



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ
ระดับชาติ (Proceedings)



18 THAILAND
TREC RENEWABLE ENERGY
FOR COMMUNITY CONFERENCE

การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

พลังชุมชนเพื่อพลังงานสะอาดและความเป็นกลางทางคาร์บอน:
นวัตกรรมเพื่อการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน

12 - 14 พฤศจิกายน 2568

ณ อุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ (Proceedings)
การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18
18th Thailand Renewable Energy for Community Conference

พิมพ์ครั้งที่ 1
สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย

ธันวาคม 2568

เรียบเรียงโดย :

ศูนย์อนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ
สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี -
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำนักงานชั้น 2 อาคารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

อีเมล : crspg@sut.ac.th
โทร : 044 224 839 , 044 224 795

จัดทำโดย :

ศูนย์อนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ
สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี -
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำนักงานชั้น 2 อาคารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

อีเมล : crspg@sut.ac.th
โทร : 044 224 839 , 044 224 795

เลขมาตรฐานสากลประจำหนังสืออิเล็กทรอนิกส์
ISBN (E-Book)

978-974-533-795-4

Sponsored by



Organized by: **SUT** | อพ.สร. - มทส.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





สิริกิติ์พระชนนี

เสด็จสู่ทิพย์พิมานศรี

พระเมตตาмаกล้นมี

ดุจแสงสุรีย์ฉายงาม

ศิลปาชีพเลื่องนาม

งานติดตามปกเกล้าป้อง

ทรงเป็นมิ่งขวัญผอง

ชาวไทยทั้งผองอาลัยครวญ

พระนาถาอ่อนทวน

น้อมดวงพระวิญญานเสด็จ

สู่สวรรคอันวิเศษ

ด้วยเดชพระคุณนิรันดร์

เทิดพระเกียรติอ่อนนบพลัน

แสนอนันต์มีมิวันลืม

ปวงข้าพระพุทธเจ้าทั้งหลาย ขอน้อมถวายความอาลัย

และรำลึกถึงพระมหากรุณาธิคุณ อันหาที่สุดมิได้

ปวงข้าพระพุทธเจ้าทั้งหลายขอถวายบังคมส่งเสด็จสู่สวรรคาลัย

สารจากประธานพิธีเปิดการจัดงาน

การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18



ข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่งในการได้รับเชิญมาเป็นประธานในพิธีเปิดการประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (Thailand Renewable Energy for Community Conferences: TREC) ซึ่งได้ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2551 สืบเนื่องมาทุกปี เป็นครั้งที่ 18 ในปีนี้ การจัดงานในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ เครือข่ายทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องใน ด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ ได้มีโอกาสมาพบเจอกันแลกเปลี่ยนความรู้ และประสบการณ์ในการทำงาน การวิจัยและการพัฒนา ความรู้ด้านต่างๆ อีกทั้งมีโอกาสนำผลงานของตนเองที่เป็นประโยชน์ ในการพัฒนาประเทศชาติมาถ่ายทอดให้ความรู้กันในเครือข่าย

ข้าพเจ้าในฐานะได้รับเกียรติมาเป็นประธานในพิธีและมีโอกาสได้ร่วมเสวนาในครั้งนี้ด้วย รู้สึกยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะได้แลกเปลี่ยนประสบการณ์ การทำงานด้านการเกษตรและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งที่เคยปฏิบัติหน้าที่ต่าง ๆ มาในด้านทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมด้านต่าง ๆ ของประเทศที่ผ่านมา อยู่ในหลายหน่วยงาน เพื่อให้ประเทศมีความมั่นคงด้านอาหาร พลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ควบคู่กับการรักษาทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมของประเทศไว้ให้คนรุ่นหลัง มีทรัพยากรที่ดีไว้ใช้อย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ในการพัฒนาคุณภาพชีวิตและเพื่อการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนา องค์ความรู้ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม และระบบพลังงานทดแทนหลายรูปแบบ ที่จะช่วยให้การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีให้เหมาะสมกับบริบทของชุมชนต่างๆและประเทศไทยเราอีกทั้งการดูแลรักษาสิ่งต่าง ๆ ที่ตั้งงานของประเทศ สนับสนุนการศึกษาค้นคว้าวิจัยที่ตอบโจทย์กับชุมชนในทุกมิติ โดยสามารถทำงานร่วมกันในภาครัฐให้สอดคล้องกับพันธกิจของ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ในโอกาสนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมวิชาการในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์แก่ทุกภาคส่วนที่จะมาเป็นเครือข่ายทำงานร่วมกันต่อไป ขอให้การจัดประชุมวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 ระหว่าง วันที่ 12-14 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 นี้เป็นไปด้วยความเรียบร้อยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ



นาย นราพัฒน์ แก้วทอง



สารจากผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

กระผมรู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้มาเป็นส่วนหนึ่งของ การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (TREC 18) ซึ่งตลอดระยะเวลา 18 ปีที่ผ่านมา ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความสำคัญของการเป็น เวทีแห่งความร่วมมือ ที่รวบรวมบุคลากรชั้นนำของประเทศ ทั้งคณาจารย์ นักวิชาการ และนักวิจัย ให้มาร่วมกันแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และขับเคลื่อนอนาคตพลังงานของชาติ การประชุมในลักษณะนี้มีคุณค่าอย่างยิ่ง เพราะเป็นจุดเริ่มต้นของนวัตกรรมและแนวทางปฏิบัติที่จับต้องได้ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนา พลังงานทดแทนที่ยั่งยืนในระดับชุมชน อย่างแท้จริง

ในฐานะผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) กระผมมีความภาคภูมิใจที่ กฟภ. เป็นส่วนสำคัญในการนานโยบายพลังงานสะอาดของประเทศไปสู่การปฏิบัติให้เกิดขึ้นจริง เราไม่ได้เป็นเพียงผู้จัดส่งพลังงาน แต่เราคือ **"ผู้พัฒนานวัตกรรมพลังงานเพื่อคุณภาพชีวิต"** ของคนไทยทุกคน

กฟภ. กำลังเดินหน้าอย่างเต็มกำลังในการปฏิรูปโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศให้ก้าวสู่ยุคดิจิทัล ผ่านการพัฒนา **โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid)** โดยมีโครงการนำร่องที่ประสบความสำเร็จในหลายพื้นที่ ซึ่งเทคโนโลยีนี้เปรียบเสมือนการติดสมองให้กับระบบไฟฟ้า ทาให้สามารถบริหารจัดการการจ่ายไฟได้อย่างแม่นยำ รองรับการเชื่อมต่อพลังงานสะอาดจากภาคประชาชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในภาพรวม นอกจากนี้ เรายังมุ่งมั่นสร้างความเท่าเทียมในการเข้าถึงพลังงานผ่านโครงการ ระบบไฟฟ้าแบบพึ่งพาตนเอง (**Microgrid**) ในพื้นที่ห่างไกล เช่น เกาะพลวย และ จังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งไม่เพียงช่วยให้ชุมชนมีไฟฟ้าใช้อย่างมั่นคง แต่ยังเป็นการสร้าง **ต้นแบบความมั่นคงทางพลังงานระดับฐานราก** และสนับสนุนเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ในการบรรยายพิเศษหัวข้อ **"Smart and Micro Grid"** กระผมตั้งใจจะแบ่งปันวิสัยทัศน์และประสบการณ์ของ กฟภ. เพื่อจุดประกายให้เห็นว่าเทคโนโลยีเหล่านี้คือเครื่องมือสำคัญที่จะช่วยให้เราสามารถสร้างสรรค์ระบบนิเวศพลังงานที่ **สะอาด ยืดหยุ่น และเป็นธรรม** สำหรับทุกคน

กระผมขออวยพรให้การประชุมวิชาการครั้งนี้บรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้และเครือข่ายที่เกิดขึ้นจากงานนี้ จะเป็นแรงผลักดันให้ทุกท่านร่วมกันสร้างสรรค์นวัตกรรม **"พลังงานเพื่อชุมชน"** และนำพาประเทศไทยไปสู่ความมั่นคงทางพลังงานอย่างยั่งยืนต่อไป



ดร.มงคล ตริกิจจานนท์
ผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

35th SUT¹ ANNIVERSARY

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยแห่งนวัตกรรมและความยั่งยืน

สารจากอธิการบดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ในนามของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขอต้อนรับทุกท่านเข้าร่วมงานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (TREC-18) ซึ่งเป็นการจัดการประชุมวิชาการระดับชาติประจำปี 2568 ในระหว่างวันที่ 12 – 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2568 ภายใต้ชื่องาน “พลังชุมชนเพื่อพลังงานสะอาดและความเป็นกลางทางคาร์บอน” โดยความร่วมมือระหว่าง สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 ความร่วมมือดังกล่าวนับเป็นการสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นยุทธศาสตร์สำคัญในการขับเคลื่อนพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศให้มีความมั่นคงและยั่งยืน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จึงขอเชิญชวนคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และผู้ที่มีความสนใจด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม เข้าร่วมการประชุมวิชาการในครั้งนี้ เพื่อร่วมกันสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ แลกเปลี่ยนความรู้ซึ่งกันและกัน อันจะเป็นการสร้างเครือข่ายทางการศึกษาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมที่เข้มแข็งในอนาคต

การจัดประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (TREC-18) นี้ ได้รับการสนับสนุนจาก หน่วยงานราชการ หน่วยงานเอกชน และหน่วยงานการศึกษาทั้งในและต่างประเทศ ในการสนับสนุนบุคลากรในสังกัดเข้าร่วมเผยแพร่ผลงานวิจัย ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์และให้ความร่วมมือในการจัดงานประชุมครั้งนี้ขึ้นจนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ ในฐานะเจ้าภาพร่วมในการจัดงานประชุม ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ คณาจารย์ นักวิจัย และผู้เข้าร่วมงานทุกท่านจากทุกหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนการจัดประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (TREC-18) ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้เข้าร่วมการประชุมทุกท่านจะได้รับประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

พรศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล
รักษาการอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



สารจากอธิการบดี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



ในนามของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ขอต้อนรับทุกท่านเข้าสู่การประชุมวิชาการ “การขับเคลื่อนพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (TREC-18)” ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 12-14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2568 ภายใต้แนวคิด “พลังงานสะอาด พลังแห่งการพัฒนาชุมชนอย่างยั่งยืน” โดยมีเครือข่ายความร่วมมือระหว่างสถาบันพลังงานทางเลือกแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นเจ้าภาพร่วมในการจัดงานครั้งนี้

มหาวิทยาลัยมหาสารคามในฐานะ “มหาวิทยาลัยแห่งการรับใช้สังคม” มีความภาคภูมิใจที่ได้เป็นส่วนหนึ่งในการขับเคลื่อนองค์ความรู้ด้านพลังงานทดแทนและนวัตกรรมเพื่อชุมชน สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะด้านพลังงานสะอาด (Affordable and Clean Energy) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างสมดุล การประชุมวิชาการ TREC-18 ครั้งนี้ นับเป็นเวทีสำคัญในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และประสบการณ์ระหว่างนักวิชาการ นักวิจัย นักศึกษา หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และชุมชนในท้องถิ่น ที่จะมาร่วมกันสร้างสรรค์แนวทางการใช้พลังงานทางเลือกอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หวังเป็นอย่างยิ่งว่า การประชุมในครั้งนี้จะเป็นแรงบันดาลใจให้เกิดความร่วมมือใหม่ๆ และขยายผลการพัฒนาไปสู่การใช้พลังงานสะอาดที่สร้างคุณค่าให้กับสังคมไทย ขอขอบคุณทุกภาคส่วนที่มีส่วนร่วมในการจัดประชุมวิชาการในครั้งนี้ และขออวยพรให้การประชุม “การขับเคลื่อนพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (TREC-18)” ประสบความสำเร็จอย่างสูงสุด นำมาซึ่งองค์ความรู้และเครือข่ายความร่วมมือที่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติในระยะยาว

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ ศรีวิไล
อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



สารจากผู้อำนวยการอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2



ในนามของ อุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 รู้สึกเป็นเกียรติและยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้มีโอกาสต้อนรับทุกท่านเข้าร่วมงาน การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (TREC 18) ในครั้งนี้ การประชุมภายใต้หัวข้อ “พลังงานสะอาด และความเป็นกลางทางคาร์บอน: นวัตกรรมเพื่อการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน” ถือเป็นประเด็นที่อยู่ในความสนใจและเป็นภารกิจสำคัญของอุทยานฯ ในฐานะกลไกหลักของภูมิภาคในการขับเคลื่อนงานวิจัย นวัตกรรม และเทคโนโลยีไปสู่

การใช้ประโยชน์จริงในภาคอุตสาหกรรมและชุมชน

อุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 มุ่งเน้นการเป็นศูนย์กลางในการบ่มเพาะและพัฒนาผู้ประกอบการด้านเทคโนโลยี โดยสาขาพลังงานสะอาดและเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ก็เป็นหนึ่งในหลายสาขาที่อยู่ในความรับผิดชอบของอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาคฯ การได้เป็นเจ้าภาพร่วมในงาน TREC 18 นี้ จึงเป็นโอกาสสำคัญที่จะเชื่อมโยงผลงานวิชาการของนักวิจัยทั่วประเทศเข้ากับโจทย์ความต้องการของชุมชนและภาคธุรกิจในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อสร้างความเข้มแข็งและยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนอย่างยั่งยืน

ในนามของ อุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 หวังเป็นอย่างยิ่งว่า การประชุมตลอดระยะเวลา 12 - 14 พฤศจิกายน 2568 ณ สถานที่แห่งนี้ จะเต็มไปด้วยการแลกเปลี่ยนความรู้ที่เป็นประโยชน์ การสร้างเครือข่ายที่เข้มแข็ง และนำมาซึ่งความร่วมมือใหม่ ๆ ที่จะก่อให้เกิดนวัตกรรมพลังงานอันเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นฟันเฟืองสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศสู่เป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนต่อไป ขออำนาจพรให้การจัดงานสำเร็จลุล่วงด้วยดีตามวัตถุประสงค์ทุกประการ และขอให้ทุกท่านประสบความสำเร็จและได้รับความรู้จากการประชุมอย่างเต็มที่



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชาวล
ผู้อำนวยการอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2

สารจากประธานที่ปรึกษาสมาคม พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย



งานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (Thailand Renewable Energy for Community Conferences: TREC) ได้ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2551 สืบเนื่องมาทุกปีจนมาถึงปัจจุบัน เป็นครั้งที่ 18 แล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีให้คณาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้อง ในส่วนที่เกี่ยวข้อง ทางด้านวิศวกรรม พลังงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชนในแต่ละหน่วยงานทั้งภาครัฐ และเอกชนและประชาชนทั่วไป ได้มีโอกาสมาพบเจอกันและนำ ผลงานของตนเอง มานำเสนอเพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนองค์

ความรู้สร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านวิชาการและวิจัยระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ รวมถึง สถาบันการศึกษา อันจะเป็นการส่งเสริมและพัฒนาให้เกิดการพัฒนา ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพสอดคล้อง กับความต้องการของสังคมและประเทศอย่างต่อเนื่อง การจัดงานนี้เป็นการเน้นสร้างความร่วมมือใน รูปแบบสหวิทยาการและการสร้างนวัตกรรมสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืนทุกมิติ โดยจะก่อให้เกิดมุมมองหรือ แนวทางที่จะทำให้ ความรู้ด้านวิศวกรรมพลังงานด้านต่าง ๆ และสิ่งแวดล้อม สามารถขับเคลื่อน ตาม นโยบายความยั่งยืนขององค์กรของประเทศไทยต่อไปอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศตาม ยุทธศาสตร์ชาติและตามนโยบายของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดภาวะโลกร้อน ในครั้งนี้ ทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ร่วมกับสมาคมฯ ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพร่วมกันในการจัดงาน ร่วมงานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 นี้ระหว่าง วันที่ 12-14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2568

ข้าพเจ้าในนามประธานที่ปรึกษาสมาคมฯ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมวิชาการในครั้งนี้จะเป็น ประโยชน์แก่ทุกท่านที่เข้าร่วมประชุมและขอแสดงความขอบคุณทุกฝ่ายทุกองค์กรที่มีส่วนร่วมในการ ผลักดันและทำงานร่วมกันทำงานให้งานประชุมวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้



รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โรยนิรินทร์
ประธานที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

สารจากนายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน



ในนามของ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน (TRECA) ผมขอแสดงความยินดีและต้อนรับทุกท่านเข้าสู่ การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 (Thailand Renewable Energy For Community Conference : TREC 18) อย่างอบอุ่นยิ่ง

การประชุมครั้งที่ 18 นี้ จัดขึ้นภายใต้แนวคิดหลักที่สอดคล้องกับทิศทางโลกและประเทศไทย คือ “พลังงานสะอาด และความเป็นกลางทางคาร์บอน: นวัตกรรมเพื่อการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน” ซึ่งถือเป็นประเด็นที่มีความสำคัญ

เร่งด่วนและเป็นความท้าทายที่ต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกภาคส่วน

ตลอดระยะเวลาของการประชุมระหว่างวันที่ 12 – 14 พฤศจิกายน 2568 ณ อุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เราจะได้ร่วมแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ และนำเสนอผลงานวิชาการที่มีคุณค่าใน 6 หัวข้อสำคัญ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่เทคโนโลยีพลังงานสำหรับชุมชน บทบาทของชุมชนในการเปลี่ยนผ่านพลังงานสะอาด ไปจนถึงนวัตกรรมการจัดการเพื่อความเป็นกลางทางคาร์บอน

ผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การประชุมครั้งนี้จะเป็นเวทีสำคัญในการ สร้างเครือข่ายความร่วมมือ จุดประกาย ความคิดสร้างสรรค์ และนำไปสู่การ ต่อยอดงานวิจัยและนวัตกรรม ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม เพื่อขับเคลื่อนประเทศไทยไปสู่เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนและเศรษฐกิจที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 และทุกภาคีเครือข่าย ตลอดจนผู้สนับสนุนทุก ๆ ท่านที่ได้ร่วมสนับสนุนการจัดงานอย่างเข้มแข็ง ขออำนวยการให้ทุกท่านได้รับประโยชน์สูงสุดจากการประชุม และประสบแต่ความสุขความเจริญตลอดการเข้าร่วมงาน



รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ
นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

คณะกรรมการที่ปรึกษา สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

1. ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	ที่ปรึกษาากิตติมศักดิ์
2. ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ที่ปรึกษาากิตติมศักดิ์
3. ศาสตราจารย์ ดร.พีระพงศ์ ทิฆมสกุล	ที่ปรึกษาากิตติมศักดิ์
4. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	ที่ปรึกษาากิตติมศักดิ์
5. ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	ที่ปรึกษาากิตติมศักดิ์
6. รองศาสตราจารย์ ดร. วิรัชย์ โธมณินทร	ประธานที่ปรึกษา
7. พลอากาศโท เอกราช ชาดิชัย	ที่ปรึกษา
8. ดร.มนตรี ชาลีเครือ	ที่ปรึกษา
9. รองศาสตราจารย์ ดร. บุญเรือง มะรังศรี	ที่ปรึกษา
10. ดร.สาคร สร้อยสังวาลย์	ที่ปรึกษา
11. ดร.วิชัย เพ็ชรทองคำ	ที่ปรึกษา
12. ดร.อำพล อาภาธนากร	ที่ปรึกษา
13. รองศาสตราจารย์ ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร	ที่ปรึกษา

คณะกรรมการ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

1. รองศาสตราจารย์ ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	นายกสมาคม
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ศรีประภาคาร	อุปนายก
3. รองศาสตราจารย์ ดร. วิรัชย์ โธมณินทร	กรรมการ
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรพงศ์	กรรมการและปฏิคม
5. ดร.กฤษมาพร พึ่งโพธิ์	กรรมการและเลขานุการ
6. นางสาวธัญญลักษณ์ ชิดโคกรวด	เหรัญญิกและประชาสัมพันธ์
7. รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล	นายทะเบียน

คณะกรรมการพิจารณาบทความ

1. ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	ที่ปรึกษา
2. ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ที่ปรึกษา
3. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	ที่ปรึกษา
4. ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	ที่ปรึกษา
5. ศาสตราจารย์ ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล	ที่ปรึกษา
6. ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ	ที่ปรึกษา
7. รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โยชนรินทร์	ที่ปรึกษา
8. ดร.อำพล อาภาธนากร	ที่ปรึกษา
9. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี	ประธานคณะกรรมการ
10. รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ	รองประธานคณะกรรมการ
11. ศาสตราจารย์ ดร.ฤกษ์ชัย ภูมิภักดีพิชญ์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
12. รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนโชติ เทียนมงคล	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
13. รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
14. รองศาสตราจารย์ ดร.จงลักษณ์ พาหะชา	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยพะเยา
15. รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
16. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
17. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
18. รองศาสตราจารย์ ดร.เทพ เกื้อทวีกุล	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
19. รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
20. รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
21. รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยแม่โจ้
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคิน มณีโชติ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย สะทะโชติ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิม พระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระวุฒิ อรุณวรรณะ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรเมษฐ์ จันทร์เพ็ง	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัสหิยะ สนิโซ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ สีขำนาญ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิ์ชาติ อากกล้า	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระวุฒิ อรุณวรรณนะ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ พลวงษ์ศรี	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยแม่โจ้
32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณีนันท์ วงษ์ขี้ม	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
33. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ณัฐกิตติ์ แสนทอง	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย สาวิลีทธิ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรกร ปิ่นธรัตน์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรณณัติ บริบูรณ์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพงษ์ บุญรักษา	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ ศาลายา
38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองยศ เกตุรักษา	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ ศาลายา
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยา สมสัย	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สักรินทร์ แซ่ภู่	อนุกรรมการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กริธา สุขทั้ง	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตนนทบุรี
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาติกา เตมีประเสริฐกิจ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ ศาลายา
43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิตติศักดิ์ ถึงสุข	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ ศาลายา
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุกิตติ์ พิบูลนฤดม	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัติ คลังสีดา	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวรินทร์ นวลศรี	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรหมพัทธ์ บุญรักษา	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
48. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุพธนา คงจีน	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา
49. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารักษ์ บุญมาตย์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
50. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประหยัด กองสุข	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
51. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ประทุมทรัพย์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
52. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ สอนสารี	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
53. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
54. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงชาติ เกิดผล	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
55. ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา	อนุกรรมการศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ
56. อาจารย์ ดร.นิติศักดิ์ ปาสาจะ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
57. อาจารย์ ดร.นราวิทย์ ดาวเรือง	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
58. อาจารย์ ดร.ประจวบ พิระพงศ์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
59. อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
60. อาจารย์ ดร.ณัฐอาภา สัจจวาที	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
61. อาจารย์ ดร.ศรินทร์ย์ อุดชาชน	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
62. อาจารย์ ดร.สมโภช ทองน้ำเที่ยง	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
63. อาจารย์ ดร.นราวิทย์ ดาวเรือง	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
64. อาจารย์ ดร.ทศพร สุรินทร์แก้ว	อนุกรรมการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
65. อาจารย์ ดร.ดุสิต อุทิศสุนทร	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
66. อาจารย์ ดร.ปัญญาพล เกตราพูนสินไชย	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยรังสิต
67. อาจารย์ ดร.ศรัณย์ นัตรธัญญกิจ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ นนทบุรี

68. อาจารย์ ดร.ชนิษฐา วรรณคำ	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ นนทบุรี
69. อาจารย์ ดร.ชัยพิชิต คำพิมพ์	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ ศาลายา
70. อาจารย์ ยุทธนา อุไรชื่น	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
71. อาจารย์ ศิริลักษณ์ ไกยวินิจ	อนุกรรมการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
72. อาจารย์ กมลวรรณ รัชตเวชกุล	อนุกรรมการมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กำหนดการนำเสนอบทความ

วันพุธที่ 12 พฤศจิกายน 2568

ช่วงที่ 1 เวลา 13:00 – 14:30 น.

ณ อาคารอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาค

ตะวันออกเฉียงเหนือ 2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ. เมือง จ. นครราชสีมา



ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B407
หัวข้อบทความ	เทคโนโลยีพลังงานสำหรับชุมชน: จากทฤษฎีสู่การปฏิบัติ
Session Chair	ผศ.ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผศ.ดร.บรรณณัฐ บริบูรณ์ คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
13:00 – 14:30 น.	ออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดไส้ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติระบบออฟกริด <i>ณัฐศาสตร์ สาแข, เพชรพิษณุ จิระเดชประไพ, เทพ เกื้อทวีกุล, และ ภาคิน มณีโชติ</i>
	การพัฒนาชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อหันกลับตำแหน่งทิศตะวันออกสำหรับเข้าวันใหม่ <i>ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กฤษณนัท สอนจันทร์, พิรญาณ์ ยอดแก้ว, จิตติมาพร เผือกยิ้ม และ นิรมล บุญเชิด</i>
	การเปรียบเทียบผลการผลิตไฟฟ้าระยะสั้นกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst โครงการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 500 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ <i>สุวินันท์ จันทอุไร และ พลากร พรหมเมศรี</i>
	การทดสอบระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าในการควบคุมการไหลอัตโนมัติสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาก <i>ยุทธนา ทองอินทราช, พลากร พรหมเมศรี, ปรุฬห์ มะยะเฉี่ยว, และ ชลธิศา รัตนชู</i>
	การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีศึกษา : เกษตรกรผู้ปลูกยางพาราเขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวด อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ <i>ณัฐวุฒิ พจน์ปริญญา และ ดุสิต อุทิศสุนทร</i>
	การออกแบบระบบตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร <i>ธีระพงษ์ บุญรักษา, ภัทรพล ภู้อยอดยิ่ง, ธีรวัฒน์ ป้องกัน, เศรษฐวัฒน์ หนูขาว, วรสิทธิ์ แยมวงษา, พรหมพัทธ์ บุญรักษา, อนุสรณ์ ผ่องประภา เกศรา พลไชย และ บุญเรือง มะรังศรี</i>
14:30-13.45 น.	Coffee break

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B405
หัวข้อบทความ	การวิจัยและพัฒนาพลังงานสะอาดเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน
Session Chair	รศ.ดร.เทพ เกื้อทวีกุล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ กำแพงเพชร อาจารย์ ดร.รุ่งเพชร ก่องนอก คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
13:00 – 14:30 น.	การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อแนวทางการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจาก มูลแพะใช้งานเป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำ <i>ชินวร ศุภวงศ์ และ ชานนท์ บุญมีพิพิธ</i>
	ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ <i>กฤษณะ นุ่มเตื้อ, ภูริพัฒน์ สุวรรณโณ, ธรรมปิติ เมืองชัย, อัษฎางค์ บุญศรี, วรุฒิ บุตรดี, และ อิทธิพล เหลาพรหม</i>
	ผลการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและระยะคืนทุนของเครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับครอบครัวขนาดเล็ก <i>ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด, อนุพล อัครพิน, ประภาศิริ ใจผ่อง, และ วีระบุลย์กิตติ ชุมพร ผ่อง</i>
	ระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน <i>ณัฐพล ไวยุวัตร, ชนชน การะภักดี, อัษฎางค์ บุญศรี, จารุกิตติ พิบูลนฤดม, อานนท์ วงษ์มณี, และ อนัน หยวกวัด</i>
	การศึกษาผลกระทบด้านพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ใน ประเทศไทย <i>อดิสร พลเสนา, ทรงยศ มาลีวงศ์, เด่น คอกพิมาย, มนตรี ชาลีเคลือ, พิษณุ บุญ รัตน์, สมพล โคศรี, และ รุ่งเพชร ก่องนอก</i>
	เครื่องนวดข้าวขนาดเล็กโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง ไร้แปรงถ่านพลังงาน แสงอาทิตย์ <i>ตรีภพ ยอดโยม, อนุรักษ สมวรรณ, ภาคิม มณีโชติ, และ เทพ เกื้อทวีกุล</i>
14:30-14.45 น.	Coffee break

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B404
หัวข้อบทความ	นวัตกรรมพลังงานเพื่อความยั่งยืนของ ทรัพยากรธรรมชาติ
Session Chair	รศ.ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อาจารย์ เกศรา พลไชย คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
13:00 – 14:30 น.	การพัฒนานวัตกรรมเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เกษตรกรรม กรณีศึกษา พื้นที่ระบบจ่ายน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตำบลหัวเมือง อำเภอ สอง จังหวัดแพร่ <i>พิเชฐ ลือไธสง, กันต์ อินทวงศ์, กาญจนา ดาวเด่น, และ อภิศักดิ์ พรหมฝ่าย</i> การพัฒนาต้นแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลง ปลูกพืชแถวตรงที่ถูกควบคุมจากระยะไกลโดยใช้คลื่นวิทยุ <i>ยุทธพงษ์ ตาระป็น, นิกราน หอมดวง, กิตติกร สาสุจิตต์, และ สุระพล ริยะนา</i> การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ศักยภาพ พลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย <i>วัชรพงศ์ ศรีแสง, พรวิวัฒน์ นารีกุลภัทรวงศ์, ปรีชา ศรีประภาคาร, และ ยุทธนา อุไรชื่น</i> การอบแห้งพริกจินดาแดงโดยใช้ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ผสมผสานกับแหล่งความร้อนเสริมจากก๊าซหุงต้ม <i>Xai HER, สุระพล ริยะนา, นิกราน หอมดวง, และ กิตติกร สาสุจิตต์</i> การศึกษาแนวทางการพัฒนาศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนหลังคาในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย <i>พิพัฒน์ กรณีกา, จรัญ คนแรง, ธนพล แสงสุวรรณ, และ วิภาพ ใจแข็ง</i> การพัฒนารถกอล์ฟพลังงานแสงอาทิตย์สวนพลังงานมหาวิทยาลัยราชภัฏ กำแพงเพชร <i>เกียรติศักดิ์ สุขสำราญ, สิริยากร สีสมัญ, พรพิมล พลอาจ, พรรณทิพา ประสาท แก้ว, นีวดี คลังสีดา, เทพ เกื้อทวีกุล, รุ่งโรจน์ สงวนวัฒนา, ภาคิณ มณีโชติ</i>
14:30-14.45 น.	Coffee break

กำหนดการนำเสนอบทความ

วันพุธที่ 12 พฤศจิกายน 2568

ช่วงที่ 2 เวลา 14:45 – 16:30 น.

ณ อาคารอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาค

ตะวันออกเฉียงเหนือ 2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ. เมือง จ. นครราชสีมา



ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B407
หัวข้อบทความ	เทคโนโลยีพลังงานสำหรับชุมชน:จากทฤษฎีสู่การปฏิบัติ
Session Chair	ผศ.ดร.สุรัชย์ ณัฐ จันทรศรี วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
14:45 – 16:30 น.	อิทธิพลของจำนวนปลากุเลาต่อคุณภาพและการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสำหรับการทำปลากุเลาเค็มด้วยตู้อกความชื้นพลังงานไฟฟ้า สามารถ ยอดเสาร์, พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์, วีรพล ทองคุปต์, มุฮัมมัดรอซดี มุดอ, และ นิโอะ ปูซู การควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์สำหรับชุมชนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ นงนุช ศรีเล็ก, อนุพงษ์ สมพฤกษ์, มิ่งขวัญ สมพฤกษ์, วิลาสินี ศรีสุวรรณ, ธนพล แสงสุวรรณ, ชัชชัย วรพัฒน์, วิภาพ ใจแข็ง, จริญญา คนแรง, ปรีศักดิ์ งามสมภาค, กมลชนก สว่างศิลป์, กิตติภาพ เพ็ชรเม็ด, สิทธิกฤต เหล็กพูล, นเรศ ใหญ่วงศ์, และ ปราณต์ เมฆอากาศ การผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน วิทยา ชูเนตร, อลิสา ธรรมฤทธิ์, จริญญา ภาคพรหม, พิลิษฐ์ จันแปงเงิน, ชาญชัย ทองโสภ, นุชนาฏ สันทาลุนัย, ลำราญ สันทาลุนัย และ ลำเรียง สันทาลุนัย การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิภายนอกของกล่องเลี้ยงผึ้งรังด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วรรณ พลพันธ์, ศุภวิชญ์ อดิศักดิ์ดา, เจริญศักดิ์ เขียวเล่ง, ศุภเชษฐ เป้าวิวัฒน์ การสร้างแบบจำลองพลวัตเพื่อประเมินการใช้พลังงานและสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับวัฏจักรการขับที่แตกต่างกัน แสงเพชร งามชัยภูมิ, บรรณณัติ บริบูรณ์, ไพบุลย์ บุปผา, นพรัตน์ ธรรมวงษา, สราวุฒิ แสงศาลา, และ ณัฐกิตติ์ แสนทอง การพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน ชาธิ์ จำว้าง, ยูวารี เวาะและ, ลุดฟี ลีโอนี, อีลิทียะ สนิโซ, วาริชา วาแม, และ มุฮัมมัดคอยรี หะยีปากา การระบุตำแหน่งและขนาดสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะของเทศบาลนครอุดรธานี โดยอ้างอิงจากการพยากรณ์ความต้องการ สุนทร สุทธิปาก, ชญานนท์ แสงมณี, อธิกา จันทนปุม, กมลรัตน์ ดีสภา, บรรณณัติ บริบูรณ์, และ สราวุฒิ แสงศาลา

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B405
หัวข้อบทความ	การวิจัยและพัฒนาพลังงานสะอาดเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน
Session Chair	ผศ.ดร.พรหมพักตร์ บุญรักษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อาจารย์ ดร.ดุสิต อุทิศสุนทร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
14:45 – 16:30 น.	Clean Electricity Generation of Rice Husk and Wood Residues Power Plants in Thailand in LCOE Strategies and Pathways to Net Zero Emissions <i>Prachuab Peerapong, Kedsara Palachai, Sonthaya Khamdech, Patchara Wongtong, Terapong Boonraksa and Promphak Boonraksa</i> การเปรียบเทียบต้นทุนค่าไฟฟ้ารายเดือนก่อนและหลังการใช้งานระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา <i>ธวัชวัฒน์ มิสรา และ ศุภเชษฐ เป้าวิวัฒน์</i> เครื่องควมปรักอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์ <i>ชาตรีษฐ์ อินทร์โพธิ์, พีรภัทร์ สุภาไทย์, จารุกิตติ์ พิบูลนฤดม, ภาคิณ มณีโชติ, อนัน หยวักวัด, ปรีชาภรณ์ ชันบุรี และ เทพ เกื้อทวีกุล</i> ผลกระทบของการให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อมในการผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ <i>นิกราน หอมดวง, ประภัสสร รัตนะไพบูลย์, พนธกร เหลี่ยมเคลือบ, สุภกิจ ชัยเมืองเลน, ถิรวัฒน์ วงษาเทียม, ขจรเกียรติ กันทะหล้า, สุระพล ริยะนา, และ กิตติกร สาสุจิตต์</i> เครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ <i>พิระพัคส์ การะภักดี, พิชัย หอมจันทร์, อัษฎางค์ บุญศรี, วรวิมล บุตรดี, และ อธิธิผล เหลาพรม</i>

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B404
หัวข้อบทความ	นวัตกรรมพลังงานเพื่อความยั่งยืนของทรัพยากรธรรมชาติ
Session Chair	ผศ.ดร.ศธา วาทกิจ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ ดร.ธนวรรณ วัชรดำรงศักดิ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
14:45 – 16:30 น.	การพัฒนากระบวนการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด พิพัฒน์ วงศ์จักร, จรรย์ คนแรง, ธนพล แสงสุวรรณ, ชูชาติ ม่วงโกล้าย และ วิภาพ ใจแข็ง การใช้ประโยชน์เชิงมูลค่าอย่างยั่งยืนจากก้อนเชื้อเห็ดใช้แล้ว: ความเป็นไปได้ในการผลิตเม็ดเชื้อเห็ดเลี้ยงชีวภาพ ปวิพัทธิ์ ถนอมพงษ์ชาติ, ศิวัตม์ กมลคุณานนท์, ลลิตา เพชรใจหาญ, และ ภคมน ปินตานา การอบกระจุบด้วยตู้อบแห้งพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล ปนิพันธ์ สีสุวรรณ, พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์, และ นิโอะ ปูชู การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพเพื่อเพิ่มผลผลิตและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากกากหมาก ลลิตา เพชรใจหาญ, ธเนศ ไชยชนะ, กิตติกร สาสุจิตต์, และ ภคมน ปินตานา การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร : กรณีศึกษาการปลูกกระเจี๊ยบแดง รุ่งเพชร ก่องนอก, ศศิวิมล ทรงไทร, พิระวุฒิ ชินวรรังสี, สิริมงคล สังฆะวงศ์, สุพจน์ โสดารัตน์, นพดล นันทวงศ์, เกรียงไกร โมสลียานนท์ และ กอบศักดิ์ ศรีประภา การพัฒนากระบวนการตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ IoT ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กฤษณนัท สวนจันทร์, พิรญาณ์ ยอดแก้ว, จิตติมาพร เผือกยิ้ม และ นิรมล บุญเชิด

กำหนดการนำเสนอบทความ

วันพฤหัสบดีที่ 13 พฤศจิกายน 2568

ช่วงที่ 1 เวลา 13:00 – 14:30 น.

ณ อาคารอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาค

ตะวันออกเฉียงเหนือ 2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ. เมือง จ. นครราชสีมา



ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B407
หัวข้อบทความ	นวัตกรรมการจัดการเมืองอัจฉริยะ สู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน
Session Chair	ผศ.ดร.มณีนรัตน์ วงษ์ขี้ม ผู้จัดการศูนย์ธุรกิจนวัตกรรมและห้องทดลองแห่งอนาคต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผศ.ดร.ชานนท์ บุญมีพิพิธ วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน รัตนโกสินทร์ มทร. รัตนโกสินทร์
13:00 – 14:30 น.	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนเพาะเห็ดหอม หมู่บ้านปางมะโอ ตำบลวังเงิน อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง <i>อดิศร ถมยา, นิวัติ กิจไพศาลสกุล, สมพร ตีบขัต, ดอนสัน ปงผาบ, ภูวสิทธิ์ ตุ่น แก้ว, วศินวิโรตม์ เนติศักดิ์ และ สกล จิโนสวัสดิ์</i> ระบบ Edge-AI สำหรับตรวจจับหมวกนิรภัยและแจ้งเตือนผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ แบบเรียลไทม์ <i>ศักดิ์ชัย ศรีมากรณ์, วีรชัย สว่างทุกข์, ประสงค์ หน่อแก้ว, ศุภวุฒิ ผากา, ธนวรรก ฤต โอฬารธนพร, ไพจิตร สุขสมบูรณ์, อนุกิจ เสาร์แก้ว และ โอฬาร เขียวชาญ</i> การพัฒนาแบบจำลองการทำนายสถานะประจุของแบตเตอรี่สำหรับ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นและการถดถอยแบบเวกเตอร์ สนับสนุน <i>วรรณฤทธิ์ ทวีชาติ และ บุษบง โสมัสสา</i> การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์ ใน การศึกษาด้านแบบการผลิตระบบไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนผสมผสานขนาด 150 kW กรณีศึกษาเกาะเต่า จ.สุราษฎร์ธานี <i>สันติ พลอยพรหม, วีรชัย ไรยนรินทร์, สิริศักดิ์ ปางวุฒิวิณัย, วรเชษฐ์ แสงสีดา, ไววิทย์ อุทัยเฉลิม, ธนยศ คิตเมตตากุล, และ สุเทพ สีมาลา</i>
14:30-14.45 น.	Coffee break

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B405
หัวข้อบทความ	นโยบายและกฎหมายส่งเสริมพลังงานสะอาดและความเป็นกลางทางคาร์บอน
Session Chair	ผศ.ดร.นิกราน หอมดวง วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อาจารย์ ยุทธนา อุไรชื่น คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
13:00 – 14:30 น.	กรณีศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบโซลาร์บนหลังคา เปรียบเทียบผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจริงกับการทำนายผลเพื่อนำไปสู่คาร์บอนเครดิต <i>บงกช ประสิทธิ์, วิภาณต์ วันสูงเนิน และ สุรนาท แซ่ย่าง</i>
	การศึกษาสภาพปัญหาและแนวทางการปรับตัวของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานคร เพื่อเตรียมความพร้อมต่อการประเมิน Carbon Footprint <i>เอกวุฒิ เรืองสง, ธนธร ทองสัมฤทธิ์, และ นิตศน์ ทิพย์โสตนัยนา</i>
	อิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาไฟโรไลซิสต่อคุณสมบัติถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ <i>ประภัสสร รัตนไพบูลย์, กิตติกร สาสุจิตต์, พัทธี อินธนู, Ramehprabu Ramaraj และ นิกราน หอมดวง</i>
	กระบวนการไฟโรไลซิสสำหรับการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง <i>ฉันทวัช เจริญสุข, สุระพล รียะนา, นิกราน หอมดวง, เตชัส พรหมตา, และ กิตติกร สาสุจิตต์</i>
	การประเมินมาตรการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก กรณีศึกษาเทศบาลเมืองลาดสวาย <i>ศุภวิชญ์ ขำเดช และ วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์</i>
14:30-13.45 น.	Coffee break

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B404
หัวข้อบทความ	การวิจัยและพัฒนาพลังงานสะอาดเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน
Session Chair	ผศ.ดร.ธีระพงษ์ บุญรักษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลายา นครปฐม อาจารย์ ดร.ไพฑูรย์ เหล่าดี วิทยาลัยเทคนิคสยาม
13:00 – 14:30 น.	การวิเคราะห์ศักยภาพและความเป็นไปได้ทางการเงินในการพัฒนาอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ด้วยระบบไมโครกริดจากเซลล์แสงอาทิตย์ <i>ชัชพล ต้นตำว, จรรย์ คนแรง, ธนพล แสงสุวรรณ และ วิภาพ ใจแข็ง</i>
	แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและการตรวจสอบเชิงฮาร์ดแวร์ <i>ทัด ธนาภิจ, ณัฐพนธ์ หาดอ้าน, อมรเทพ แม่นสุข, กมลภัสสร มั่นศิลป์, วัชรกร ปิ่นธรัตน์ และ บุญเรือง มะรังศรี</i>
	แบบจำลองและจำลองสถานการณ์ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ <i>ธนยศ คิตเมตตากุล และ บุญยัง ปลั่งกลาง</i>
	การผลิตไฟฟ้าจากเฮอร์มิโออิเล็กทรอนิกส์โดยใช้พลังงานความเย็นเหลือทิ้งจากไนโตรเจนเหลว <i>กายสิทธิ์ แหล่งขอบกฤษณ์, และ เจริญพร เลิศสถิตธนกร</i>
	การทดสอบและการจำลองเชิงพลศาสตร์ของไหลของการระบายความร้อนแพ็กแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยการไหลของอากาศแบบตกกระทบ <i>สัญญาชัย รำเพยพัฑ, อภิเดช บุญเจือ, ภาณุศักดิ์ มูลศรี, สาธิต ทูลไธสง, วริศราภรณ์ จรโคกรวด, วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ, ศรันย์ คัมภีร์ภัทร, ไมตรี ธรรมมา และ ธนดน สอนไผ่</i>
	การพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้น เรื่องการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในจังหวัดพิษณุโลก <i>วีระบุลย์กิตติ ชุมพรผ่อง, ชัชวินทร์ นวลศรี, ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด, และ สมิทธิ์ธัตถ์ แก้วมาคุณ</i>
14:30-14.45 น.	Coffee break

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B408
หัวข้อบทความ	Asia Renewable Energy for Community Conference
Session Chair	ผศ.ดร.สุระพล รียะนา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ผศ.ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
13:00 – 14:30 น.	Invited Speaker for International Session Mr.Jason Kim Director of Renewable Energy Seoltech Ltd. South Korea Optimization of Calcium Hydroxide Pretreatment Conditions and Bioethanol Production from Sugarcane Bagasse <i>Techut Promta, Surapon Riyana, Nigran Homdoun, and Kittikorn Sasujit</i> Development of A Solar-Powered Mower for Row Crop Cultivations based on Differential Steering Systems and Radio Frequency Remote Controls in conjunction with ESP32-CAM <i>Yuthapong Tarapin, Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit, Surapon Riyana</i> Production of Biomass Pellets and Biochar from Rubber Seed Cake <i>Piyapat Limprechachat, Kiatkamjon Intani, Ratiya Thuwapanichayanan, Donludee Jaisut, Shinji Kanehashi and Supakit Sayasoonthorn</i> Development of Remote-Control Solar Weed Removal Machine Using the Internet of Things in Conjunction with ESP-NOW and YOLOv11 <i>Yuthapong Tarapin, Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit, Surapon Riyana</i> Multi-Agent Soft Actor-Critic Based Peer to Peer Energy Trading Model Incorporating Battery Energy Storage with Active Voltage Control for a Microgrid <i>Ashok Paudel, Thandar Aung, Khin Phyu Ye Myint, Watcharakorn Pinthurat, Terapong Boonraksa, Promphak Boonraksa and Boonruang Marungsri</i>
14:30-14.45 น.	Coffee break

กำหนดการนำเสนอบทความ

วันพฤหัสบดีที่ 13 พฤศจิกายน 2568

ช่วงที่ 2 เวลา 14:45 – 16:30 น.

ณ อาคารอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาค

ตะวันออกเฉียงเหนือ 2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ. เมือง จ. นครราชสีมา



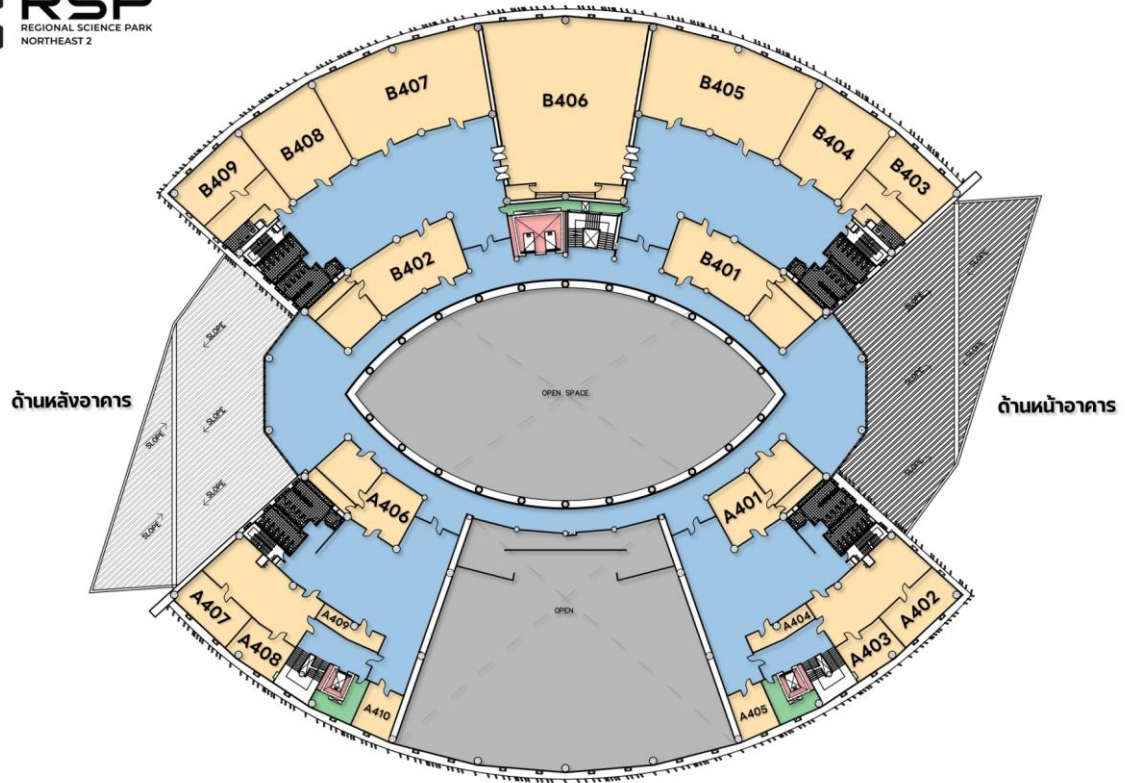
ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B407
หัวข้อบทความ	นวัตกรรมจัดการเมืองอัจฉริยะ สู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน
Session Chair	ผศ.ดร.ภาดิน มณีโชติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ กำแพงเพชร อาจารย์ ดร.ณัฐอาภา สัจจวาที คณะการบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม
14:45 – 16:30 น.	การปรับปรุงสมบัติของโพลียูรีเทนด้วยขานอ้อยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์แทนยิปซัม พัชร อินธนู และ ชนัดดา จันดาหาญ การศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัว กฤษณนที สวนจันทร์, ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กฤษฎา แสนคำ, กิตติพัทธ์ พูลสวัสดิ์ และ ปาณัสสพดิน อักษรกลาง การศึกษาตัวประสานในเทคนิคอัดเย็นที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากเศษ ไม้จามจุรี รุ่งฤดี ชนุดหอม, ธเนศ ไชยชนะ, กิตติกร สาสุจิตต์, ลลิตา เพชรใจหาญ และ ภค มน ปินตานา การศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติของถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวและขานอ้อย พัชร อินธนู, สุภัชชา ประมาศ, และ กุศลคำนวน ญัฐบุญพิสุทธิ์ การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากเปลือกโกโก้จากวิสาหกิจชุมชนแปรรูปโกโก้ และ ผลผลิตทางการเกษตรกำแพงเพชร ณภัทร อ้ายม็อก, ปิยะพร โล่ตระกูล, เทพ เกื้อทวีกุล, และ จารุกิตต์ พิบูลนฤดม
16:30 – 18:00 น.	การประชุมของกรรมการสมาคม
18:30 – 22:00 น.	งานเลี้ยงรับรองผู้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่ง ประเทศไทยครั้งที่ 18 - มอบรางวัลบทความดีเด่น - มอบธงเจ้าภาพครั้งที่ 19

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B405
หัวข้อบทความ	นวัตกรรมพลังงานเพื่อความยั่งยืนของทรัพยากรธรรมชาติ
Session Chair	รศ.ดร.ภาณท์ เกิดขึ้น คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน นครราชสีมา ผศ.ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
14:45 – 16:30 น.	การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนบำบัดแบบต่อเนื่องในระบบเปิดลำคลองแม่ข่า สมภาพ บุญศรี, นำพร ปัญญาใหญ่, รณชาติ มั่นศิลป์, และ ธนวรรณ วัชรดำรงศักดิ์ การพยากรณ์ระยะทางที่เหลือของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลสถานะของแบตเตอรี่ (SOC) วรรณฤทธิ์ ทวีชาติ เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลม แบบ Savonius Rotor สามารถ ยอดเสาร์, พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์, วีรพล ทองคุปต์, มูฮัมหมัดรอซดี นพนันท์ รัตน์, สามารถ ยอดเสาร์, รัตนารณณ์ ดั่งหว่ง, พิมพ์ประไพ ไผ่สุข, สมพล มะลิเกะ, และ วีรพล ทองคุปต์ การจำลองพลศาสตร์การไหลของอากาศในระบบดักจับมลพิษด้วยเทคโนโลยีไมโคร/นาโนบำบัด ไพฑูรย์ เหล่าดี, นำพร ปัญญาใหญ่, รณชาติ มั่นศิลป์, เอกรัฐ จันทร์ประเสริฐ และ ธนวรรณ วัชรดำรงศักดิ์ ระบบจองคิวรับบริการออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร รุ่งโรจน์ สงวนวัฒนา และ ภาติณ มณีโชติ
16:30 – 18:00 น.	การประชุมของกรรมการสมาคม
18:30 – 22:00 น.	งานเลี้ยงรับรองผู้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 - มอบรางวัลบทความดีเด่น - มอบธงเจ้าภาพครั้งที่ 19

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B404
หัวข้อบทความ	การวิจัยและพัฒนาพลังงานสะอาดเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน
Session Chair	ศ.ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ รศ.ดร.วิรัช โยชนรินทร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
14:45 – 16:30 น.	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอัตราการไหลของอากาศอัดจากกังหันลมอัดอากาศเชิงกล ขนาด 5 กิโลวัตต์ <i>วรเชษฐ์ แสงสีดา, วิรัช โยชนรินทร์, ภาณุ ประทุมณพรัตน์, และ ขวัญชัย จ้อยเจริญ</i> การวิเคราะห์เชิงพลังงานของชีวมวลเหลือทิ้งในมหาวิทยาลัยเพื่ออนาคตพลังงานคาร์บอนต่ำ <i>ณัฐธัญญา พรกวิรัตน์ชัย และ วิชชุดา ภาโสสม</i> ผลของอุณหภูมิไอวาลวอเตอร์และค่าดีกรีความร้อนยวดยิ่ง ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง ผ่านปั๊มความร้อนคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดทรานส์คริสติคัล <i>อรรถกร อาสนคำ, ธรณิศวรรค์ ดีทายาท และ ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์</i> การประเมินประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบอัดอากาศ <i>สิริศักดิ์ ปางวุฒินิชย์, วิรัช โยชนรินทร์, วรเชษฐ์ แสงสีดา, ไวยวิทย์ อุตย์เฉลิม, สันติ พลอยพรหม, ธนยศ คิดเมตตากุล, และ สุเทพ สีมาลา</i> อิทธิพลของความหนาของวัสดุพรมที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำ <i>ปกรณ์ พรหมแก้ว, ปฏิวดี วรามิตร, สัณชัย รำเพยพัฑ, และ ภาณุศักดิ์ มูลศรี</i> ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งไอเสียผ่านวัฏจักรแรงดัน สารอินทรีย์: กรณีใช้ขดท่อหมุนเวียน ในการแลกเปลี่ยนความร้อน <i>ธรณิศวรรค์ ดีทายาท, เหนือพล ดวงเบ็ญ, วาสนา คำโอภาส, อรรถกร อาสนคำ, และ ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์</i>
16:30 – 18:00 น.	การประชุมของกรรมการสมาคม
18:30 – 22:00 น.	งานเลี้ยงรับรองผู้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 - มอบรางวัลบทความดีเด่น - มอบธงเจ้าภาพครั้งที่ 19

ห้องนำเสนอ	ห้องประชุม B408
หัวข้อบทความ	Asia Renewable Energy for Community Conference
Session Chair	ผศ.ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผศ.ดร.วัชรกร ปิ่นธรัตน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี
14:45 – 16:30 น.	Cost-Optimal Home Energy Management under Thai TOU Tariffs using Multi-Agent Deep Reinforcement Learning <i>Khin Phyu Ye Myint, Thandar Aung, Ashok Paudel, Watcharakorn Pinthurat, Promphak Boonraksa, Terapong Boonraksa and Boonruang Marungsri</i>
	A Prototype of Online Control and Monitoring Systems based on NodeMCU ESP8266 in conjunction with MQTT and Node-RED dashboard-UI <i>Yuthapong Tarapin, Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit and Surapon Riyana</i>
	Circular Economy and Value-Added Analysis of Cacao Pod Husk By-products for Wood Vinegar Production <i>Arisara Romyen, Nuttaporn Rochanahastin, and Juntima Chungsiriporn</i>
	LSTM-Enhanced Multi-Agent Soft Actor-Critic for Coordinated Voltage Regulation and Energy Management in the Distribution System <i>Thandar Aung, Khin Phyu Ye Myint, Ashok Paudel, Watcharakorn Pinthurat, Terapong Boonraksa, Promphak Boonraksa and Boonruang Marungsri</i>
	Energy Recovery in Electronics Plant Considering Economics Constraint <i>Prayad Boonkham, Chaimongkol Pengtem, Promsak Apiratikul and Nikorn Saengngam</i>
16:30 – 18:00 น.	การประชุมของกรรมการสมาคม
18:30 – 22:00 น.	งานเลี้ยงรับรองผู้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 - มอบรางวัลบทความดีเด่น - มอบธงเจ้าภาพครั้งที่ 19

แผนผังชั้น 4 อาคารอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา



สารบัญ

	หน้า
สารจากประธานพิธีเปิดการจัดงานการประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18	5
สารจากผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	6
สารจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	7
สารจากอธิการบดี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	8
สารจากผู้อำนวยการอุทยานวิทยาศาสตร์ภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2	9
สารจากประธานที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน	10
สารจากนายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน	11
คณะกรรมการที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน	12
คณะกรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน	12
คณะกรรมการพิจารณาบทความ	13
กำหนดการนำเสนอบทความ	17
หัวข้อบทความ: การวิจัยและพัฒนาพลังงานเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน	45
❖ การจำลองพลศาสตร์การไหลของอากาศในระบบดักจับมลพิษ ด้วยเทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล (Simulations of Airflow Dynamics in Air Pollution Control System Using Micro/Nano Bubble Technology)	46
❖ การทดสอบและการจำลองเชิงพลศาสตร์ของไหลของการระบายความร้อนแพ็คเกจเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการไหลของอากาศแบบตกกระทบ (Experimental and Computational Fluid Dynamics Investigation of Impinging Air Cooling for Electric Vehicle Battery Packs)	47
❖ การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อแนวทางการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะใช้งานเป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำ (Economic Evaluation for Using Goat Dung Pellets as Boiler Fuel)	60
❖ การเปรียบเทียบต้นทุนค่าไฟฟ้ารายเดือนก่อนและหลังการใช้งานระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา (A Comparative Study of Monthly Electricity Costs Before and After the Implementation of an On-Grid Rooftop Solar Cell System at Narathiwat Technical College)	68
❖ การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้พลังงานความเย็นเหลือทิ้งจากไนโตรเจนเหลว (Thermoelectric Power Generation Utilizes Waste Cold Energy from Liquid Nitrogen)	79

สารบัญ

	หน้า
❖ การเปรียบเทียบผลการผลิตไฟฟ้าระยะสั้นกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst โครงการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 500 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ (Short-Term Electricity Generation Comparison between Actual and PVsyst-Simulated Results of a 500 kW Solar Power Generation Project at Princess of Naradhiwas University)	86
❖ การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากเปลือกโกโก้จากวิสาหกิจชุมชนแปรรูปโกโก้และผลผลิตทางการเกษตรกำแพงเพชร (Development of Charcoal Briquettes from Cocoa Husk by the Cocoa Processing and Agricultural Products Community Enterprise Kamphaeng Phet)	87
❖ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอัตราการไหลของอากาศอัดจากกังหันลมอัดอากาศเชิงกล ขนาด 5 กิโลวัตต์ (Analysis of the relationship between wind speed and compressed air flow rate From a 5-kilowatt mechanical air compressor wind turbine)	89
❖ การวิเคราะห์เชิงพลังงานของชีวมวลเหลือทิ้งในมหาวิทยาลัยเพื่ออนาคตพลังงานคาร์บอนต่ำ(Energy Analysis of University Biomass Waste for a Low-Carbon Energy Future)	91
❖ การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์ในการศึกษาต้นแบบการผลิตระบบไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนผสมผสาน ขนาด 150 kW กรณีศึกษาเกาะเต่า จ.สุราษฎร์ธานี (Computer Analysis of Photovoltaic in a Hybrid 150 kW System Plant: Case Study of Tao Island)	99
❖ การวิเคราะห์ศักยภาพและความเป็นไปได้ทางการเงินในการพัฒนาอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ด้วยระบบไมโครกริดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Feasibility Study and Potential Analysis for Developing Yupparat Wittayamongkol Building into a Net-Zero Energy Building with a Microgrid System)	100
❖ การศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติของถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวและชานอ้อย (A Study and Comparison of the Properties of Briquette Charcoal from Rice Straw and Sugarcane Bagasse)	111
❖ การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในอาคาร (Design and Development of Building Energy Monitoring System)	120
❖ เครื่องคั่วพริกอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar-Powered Automatic Chili Roasting Machine)	122

สารบัญ

	หน้า
❖ เครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (A Solar Energy Floating Waste Collector Controlled via Smartphone)	124
❖ เครื่องนวดข้าวขนาดเล็กโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ (Development of a Small Rice Threshing Machine by a Brushless DC Motor Using Solar Energy)	130
❖ ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ (DC motor speed controller with feedback IC TL494 for constant speed control)	131
❖ แบบจำลองและจำลองสถานการณ์ระบบอิเล็กโทรไลซิสแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ (Modeling and Simulation of PEM Electrolysis System Powered by DC Power Supply Using Different Water Sources)	140
❖ แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและการตรวจสอบเชิงฮาร์ดแวร์ (First-Order Equivalent Circuit Model of a Lithium-Ion Battery and Hardware Verification)	141
❖ ผลกระทบของการให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อมในการผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ (Effects of direct and indirect heating on biochar production from coffee husks)	142
❖ ผลของอุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์และค่าดีกรีความร้อนยวดยิ่ง ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง ผ่านปั๊มความร้อนคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดทรานส์คริติคัล (EFFECT OF EVAPORATOR TEMPERATURE AND ITS DEGREE OF SUPERHEAT ON HIGH TEMPERATURE HOT WATER PRODUCTION VIA A TRANSCRITICAL CO ₂ HEAT PUMP)	150
❖ ระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน (Body Mass Index Measurement System via Smartphone Application)	
❖ ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งไอเสียผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์: กรณีใช้ขี้ดท่อหมุนเวียน ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Potential for Electricity Generation from Exhaust Waste Heat via an Organic Rankine Cycle: A Case Study Using a Run-Around Coil Heat Exchanger)	

สารบัญ

	หน้า
❖ อิทธิพลของความหนาของวัสดุพูนที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของปั๊ม สูบน้ำกำลังไอน้ำ (The Influence of Porous Material Thickness on the Thermal Performance of Steam-Powered Water Pump)	166
หัวข้อบทความ: เทคโนโลยีพลังงานสำหรับชุมชน-จากทฤษฎีสู่การปฏิบัติ	174
❖ การควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์สำหรับชุมชนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Production Control of Biochar for Community using Microcontroller)	175
❖ การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงาน แสงอาทิตย์ กรณีศึกษา : เกษตรกรผู้ปลูกยางพาราเขตนิคมสร้างตนเองบ้าน กรวด อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ (Utilizing Internet of Things Technology for Enhanced Solar Energy Water Management : Case Study Rubber Farming in the Ban Kruat Self-Help Settlement, Ban Kruat District, Buriram Province)	177
❖ การทดสอบระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าในการควบคุมการไหลอัตโนมัติ สำหรับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาก (Performance Testing of an Automatic Flow Control System Using a Motorized Valve for a Micro Hydropower Generator)	179
❖ การประเมินประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบอัดอากาศ (Performance Evaluation of Solar Energy for Compressed Air Systems)	185
❖ การผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กใน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (Hydrolysate Production from Biomass via Hydrothermal Carbonization Using Magnetic Induction Heating)	198
❖ การพัฒนาชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อหันกลับตำแหน่งทิศ ตะวันออกสำหรับเช้าวันใหม่ (Development of a Solar Tracking Controller with Automatic Eastward Repositioning for the Next Day)	199
❖ การพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน (Development of Moisture and Temperature Control System for Melon Greenhouses)	206
❖ การศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัว (A Study of Fuel Properties of Cow Dung Briquette)	208

สารบัญ

	หน้า
❖ การพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้น เรื่องการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ในจังหวัดพิษณุโลก (Development of a short-term training course on charcoal briquette production from agricultural waste materials in Phitsanulok Province)	210
❖ การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อแนวทางการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะใช้งานเป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำ (Economic evaluation for use goat dung pellets as boiler fuel)	212
❖ การศึกษาผลกระทบด้านพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ในประเทศไทย (Case Study Energy Losses from Transformer Implementation in Thailand)	220
❖ ผลการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและระยะคืนทุนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับครอบครัวขนาดเล็ก (Thermal Efficiency and Payback Period investigation of the Solar Dryer for small families)	228
❖ การออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดไส้ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติในระบบออฟกริด (Design and Development of Solar Dryer with Automatic Temperature Control Incandescent Lamp in Off-Grid System)	230
❖ อิทธิพลของจำนวนปลาเกลือต่อคุณภาพและการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสำหรับการทำปลาเกลือเค็ม ด้วยตู้ลดความชื้นพลังงานไฟฟ้า (Influence of Fish Quantity on Quality and Electrical Energy Consumption in Salted Gulao Fish (Eleutheronema Tetradactylum) Production Using an Electric Dehumidification Chamber)	231
หัวข้อบทความ : นโยบายและกฎหมายส่งเสริมพลังงานและพลังงานสะอาดสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน	233
❖ กรณีศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบโซลาร์บนหลังคา เปรียบเทียบผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจริง กับการทำนายผลเพื่อนำไปสู่คาร์บอนเครดิต (A case study of electrical energy production using rooftop solar systems : comparing actual electrical energy production with forecasting results forward to carbon credits)	234

สารบัญ

	หน้า
❖ การศึกษาสภาพปัญหาและแนวทางการปรับตัวของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานคร เพื่อเตรียมความพร้อมต่อการประเมิน (Carbon Footprint A Study on Challenges and Adaptation Strategies of Plastic Packaging Printing Companies in Bangkok to Prepare for Carbon Footprint Assessment.)	236
❖ อิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสต่อสมบัติถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ (Effects of Pyrolysis Temperature and Residence Time on the Physicochemical Properties of Bamboo Biochar)	247
❖	
หัวข้อบทความ: นวัตกรรมจัดการเมืองอัจฉริยะสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน	254
❖ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนเพาะเห็ดหอมหมู่บ้านปางมะโอ ตำบล วังเงิน อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง (The Application of IoT Technology for Smart Farm Control in a Shiitake Mushroom Greenhouse at Pangmao Village, Wang Ngoen Subdistrict, Mae Tha District, Lampang Province)	255
❖ การปรับปรุงสมบัติของโพลียูรีเทนด้วยขานอ้อยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์แทนยิปซัม Development of Polyurethane for Ceiling Applications	262
❖ การระบุตำแหน่งและขนาดสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะของเทศบาลนครอุดรธานี โดยอ้างอิงจากการพยากรณ์ความต้องการ (Location and Sizing of Public Electric Vehicle Charging Stations of Udon Thani Municipality based on Demand Forecasting)	264
❖ การสร้างแบบจำลองพลวัตเพื่อประเมินการใช้พลังงานและสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับวัฏจักรการขับขี่ที่แตกต่างกัน (Dynamic Modeling and Performance Analysis of Fuel Cell Electric Vehicles for Various Driving Cycles)	270
❖ ระบบ Edge-AI สำหรับตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยและทะเบียนรถจักรยานยนต์แบบเรียลไทม์ (Edge-AI System for Real-Time Motorcycle Helmet Detection and License Plate Recognition)	272
❖ ระบบจองคิวรับบริการออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร (Online Service Queue Reservation and Notification System via LINE Application, Faculty of Industrial Technology, KamphaengPhet Rajabhat University)	284

สารบัญ

	หน้า
หัวข้อบทความ : นวัตกรรมพลังงานเพื่อความยั่งยืนของทรัพยากรธรรมชาติ	292
❖ การใช้ประโยชน์เชิงมูลค่าอย่างยั่งยืนจากก้อนเชื้อเห็ดใช้แล้ว: ความเป็นไปได้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวภาพ (Sustainable Valorization of Spent Mushroom Substrate: Feasibility of Bio-Pellet Production)	293
❖ การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนบับเบิลแบบต่อเนื่องในระบบเปิดลำคลองแม่ข่า (Wastewater Treatment Using Continuous Micro-Nano Bubbles Technology in the Open Ma Kha Canal System)	295
❖ การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษา ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Geospatial Artificial Intelligence for Solar Energy Potential Analysis: A Case Study of Northern and Northeastern Thailand)	297
❖ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร : กรณีศึกษาการปลูกกระเจี๊ยบแดง (Performance Evaluation of Conventional PV and Colored PV (Red) Panels on Electricity Generation and Roselle Growth under an Agrivoltaics System)	299
❖ การพัฒนาต้นแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลงปลูกพืชแถวตรงที่ถูก ควบคุมจากระยะไกลโดยใช้คลื่นวิทยุ (Developing a Prototype of Solar-Powered Mowers for Weed Control in Straight-Row Crop Fields Operated by a Radio Frequency Remote Control)	301
❖ การพัฒนานวัตกรรมเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจจ่ายน้ำ เข้าพื้นที่เกษตรกรรม กรณีศึกษา พื้นที่ระบบจ่ายน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตำบลหัวเมือง อำเภอสอง จังหวัดแพร่ (Development of innovation to increase efficiency in water distribution decision-making Into agricultural areas Case study: Solar water distribution system area Huamuang Subdistrict, Song District, Phrae Province)	312
❖ การพัฒนาแบบจำลองการทำนายสถานะประจุของแบตเตอรี่สำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นและการถดถอยแบบเวกเตอร์สนับสนุน (Development of a Battery State of Charge Prediction Model for Electric Motorcycles Using Linear Regression and Support Vector Regression)	314
❖ การพัฒนารถกอล์ฟพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับสวนพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร (Development of Solar-powered Golf Carts for the Energy Park, Kamphaeng Phet Rajabhat University)	321

สารบัญ

	หน้า
❖ การพัฒนาระบบตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ IoT (Development of a solar tracking system monitoring system using IoT)	323
❖ การพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด (Development of a smart hydroponic vegetable growing system combined with smart microgrid technology)	330
❖ การศึกษาแนวทางการพัฒนาศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนหลังคา ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย (A Study of Guidelines for Potential Development of Rooftop Solar Power Generation Systems in Chiang Rai Rajabhat University Area)	332
❖ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อเพิ่มผลผลิตและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากกาบหมาก (Study of Optimal Conditions for Physical Activation in Activated Carbon Production to Enhance Yield and BET Surface Area from Areca Spathe)	339
❖ การอบกระจุัดด้วยตู้อบแห้งพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล (Baking of Krajoed (Lepironia articulata) With biomass heat energy dryer)	341
❖ การอบแห้งพริกจินดาแดงโดยใช้ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ผสมผสานกับแหล่งความร้อนเสริมจากก๊าซหุงต้ม (Drying of Jinda Red Chili Using a Solar Water Heating System Combined with an Auxiliary Heat Source from Liquefied Petroleum Gas)	343
หัวข้อบทความ : บทบาทของชุมชนในการเปลี่ยนผ่านพลังงานสะอาด	353
❖ กระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง (Pyrolysis process for converting waste plastic into fuel oil)	354
❖ การประเมินมาตรการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยต้นทุนหน่วยสุดท้าย ของการลดก๊าซเรือนกระจก กรณีศึกษาเทศบาลเมืองลาดสวาย (Assessment of Greenhouse Gas Emission Mitigation Measures Using Marginal Abatement Cost: A Case Study in Ladsawai Municipality)	356

สารบัญ

	หน้า
Asia Renewable Energy for Community Conference (AREC)	362
❖ Circular Economy and Value-Added Analysis of Cacao Pod Husk By-products for Wood Vinegar Production	363
❖ LSTM-Enhanced Multi-Agent Soft Actor-Critic for Coordinated Voltage Regulation and Energy Management in the Distribution System	364
❖ Multi-Agent Soft Actor-Critic Based Peer-to-Peer Energy Trading Model Incorporating Battery Energy Storage with Active Voltage Control for a Microgrid	365
❖ OPTIMIZATION OF CALCIUM HYDROXIDE PRETREATMENT CONDITIONS AND BIOETHANOL PRODUCTION FROM SUGARCANE BAGASSE	366
❖ Production of Biomass Pellets and Biochar from Rubber Seed Cake	377
❖ Cost-Optimal Home Energy Management under Thai TOU Tariffs using Multi- Agent Deep Reinforcement Learning	383
❖ Energy Recovery in Electronics Plant Considering Economic Constraints	393
❖ A Prototype of Online Control and Monitoring Systems based on NodeMCU ESP8266 in conjunction with MQTT and Node-RED dashboard-UI	394
❖ Development of A Solar-Powered Mower for Row Crop Cultivations based on Differential Steering Systems and Radio Frequency Remote Controls in conjunction with ESP32-CAM	395
❖ Development of Remote-Control Solar Weed Removal Machine Using the Internet of Things in Conjunction with ESP-NOW and YOLOv11	405
❖ Clean Electricity Generation of Rice Husk and Wood Residues Power Plants in Thailand in LCOE Strategies and Pathways to Net Zero Emissions	406

การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ครั้งที่ 18 (TREC-18)

หัวข้อบทความ 1

การวิจัยและพัฒนาพลังงานเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน

**การจำลองพลศาสตร์การไหลของอากาศในระบบดักจับมลพิษ
ด้วยเทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล**
**Simulations of Airflow Dynamics in Air Pollution Control Systems
Using Micro/Nano Bubble Technology**

ไพฑูรย์ เหล่าดี¹, นภาพร ปัญญาใหญ่², รณชาติ มั่นศิลป์¹, เอกรัฐ จันทร์ประเสริฐ¹ และ ธนวรรณ วัชรดำรงศักดิ์^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง
จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย
จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road Chang Phueak
Subdistrict, Mueang District, Chiang Mai Province 50300

²Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, San Sai, Chiang Mai, 50290

*Corresponding author: Tel.: +66 92351-5465 E-mail address: thanawatwatcharadumrongsak@gmail.com

Abstract

This research aims to study airflow behavior for the design of a pollution-capture system from the combustion process using Micro/Nanobubble technology. Micro/Nano Bubble technology uses sponge particles with diameters of 10-50 μm and less than 200 μm , creating a simulated tunnel for actual testing to analyze the results for design, simulating airflow with the Ansys-CFX 2024 program. The independent variable is the length of the exhaust-catching tunnel in two cases: 40 x 50 x 40 cm and 40 x 100 x 40 cm. The comparison is performed to determine the suitability trend at inlet air velocities of 5 m/s, 10 m/s, and 15 m/s. The study results found that the exhaust emission capture tunnel should be approximately 0.5-1.0 m long, and the inlet exhaust air velocity should be 5-15 m/s. However, the study did not consider other variables such as the number of nozzles, pressure, nozzle orifice size, injection rate, and injection frequency. The researchers will focus on field studies with real-world tests to further investigate the research hypothesis and serve as a guideline for the further development of air pollution capture techniques.

Keywords: Emission capture, Micro/Nano bubble, Exhaust gases, Emission

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศสำหรับออกแบบระบบดักจับมลพิษจากกระบวนการเผาไหม้ด้วยเทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอนุภาคฟองน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 -50 μm และเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 200 μm โดยการสร้างอุโมงค์จำลองพร้อมทดสอบจริงเพื่อนำผลมาวิเคราะห์ออกแบบด้วยการจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรม Ansys-CFX 2024 โดยกำหนดตัวแปรต้นคือขนาดความยาวของอุโมงค์ดักจับไอเสีย 2 กรณี คือ กรณีแรกมีขนาด 40 x 50 x 40 cm และกรณีที่สองมีขนาด 40 x 100 x 40 cm ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาแนวโน้มความเหมาะสมที่ความเร็วอากาศเข้าที่ 5 m/s 10 m/s และ 15 m/s ผลการศึกษาพบว่า อุโมงค์ดักจับมลพิษไอเสียมีความยาว 0.5-1.0 m ความเร็วอากาศไอเสียเข้าที่ความเร็ว 5-15 m/s อย่างไรก็ตามผลการศึกษาดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาตัวแปรอื่นๆ เช่น จำนวนหัวฉีด ความดัน ขนาดของรูหัวฉีด อัตราการฉีด ความถี่ของการฉีด ทั้งนี้ผู้วิจัยจะมุ่งศึกษาในภาคสนามด้วยการทดสอบจริงเพื่อสืบหาสมมติฐานงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น สำหรับเป็นแนวทางการพัฒนาเทคนิคการดักจับมลพิษอากาศต่อไป

คำสำคัญ: เครื่องดักจับมลพิษ, เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล, มลพิษ, ไอเสีย

การทดสอบและการจำลองเชิงพลศาสตร์ของไหลของการระบายความร้อนแพ็คเกจเตอรียานยนต์ไฟฟ้า
ด้วยการไหลของอากาศแบบตกกระทบ

Experimental and Computational Fluid Dynamics Investigation of Impinging Air Cooling
for Electric Vehicle Battery Packs

สัญญา รำเพยพิท¹, อภิเดช บุญเจือ¹, ภาณุศักดิ์ มูลศรี¹, สาธิต ทูลไธสง¹, วริศราภรณ์ จรโคกรวด¹,
วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ², ศรัณย์ คัมภีร์ภัทร², ไมตรี ธรรมมา² และ ธนดน สวนไฟ^{1*}

Sanchai Ramphueiphad¹, Apidach Boonjue¹, Phanusak Munsri¹, Sarthit Toolthaisong¹, Warisaraporn
Jornkokkrud¹, Witchupong Wiboonjaroen², Saran Kampeephat², Maitree Thamma² and
Tanadon Sounphai^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นครราชสีมา 30000

¹ Energy Engineering, Faculty of Engineering and Technology is the Engineering, Rajamangala University of
Technology Isan, Nakhonratchasima 30000

² Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Technology is the Engineering
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima 30000

*Corresponding author: Tel.: 095-4497244. E-mail address: tanadon_c012@hotmail.com

Abstract

This study investigates the effect of inter-cell spacing on the thermal performance of lithium-ion battery packs using air impingement cooling, a promising method for electric vehicle (EV) thermal management. A prototype battery pack of 18650 Li-ion cells was tested at charging rates of 1C, 2C, and 3C under controlled ambient temperatures of 20, 25, and 30 °C, with a fixed airflow of 5 m/s. Thermocouples measured surface and average cell temperatures, as well as the temperature distribution across the pack. Three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were also conducted using ANSYS Fluent with detailed geometry and k- ϵ turbulence modeling. Results show that increasing inter-cell spacing from 2 mm to 4 mm significantly improves heat dissipation, lowering the maximum cell surface temperature by 5–8 °C depending on the C-rate and enhancing thermal uniformity. CFD results agreed closely with experiments, with deviations below 5%, validating the numerical approach. These findings highlight the importance of geometric configuration in battery pack design and guide the optimization of air-cooling strategies in EV thermal management systems.

Keywords: Lithium-ion battery, Air cooling, Electric vehicle, Computational Fluid Dynamics (CFD)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ต่อประสิทธิภาพการจัดการความร้อนของแพ็คเกจเตอรียานยนต์ไฟฟ้า (EV) โดยใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศแบบไหลตกกระทบ (Air Impingement) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ได้สร้างต้นแบบแพ็คเกจเตอรียานยนต์ไฟฟ้าจากเซลล์ลิเทียมไอออน 18650 และทดสอบภายใต้อัตราการชาร์จ 1C, 2C และ 3C ที่อุณหภูมิแวดล้อม 20, 25 และ 30 °C โดยใช้อัตราการไหลของอากาศคงที่ 5 m/s ติดตั้งเทอร์

โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิผิวเซลล์ อุณหภูมิเฉลี่ย และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในแพ็ก พร้อมจำลองเชิงตัวเลข (CFD) ด้วย ANSYS Fluent โดยใช้โมเดลความปั่นป่วน $k-\epsilon$ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มระยะห่างระหว่างเซลล์จาก 2 mm เป็น 4 mm ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน ลดอุณหภูมิผิวเซลล์สูงสุด 5–8 °C (ขึ้นกับอัตราการชาร์จ) และทำให้การกระจายความร้อนภายในแพ็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ผลการจำลอง CFD สอดคล้องกับการทดลองจริง โดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 5% แสดงถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของการจำลอง งานวิจัยนี้ชี้แนวทางสำคัญในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนด้วยอากาศสำหรับแพ็กแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า

คำสำคัญ: แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, การระบายความร้อนด้วยอากาศ, ยานยนต์ไฟฟ้า, การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

บทนำ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหลักสำหรับทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles: EVs) เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง น้ำหนักเบา ประสิทธิภาพการชาร์จ-คายประจุที่ดี และอายุการใช้งานยาวนาน [1–3] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ ความไวต่ออุณหภูมิในการทำงาน หากอุณหภูมิสูงกว่า 60 °C จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์ ความจุลดลง และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิด thermal runaway ซึ่งอาจก่อให้เกิดการลุกไหม้หรือการระเบิด [4–6] ดังนั้นระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ (Battery Thermal Management System: BTMS) จึงมีบทบาทสำคัญในการรักษาประสิทธิภาพและความปลอดภัยของแพ็กแบตเตอรี่ แนวทางการจัดการความร้อนที่พัฒนามาแล้วมีทั้งการใช้การใช้อากาศและของเหลวเป็นตัวกลาง โดยการระบายความร้อนด้วยอากาศ (air cooling) มีข้อดีคือโครงสร้างเรียบง่าย น้ำหนักเบา และต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับระบบของเหลว แต่ข้อจำกัดคือประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างต่ำ [7,8] งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหล ทิศทางการไหล การจัดเรียงเซลล์ และการใช้ครีหรือช่องทางพิเศษ เพื่อเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อน [9–11] นอกจากนี้ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics: CFD) ยังถูกนำมาใช้เพื่อทำความเข้าใจการกระจายอุณหภูมิ การคาดการณ์จุดร้อน (hot spot) และการประเมินความดันตกคร่อมในระบบระบายความร้อน [12,13] ในกรณียานยนต์ไฟฟ้า ความต้องการ BTMS ที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้มั่นใจว่าการทำงานของแบตเตอรี่จะมีทั้ง ประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และอายุการใช้งานที่ยาวนาน [14,15] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของประเทศไทย การผลักดันการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นหนึ่งในกลยุทธ์หลักเพื่อบรรลุเป้าหมายด้านพลังงานสะอาดและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [16] อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่และระบบจัดการความร้อนยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น จึงมีความจำเป็นต้องมีงานวิจัยเชิงลึกที่เน้นการออกแบบและประเมิน BTMS ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและการใช้งานจริงในประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็กแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ด้วยวิธีการทดลองจริงและการจำลอง CFD โดยมุ่งเน้นการศึกษาผลของ ระยะห่างระหว่างเซลล์และเงื่อนไขการระบายความร้อนด้วยอากาศ ที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบระบบจัดการความร้อนที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเหมาะสมต่อการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการระบายความร้อนของแพ็กแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้การทดลองจริงควบคู่กับการจำลองเชิงพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CFD ขั้นตอนการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. การทดลองจริง

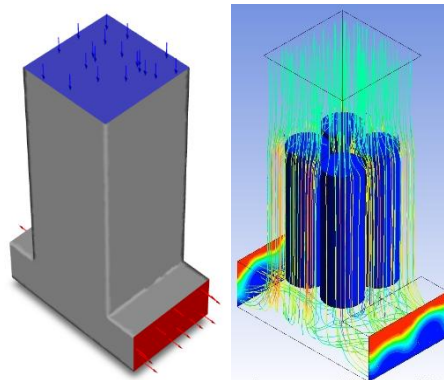
ได้สร้างต้นแบบแพ็กแบตเตอรี่จากเซลล์ลิเทียมไอออนชนิด 18650 ความจุ 1200 mAh แรงดันไฟฟ้า 3.7 V โดยจัดเรียงเซลล์ในโมดูลและปรับระยะห่างระหว่างเซลล์เป็น 3 ระยะ ได้แก่ 2 mm, 4 mm และ 6 mm เพื่อศึกษาผลของการจัดเรียงต่อการถ่ายเทความร้อน อากาศถูกทำให้ไหลตกกระทบ (impinging air flow) ด้วยความเร็ว 5 m/s ที่อุณหภูมิ

ระยะห่าง 4 mm

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ระยะทาง (mm)	ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)	อัตราการระเหยน้ำ (C-rate)
2	5	20,25 และ 30	1, 2 และ 3
4	5	20,25 และ 30	1, 2 และ 3
6	5	20,25 และ 30	1, 2 และ 3

การจำลอง CFD ทำโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent สร้างแบบจำลอง 3 มิติของโมดูลแบตเตอรี่และโดเมนอากาศรอบ ๆ ให้มีขนาดและระยะห่างเท่ากับการทดลองจริง เพื่อให้สภาวะการจำลองสอดคล้องกับการทดลอง Mesh ถูกสร้างในลักษณะ hybrid mesh พร้อมเพิ่มจำนวนชั้น boundary layer รอบผิวเซลล์เพื่อให้สามารถจับ gradient อุณหภูมิและความเร็วได้แม่นยำ เงื่อนไขขอบเขตถูกกำหนดเป็น velocity inlet (5 m/s) และ pressure outlet ที่บรรยากาศ ใช้โมเดลความปั่นป่วน k- ϵ สำหรับการคำนวณการไหล ผลการจำลองได้ทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิเฉลี่ย ความต่างอุณหภูมิ (ΔT) และความดันตกคร่อมของอากาศ ผลลัพธ์จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง



ภาพที่ 3 แบบจำลอง CFD ของแพ็กแบตเตอร์และทิศทางการไหลของอากาศ

3. สมการที่ใช้ในการจำลอง CFD (Simulation focus)

ในการจำลอง CFD ของระบบระบายความร้อนแพ็กแบตเตอร์ จะต้องนิยามสมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลของอากาศและการพาความร้อน ดังนี้

3.1 Convective Heat Transfer Coefficient

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จาก Nusselt number (Nu)

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L_c} \quad (1)$$

โดยที่ k คือ สภาพนำความร้อนของอากาศ ($W/m \cdot K$) และ L_c คือความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) [17,18,19]

3.2 Nusselt Number – Turbulent Flow Correlation

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ใช้ empirical correlation ของ Dittus–Boelter equation

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (2)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Reynolds number (Re) และ Prandtl number (Pr) [17,18]

3.3 Reynolds Number (Re)

Reynolds number ใช้บ่งบอกลักษณะการไหล (Laminar/Turbulent)

$$Re = \frac{\rho U L_c}{\mu} \quad (3)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3), U คือ ความเร็วลม (m/s), μ คือความหนืดพลศาสตร์ของอากาศ ($Pa \cdot s$) [17,20]

3.4 Prandtl Number (Pr)

Prandtl number แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแพร่โมเมนตัมและการแพร่ความร้อน

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (4)$$

โดยที่ C_p คือความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($J/kg \cdot K$) [17,18]

4. อัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q_{conv} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

โดยที่ Q_{conv} คือ อัตราการพาความร้อนที่ผิวแบตเตอร์ (W), T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางออก (K), T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า (K)

การคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\dot{m}$) จะได้จากการที่ทางที่ผู้ทำการทดลองกำหนดความเร็วลม (V) ที่ทางเข้า 5 m/s จึงคำนวณได้ดังสมการ 6

$$\dot{m} = \rho AV \quad (6)$$

โดยที่ $\dot{m}$ คือ มวลของอากาศที่จะต้องนำมาระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่ (kg / s), A คือ พื้นที่ทางไหลของอากาศ (m^2), V คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

5. การคำนวณหาความร้อนของแบตเตอรี่

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

โดยที่ Q คือ การพาความร้อนที่แบตเตอรี่ (W), h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W / m^2 \cdot K$), A คือ พื้นที่แบตเตอรี่กระจายความร้อนให้กับอากาศ (m^2), T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ (K), T_∞ คือ อุณหภูมิอากาศรอบๆแบตเตอรี่ (K)

จากการหาการกระจายตัวความร้อนของแบตเตอรี่ให้กับอากาศ จะได้ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิอากาศรอบๆ เซลล์แบตเตอรี่ ดังนั้นจึงนำ T_f ไปใช้หาค่าคุณสมบัติของอากาศจากตารางคุณสมบัติอากาศ) จากสมการที่ 8

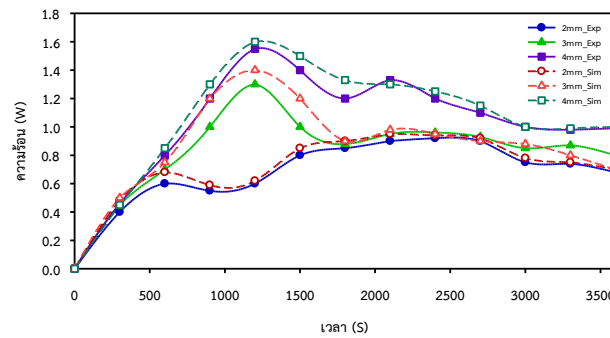
$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (8)$$

ผลการวิจัย

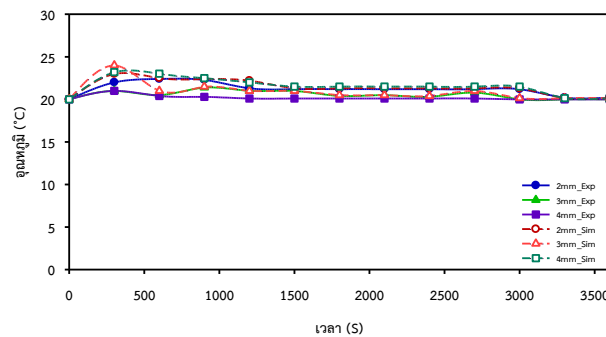
การศึกษานี้ได้ทำการทดลองและจำลองเชิงตัวเลข (CFD) เพื่อวิเคราะห์การระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด 18650 ภายใต้อัตราการชาร์จ 1C, 2C และ 3C และการไหลของอากาศแบบไหลตกกระทบ (Impinging Air Cooling) ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการจำลองในสามสถานะอุณหภูมิอากาศระบายความร้อน (20 °C, 25 °C และ 30 °C) และสามระยะห่างระหว่างเซลล์ (2 mm, 3 mm และ 4 mm) ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิผิวแพ็คเกจแบตเตอรี่และการระบายความร้อนที่อัตราการชาร์จ 1C เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง CFD

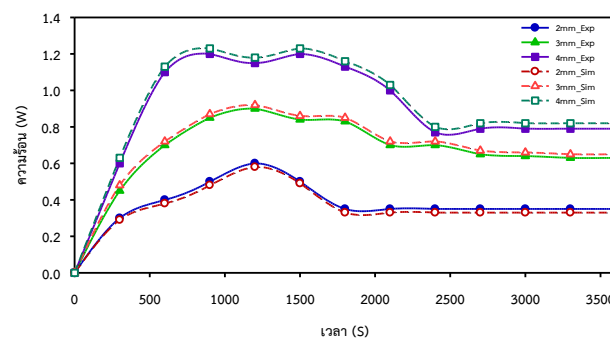
การทดสอบและการจำลอง CFD ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลของ ระยะห่างระหว่างผิวเซลล์แบตเตอรี่ (2, 3 และ 4 มม.) ต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อน ภายใต้สภาวะอากาศที่มีอุณหภูมิเข้า 20, 25 และ 30 °C ที่ความเร็วลมคงที่ 5 m/s โดยผลลัพธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าการทดลองจริง (Experiment) และค่าที่ได้จากการจำลอง (Simulation) ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 20 °C จากภาพที่ 4–5 พบว่าแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีการระบายความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 1.6 W ในขณะที่ระยะ 3 mm และ 2 mm ระบายความร้อนได้สูงสุดเพียง 1.0 W และ 0.7 W ตามลำดับ อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ที่วัดได้จริงอยู่ระหว่าง 20–25 °C ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการจำลอง CFD ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 25 °C จากภาพที่ 6–7 ผลการทดลองแสดงว่า ระยะห่าง 4 mm ระบายความร้อนได้สูงสุดที่ 1.3 W ขณะที่ระยะ 3 mm และ 2 mm มีค่า 0.9 W และ 0.3 W ตามลำดับ อุณหภูมิผิวที่วัดได้อยู่ในช่วง 25–30 °C การจำลอง CFD แสดงแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MAPE) ไม่เกิน 8% ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 30 °C จากภาพที่ 8–9 ระยะห่าง 4 mm สามารถระบายความร้อนสูงสุดได้ที่ 1.0 W ในขณะที่ระยะ 3 mm และ 2 mm ได้ค่า 0.6 W และ 0.5 W ตามลำดับ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 30–35 °C ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์การทำงานที่ปลอดภัยของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



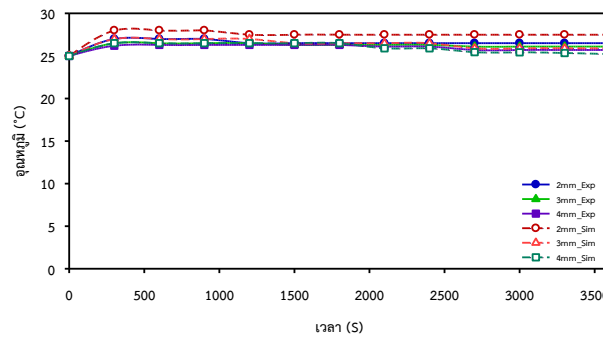
ภาพที่ 4 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C



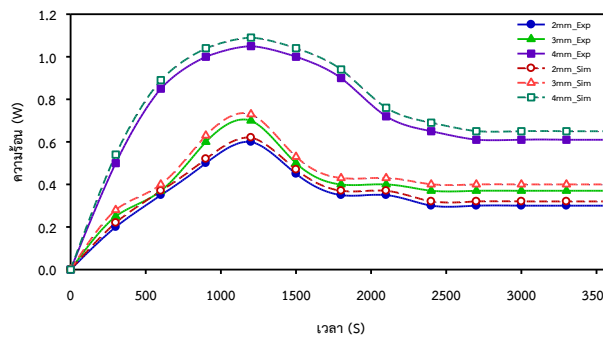
ภาพที่ 5 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C



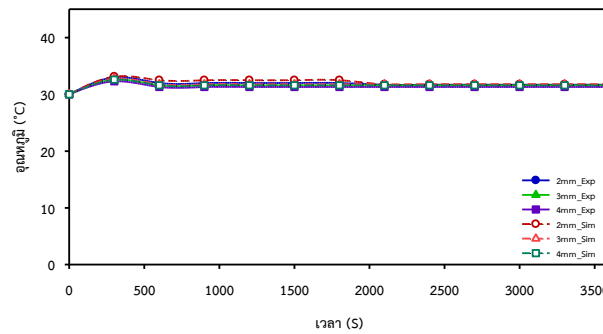
ภาพที่ 6 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

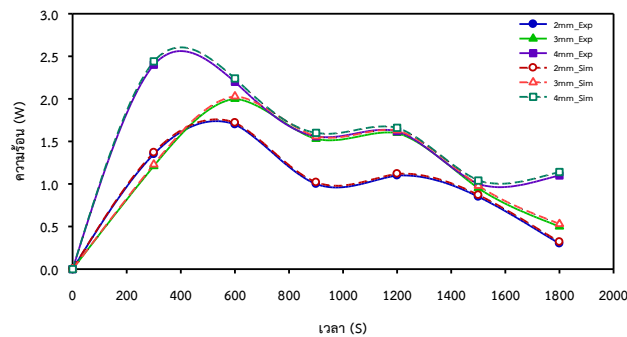


ภาพที่ 9 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

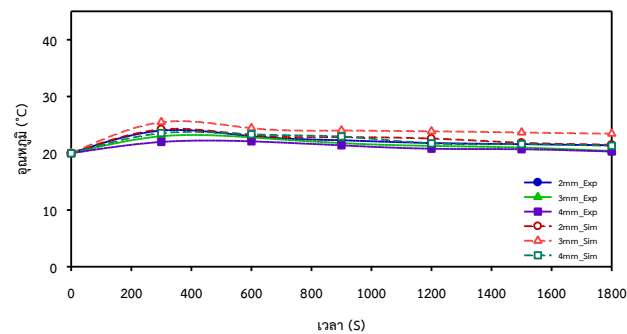
โดยรวม ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่า ระยะห่างระหว่างเซลล์ที่มากขึ้น (4 mm) ช่วยเพิ่มพื้นที่การไหลของอากาศและลดอุณหภูมิสูงสุดของเซลล์ได้ดีกว่า ขณะเดียวกันผลจาก CFD แสดงค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง ทำให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้อย่างน่าเชื่อถือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองและ CFD ไม่เกิน 8% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการยืนยันแบบจำลอง สามารถสรุปได้ว่า การใช้ระยะห่าง 4 mm เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่อัตราการชาร์จ 1C และการใช้ CFD ร่วมกับการทดลองสามารถใช้เป็นเครื่องมือออกแบบที่มีความแม่นยำสำหรับการพัฒนาระบบจัดการความร้อนของยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

2. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิผิวแพ็กแบตเตอรี่และการระบายความร้อนที่อัตราการชาร์จ 2C เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง CFD

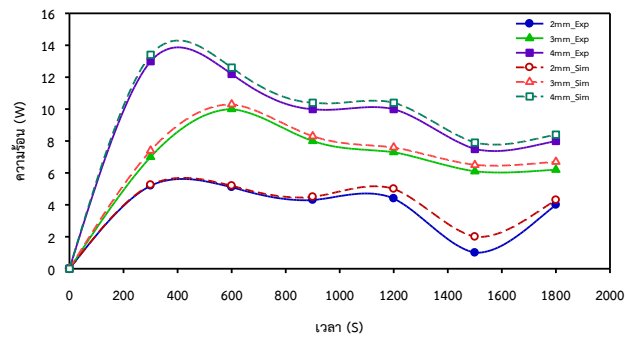
ผลการทดสอบและการจำลอง CFD ที่อัตราการชาร์จ 2C ทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง 1C โดยใช้อากาศเข้าที่อุณหภูมิ 20, 25 และ 30 °C ความเร็วลมคงที่ 5 m/s พบว่า ระยะห่างของเซลล์แบตเตอรี่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างชัดเจน และการจำลอง CFD สามารถอธิบายแนวโน้มได้ใกล้เคียงกับการทดลอง ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 20 °C จากภาพที่ 10-11 การทดลองพบว่า ระยะห่าง 4 mm มีการระบายความร้อนสูงสุด 2.2 W ขณะที่ระยะ 3 mm และ 2 mm มีค่า 2.0 W และ 1.9 W ตามลำดับ อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 20–30 °C สอดคล้องกับค่าจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 7% ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 25 °C จากภาพที่ 12-13 ระยะห่าง 4 mm ระบายความร้อนสูงสุดได้ถึง 12.1 W ซึ่งมากกว่าระยะ 3 mm (10.0 W) และ 2 mm (6.0 W) อย่างชัดเจน อุณหภูมิผิวที่วัดได้อยู่ในช่วง 25–30 °C การจำลอง CFD ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง โดยมีค่า MAPE ไม่เกิน 6% ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 30 °C จากภาพที่ 14-15 ผลการทดลองแสดงว่า ระยะห่าง 4 mm ระบายความร้อนได้สูงสุด 3.0 W มากกว่าระยะ 3 mm (3.0 W) และ 2 mm (1.0 W) เล็กน้อย อุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ระหว่าง 30–35 °C ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์การทำงานที่ปลอดภัย



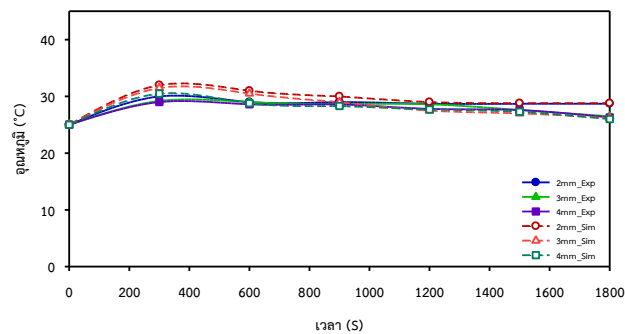
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C



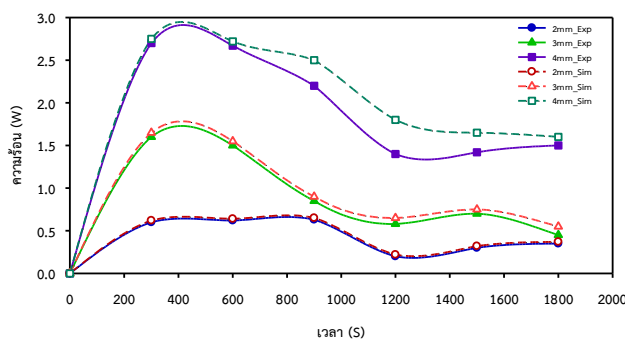
ภาพที่ 11 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C



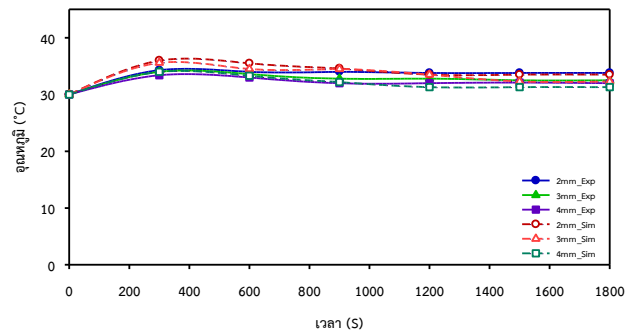
ภาพที่ 12 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



ภาพที่ 14 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

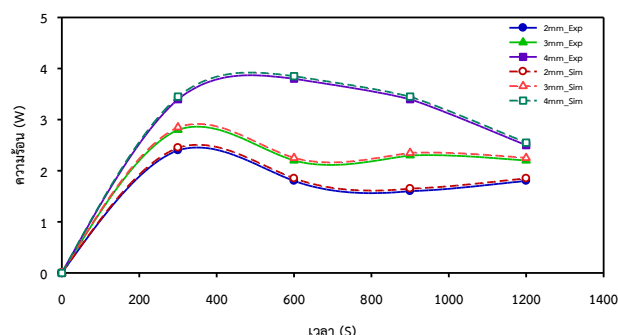


ภาพที่ 15 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

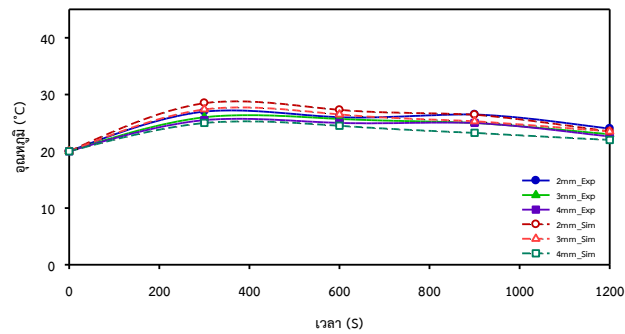
ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและการจำลอง CFD อยู่ในช่วง 3–7% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง สรุปผลที่อัตราการชาร์จ 2C การเพิ่มระยะห่างระหว่างเซลล์เป็น 4 mm ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในสภาวะอากาศที่มีอุณหภูมิ 25 °C ซึ่งพบการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (12.1 W) เมื่อเทียบกับระยะห่างที่แคบกว่า การจำลอง CFD สามารถสะท้อนพฤติกรรมนี้ได้ถูกต้อง ทำให้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบระบบจัดการความร้อนของแพ็คเกจเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิผิวแพ็คเกจเตอรี่และการระบายความร้อนที่อัตราการชาร์จ 3C เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง CFD

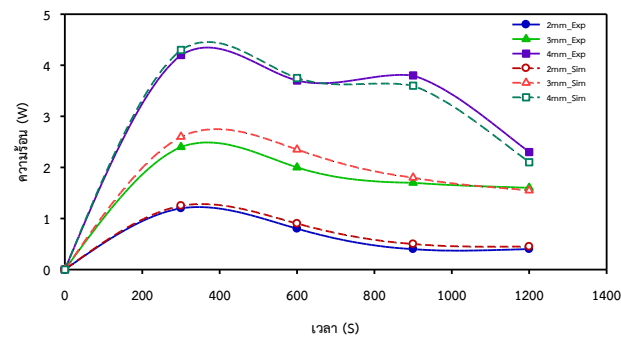
การทดลองที่อัตราการชาร์จ 3C ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างผิวเซลล์แบตเตอรี่ (2 mm, 3 mm และ 4 mm) ต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อนของอากาศแบบตกกระทบ และเปรียบเทียบกับผลการจำลอง CFD ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศเข้า 20, 25 และ 30 °C ที่ความเร็วลมคงที่ 5 m/s การเปรียบเทียบการทดลองและการจำลอง CFD ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 20 °C จากภาพที่ 16-17 ระยะห่าง 4 mm มีการระบายความร้อนสูงสุด (≈ 4 W) และอุณหภูมิผิวต่ำกว่า 25 °C ผล CFD ให้แนวโน้มเดียวกัน แสดงว่าการไหลของอากาศในช่องว่างที่กว้างขึ้นช่วยระบายความร้อนได้มีประสิทธิภาพ ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 25 °C จากภาพที่ 18-19 ระยะห่าง 4 mm มีการระบายความร้อนสูงสุด (≈ 4.1 W) ซึ่งมากกว่า 3 mm (≈ 2 W) และ 2 mm (≈ 1 W) อย่างชัดเจน อุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 25–28 °C สอดคล้องกับผล CFD ที่อุณหภูมิอากาศเข้า 30 °C จากภาพที่ 20-21 ความร้อนที่ถูกระบายออกสูงสุดถึง 12 W ที่ระยะห่าง 4 mm ในขณะที่ 3 mm และ 2 mm อยู่ที่ 11 W และ 8 W ตามลำดับ อุณหภูมิผิวเพิ่มขึ้นแต่ยังคงต่ำกว่า 40 °C ซึ่งอยู่ในช่วงการทำงานที่ยอมรับได้



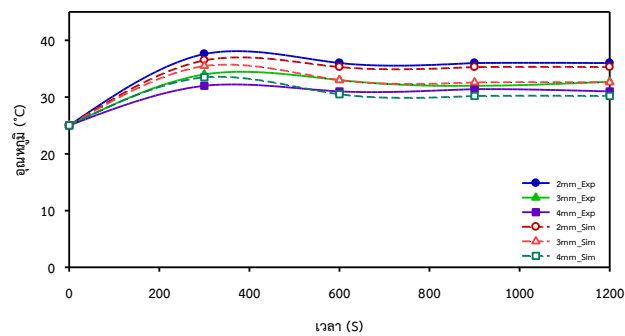
ภาพที่ 16 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C



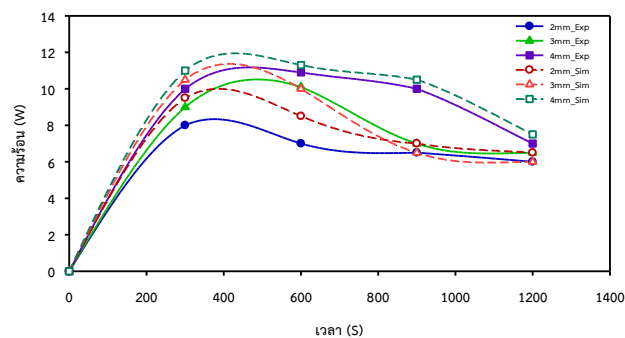
ภาพที่ 17 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C



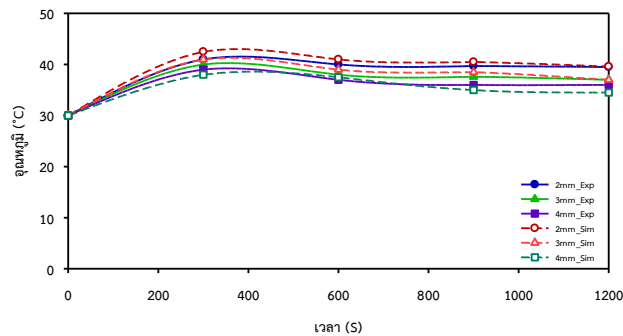
ภาพที่ 18 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



ภาพที่ 19 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



ภาพที่ 20 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD การระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C



ภาพที่ 21 เปรียบเทียบการทดลองกับ CFD อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

สรุปผลที่อัตราการชาร์จ 3C การทดลองยืนยันว่า ระยะห่าง 4 mm ให้ผลการระบายความร้อนได้ดีที่สุดในทุกเงื่อนไข โดยสามารถลดอุณหภูมิผิวเซลล์ให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัย (20–40 °C) แม้ที่อัตราการชาร์จสูงถึง 3C ผลการจำลอง CFD ให้แนวโน้มที่สอดคล้องกับการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในบางจุด แสดงถึงความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ และยืนยันว่า CFD สามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ระยะห่างระหว่างผิวเซลล์แบตเตอรี่มีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อนแบบตกกระทบ โดยระยะห่าง 4 mm ให้ผลการระบายความร้อนสูงสุด ลดอุณหภูมิผิวเซลล์ได้มากกว่า 2 mm และ 3 mm ในทุกอัตราการชาร์จ (1C, 2C และ 3C) และทุกอุณหภูมิอากาศเข้า (20, 25 และ 30 °C) ผลการจำลอง CFD แสดงแนวโน้มสอดคล้องกับการทดลองจริงอย่างใกล้เคียง (ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 8%) แสดงให้เห็นว่า CFD เป็นเครื่องมือที่เชื่อถือได้สำหรับการออกแบบระบบจัดการความร้อนของแพ็คเกจเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน ลดความร้อนสูงสุดของเซลล์ และยืดอายุการใช้งาน พร้อมลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านที่ผู้เขียนใช้ผลงานอ้างอิงในการเขียนบทความฉบับนี้ และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nagaura, T., & Tozawa, K. (1990). Lithium ion rechargeable battery. *Progress in Batteries & Battery Materials*, 9, 209–217.
- [2] Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359–367.
- [3] Goodenough, J. B., & Park, K. S. (2013). The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167–1176.
- [4] Bandhauer, T. M., Garimella, S., & Fuller, T. F. (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(3), R1–R25.
- [5] Spotnitz, R., & Franklin, J. (2003). Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 113(1), 81–100.

- [6] Chen, M., & Evans, J. W. (1993). Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 140(7), 1833–1838.
- [7] Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554–4571.
- [8] Saw, L. H., Ye, Y., & Tay, A. A. O. (2016). Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling. *Applied Energy*, 177, 783–792.
- [9] Xu, X., et al. (2017). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system with mini-channel cold plates. *Energy Conversion and Management*, 150, 77–85.
- [10] Panchal, S., et al. (2018). Thermal management of lithium-ion pouch cell with indirect liquid cooling using cooling plate. *Applied Thermal Engineering*, 123, 501–512.
- [11] Mahamud, R., & Park, C. (2011). Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management. *Applied Energy*, 94, 143–151.
- [12] Patil, A., et al. (2008). Development of high power lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 163(1), 282–300.
- [13] Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., & Tay, A. A. O. (2012). Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 32, 36–48.
- [14] Lu, Z., et al. (2016). Thermal management of densely-packed EV battery with forced air cooling strategies. *Energy Procedia*, 88, 682–688.
- [15] Rao, Z., Qian, Z., & Kuang, Y. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514–1522.
- [16] Ministry of Energy Thailand. (2022). Thailand's National Energy Plan and EV Roadmap.
- [17] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (5th ed.). Wiley.
- [18] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [19] Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer* (4th ed.). Wiley.
- [20] White, F. M. (2006). *Viscous Fluid Flow* (3rd ed.). McGraw-Hill.

การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อแนวทางการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะ ใช้งานเป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำ

Economic Evaluation for Use Goat Dung Pellets as Boiler Fuel

ชินวร ศุภวงศ์¹ และ ชานนท์ บุญมีพิพิธ*

Chinnavon Suphawong¹ and Chanon Bunmephiphit*

¹ การจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73170

¹ Smart Energy and Environmental Management, Rattanakosin College for Sustainable Energy and
Environment, Rajamangala

University of Technology Rattanakosin, Nakhonpathom 73170, Thailand

¹Corresponding author: Tel.: 0847772994 E-mail address: Chanon.bun@rmutr.ac.th

Abstract

The rising demand for energy in economic and industrial sectors has reinforced dependence on fossil fuels, despite their high calorific value. However, fossil energy sources are constrained by limited availability, high import costs, and adverse environmental impacts, particularly greenhouse gas emissions that drive global warming. Biomass energy has emerged as a sustainable alternative, with goat manure, a product of livestock farming, demonstrating potential as a pelletized fuel. Experimental characterization revealed that goat-manure pellets have a calorific value of 9.29 MJ/kg, a moisture content of 12.14%, a fixed carbon content of 10.35%, an ash content of 41.38%, and a volatile matter content of 36.13%, which did not comply with the limits specified in the Thai Industrial Standard (TIS 2772-2560). However, when goat manure pellets replaced fuel oil in a 1-ton boiler, the economic assessment indicated a notable reduction in fuel costs, with a positive Net Present Value (NPV), a satisfactory Internal Rate of Return (IRR), and a payback period of approximately 3.29 years. Furthermore, the use of goat-manure pellets can mitigate CO₂ emissions by approximately 1.841 tons per day. These findings underscore the dual benefits of goat-manure pelletizations as a viable waste-to-energy pathway, offering both economic feasibility and environmental sustainability.

Keywords: Biomass Energy, Goat Manure, Pellet Fuel, Fixed Carbon, Economics

บทคัดย่อ

ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นในภาคเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมได้ส่งผลให้เกิดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้น แม้ว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลจะมีค่าความร้อนสูง แต่ก็มีข้อจำกัดด้านปริมาณที่มีอยู่จำกัด ต้นทุนการนำเข้าสูง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน พลังงานชีวมวลจึงได้กลายเป็นทางเลือกที่ยั่งยืน โดยมูลแพะซึ่งเป็นผลผลิตจากการเลี้ยงสัตว์แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำมาอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์เชิงทดลองพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะมีค่าความร้อนเท่ากับ 9.29 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่ความชื้น 12.14% และมีคาร์บอนคงเหลือ 10.35% ปริมาณเถ้า 41.38% และสารระเหย (36.13%) ไม่สอดคล้องกับขอบเขตที่กำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2772-2560) แต่เมื่อมีการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะมาใช้ทดแทนน้ำมันเตาในหม้อต้มไอน้ำ ขนาด 1 ตัน ผลการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าการลดต้นทุนเชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นบวก อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ และระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3.29 ปี. นอกจากนี้ การใช้เชื้อเพลิง

อัดเม็ดจากมูลแพะยังสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ประมาณ 1.841 ตันต่อวัน ผลการศึกษานี้จึงเน้นย้ำถึงประโยชน์สองด้านของการอัดเม็ดมูลแพะในฐานะทางเลือกการจัดการของเสียที่สามารถผลิตพลังงานได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม.

คำสำคัญ: พลังงานชีวมวล, มูลแพะ, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, คาร์บอนคงตัว, เศรษฐศาสตร์

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจแต่พลังงานส่วนใหญ่ที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน มีจำกัดและไม่สามารถทดแทนได้ทันเวลา ทำให้ต้องพัฒนาพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานชีวมวลจากอินทรีย์สารของพืชและสัตว์ รวมถึงพลังงานแสงอาทิตย์ น้ำ ลม และนิวเคลียร์ พลังงานชีวมวลได้รับความนิยมเพราะมีราคาถูก เป็นพลังงานสะอาดและช่วยลดการปลดปล่อย ก๊าซเรือนกระจก (GHG) ซึ่งส่วนใหญ่ปัจจุบันอยู่ภาคพลังงานสูงถึง 73 % ส่งผลต่อภาวะโลกร้อนอย่างมากที่สุด อีกทั้งยังสนับสนุนการใช้ทรัพยากรจากการเกษตรในประเทศไทย สร้างเชื้อเพลิงจากมูลสัตว์และผลิตปุ๋ยจากของเหลือจากการเกษตรและปศุสัตว์ พลังงานชีวมวลมีบทบาทสำคัญต่อการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งเสริมเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และพัฒนาคุณภาพชีวิตมนุษย์และสิ่งมีชีวิต โดยสามารถนำไปได้ทั้งในบ้านเรือน การเกษตร และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ถือเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืนในหลายมิติ

พลังงานชีวมวล เป็นพลังงานที่มาจากสารอินทรีย์ที่สามารถกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและผลิตพลังงานได้ โดยสารอินทรีย์จะได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือทางการเกษตร และมูลสัตว์ [1] เป็นต้น พลังงานชีวมวลสามารถนำมาเผาไหม้ เพื่อแปรรูปเป็นพลังงานความร้อน หรือผลิตพลังงานไฟฟ้า สามารถนำมาทดแทนพลังงานฟอสซิลที่ประเทศนำเข้า ซึ่งพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ช่วยรักษาสภาพแวดล้อม รวมถึงเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและสามารถหาได้ทุกที่ในประเทศไทย การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล จากการวัสดุเหลือจากการเกษตร วัชพืช และมูลสัตว์ [2] ซึ่งแต่ละประเภทของชีวมวลมีแนวทางการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในเชิงเทคนิคและวิธีการผลิต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความชื้นของวัตถุดิบ [3] ก่อนเข้ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล และอัตราส่วนที่ศึกษาของแต่ละงานวิจัย ประกอบด้วย การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไผ่ร่วมกับไบโอดีเซล [4] ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย ที่เป็นเศษพืชเหลือจากงานเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม [4] มูลสุกร มูลไก่ [5] มูลวัว มูลเป็ด แกลบ ขี้เลื่อย และใบมะม่วง ขุยมะพร้าวและชีวมวลเหลือในชุมชน [1] พบว่าโดยทั่วไปขนาดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm [3] และความยาว 15-20 mm หรือแล้วแต่การนำไปงาน

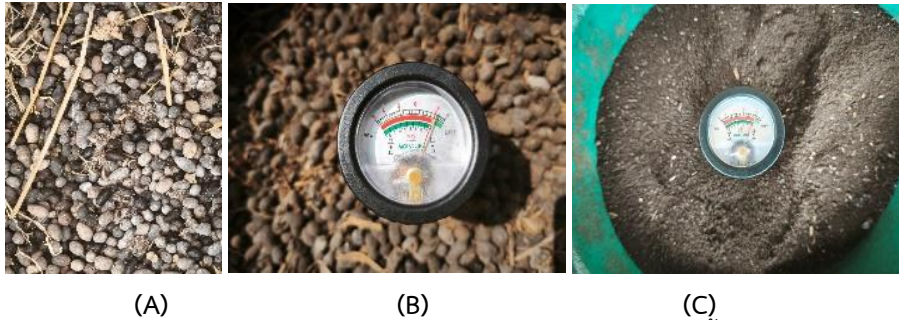
ดังนั้นในการศึกษานี้ ผู้วิจัยมีความสนใจต่อการศึกษาความเหมาะสมต่อการนำมูลแพะมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทให้ความร้อน ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเป็นเชื้อเพลิง และประเมินความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ ประกอบด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) อัตราส่วน ผลตอบแทนต่อเงินลงทุน (Benefit-Cost Ratio, B/C) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ในการใช้งานเพื่อทดแทนน้ำมันเตาของหม้อไอน้ำ Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1 Ton ใช้ชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะ เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

วิธีการวิจัย

1. กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากมูลแพะ

1.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ใช้เครื่องวัดความชื้นในดิน (Capacitance) สำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดใช้มูลแพะมีลักษณะเป็นเม็ด คล้ายเม็ดมะขาม โดยนำมูลแพะแยกเศษผงเจือปนออก แสดงดังภาพที่ 1(A,B) และนำเข้าเครื่องตีปั่นผง วัดความชื้น อ่านได้ 1 ค่าความหนาแน่น 290 Kg/m³ แสดงดังภาพที่ 1(C) นำผงมูลแพะผสมน้ำให้มีความชื้นเพียงพอจะให้ได้สามารถจับตัวเป็นก้อนได้ เนื่องจากกรณีศึกษานี้ใช้ชีวมวลอย่างเดียวคือมูลแพะ ใช้น้ำเป็นส่วนผสม 1: 0.8 คลุกเคล้าให้มีความชื้น 8 ค่าความหนาแน่น 410 Kg/m³ ต่อรอบกระบวนการอัดเม็ด ดังแสดงในรูป 2(A-B) ก่อนอัดเม็ด ต้องอุ่นเครื่องอัดเม็ดโดยสตาร์ทเครื่องยนต์ ประมาณ 10 -15 นาที อุณหภูมิ หัวอัด Flat Die ประมาณ 60 องศา

1.2 กระบวนการอัดเม็ดมูลแพะและลดความชื้นดังแสดงดังภาพที่ 2(A-F) โดยการนำมูลแพะที่มีความชื้นเหมาะสมนั้นลำเลียงหรือโรยเข้าสู่เครื่องอัดเม็ด อัตราการป้อน 40 กก./ชั่วโมง แสดงในรูป 2(C) มูลแพะจะถูกลูกกลิ้งบดอัดกระทั่งผ่านรูของถาดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. และไหลออกมาจากเครื่องอัด แสดงในรูปที่ 2(D) อย่างต่อเนื่อง และมูลแพะอัดเม็ดยังไม่ถึงแม้จะถูกอัดด้วยแรงดันสูงและมีอุณหภูมิทำงานของเครื่องมากกว่า 60°C ได้เม็ดเชื้อเพลิง รูป 2 (E) มีความชื้นสูงทำการลดความชื้นโดยการผึ่งแดด 3 วัน รูป 2 (F)



ภาพที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการอัดเม็ดมูลแพะ (A) มูลแพะที่เหลือทิ้งจากกระบวนการเลี้ยงสัตว์ (B) มูลแพะที่คัดส่งปนเปื้อนออก และ (C) มูลแพะที่ผ่านกระบวนการตีปน



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตมูลแพะอัดเม็ด (A) มูลแพะที่ตีปนจนมีขนาดเล็ก (B) การเพิ่มความชื้นให้มูลแพะเพื่อให้สามารถจับตัวเป็นก้อนได้ (C) เครื่องอัดเม็ด (D) ลักษณะการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (E) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความชื้นสูง และ (F) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 12.14

1.3 การทดสอบคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดขึ้นรูปแบบอัดเม็ด โดยใช้ชีวมวลตัวอย่างจากนั้นอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และเก็บตัวอย่างทดสอบ การวิเคราะห์สมบัติ ประกอบไปด้วย ความหนาแน่น (Bulk Density มาตรฐาน ASTM E873-62) ,ความชื้น (Moisture มาตรฐาน ASTM E 871) , ปริมาณเถ้า (Ash มาตรฐาน ASTM D1102) ,ปริมาณสารระเหย (Volatile Mater มาตรฐาน ASTM E 872) ,ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon มาตรฐาน ASTM E 872) ,ค่าความร้อน (Heating value) ด้วยเครื่อง Boom calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 , การวิเคราะห์เชิงการเผาไหม้ TG/DTA เครื่อง THERMORAIMETIC ANALYZER ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 Tarsus . เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ C,H,N,S ด้วยเครื่อง ELEMENTAL ANALYZER ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Flash Smart

2. การวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) อัตราผลตอบแทนของโครงการ คือ อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ที่ทำให้ค่า NPV มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น อัตราผลตอบแทนของโครงการจึงได้แก่อัตราดอกเบี้ยหรือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้ NPV=0 สำหรับการคำนวณอัตราผลตอบแทนทางการเงิน เพื่อหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{\text{Benefit}}{(1+IRR)^t} - \frac{\text{Cost}}{(1+IRR)^t} \quad (1)$$

โดยที่	IRR	คืออัตราผลตอบแทนทางการเงินตราสุดท้ายที่ยอมรับได้
	n	คืออายุโครงการ
	t	คือจำนวนปีโครงการ
	Cost	มูลค่าของต้นทุนในปีที่ t (บาท)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) การตัดสินใจลงทุนอาจมีทั้งแบบเดียว หรือหลายแบบพิจารณา ร่วมกันได้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) มูลค่าปัจจุบัน หมายถึง มูลค่าผลตอบแทนที่เป็นมูลค่าปัจจุบัน ซึ่ง อาจแปลงมาจากมูลค่า ผลตอบแทนรายคาบหรือผลตอบแทนในอนาคต สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{B_t - C_t}{(1+K)^t} \quad (2)$$

โดยที่	NPV	คือมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิตลอดอายุโครงการ
	n	คืออายุโครงการ
	t	คือจำนวนปีโครงการ
	B _t	คือมูลค่าผลตอบแทนเกิดขึ้นในปี t(บาท)
	C _t	คือมูลค่าต้นทุนในปี t(บาท)
	K	คืออัตราดอกเบี้ย (Discount rate) 7.75 %

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PP) หมายถึงระยะเวลาที่ทำให้ผลตอบแทนมีค่าเท่ากับมูลค่าที่ ลงทุนนั้น คือการพิจารณาจำนวนปีที่ ได้รับผลประโยชน์คุ้มกับค่าใช้จ่ายในการลงทุนตั้งนั้นหากดำเนินงานแล้วผลตอบแทน หรือ ผลประโยชน์ คุ้มกับจำนวนเงินที่ลงทุนได้รวดเร็วก็จะดีเพราะความเสี่ยงน้อยและผู้ลงทุนสามารถนำเงินที่ ถอนทุนได้ไปลงทุน เพื่อหาประโยชน์ในกิจการอื่นๆ ต่อไป

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Cost of Investment}}{\text{Average Annual Cash Flow}} \quad (3)$$

อัตราส่วนผลตอบแทนต่อเงินลงทุน (Benefit-Cost Ratio, B/C) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อเงินลงทุน คืออัตรา- ส่วน ระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนหรือมูลค่าผลตอบแทนของโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของกระแสต้นทุนหรือ ต้นทุนรวมของโครงการ ค่าพารามิเตอร์นี้ใช้วัดความคุ้มค่าของโครงการ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$B/C \text{ Ratio} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (4)$$

จากการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมูลแพะที่ใช้มูลแพะเป็นสื่งเหลือทิ้งจากการทำเกษตรกรรมการเลี้ยงแพะ ของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ใช้เป็นพลังงานชีวมวลทดแทนน้ำมันเตาสำหรับเชื้อเพลิงให้ความร้อน ของหม้อต้มไอน้ำประเภทสตีมบอยเลอร์ท่อไฟชีวมวล Fire Tube Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1 Ton แสดงดังภาพที่ 4 และคุณสมบัติดังตารางที่ 1



คุณลักษณะเฉพาะของสตีมบอยเลอร์ท่อไฟชีวมวล Fire Tube Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1 Ton

- รุ่น Type	สตีมบอยเลอร์ ท่อไฟนอน เชื้อเพลิงชีวมวล Fire Tube Boiler
- เชื้อเพลิง Fuel	น้ำมันเตากลาง ค่าความร้อน 42 MJ/Kg
- น้ำมันเตาความหนาแน่น	0.95 Kg/Liter ราคา 22 Bath/Liter
- ประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ	75-80 %
- แรงดันใช้งาน	7.0-10 Bar / Temp.160-180 °C
- แรงดันสูงสุด	12.0 Bar Max.
- ทดสอบแรงดัน	25.0 Bar
- Operation	8 Hr/day
- ปริมาณการใช้น้ำมันเตากลาง	575.36 Liter/Day
- ค่าน้ำมัน	12,657.92 Bath/Day

ลำดับ	ขนาด หม้อไอน้ำ Ton	พลังงาน กิโล แคลอรี	กำลัง กิโลวัตต์	BHP แรงม้า หม้อน้ำ	ปริมาณการ น้ำในเตากลาง (ลิตร/วัน)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท)		หมายเหตุ ประหยัด วันละ
						เดิม 22 บาท/ลิตร	ชีวมวลเม็ด 17.78 บาท	
1	1.0	600	700	63.50	575.36	12,657.92	10,080.87	2,3,013.87

1. กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากมูลแพะ ไม่ฝังแฉดลดความชื้นภาพที่ 2(E) ความชื้น 47% มีผิวที่เรียบ โครงสร้างประสานยึดเกาะและจับตัวกันได้ดี สีของมูลแพะอัดเม็ดสีน้ำตาล ความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 12.56 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6.0 mm. Bulk Density 790 kg/m³ มีค่าความร้อน 1430.68 Cal/g หรือ 5.98 MJ/Kg และหลังลดความชื้นฝังแฉด 3 วัน แสดงดังภาพที่ 2(F) ลักษณะทางกายภาพของมูลแพะอัดเม็ดมีผิวที่เรียบ ความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 9.33 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4.37 mm. Bulk Density 869 kg/m³

2.การวิเคราะห์คุณสมบัติของมูลแพะอัดเม็ด ความชื้น 12.14 % ทดสอบมาตรฐาน ASTM E871-82:2013 ,ปริมาณสารระเหย 26.13 % ทดสอบมาตรฐาน ASTM E872-82:2013 , ปริมาณเถ้า 41.38 % ทดสอบมาตรฐาน ASTM E 1534-93:2013 , ปริมาณคาร์บอนคงตัว 10.35 % ทดสอบมาตรฐาน ASTM D3172 ความร้อนมีค่า 2,220.26 Cal/g หรือ 9.29 MJ/Kg โดยใช้เครื่อง Boom calorimeter , วิเคราะห์ CHNS/O Carbon (C) 25.23 , Hydrogen (H) 3.23 ,Nitrogen (N) 2.75 Sulfur (S) 0.47 ใช้เครื่อง Elemental Analyzer , วิเคราะห์ค่าการสลายตัว แสดงพฤติกรรมการเผาไหม้ โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analysis ของชีวมวลเชื้อเพลิงอัดเม็ดมูลแพะ โดยแบ่ง เป็นช่วงอุณหภูมิเป็น 3- ระยะหลักวิเคราะห์ TG/DTG ตามช่วงอุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 85–276 °C) เป็นขั้นตอนเตรียมก่อนการเผาไหม้จริง , ช่วงอุณหภูมิปาน

กลาง (ประมาณ 276–332 °C) เป็นช่วงที่มีการเผาไหม้หลักของชีวมวล ,ช่วงอุณหภูมิสูง (ประมาณ 660–678 °C) เป็นการสลายตัวของ lignin และสารอินทรีย์ บางชนิด

3. การวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์

ปัจจัยต่อการพิจารณาการเปรียบเทียบเมื่อนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะเข้าไปใช้งานเพื่อลดการใช้พลังงานเดิมลงพบว่าเมื่อ Pellets Fuse Goat manure moisture 47% ทำการผึ่งแดด 3 วัน ความชื้นลดลงเหลือ 12.14% น้ำหนักลดลง 16% โดยคำนวณจากค่าความหนาแน่น จากการผลิตชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะอัตราการผลิต 400 kg/Day นำมาผึ่งแดด 3 วัน คงเหลือ 336 kg นำมาคำนวณหาต้นทุนเป็น kg/Bath ต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะ (ต้นทุนวัตถุดิบ) กรณีการผลิตขั้นต่ำ 400 kg โดยมีมูลค่าโลกรัมละ 1.5 บาท รวมต้นทุนวัตถุดิบ 600 บาท แรงงานบุคลากรในการผลิต (2 คน) คนละ 300 บาท รวมทั้งสิ้น 600 บาท ต้นทุนน้ำมันเชื้อเพลิง 117.12 บาท รวมรายจ่ายต้นทุน 1,317.12 บาท/วัน ชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตได้ต้องทำการให้แห้งด้วยการผึ่งแดดอย่างน้อย 3 วัน ผลผลิตที่พร้อมใช้งานเมื่อทำให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือ 336 kg เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิต 3.92 Bath/kg

ปริมาณความร้อนของชีวมวลอัดเม็ดจากมูลแพะจะนำไปพิจารณาเพื่อทดแทนน้ำมันเตาของหม้อไอน้ำขนาด 1 Ton ซึ่งโดยปกติจะใช้น้ำมันเตา 575.36 ลิตร/วัน ต่อการใช้งานแต่ละวัน น้ำมันเตาจะมีค่าความร้อนเท่ากับ 42 MJ/kg จึงทำให้การใช้งานน้ำมันเตาในแต่ละวันจะต้องการค่าพลังงาน 24,165.12 MJ/Day เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวพิจารณาเพื่อนำชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 12.14% มีค่าความร้อน 9.26 MJ/kg เท่ากับ 2,609.63 kg/Day ต้นทุนในการใช้น้ำมันเตาวันละ 12,657.92 Bath/Day ซึ่งมีราคาต่อลิตร 22.00 Bath/Liter และเมื่อนำชีวมวลอัดเม็ด 2,609.63 Kg/Day จะสามารถนำมาทดแทนเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเตา โดยชีวมวลอัดเม็ดมีราคา 3.92 Bath/kg รวมเป็นทั้งสิ้น 10,229.75 Bath/Day ซึ่งมีผลการประหยัด 2,428.17 Bath/Day จะมีค่าการประหยัดเมื่อทดแทนน้ำมันเตา 4.22 Bath/Liter และกำหนดโครงการต้องผลิตชีวมวลอัดเม็ดวันละ 2.6 Ton/Day เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ Boiler ขนาด 1 Ton ทดแทนได้ และการลงทุนเครื่องจักรโดยเพิ่มจำนวนเครื่องจักร เครื่องตีป่นราคา 194,184.00 บาท เครื่องอัดเม็ด Flat Die ราคา 485,460.00 บาท รวมเท่ากับ 679,644.00 บาท อายุโครงการ 5 ปี

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์จากการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิง

พารามิเตอร์	เม็ดเชื้อเพลิงมูลแพะ	หน่วย
กำลังการผลิต	2,639.63	กก./วัน
ต้นทุนการลงทุน	679,644.00	บาท
วัสดุต้นทุน	4,592.96	บาท
ต้นทุนการดำเนินการ	6,387.91	บาท
ค่าความร้อนรวม	23,013.40	เมกะจูล/วัน
ต้นทุนพลังงานเฉพาะ	10,980.87	บาท
การประหยัดพลังงาน	สมดุล	น้ำมันเตา = ชีวมวล
การประหยัดพลังงาน ต้นทุน/หน่วย	4.22	บาท/ลิตร
ต้นทุนในการกำจัด/หน่วย	0.00	บาท
ประหยัดรวม บาท/วัน	2,428.17	บาท/วัน
การประหยัดเป็นร้อยละ	20.00	%
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ NPV	831,041.34	บาท
อัตราผลตอบแทนภายใน IRR	23.5	%
อัตราผลตอบแทนต่อเงินทุน B/C	1.30	
ระยะเวลาคืนทุน Payback Period	3.29	ปี

สรุปการวิจัย

การผลิตเชื้อเพลิงเม็ดชีวมวลมูลแพะ สามารถขึ้นรูปได้ โดย ความหนาแน่น,เส้นผ่าศูนย์กลาง ,ความยาว อยู่ในเกณฑ์ ความชื้น แต่ ค่าความร้อน และ เถ้า ไม่อยู่ในเกณฑ์ มอก.2772-2560 ซึ่งสามารถพัฒนา กระบวนการผลิตได้ หลายวิธี เช่น การลดความชื้นโดยการผึ่งแดด เพิ่มจำนวนวัน และ นำของเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม กากตะกอนดีแคเตอร์ , กากตะกอนน้ำเสีย[13]ใช้ผสมกับมูลแพะ หรือการใช้ ขบวนการนำมูลแพะมาเผาถ่านแบบชาโคล[11] จากงานวิจัยอื่น พบว่า มูลควาสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงที่ใช้ในบ้านเรือนได้ เช่น ถ่าน เป็นต้น[9] ผู้วิจัยเก็บรวบรวมมูลแพะ จาก ศพก.นายสุขสันต์ เครือแดง วิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงแพะ-แกะ บางสะพานน้อย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ในพื้นที่ มี สมาชิก 10 กลุ่ม มีแพะพ่อพันธุ์รวม 198 ตัว แม่พันธุ์รวม 147 ตัว อื่นๆ 3,176 ตัว [25] ประมาณการมูลแพะ 5,870 Kg/Day [25] สามารถพัฒนาเป็น โครงข่ายในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมูลแพะ เป็นการเพิ่มมูลค่าและให้โอกาสแก่เกษตรกร ในแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียการปศุสัตว์จำนวนมาก เป็นทางเลือกเพิ่มจากการนำมูลแพะไปแปรรูปสำหรับบำรุงดิน จากการทดลองขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงประเภทให้ความร้อน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อการเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาสำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลขนาด 1 Ton นั้นจะมีระยะเวลาในการคืนทุน ภายใน 3.29 ปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] นภาดา วิเชียรพงษ์ และคณะ. (2563). การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขุยมะพร้าวผสมชีวมวลเหลือทิ้ง. PSRU Journal of Science and Technology. 5(3): 112-126 (2020)
- [2] ศิริชัย ต่อสกุล และคณะ. (2558).การออกแบบและสร้างเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยระบบดายนัด. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, หน้า 91-94
- [3] ญัฐกิตติ์ ก้อยผ่านกิจ และคณะ. (2560). การศึกษากระบวนการผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากถั่วแระ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, หน้า 292-298
- [4] อธิรัตน์ จีระมะกร และคณะ. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไผ่ร่วมกับใบอ้อย. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14, หน้า 1040-1047
- [5] ยวรัตน์ เงินเย็น และคณะ. (2561). เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากมูลสุกรและมูลไก่โดยไม้ตัวประสาน. การเกษตรราชภัฏ. RAJABHAT AGRIC. 17 (1) : 8-16 (2018)
- [6] รัฐกร สวัสดิ์แดง และคณะ (2561). การประเมินความเหมาะสมการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจาก เปลือกกะลาเผา วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย ปีที่ 32 ฉบับที่ 1:หน้า 25-31 (2561)
- [7] โกสินทร์ จิรนิรามัย และคณะ (2567) การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและขยะกำพร้าว วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 29 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2567
- [8] ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก (2558). เม็ดเชื้อเพลิงจากไฟ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม 2558
- [9] เสรีย์ ตูประกาย และคณะ (2563) การศึกษาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลควา. วารสารวิจัยรามคำแหง (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2563
- [10] ปัทมา สาสนิช และคณะ (2022).การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งจากฟาร์มจระเข้ผสมชี้เลี้ยงไม้ไผ่อัดเม็ด. Life Sciences and Environment Journal 2022; 23(1): 208-218
- [11] สันติ คู่กระสังข์ และคณะ (2567) การพัฒนาถ่านชีวมวลจากมูลแพะในการสร้างมูลค่าเพิ่มของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะในจังหวัดตาก วารสารสังคมศาสตร์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2567 หน้า 46

- [12] ศิวโรจน์ ศิริลักษณ์ (2555) แนวทางสำหรับการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินเกรดต่ำด้วยเทคนิค “NP & P Separation” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม 2555
- [13] สุกฤษ มณีรัตน์ (2567). การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนน้ำเสีย
วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ปี
การศึกษา 2567
- [14] นฤมล ภานำภา (2554) การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟต์เพื่อการประโยชน์ในด้านพลังงานเชิง
พาณิชย์และอุตสาหกรรม สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
- [15] สนทยา มูลศรีแก้ว และคณะ (2555) การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลแพะ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ กองทุนส่งเสริมงานวิจัยปี 2555
- [16] รอมสัน หมดมานัง (2566) การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกทุเรียน
ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้ ประจำปี 2566 มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
- [17] นิกรศิลป์ บุญสมบัติ (2560) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิส แบบเร็ว ของเหง้า
มันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ
SWU Engineering Journal (2017) 12(2), 58-70 วารสารวิศวกรรมศาสตร์
- [18] ลักขณา พิทักษ์ (2563) การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากใบอ้อย
Industrial Technology Journal ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2563
- [19] รัชมี สิทธิชนแก้ว (2560) การผลิตและการประเมินศักยภาพของหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดโดยน้ำหมักชีวภาพ
เป็นตัวประสาน เพื่อเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน
- 2560
- [20] จุฬารักษ์ ชนะถาวร (2562) ผลของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟต่อสมบัติของเชื้อเพลิง ชีว
มวลอัดเม็ด วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ ฉบับที่ มกราคม-มิถุนายน 2562
- [21] กฤติเดช ดวงใจบุญ (2566) การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนน้ำเสียและชีวมวลเพื่อ
พลังงานทดแทน เป็น
วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน เมษายน – มิถุนายน 2566
- [22] จิตรา รุ่งกิจการพานิช (2565) เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อยสำหรับเตาถ่าน ใน
ครัวเรือน วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2565
- [23] เจนศักดิ์ เอกบุญธวัช (2018) ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน
วารสาร มทร.อสาณ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2561
- [24] สุพัตรา บุตรเสรีชัย (2561) การศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านอัดเม็ดจากมูลวัว เพื่อเป็นเชื้อเพลิง
-แข็ง วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2561
- [25] เอกสารข้อมูล เครือข่ายเกษตรกรรมยั่งยืนและข้อมูลพื้นฐานการผลิตแพะ ในพื้นที่ปศุสัตว์เขต 1-9 ประจำปี 2566

การเปรียบเทียบต้นทุนค่าไฟฟ้ารายเดือนก่อนและหลังการใช้งานระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร วิทยาลัยเทคนิคนราธิวาส

A Comparative Study of Monthly Electricity Costs Before and After the Implementation of an On-Grid Rooftop Solar Cell System at Narathiwat Technical College

ธวิวัฒน์ มิส¹ และ ศุภเชษฐ เป้าวิวัฒน์^{1*}

Thawiwat Misa¹ and Supchatt Paowiwat^{1*}

¹สาขาวิชาช่างไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยนราธิวาส มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Narathiwat Technical College,
Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

¹Corresponding author: Tel. : 0838656959. E-mail address: 6591203014@pnu.ac.th

Abstract

This research aimed to (1) compare the electrical power generated by an on-grid solar photovoltaic (PV) system with the electricity consumption recorded in the Provincial Electricity Authority (PEA) bills of a government institution, and (2) examine the correlation and analyze the potential for reducing energy costs in the public sector. The study focused on the installation of a 260.40 kWp on-grid solar PV system at an educational institution. The findings revealed that the system effectively reduced electricity expenses and promoted the use of clean energy. The total electricity cost decreased from 980,462.73 THB in 2023 to 717,851.01 THB in 2024, representing a 26.8% reduction, while electricity consumption decreased by 22.3%. The system generated a total of 107,174.30 kWh per year, equivalent to a financial saving of 450,132.06 THB annually. The economic analysis indicated a return on investment (ROI) of 8.62%, a net present value (NPV) of 618,000 THB, an internal rate of return (IRR) of 7.2%, and a payback period of approximately 11.6 years, confirming the project's long-term financial feasibility. Additionally, the system reduced carbon dioxide (CO₂) emissions by approximately 61.09 tons per year, equivalent to planting 657 trees annually. In conclusion, the 260.40 kWp on-grid solar PV system proved economically and environmentally beneficial, serving as a sustainable model for renewable energy implementation in government institutions.

Keywords: Solar photovoltaic system, On-grid solar, Energy cost reduction, Economic feasibility, Carbon dioxide reduction

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์สองประการ ได้แก่ (1) เพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดกับกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในบิลค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าในองค์กรภาครัฐ และ (2) เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องและวิเคราะห์ศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของหน่วยงานรัฐ ผลการศึกษาการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออนกริด (On-Grid Solar PV System) ขนาด 260.40 กิโลวัตต์พีค (kWp) ในสถานศึกษา พบว่าระบบสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าใช้จ่ายรวมลดลงจาก 980,462.73 บาทในปี พ.ศ. 2566 เหลือ 717,851.01 บาทในปี พ.ศ. 2567 หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 26.8 และปริมาณการใช้ไฟฟ้าลดลงร้อยละ 22.3 ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้รวมทั้งสิ้น 107,174.30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นมูลค่าการประหยัด 450,132.06 บาทต่อปี ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าอัตราผลตอบแทนต่อการลงทุน (ROI) เท่ากับ 8.62 เปอร์เซ็นต์ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 618,000 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 7.2 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาคืนทุนประมาณ 11.6 ปี แสดงให้เห็นว่าโครงการมีความคุ้มค่าในระยะยาว นอกจากนี้ระบบยังสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ 61.09 ตันต่อปี หรือเทียบเท่าการปลูกต้นไม้ 657 ต้นต่อปี โดยสรุป ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 260.40 kWp

มีความคุ้มค่าทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม เป็นแนวทางการใช้พลังงานทดแทนที่มีศักยภาพและสามารถขยายผลสู่หน่วยงานภาครัฐอื่น ๆ ได้อย่างยั่งยืน.

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, โซลาร์เซลล์แบบออนกริด, การประหยัดพลังงานไฟฟ้า, ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์, การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคม ขณะที่การผลิตไฟฟ้ายังคงพึ่งพาพลังงานฟอสซิลเป็นหลัก ซึ่งไม่เพียงมีปริมาณจำกัด แต่ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [4] [5] ดังนั้น การพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าที่สะอาดและยั่งยืนจึงกลายเป็นแนวทางสำคัญที่ได้รับความสนใจในระดับนานาชาติ การบริหารจัดการพลังงานในหน่วยงานภาครัฐถือเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อทั้งมิติเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม หน่วยงานภาครัฐมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูงจากอาคารสำนักงาน สถานที่ราชการ โรงพยาบาล และสถานศึกษาต่างๆ ซึ่งค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญของงบประมาณประจำปีส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานและคุณภาพการให้บริการสาธารณะ [1] [3]

หนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือ ระบบโซลาร์เซลล์ (Solar Cell System) ซึ่งอาศัยแผงโซลาร์เซลล์ในการแปลงพลังงานแสงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ก่อนส่งผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) สำหรับใช้งานจริง [2] [6] ปัจจุบัน ระบบที่ได้รับการติดตั้งอย่างแพร่หลายคือ ระบบโซลาร์เซลล์แบบ ออนกริด (On-Grid System) ซึ่งเชื่อมต่อกับสายส่งของการไฟฟ้าโดยตรง โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบจะถูกนำมาใช้ภายในองค์กร และหากไม่เพียงพอจะดึงพลังงานจากการไฟฟ้ามาชดเชย [1] [5] ข้อได้เปรียบสำคัญของระบบออนกริดคือ มีต้นทุนการลงทุนต่ำกว่าเพราะไม่ต้องติดตั้งแบตเตอรี่สำรอง มีการบำรุงรักษาง่าย และสามารถคืนทุนได้เร็วจากการลดค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือน [3] [8] [10] การประเมินศักยภาพทางเทคนิคของระบบ Solar PV บนหลังคาอาคารได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในหลายประเทศ โดย National Renewable Energy Laboratory (NREL) ได้พัฒนาวิธีการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากหลังคาอาคารในระดับประเทศ [2] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่และปัจจัยด้านสภาพอากาศในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

อย่างไรก็ตาม แม้ระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดจะมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากระบบโซลาร์เซลล์กับกำลังไฟฟ้าที่บันทึกไว้ในบิลค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินความถูกต้อง ความสอดคล้อง และประสิทธิภาพของระบบในเชิงประจักษ์ [3] [7] การเปรียบเทียบดังกล่าวจะช่วยให้เห็นถึงความสอดคล้องของข้อมูล การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบ และผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงของหน่วยงาน งานวิจัยในหลายประเทศได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการประเมินประสิทธิภาพ เช่น Performance Ratio, Capacity Factor, Final Yield และ System Efficiency ในการวัดประสิทธิภาพของระบบ PV [5] [6] โดยเฉพาะในองค์กรภาครัฐ ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณสูง หากสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยลดภาระงบประมาณและเพิ่มศักยภาพด้านการจัดการพลังงานในระดับองค์กรได้อย่างเป็นรูปธรรม [1] [4]

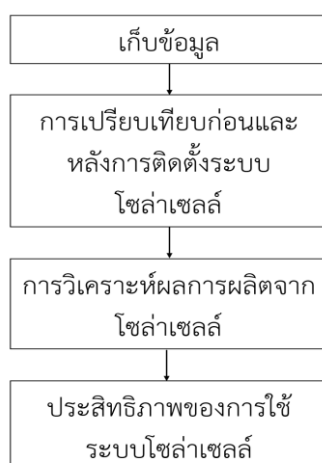
ในบริบทของประเทศไทย รัฐบาลได้ให้ความสำคัญกับการส่งเสริมพลังงานแสงอาทิตย์อย่างจริงจัง โดยมีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนในส่วนผสมของการผลิตไฟฟ้าให้สูงขึ้น ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP) และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) [9] การศึกษาเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์ของระบบ Solar PV แบบ Self-consumption ในประเทศไทยพบว่า แม้จะไม่มีมาตรการชดเชยค่าไฟฟ้าส่วนเกิน การลงทุนในระบบ PV สำหรับกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าในหลายประเภทก็ยังคงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) อยู่ระหว่าง 10-17% [9] นอกจากนี้ การศึกษาล่าสุดยังแสดงให้เห็นว่า ระบบจัดการพลังงานขั้นสูง (Advanced Energy Management System) ที่บูรณาการกับระบบ Solar PV บนหลังคาสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้ 28.59-35.48% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบจัดการพลังงานแบบทั่วไป [4]

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้มีความสำคัญในฐานะที่เป็นการนำข้อมูลเชิงประจักษ์มาใช้ประเมินความคุ้มค่าและประสิทธิภาพของการใช้ระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดในองค์กรภาครัฐ ซึ่งไม่เพียงช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า แต่ยังส่งเสริมการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืน [1] [8] [10] การวิจัยนี้ช่วยให้หน่วยงานภาครัฐสามารถตัดสินใจลงทุนด้านพลังงานหมุนเวียนได้อย่างมีข้อมูลเชิงประจักษ์รองรับ ลดความเสี่ยงที่เกิดจากการประมาณการที่ไม่ถูกต้องแม่นยำ ช่วยในการกำหนดขนาดระบบที่เหมาะสมกับรูปแบบการใช้พลังงานของแต่ละหน่วยงาน และสามารถคาดการณ์ผลตอบแทนทางการเงินได้อย่างเป็นระบบและน่าเชื่อถือ [10] อีกทั้งยังสามารถเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้ระบบโซลาร์เซลล์เพื่อการบริหารจัดการพลังงานในองค์กร และนำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดนโยบายระดับชาติ ส่งเสริมการติดตั้งระบบ PV ในหน่วยงานภาครัฐอย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของประเทศไทยที่กำลังมุ่งสู่เป้าหมาย Carbon Neutrality และมีแผนเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ถึง 22.8 GW ในอีก 25 ปีข้างหน้า [9]

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดกับกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในบิลค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าในองค์กรภาครัฐ
2. เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องและวิเคราะห์ศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของหน่วยงานรัฐ

วิธีการวิจัย



ภาพที่ 1 กระบวนการทำงานโดยรวม

ขั้นตอนที่ 1 การเก็บข้อมูลจากใบแจ้งยอดจากการไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์ เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ติดตั้งบนหลังคาอาคารของวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา มหาวิทยาลัยนครราชสีมาชนครินทร์ จังหวัดนครราชสีมา โดยเป็นระบบแบบออนกริด (On-Grid System) ที่เชื่อมต่อกับ สายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีกำลังติดตั้งรวม 260.40 กิโลวัตต์พีค (kWp) ใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline Silicon) ขนาด 310 วัตต์ต่อแผง จำนวนประมาณ 840 แผง ติดตั้งในทิศใต้ มุมเอียง 10 องศา ระบบควบคุมการทำงานด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิด String Inverter รวมกำลัง 260 กิโลวัตต์ ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าถูกวัดจากมิเตอร์ฝั่งกระแสสลับ (AC) และบันทึกผ่านระบบ Monitoring Portal ของอินเวอร์เตอร์ เพื่อเก็บค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW) และแรงดันไฟฟ้า (V) สำหรับเปรียบเทียบกับข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากใบแจ้งหนี้ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในช่วงเดือนมกราคม 2566 ถึง ธันวาคม 2567



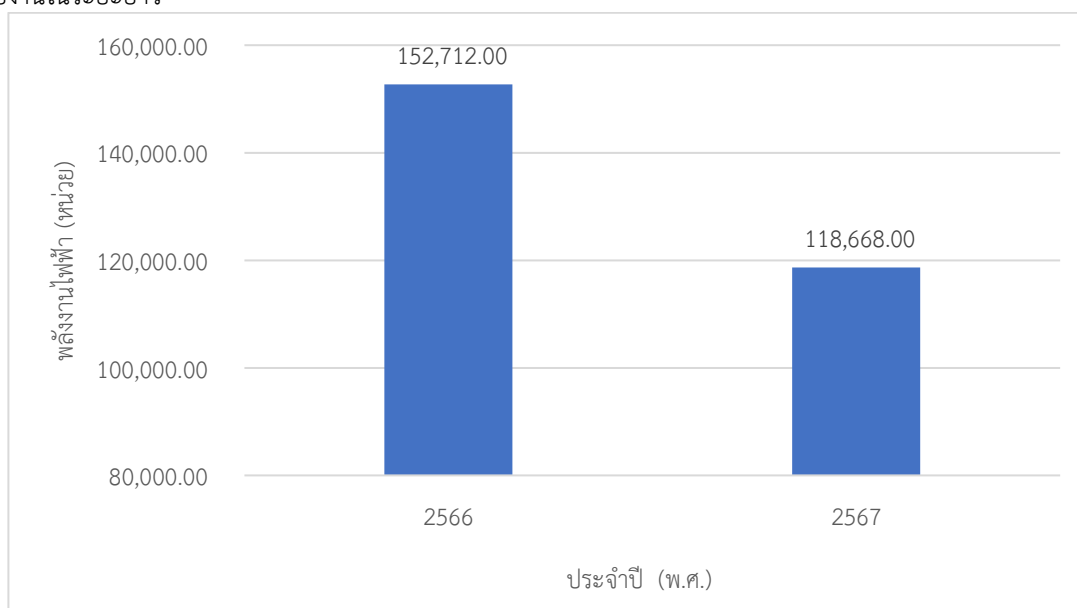
ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือน ระหว่างปี พ.ศ. 2566 และ พ.ศ. 2567

เดือน	ปี 2566		ปี 2567	
	จำนวนเงิน	หน่วยค่าไฟฟ้า	จำนวนเงิน	หน่วยค่าไฟฟ้า
มกราคม	108,912.90	15,372.00	78,578.70	13,056.00
กุมภาพันธ์	108,177.36	15,306.00	56,860.98	9,180.00
มีนาคม	96,159.18	14,478.00	40,725.07	7,146.00
เมษายน	68,622.02	10,116.00	37,805.39	6,636.00
พฤษภาคม	71,920.55	11,604.00	58,393.24	9,828.00
มิถุนายน	90,978.07	13,968.00	82,675.55	13,884.00
กรกฎาคม	115,324.30	18,090.00	82,118.73	13,884.00
สิงหาคม	73,261.40	10,584.00	67,983.01	10,914.00
กันยายน	63,066.12	10,320.00	64,465.18	10,626.00
ตุลาคม	42,622.49	7,650.00	42,622.49	6,144.00
พฤศจิกายน	71,282.42	12,600.00	60,082.51	9,630.00
ธันวาคม	70,135.92	12,624.00	45,540.16	7,740.00
รวม	980,462.73	152,712.00	717,851.01	118,668.00

ในภาพรวม การเปรียบเทียบระหว่างสองปีชี้ให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในปี 2567 ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ารวม 107,174.30 kWh ซึ่งคิดเป็นมูลค่าเทียบเท่า 450,132.06 บาท หากคิดตามอัตราค่าไฟเฉลี่ย 4.2 บาทต่อหน่วย อย่างไรก็ตาม มูลค่าการประหยัดจริงจากใบแจ้งค่าไฟฟ้าอยู่ที่ 262,611.72 บาท เท่านั้น ซึ่งคิดเป็นประมาณ 58.3% ของมูลค่าพลังงานที่ผลิตได้ทั้งหมด

ความแตกต่างดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากลักษณะของระบบที่ใช้ ซึ่งเป็นระบบ ออนกริดแบบไม่มีการหักล้างพลังงานส่วนเกิน (No Export Balance / Net Metering) ทำให้พลังงานที่ผลิตเกินความต้องการใช้งานในบางช่วงเวลาไม่สามารถส่งคืนเข้าสู่ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้ ส่งผลให้พลังงานส่วนเกินดังกล่าวไม่ถูกนำมาคิดเป็นการประหยัดในบิลค่าไฟฟ้าจริง นอกจากนี้ ค่าไฟฟ้ายังประกอบด้วยค่าใช้จ่ายคงที่ เช่น ค่าบริการรายเดือน และค่า Ft ที่ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยตรง

ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีส่วนช่วยลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีเพียง “ความสัมพันธ์บางส่วน (Partial Correlation)” ระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และการลดลงของค่าไฟฟ้าที่ชำระจริง ทั้งนี้ จากการคำนวณพบว่า พลังงานที่ผลิตได้ประมาณ 31.8% ถูกนำมาใช้ทดแทนการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยตรง ซึ่งยังคงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดภาระค่าใช้จ่ายของหน่วยงานในระยะยาว



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า ระหว่างปี พ.ศ. 2566 และ พ.ศ. 2567

จากภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมระหว่างปี พ.ศ. 2566 และ พ.ศ. 2567 พบว่า ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี 2567 มีค่า 118,668 หน่วย ลดลงจากปี 2566 ที่มีค่า 152,712 หน่วย คิดเป็นการลดลง ประมาณ 22.3% ผลการลดดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านพลังงานของสถานศึกษาอย่างชัดเจน

การลดลงนี้อธิบายได้ว่าเป็นผลจากการนำ ระบบผลิตไฟฟ้าระบบโซลาร์เซลล์มาใช้งานในปี 2567 ซึ่งทำให้สถานศึกษา สามารถผลิตไฟฟ้าใช้เองบางส่วน ลดการพึ่งพาพลังงานจากการไฟฟ้าโดยตรง และช่วยลดปริมาณหน่วยการใช้ไฟฟ้าที่ต้องซื้อ จากภาครัฐอย่างมีนัยสำคัญ

กล่าวโดยสรุปพบว่าจากการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า จึงเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่ชี้ให้เห็นว่าการ ลงทุนในระบบโซลาร์เซลล์ส่งผลโดยตรงต่อการลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี 2567 เมื่อเทียบกับปี 2566 ซึ่งยังเป็นปีที่ยัง ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าระบบโซลาร์เซลล์ยังไม่เต็มที่ จึงแสดงถึงความคุ้มค่าและประสิทธิภาพของการใช้พลังงานทดแทน ในบริบท ของสถานศึกษา

ตารางที่ 2 ผลการผลิตไฟฟ้าและมูลค่าการประหยัดจากระบบโซลาร์เซลล์ ปี พ.ศ. 2567

ปี 2567			
เดือน	กำลังไฟฟ้าสูงสุด(kWp)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้(kWh)	ประหยัดเงิน (หน่วย: 4.2 บาท)
มกราคม	260.40	2,377.31	9,984.70
กุมภาพันธ์	260.40	2,274.26	9,551.89
มีนาคม	260.40	2,442.65	10,259.13
เมษายน	260.40	10,079.26	42,332.89
พฤษภาคม	260.40	11,024.08	46,301.14
มิถุนายน	260.40	3,104.40	13,038.48
กรกฎาคม	260.40	131.78	553.48
สิงหาคม	260.40	3,506.87	14,728.85
กันยายน	260.40	15,954.03	67,006.93

ตารางที่ 2 ผลการผลิตไฟฟ้าและมูลค่าการประหยัดจากระบบโซลาร์เซลล์ ปี พ.ศ. 2567 (ต่อ)

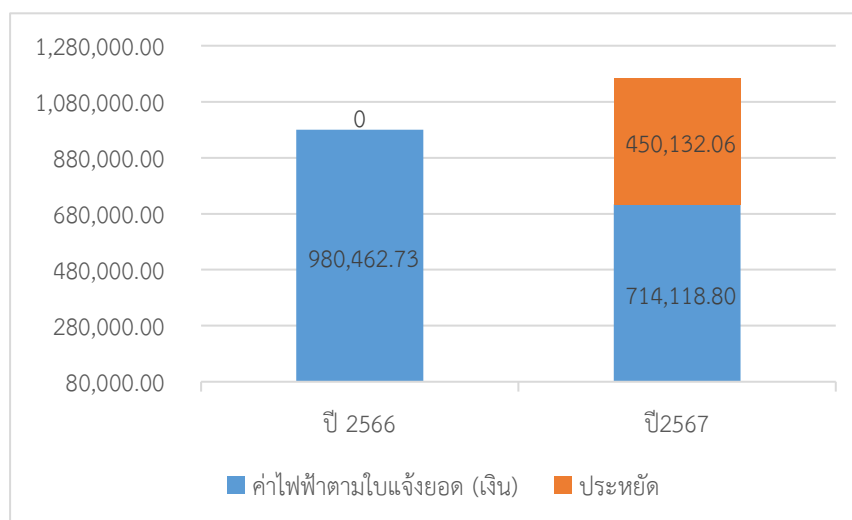
ปี 2567			
เดือน	กำลังไฟฟ้าสูงสุด(kWp)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้(kWh)	ประหยัดเงิน (หน่วย: 4.2 บาท)
ตุลาคม	260.40	24,697.35	103,728.87
พฤศจิกายน	260.40	17,553.31	73,723.90
ธันวาคม	260.40	14,029.00	58,921.80
รวม	260.40	107,174.30	450,132.06

จากตารางที่ 2 ผลการติดตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออนกริด (On-Grid Solar PV System) ขนาด 260.40 kWp ตลอดปี พ.ศ. 2567 พบว่า ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รวมทั้งสิ้น 107,174.30 kWh คิดเป็นมูลค่าการประหยัดทางเศรษฐกิจประมาณ 450,132.06 บาท โดยคำนวณจากอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.2 บาทต่อ หน่วย

เมื่อพิจารณาในรายเดือน พบว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความผันผวนตามฤดูกาล โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤศจิกายน ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อนและต้นฤดูหนาวของประเทศไทยที่มีรังสีอาทิตย์สูงและท้องฟ้าแจ่มใส ส่งผลให้ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในปริมาณมาก โดยเฉพาะในเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นเดือนที่มีค่าการผลิตสูงสุด 24,697.35 kWh คิดเป็นมูลค่าการประหยัดสูงสุด 103,728.87 บาท ในทางตรงกันข้าม ช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม รวมถึง เดือนกรกฎาคม พบว่าระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่าค่าเฉลี่ย โดยเฉพาะเดือนกรกฎาคมซึ่งผลิตได้เพียง 131.78 kWh เนื่องจากเป็นช่วงฤดูฝนที่มีเมฆมาก แสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ และบางช่วงมีฝนตกติดต่อกันหลายวัน ทำให้ระดับรังสีดวง อาทิตย์ (Solar Irradiance) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีความผันผวนของปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ในแต่ละเดือน แต่โดยเฉลี่ยแล้วระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี โดยไม่มีการหยุดชะงักของการทำงาน ซึ่งสะท้อนถึง ความเสถียรของระบบออนกริด ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานแม้ในสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ผลการดำเนินงานดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ [13] ที่รายงานว่า ระบบออนกริดในสถาบันการศึกษามีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ย 1,200–1,400 kWh ต่อ 1 kWp ต่อปี ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้

โดยสรุป ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 260.40 kWp สามารถผลิตไฟฟ้าได้ตลอดทั้งปี โดยมีปริมาณการผลิตสูงสุดในช่วงเดือนตุลาคม และต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม การเปลี่ยนแปลงนี้สะท้อนถึงอิทธิพลของฤดูกาลต่อประสิทธิภาพของระบบ ทั้งนี้ พลังงานที่ผลิตได้ทั้งหมดถูกนำมาใช้ภายในสถานศึกษาโดยตรง ทำให้สามารถลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากการไฟฟ้าภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมในลำดับต่อไป



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าและมูลค่าการประหยัดที่ได้จากระบบโซลาร์เซลล์ ระหว่างปี พ.ศ. 2566 และ พ.ศ. 2567

จากภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารวมระหว่างปี พ.ศ. 2566 และปี พ.ศ. 2567 พบว่า หลังการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออนกริดขนาด 260.40 kWp ส่งผลให้ค่าไฟฟ้ารวมของสถานศึกษา ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยในปี 2566 มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้ารวมทั้งปี 980,462.73 บาท ในขณะที่ปี 2567 มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าลดลง เหลือเพียง 714,118.80 บาท และยังสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติมจากระบบโซลาร์เซลล์ คิดเป็นมูลค่าการประหยัดเพิ่ม อีก 450,132.06 บาท เมื่อรวมทั้งส่วนที่ลดลงจากบิลค่าไฟฟ้าและมูลค่าการผลิตไฟฟ้าจากระบบ จะพบว่าปี 2567 มีการลด ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้รวมประมาณ 262,611.72 บาท หรือคิดเป็นการลดลงร้อยละ 26.8 เมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบโซลาร์เซลล์ในการช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายของหน่วยงานภาครัฐได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม ผลประหยัดที่ได้จากระบบมีค่ามากกว่าการลดลงของค่าไฟฟ้าที่ปรากฏในบิล เนื่องจากระบบที่ติดตั้ง เป็นแบบ ออนกริดโดยไม่มีการหักล้างพลังงานส่วนเกิน (No Export Balance System) ซึ่งพลังงานส่วนเกินที่ผลิตได้ในบาง ช่วงเวลาจะไม่ถูกนำไปคิดหักล้างกับค่าไฟฟ้าจริง จึงเกิดความแตกต่างระหว่าง “พลังงานที่ผลิตได้” กับ “มูลค่าการลด ค่าใช้จ่ายจริง” ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Chantharak et al. (2023) ที่ระบุว่าระบบออนกริดซึ่งไม่มีการส่ง พลังงานกลับเข้าสายส่งจะให้ผลประหยัดจริงเฉลี่ยเพียง 60–70% ของมูลค่าการผลิตทั้งหมด

โดยสรุป ผลการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออนกริดสามารถ ลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้อย่างเป็นรูปธรรม และเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและการบริหาร งบประมาณของหน่วยงานภาครัฐได้อย่างยั่งยืน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 260.40 kWp

รายการ	สัญลักษณ์	สูตรคำนวณ / วิธีการ	ผลการคำนวณ	การตีความ
เงินลงทุนรวมของโครงการ	I_0	รวมราคาติดตั้งอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายทั้งหมด	5,222,000 บาท	ต้นทุนรวมของระบบ Solar PV rooftop
ผลประหยัดค่าไฟฟ้ารวมต่อปี	CF	จากพลังงานผลิตได้ $107,174.30 \text{ kWh} \times 4.2$ บาท/หน่วย	450,132.06 บาท/ปี	รายได้สุทธิจากการลดค่าไฟฟ้า
ผลตอบแทนต่อการลงทุน (ROI)	-	$(ROI = \frac{CF}{I_0} \times 100)$	8.62 %	อัตราผลตอบแทนต่อปีจากการลงทุน
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)	-	$(Payback = \frac{I_0}{CF})$	11.6 ปี	ใช้เวลาประมาณ 12 ปีจึงคืนทุนเต็มจำนวน
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	-	$NPV = \sum_{t=1}^{25} \frac{CF_t}{(1 + 0.06)^t} - I_0$	618,000 บาท	มีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าโครงการคุ้มค่า
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	-	คำนวณหาอัตราคิดลดที่ทำให้ $NPV = 0$	7.2 %	ให้ผลตอบแทนสูงกว่าอัตราคิดลด 6%
อัตราคิดลดที่ใช้ (Discount Rate)	r	สมมติฐานจากต้นทุนทางการเงินเฉลี่ยของรัฐ	6 %	ใช้ประกอบการคำนวณ NPV และ IRR
อายุการใช้งานระบบ (Project Lifetime)	n	อายุการใช้งานเฉลี่ยของแผงโซลาร์เซลล์	25 ปี	ใช้เป็นช่วงเวลาคำนวณกระแสเงินสด

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออนกริด (On-Grid System) ขนาด 260.40 kWp แสดงให้เห็นว่า โครงการมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในระดับที่น่าพอใจ โดยมีเงินลงทุนรวมทั้งสิ้น 5,222,000 บาท ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนการจัดซื้อแผงโซลาร์เซลล์ อินเวอร์เตอร์ โครงสร้างรองรับ อุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบ Monitoring และค่าดำเนินการทางไฟฟ้า ทั้งหมดนี้เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงจากการติดตั้งในพื้นที่สถานศึกษา ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รวม 107,174.30 kWh ต่อปี ซึ่งเมื่อคำนวณด้วยอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.2 บาทต่อหน่วย ทำให้สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 450,132.06 บาทต่อปี อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) เท่ากับ 8.62 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับโครงการด้านพลังงานทดแทนในภาครัฐที่มุ่งเน้นการลดต้นทุนการดำเนินงานระยะยาวมากกว่าการสร้างกำไรเชิงพาณิชย์ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานของ [12] ที่ระบุว่าระบบ Solar Rooftop ในหน่วยงานราชการมี ROI อยู่ระหว่าง 6–10 เปอร์เซ็นต์ ต่อปี

ในส่วนของ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) พบว่าระบบสามารถคืนทุนได้ภายใน 11.6 ปี ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับอายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์ ประมาณ 25 ปี และมีศักยภาพที่จะคืนทุนได้เร็วขึ้นเหลือ 9–10 ปี หากค่าไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3–5 เปอร์เซ็นต์ ต่อปี ในอนาคต ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความยั่งยืนของโครงการในระยะยาว เมื่อพิจารณาควบคู่กับต้นทุนการบำรุงรักษาที่ต่ำของระบบออนกริด การคำนวณ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ที่อัตราคิดลด 6 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 618,000 บาท ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าโครงการนี้สามารถสร้างผลตอบแทนเชิงบวกในระยะยาวได้อย่างแท้จริง ขณะที่ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับ 7.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าอัตรา คิดลด 6 เปอร์เซ็นต์ เล็กน้อย สะท้อนว่าโครงการมีความคุ้มค่าในระดับที่น่าพอใจและสามารถแข่งขันได้กับการลงทุนในโครงการพลังงานหมุนเวียนทั่วไปในประเทศไทย สอดคล้องกับรายงานของ Chantharak et al. (2023) ที่พบว่าโครงการ Solar PV ภาครัฐมี IRR เฉลี่ย 7–9 เปอร์เซ็นต์ และมี NPV เป็นบวกเมื่ออายุโครงการมากกว่า 20 ปี

โดยสรุป การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ยืนยันว่า การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 260.40 kWp มีความคุ้มค่าและเหมาะสมต่อการลงทุนในหน่วยงานภาครัฐ ทั้งนี้ นอกจากจะสามารถลดค่าไฟฟ้ารายปีได้อย่างต่อเนื่อง ยังมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระยะยาว อันเป็นการสนับสนุนเป้าหมายของประเทศไทยในการมุ่งสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน และการใช้พลังงานสะอาด (Net Zero Emission Goal) ของประเทศไทย

ตารางที่ 4 สรุปผลการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการเทียบเท่าทางสิ่งแวดล้อม

รายการ	ค่าโดยประมาณ	หน่วย
กำลังการติดตั้งรวม	260.40	kWp
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (ต่อปี)	107,174.30	kWh/ปี
การลดการปล่อย CO ₂ (คำนวณได้)	61.09	ตัน/ปี
จากข้อมูลระบบ (รวมสะสม)	102,852	ตัน
การดูดซับ CO ₂ ของต้นไม้ 1 ต้น	0.093	ตัน/ปี
จำนวนต้นไม้เทียบเท่า	657	ตัน/ปี

จากตารางที่ 4 ผลการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกำลังติดตั้งรวม 260.40 kWp พบว่า ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 107,174.30 kWh ต่อปี ซึ่งสอดคล้องกับค่าศักยภาพของระบบโซลาร์เซลล์แบบ ออนกริดในพื้นที่ประเทศไทยที่มีระดับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงต่อเนื่องตลอดปี การผลิตไฟฟ้าจำนวนดังกล่าวส่งผลให้เกิดการ ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ประมาณ 61.09 ตันต่อปี หรือเทียบเท่ากับ การปลูกต้นไม้ประมาณ 657 ต้นต่อปี ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า ระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ การลดการปล่อย CO₂ สะสมของระบบที่มีค่ารวมกว่า 102,852 ตัน ตลอดอายุการใช้งาน ยังสะท้อนให้เห็นถึงความคุ้มค่าทางสิ่งแวดล้อมในระยะยาวของโครงการ ซึ่งมีส่วนสนับสนุนเป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net Zero Emission ของประเทศ โดยเฉพาะในภาคหน่วยงานภาครัฐที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง การติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดค่าใช้จ่ายประจำและส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างยั่งยืน

ผลการศึกษาข้างต้นจึงยืนยันว่า การลงทุนในระบบโซลาร์เซลล์แบบออนกริดไม่เพียงแต่ช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสามารถเป็นต้นแบบในการส่งเสริมการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในองค์กรภาครัฐและสถานศึกษา

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์สองประการ ได้แก่ (1) เพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบโซลาร์เซลล์แบบ ออนกริดกับกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในบิลค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าในองค์กรภาครัฐ และ (2) เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องและวิเคราะห์ศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของหน่วยงานรัฐ

ผลการศึกษาการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออนกริด (On-Grid Solar PV System) ขนาด 260.40 กิโลวัตต์พีค (kWp) ในสถานศึกษา แสดงให้เห็นว่าระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าและส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์ พลังงาน และสิ่งแวดล้อม โดยจากการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการติดตั้งระบบ พบว่าค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งปีลดลงจาก 980,462.73 บาทในปี พ.ศ. 2566 เหลือ 717,851.01 บาทในปี พ.ศ. 2567 คิดเป็นการลดลงร้อยละ 26.8 ขณะที่ปริมาณการใช้ไฟฟ้าลดลงจาก 152,712 หน่วย เหลือ 118,668 หน่วย หรือคิดเป็นร้อยละ 22.3 สะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถช่วยลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งสามารถผลิตไฟฟ้าได้รวมทั้งสิ้น 107,174.30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นมูลค่าการประหยัด 450,132.06 บาทต่อปี โดยมีค่าการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงที่มีรังสีอาทิตย์เข้มข้น และต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูฝนที่มีเมฆมากและมีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ ปัจจัยด้านภูมิอากาศจึงมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ ทั้งนี้ แม้จะมีความผันผวนในแต่ละเดือน แต่ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปีโดยไม่พบการหยุดชะงัก สะท้อนถึงความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ในด้านเศรษฐศาสตร์พลังงาน การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโครงการพบว่า มีเงินลงทุนรวมทั้งสิ้น 5,222,000 บาท และสามารถสร้างผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ได้อย่างเหมาะสม โดยมีอัตราผลตอบแทนต่อการลงทุน (ROI) เท่ากับ 8.62 เปอร์เซ็นต์ต่อปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 618,000 บาท ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าในระยะ

ยาว และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 7.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าอัตราคิดลดที่ใช้ในการคำนวณ (6%) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ประมาณ 11.6 ปี ซึ่งอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมกับอายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์ที่เฉลี่ยประมาณ 25 ปี ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Somchai et al. (2021) และ Chantharak et al. (2023) ที่ระบุว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในหน่วยงานภาครัฐมี ROI เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6–10 เปอร์เซ็นต์ และสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 10–12 ปี

นอกจากความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้ว ระบบยังมีประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ประมาณ 61.09 ตันต่อปี หรือเทียบเท่ากับการปลูกต้นไม้จำนวน 657 ต้นต่อปี และหากคำนวณรวมตลอดอายุการใช้งานของระบบจะสามารถลดการปล่อย CO₂ ได้รวมกว่า 102,852 ตัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ [5]

โดยสรุป การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 260.40 kWp ในสถานศึกษามีความคุ้มค่าทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า ลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากภายนอก และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบมีความเสถียรในการทำงานและให้ผลตอบแทนที่เหมาะสมต่อการลงทุนในระยะยาว จึงถือเป็นแนวทางการใช้พลังงานทดแทนที่มีศักยภาพและเหมาะสมต่อการขยายผลไปยังหน่วยงานภาครัฐและสถานศึกษาอื่น ๆ เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดและการบริหารจัดการพลังงานอย่างยั่งยืนในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Frontiers in Energy Research (2024). Design, techno-economic evaluation, and experimental testing of grid connected rooftop solar photovoltaic systems for commercial buildings. <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1483755/full>
- [2] National Renewable Energy Laboratory (2016). Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States. <https://docs.nrel.gov/docs/fy16osti/65298.pdf>
- [3] U.S. Department of Energy (2022). Understanding Solar Photovoltaic System Performance. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/understanding-solar-photo-voltaic-system-performance.pdf>
- [4] Renewable and Sustainable Energy Reviews (2024). Integrated rooftop solar PV-based residential advanced energy management system: An economic involvement of energy systems for prosumers. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277278312400044X>
- [5] Energy and Buildings (2021). Performance analysis of a grid-connected rooftop solar PV system in Kuala Terengganu, Malaysia. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821004667>
- [6] Sustainable Energy Technologies and Assessments (2018). Performance evaluation of a rooftop solar photovoltaic power plant in Northern India. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082618300802>
- [7] National Renewable Energy Laboratory (2006). Procedure for Measuring and Reporting Commercial Building Energy Performance with Grid-Connected PV Systems. <https://docs.nrel.gov/docs/fy06osti/38603.pdf>
- [8] International Journal of Energy and Environmental Engineering (2018). Evaluating solar energy technical and economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40095-018-0289-1>
- [9] Renewable Energy (2019). The economics of solar PV self-consumption in Thailand. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119301004>



- [10] Renewable Energy Focus (2023). The assessment of the value of electricity saving and economic benefit to residential solar rooftop PV customer: The case of Thailand.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X23001530> RetryClaude can make mistakes. Please double-check responses.
- [11] Chantharak, W., Pradit, A., & Suwan, P. (2023). Economic analysis of on-grid solar photovoltaic systems for public buildings in Thailand. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 15(2), 45–53.
- [12] Somchai, T., Rattanapong, S., & Phasuk, K. (2021). Cost-benefit analysis of solar rooftop systems in government buildings. *Energy Policy and Management Journal*, 9(1), 22–31.
- [13] Chantharak, W., Pradit, A., & Suwan, P. (2023). Performance and economic evaluation of on-grid solar PV systems for educational institutions in Thailand. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 15(2), 45–53.
- [14] International Energy Agency. (2022). *Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027*. Paris: IEA Publications.
- [15] National Renewable Energy Laboratory. (2021). *Solar radiation data manual for flat-plate and concentrating collectors*. Golden, CO: U.S. Department of Energy.

การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้พลังงานความเย็นเหลือทิ้งจากไนโตรเจนเหลว Thermoelectric Power Generation Utilizes Waste Cold Energy from Liquid Nitrogen

กายสิทธิ์ แหล่งชอบกฤษณ์^{1*} และ เจริญพร เลิศสถิตธนกร²
 Kayasit Laengchobkrit^{1*} and Charoenporn Lertsatitthanakorn²

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

¹Program of Energy Technology, School of Environment and Material,
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

² สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

²Program of Energy Management Technology, School of Environment and Material,
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

¹Corresponding author: Tel.: 084-6003538. E-mail address: kayasit.laen@kmutt.ac.th

Abstract

The cold energy of liquefied Nitrogen is generally wasted when it is extracted for use in the gaseous phase. This paper proposes cryogenic thermoelectric generators to recover this waste cold energy. Consisting of four commercial thermoelectric generator (TEG) modules, these are characterized by direct, low-efficiency (up to 5%) conversion of thermal energy into electrical energy. The effect of the heat supplied to the cold energy reservoir on the maximum output power and conversion efficiency is shown. The results indicated that, with 200 W of heat supplied, the system produces 5.25 W of power output and 3.16% conversion efficiency. However, this shows that cold waste energy from liquid nitrogen has strong potential as an alternative cooling source for TE power generation, by utilizing waste cooling energy to increase energy recovery efficiency in the system.

Keywords: Thermoelectric power generator, Waste cold energy, Liquid nitrogen

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้ว พลังงานความเย็นของไนโตรเจนเหลวจะสูญเสียไปเมื่อนำไนโตรเจนเหลวไปใช้ประโยชน์จากการทำงานในสถานะก๊าซ บทความนี้เสนอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกแบบเย็นยิ่งยวด เพื่อนำพลังงานความเย็นที่สูญเสียไปกลับมาใช้ใหม่ ประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกเชิงพาณิชย์ผลิตไฟฟ้า (Thermoelectric generator, TEG) สี่โมดูลมีลักษณะเฉพาะคือการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงที่มีประสิทธิภาพต่ำ (สูงสุดประมาณ 5%) งานวิจัยนี้ได้มีการแสดงถึงผลกระทบของความร้อนที่จ่ายไปยังแหล่งกักเก็บพลังงานความเย็นที่มีต่อการผลิตไฟฟ้าการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อน 200 วัตต์ ระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 2.62 วัตต์ โดยมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 3.16% อย่างไรก็ตามการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าพลังงานความเย็นที่เหลือทิ้งจากการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนเหลวมีศักยภาพที่ดีและเป็นความคาดหวังที่ใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการเป็นแหล่งระบายความร้อนให้กับการผลิตไฟฟ้าจาก TEG ในการใช้ประโยชน์จากความเย็นเหลือทิ้งสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานที่สูญเสียในระบบกลับมาใช้ประโยชน์

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก, พลังงานความเย็นเหลือทิ้ง, ไนโตรเจนเหลว

บทนำ

วิกฤตการณ์พลังงานทั่วโลกทำให้ผู้คนเริ่มตระหนักถึงความสำคัญของการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่เป็นหนทางที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานให้สูงขึ้นแต่โดยส่วนมากความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่มักมาจากแหล่งความร้อนสูง เช่น ความร้อนจากห้องเผาไหม้หม้อไอน้ำ ความร้อนทิ้งจากเตาเผาไหม้ ความร้อนจากกระบวนการผลิต เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังมีพลังงานเย็นซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดจากระบบการระเหยของก๊าซเหลวชนิดต่างๆ จากการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซจากการจัดเก็บก๊าซเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เพราะสะดวกต่อการขนส่งและการจัดเก็บสำหรับการใช้งานที่ทำให้สะดวกต่อการใช้งานในปริมาณมาก เช่น ก๊าซธรรมชาติเหลว ก๊าซอาร์กอนเหลวไนโตรเจนเหลว และอื่นๆ การจะใช้งานจะต้องทำให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซโดยใช้ตัวทำระเหยสำหรับดูดพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิไปยังจุดเดือด โดยในกระบวนการใช้งานแหล่งที่มีพลังงานความเย็นสะสมอยู่ที่สามารถใช้ได้จากการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซอย่างไนโตรเจนจากไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ -196 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเกิดการขยายตัวเป็นก๊าซถึง 694 เท่าและเมื่อก๊าซไนโตรเจนเหลวมีการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซจะมีการดูดพลังงานจากภายนอกผ่านตัวทำระเหยก๊าซทำให้เกิดผลต่างทางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศ มีที่มาจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและความร้อนสัมผัสที่ทำให้ของเหลวเดือดกลายเป็นไอเรียกว่า "พลังงานเย็น" [1-2] ซึ่งพลังงานความเย็นเหล่านี้เป็นพลังงานเหลือทิ้งที่ไม่ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ นอกจากการกู้คืนความร้อนเสียแล้ว การกู้คืนความเย็นเสียยังเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาอีกด้วย อย่างเช่นสามารถนำไปใช้ในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์บางชนิดได้ เช่น เฮอร์โมอิเล็กทริก

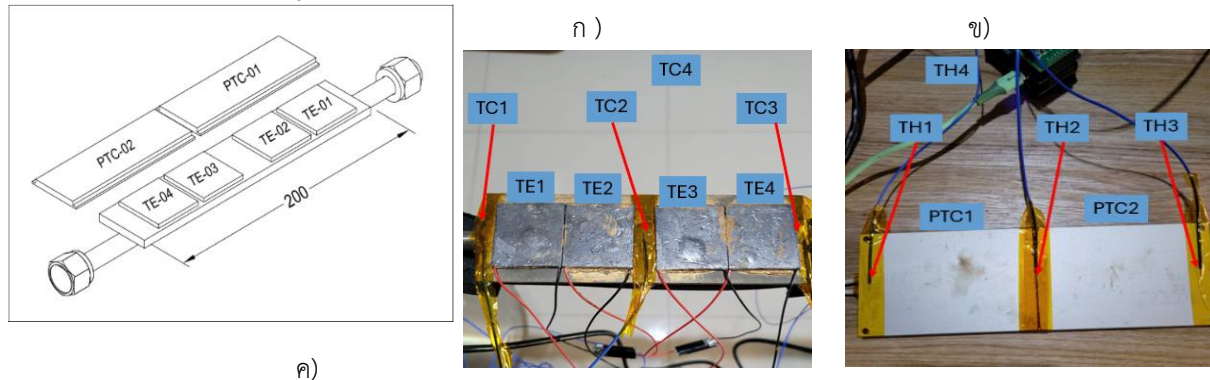
การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานพลังงานนอกจากการใช้งานระบบความร้อนร่วมแล้วการใช้งานเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้าเฮอร์โมอิเล็กทริก (TEG) ซึ่งทำงานตามหลักการของปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck effect) จากปรากฏการณ์นี้ทำให้นักวิจัยได้พัฒนาเพื่อนำมาผลิตไฟฟ้าหลายรูปแบบ เช่น Jeong E S. [2] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งแปลงพลังงานความเย็นของก๊าซธรรมชาติเหลวที่อุณหภูมิ -143.15 °C ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า พบว่าการใช้ความเย็นจากการระเหยของก๊าซมีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอุปกรณ์ TEG C. Weng et al. [3] ได้ทำการทดลองการใช้ความเย็นเหลือทิ้งจากท่อจ่ายไนโตรเจนเหลวโดยใช้พัลลภระบายความร้อนบนท่อออลูมิเนียมพบว่าสามารถทำให้อุปกรณ์ TEG ผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 0.93 วัตต์ เป็นต้น โดยอุปกรณ์ TEG ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลแบบง่าย ๆ ที่สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับการใช้งานผลิตไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสำหรับการใช้งานทำความร้อนหรือทำความเย็นได้โดยตรง [4] ทั้งยังมีความน่าสนใจอย่างมากเนื่องจากมีขนาดเล็ก ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ไม่มีเสียง และยังมีควมน่าเชื่อถือสูง โดยสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กได้ แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้เนื่องจากยังมีประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานต่ำ (Energy conversion) อย่างไรก็ตามการใช้งานอุปกรณ์ TEG สามารถประยุกต์การใช้งานในการเปลี่ยนรูปพลังงานมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความต่างของอุณหภูมิ จำนวนโมดูล เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปยังการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเฮอร์โมอิเล็กทริกจากการใช้ความเย็นเหลือทิ้งจากการใช้งานระบบไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศโดยมีการใช้สัมผัสอุปกรณ์ TEG ในการใช้ประโยชน์จากการพาความร้อนของระบบไนโตรเจนเหลวเพื่อเป็นแนวทางออกแบบและใช้ประโยชน์ระบบผลิตไฟฟ้าโดยเฮอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้พลังงานจากความเย็นเหลือทิ้งจากไนโตรเจนเหลวสำหรับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการออกแบบการใช้งานอุปกรณ์ TEG ในการใช้ประโยชน์จากการกู้คืนพลังงานที่สูญเสียกลับปมาประยุกต์ใช้งานต่อไป

วิธีการวิจัย

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฮอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ความเย็นทิ้งจากไนโตรเจนในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในพื้นที่ในห้องเปิดโล่งภายนอก โดยในการทดลองได้ออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าเฮอร์โมอิเล็กทริกที่มีการให้ความร้อนแบบไฟฟ้ากับ TEG แสดงดังภาพที่ 1 ก. ชุดผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยความเย็นเหลือทิ้งประกอบด้วย TEG จำนวน 4 โมดูล (รุ่น TEHP1-12635-1.2) ขนาด กว้าง 35 mm ยาว 35 mm และหนา 2.5 mm ต่อกันอนุกรมกันทางไฟฟ้า โดยด้านเย็นติดตั้งบนแผ่นนำความร้อนบนแผ่นสแตนเลส ขนาด กว้าง 40 mm ยาว 200 mm และหนา 2 mm เชื่อมติดกับท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm ยาว 300 mm ในขณะที่ด้านร้อนของ TEG โมดูลติดตั้งบนทำความร้อนเซรามิกประ

เกท (Positive Temperature Coefficient, PTC) ขนาด 200 W กว้าง 40 mm และ ยาว 250 mm ติดอุปกรณ์สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น ด้านละ 4 จุด แสดงดังภาพที่ 1 ข. และ ค.

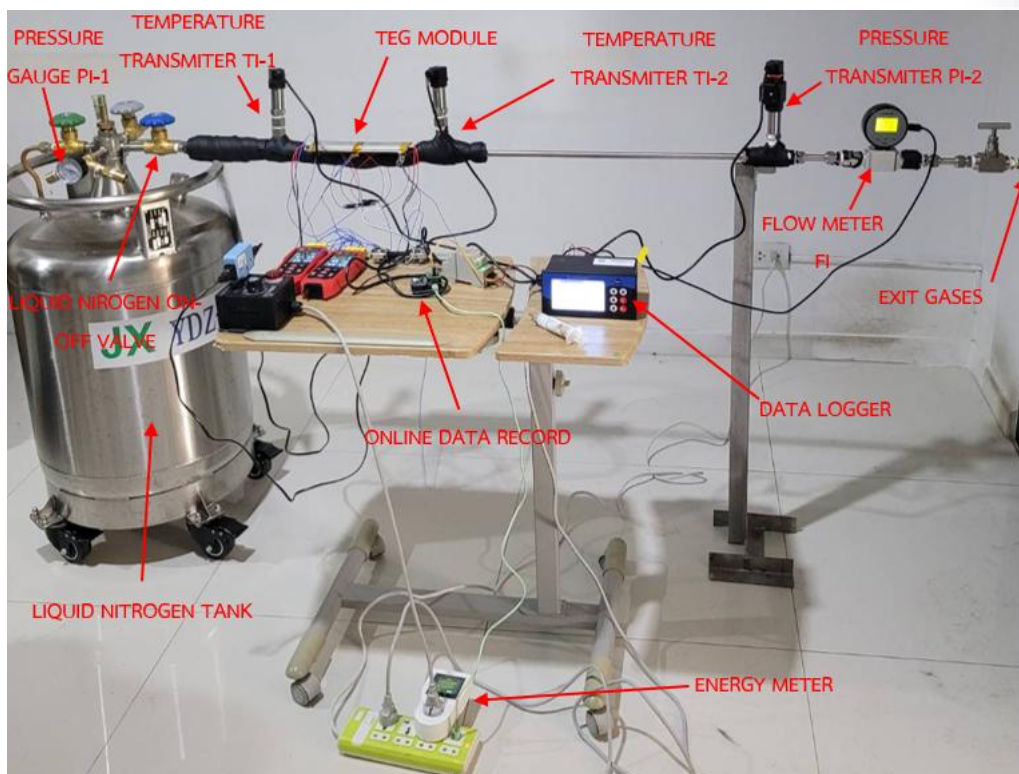
โดยชุดอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าจากความเย็นเหลือทิ้งมีหลักการทำงานคือเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้ชุด PTC จะทำให้มีการสร้างความร้อนขึ้นส่งผลทำให้อุณหภูมิด้านร้อนของ TEG มีค่าสูงขึ้นและขณะเดียวกันเมื่อเปิดวาล์วจากถังบรรจุนโตรเจนเหลว จะมีไนโตรเจนเหลวไหลผ่านระบบท่อที่ติดตั้งอยู่ด้านเย็นของโมดูลส่งผลให้มีการดูดความร้อนผ่านแผ่นสแตนเลสทำให้อุณหภูมิด้านเย็นของ TEG มีค่าต่ำลง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากด้านร้อนของ TEG มายังด้านเย็นของ TEG เมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผลต่างด้านอุณหภูมิเกิดขึ้นส่งผลให้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า TEG สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 1 แบบอุปกรณ์การทดลอง ก) ส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าจาก TEG ข) ตำแหน่งวัดอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ค) ตำแหน่งวัดอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก

เพื่อทดสอบและวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะของระบบที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากอัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ TEG ผลิตออกมา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ ได้แก่ พลังงานความร้อนของแผ่นเซรามิก PTC ที่จ่ายให้ TEG และนำมาหาค่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงาน โดยติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่าง ๆ ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ใช้ในการวัดอุณหภูมิโดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล แสดงดังภาพที่ 2 ในสภาวะอุณหภูมิบรรยากาศปกติ ได้มีการติดตั้งเกจวัดแรงดันที่ถังบรรจุนโตรเจนเหลวและ อุปกรณ์วัดความดัน (ช่วงการวัด 0 bar ถึง 10 bar) และได้มีการติดตั้งชุดวัดอัตราการไหลของไนโตรเจนแผ่นทำความร้อน PTC เชื่อมต่อกับชุดปรับกำลังไฟฟ้า สามารถปรับความร้อนที่ให้กับ TEG ได้

ในการทดลองได้ปรับตั้งแรงดันขาออกของไนโตรเจนสำหรับการทดลองที่ 1 Barg. เปิดไนโตรเจนเหลวจากระบบโดยในทดลองเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานระบบจะต้องทำให้ไนโตรเจนเหลวเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซก่อนออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นจึงได้ใช้อัตราการไหลของ 60 SLPM ที่เหมาะสมกับขนาดของอุปกรณ์การทดลอง และทำการเปิดระบบจ่ายไฟฟ้าให้แผ่นทำความร้อนเซรามิกตามที่พิกัดสูงสุด 200 W 150 W 100 W ในการทดลอง แล้วทำการเก็บข้อมูลจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งไว้สำหรับเปรียบเทียบผล และเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายการทดลอง จึงได้เตรียมท่อยาวพอให้ไนโตรเจนได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงก่อนที่จะระบายออกสู่บรรยากาศ และเพื่อลดการสูญเสียความเย็นก่อนที่ไนโตรเจนจะไปถึงระบบกู้คืนความเย็นระหว่างระบบกู้คืนพลังงานความเย็น TEG และถึงไนโตรเจนเหลวจะถูกหุ้มด้วยวัสดุฉนวนกันความร้อน



ภาพที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าจาก TEG ร่วมกับพลังงานเย็นเหลือทิ้งจากไนโตรเจนเหลว

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ TEG เกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{max} = \frac{1}{2} V_{oc} \times \frac{1}{2} I_{sc} \quad (1)$$

โดยที่ P, I และ V คือ กำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก TEG ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Conversion efficiency) ของ TEG สามารถประเมินได้จาก [5]

$$\eta_e = \eta_c \frac{M-1}{M+\frac{T_c}{T_h}} \quad (2)$$

เมื่อ M สามารถหาได้จาก $M = \sqrt{1 + ZT_m}$ โดยที่ T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยด้านร้อนและด้านเย็นของ TEG สามารถหาได้จาก $T_m = \frac{(T_h + T_c)}{2}$, T_h และ T_c คือ อุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของ TEG, Z คือ ค่า Figure of merit ของ วัสดุ TEG ($Z = 1.6 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$) [6], η_c คือประสิทธิภาพคาร์โน สามารถหาได้จาก (3)

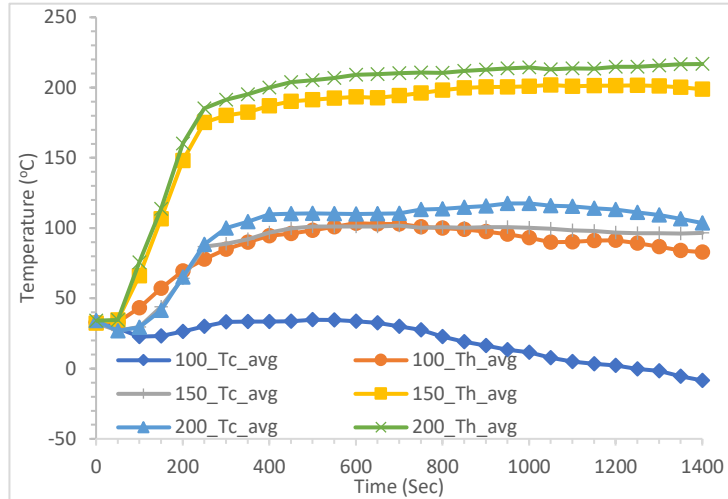
$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (3)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1. การกระจายอุณหภูมิของระบบผลิตพลังงานจากความเย็นเหลือทิ้ง

ภาพที่ 3 แสดงการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้จากการจ่ายความร้อนเข้าสู่ระบบที่อัตรา 100 วัตต์ 150 วัตต์ และ 200 วัตต์ เมื่อจ่ายความร้อนให้ TEG เพิ่มขึ้น อุณหภูมิด้านร้อนมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่ผ่าน TEG ไปยังด้านเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น

ทำให้อุณหภูมิด้านเย็นของ TEG สูงขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างทั้งสองด้านของโมดูล TEG โดยจะมีค่าค่าแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นสูงสุด เท่ากับ 52.68°C, 131.34°C, และ 142.59°C ตามลำดับ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าความร้อนที่ให้อาจ 100 ถึง 200 วัตต์ ซึ่งจะเกิดประโยชน์ต่อการผลิตไฟฟ้าของ TEG ทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น ซึ่งจะแสดงในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของ TEG ที่อัตราการให้ความร้อนที่ 100 วัตต์ 150 วัตต์และ 200 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเวลา

3.2. ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบกักเก็บพลังงานความเย็น TEG

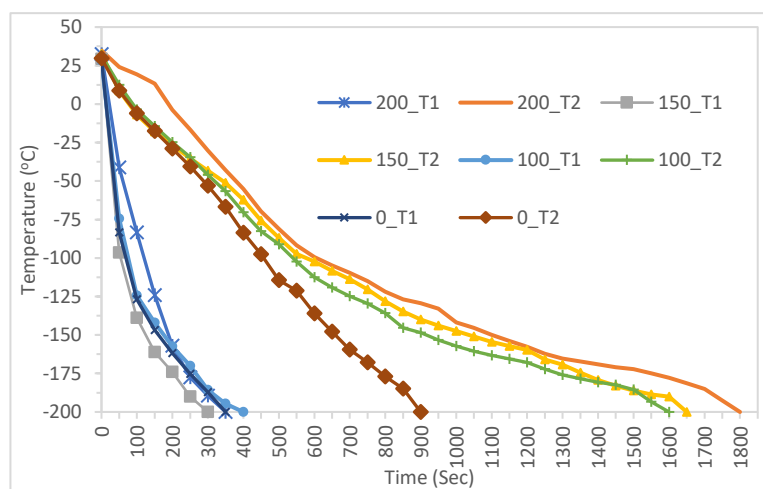
ตารางที่ 1 แสดงผลของการทำงานของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจาก TEG ร่วมกับความร้อนเหลือทิ้งจากไนโตรเจนเหลว ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความร้อนที่ให้กับ TEG เป็นผลจากผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของ TEG เพิ่มขึ้น จากการที่ไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิต่ำสามารถใช้เป็นแหล่งในการระบายความร้อนของ TEG ได้เป็นอย่างดี จากการทดลองพบว่าชุด TEG สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น เมื่อจ่ายความร้อนจาก 100 ถึง 200 วัตต์ TEG ผลิตไฟฟ้าเพิ่มจาก 2.11 เป็น 5.25 วัตต์ ตามลำดับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อความร้อนที่ให้กับ TEG เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ C. Weng et al., [3] ที่ใช้ TEG ระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนจากพัดลมบนท่อจ่าย ไนโตรเจนเหลวสามารถจะให้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.93 วัตต์ จะพบว่าการใช้ความร้อนจ่ายโดยตรงบน TEG โดยการนำความร้อนของแผ่นอลูมิเนียมในการทดลองจะสามารถทำให้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการระบายความร้อนสูงกว่าที่ 2.62 วัตต์ โดยประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบ TEG ในการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 2.49%, 3.10% และ 3.16% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าที่ความร้อน 150 และ 200 วัตต์ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานต่างกันไม่มาก ทั้งนี้จะเกิดจากขีดจำกัดในการระบายความร้อนเมื่อให้ความร้อนสูง ดังนั้นการให้ความร้อนที่สูงมากเกินไปจะจำกัดการระบายความร้อนของระบบ อาจทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำลงได้

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจาก TEG ที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าความร้อนที่ให้กับ TEG

พลังงานที่นำเข้า	อุณหภูมิเฉลี่ยด้านร้อน (T_h)	อุณหภูมิเฉลี่ยด้านเย็น (T_c)	ผลต่างอุณหภูมิ (T_m)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (I)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})	ประสิทธิภาพ (η_e)
100 W	85.49 °C	19.88 °C	52.68 °C	4.306 V	0.98	1.05	2.49%
150 W	174.81 °C	87.89 °C	131.34 °C	6.317 V	1.08	1.71	3.10%
200 W	187.15 °C	98.03 °C	142.59 °C	8.601 V	1.22	2.62	3.16%

3.3. ผลกระทบของความร้อนที่จ่ายให้กับระบบต่อการเดือดเป็นไอของไนโตรเจนเหลว

วัตถุประสงค์หนึ่งของการศึกษาวิจัยนี้คือ การนำไนโตรเจนในสถานะของก๊าซมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนั้นอัตราการเดือดของไนโตรเจนจึงมีความสำคัญต่อการนำก๊าซไนโตรเจนไปใช้งานจริง เนื่องจากไนโตรเจนเหลวมีจุดเดือดที่ -196°C จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนกับไนโตรเจนเพื่อให้เกิดการเดือดเป็นไอ การให้ความร้อนผ่านชุดผลิตไฟฟ้าจาก TEG แล้วถ่ายเทความร้อนผ่านด้านเย็นของ TEG มายังไนโตรเจนไหลที่ไหลในท่อ ช่วยให้ไนโตรเจนเหลวเดือดเป็นไอได้ ภาพที่ 4 แสดงถึงผลของอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวภายในท่อที่ได้รับความร้อนผ่าน TEG ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวภายในท่มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นเหตุให้ไนโตรเจนเหลวสามารถเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ได้จากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นเหนือจุดเดือด โดยหากไม่ได้มีการใส่ความร้อนเข้าไปในระบบไนโตรเจนเหลวจะระเหยได้ในระยะเวลาเพียง 550 วินาทีในขณะที่มีการให้พลังงานความร้อนกับชุดผลิตไฟฟ้าจาก TEG ที่ 200 วัตต์ ระยะเวลาในการเดือดของไนโตรเจนเหลวจะเพิ่มขึ้นถึง 1450 วินาที แสดงถึงปริมาณไนโตรเจนเหลวสามารถเดือดเป็นไอได้มากขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการนำความร้อนมารวมในระบบสามารถทำให้ชุดทำระเหยก๊าซมีความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของไนโตรเจนจากชุดผลิตไฟฟ้า TEG ที่อัตราการให้ความร้อน 100 วัตต์ 150 วัตต์ 200 วัตต์ และกรณีไม่มีการให้ความร้อน เมื่อเทียบกับเวลา

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างและทดลองระบบผลิตไฟฟ้าจากความเย็นเหลือทิ้งโดยใช้ TEG ในขณะเดียวกันช่วยให้ไนโตรเจนเหลวเดือดเป็นไอได้มากขึ้น โดยมีการปรับเปลี่ยนความร้อนที่ให้กับชุด TEG จากผลการทดลองพบว่าความร้อนที่ให้กับชุด TEG มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าและการระเหยของไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ระบบผลิตไฟฟ้าจาก TEG สามารถผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.62 วัตต์ และมีประสิทธิภาพการแปลงสภาพพลังงานเท่ากับ 3.16% ในขณะที่ไนโตรเจนเหลวเดือดเป็นไอได้มากขึ้นจากกรณีไม่มีการให้ความร้อนเป็นเวลา 1450 วินาที ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจาก TEG สามารถนำความเย็นเหลือทิ้งจากไนโตรเจนเหลวมาผลิตไฟฟ้าได้และช่วยให้ไนโตรเจนเหลวเดือดเป็นไอได้ดีขึ้น เนื่องจากการใช้งานไนโตรเจนต้องอยู่ในสถานะเป็นก๊าซ ซึ่งจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวต่ำมากในลักษณะของเหลวเย็นยิ่งยวด (cryogenic fluid) ต้องอาศัยความร้อนมาใช้ในการทำให้ไนโตรเจนเหลวเดือดเป็นไอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความเป็นไปได้ในเชิงเทคนิคที่จะนำการผลิตไฟฟ้าจาก TEG มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและนำพลังงานเย็นเหลือทิ้งจากไนโตรเจนมาระบายความร้อนให้กับ TEG ทำให้ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าและทำให้ไนโตรเจนเหลวเดือดเป็นไอในเวลาเดียวกันซึ่งจะสามารถนำพลังงานไฟฟ้าจากความเย็นเหลือทิ้งที่ได้มาไปใช้ประโยชน์ต่อไป อย่างไรก็ตามควรมีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์หากจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง ซึ่งจะต้องมีการทำระบบขนาดใหญ่กว่างานวิจัยนี้เพื่อที่จะสามารถรองรับพลังงานความเย็นจากการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนเหลวได้มากกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sun W, Hu P, Chen Z, Jia L. (2005). **Performance of cryogenic thermoelectric generators in LNG cold energy utilization.** Energy Convers Manage. 46(5), 789–96.
- [2] Jeong E S. (2017). **Optimization of power generating thermoelectric modules utilizing cold energy.** Cryogenics. 88, 29–35.
- [3] Weng C, Lin M.C., Huang M.J. (2016). **A waste cold recovery from the exhausted cryogenic nitrogen by using thermoelectric power generator.** Energy. 103, 385–396.
- [4] Sevan K, Altug S, Z.Fatih O, Turker S. (2012). **Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures.** Energy Conversion and Management. 62, 47–50.
- [5] Lertsatitthanakorn, C., Pawatwong B., Sathapornprasath, K., Soponronnarit, C. (2019). **Experimental Performance and Economic Evaluation of a Thermoelectric Liquefied Petroleum Gas (TE-LPG) Cook Stove.** International Journal of Heat and Technology. 37(2), 575-582.
- [6] Boonyasri, M., Jamradloedluk, J., Lertsatitthanakorn, C., Therdyothin, A., Soponronnarit, S.. (2017). **Increasing the efficiency of a thermoelectric generator using an evaporative cooling system.** Journal of Electronic Materials,.46(5), 3043-3046.

การเปรียบเทียบผลการผลิตไฟฟ้าระยะสั้นกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst โครงการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 500 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

Short-Term Electricity Generation Comparison between Actual and PVsyst-Simulated
Results of a 500 kW Solar Power Generation Project at
Princess of Naradhiwas University

สุวินันท์ จันทอไร^{1*} พลากร พรหมเมศ²
Suwinant Chanthaurai^{1*} and Palakorn Prommet²

^{1*} นักศึกษาปริญญาโท สาขาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹ Master of Engineering Program in Technology and Innovation Management, Faculty of Science Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

² Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

¹ Corresponding author: Tel.: 089-9749867. E-mail address: suwinant.c@pnu.ac.th

Abstract

This study analyzes and compares the short-term performance of a 500 kW ground-mounted solar photovoltaic system at Princess of Naradhiwas University. Actual electricity generation data from January to June 2025 were compared with simulation results obtained from PVsyst software. The analysis showed an average accuracy of 81.42% and an average deviation of 18.58%. The discrepancies were mainly due to variations in solar irradiance, unstable weather conditions, equipment degradation, and dust accumulation on the solar panels. These findings provide a practical basis for developing preventive maintenance strategies to sustain system efficiency and extend the operational lifetime of solar photovoltaic systems.

Keywords: Solar Photovoltaic, Electricity Generation, PVsyst.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าระยะสั้นของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ขนาด 500 kW ณ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ โดยใช้ข้อมูลการผลิตจริงระหว่างเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 เปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ผลการศึกษาพบว่าระบบมีความแม่นยำเฉลี่ย 81.42% และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 18.58% ความแตกต่างเกิดจากความแปรผันของรังสีดวงอาทิตย์ สภาพอากาศไม่แน่นอน การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ และการสะสมของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางจัดทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เพื่อคงประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, การผลิตไฟฟ้า, โปรแกรม PVsyst

การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากเปลือกโกโก้จากวิสาหกิจชุมชนแปรรูปโกโก้
และผลผลิตทางการเกษตรกำแพงเพชร

Development of Charcoal Briquettes from Cocoa Husk by the Cocoa Processing and
Agricultural Products Community Enterprise Kamphaeng Phet

ณภัทร อ้ายม็อก^{1*}, ปิยะพร โล่ตระกูล^{1*}, เสาวลักษณ์ ยอดวิญญวงษ์², เทพ เกื้อทวีกุล¹ และจารุกิตต์ พิบูลนฤดม¹
Naphat Aimok^{1*}, Piyaporn Lotrakul¹, Saowaluk Yotwinyuwong², Thap Kueathaweekun¹
and Jarukit Piboolnaruedom¹

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

¹Energy technology, Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University,
Kamphaeng Phet 62000,

Abstract

This research aimed to develop and evaluate the quality of charcoal briquettes produced from cocoa pod husks, an agricultural residue generated by the cocoa processing community enterprise in Kamphaeng Phet Province, Thailand. Tapioca starch was used as a natural binder at five mixing ratios: 1,000 g of carbonized cocoa husk with 500 g of water and 50, 100, 150, 200, and 250 g of starch, respectively. The production process involved raw material preparation, carbonization at 400–600°C, pulverizing, sieving, mixing, and briquetting. The physical and energy properties of the briquettes were analyzed, including moisture content, density, heating value, and burning duration.

The results showed that all briquette samples could be formed successfully with smooth surfaces, uniform black color, and no cracks. Moisture content ranged between 4–6%, meeting the Thai Community Product Standard (TCPS 238/2547). The average density ranged from 0.814 to 0.895 g/cm³, and the heating value ranged from 5,116.08 to 5,708.66 cal/g. The first formulation (50 g starch) achieved the highest heating value and exhibited optimal burning performance with easy ignition, low smoke emission, and an average burning time of 150 minutes. These findings confirm that cocoa pod husks can be effectively used as a raw material for producing high-quality charcoal briquettes, serving as an alternative biomass fuel that supports sustainable energy use and community-based circular-economy development.

Keywords: Cocoa husk, Charcoal briquette, Biomass energy, Tapioca starch binder, Circular economy

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินคุณภาพของถ่านอัดแท่งจากเปลือกโกโก้ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปโกโก้ของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปโกโก้และผลผลิตทางการเกษตร จังหวัดกำแพงเพชร เพื่อเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์เชิงพลังงานอย่างยั่งยืน การทดลองใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวยึดประสานใน 5 อัตราส่วน ได้แก่ เปลือกโกโก้ 1,000 กรัม น้ำ 500 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 50, 100, 150, 200 และ 250 กรัม ตามลำดับ โดยกระบวนการผลิตประกอบด้วยการเตรียมวัตถุดิบ แล้วเผาแบบควบคุมอากาศที่อุณหภูมิ 400–600°C การบดและร่อน การผสม และการอัดแท่ง จากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและพลังงาน ได้แก่ ค่าความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน และระยะเวลาเผาไหม้

ผลการทดลองพบว่า ถ่านอัดแท่งจากเปลือกโกโก้ทุกสูตรสามารถขึ้นรูปได้ดี มีผิวเรียบ สีดำสม่ำเสมอ และไม่แตกหัก ค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 4–6% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 238/2547) ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 0.814–0.895 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความร้อนอยู่ในช่วง 5,116.08–5,708.66 แคลอรีต่อกรัม โดยสูตรที่ 1 (แป้งมันสำปะหลัง 50 กรัม) ให้ค่าความร้อนสูงสุดและมีสมบัติการเผาไหม้ดีที่สุด สามารถติดไฟง่าย คว้นน้อย และเผาไหม้ได้นานเฉลี่ย 150 นาที แสดงให้เห็นว่าเปลือกโกโก้สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพ เหมาะสำหรับเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือก ลดการพึ่งพาถ่านไม้จากธรรมชาติ และเพิ่มรายได้ให้แก่ชุมชน

คำสำคัญ: เปลือกโกโก้, ถ่านอัดแท่ง, พลังงานชีวมวล, แป้งมันสำปะหลัง, เศรษฐกิจหมุนเวียน

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอัตราการไหลของอากาศอัด
จากกังหันลมอัดอากาศเชิงกล ขนาด 5 กิโลวัตต์

Analysis of the relationship between wind speed and compressed air flow rate
From a 5-kilowatt mechanical air compressor wind turbine

วรเชษฐ์ แสงสีดา¹, วิรัชย์ โธณินทร^{2*}, ภาณุ ประทุมพนรัตน์¹ และ ขวัญชัย จ้อยเจริญ¹

1 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

2 ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

*Corresponding author: Tel.: 02-5493433. E-mail address: wirachai.r@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper aims to study the potential of a mechanical compressed air wind turbine system and evaluate its performance in low-wind-speed areas, which is a significant context in Thailand and Southeast Asia. The experiment was conducted by installing a wind turbine with 3-meter-long blades connected to a V-shaped twin-piston air compressor to convert wind energy directly into compressed air. The experimental results were recorded and presented graphically to illustrate the relationship between wind speed and the flow rate of compressed air.

The results of hourly wind speed measurements over 24 hours show that the average wind speed is approximately 5.4 meters per second, with periods of maximum wind speeds exceeding 9 meters per second. The compressed air flow rate measurements demonstrate a close relationship with wind speed. Specifically, when the wind speed is below 3 meters per second, the system can still generate a flow rate of approximately 100–200 liters per minute. When the wind speed exceeds 5 meters per second, the flow rate increases dramatically, reaching a maximum of 1600 liters per minute at approximately 9.5 meters per second, the cut-off wind speed at which the system stops functioning to prevent damage. The system performance graph confirms that the turbine's cut-in wind speed is 2.3 meters per second and that the system can operate efficiently within the 2.3–9.5 meters per second wind speed range. This relationship aligns with the fundamental theory of wind energy, which states that wind power is proportional to the cube of wind speed, so even a slight increase in wind speed leads to a significant increase in the compressed air flow rate.

The experimental results demonstrate the advantages of a mechanical compressed air wind turbine system that uses direct energy transfer from the turbine shaft to the air compressor, without converting it into electrical energy, thereby reducing losses and improving operational stability. Although the system has limitations in energy storage, it is suitable for practical application at the community level, especially for aeration in aquaculture ponds or agriculture that require high dissolved oxygen. This research shows that mechanical compressed-air wind turbines can operate even in low-wind areas, achieve maximum efficiency at moderate wind speeds, and have high potential for development as a clean energy technology for sustainable agriculture and community development.

Keywords: Wind turbine, Mechanical air compression, Low wind speed

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการทำงานและประเมินสมรรถนะของระบบกังหันลมอัดอากาศเชิงกลในพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ ซึ่งเป็นบริบทสำคัญของประเทศไทยและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การทดลองดำเนินการโดยติดตั้งกังหันลมขนาดใบพัดยาว 3 เมตร เชื่อมต่อกับเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบคู่รูปตัววี เพื่อแปลงพลังงานลมเป็นอากาศอัดโดยตรง ผลการทดลองได้ถูกบันทึกและนำเสนอในรูปแบบกราฟเพื่อสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและอัตราการไหลของอากาศอัด

จากผลการวัดความเร็วลมรายชั่วโมงตลอด 24 ชั่วโมง พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5.4 เมตรต่อวินาที โดยมีช่วงเวลาที่ความเร็วลมสูงสุดมากกว่า 9 เมตรต่อวินาที การวัดอัตราการไหลของอากาศอัดแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกับความเร็วลม กล่าวคือ เมื่อความเร็วลมต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที ระบบยังสามารถสร้างอัตราการไหลได้ประมาณ 100–200 ลิตรต่อนาที และเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นสูงกว่า 5 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด โดยมีค่าสูงสุดถึง 1600 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วลมประมาณ 9.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่า cut-off wind speed ที่ระบบหยุดการทำงานเพื่อป้องกันความเสียหาย กราฟสมรรถนะของระบบยืนยันว่า cut-in wind speed ของกังหันอยู่ที่ 2.3 เมตรต่อวินาที และระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเร็วลม 2.3–9.5 เมตรต่อวินาที ความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐานของพลังงานลม ซึ่งระบุว่าพลังงานลมแปรผันตามกำลังสามของความเร็วลม ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมเพียงเล็กน้อยก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศอัดอย่างมาก

ผลการทดลองสะท้อนถึงข้อดีของระบบกังหันลมอัดอากาศเชิงกลที่ใช้การถ่ายโอนพลังงานโดยตรงจากเพลากังหันไปยังเครื่องอัดอากาศ โดยไม่ต้องผ่านการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ทำให้ลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ทั้งนี้แม้ระบบจะมีข้อจำกัดเรื่องการเก็บพลังงาน แต่ก็เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในระดับชุมชน โดยเฉพาะงานด้านการเติมอากาศในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำหรือการเกษตรกรรมที่ต้องการออกซิเจนละลายน้ำสูง โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า กังหันลมอัดอากาศเชิงกลสามารถทำงานได้แม้ในพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำ ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงความเร็วลมปานกลาง และมีความคุ้มค่าสูงในการพัฒนาเป็นเทคโนโลยีพลังงานสะอาดเพื่อการเกษตรและการพัฒนาชุมชนอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: กังหันลม, การอัดอากาศเชิงกล, ความเร็วลมต่ำ

การวิเคราะห์เชิงพลังงานของชีวมวลเหลือทิ้งในมหาวิทยาลัยเพื่ออนาคตพลังงานคาร์บอนต่ำ Energy Analysis of University Biomass Waste for a Low-Carbon Energy Future

ณัฏฐณิชา พรกวินรัตนชัย¹ และ วิชชุดา ภาโส^{2*}

Natthannicha Phonkawinrattanachai¹ and Witchuda Pasom^{2*}

^{1,2} สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร สกลนคร 47000

^{1,2} Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University, Sakon Nakhon 47000

¹Corresponding author: Tel.: 0878119624. E-mail address: witchuda@snru.ac.th

Abstract

This study aims to rigorously analyze the energy composition of eight distinct types of biomass waste for which no comprehensive database is currently available in the vicinity of Sakon Nakhon Rajabhat University. The findings will serve both as a foundational database and as a resource for promoting low-carbon renewable energy alternatives. The research methodology encompasses proximate analysis, the application of fifteen established correlation equations, and the determination of higher heating value (HHV) via Bomb Calorimetry to assess the accuracy of the correlation models. Experimental results indicate that the biomass samples possess moisture contents ranging from 5.56% to 9.89%, all of which are below the 15% standard threshold. Volatile matter content ranged from 66.50% to 76.46%. Ash content values ranged from 5.69% to 16.20%; notably, lawn grass, banyan leaves, and bodhi leaves exceeded the 10% ash content standard. The measured HHV values ranged from 15.50–24.13 MJ/kg, exceeding the standard minimum of 14.50 MJ/kg. Among all samples, rain tree leaves exhibited the highest HHV at 24.13 MJ/kg, while lawn grass demonstrated the lowest at 15.50 MJ/kg. The correlation equation proposed by R. Saidur (2011) ($HHV = 0.335C + 1.423H - 0.154O$) yielded the minimum error, with an R^2 of 2.965, an average absolute error (AAE) of 7.883, and an average bias error (ABE) of 2.842. Biomass waste with favorable energy characteristics, including Ficus leaves, teak leaves, and alatus leaves, demonstrates suitability for conversion into compressed fuel, consistent with the compressed fuel standard (TIS 2772-2017), and thus represents a viable alternative for low-carbon energy applications.

Keywords: proximate analysis, compressed biomass, correlation equation

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางพลังงานของชีวมวลเหลือทิ้งที่ยังไม่เคยมีฐานข้อมูล ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร จำนวน 8 ชนิด เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลและเป็นทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่คาร์บอนต่ำ ด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์จากสมการสหสัมพันธ์จำนวน 15 สมการ พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าความร้อน (HHV) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter เพื่อคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของสมการสหสัมพันธ์ จากผลการทดลององค์ประกอบของชีวมวลทั้งหมด พบว่า มีค่าความชื้น 5.56%-9.89% (ไม่เกินมาตรฐาน 15%) มีสารระเหย 66.50%- 76.464% มีเถ้า 5.69%-16.20% (เกินมาตรฐาน 10% คือ หญ้าสนาม ใบต้นไทรและใบต้นโพธิ์) มีค่า HHV 15.50-24.13 MJ/Kg (สูงกว่ามาตรฐาน 14.50 MJ/Kg) โดยที่ใบจามจุรีมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 24.13 MJ/Kg และ หญ้าสนามมีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 15.50

MJ/Kg และพบว่าสมการสหสัมพันธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ สมการของ R. Saidur, 2011 ($HHV=0.335C+1.423(H)-0.154O$) ได้ค่า $R^2 = 2.965$ และค่า AAE = 7.883 ค่า ABE = 2.842 สำหรับชีวมวลเหลือทิ้งที่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์และมีคุณสมบัติทางพลังงานที่ดี เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็งได้ ตามมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแข็ง (มอก. 2772-2560) นั้นได้แก่ ใบกร่าง ใบสีก และ ใบยางนา และสามารถอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็งที่สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่คาร์บอนต่ำในอนาคตได้

คำสำคัญ: การวิเคราะห์โดยประมาณ ชีวมวลอัดแข็ง สมการสหสัมพันธ์

บทนำ

ด้วยความต้องการพลังงานที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และการใช้พลังงานจากฟอสซิลยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ปัจจุบันการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวลถือเป็นพลังงานที่เป็นที่นิยมและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงาน และยังสอดคล้องกับแผนพลังงานชาติโดยมุ่งความเป็นกลางทางคาร์บอนและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Alternative energy development plan AEDP2018) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน) ชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่มีการนำมาผลิตเป็นพลังงานมีค่าพลังงานความร้อนสูงประมาณ 14.7-16.7 MJ/kg [1] นอกจากนั้นชีวมวลจากพืชยังถือเป็นพลังงานที่เป็นกลางทางคาร์บอน เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลถูกดึงกลับมาใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืชรุ่นต่อไปได้

นอกจากนั้นยังมีชีวมวลที่น่าสนใจอีกกลุ่มคือ วัสดุชีวมวลเหลือทิ้งจากพื้นที่สาธารณะ ส่วนราชการต่างๆ หรือ พื้นที่มหาวิทยาลัย ที่ได้จากการตัดแต่งกิ่งไม้ต้นไม้เพื่อความสวยงามเป็นระเบียบเรียบร้อยของพื้นที่ แต่ส่วนใหญ่จะถูกนำไปกองรวมกันเพื่อให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติ มีเพียงใบจามจุรี ที่นำไปทำปุ๋ยหมัก ทำดินปลูก ซึ่งมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร มีเนื้อที่ทั้งสิ้น 636 ไร่ 2 งาน 4 ตารางวา มีวัสดุชีวมวลเหลือทิ้ง เช่น เศษใบไม้ เศษกิ่งไม้ ลูกไม้ และหญ้าสนามตามพื้นที่ต่างๆ มีจุดทิ้งกระจายทั่วพื้นที่ มีทั้งหมด 21 จุด แต่การจะนำวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งมาผลิตเป็นพลังงานนั้น จำเป็นต้องเลือกพืชที่มีคุณสมบัติทางพลังงานที่ดี คือ มีค่าพลังงานความร้อนสูง มีค่าความชื้นต่ำ มีชี้น้อย มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง มีสารระเหยสูง แต่การที่จะวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลังงานต้องใช้เครื่องมือที่มีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งคนทั่วไปเข้าถึงได้ยาก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางพลังงานของชีวมวลเหลือทิ้งที่ยังไม่เคยมีฐานข้อมูลทางพลังงาน จำนวน 8 ชนิด เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลและเป็นทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่คาร์บอนต่ำ ด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์จากสมการสหสัมพันธ์จำนวน 15 สมการ พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าความร้อน (HHV) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter เพื่อคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของสมการสหสัมพันธ์และค่าความคลาดเคลื่อนของสมการจะวิเคราะห์ด้วยสมการค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (R^2) สมการค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ยของความสัมพันธ์ (AAE) และสมการค่าความผิดพลาดอคติเฉลี่ย (ABE) จะทำให้ได้สมการสหสัมพันธ์ที่มีความแม่นยำและคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเหมาะที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลังงาน สำหรับผู้ที่สนใจแต่เข้าถึงเครื่องมือวัดต่าง ๆ ได้ยาก ในการ ใช้เพื่อพิจารณาเลือกวัสดุชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงต่อไป นอกจากนั้นยังเป็นการสนับสนุนและส่งเสริม ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ในปี 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero) ภายในปี 2065 ของประเทศไทยอีกทางหนึ่ง

วิธีการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดแผนการดำเนินการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งที่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ และยังไม่มีความรู้ข้อมูลด้านพลังงาน ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เช่น ใบไม้ และ หญ้าสนาม จัดเก็บ ตากให้แห้ง และบดให้ละเอียด ให้ได้ขนาด 1-3 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวล จะใช้ 2 รูปแบบ 1) การวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) ได้แก่ ค่าปริมาณคาร์บอนคงตัว (%FC) ตามมาตรฐาน ASTM D3172 ค่าปริมาณความชื้น (%MC) ตามมาตรฐาน ASTM D3173 ค่าปริมาณสารระเหย (%VM) ตามมาตรฐาน ASTM D3175 ค่าขี้เถ้า (%ASH) ตามมาตรฐาน ASTM D3174 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยสมการสหสัมพันธ์ (Correlation analysis) ได้แก่ C (คาร์บอนไดออกไซด์) H (ไฮโดรเจน) O (ออกซิเจน) และค่าความร้อนสูง (HHV) ตามมาตรฐาน ASTM E771

การวิเคราะห์โดยประมาณมีรายละเอียดดังนี้

- 1) จะใช้ตัวอย่างวัสดุเหลือทิ้ง ขนาด 3 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยทนไฟเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (MC) ตามมาตรฐาน ASTM D3173 โดยการนำไป อบในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6-12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาพักไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 15-20 นาที และชั่งน้ำหนักชีวมวลหลังอบ 105 องศาเซลเซียส นำน้ำหนักของชีวมวลที่หายไป ไปคำนวณร้อยละของความชื้นของชีวมวล ตามสมการ 1

$$\%MC = [(W_i - W_f) / (W_i - W_c)] \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ W_c = น้ำหนักภาชนะ, หน่วยกรัม

W_i = น้ำหนักเริ่มต้น (สารชีวมวล+ภาชนะ), หน่วยกรัม

W_f = น้ำหนักสุดท้ายหลังจากการอบ (สารชีวมวล+ภาชนะ), หน่วยกรัม

- 2) หลังจากนั้นใช้ตัวอย่างเดียวกันจากการหาความชื้น นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย (VM) ตามมาตรฐาน ASTM D3175 โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 5 องศาเซลเซียส ในเตาเผาไฟฟ้า (Muffle Furnace) เป็นเวลา 7 นาที หลังจากนั้นนำออกมาพักไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 15-20 นาที และชั่งน้ำหนักชีวมวลหลังเผา 950 ± 5 องศาเซลเซียส นำน้ำหนักของชีวมวลที่หายไป ไปคำนวณร้อยละของสารระเหยของชีวมวล ตามสมการที่ 2

$$A = [(W_i - W_f) / (W_i - W_c)] \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ W_c = น้ำหนักภาชนะ, หน่วยกรัม

W_i = น้ำหนักเริ่มต้น (สารชีวมวล+ภาชนะ), หน่วยกรัม

W_f = น้ำหนักสุดท้ายหลังจากการเผา (สารชีวมวล+ภาชนะ), หน่วยกรัม

ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารระเหย (%VM) = A-B

A = ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสีย

B = ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น

- 3) นำชีวมวลที่วิเคราะห์สารระเหยแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (Ash) ตามมาตรฐาน ASTM D314 โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ต้องปิดฝาถ้วยทนไฟ หลังจากนั้นนำออกมาพักไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 15-20 นาที และชั่งน้ำหนักชีวมวลหลังเผา 750 ± 5 องศาเซลเซียส นำน้ำหนักของชีวมวลที่หายไป ไปคำนวณร้อยละของปริมาณเถ้าของชีวมวล ตามสมการที่ 3

$$\%Ash = [(m_{ash} - m_{cont}) / (m_{od} - m_{cont})] \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ m_{ash} = น้ำหนักภาชนะ, หน่วยกรัม

m_{cont} = น้ำหนักเริ่มต้น (สารชีวมวล+ภาชนะ), หน่วยกรัม

m_{od} = น้ำหนักสุดท้ายหลังจากการเผา (สารชีวมวล+ภาชนะ), หน่วยกรัม

- 4) ส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D3172 หาได้จากค่าผลต่างของหนึ่งร้อยละด้วยผลรวมของร้อยละของความชื้น สารระเหยง่าย และปริมาณเถ้าของชีวมวล ตามสมการที่ 4

$$\%FC = 100 - (\%MC + \%VM + \%Ash) \quad (4)$$

โดยที่ $\%FC$ = ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว

$\%MC$ = ร้อยละของปริมาณความชื้น

$\%VM$ = ร้อยละของปริมาณสารระเหย

%Ash = ร้อยละของปริมาณเถ้า

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยสมการสหสัมพันธ์ (Correlation analysis) เพื่อประมาณค่าองค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าพลังงานความร้อน ได้แก่ C (คาร์บอนไดออกไซด์) H (ไฮโดรเจน) O (ออกซิเจน) และค่าความร้อนสูง (HHV) โดยใช้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (FC, MC, VM, Ash) เป็นค่านำเข้าในการวิเคราะห์ที่ใช้สมการสหสัมพันธ์

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ความถูกต้องและความแม่นยำของสมการสหสัมพันธ์ โดยการหาค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของค่าพลังงานความร้อนสูง HHV ที่ได้จากแต่ละสมการ เทียบกับค่าพลังงานความร้อนสูง HHV ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter

และหาค่าผลรวมของค่าผิดพลาดยกกำลังสองจากการทดลองจาก Bomb Calorimeter เพื่อที่จะหาสมการที่ดีที่สุดในการประมาณค่าร้อนเชื้อเพลิงชีวมวล ตามสมการที่ 5

ค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง =

$$(\text{ค่าความร้อนที่ได้จากบอมบ์แคลอรีมิเตอร์} - \text{ค่าความร้อนที่ได้จากสมการ})^2 \quad (5)$$

เพื่อประเมินความแม่นยำของสมการสัมพันธ์ จากค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ยของความสัมพันธ์ (AAE) และจากค่าความผิดพลาดอคติเฉลี่ย (ABE) สามารถคำนวณได้ [5] ตามสมการที่ 6 และ สมการที่ 7

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left| \frac{\text{Value}_p - \text{Value}_M}{\text{Value}_M} \right| \times 100\% \quad (6)$$

$$ABE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left[\frac{\text{Value}_p - \text{Value}_M}{\text{Value}_M} \right] \times 100\% \quad (7)$$

เมื่อ AAE = ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ยของความสัมพันธ์

ABE = ค่าความผิดพลาดอคติเฉลี่ย

Value_p = ค่าความร้อนที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์

Value_M = ค่าความร้อนจากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดแข็งจากชีวมวลเหลือทิ้งที่มีคุณสมบัติทางพลังงานดีที่สุดในพื้นที่ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

การทดสอบการผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดแข็ง

1. ขั้นตอนในการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง

1) การเตรียมวัสดุตัวอย่างในการอัดขึ้นรูป

โดยใช้วัสดุที่ทำการตากแห้ง และบดย่อยวัสดุให้ได้ขนาด 1 – 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดังนี้

1.1 ชั่งวัสดุตามอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้วัสดุประมาณ 3 กิโลกรัม

1.2 นำวัสดุที่ทำการชั่งเรียบร้อยแล้วเทใส่เครื่องกวนผสมและทำการวัดค่าความชื้น วัสดุเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (Grain Moisture Meter)

1.3 ทำการเพิ่มความชื้นวัสดุโดยการพ่นน้ำให้ได้ประมาณร้อยละ 30 – 35 และทำการ กวนผสมวัสดุในเครื่องผสม

1.4 นำวัสดุที่กวนผสมจัดเก็บไว้ในภาชนะปิดทิ้งไว้ประมาณ 30 – 45 นาที แล้วจึงนำ วัสดุไปใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป แบบเป็นเม็ด (Pellet)

2) กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง

การอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงโดยการนำวัสดุที่ทำการจัดเตรียมในขั้นตอน โดยทำการอัดขึ้นรูปแบบเม็ด (Pellet) มีรายละเอียด ดังนี้

2.1 นำวัสดุที่ทำการผสมไว้ โดยแต่ละชุดการทดลองใช้วัสดุประมาณ 3 กิโลกรัม

2.2 เปิดเครื่องอัด (Pelletizing press) และวัตถุดิบผงไม้ที่มีอุณหภูมิ ประมาณ 75 – 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องอัดผงไม้แบบอินฟาเรด เมื่อได้วัตถุดิบตามที่ต้องการจากนั้นนำวัสดุที่ทำการผสมไว้เทใส่เครื่องอัดในอัตราที่สม่ำเสมอ

2.3 เม็ดเชื้อเพลิงที่อัดได้ทำการลดอุณหภูมิและความชื้นเบื้องต้นโดยใช้พัดลมเป่า

2.4 นำเชื้อเพลิงที่ได้ทำการลดความชื้นโดยการนำไปตากแดด เป็นระยะเวลา ประมาณ 24 ชั่วโมง และทำการเก็บวัสดุไว้ในภาชนะปิดเพื่อป้องกันความชื้น

2.5 คัดแยกเชื้อเพลิงตามคุณภาพของวัสดุ 3 รูปแบบ ได้แก่ เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี คือ เชื้อเพลิงที่ไม่มีรอยแตก มีความมันวาว และรูปทรงตรง เชื้อเพลิงคุณภาพไม่ดี คือเชื้อเพลิงที่มี รอยแตก รูปทรงบิดเบี้ยว และวัสดุที่ไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ หรือเกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการ อัด และทำการชั่งวัสดุแต่ละกลุ่ม เพื่อคำนวณหาร้อยละของคุณภาพการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดลองชีวมวลที่มีการรวบรวมในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร มีทั้งหมด 17 ชนิด และที่ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์และไม่มีฐานข้อมูลทางด้านพลังงานจำนวน 8 ชนิด ดังตารางที่ 1 ที่นำมาศึกษาวิจัยในครั้งนี้ โดยผลการวิเคราะห์โดยประมาณ พบว่า ชีวมวลทุกชนิดมีค่าความชื้น 5-9 % (ไม่เกินค่ามาตรฐาน 15%) สารระเหยมี 64-76 % ซี้้ถ้า 5-16 % (ไม่เกินมาตรฐาน 10%) ชีวมวลที่มีปริมาณเถ้ามากเกินค่ามาตรฐานคือ ใบต้นไทร ใบต้นโพธิ์และหญ้าสนาม และชีวมวลมีปริมาณคาร์บอนคงตัว 7-16 % และมีค่าความร้อนสูง (HHV) มากกว่าค่ามาตรฐานของกระทรวงพลังงาน อยู่ในช่วงประมาณ 16.57 – 24.13 MJ/kg (ค่ามาตรฐาน ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg) โดยที่ ใบจามจุรี มีค่าความร้อนสูงมากที่สุด มีค่า 24.13 MJ/kg และใบต้นโพธิ์มีค่าความร้อนสูงน้อยที่สุดคือ 16.57 MJ/kg และจะพบว่าค่าความร้อนสูงของชีวมวล สอดคล้องกับปริมาณองค์ประกอบของ %FC และปริมาณองค์ประกอบของ %VM ชีวมวลที่มี %FC และ %VM ในสัดส่วนที่สูงมีแนวโน้มที่จะทำให้ค่า HHV ของชีวมวลสูงตามไปด้วย [11], [12], [13]

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ และค่าความร้อนสูงของชีวมวล

ชีวมวล	%MC	%VM	%ASH	%FC	HHV (MJ/kg)
ใบดอกคูณ	7.776 ± 0.431	76.464 ± 2.669	5.999 ± 1.473	9.760 ± 1.333	18.34 ± 0.31
ใบลิลาวดี	9.890 ± 0.1603	73.728 ± 0.744	9.352 ± 0.573	7.028 ± 0.387	19.83 ± 0.19
ใบต้นไทร	7.795 ± 0.213	67.213 ± 0.962	12.586 ± 0.145	12.404 ± 0.727	17.87 ± 0.71
ใบต้นโพธิ์	7.617 ± 0.325	66.589 ± 1.103	16.166 ± 0.442	9.626 ± 0.796	16.57 ± 0.48
ใบดอกเข็ม	8.702 ± 0.251	68.929 ± 1.441	5.696 ± 1.108	16.671 ± 2.304	20.93 ± 0.40
หญ้าสนาม	8.127 ± 0.159	66.504 ± 1.227	16.200 ± 0.838	9.167 ± 0.414	17.95 ± 0.69
ใบจามจุรี	5.568 ± 0.080	75.234 ± 1.349	6.600 ± 0.838	12.596 ± 0.642	24.13 ± 0.20
ใบกร่าง	9.501 ± 0.130	70.051 ± 1.881	7.062 ± 0.205	13.384 ± 1.859	20.85 ± 0.13

และเมื่อนำค่าองค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณจากตารางที่ 1 มาเป็นค่านำเข้า (Input) ในการคำนวณหาองค์ประกอบแบบแยกธาตุจากสมการในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นสมการสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของชีวมวลที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ที่มีการทำวิจัยที่ผ่านมา คือในกลุ่มพวง แกลบ เส้นใย กลุ่มเนื้อไม้ ชื้นไม้ และกลุ่มใบไม้ ลูกไม้ [5] เพื่อให้ได้ค่า C, H, O คือ ปริมาณร้อยละโดยมวล/มวลของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าองค์ประกอบแบบแยกธาตุจากสมการสหสัมพันธ์ (Correlation analysis) [5]

สมการสหสัมพันธ์	% ค่าองค์ประกอบธาตุ							
	ใบดอก คุณ	ใบ สืลาวดี	ใบต้น ไทร	ใบต้น โพธิ์	ใบดอก เข็ม	หญ้า สนาม	ใบ จามจุรี	ใบ กร่าง
$C = 0.635FC + 0.460VM - 0.095ASH(wt. \%)$	40.801	37.489	37.599	35.208	41.753	34.874	41.980	40.052
$H = 0.059FC + 0.060VM - 0.010ASH(wt. \%)$	5.104	4.745	4.639	4.402	5.062	4.369	5.191	4.992
$O = 0.340FC + 0.469VM - 0.023ASH(wt. \%)$	39.042	36.753	35.451	34.132	37.865	33.935	39.416	37.242

จากตารางผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ใบจามจุรี มีร้อยละขององค์ประกอบของคาร์บอน มากที่สุด คือ ร้อยละ 41.980 มีแนวโน้มที่จะให้ค่าพลังงานความร้อนสูงมากที่สุด สอดคล้องกับผลที่ได้ค่าการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter คือ 24.13 MJ/kg จากนั้นนำค่าองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (C, H, O) ที่ได้จากตารางที่ 2 ใช้เป็นค่านำเข้า (Input) สำหรับการคำนวณหาพลังงานความร้อนสูง (HHV) ของชีวมวลจากสมการสหสัมพันธ์ ในตารางที่ 3 ต่อไป

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยสมการสหสัมพันธ์ (Correlation analysis)

ลำดับ ที่	สมการสหสัมพันธ์	ค่าความร้อนสูง HHV (MJ/Kg)							
		ใบดอก คุณ	ใบ สืลาวดี	ใบ ต้นไทร	ใบ ต้นโพธิ์	ใบดอก เข็ม	หญ้า สนาม	ใบ จามจุรี	ใบ กร่าง
1	$HHV = 0.312FC + 0.1534VM$ [2,3]	14.774	13.502	14.180	13.218	15.775	13.061	15.471	14.921
2	$HHV = 0.196FC + 14.119$ [3]	16.031	15.496	16.550	16.005	17.386	15.915	16.587	16.742
3	$HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078A$ [4]	15.325	13.906	14.766	13.659	16.596	13.483	16.131	15.598
4	$HHV = -10.81408 + 0.3133(VM+FC)$ [6]	16.200	14.486	14.130	13.064	16.004	12.893	16.703	15.326
5	$HHV (MJ/kg) = 19.914 - 0.2324 (Ash)$ [7]	18.519	17.740	16.988	16.156	18.590	16.149	18.380	18.273
6	$HHV = 354.3FC + 170.8VM$ [8]	16.518	15.082	15.875	14.784	17.679	14.606	17.312	16.706
7	$HHV = 35,430 - 183.5VM - 354.3ASH$ [8]	19.273	18.587	18.636	17.483	20.763	17.486	19.285	20.073
8	$HHV = 28.296 - 0.2887A - 656.2/VM$ [9]	17.986	16.695	14.899	13.774	17.131	13.751	17.668	16.890
9	$HHV = 0.3543(FC) + 0.1798(VM)$ [10]	17.206	15.746	16.479	15.383	18.300	15.205	17.990	17.337
10	$HHV (MJ/kg) = -1.3675 + 0.3137 C + 0.7009 H + 0.0318 O$ [7]	16.251	14.887	14.806	13.848	16.483	13.714	16.693	15.831
11	$HHV = 0.4373C - 1.6701$ [10]	16.172	14.724	14.772	13.726	16.588	13.580	16.688	15.845
12	$HHV = 0.335C + 1.423(H) - 0.1540$ [10]	20.777	19.157	19.043	17.904	21.037	17.746	21.296	20.268

เมื่อนำค่าความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์จากสมการสหสัมพันธ์ ไปทดสอบความแม่นยำเทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter และนำไปคำนวณ พบว่า สมการสหสัมพันธ์ของ R. Saidur , (2011) $HHV = 0.335C + 1.423(H) - 0.1540$ [10] มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (R^2) = 2.249 มีค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (AAE) = 5.943 และมีค่าความผิดพลาดอคติเฉลี่ย (ABE) = 1.167 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในกลุ่มของสมการทั้งหมด 12 สมการ ในตารางที่ 3 คือ ค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (R^2) = 2.249 สมการค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (AAE) = 5.943 และสมการค่าความผิดพลาดอคติเฉลี่ย (ABE) = 1.167 จากนั้นทางผู้วิจัยได้นำชีวมวลในมหาวิทยาลัยที่มีฐานข้อมูลทางพลังงานมาตรวจสอบความถูกต้องของสมการ คือ ใบสัก ใบยางนา และใบหูกวาง

พบว่าผลวิเคราะห์ทดลองให้ผลสอดคล้องกับชีวมวลทั้ง 8 ชนิดที่ผ่านมาคือ สมการลำดับที่ 12 มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (R^2) = 1.959 สมการค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ยของความสัมพันธ์ (AAE) = 6.092 สมการค่าความผิดพลาดอคติเฉลี่ย (ABE) = 2.236 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่อง Bomb Calorimeter มากที่สุด จากนั้นจึงนำชีวมวลในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่มีคุณสมบัติทางพลังงานที่ดีที่สุดและยังไม่มีมีการนำมาใช้ประโยชน์ 3 อันดับแรก คือ ใบกว้าง ใบสีก และใบยางนา มาทดลองการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็ง จากการทดสอบอัดขึ้นรูปชีวมวลทั้ง 3 ชนิด สามารถนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแข็งได้ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแข็ง

ชีวมวลอัดแข็ง	ลักษณะทางกายภาพ
	-ผิวเรียบ ไม่มันวาว รอยแตกร้าวน้อยมาก -ความยาวประมาณ 40-60 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 11.5 mm -การดูดซึมน้ำ 2.68% -การแตกร่วน 5.84% -%ความชื้น 0.131% -ค่าความร้อนสูง 19.378 MJ/kg
	-ผิวเรียบ มันวาว รอยแตกร้าวน้อยมาก -ความยาวประมาณ 40-60 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 11.5 mm -การดูดซึมน้ำ 2.21 % -การแตกร่วน 1.91 % -%ความชื้น 0.095% -ค่าความร้อนสูง 18.479 MJ/kg
	-ผิวเรียบ ไม่มันวาว รอยแตกร้าวน้อยมาก -ความยาวประมาณ 40-60 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 11.5 mm -การดูดซึมน้ำ 1.73% -การแตกร่วน 2.88% -ความชื้น 0.111% -ค่าความร้อนสูง 18.700 MJ/kg

จะเห็นว่าชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะทางกายภาพเป็นไปตามมาตรฐาน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแข็ง เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6mm-25mm ความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 3.15mm-40mm และความชื้นไม่เกิน 15 %) มีค่าความร้อนสูงมากกว่าค่ามาตรฐาน คือ ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg (ตามมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแข็ง มอก.2772-2560)

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองชีวมวลที่มีการรวบรวมในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร มีทั้งหมด 17 ชนิด และที่ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์และไม่มีฐานข้อมูลทางด้านพลังงานจำนวน 8 ชนิด นำมาวิเคราะห์โดยประมาณ พบว่า ชีวมวลทุกชนิดมีค่าความชื้น 5-9 % (ไม่เกินค่ามาตรฐาน 15%) สารระเหยมี 64-76 % ชีวเถ้า 5-16 % (ไม่เกินมาตรฐาน 10%) ชีวมวลที่มีปริมาณเถ้ามากเกินค่ามาตรฐานคือ ใบต้นไทร ใบต้นโพธิ์และหญ้าสนาม มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 7-16 % ค่าความร้อนสูง (HHV) 15.50 – 24.13 MJ/kg (ไม่น้อยกว่าค่ามาตรฐาน 14.5 MJ/kg) โดยที่ ใบจามจุรี มีค่าความร้อนสูงมากที่สุด มีค่า 24.13 MJ/kg และหญ้าสนามน้อยที่สุดคือ 15.50 MJ/kg จากการทดลองพบว่าชีวมวลที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ หญ้าสนาม ใบต้นไทรและใบต้นโพธิ์ เนื่องจากมีปริมาณเถ้าสูงเกินมาตรฐาน ส่วนใบดอกเข็มมีปริมาณการรวบรวมการตัดแต่งในพื้นที่โดยรวมค่อนข้างน้อยอาจจะไม่เหมาะสมเป็นวัสดุหลักในการผลิตเชื้อเพลิง ส่วนใบจามจุรีที่มีค่า HHV สูงที่สุดแต่ ถือว่ามีการนำมาใช้ประโยชน์ในการมาทำดินปลูกต้นไม้อยู่แล้ว จากการวิเคราะห์จากสมการสหสัมพันธ์พบว่า

สมการที่มีความแม่นยำสูงที่สุดคือสมการของ R.Saidur,2011 ($HHV=0.335C+1.423(H)-0.154O$) คือมี ค่าความผิดพลาด ยกกำลังสอง (R^2) = 2.831 และค่า AAE = 7.325 ค่า ABE = 3.40 สามารถใช้ในการทำนายค่าพลังงานความร้อนของชีวมวล ได้ใกล้เคียงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Bomb Calorimeter มากที่สุด และชีวมวลที่มีคุณสมบัติที่ดีทางพลังงาน และ ไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยคือ ใบกร่าง ใบสั๊ก และใบยางนา สามารถนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัด แข็งได้ และมีคุณสมบัติที่ดีเป็นไปตามมาตรฐานของเชื้อเพลิงอัดแข็งมีค่าความร้อนสูง (HHV) อยู่ระหว่าง 18.700 MJ/kg - 19.378 MJ/kg เป็นทางเลือกสำหรับใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนที่ส่งเสริมความเป็นกลางทางคาร์บอนในอนาคตต่อไป ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางสาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการวิเคราะห์องค์ประกอบ และค่าความร้อนของชีวมวล ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยใน ครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อยู่ วัฒนา, & เลิศ ทศนีย์. (2017). การ ประเมิน ความ เหมาะสม ของ วัตถุดิบ ชีว มวล ใน การ ผลิต เชื้อเพลิง อัด เม็ด ตาม แนวคิด ผลิต ภาพ สี เขียว.
- [2] อธิสรร์ อินทนนท์และวรัญญู วงศ์คำลือ (2552) การเปรียบเทียบสมการค่าความร้อนของชีวมวลจากการวิเคราะห์ องค์ประกอบโดยประมาณ (Doctoral dissertation, มหาวิทยาลัย นเรศวร).
- [3] นงนุช ศรีเล็กและคณะ (2565). สหสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการประเมินค่าความ ร้อนสูงด้วยค่าการวิเคราะห์ โดยประมาณของชีวมวลและถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้และขังข้าวโพด. Wittayasara: Integration Apply Engineering and Industrial Technology, 15(1), 13-25.
- [4] นිරนุช วรีวงศ์ (2559) การศึกษาค่าความร้อนสำหรับเคราฤชีเพื่อเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ:รายงานวิจัย สาขาวิชาการ จัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [5] Shen, J., Zhu, S., Liu, X., Zhang, H., & Tan, J. (2010). The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. Energy Conversion and Management, 51(5), 983-987.
- [6] Jiménez, L., & González, F. (1991). Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels. Fuel, 70(8), 947-950.
- [7] Changdong Sheng1 , J.L.T. Azevedo*. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. Biomass and bioenergy, 28(5), 499-507.
- [8] Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Rodriguez, J. J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. Fuel, 80(11), 1567-1571
- [9] Özyüğüran, A., & Yaman, S. (2017). Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis. Energy Procedia, 107, 130-136.
- [10] Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. Renewable and sustainable energy reviews, 15(5), 2262-2289.
- [11] Nhuchhen, D. R., & Afzal, M. T. (2017). HHV predicting correlations for torrefied biomass using proximate and ultimate analyses. Bioengineering, 4(1), 7.
- [12] Daskin, M., Erdoğan, A., Güleç, F., & Okolie, J. A. (2024). Generalizability of empirical correlations for predicting higher heating values of biomass. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 46(1), 5434-5450.
- [13] Brandić, I., Pezo, L., Voća, N., & Matin, A. (2024). Biomass higher heating value estimation: A comparative analysis of machine learning models. Energies, 17(9), 2137.

การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์ ในการศึกษาต้นแบบการผลิต
ระบบไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนผสมผสานขนาด 150 kW กรณีศึกษาเกาะเต่า จ.สุราษฎร์ธานี
Computer Analysis of Photovoltaic in Hybrid 150 kW System Plant case Study of Tao Island

สันติ พลอยพรหม¹, วิรัชย์ โรยนรินทร์^{1,2*}, สิริศักดิ์ ปางวุฒินิชย์¹, วรเชษฐ์ แสงสีดา¹, ไวยวิทย์ อุทัยเฉลิม¹, ธนยศ คิตเมตตากุล¹
และ สุเทพ สีมาลา¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

² ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

*Corresponding author: Tel.: 02-5493433. E-mail address: wirachai.r@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper aims to develop and test a prototype Hybrid Renewable Energy System (HRES) comprising a 100 kW wind turbine, a 50 kW solar PV system, and a Li-NMC battery energy storage system with at least 140 kWh capacity to reduce diesel fuel consumption on Ko Tao Island, Surat Thani Province.

The study includes site surveys for wind-solar potential, system architecture design, PowerWorld simulations, and the development of a real-time monitoring and control platform. Results show that the system can operate in both on-grid and islanded modes, with the Li-NMC battery effectively stabilizing voltage and frequency.

Economic analysis indicates the project's feasibility, with a Net Present Value (NPV) of approximately 12 million THB, an Internal Rate of Return (IRR) of 14.5%, and a Payback Period of about 7 years. The system can also reduce CO₂ emissions by around 800 tons annually, contributing to national clean energy targets.

Keywords: Renewable energy, Microgrid, Wind turbine, Solar PV, Battery storage

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบต้นแบบโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน (Hybrid Renewable Energy System; HRES) ประกอบด้วยกังหันลมขนาด 100 กิโลวัตต์ โซลาร์เซลล์ขนาด 50 กิโลวัตต์ และระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด Li-Phosphate ความจุไม่น้อยกว่า 140 kWh เพื่อลดการพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าด้วยน้ำมันดีเซลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) บนเกาะเต่า จังหวัดสุราษฎร์ธานี

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยการสำรวจศักยภาพพลังงานลม-แสงอาทิตย์ การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบการจำลองด้วยโปรแกรม PowerWorld และการจัดทำระบบติดตาม-ควบคุมข้อมูลพลังงานแบบเรียลไทม์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ทั้งโหมดเชื่อมต่อสายส่ง (On-grid) และโหมดแยกตัว (Islanded) โดยมีแบตเตอรี่ Li-Phosphate ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพแรงดันและความถี่ของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่า โครงการสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้ในระยะยาว โดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ประมาณ 12 ล้านบาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 14.5 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ประมาณ 7 ปี พร้อมทั้งสามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 800 ตันต่อปี ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาพลังงานสะอาดของประเทศ

คำสำคัญ: พลังงานทดแทน, ไมโครกริด, กังหันลม, โซลาร์เซลล์, แบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน

การวิเคราะห์ศักยภาพและความเป็นไปได้ทางการเงินในการพัฒนาอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์
ด้วยระบบไมโครกริดจากเซลล์แสงอาทิตย์

Feasibility Study and Potential Analysis for Developing the Yupparat Wittayamongkol
Building into a Net-Zero Energy Building with a Microgrid System

ชัชพล ต้นด้าว^{1*}, จริญญา คนแรง¹, ธนพล แสงสุวรรณ¹ และ วิภพ ใจแข็ง¹

Chatchaphon Tanta^{1*}, Jarun Khonrang¹, Thanapon Saengsuwan¹ and Wipobh Jaikhang¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เชียงราย 57100

¹ Department of Electrical Engineering and Smart Grid Technology, Faculty of Industrial Technology,
Chiang Rai Rajabhat University, Chiang Rai 57100

Abstract

This research aims to assess the financial feasibility of transforming the Yupharat Wittayamongkhon Building at Chiang Rai Rajabhat University into a Net Zero Energy Building (NZEB). Both solar photovoltaic (PV) system configurations were analyzed: an off-grid system with battery storage and an on-grid system allowing daytime energy sales to offset nighttime consumption. System design and performance were simulated using the PVsyst Program. Results show the off-grid system generates 488.65 MWh/year with a Solar Fraction (SF) of 98.08% and a Performance Ratio (PR) of 58.73%. The on-grid system produces 688.94 MWh/year, with 340.19 MWh/year used onsite, SF of 68.28%, and PR of 86.12%, indicating better energy conversion efficiency. Based on a 20-year financial analysis with a 6.31% discount rate, 0.5% annual O&M inflation, and 0.5% module degradation, the off-grid system has a negative Net Present Value (NPV) of -7.77 million Thai Baht and a Benefit–Cost Ratio (BCR) of 0.75. In contrast, the on-grid system yields a positive Net Present Value (NPV) of 12.82 million Thai Baht, a BCR of 1.64, and a payback period of 8 years and 7 months. Therefore, the on-grid model is more economically viable and aligns with government energy-efficiency initiatives, serving as a replicable model for future NZEB developments.

Keywords: Net Zero building, Financial Feasibility, Rooftop Solar System

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการพัฒนาอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ให้เป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) ด้วยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบไมโครกริด โดยทำการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบในสองรูปแบบ ได้แก่ ระบบออฟกริดพร้อมแบตเตอรี่ (Off-grid with battery) และระบบออนกริด (On-grid) ร่วมกับการขายไฟในตอนกลางวันเพื่อทดแทนค่าไฟที่ใช้ไปในตอนกลางคืน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านเทคนิคและความคุ้มค่าทางการเงิน

จากผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม PVsyst พบว่า ระบบ Off-Grid มีกำลังผลิต 488.65 MWh/ปี คิดเป็นค่า Solar Fraction (SF) ประมาณ 98.08% และ Performance Ratio (PR) อยู่ที่ 58.73% ในขณะที่ระบบ On-grid สามารถผลิต

ไฟฟ้าได้ 688.94 MWh/ปี ใช้ภายในอาคาร 340.19 MWh/ปี มีค่า PR 86.12% และ SF 68.28% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่สูงขึ้น

ด้านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินใช้ระยะเวลาประเมิน 20 ปี อัตราคิดลด 6.31% อัตราเงินเพื่อค่าใช้จ่ายดำเนินการ 0.5% และอัตราเสื่อมมูลค่า 0.5% ต่อปี พบว่า ระบบ Off-Grid ให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ประมาณ -7.77 ล้านบาท และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อทุน (BCR) เท่ากับ 0.75 ซึ่งยังไม่ผ่านเกณฑ์ความคุ้มค่า ขณะที่ระบบ On-grid มีค่า NPV ประมาณ +12.82 ล้านบาท BCR เท่ากับ 1.64 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

จากการศึกษาดังกล่าวสรุปได้ว่า ระบบ On-grid เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่า เพราะมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 8 ปี 7 เดือน ซึ่งคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และในเชิงศักยภาพในการพัฒนาอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์สามารถนำส่วนต่างที่ได้จากการขายไฟมาทดแทนพลังงานที่ซื้อมาใช้ในตอนกลางคืนจึงทำให้สามารถบรรลุความสำเร็จทั้งเชิงพลังงานและเชิงเศรษฐศาสตร์ในระยะยาวได้ ทั้งยังสอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาอาคารประหยัดพลังงานของภาครัฐ และงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ ตัดสินใจลงทุน และพัฒนาอาคารอื่น ๆ ให้เข้าสู่เกณฑ์ NZEB อย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: อาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์, ความเป็นไปได้ทางการเงิน, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในภาคอาคารซึ่งมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 23 ของการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งประเทศ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2566) ปัจจุบันดังกล่าวไม่เพียงสร้างแรงกดดันต่อความมั่นคงทางพลังงาน แต่ยังส่งผลกระทบต่อภาระต้นทุนการดำเนินงานของหน่วยงานภาครัฐและสถาบันการศึกษา นโยบายพลังงานระดับชาติ เช่น แผนพลังงานชาติ (National Energy Plan: NEP 2022) และแผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2561–2580 โดยเฉพาะอาคารสถานศึกษาที่ใช้ระบบแสงสว่างและปรับอากาศเป็นหลักถึงร้อยละ 80 ของพลังงานทั้งหมด (ศุภโชค สนธิไชย และสิริวิรัตน์ โรโห, 2564) จึงมีการกำหนดทิศทางการยกระดับประสิทธิภาพพลังงานและการใช้พลังงานสะอาดในภาคอาคาร ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ส่งเสริมให้อาคารสำนักงานพัฒนาเป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building) โดยเน้นการวิเคราะห์การใช้พลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานสะอาด เช่น ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 2568) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำแนวทางดังกล่าวมาประยุกต์โดยติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงกลางวัน ซึ่งหากมีพลังงานส่วนเกินจากการใช้งานภายในอาคาร จะถูกส่งกลับเข้าสู่ระบบโครงข่ายของการไฟฟ้า (On-Grid) เพื่อจำหน่าย โดยรายได้จากการขายไฟฟ้าส่วนเกินนี้จะถูกนำมาใช้ชดเชยกับค่าไฟฟ้าที่จำเป็นต้องซื้อจากโครงข่ายในช่วงกลางคืน ส่งผลให้สมดุลพลังงานของอาคารสามารถเข้าใกล้หรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นแนวคิดหลักของ NZEB ทั้งในแง่ปริมาณพลังงานและค่าใช้จ่าย งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย โดยใช้กรอบแนวคิดอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ ผ่านการออกแบบและจำลองระบบพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 2 ทางเลือก ได้แก่ ระบบ Off-Grid ที่ใช้แบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน และระบบ On-grid ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า การศึกษาครั้งนี้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านเทคนิคของทั้งสองระบบ พร้อมประเมินความคุ้มค่าทางการเงินด้วยดัชนีทางเศรษฐศาสตร์ เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (BCR) และระยะเวลาคืนทุนคิดลด ผลการวิจัยจะเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดนโยบายด้านพลังงานในระดับสถาบันอุดมศึกษา รวมถึงสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบและตัดสินใจลงทุนโครงการอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ในไทย

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพทางเทคนิคและความเป็นไปได้ทางการเงินในการพัฒนาอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ให้เป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. แหล่งที่มาของข้อมูล ประกอบด้วย

1.1 แหล่งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) จำนวน 20 คน

ได้จากการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารจัดการอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้ข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลภายในองค์กรเกี่ยวกับรูปแบบการใช้พลังงาน สภาพอาคาร ระบบแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ

1.2 แหล่งข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ได้จากเอกสารรายงานวิชาการ รายงานการวิเคราะห์โครงการมาตรฐานทางเทคนิค และข้อมูลจากหน่วยงานราชการ

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ โดยใช้ข้อมูล 2 แบบ ได้แก่ แบบสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารจัดการอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย และสอบถามราคาผู้ผลิตสินค้าที่ใช้ในโครงการ

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Method) เป็นการวิเคราะห์ถึงต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis: CBA) ทางการเงินของการพัฒนาอาคาร เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ให้ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ โดยอาศัยเครื่องมือทางการเงิน ประกอบด้วย ดังนี้

1.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและผลประโยชน์ของโครงการตั้งแต่ปีแรก ในปีที่ 0 จนถึงตลอดอายุของโครงการ โดยมีองค์ประกอบ ดังนี้

1.1.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost) เป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรกของโครงการ โดยปรับให้อยู่ในรูป บาทต่อวัตต์พีค (THB/Wp) เพื่อให้เปรียบเทียบข้ามขนาดระบบได้ ดังนี้

1.1.2 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (Operation Cost) หลังจากติดตั้งระบบแล้ว ยังคงมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและดำเนินงาน ซึ่งรวมถึง

1.1.3 รายได้และผลประโยชน์ของโครงการ ซึ่งเป็นผลตอบแทนรวมของแต่ละปีตลอดอายุของโครงการ คือ ผลการประหยัดจากการใช้ไฟฟ้า

1.2 งบกำไรขาดทุน (Income Statement) เป็นงบที่แสดงผลการดำเนินงานของโครงการลงทุนในช่วงเวลาหนึ่ง โดยผลลัพธ์ที่ได้คือกำไรสุทธิหรือขาดทุนสุทธิ

1.3 งบกระแสเงินสด (Statement of Cash Flows) เป็นงบแสดงการได้มาและใช้ไปของเงินสดของโครงการในช่วงเวลาหนึ่ง

1.4 อัตราคิดลด (Discount Rate) เป็นอัตราส่วนที่ใช้สำหรับคิดลดกระแสเงินสดหรือดอกเบี้ยและผลตอบแทนของโครงการในแต่ละปีให้เป็นมูลค่าปัจจุบัน

1.5 ตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการ (Indicators of Project Worth) มีความสำคัญอย่างมากต่อการตัดสินใจที่จะรับหรือปฏิเสธโครงการที่กำลังจะเริ่มอยู่ หรือกำลังนำใช้สำหรับเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจลงทุน (Investment decision criteria) เพราะตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการสามารถนำมาประกอบการพิจารณาแต่ละโครงการที่จะต้องมีการลงทุนหรือไม่ โดยหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจเพื่อการลงทุน แบ่งเป็น 2 ประเภท (พิชัย อาจริชัย, 2550) ดังนี้

1.5.1 การวิเคราะห์แบบไม่ปรับค่าของเวลา (non-discounted measures of project worth) เป็นเกณฑ์ที่พิจารณาระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการ โดยพิจารณาแบบ

ว่าปีที่จะได้ครบยอดผลแทนเท่ากับเงินลงทุนที่ใช้ไป หรือ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) หลักเกณฑ์เลือกโครงการคือ ระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุด แสดงว่าโครงการมีมูลค่าคุ้มค่าในการลงทุน คำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{จำนวนปีก่อนคืนทุน} + \frac{\text{จำนวนเงินส่วนที่ยังไม่คืนทุน}}{\text{จำนวนกระแสเงินสดในปีที่คืนทุน}}$$

1.5.2 การวิเคราะห์แบบปรับค่าของเวลา (discounted measures of project worth) เป็นการนำผลต่างระหว่างผลประโยชน์กับค่าใช้จ่ายของโครงการในช่วงระยะเวลาที่ต่างกันตลอดช่วงอายุโครงการมาปรับค่าให้อยู่ในเวลาเดียวกันเป็นปัจจุบัน ซึ่งวิธีที่คำนึงถึงมูลค่าของเงินตามเวลา ได้แก่

1.5.2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือ ผลรวมของผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนที่ได้รับกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนที่จ่ายไปแต่ละปีของโครงการว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ ซึ่งอาจมีค่าเป็นลบ เป็นศูนย์ หรือเป็นบวกก็ได้ หลักเกณฑ์การเลือกโครงการ คือ NPV ต้องเท่ากับหรือมากกว่าศูนย์ คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{NB_t}{(1+WACC)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{IC_t}{(1+WACC)^t}$$

โดยที่ NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ, NB_t = ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานในปีที่ t, IC_t = ต้นทุนของโครงการในปีที่ t, WACC = อัตราคิดลดถ่วงน้ำหนัก, t = ระยะเวลาของโครงการ (0, 1, ..., n), n = อายุของโครงการเป็นปี

1.5.2.2 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit–Cost Ratio: BCR) เป็นอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของรายได้ตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนตลอดอายุโครงการ ซึ่งมีหลักเกณฑ์การเลือกโครงการ คือ จะเลือกโครงการที่ BCR มีค่ามากกว่า 1 คำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

โดยที่ B_t = ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t, C_t = ต้นทุนของโครงการในปีที่ t, t = ระยะเวลาของโครงการ (0, 1, 2, ..., n), r = อัตราคิดลดหรืออัตราดอกเบี้ยที่เหมาะสม, n = อายุของโครงการเป็นปี

สูตรนี้ใช้เพื่อประเมินความคุ้มค่าของโครงการ โดยถ้า BCR > 1 ถือว่าโครงการมีความคุ้มค่าสำหรับการลงทุน

1.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เป็นการพิจารณาผลกระทบเมื่อสถานการณ์การดำเนินโครงการไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ และความเสี่ยงต่าง ๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในอนาคต ทำให้ส่งผลต่อการลงทุนในโครงการ โดยการกำหนดให้ตัวแปรสำคัญในการดำเนินโครงการมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้การกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ยังคงค่าคงที่ ในการศึกษาได้กำหนดตัวแปรในกรณีต่างๆ โดยกำหนดให้ ต้นทุนค่าอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายตลาด โดยใช้ปัจจัยอื่นคงที่

3. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนา (Descriptive Method)

ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดตัวชี้วัดและระดับคะแนนของตัวชี้วัดในแต่ละด้าน เพื่อมาคำนวณหาค่าดัชนีประกอบอย่างง่าย (Composite Index) ที่สะท้อนศักยภาพของโครงการ โดยในการศึกษานี้ได้นำตัวชี้วัดจากงานวิจัยของ (สมาลี สันติพลวุฒิ และคณะ, 2554) โดยมีองค์ประกอบด้าน 4 ด้าน ได้แก่ ปัจจัยการผลิต อุปสงค์หรือความต้องการของตลาด อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องและสนับสนุนกัน กลยุทธ์ โครงสร้าง และการแข่งขัน เพื่อประเมินคะแนนแล้วนำไปคำนวณดัชนีประกอบอย่างง่าย ดังนี้

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^m X_{ij}}{\sum_{j=1}^m \text{Max}X_{ij}}$$

โดยที่ D_i = คะแนนการประเมินศักยภาพด้านที่ i, X_{ij} = คะแนนการประเมินของตัวชี้วัดด้านที่ i ตัวที่ j, MaxX_{ij} = คะแนนสูงสุดของตัวชี้วัดด้านที่ i ตัวที่ j, i = ศักยภาพของการพัฒนาอาคาร ให้ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ ในแต่ละด้าน, j =

ตัวชี้วัดแต่ละด้านในการประเมินศักยภาพของการพัฒนาอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ให้ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์

เมื่อได้คะแนนศักยภาพในแต่ละด้านและภาพรวมแล้ว จึงนำไปประเมินระดับศักยภาพตามหลักอัตราภาคขึ้น ซึ่งคิดเป็นร้อยละ

ตารางที่ 1 การจำแนกระดับศักยภาพของการพัฒนาอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายให้ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์

คะแนนรวมทั้งหมด (ร้อยละ)	ระดับศักยภาพ
มากกว่า 80-100	สูง
มากกว่า 60-80	ค่อนข้างสูง
มากกว่า 40-60	ปานกลาง
มากกว่า 20-40	ค่อนข้างต่ำ
0-20	ต่ำ

หลังจากได้รับผลการวิเคราะห์ ระดับศักยภาพ จึงนำผลดังกล่าวมาจำแนกให้เป็นจุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคของโครงการ (SWOT Analysis)

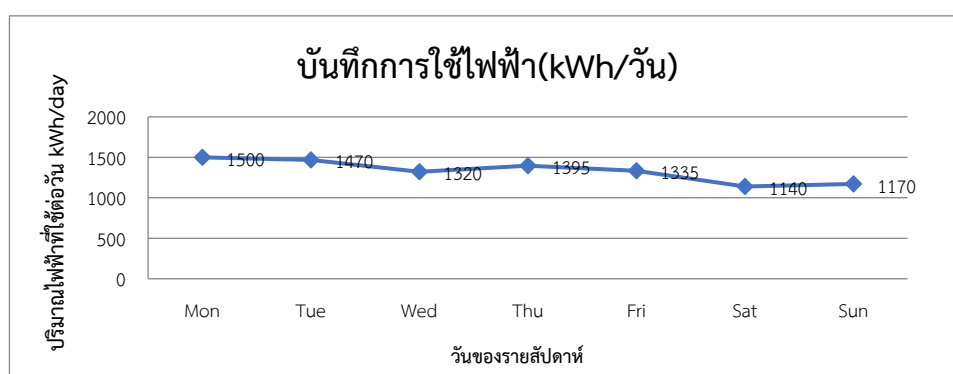
ผลการวิจัย

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานของอาคารจากกองบริการการศึกษาและงานอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ข้อมูลประกอบด้วยปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า รายจ่ายค่าไฟฟ้า และรูปแบบการใช้งานของอาคารยุพราชวิทยมงคล

1.1 แหล่งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) จำนวน 20 คน

ผลจากการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารจัดการอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้ข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลภายในองค์กรเกี่ยวกับรูปแบบการใช้พลังงาน และสภาพอาคาร



ภาพที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)

1.2 แหล่งข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) สถิติการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปีของอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย แสดงจำนวนหน่วยไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 ถึง ธันวาคม 2567 โดยพบว่าค่าไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในปี 2567 ที่ 2,395,673 บาท

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ โดยใช้ข้อมูล 2 แบบ ได้แก่ แบบสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารจัดการอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย และสอบถามราคาผู้ผลิตสินค้าที่ใช้ในโครงการ

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Method) เป็นการวิเคราะห์ถึงต้นทุนและผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis: CBA) ทางการเงินของการพัฒนาอาคาร เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ให้ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ โดยอาศัยเครื่องมือทางการเงิน ประกอบด้วย ดังนี้

1.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและผลประโยชน์ของโครงการตั้งแต่ปีแรก ในปีที่ 0 จนถึงตลอดอายุของโครงการ โดยมีองค์ประกอบ ดังนี้

1.1.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost) เป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรกของโครงการ ประกอบด้วย ต้นทุนการติดตั้ง ระบบโซลาร์เซลล์

- แผง = 2,545 = 4.07 บาท/Wp
- ค่าติดตั้งระบบ = 19,725,001.95 = 33.3 บาท/Wp
- ค่า Inverter = 2,470,000.00 = 4.68 บาท/Wp

1.1.2 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ (Operation Cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อโครงการเริ่ม ประกอบด้วย ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา ค่าทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์ และ ค่าเพื่อเปลี่ยนแบตเตอรี่

- ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา: 30,000 บาท/ปี
- ค่าทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์: 20,000 บาท/ปี
- ในส่วนของระบบ On-grid ค่าบำรุงรักษา อยู่ที่ 140,000 บาท/ปี

1.1.3 รายได้และผลประโยชน์ของโครงการ ซึ่งเป็นผลตอบแทนรวมของแต่ละปีตลอดอายุของโครงการ

1.2 งบกำไรขาดทุน (Income Statement) ภายใต้สมมติฐานเดียวกัน (อัตราคิดลด 6.31%/ปี เงินเพื่อ O&M 0.5%/ปี และการเสื่อมมูลค่า 0.5%/ปี) ระบบ Off-Grid ให้ผลทางการเงินเป็นลบ โดยมี NPV = -7.77 ล้านบาท ในทางกลับกัน ระบบ On-grid มีความคุ้มค่าอย่างชัดเจน โดย NPV = +12.818 ล้านบาท

1.3 งบกระแสเงินสด (Statement of Cash Flows) เป็นงบแสดงการได้มาและใช้ไปของเงินสดของโครงการในช่วงเวลาหนึ่ง

1.4 อัตราคิดลด (Discount Rate) กำหนดค่าอัตราคิดลด (Discount rate, r) = 6.31% (Farungsang, 2025)

1.5 ตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการ (Indicators of Project Worth) มีความสำคัญอย่างมากต่อการตัดสินใจที่จะรับหรือปฏิเสธโครงการที่กำลังจะเริ่มอยู่ หรือกำลังนำไปใช้สำหรับเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจลงทุน (Investment decision criteria) เพราะตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการสามารถนำมาประกอบการพิจารณาแต่ละโครงการที่จะต้องมีการลงทุนหรือไม่ โดยหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจเพื่อการลงทุน แบ่งเป็น 2 ประเภท (พิชัย อาจริชัย, 2550) ดังนี้

1.5.1 การวิเคราะห์แบบไม่ปรับค่าของเวลา (non-discounted measures of project worth) เป็นเกณฑ์ที่พิจารณาระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการ โดยพิจารณาแบบว่าปีที่จะได้ครบยอดผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนที่ใช้ไป หรือ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) หลักเกณฑ์เลือกโครงการคือ ระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุด แสดงว่าโครงการมีมูลค่าคุ้มค่าในการลงทุน คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{จำนวนปีก่อนคืนทุน} + \frac{\text{จำนวนเงินส่วนที่ยังไม่คืนทุน}}{\text{จำนวนกระแสเงินสดในปีที่คืนทุน}}$$

1.5.2 การวิเคราะห์แบบปรับค่าของเวลา (discounted measures of project worth) เป็นการนำผลต่างระหว่างผลประโยชน์กับค่าใช้จ่ายของโครงการในช่วงระยะเวลาที่ต่างกันตลอดช่วงอายุโครงการมาปรับค่าให้อยู่ในเวลาเดียวกันเป็นปัจจุบัน ซึ่งวิธีที่คำนึงถึงมูลค่าของเงินตามเวลา ได้แก่

1.5.2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือ ผลรวมของผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนที่ได้รับกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนที่จ่ายไปแต่ละปีของโครงการว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ ซึ่งอาจจะมีค่าเป็นลบ เป็นศูนย์ หรือเป็นบวกก็ได้ หลักเกณฑ์การเลือกโครงการ คือ NPV ต้องเท่ากับหรือมากกว่าศูนย์ คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{NB_t}{(1+WACC)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{IC_t}{(1+WACC)^t}$$

โดยที่ NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ, NB_t = ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานในปีที่ t , IC_t = ต้นทุนของโครงการในปีที่ t , WACC = อัตราคิดลดถ่วงน้ำหนัก, t = ระยะเวลาของโครงการ (0, 1, ..., n), n = อายุของโครงการเป็นปี

1.5.2.2 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit–Cost Ratio: BCR) เป็นอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของรายได้ตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนตลอดอายุโครงการ ซึ่งมีหลักเกณฑ์การเลือกโครงการ คือ จะเลือกโครงการที่ BCR มีค่ามากกว่า 1 คำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

โดยที่ B_t = ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t , C_t = ต้นทุนของโครงการในปีที่ t , t = ระยะเวลาของโครงการ (0, 1, 2, ..., n), r = อัตราคิดลดหรืออัตราดอกเบี้ยที่เหมาะสม, n = อายุของโครงการเป็นปี

สูตรนี้ใช้เพื่อประเมินความคุ้มค่าของโครงการ โดยถ้า $BCR > 1$ ถือว่าโครงการมีความคุ้มค่าสำหรับการลงทุน

1.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เป็นการพิจารณาผลกระทบเมื่อสถานการณ์การดำเนินโครงการไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ และความเสี่ยงต่าง ๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในอนาคต ทำให้ส่งผลต่อการลงทุนในโครงการ โดยการกำหนดให้ตัวแปรสำคัญในการดำเนินโครงการมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป ภายใต้การกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ยังคงค่าคงที่ ในการศึกษาได้กำหนดตัวแปรในกรณีต่างๆ โดยกำหนดให้ ต้นทุนค่าอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายตลาด โดยใช้ปัจจัยอื่นคงที่

3. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนา (Descriptive Method)

ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดตัวชี้วัดและระดับคะแนนของตัวชี้วัดในแต่ละด้าน เพื่อมาคำนวณหาค่าดัชนีประกอบอย่างง่าย (Composite Index) ที่สะท้อนศักยภาพของโครงการ โดยในการศึกษานี้ได้นำตัวชี้วัดจากงานวิจัยของ (สุมาลี สันติพลวุฒิ และคณะ, 2554) โดยมีองค์ประกอบด้าน 4 ด้าน ได้แก่ ปัจจัยการผลิต อุปสงค์หรือความต้องการของตลาด อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องและสนับสนุนกัน กลยุทธ์ โครงสร้าง และการแข่งขัน เพื่อประเมินคะแนนแล้วนำไปคำนวณดัชนีประกอบอย่างง่าย ดังนี้

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^m X_{ij}}{\sum_{j=1}^m \text{Max}X_{ij}}$$

โดยที่

D_i = คะแนนการประเมินศักยภาพด้านที่ i ,

X_{ij} = คะแนนการประเมินของตัวชี้วัดด้านที่ i ตัวที่ j ,

$\text{Max}X_{ij}$ = คะแนนสูงสุดของตัวชี้วัดด้านที่ i ตัวที่ j ,

i = ศักยภาพของการพัฒนาอาคาร ให้ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ ในแต่ละด้าน,

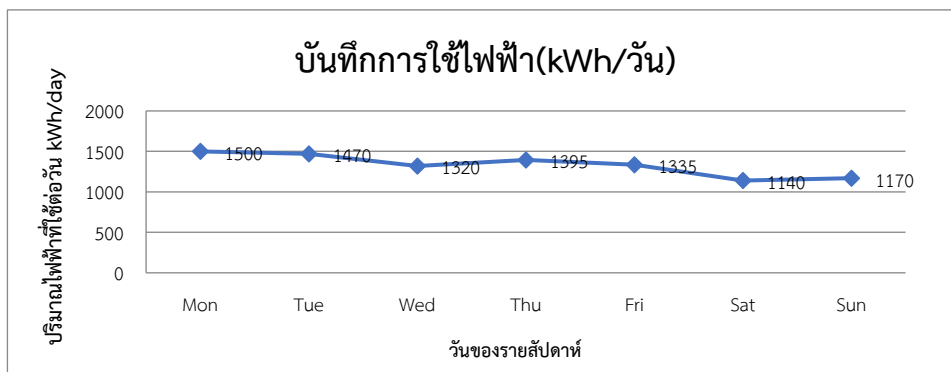
j = ตัวชี้วัดแต่ละด้านในการประเมินศักยภาพของการพัฒนาอาคารยูปราชีวิทย์มงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ให้ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์

เมื่อได้คะแนนศักยภาพในแต่ละด้านและภาพรวมแล้ว จึงนำไปประเมินระดับศักยภาพตามหลักอัตราภาคขึ้น ซึ่งคิดเป็นร้อยละ

ผลการวิเคราะห์ศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการพัฒนาอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ให้เป็นอาคารใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ ดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

1.1 เก็บข้อมูลการใช้พลังงานของอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เพื่อให้เข้าใจโครงสร้างการใช้พลังงานของอาคาร



ภาพที่ 2 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh) แกน X แสดงวันของรายสัปดาห์ (Days of the Week) ตั้งแต่วันจันทร์ถึงวันอาทิตย์ ปี 2568 และแกน Y แสดงปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ต่อวัน (Energy Consumption; kWh/day).

1.2 เก็บข้อมูลศึกษาศักยภาพของการพัฒนาอาคารให้เป็นอาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building) โดยประเมินจากระบบพลังงานทดแทน เทคโนโลยีที่นำมาใช้ จากเอกสารรายงานวิชาการ รายงานการวิเคราะห์โครงการ เช่น ค่าอัตราคิดลด (Discount rate, r) = 6.31% (Farungsang, 2025)

1.3 เก็บข้อมูลแหล่งพลังงานทดแทนภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย โดยข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา พบว่า เพียงพอกับขนาด ขนาด 469 kWp สำหรับ ระบบ Off-Grid และ ขนาด 450 kWp สำหรับระบบ On-Grid โดยใช้พื้นที่ประมาณ 2,087 m²

2. วิเคราะห์ศักยภาพและความเป็นไปได้ทางการเงินในการพัฒนาอาคารให้พลังงานเป็นศูนย์ แบ่งได้ 3 ด้าน ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงกายภาพ

2.1.1 พื้นที่การศึกษา ณ ตึกอาคารยุพราชวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย 80 หมู่ 9 ถ.พหลโยธิน ตำบล บ้านดู่ อ.เมือง จ. เชียงรายตำแหน่งที่ตั้ง ละติจูด,ลองจิจูด ที่จำลองติดตั้งแผงเซลล์

2.1.2 พื้นที่หลังคาของอาคารที่สามารถติดตั้ง ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ได้ คือ 2,087 m² จำนวน 808 แผง ของขนาด 580W)

2.2 การวิเคราะห์ทางเทคนิค

เงื่อนไขการจำลอง (Simulation Conditions) การจำลองทำภายใต้พิกัดตำแหน่งอาคารยุพราชวิทยมงคล (Lat. 19.90°N, Long. 99.83°E) หลังคามีมุมเอียง 15° หันไปทางทิศใต้ ใช้ฐานข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของโปรแกรม PVsyst, ชนิดแผง Mono crystalline 580 Wp, อินเวอร์เตอร์ขนาด 50 kW ประสิทธิภาพระบบสายและอุปกรณ์รวม 96%; อัตราเสื่อมโมดูล 0.5%/ปี และจำลองทั้งแบบ Off-grid (มีแบตเตอรี่กักเก็บ) และ On-grid (เชื่อมต่อโครงข่าย)

2.2.1 จำลองด้วยโปรแกรม PVsyst ทำการจำลองติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) แบบ Off-Grid และ On-Grid



ภาพที่ 3 รูปภาพจำลองการติดตั้งแผงโซลาร์ บนหลังคา (Solar Rooftop)
อาคารยูพราขวิทยมงคล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

ตารางที่ 2 การแสดงประสิทธิภาพ ทั้ง 2 ระบบ

ลักษณะ	ระบบ Off-Grid	ระบบ On-grid
พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่ (kWh/ปี)	708,750 kWh (708.75 MWh)	688,940 kWh (688.94 MWh)
พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (kWh/ปี)	488,650 kWh (488.65 MWh)	340,190 kWh (340.19 MWh)
พลังงานส่วนเกิน (kWh/ปี)	204,580 kWh (204.58 MWh)	348,750 kWh (348.75 MWh)
พลังงานที่ขาดหายไป (kWh/ปี)	9,570 kWh (9.57 MWh)	0 kWh
อัตราประสิทธิภาพ (PR)	58.73%	86.12%
สัดส่วนพลังงานแสงอาทิตย์ (SF)	98.08%	68.28%

จากตารางที่ 2 การแสดงประสิทธิภาพ ทั้ง 2 ระบบ โดยเปรียบเทียบ ระบบ Off-Grid และระบบ On-grid พบว่า ระบบ Off-Grid มี SF 98.08% ใกล้เป้าหมาย NZEB มากกว่า ขณะที่ ระบบ On-grid ไม่มี Missing Energy ให้ค่า PR 86.12% แต่ SF 68.28% พบว่า ระบบ Off-Grid พังพาโซลาร์ภายในสูง (SF สูงมาก) แต่ต้องจัดการพลังงานส่วนเกินและลดช่วงขาดผ่านการปรับ EMS/ขนาดแบตเตอรี่/การเลื่อนโหลดกลางวัน ส่วนระบบ On-grid มีประสิทธิภาพเชิงระบบสูงและจ่ายพลังงานต่อเนื่อง แต่ ครอบคลุมโหลดต่ำกว่า แต่ยังคงพึ่งพากริดมากกว่า ซึ่งสามารถทดแทนได้จากการขายไฟเพื่อให้เกิดการพัฒนาอาคารให้เป็นอาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building)

2.2.2 การเปรียบเทียบการผลิตกับการใช้ไฟฟ้า นำข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Solar Rooftop ที่ได้จากการจำลอง มาเปรียบเทียบกับข้อมูลการใช้ไฟฟ้าจริงของอาคารจากการบันทึกการใช้ไฟฟ้ารายชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ความเพียงพอของพลังงานที่ผลิตได้

2.3 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

พบว่า อาคารมีความต้องการใช้พลังงานเฉลี่ย 1,365 kWh/วัน หรือคิดเป็น 498.22 MWh/ปี โดยการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 469 kWp มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (PVB) เท่ากับ 23.172 ล้านบาท ขณะที่ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (PVC) เท่ากับ 30.941 ล้านบาท ส่งผลให้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ -7.77 ล้านบาท และ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 0.75 (< 1) จึงยังไม่ผ่านเกณฑ์คุ้มค่าทางการเงินภายใต้การคิดลด ในขณะที่ระบบ On-grid มีมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (PVB) เท่ากับ 32.687 ล้านบาท มูลค่าปัจจุบันของ

ต้นทุนรวม (PVC) เท่ากับ 19.869 ล้านบาท จึงได้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ +12.818 ล้านบาท และ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) ประมาณ 1.64 (> 1) แสดงถึงความคุ้มค่าทางการเงินของระบบ On-grid

สรุปผลการวิจัย

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst แสดงให้เห็นว่าจากการวิเคราะห์ศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริด (Off-Grid) และออนกริด (On-Grid) พบว่า ระบบ Off-Grid มีสัดส่วนการพึ่งพาพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Fraction: SF) สูงถึง 98.08% ซึ่งใกล้เคียงเป้าหมายของการเป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (NZEB) มากกว่า On-grid ที่มี SF อยู่ที่ 68.28% อย่างไรก็ตาม ระบบ Off-Grid ยังมีปัญหาในด้านพลังงานส่วนเกินและพลังงานขาดช่วง จึงต้องอาศัยการจัดการโหลดและระบบกักเก็บพลังงานเพิ่มเติม ขณะที่ระบบ On-grid แม้จะมี SF ต่ำกว่า แต่มีประสิทธิภาพระบบสูงกว่า ($PR = 86.12\%$) และไม่มีพลังงานขาดช่วง ความแตกต่างสำคัญอยู่ที่ องค์ประกอบความสูญเสียในกระบวนการแปลงและกักเก็บพลังงาน ระบบ Off-Grid มี Unused Energy เมื่อแบตเตอรี่เต็ม -28.1% พร้อมความสูญเสียจากคอนเวอร์เตอร์ (-2.5%) การเดินสาย (-1.5%) และรอบชาร์จ-คาย (-0.6%) ผลรวมของโครงสร้างความสูญเสียดังกล่าวทำให้ ประสิทธิภาพระบบ (PR) ของ On-Grid สูงกว่าอย่างชัดเจน (86.12%) ส่วน Off-Grid ต่ำกว่า (58.73%) เนื่องจากระบบ On-grid ไม่มีองค์ประกอบกักเก็บ จึงไม่เกิดความสูญเสียดังกล่าว รวมถึงมีความคุ้มค่าทางการเงินอย่างชัดเจน โดยมี NPV เป็นบวก (+12.818 ล้านบาท) และ BCR มากกว่า 1 (1.64) เมื่อเทียบกับ Off-Grid ที่มี NPV ติดลบและ BCR ต่ำกว่า 1 จึงสรุปได้ว่าระบบ On-grid มีความเหมาะสมในเชิงการลงทุนและสามารถนำไปสู่ การพัฒนาอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าในบริบทของมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ในโครงการปรับปรุงอาคารวิทยุราชวิทยมงคลสู่การเป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ จะสามารถเป็นต้นแบบการพัฒนา NZEB

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรทดลองใช้ระบบกักเก็บพลังงานที่ผสมผสานระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและระบบกักเก็บพลังงานรูปแบบอื่นด้วย
2. ควรศึกษาความอ่อนไหวของโครงการต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราคิดลด ราคาพลังงานไฟฟ้า และต้นทุนอุปกรณ์ เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายและการลงทุนในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินและการวิเคราะห์ศักยภาพการพัฒนาอาคารวิทยุราชวิทยมงคลสู่การเป็นอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ด้วยระบบไมโครกริด ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากคณาจารย์ ผู้เชี่ยวชาญ และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องหลายฝ่าย ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ความรู้ แนวคิด และสนับสนุนข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยอย่างยิ่ง

ขอแสดงความขอบคุณคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นระบบและต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการศึกษา ตลอดจนช่วยชี้แนะแนวทางการดำเนินงานให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). คู่มือการออกแบบและก่อสร้างอาคารอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายควบคุมอาคาร. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- [2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2568). Automatic Meter Reading (AMR). สืบค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2568. จาก <https://www.amr.pea.co.th/AMRWEB/Index.aspx>.
- [3] ดร.ณิ ปัญญา. (2564). การศึกษาการตรวจพิสูจน์ผลประหยัดของโครงการอาคารที่มีการใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.

- [4] ศุภโชค สนธิไชย และสิริวิรัตน์ โรโห. (2564). แนวทางปรับปรุงอาคารสถานศึกษาตามเกณฑ์อาคารอนุรักษ์พลังงาน. วารสารวิชาการพลังงานและสิ่งแวดล้อม, 3(2), 44–58.
- [5] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2566). รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2566 = Energy statistics of Thailand 2023. (พิมพ์ครั้งที่ 1). นนทบุรี: สหมิตรพรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- [6] สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย. (2567). สืบค้นทรัพยากรสารสนเทศ. สืบค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2568. จาก <https://aric.crru.ac.th/gallery/detail?id=562>
- [7] อนันท์ พลขุนทด. (2564). แนวทางการออกแบบอาคารที่มีการใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับ อาคารสำนักงานอัจฉริยะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาศิลปศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาศิลปศาสตรบัณฑิตเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [8] Farungsang, L., Varquez, A. C. G., & Tokimatsu, K. (2025). Geospatial Assessment and Economic Analysis of Rooftop Solar Photovoltaic Potential in Thailand. Sustainability, 17, 7052.

การศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติของถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวและขานอ้อย A Study and Comparison of the Properties of Briquette Charcoal from Rice Straw and Sugarcane Bagasse

พัชรีย์ อินธนู* สุภัชชา ประมาศ และกุลศันฉนวน ณัฐบุญพิสุทธิ์

Patcharee Intanoo* Suphatcha Pramat and Gusunconow Noddbundpizu

สาขานวัตกรรมเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

Industrial Chemistry Innovation, Faculty of Science,

Maejo University, Chiangmai 50290

*Corresponding author: Tel.: 0946197947. E-mail address: patchareeintanoo@gmail.com

Abstract

The objective of this research was to produce a briquette from rice straw and sugarcane bagasse via carbonization at 500°C in 60 minutes. The study investigated the effect of biomass type on the physical and thermal properties of briquettes. The study indicated that briquettes produced from sugarcane bagasse exhibited superior physical and thermal properties compared to those made from rice straw. Specifically, the water permeability rate was 1.77 times lower, and the heating value was 1.41 times higher (the heating value of the sugarcane bagasse briquettes was 24.75 MJ/kg). A lower water permeability rate suggests a denser briquette structure, which enhances airflow and promotes more complete combustion, resulting in higher thermal energy output. Moreover, the carbonization process used to convert sugarcane bagasse into charcoal before compressing it into a briquette demonstrated higher efficiency than that of rice straw, as evidenced by a 12.08% higher energy yield. Therefore, the briquette produced in this study is considered suitable for household energy applications.

Keywords: Briquettes, sugarcane bagasse, rice straw, carbonization

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวและขานอ้อยด้วยกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที จากนั้นทำการศึกษานิตของสารชีวมวลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่ง จากการศึกษาพบว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากขานอ้อยมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากฟางข้าวแสดงในรูปอัตราการซึมผ่านน้ำต่ำกว่า 1.77 เท่า และมีค่าความร้อนสูงกว่า 1.41 เท่า ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากขานอ้อยมีค่าเท่ากับ 24.75 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อัตราการซึมผ่านน้ำที่ต่ำบ่งบอกถึงความแน่นของถ่านอัดแท่งที่มากส่งผลให้อากาศไหลผ่านได้ดีจนกระทั่งเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และให้พลังงานความร้อนสูงกว่าคือ มากกว่านั้นกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนขานอ้อยให้เป็นถ่านมีประสิทธิภาพในระดับที่ดีกว่าการเปลี่ยนฟางข้าวให้เป็นถ่านสอดคล้องกับอัตราส่วนผลได้ของพลังงานที่มากกว่าคิดเป็นร้อยละ 12.08 ดังนั้นถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้จึงเหมาะกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

คำสำคัญ: ถ่านอัดแท่ง ฟางข้าว ขานอ้อย การคาร์บอนไนซ์

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้แหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักเริ่มลดลงประกอบกับการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานฟอสซิลอย่างรุนแรงโดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคพลังงานภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตร ซึ่งภาคพลังงานและภาคอุตสาหกรรมมีมาตรการในการควบคุมดูแลการดำเนินกิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการสร้างโครงการที่สามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมดังกล่าวอย่างเคร่งครัด เช่น การปลูกป่าหรือการปลูกปะการังเพื่อช่วยเพิ่มแหล่งดูดซับคาร์บอนที่เป็นสาเหตุของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อน (Global warming) เป็นต้น ในขณะที่ภาคเกษตรเป็นภาคที่ไม่สามารถสร้างมาตรการดังกล่าวได้เนื่องจากภาคเกษตรมีหน่วยงานและผู้ที่เกี่ยวข้องหลายส่วนได้แก่ หน่วยงานท้องถิ่น หน่วยงานภาครัฐบาล รวมถึงเกษตรกร จึงทำให้หลังฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิตของภาคเกษตรเป็นช่วงเวลาที่สิ่งแวดล้อมถูกทำลายจากปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มากจนไม่สามารถมีวิธีการจัดการที่ดีและมีประสิทธิภาพ หากมีแนวทางในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ดี เช่น การนำไปเป็นแหล่งพลังงานแทนการเผาหรือการไถกลบ นอกจากจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้วยังช่วยลดการพึ่งพิงแหล่งพลังงานฟอสซิลได้อีกด้วย การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ใช้ระยะเวลาในการสลายตัวนานถึง 1,000-10,000 ปี [1] ตรงกันข้ามกับ CO_2 ที่ได้จากการเผาไหม้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่พืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเติบโตผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงจึงส่งผลให้ CO_2 มีระยะเวลายังคงอยู่ในบรรยากาศสั้นโดยปราศจากการเป็นต้นเหตุของการเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากปริมาณแก๊สเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศที่มากขึ้นไป [2] ดังนั้นแหล่งพลังงานจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงกลายเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่มีศักยภาพเพราะหาได้ง่าย มีปริมาณมากรวมถึงสามารถแปรรูปเป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าแหล่งพลังงานฟอสซิลได้ [3]

ฟางข้าวถือเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมากที่สุดของภาคเกษตรในประเทศไทยคิดเป็นร้อยละ 25.00 [4] และฟางข้าวยังถือเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการเป็นแหล่งพลังงานที่ดีคือให้พลังงานความร้อนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่นเป็นแหล่งพลังงาน [4] เพราะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีที่เหมาะสมต่อการเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass fuel) โดยเฉพาะค่าความร้อนจำเพาะ (Calorific value) ซึ่งสูงกว่าวัสดุเหลือใช้ชนิดอื่น นอกจากนี้ยังมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ในระดับสูงและมีโครงสร้างพูนที่เอื้อต่อการจุดติดไฟและเผาไหม้ได้ง่าย [5] สำหรับกากขานอ้อยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลที่ประเทศไทยมีกำลังการผลิตมากกว่า 13 ล้านตันต่อปี จะทำให้เกิดกากขานอ้อย 30 ล้านตันต่อปี [5] อย่างไรก็ตามกากขานอ้อยที่เกิดขึ้นร้อยละ 30.00 มักถูกนำไปเป็นแหล่งพลังงานสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ส่วนกากขานอ้อยที่เหลือจะถูกกองทิ้งไว้จนกลายเป็นแหล่งของการปล่อยแก๊สเรือนกระจกชนิดแก๊สมีเทนที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน 30 เท่าของ CO_2 จากการหมักหมม [4] ดังนั้นการนำฟางข้าวและขานอ้อยไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลจึงจัดเป็นการลดปัญหาการจัดการวัสดุเหลือทิ้งหลังฤดูกาลเก็บเกี่ยวที่ยั่งยืนด้านการลดการเกิดมลพิษทางอากาศได้แก่ ปัญหาหมอกควัน (Smog) และปัญหาสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง (Climate change) การพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าวและขานอ้อยเพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อนพร้อมกับการลดมลพิษทางอากาศจึงมีความสำคัญต่อการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนอย่างยั่งยืน รวมถึงยังเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การแสวงหาแหล่งพลังงานจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังสอดคล้องกับนโยบายภาครัฐที่มุ่งเน้นการพัฒนาพลังงานชีวภาพเพื่อลดการพึ่งพิงพลังงานฟอสซิล รวมถึงยังเป็นการสนับสนุนการเติบโตอย่างยั่งยืนของภาคเกษตรและภาคอุตสาหกรรมซึ่งสอดคล้องกับงาน ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในรูปแบบอัดแท่งจากฟางข้าวและขานอ้อยพร้อมกับเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนที่มีสมบัติทางความร้อนเทียบเท่าเชื้อเพลิงฟอสซิลชนิดถ่านหินซึ่งถือเป็นแนวทางในการส่งเสริมการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ยั่งยืนเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีการทำวิจัย

1. การเตรียมฟางข้าวและขานอ้อย

ฟางข้าวและขานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากกลุ่มเกษตรกรรณแปลงใหญ่ลำไยป่าซาง ตำบลป่าซาง อำเภอลำพูน จังหวัดลำพูนและตำบลหนองกระเทียม อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก ตามลำดับ นำฟางข้าวและขานอ้อยตากภายใต้แสงแดดเพื่อกำจัดน้ำและความชื้นเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำฟางข้าวและขานอ้อยมาลดขนาดด้วยการปั่นเชิงกลที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที นาน 3 นาที จากนั้นนำไปคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช จะได้ผงฟางข้าวและผงขานอ้อย เก็บผงฟางข้าวและผงขานอ้อยในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งานทุกครั้ง (ภาพที่ 2)

2. การเปลี่ยนฟางข้าวและขานอ้อยเป็นคาร์บอน

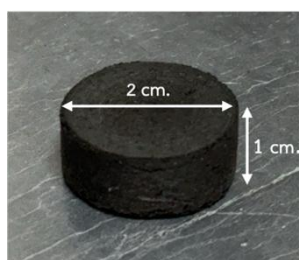
นำผงฟางข้าวและผงขานอ้อยเผาภายใต้สภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที นาน 60 นาที เรียกกระบวนการนี้ว่า คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ในเตาเผาไฟฟ้าจะได้ผงคาร์บอนของฟางข้าวและขานอ้อยที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ นำผงคาร์บอนของฟางข้าวและขานอ้อยไปคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช เก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งานทุกครั้ง (ภาพที่ 2)

3. การเตรียมถ่านอัดแท่ง

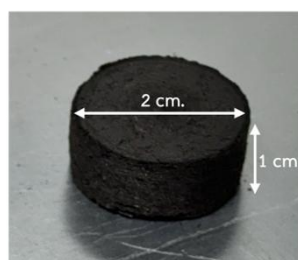
นำผงคาร์บอนของฟางข้าวและขานอ้อยไปผสมกับแป้งมันสำปะหลัง (ตัวเชื่อมประสาน) ในอัตราส่วนร้อยละ 10.00 โดยน้ำหนัก เติมน้ำลงไปร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก ไปอัดขึ้นรูปเพื่อให้มีลักษณะเป็นแท่งด้วยเครื่องอัด โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 เซนติเมตร และความหนา 1.00 เซนติเมตร (ภาพที่ 1)

4. การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ (1) วิเคราะห์ในลักษณะของผงคาร์บอนของฟางข้าวและขานอ้อยและ (2) วิเคราะห์ในลักษณะของถ่านอัดแท่ง สำหรับผงคาร์บอนของฟางข้าวและขานอ้อยจะนำไปหาสัดส่วนหรือองค์ประกอบที่ให้พลังงานและไม่ให้พลังงานซึ่งอยู่ในการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วยสารระเหยง่าย (Volatile matter, VM) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) เถ้า (Ash) และความชื้น (Moisture, MS) ตามลำดับ โดยมีวิธีวิเคราะห์ดังแสดงในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [6] รวมถึงการหาองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (% C) ไฮโดรเจน (% H) ออกซิเจน (% O) ไนโตรเจน (% N) และซัลเฟอร์ (% S) ซึ่งอยู่ในการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) ด้วยเครื่องมือ CHN628,628S (LECO Method) จากนั้นนำผลของการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบละเอียดไปคำนวณหาค่าความร้อนในหน่วยเมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) ตามสมการ Dulong [12] และงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7] สำหรับสมบัติของถ่านอัดแท่งที่วิเคราะห์จะเป็นสมบัติทางกายภาพในรูปของความหนาแน่น (Density) ค่าความแน่น (Densification) และอัตราการซึมผ่านน้ำ และสมบัติทางความร้อนในรูปอัตราส่วนผลได้ของพลังงาน (Energy yield ratio, η_E) ค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy density, D_e) และความร้อนเชิงทฤษฎี (High heating value, HHV) โดยมีวิธีการวิเคราะห์ที่แสดงในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [8]



(ก)



(ข)

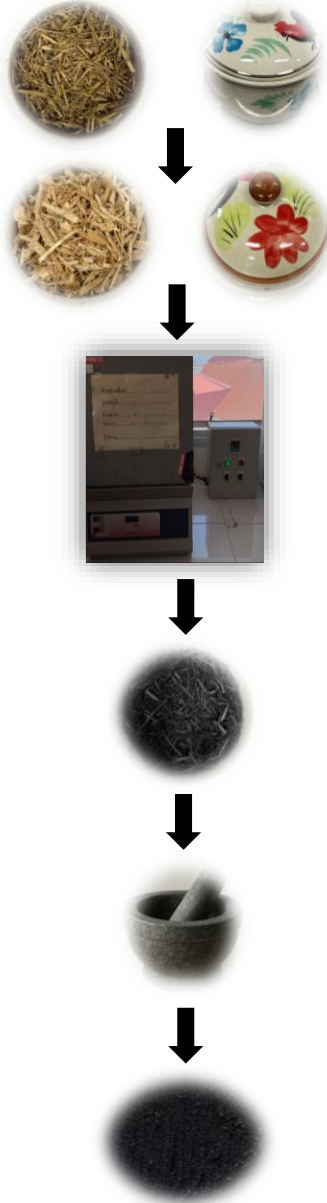
ภาพที่ 1 ถ่านอัดแท่งจาก (ก) ฟางข้าวและจาก (ข) ขานอ้อย

การเตรียมสารชีวมวล

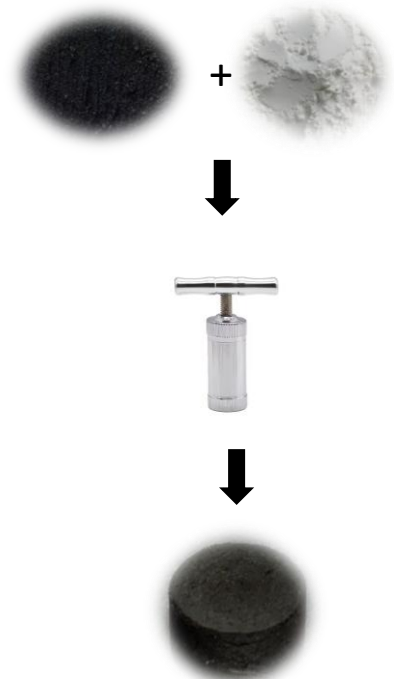


การเปลี่ยนสารชีวมวล

ให้เป็นผงคาร์บอน



การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทดลอง

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis)

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของฟางข้าว ชานอ้อย ผงคาร์บอนของฟางข้าว และผงคาร์บอนของชานอ้อย พบว่าผงคาร์บอนของฟางข้าวและผงคาร์บอนของชานอ้อยมีส่วนที่ให้พลังงานมากกว่าส่วนที่ไม่ให้พลังงานคิดเป็นร้อยละ 1.81 และ 3.00 ตามลำดับ (ส่วนที่ให้พลังงานของผงคาร์บอนจากฟางและชานอ้อยคือ ร้อยละ 89.20 และ 90.27 โดยน้ำหนักตามลำดับ) (ตารางที่ 1) โดยส่วนที่ให้พลังงานประกอบด้วยสารระเหยง่าย (% VM) และคาร์บอนคงตัว (% FC) ในขณะที่ส่วน

ที่ไม่ให้พลังงานแสดงในรูปปริมาณเถ้า (% ASH) และปริมาณความชื้น (% MS) เมื่อพิจารณาสารชีวมวลชนิดเดียวกันจะเห็นว่า ส่วนที่ให้พลังงานของผงคาร์บอนมีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นในขณะที่สัดส่วนของสารระเหยง่ายลดลง ปริมาณ คาร์บอนคงตัวสูงอาจส่งผลให้ถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ให้พลังงานหลังการเผาไหม้มากเนื่องจากองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัว เป็นของแข็งที่ไม่ระเหยเมื่อถูกให้ความร้อนเพื่อกำจัดความชื้นและสารระเหยแล้วจึงทำให้เหลือเพียงคาร์บอนคงตัวซึ่งเป็นส่วน ที่สามารถเผาไหม้และให้พลังงานความร้อนได้นั้นเองสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพลังงาน (D_e) ที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลจาก สารชีวมวลดิบ 1.01 เท่า ในกรณีฟางข้าว ดังนั้นถ่านอัดแท่งจึงให้พลังงานความร้อนสูง คงที่ และมีความต่อเนื่อง [4] รวมถึงมี ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่ยาวนานเมื่อเปรียบเทียบกับสารชีวมวลดิบของฟางข้าวและขานอ้อย [4] อาจมีความสอดคล้อง กับค่าความร้อนที่สูงกว่าซึ่งจะกล่าวในต่อไป ส่วนปริมาณสารระเหยง่ายจะให้ผลการวิเคราะห์ตรงกันข้ามกับปริมาณคาร์บอน คงตัวกล่าวคือ ปริมาณสารระเหยง่ายของถ่านอัดแท่งมักจะต่ำกว่าสารชีวมวลดิบซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวทางความร้อน ของสารประกอบอินทรีย์ชนิดเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในสารชีวมวลดิบเป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่น CO CH_4 H_2 เป็นต้น [9] และระเหยออกไป ณ สภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลทำให้ถ่านอัดแท่งมีปริมาณสารระเหยง่าย ต่ำกว่าสารชีวมวลคิดเป็นร้อยละ 11.91 และเป็นสาเหตุให้ถ่านอัดแท่งจุดติดไฟยากและเผาไหม้ได้ช้า [10] ในงานวิจัยนี้ถ่านอัด แท่งจากฟางข้าวและขานอ้อยให้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณเช่นเดียวกันคือ ถ่านอัดแท่งจะให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงและ ปริมาณสารระเหยง่ายต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวและขานอ้อยดิบส่งผลให้ค่าความร้อนและความหนาแน่นของพลังงาน ของถ่านอัดแท่งสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 1 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบแบบละเอียด (Ultimate analysis) ของฟาง ข้าวและขานอ้อยที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

สาร	องค์ประกอบประมาณ (ร้อยละ)				องค์ประกอบแบบละเอียด (ร้อยละ)				
	MS	VM	ASH	FC	C	H	O	N	S
ฟางข้าว	7.94	81.70	2.87	7.50	39.09	6.74	53.52	0.66	N.D.
ขานอ้อย	6.93	86.20	2.80	4.07	40.48	6.35	52.04	1.13	N.D.
คาร์บอนจากฟางข้าว	6.36	71.97	2.80	13.96	51.49	3.39	44.03	1.09	N.D.
คาร์บอนจากขานอ้อย	4.23	79.10	2.72	18.87	62.03	5.00	31.1	1.88	N.D.

เมื่อพิจารณาถ่านอัดแท่งทั้งที่ผลิตจากฟางข้าวและขานอ้อยพบว่าถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยจะให้ส่วนที่มีพลังงานมากกว่า คือมีองค์ประกอบของสารระเหยง่ายสูงกว่าถ่านอัดแท่งจากฟางข้าว 1.10 เท่า (ตารางที่ 1) เนื่องจากขานอ้อยมีโครงสร้างของ สารอินทรีย์ชนิดลิกนินในปริมาณมากกว่ารวมไปถึงขานอ้อยยังประกอบด้วยเส้นใยที่เหนียวแน่นดังนั้นเมื่อนำมาเผาภายใต้ สภาวะบรรยากาศ ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (Carbonization) จะเหลือคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่มากกว่าฟางข้าว (ตารางที่ 2) อีกทั้งเมื่อนำขานอ้อยมาอัดให้เป็นถ่านแล้วได้ถ่านที่แน่นและมีน้ำหนักมากกว่าซึ่งเห็นได้จากการวิเคราะห์อัตรา การซึมผ่านน้ำและพบว่าถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยมีอัตราการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าถ่านอัดแท่งจากฟางข้าว 1.77 เท่า (อัตราการ ซึมผ่านน้ำของถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยคือ 1.94 มิลลิลิตรต่ออนาที) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคคาร์บอนในถ่านอัดแท่งจากขานอ้อย อยู่ชิดติดกันโดยมีขนาดของช่องว่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนใกล้เคียงกันทำให้ถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยมีความหนาแน่นมาก เป็นผลให้มีความหนาแน่นของพลังงานต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่าอีกด้วยด้วยความหนาแน่นของพลังงานที่มากจะส่งผลต่อการเผา ไหม้ที่ยาวนานและให้พลังงานความร้อนอย่างสม่ำเสมอ [11] โดยจะแสดงในรูปค่าความร้อนที่สูงกว่า ซึ่งจะอภิปรายในต่อไป มากไปกว่านั้นปริมาณธาตุคาร์บอน (% C) จากการวิเคราะห์แบบละเอียดที่แสดงถึงปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเชื้อเพลิงที่อยู่ ในรูปคาร์บอนคงตัวและอยู่ในรูปสารระเหยง่ายจะมีความแตกต่างจากคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ อย่างไรก็ตามปริมาณธาตุคาร์บอนยังคงส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนและความหนาแน่นของพลังงานในถ่านอัดแท่งและ

เชื้อเพลิงชีวมวลดิบเช่นเดียวกับปริมาณคาร์บอนคงตัว โดยถ่านอัดแท่งที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนสูงจะให้ค่าความร้อนสูงนั่นเอง จากการศึกษาถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากขานอ้อยมีปริมาณธาตุคาร์บอนสูงกว่าซึ่งให้เห็นถึงแหล่งให้พลังงานที่มากกว่า ส่วนปริมาณธาตุไฮโดรเจนที่พบในถ่านอัดแท่งนั้นแสดงถึงความสามารถในการเผาไหม้ที่เร็วและจุดติดไฟได้ง่าย ซึ่งในถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยมีปริมาณธาตุไฮโดรเจนมากกว่าถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวจึงทำให้ถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยมีความสามารถในการจุดติดไฟได้ดีกว่าสอดคล้องกับปริมาณธาตุออกซิเจนที่จัดเป็นองค์ประกอบที่ไม่ให้พลังงานต่ำกว่า (ตารางที่ 1) สำหรับปริมาณธาตุไนโตรเจนและซัลเฟอร์จะแสดงถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้งานถ่านอัดแท่งด้วยการเผาไหม้ โดยธาตุไนโตรเจนและซัลเฟอร์เมื่อเผาไหม้แล้วจะเกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ตามลำดับ ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและก่อให้เกิดเป็นกรด (หรือ กรดฝน) แตกต่างจากถ่านหินที่มีปริมาณธาตุไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักและซัลเฟอร์ มากกว่าร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก [11]

ตารางที่ 2 สารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆที่พบในฟางข้าว [16] และขานอ้อย [17]

สารชีวมวล	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ฟางข้าว	32-47	19-27	5-24
ขานอ้อย	40-50	25-30	20-25

2. สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

สมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากฟางข้าวและขานอ้อยในงานวิจัยนี้จะศึกษาในรูปค่าความร้อน ความหนาแน่นของพลังงาน และอัตราส่วนผลได้ของพลังงาน โดยค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งบ่งบอกถึงปริมาณพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง 1 หน่วยมวล ส่วนความหนาแน่นของพลังงานแสดงถึงปริมาณพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สำหรับค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราส่วนของปริมาณธาตุ C:H:O ในเชิงเคมีตามสมการ Dulong [12] ดังแสดงในสมการที่ 1 โดยถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากขานอ้อยมีอัตราส่วนของปริมาณธาตุ C:H:O สูงกว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากฟางข้าวเป็นผลทำให้มีค่าความร้อนเชิงทฤษฎี (High heating value; HHV) สูงกว่า 1.41 เท่า (ตารางที่ 3) เนื่องจากถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยมีองค์ประกอบของธาตุที่เผาไหม้และให้พลังงานได้มากกว่าคือ ธาตุคาร์บอน (C) และธาตุไฮโดรเจน (H) ในขณะที่มีองค์ประกอบของธาตุออกซิเจน (O) ต่ำซึ่งถือเป็นธาตุที่ไม่ให้พลังงาน [13] นอกจากอัตราส่วนของปริมาณธาตุ C:H:O ที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งแล้วปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) และสารระเหยง่าย (VM) ยังทำให้ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งมีความแตกต่างกันอีกด้วย ถ่านอัดแท่งที่มีคาร์บอนคงตัวสูงและปริมาณสารระเหยง่ายต่ำจะให้ค่าความร้อนสูงสอดคล้องกับถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากขานอ้อยที่มีค่าความร้อนสูงกว่านั่นเอง จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนเชิงทฤษฎีของถ่านอัดแท่งที่ได้จากการคำนวณขององค์ประกอบแบบประมาณและองค์ประกอบแบบละเอียดมีความแตกต่างกันเนื่องจากการวิเคราะห์แบบละเอียดเป็นการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของธาตุที่ให้พลังงานคือ C และ H รวมถึงธาตุที่ไม่ให้พลังงานคือ O อย่างละเอียด ส่วนการวิเคราะห์แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบภาพรวมที่มีความละเอียดต่ำกว่า กล่าวคือการคำนวณค่าความร้อนเชิงทฤษฎีด้วยองค์ประกอบของธาตุจะอาศัยสูตรทางฟิสิกส์เคมีที่พิจารณาพลังงานของแต่ละธาตุ ส่วนการคำนวณค่าความร้อนเชิงทฤษฎีด้วยองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัว สารระเหยง่าย และถ้าจะใช้สมการหรือกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นการประมาณค่าจึงทำให้ค่าความร้อนเชิงทฤษฎีที่ได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นการคำนวณหาค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งในงานวิจัยนี้จะอาศัยค่าความร้อนจากปริมาณของธาตุ C H และ O เป็นหลัก

สำหรับสมบัติทางความร้อนในรูปความหนาแน่นของพลังงานจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง คือ ถ่านอัดแท่งที่มีความหนาแน่นสูงหรือมีความแน่นสูงส่งผลให้อนุภาคคาร์บอนอยู่ใกล้ชิดกันจนทำให้ขนาดช่องว่างระหว่างอนุภาคเล็กและมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมาก เมื่อถ่านอัดแท่งติดไฟจะเกิดการเผาไหม้ที่มีความสม่ำเสมอและให้พลังงานความร้อนต่อปริมาตรสูงดังแสดงในสมการที่ 2 ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากฟางข้าวและขานอ้อยของงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 200-400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) โดยถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยมีความหนาแน่น 350 kg/m^3 โดยเฉลี่ย ซึ่งมากกว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้จากฟางข้าว 1.25 เท่า อีกทั้งยังมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งทั่วไปที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงประมาณ $500\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ อย่างไรก็ตามถ่านที่มีความหนาแน่นสูงแม้ว่าจะมีความหนาแน่นของพลังงานสูงแต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความสามารถการจุดติดไฟที่ยากและถ่านจะเกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์เพราะมีความพรุนต่ำเป็นสาเหตุให้อากาศไหลผ่านได้ยากซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการออกแบบถ่านอัดแท่งให้มีช่องระบายอากาศภายในหรือเติมวัสดุไวไฟ (Starter) เช่น กากน้ำตาลและไขมัน ลงไปในปริมาณที่เหมาะสม จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนสามารถสรุปได้ว่าคุณภาพของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในระดับครัวเรือนที่อาจช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการใช้แก๊สหุงต้มในการประกอบอาหารได้

$$HHV \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) \approx 0.338 (\%C) + 1.428 (\%H) - 0.108 (\%O) \quad (1)$$

$$\text{Energy density} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right) = \text{density} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times HHV \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) \quad (2)$$

เมื่อ	HHV	คือ ค่าความร้อนทางทฤษฎี (MJ/kg)
	%C	คือ ปริมาณธาตุคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	%H	คือ ปริมาณธาตุไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	%O	คือ ปริมาณธาตุออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	Energy density	คือ ความหนาแน่นพลังงานของถ่านอัดแท่ง (MJ/m^3)
	Density	คือ ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง (kg/m^3)

ตารางที่ 3 ค่าความร้อนและความหนาแน่นของพลังงานของถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวและขานอ้อยด้วยกระบวนการคาร์บอนไซเซชัน

ถ่านอัดแท่ง	ค่าความร้อน		ความหนาแน่น
	จากองค์ประกอบแบบประมาณ (kcal/kg) [14]	จากองค์ประกอบแบบละเอียด (MJ/kg) [15]	พลังงาน (MJ/m^3)
ฟางข้าว	18.89	17.49	5,025.78
ขานอ้อย	19.21	24.75	7,582.82

สำหรับผลของอัตราส่วนผลได้ของพลังงานที่แสดงถึงสัดส่วนของพลังงานที่คงอยู่ในถ่านอัดแท่งหลังจากกระบวนการคาร์บอนไซเซชันเมื่อเทียบกับพลังงานเริ่มต้นในวัตถุดิบชีวมวลดิบแล้ว (คือฟางข้าวและขานอ้อย) จากการศึกษาพบอีกว่าอัตราส่วนผลได้พลังงานของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากฟางข้าวและขานอ้อยมีค่าเท่ากับ 36.26 และ 41.25 ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลางคืออยู่ในช่วงร้อยละ 30-50 หมายถึง การแปรรูปฟางข้าวและขานอ้อยให้เป็นถ่านผ่านกระบวนการคาร์บอนไซเซชัน ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที สามารถเก็บรักษาพลังงานไว้ได้ประมาณร้อยละ 30-50 ของพลังงานในวัตถุดิบชีวมวลดิบกล่าวคือ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการผลิตถ่านที่มีความคุ้มค่าและสูญเสียพลังงานน้อยจึงทำให้เป็น

กระบวนการที่สามารถเปลี่ยนวัตถุดิบสารชีวมวลดิบเป็นพลังงานได้ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนผลได้ของพลังงานถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวและขานอ้อยจะเห็นว่าถ่านอัดแท่งจากขานอ้อยมีอัตราส่วนผลได้ของพลังงานสูงกว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากฟางข้าวคิดเป็นร้อยละ 12.08 เนื่องจากขานอ้อยมีปริมาณธาตุคาร์บอนและลิกนิน (Lignin) สูงกว่าฟางข้าว ซึ่งลิกนินช่วยให้การคาร์บอนในชีวมวลถ่านที่มีคุณภาพดีและให้พลังงานสูงเพราะลิกนินเป็นส่วนประกอบที่ให้พลังงานมากกว่าเซลลูโลสเมื่อเผาไหม้ ในขณะที่ฟางข้าวจะมีปริมาณเซลลูโลสสูงแต่มีลิกนินในปริมาณต่ำจึงทำให้การแปรรูปฟางข้าวเป็นถ่านสูญเสียพลังงานมากกว่า อีกทั้งขานอ้อยมีเนื้อไม้ที่แน่นและแข็งแรงกว่าทำให้เมื่อนำมาผลิตถ่านอัดแท่งแล้วจะมีความหนาแน่นสูงและให้ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูงกว่า 1.41 เทา ส่วนฟางข้าวมีโครงสร้างโปร่งฟู น้ำหนักเบา และความหนาแน่นต่ำจึงให้พลังงานน้อยกว่าเมื่อพิจารณาปริมาตรเดียวกัน

สรุปผลการวิจัย

ในการผลิตถ่านอัดแท่งจากฟางข้าวและขานอ้อยสามารถสรุปได้ว่าการแปรรูปขานอ้อยให้เป็นถ่านจะมีคุณภาพดีกว่าการแปรรูปฟางข้าวเป็นถ่าน ซึ่งแสดงในรูปของสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นคือ ถ่านอัดแท่งมีความแน่นและให้พลังงานความร้อนสูงคิดเป็นร้อยละ 32.18 และ 33.73 ตามลำดับ โดยความแน่นจะแสดงถึงการเผาไหม้ที่คงที่และให้พลังงานความร้อนที่สม่ำเสมอเนื่องจากอากาศที่เป็นตัวช่วยให้เกิดการเผาไหม้ไหลผ่านได้ดี ส่วนการให้พลังงานความร้อนสูงของถ่านอัดแท่งแสดงถึงปริมาณพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ปล่อยออกมาเมื่อถ่านอัดแท่งถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในสภาพที่มีอากาศเพียงพอ จึงเป็นผลทำให้ถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากขานอ้อยแสดงสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนที่ดีขึ้นคือ มีความแน่นมากสอดคล้องกับอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าคิดเป็นร้อยละ 43.60 และมีค่าความร้อนสูง กว่าคิดเป็นร้อยละ 29.33 มากไปกว่านั้นกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับปานกลางที่สามารถเปลี่ยนขานอ้อยเป็นพลังงานได้ปานกลางจึงเหมาะกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชานวัตกรรมเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการตรวจวัดรวมทั้งสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณกลุ่มเกษตรกรนาแปลงใหญ่ลำไยป่าซาง ตำบลป่าซาง อำเภอลำปำ จังหวัดลำพูนและตำบลหนองกระเทียม อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก สำหรับความอนุเคราะห์ฟางข้าวและขานอ้อยตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Greenpeace International. (2013). **Why forest conservation cannot offset fossil emissions.** Amsterdam, Netherland.
- [2] Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., Caldeira, K., Matsumoto, K., Munhoven, G., Montenegro, A., & Toko, K. (2009). Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. **The Annual Review of Earth and Planetary Sciences.** 37, 117-34.
- [3] Ali, S., Rani, A., Dar, M., Dar., Qaisrani, M., Nonam, M., Yoganathan, K., Asad, M., Berhanu, A., Barwant., & Zhu, D. (2024). Biomass. **Recent Advances in Characterization and Valorization of Lignin and Its Value-Added Product: Challenges and Future Perspectives.** 4, 947-977.
- [4] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2567). **รายงานเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน กฟผ. ประจำปี 2567.** จาก <http://www.egat.co.th>.
- [5] Pranata Ali, S., Afifah, D., Slimi, F., Cendekia, D., Wulandari, Y., Ramandani, A., & Shintawati. (2025). Jurnal Rekayasa Proses. Optimization of co-firing briquette fuel from coal waste and plam kernel shells: **Enhancing energy and waste valorization.** 3, 232.

- [6] มหาวิทยาลัยเกนต์ (Ghent University). (ม.ป.ป.). เทคนิคการวิเคราะห์ทางชีวภาพ: การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของชีวมวล (Proximate Analysis). สืบค้นจาก <https://aquaculture.ugent.be/Education/coursematerial/online%20courses/ATA/analysis/proxi.htm>
- [7] Partridge, A., Sermyagina, E., & Vakkilainen, E. K. (2020). Impact of pretreatment on hydrothermally carbonized spruce: **energy yield and energy densification ratio across treatment temperatures**. ResearchGate.
- [8] Maghirang, R., G., Mckee, L. H., & Burns, L. (2006). **Durability and breakage of feed pellets during repeated testing**. U.S. Department of Agriculture, Agricul.
- [9] อรุณี ศุภวินสาธิต. (2555). “พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง”. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 16(2), 36-43. สืบค้นจาก <http://digital.car.chula.ac.th/cuej/vol16/iss2/7>
- [10] Welker, C., Balasubramanian, V., Petti, C., Mohan Rai, K., Debolt, S., & Mendu, V. (2015). **Energies. Engineering Plant Biomass Lignin Content and Composition for Biofuels Bioproducts**. 8, 7654-7676.
- [11] Nyakuma, B., Ahmad, A., Johari, A., Abdullah, T., & Oladokun, O. (2558). Torrefaction of **Pelletized Oil Palm Empty Fruit Bunches: Effects on Mass Yield, Energy Yield, and Heating Value**. arXiv:1505.05469. สืบค้นจาก <https://arxiv.org/abs/1505.05469>
- [12] Hosokai, S., Matsuoka, K., Kuramoto, K., & Suzuki, Y. (2016). **Modification of Dulong’s formula to estimate heating value of gas, liquid and solid fuels**. Fuel Processing Technology, 152, 399–405.
- [13] Park, D., Kim, S., Cheol oh, K., Cho, L., Jeon, Y., lee, C., & Kim, D. (2022). **Thermogravimetric analysis-based proximate analysis of agro-byproducts and prediction of calorific value**. Energy Report, 8, 12038-12044.
- [14] Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. (2005). **Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data**. Biomass and Bioenergy, 28(5), 499–507.
- [15] Akam, N., Dioboma, B., Mfomo, J., Ndiwe, B., Bot, B., & Biwolé, A. (2024). Physicochemical characterization of briquetted fuel produced from cocoa pod husk case of Cameroon. Energy Report, 11, 1580-1589
- [16] Kumari, D., et al. “Rice straw structure changes following green pretreatment.” PMC (PubMed Central), 2022.
- [17] Zhou, Z., Cheng, Y., Zhang, W., Jiang, J., and Lei, F. (2016). "Characterization of lignins from sugarcane bagasse pretreated with green liquor combined with ethanol and hydrogen peroxide," BioRes. 11(2), 3191-3203.

การออกแบบระบบตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร Design of Building Energy Measurement and Monitoring System

ธีระพงษ์ บุญรักษา^{1*}, ภัทรพล ภูยอดยิ่ง¹, ธีรวัฒน์ ป้องกัน¹, เศรษฐวัฒน์ หนูขาว¹, วรสิทธิ์ แยมวงษา¹,
พรหมพัทธ์ บุญรักษา², อนุสรณ์ ผ่องประภา³, เกศรา พลไชย⁴ และ บุญเรือง มะรังศรี^{5*}
Terapong Boonraksa^{1*}, Pattarapon Pooyodying¹, Teerawat Pongkan¹, Settawat Nookhaw¹, Valit Yamwongsa¹
Promphak Boonraksa², Anusorn Phongprapa³, Kedsara Palachai⁴ and Boonruang Marungsri^{5*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครปฐม 73170

² สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และเทคโนโลยีอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ นนทบุรี 11000

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 10170

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 10170

⁵ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

¹ School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, Nakhon Pathom, 73170

² Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi 11000

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Bangkokthonburi University, 10170

⁴ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Bangkokthonburi University, 10170

⁵ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000

Corresponding author: Tel.: 0833345771 E-mail address: terapong.boon@rmutr.ac.th, bmshevee@sut.ac.th

Abstract

The electrical energy demand in buildings continues to rise, making energy monitoring and tracking an essential factor for effective energy management. This study aims to design and develop an electrical energy measurement system capable of collecting accurate, reliable data and supporting real-time monitoring of energy usage. The developed system can seamlessly transfer measurement data from monitoring devices to a user-friendly display platform, enabling convenient access for users. System testing, compared with a standard energy measurement instrument (Fluke 1738 Power Logger), showed that the real power (P) and apparent power (S) deviate by only 3.485% and 0.832%, respectively. The measurement results had low error rates within acceptable limits. These findings demonstrate that the proposed system is accurate and practical for real-world applications, and holds substantial potential as a tool to support building energy management and future development toward smart building systems.

Keywords: Energy measurement system, Energy management system, Power meter, Energy monitoring system

บทคัดย่อ

การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างถูกต้อง เชื่อถือได้ และรองรับการติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดไปยังแพลตฟอร์มแสดงผลที่ใช้งานง่าย เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้งาน ทำทดสอบระบบโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดพลังงานมาตรฐาน Fluke 1738 Power Logger พบว่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) มีความคลาดเคลื่อนเพียง 3.485% และ 0.832% ผลการวัดมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง เหมาะสมต่อการใช้งานจริง และมีศักยภาพในการสนับสนุนการจัดการพลังงานในอาคาร รวมถึงการต่อยอดสู่ระบบอาคารอัจฉริยะในอนาคต

คำสำคัญ: การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า ระบบจัดการพลังงาน พาวเวอร์มิเตอร์ ระบบติดตามการใช้พลังงาน

เครื่องคั่วพริกอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์ Solar-Powered Automatic Chili Roasting Machine

ชาตรีชัย อินทร์โพธิ์^{1*} จารุกิตต์ พิบูลนฤดม¹ พีรภัทร์ สุภาโท¹ ภาคิน มณีโชติ¹ อนัน หยวักวต² ปรีชาภรณ์ ชันบุรี²
จิรวัดน์ บุญจันทร์² และ เทพ เกื้อทวีกุล¹

Chatri Ainpoh^{1*}, Jarukit Piboolnaruedom¹, Peeraphat Suphatho¹, Pakin Maneechot¹, Anan Yuakwat²
Prechabhorn Khunburi², Jirawat Boonjun² and Thep Kueathaweekun¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

¹energy technology, Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University,
Kamphaeng Phet 62000,

²Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University,
Kamphaeng Phet 62000,

Corresponding author: Tel 0879430784 E-mail address: chatriainpho@gmail.com

Abstract

This research presents the design and development of an automatic chili-roasting machine powered by solar energy to improve roasting efficiency for farmers in the Thung Mahasarn Community, Maha Chai Subdistrict, Sai Ngam District, Kamphaeng Phet Province. The prototype machine was designed with dimensions of 60 cm in width, 80 cm in length, and 180 cm in height, equipped with an automatic control system and powered by a 100-watt solar panel installed on top. The system was constructed and tested with four different chili quantities: 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 kilograms to determine the optimal roasting amount based on roasting quality and processing time. Experimental results indicated that the optimal roasting quantity was 1.5 kilograms per batch, requiring 9.5 minutes (570 seconds). The roasted chilies exhibited a light brownish-black color, indicating an appropriate roasting level suitable for further processing in chili-based products. The developed solar-powered automatic chili roasting machine can be practically applied within the Thung Mahasarn community and among local homemakers' groups to enhance the production efficiency of roasted chili, chili powder, and chili paste for commercial purposes. The innovation effectively reduces labor, production time, and energy consumption, thereby promoting sustainable community income.

Keywords: Chili Roasting Machine, Solar Energy, Automation, Roasting Efficiency

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องคั่วพริกอัตโนมัติที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคั่วพริกให้กับเกษตรกรในชุมชนทุ่งมหาศาล ต. มหาชัย อ. ไทรงาม จ. กำแพงเพชร ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างขนาดกว้าง 60 เซนติเมตร และยาว 80 เซนติเมตร และสูง 180 เซนติเมตร และมีระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 100 วัตต์ ไว้ด้านบน ดำเนินการสร้างและดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องคั่วพริกในปริมาณ 1 กิโลกรัม 1.5 กิโลกรัม 2 กิโลกรัม และ 2.5 กิโลกรัม เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องคั่วพริกนี้ โดยดูปริมาณการคั่ว

และระยะเวลาในการคั่ว จากผลการทดลองคั่วพริกพบว่า ปริมาณพริกที่นำมาคั่วที่เหมาะสมที่สุดคือ จำนวน 1.5 กิโลกรัมต่อรอบ โดยใช้เวลา 9.5 นาที หรือ 570 วินาที และคั่วพริกแล้วลักษณะทางกายภาพของพริกจะมีสีน้ำตาลอมดำอ่อนเนื่องจากความร้อน ซึ่งเป็นลักษณะของพริกที่ดีที่เหมาะสมในการนำไปแปรรูปร่วมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้ส่วนผสมของพริกอื่นถัดไป ดังนั้นเครื่องคั่วพริกอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงให้กับ ชุมชนชุมชนทุ่งมหาศาล ต.มหาชัย อ. ไทรงาม จ. กำแพงเพชร และกลุ่มแม่บ้านที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพริกคั่ว พริกป่น หรือน้ำพริก เพื่อนำไปจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ช่วยลดการใช้แรงงาน ลดเวลาการผลิต ประหยัดพลังงาน ส่งผลให้ชุมชนมีรายได้มากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: เครื่องคั่วพริก, พลังงานแสงอาทิตย์, ระบบอัตโนมัติ, ประสิทธิภาพการคั่ว

เครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ A Solar Energy Floating Waste Collector Controlled via Smartphone

พิระพัคส์ การะภักดี^{1*}, พิชัย หอมจันทร์¹, อัษฎางค์ บุญศรี², วรวิทย์ บุตรดี² และ อิทธิพล เหลาพรหม²
Phiraphak Karaphakdee^{1*}, Pichai Homchan¹, Ussadang Boonsri², Worawut buddee², and Itthiphon Laoprom²

¹สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

²สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยี เอกวิศวกรรมพลังงานและระบบควบคุม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

¹Energy Technology Faculty of Industrial Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University
Kamphaeng Phet 62000.

²Major Engineering Technology Minor Energy and Control System Engineering Faculty of Industrial
Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University Kamphaeng Phet 62000.

*Corresponding author: Tel: 0614461859. E-mail phiraphak2546@gmail.com

Abstract

This article presents the design and construction of a solar-powered floating waste collector controlled via a smartphone. The device measures 160 × 175 × 100 cm, uses three 12-volt, 250-watt DC motors, is controlled by a NodeMCU board, and is powered by an off-grid solar power system with a 12-volt, 24-ampere-hour battery. The testing was divided into three parts: 1) mechanical performance, 2) work-operated mechanical performance, and 3) the solar power system performance. The results showed that the device can operate according to the specified mechanism and efficiently collect sewage, achieving a maximum harvest volume of 0.28 cubic meters over two cycles. The solar cell system can supply power to the device for 35 minutes. The prototype is accurate, stable, and responsive to commands. It is suitable for public use and supports the Zero-Waste policy.

Keywords: Floating waste, Solar energy, Smartphone

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้าง เครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องมีขนาด 160 × 175 × 100 เซนติเมตร ใช้มอเตอร์กระแสตรง 12 โวลต์ ขนาด 250 วัตต์ จำนวน 3 ตัว ควบคุมด้วยบอร์ด NodeMCU และใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริดร่วมกับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 24 แอมแปร์ชั่วโมง การทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานบนบก 2) การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานในน้ำ และ 3) ประสิทธิภาพการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการทดสอบพบว่า เครื่องสามารถเคลื่อนที่ได้ตามกลไกที่กำหนดและเก็บสิ่งปฏิกูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีปริมาณการเก็บเกี่ยวสูงสุดจำนวน 2 รอบ เท่ากับ 0.28 ลูกบาศก์เมตร ระบบโซลาร์เซลล์สามารถจ่ายพลังงานให้เครื่องทำงานได้ 35 นาที เครื่องต้นแบบมีความแม่นยำ เสถียร และตอบสนองต่อคำสั่งได้ดีเหมาะสำหรับใช้ในพื้นที่สาธารณะและสนับสนุนนโยบาย Zero-Waste

คำสำคัญ: สิ่งปฏิกูลลอยน้ำ, พลังงานแสงอาทิตย์, สมาร์ทโฟน

บทนำ

ปัญหาขยะในแหล่งน้ำเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศไทยในปัจจุบัน ขยะที่ลอยอยู่ในแหล่งน้ำ สาธารณะต่าง ๆ นอกจากจะส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพและคุณภาพน้ำแล้ว ยังเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อโรคและเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ รวมถึงระบบนิเวศโดยรวม การจัดเก็บขยะเหล่านี้ส่วนใหญ่อาศัยแรงงานคน ซึ่งมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนา เครื่องเก็บขยะลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเป็นนวัตกรรมที่ช่วยลดภาระของแรงงานคน เพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการเก็บขยะลอยน้ำ โดยผู้ใช้งานสามารถควบคุมทิศทางและการทำงานของเครื่องได้ผ่านสมาร์ตโฟนในระยะไกลพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบมาจาก พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและหมุนเวียนได้ จึงช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้โครงการนี้มีความสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบดังกล่าว จะเป็นการผสมผสานเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทน ระบบควบคุมอัตโนมัติ และเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้จริง มีต้นทุนการผลิตไม่สูง และเป็นประโยชน์ต่อชุมชนในการดูแลรักษาความสะอาดของแหล่งน้ำในท้องถิ่น

ในปัจจุบัน ปัญหาขยะลอยน้ำในแม่น้ำ ลำคลอง หรือแหล่งน้ำสาธารณะต่าง ๆ เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ขยะที่ลอยอยู่ในน้ำส่วนใหญ่เป็นพลาสติก ขวดน้ำ ถุงพลาสติก และเศษวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งเมื่อสะสมเป็นเวลานานจะทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรม เกิดการอุดตันของทางน้ำ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อโรค และสร้างภาพลักษณ์ที่ไม่ดีต่อชุมชน อีกทั้งการเก็บขยะลอยน้ำในปัจจุบันยังอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในบริเวณที่กว้างหรือเข้าถึงยากที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์เก็บขยะลอยน้ำหลายรูปแบบ เช่น นายพิริวิชญ์ เหราบัตย์ (1) ได้ออกแบบและสร้าง เครื่องเก็บขยะในน้ำแบบเคลื่อนที่ได้ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์เป็นแหล่งพลังงานสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนและระบบควบคุมทิศทาง ตัวเครื่องติดตั้งตะแกรงดักขยะด้านหน้าเพื่อรวบรวมขยะลอยน้ำเข้าสู่ถังเก็บโดยอัตโนมัติ สามารถเก็บขยะประเภทพลาสติก โฟม และเศษไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องพึ่งพาแรงงานคนและไม่สร้างมลพิษทางเสียงหรืออากาศ นับว่าเป็นแนวทางสำคัญในการส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดเพื่อการจัดการขยะในแหล่งน้ำอีกทั้งงานของ เมล์ เมืองชนะ (2) ได้พัฒนา เรือเก็บขยะควบคุมระยะไกล โดยใช้ระบบรีโมทวิทยุควบคุมการเคลื่อนที่ สามารถสั่งงานให้เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย-ขวา และเก็บขยะตามพื้นที่ที่ต้องการได้สะดวก ทำให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการเก็บขยะจากระยะไกลได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ต้องลงไปในน้ำ ผลการทดลองพบว่าเรือสามารถทำงานได้อย่างเสถียร และตอบสนองต่อคำสั่งได้รวดเร็ว เหมาะกับการใช้งานในแหล่งน้ำขนาดเล็กถึงขนาดกลาง

จากผลงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์เก็บขยะลอยน้ำที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมส่วนใหญ่ยังคงใช้รีโมทวิทยุที่มีข้อจำกัดในด้านระยะการทำงานและการเชื่อมต่อข้อมูล ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนา เครื่องเก็บขยะลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้แอปพลิเคชัน Blynk และไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU เพื่อสั่งงานและควบคุมการเคลื่อนที่แบบไร้สายได้ทุกพื้นที่ที่มีเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจากโทรศัพท์มือถือ นอกจากนี้ ระบบที่พัฒนาจะใช้พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิง สนับสนุนการใช้พลังงานสะอาด และช่วยแก้ปัญหาขยะลอยน้ำได้อย่างยั่งยืน

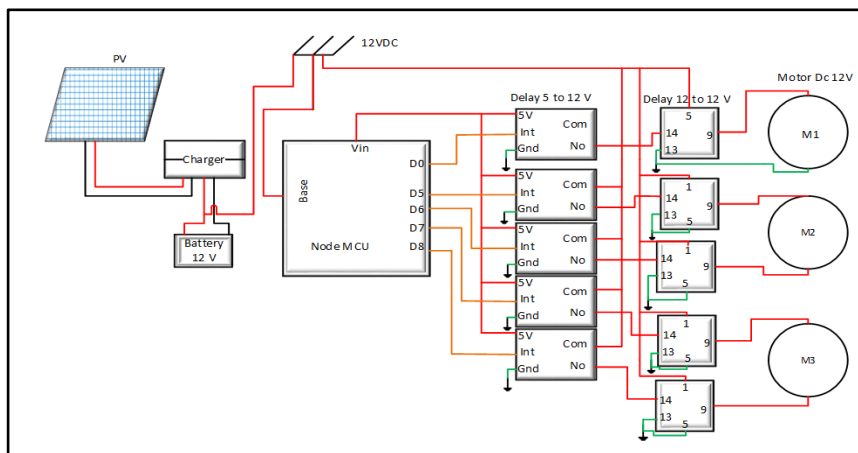
วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่องระบบระบบคัดแยกการทิ้งขยะอัตโนมัติแบบไร้สัมผัสเพื่อให้วิจัยครั้งนี้ดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดรูปแบบวิจัย ตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างระบบเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
3. ทดสอบหาประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
4. เก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูล และ สรุปผลการวิจัย

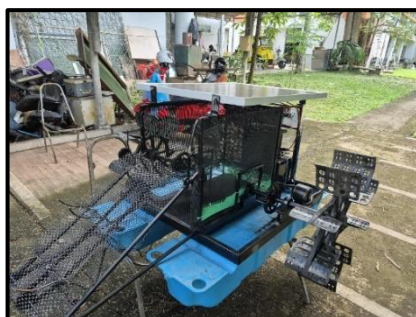
การออกแบบเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากที่ได้ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทำให้ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างการออกแบบเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นงานวิจัยที่มีความสูง 100 เซนติเมตร กว้าง 160 เซนติเมตร ยาว 175 เซนติเมตร ที่เก็บขยะในตัวเครื่องที่มีความขนาด 40 x 70 x 50 เซนติเมตร ปากเก็บเกี่ยวขยะมีขนาด 40 x 75 x 35 เซนติเมตร พร้อมติดตั้ง Motor DC 12 โวลต์ ขนาดกำลัง 250 วัตต์ จำนวน 3 ตัว ติดตั้งระบบออฟฟริต(3) แผงโซลาร์เซลล์ จำนวน 150 W จำนวน 1 แผง ตัวควบคุมการชาร์จประจุ 30 แอมป์ จำนวน 1 ตัว แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 24 แอมแปร์ชั่วโมง จำนวน 1 ก้อน จากนั้นจะเก็บพลังงานไว้เป็นแหล่งจ่ายไฟหลักให้กับระบบทั้งหมด เมื่อมีแหล่งพลังงานแล้ว บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU (4) จะจ่ายไฟผ่านขา Vin เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรดีเลย์ ขา D0 ใช้ควบคุมมอเตอร์ตัวหมุนแขนเก็บขยะ โดยส่งสัญญาณผ่านวงจรดีเลย์ 5V to 12V และ 12V to 12V เพื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์ตัวที่ 1 ขา D5 D7 ใช้เพื่อเดินหน้าและเลี้ยวขวาโดยส่งสัญญาณผ่านวงจรดีเลย์ 5V to 12V และ 12V to 12V เพื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์ตัวที่ 2 ขา D6 D8 ใช้เพื่อถอยหลังและเลี้ยวซ้ายโดยส่งสัญญาณผ่านวงจรดีเลย์ 5V to 12V และ 12V to 12V เพื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์ตัวที่ 3 เมื่อผู้ใช้สั่งการผ่านแอปพลิเคชัน Blynk (5) ที่เชื่อมต่อกับบอร์ด NodeMCU ผ่านสัญญาณ Wi-Fi ระบบจะเริ่มทำงานตามคำสั่งโดยมอเตอร์ M1 (ควบคุมด้วยขา D0) จะทำหน้าที่หมุนแขนเก็บขยะผ่านวงจรดีเลย์เพื่อหมุนเก็บสิ่งปฏิกูลที่ตั้งไว้ ส่วนมอเตอร์ M2 และ M3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นล้อขับเคลื่อนซ้าย-ขวา ถูกควบคุมผ่านขา D5, D6, D7 และ D8 โดยขา D5 และ D7 เป็นคู่ควบคุมฝั่งซ้าย และขา D6 และ D8 เป็นคู่ควบคุมฝั่งขวา



ภาพที่ 1 การออกแบบเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ต่อมาผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยแสดงตัวอย่างได้ดังภาพที่ 2



(ก) เครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำ



(ข) ชุดวงจรควบคุม

ภาพที่ 2 การสร้างระบบเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

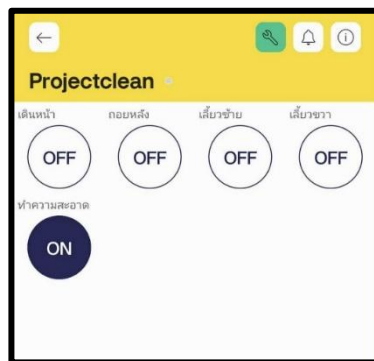
ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ตโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบจะแบ่งการทดสอบเป็น 3 หัวข้อ คือ 1) การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานของระบบของเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำ 2) การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานของน้ำของเครื่องเก็บสิ่งปฏิกูลลอยน้ำ และ 3) การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1. การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานของระบบของเครื่องเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูล

ในการทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานของเครื่องเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลจะทดสอบการทำงานของทั้งหมดได้ 2 แบบ คือ 1.1 ทดสอบกลไกการเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูล 1.2 ทดสอบกลไกการขับเคลื่อน สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

1.1 การทดสอบประสิทธิภาพทดสอบกลไกการเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลบนบก

จากภาพที่ 3 เป็นผลทดสอบของการทำงานของกลไกการเก็บเกี่ยวแบบควบคุม เมื่อผู้ใช้สั่งการผ่านแอปพลิเคชัน Blynk เมื่อกดสวิตช์ทำความสะอาดที่เชื่อมต่อกับบอร์ด NodeMCU ผ่านสัญญาณ Wi-Fi ระบบจะเริ่มทำงานตามคำสั่งโดยมอเตอร์ดังภาพที่ 3(ก) เอาต์พุตขา D0 จะทำหน้าที่หมุนแกนเก็บขยะผ่านวงจรดีเลย์ควบคุม 5V to 12V และผ่านวงจรดีเลย์ภาคกำลัง 12V to 12V เชื่อมมอเตอร์ตัวที่ 1 (M1) ดังภาพที่ 3(ข)



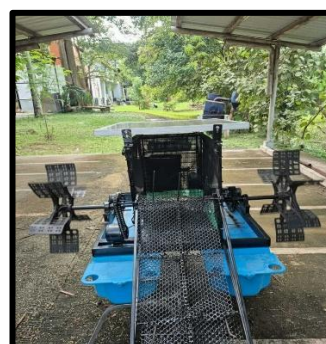
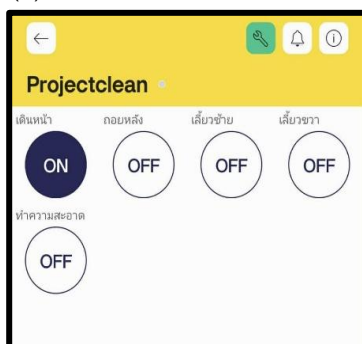
(ก) ส่วนควบคุมบนสมาร์ตโฟน

(ข) การทำงานของกลไกการเก็บเกี่ยว

ภาพที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพทดสอบกลไกการเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลบนบก

1.2 การทดสอบประสิทธิภาพของกลไกการขับเคลื่อนบนบก

ภาพที่ 4 เป็นผลทดสอบของการทำงานของกลไกการขับเคลื่อนบนบกเมื่อผู้ใช้สั่งการผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ที่เชื่อมต่อกับบอร์ด NodeMCU ผ่านสัญญาณ Wi-Fi โดยจะควบคุมมอเตอร์ M2 และ M3 เพื่อทำหน้าที่ เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย และ เลี้ยวขวา เมื่อกดสวิตช์เดินหน้า ระบบจะสั่งให้เอาต์พุต D6 กับ D8 ทำงานเพื่อให้มอเตอร์ M2 และ M3 หมุนไปด้านหน้า ถัดมาเมื่อกดสวิตช์ถอยหลัง ระบบจะสั่งให้เอาต์พุต D5 กับ D7 กลับทางหมุนเพื่อให้มอเตอร์ M2 และ M3 หมุนไปด้านหลัง จากนั้น จะสั่งเลี้ยวซ้ายผ่านเอาต์พุต D7 และเลี้ยวขวาผ่านเอาต์พุต D5 ดังแสดงตัวอย่างได้ดังภาพที่ 4(ก) 4(ข) และ 4(ค) ตามลำดับ



(ก) ส่วนควบคุมบนสมาร์ตโฟน

(ข) เดินหน้า-ถอยหลัง

(ค) เลี้ยวซ้าย-ขวา

ภาพที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของกลไกการขับเคลื่อนบนบก

2. การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานบนน้ำของเครื่องเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลลอยน้ำ

การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานบนน้ำของเครื่องเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน จะทำการทดสอบกลไกการเคลื่อนที่ และเก็บเกี่ยวขยะลอยน้ำสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้



(ก) เริ่มต้นกลไก



(ข) ทดสอบกลไกขับเคลื่อน



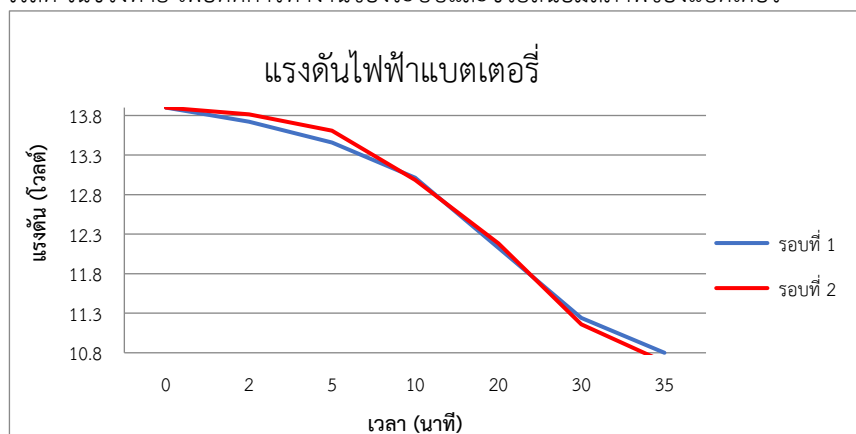
(ค) ทดสอบกลไกเก็บเกี่ยว

ภาพที่ 5 การทดสอบประสิทธิภาพกลไกการทำงานบนน้ำของเครื่องเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลลอยน้ำ

ภาพที่ 5 เป็นผลทดสอบของการทำงานของกลไกการขับเคลื่อนในน้ำเมื่อผู้ใช้งานระบบที่ติดตั้งไว้บนเครื่องเรียบร้อยแล้ว พบว่า เมื่อเริ่มต้นกลไกเครื่องจะลอยนิ่งอยู่บนน้ำ ตามภาพที่ 5 (ก) จากนั้น ทำการทดสอบกลไกการขับเคลื่อน ระบบสามารถตอบสนองการเดินหน้า ถอยหลัง และเลี้ยวซ้าย – เลี้ยวขวา ได้อย่างถูกต้อง ตามภาพที่ 5 (ข) ต่อมา เมื่อพบสิ่งปฏิกูล ผู้วิจัยได้ทดสอบการกดปุ่มเก็บเกี่ยว ตัวเครื่องสามารถดึงสิ่งปฏิกูลไว้บนแกนสายพานลำเลียงของตัวเครื่องได้ตามภาพที่ 5 (ค) ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบ ความเร็วในการเคลื่อนที่พบว่า สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วเฉลี่ย 1 เมตรต่อวินาที และสามารถควบคุมการทำงานได้ทุกพื้นที่ที่มีเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจากโทรศัพท์มือถือ ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

3. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ในภาพที่ 6 เป็นผลการทดสอบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการทดสอบจำนวน 2 ครั้ง ตัวกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กับระยะเวลาการทำงาน (นาที) ของเครื่องเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูล ผลการทดสอบพบว่า แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาการใช้งานประมาณ 35 นาที โดยเริ่มต้นที่ประมาณ 13.8 โวลต์ และลดลงเหลือ 10.8 โวลต์ ในช่วงท้าย เพื่อตัดการทำงานของระบบและช่วยถนอมสภาพของแบตเตอรี่



ภาพที่ 6 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

บทสรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลลอยน้ำควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ตัวเครื่องมีขนาด $100 \times 160 \times 175$ เซนติเมตร ส่วนเก็บเกี่ยวสิ่งปฏิกูลขนาด $40 \times 70 \times 50$ เซนติเมตร และปากเก็บเกี่ยวขนาด $40 \times 75 \times 35$ เซนติเมตร ติดตั้งมอเตอร์ DC 12 โวลต์ ขนาด 250 วัตต์ จำนวน 3 ตัว พร้อมแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 150 วัตต์ 1 แผง ตัว

ควบคุมการชาร์จขนาด 30 แอมป์ 1 ตัว และแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 24 แอมแปร์ชั่วโมง 1 ก้อน ระบบควบคุมใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU เชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของมอเตอร์ทั้งสามตัว ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถทำการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ถอยหลัง และเลี้ยวซ้าย-ขวา และเก็บเกี่ยวได้ถูกต้องตามคำสั่งที่ควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน ตัวเครื่องสามารถเก็บสิ่งปฏิกูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ความถูกต้องของระบบสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการเก็บเกี่ยวจำนวน 2 รอบ เท่ากับ 0.28 ลูกบาศก์เมตร มีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ 1 เมตรต่อวินาที ควบคุมการทำงานได้ทุกพื้นที่ที่มีเครื่องช่วยอินเตอร์เน็ตจากโทรศัพท์มือถือ ประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์สามารถให้พลังงานในการทำงานเป็นระยะเวลา 35 นาที ที่แรงดันแบตเตอรี่สูงสุด 13.8 โวลต์ และ ตัดการทำงานที่แรงดัน 10.8 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าเครื่องเก็บขยะเก็บสิ่งปฏิกูลที่ผู้วิจัยได้พัฒนามีความแม่นยำ เสถียร และสามารถตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้ในที่สาธารณะ นอกจากนี้ยังสามารถส่งเสริมการลดภาวะโลกร้อน ตามแนวทางนโยบายของ Zero Waste

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา และคณาจารย์ โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] นายพีรวิชญ์ เหราบัตย์ และ คณะฯ. (2562). **เครื่องเก็บขยะในน้ำแบบเคลื่อนที่ได้ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์**. โครงการงานวิทยาศาสตร์สำหรับนักศึกษา กศน. ระดับประเทศด้านการใช้และการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าเพื่อชีวิตและสังคม ประจำปี พ.ศ. 2562 กรุงเทพฯ : ศูนย์วิทยาศาสตร์เพื่อการศึกษาเอมมัย.
- [2] เมล์ เมืองชนะ และ ทศน์ แซ่เหลียง. (2062). **เรือเก็บขยะควบคุมระยะไกล**. ใน การประชุมวิชาการสำหรับนักศึกษา ระดับชาติ ครั้งที่ ๒. The 2nd FIT SSRU Conference 2019, วันที่ 7 มิถุนายน 2562 ณ อาคาร 47 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
- [3] อธิฐานค์ บุญศรี และ คณะฯ. (2564). **ระบบควบคุมการเลี้ยงไก่ในโรงเรือนแบบสมาร์ตฟาร์มด้วยพลังงานแสงอาทิตย์**. ใน การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 ประจำปี 2564, วันที่ 10-12 พฤศจิกายน 2564 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- [4] พัศตราภรณ์ อินสุข และ คณะฯ. (2567). **ระบบคัดแยกการทิ้งขยะอัตโนมัติแบบไร้สัมผัส**. การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 ประจำปี 2567, วันที่ 28-30 ตุลาคม 2567 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ศูนย์แม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [5] ชลิตา แจ่มจันทร์ และ คณะฯ. (2565). **ระบบรายงานสภาพน้ำและควบคุมอุณหภูมิในตู้ปลาด้วยแผ่นเพลทเทอร์ผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน**. ใน การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 ประจำปี 2565, วันที่ 27-29 ตุลาคม 2565 ณ โรงแรมโนโวเทล ชุมพร บีช รีสอร์ท แอนด์กอล์ฟ จังหวัดชุมพร.

เครื่องนวดข้าวขนาดเล็กโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านพลังงานแสงอาทิตย์

Development of a Small Rice Threshing Machine by a Brushless DC Motor Using Solar Energy

ตรีภพ ยอดดียม¹ อนุรักษ์ สมวรรณ^{1*} ปากิน มณีโชติ¹ และ เทพ เกื้อทวีกุล¹

Triphop Yodyom¹ Anurak Somwan^{1*} Pakin Maneechot¹ and Thep Kueathaweekun¹

¹โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

¹energy technology program, Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet 62000

Corresponding author: Tel.: 0813138682. E-mail anurakboss2546@gmail.com

Abstract

This research aimed to design and develop a solar-powered rice thresher system. It utilizes a 24-volt, 500-watt brushless DC motor as the drive for the threshing unit. The system is powered by two 12-volt, 190-amp-hour batteries connected in series to form 24 volts and is charged by a 550-watt solar panel through a 30-amp charge control system. The system is designed to operate both on battery power alone and with a combination of batteries and solar power. The system was found to be highly efficient, with the DC-motor-driven rice thresher operating continuously for over 12 hours per test cycle and fully recharging in an average of 10–12 hours using direct solar power. This system is suitable for small-scale farmers and households, reducing energy costs by over 50% compared to grid-connected power. It also represents a key strategy for promoting clean energy use in Thailand's agricultural sector.

Keywords : Solar Energy, Rice Threshing Machine, DC Motor, Renewable Energy

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบและพัฒนาเครื่องนวดข้าวขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ สร้างขึ้นโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิด Brushless DC ขนาด 24 โวลต์ 500 วัตต์ เป็นกำลังขับเคลื่อนข้าว โดยได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 190 แอมแปร์ – ชั่วโมง จำนวน 2 ลูก ต่ออนุกรมเป็น 24 โวลต์ และรับการชาร์จจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 550 วัตต์ ผ่านระบบควบคุมการชาร์จประจุ 30 แอมแปร์ จากการทดสอบประสิทธิภาพพบว่าเครื่องนวดข้าวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเครื่องนวดข้าวที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ DC ทำงานต่อเนื่องได้ยาวนานกว่า 12 ชั่วโมงต่อรอบการทดสอบ และสามารถชาร์จประจุไฟกลับได้เต็มภายในเวลาเฉลี่ย 10 – 12 ชั่วโมงจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงเหมาะสมสำหรับเกษตรกรรายย่อยหรือครัวเรือนขนาดเล็ก ช่วยลดต้นทุนพลังงานกว่า 50% เมื่อเทียบกับการใช้ไฟฟ้าจากสายส่ง และเป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดในภาคเกษตรกรรมไทย

คำสำคัญ : พลังงานแสงอาทิตย์, เครื่องนวดข้าว, มอเตอร์กระแสตรง, พลังงานทดแทน

ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุม ความเร็วรอบแบบคงที่

DC motor speed controller with feedback IC TL494 for constant speed control

กฤษณะ นุ่มเตื้อ^{1*} ภูมิพัฒน์ สุวรรณโณ¹ ธรรมปิติ เมืองชัย¹ อัสฎางค์ บุญศรี² วรวิทย์ บุตรดี² และ อธิพิณ เหลาพรม²
Kidsana Numdure Puripat Suwanno Thamapiti Muangchai Ussadang Boonsri Worawut buddee
 and littipon Laoprom

¹สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

²สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยี เภกิจวิศวกรรมพลังงานและระบบควบคุม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

¹Energy Technology Faculty of Industrial Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University
 Kamphaeng Phet 62000

²Major Engineering Technology Minor Energy and Control System Engineering Faculty of Industrial
 Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University Kamphaeng Phet 62000.

¹Corresponding author: Tel: 0634178955 E-mail: mangbogamer100@gmail.com

Abstract

The research DC motor speed control system with feedback IC TL494 for constant speed control aims to study the operation of the DC motor speed control circuit using IC TL494 for feedback control of DC motor speed. The experimental results show that the DC motor speed can be controlled by varying the reference signal, resulting in clockwise and counterclockwise rotation. The DC motor can move very well according to the reference signal. Moreover, the operation of the DC motor involves changing the load to achieve both clockwise and counterclockwise rotation. The control unit can satisfactorily control the motor speed to return to the reference signal. From the experimental results, the DC motor speed controlled by the IC TL494 is satisfactory.

Keywords: DC motor, feedback, IC TL494

บทคัดย่อ

งานวิจัยชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ในครั้งนี้ เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับ โดยผลการทดลองพบว่าการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ในลักษณะการทำงานแบบปรับเพิ่มลดสัญญาณอ้างอิงในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ในลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้เป็นอย่างดี อีกทั้งการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้งการเคลื่อนที่แบบหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา ชุดควบคุมสามารถควบคุมความเร็วรอบ

ของมอเตอร์ให้สามารถกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ จากผลการทดลองสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไอซี TL494 สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างน่าพอใจ

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง , แบบป้อนกลับ , ไอซี TL494

บทนำ

หากกล่าวถึงการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในปัจจุบัน คงยังปฏิเสธไม่ได้ว่ายังคงมีการใช้งานมอเตอร์ประเภทนี้อย่างมากมาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรม การเกษตร การควบคุมอัตโนมัติ การขับเคลื่อนรถไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งานทางด้านพลังงาน เป็นต้น เนื่องด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของระบบขับเคลื่อนทางกลที่ถูกใช้กันมาอย่างยาวนาน ซึ่งการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีการใช้งานที่ง่ายโดยไม่ได้มีความซับซ้อนมากนักทั้งนี้สำหรับชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีการใช้ตัวควบคุมทั้งที่เป็นตัวควบคุมแบบดิจิทัลและอนาล็อกสำหรับการควบคุม ทั้งนี้เพื่อความง่ายต่อการใช้งานระบบอนาล็อกจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยไม่จำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งงานอุปกรณ์ เพียงแต่ต้องจรรยาบรรณการออกแบบวงจรเพื่อให้ทำงานตามความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นการง่ายสำหรับผู้เริ่มต้นในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

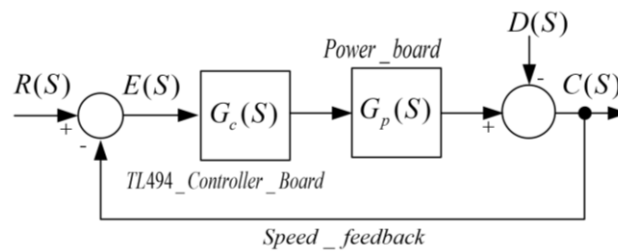
ทั้งนี้สำหรับระบบควบคุมแบบอนาล็อกที่ปัจจุบันยังคงมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ ไอซี TL 494 ซึ่งเป็นวงจรรวมที่มีฟังก์ชันการทำงานที่สามารถสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ได้ มีช่วงความถี่ในการทำงานถึง 300 กิโลเฮิร์ต อีกทั้งยังมีวงจรเปรียบเทียบแรงดันสำหรับการทำงานแบบป้อนกลับและวงจรหยุดการทำงานของวงจรได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ได้ เช่นระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์พลังงานแสงอาทิตย์ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า และการควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นต้น อีกทั้งไอซี TL494 ยังมีราคาที่ไม่สูงและหาซื้อได้ง่ายอีกด้วย ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางไฟฟ้าในปัจจุบัน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยังคงเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นที่ทราบกันดี แต่หากการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในงานบางประเภทจำเป็นต้องมีการรักษาความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีการทำงานแบบความเร็วรอบแบบคงที่ เช่น ระบบขับเคลื่อนสายพานลำเลียง ระบบป้อนชิ้นงาน เครื่องผสม เครื่องบด เครื่องเจียระไน เป็นต้น [1-2] จึงจำเป็นต้องมีชุดการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีความเร็วรอบแบบคงที่นั้น จึงได้เลือกใช้ไอซี TL494 ที่มีคุณสมบัติด้านการควบคุมที่เพียงพอต่อการใช้งานด้านการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง อีกทั้งราคาที่ถูกลงและหาซื้อได้ง่าย การออกแบบวงจรที่ทำได้ไม่ซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ จึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจเพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบคงที่ในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ได้มีการดำเนินงานและขั้นตอนการออกแบบชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ ขั้นตอนแรกศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องสำหรับการดำเนินงานวิจัยโดยหาข้อมูลที่จำเป็นในการทำวิจัย เมื่อได้ข้อมูลแล้วจึงทำการออกแบบและจัดหาอุปกรณ์วงจรตามการออกแบบวงจรที่ได้ศึกษามา จากนั้นจึงทำการสร้างวงจรและทดสอบการทำงานของวงจรและหากวงจรไม่มีข้อผิดพลาดใด ๆ จึงทำการทดลองวงจร โดยมีการทำงานในลักษณะที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ แล้วทำการเก็บผลการทดลองและสรุปผลการทำงานของวงจรและรายงานผลการทดลองต่อไป

ทั้งนี้จากระบบการควบคุมการทำงานของวงจรสามารถแสดงแผนผังการทำงานของวงจรได้ดังภาพที่ 1 ดังนี้



ภาพที่ 1 แผนผังการทำงานของชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่

โดยวงจรสำหรับชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ ซึ่งลักษณะของวงจรสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 และ 3 ซึ่งประกอบด้วยวงจรควบคุมและวงจรภาคกำลังตามลำดับ ซึ่งในภาพที่ 2 นั้นเป็นวงจรควบคุมสำหรับวงจรชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ โดยประกอบไปด้วยวงจรร้อยภายในดังนี้ คือ วงจรชุดควบคุมด้วยไอซี TL494 วงจรชุดเซนเซอร์สำหรับแยกกราวด์ วงจรชุดเลือกการทำงานแบบตามและทวนเข็มนาฬิกา วงจรชุดปรับค่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับ วงจรชุดปรับค่าความถี่สวิตช์ และวงจรชุดปรับค่าแรงดันอ้างอิง โดยสามารถอธิบายการทำงานของแต่ละชุดได้ดังนี้

วงจรถัดควบคุมด้วยไอซี TL494 เป็นชุดที่ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อส่งสัญญาณไปยังชุดวงจรภาคกำลังในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยสัญญาณที่ถูกส่งไปนั้นจะมีความกว้างของสัญญาณ PWM ตามการประมวลผลสัญญาณของสัญญาณแรงดันอ้างอิงกับสัญญาณที่มาจากชุดเซนเซอร์สำหรับแยกกราวด์ โดยสัญญาณจะกว้างมากเมื่อค่าของสัญญาณป้อนกลับที่มาจากเซนเซอร์สำหรับแยกกราวด์น้อยกว่าสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณความกว้างของสัญญาณ PWM จะแคบหรือน้อยลงหากค่าของค่าของสัญญาณป้อนกลับที่มาจากเซนเซอร์สำหรับแยกกราวด์ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณ PWM จะไม่ถูกส่งออกไปเมื่อค่าของสัญญาณป้อนกลับที่มาจากเซนเซอร์สำหรับแยกกราวด์มากกว่าสัญญาณอ้างอิง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าการปรับตั้งค่าของชุดปรับค่าควบคุมแบบป้อนกลับด้วย

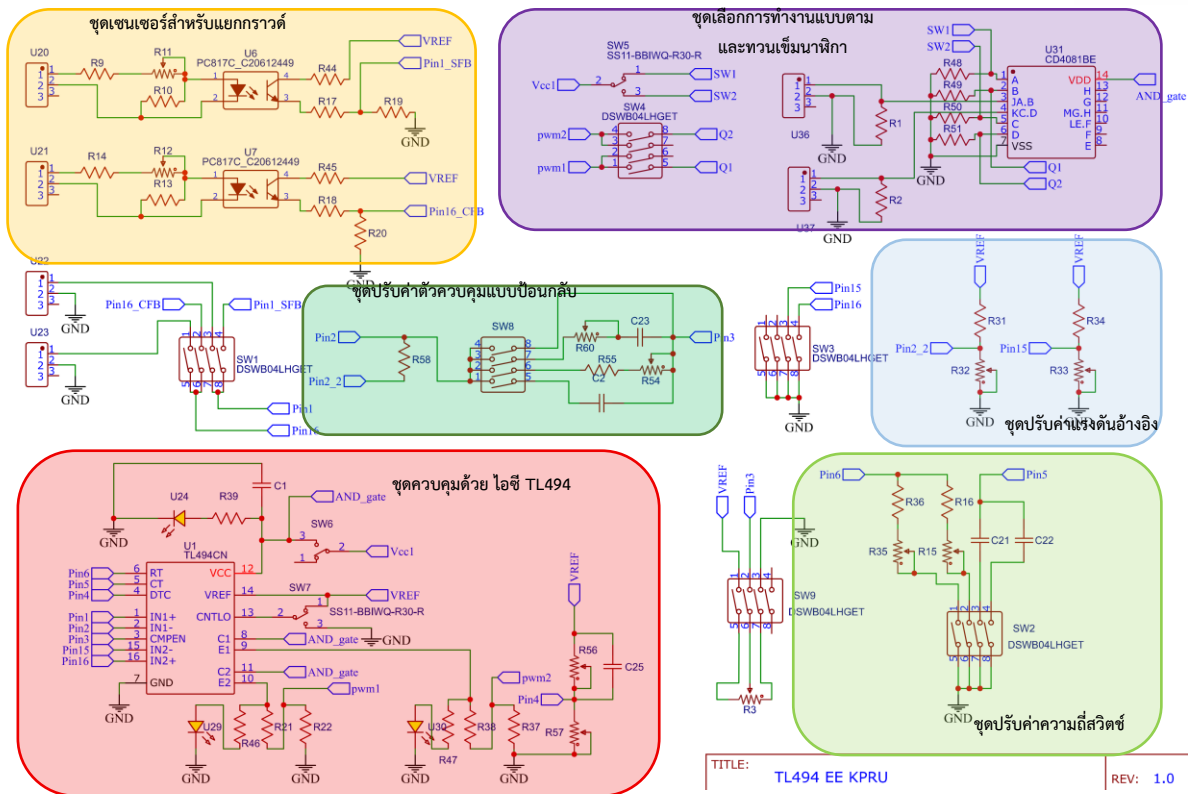
วงจรถัดเซนเซอร์สำหรับแยกกราวด์ ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากเทคโคเจนเนอเรเตอร์ซึ่งทำมาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการแยกกราวด์เพื่อป้องกันการกวนกันของสัญญาณของมอเตอร์หากใช้ระบบกราวด์ร่วมกันได้

วงจรถัดเลือกการทำงานแบบตามและทวนเข็มนาฬิกา ทำหน้าที่เพียงเลือกการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะให้มอเตอร์มีการหมุนตามหรือทวนเข็มนาฬิกา

วงจรถัดปรับค่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ทำหน้าที่ในการปรับค่าสัญญาณการทำงานแบบป้อนกลับเพื่อให้วงจรควบคุมทำหน้าที่ในการในการรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีความคงที่แม้ในขณะที่ทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิงและในขณะที่ทำการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และลดค่าความผิดพลาดของสัญญาณให้ได้มากที่สุด

โดยตัวควบคุมที่ใช้ในวงจรสามารถเลือกการทำงานได้ โดยตัวควบคุมที่เลือกใช้เป็นชนิดพีไอ ซึ่งตัวควบคุมชนิดนี้สามารถทำให้ผลตอบสนองมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วและความผิดพลาดในสภาวะคงตัวที่น้อยลงได้ โดยที่ฟังก์ชันของตัวควบคุมชนิดพีไอ ระบุไว้ในสมการที่ 1 ดังนี้ [3-4] โดยการปรับค่าตัวควบคุมชนิดพีไอนั้นได้ใช้วิธีการปรับค่าแบบทดลองปรับค่าและดูผลของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยการปรับค่าด้วยมือ

$$G_c(s) \Big|_{PI} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (1)$$



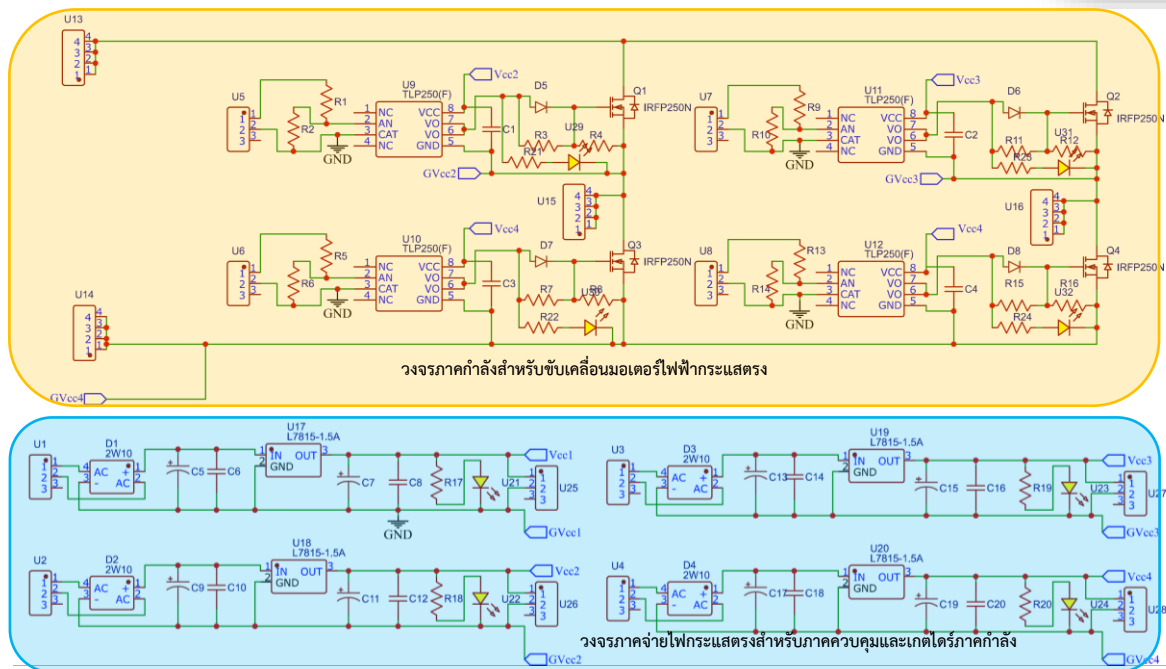
ภาพที่ 2 แสดงวงจรควบคุมของชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่

วงจรชุดปรับค่าความถี่สวิตช์ ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณความถี่ในการสวิตช์ของสัญญาณ PWM ที่จะถูกส่งไปยังภาคกำลังเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการออกแบบค่าความถี่ในการสวิตช์ สามารถออกแบบได้โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ขา 5 และ 6 ของไอซี TL494 ซึ่งเป็นค่าของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานตามลำดับ โดยมีสมการในการออกแบบดังสมการที่ 2 ดังนี้ [5] โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรให้สามารถปรับค่าความถี่ในการสวิตช์ได้หลายย่านได้ สามารถแสดงการออกแบบได้ดังภาพที่ 2 เพื่อให้การทดลองสามารถทำการทดลองได้หลายความถี่มากขึ้น

$$f_{sw} = \frac{1}{Rt \cdot Ct} \quad (2)$$

วงจรชุดปรับค่าแรงดันอ้างอิง ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อให้มอเตอร์หมุนตามสัญญาณอ้างอิงหรืออาจเรียกอีกอย่างว่าสัญญาณคำสั่ง เพราะเป็นสัญญาณที่จะทำให้สัญญาณป้อนกลับคอยรักษาสัญญาณให้ตรงกับสัญญาณอ้างอิงเสมอ

ทั้งนี้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ซึ่งประกอบด้วยวงจรภาคกำลัง แสดงได้ดังภาพที่ 3 ดังนี้ ซึ่งประกอบด้วย 2 วงจร คือ วงจรภาคกำลังสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรภาคจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับภาคควบคุมและเกตไดรฟ์ภาคกำลัง



ภาพที่ 3 แสดงวงจรกำลังและภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ จากการออกแบบวงจรสำหรับการทดลองของวงจรสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ในการทดลองเพื่อเก็บผลการทดลองจริงได้ใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ของวงจรสำหรับการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย/เทคโนโลยี
แรงดันไฟฟ้าอินพุต	20 โวลต์
ความถี่สวิตช์	10 กิโลเฮิร์ต
ชุดภาคกำลัง	วงจรฟลูบริดจ์
ชุดตัวสัญญาณป้อนกลับ	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
โหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	ตัวต้านทานขนาด 10 โอห์ม
ชนิดของตัวควบคุม	พีไอ

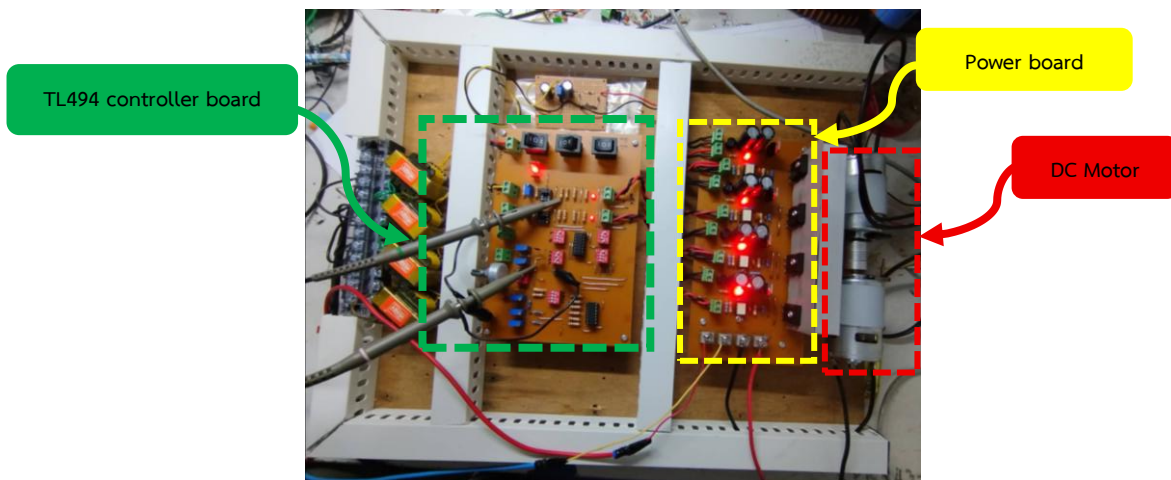
โดยทั้งนี้การปรับตั้งค่าพีไอสามารถปรับค่าการตั้งค่าได้โดยวิธีการดังนี้

- 1) ต่อระบบควบคุมให้มีการทำงานแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบพีไอก่อน
- 2) จากนั้นทำการปรับค่าอัตราขยายของค่าพีไอให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ และสังเกตผลตอบสนองที่ได้
- 3) ถ้าปรับค่าอัตราขยายของค่าพีไอให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ แล้วผลตอบสนองที่ได้ไม่มีการพุ่งเกินให้สังเกตดูว่าระบบมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวหรือไม่

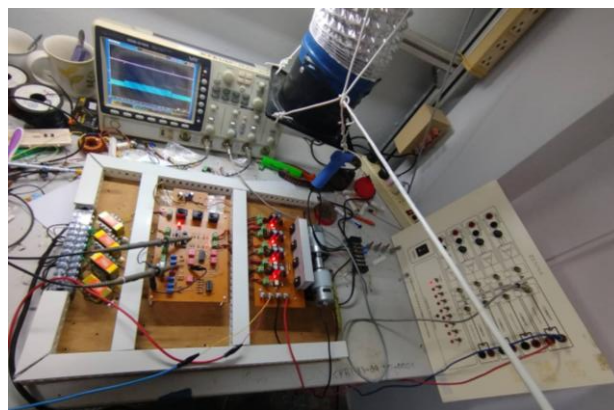
3.1) กรณีที่ไม่มีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวสามารถใช้ตัวควบคุมแบบพีไออย่างเดียว โดยปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมให้สูง ๆ เข้าไว้

3.2) กรณีที่ยังคงมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวอยู่ ให้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยการปรับตั้งค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอให้สูงพอประมาณ แล้วจึงปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไจบนกระทั่งค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวเป็นศูนย์

ทั้งนี้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่จริงสำหรับการทดลองจริงสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4 และ 5 ดังนี้



ภาพที่ 4 ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่

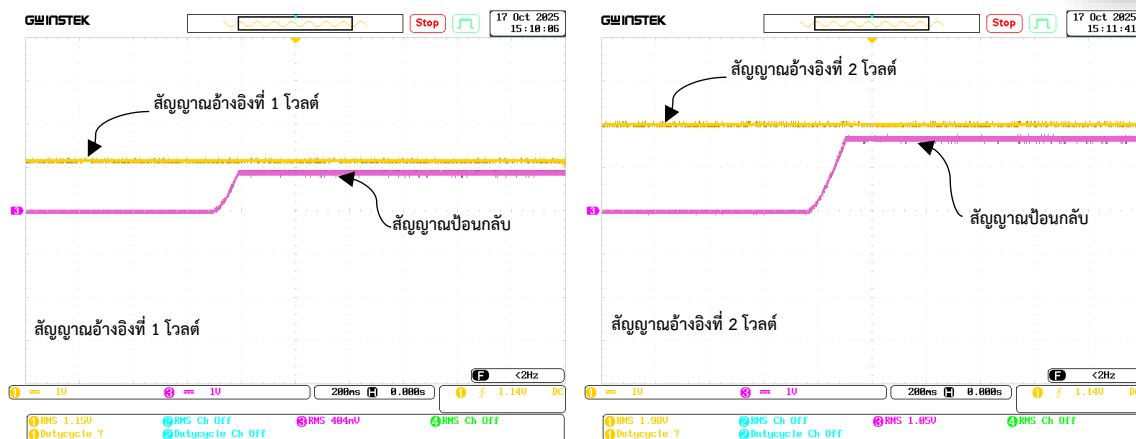


ภาพที่ 5 การติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบป้อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ขณะทำการทดลอง

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

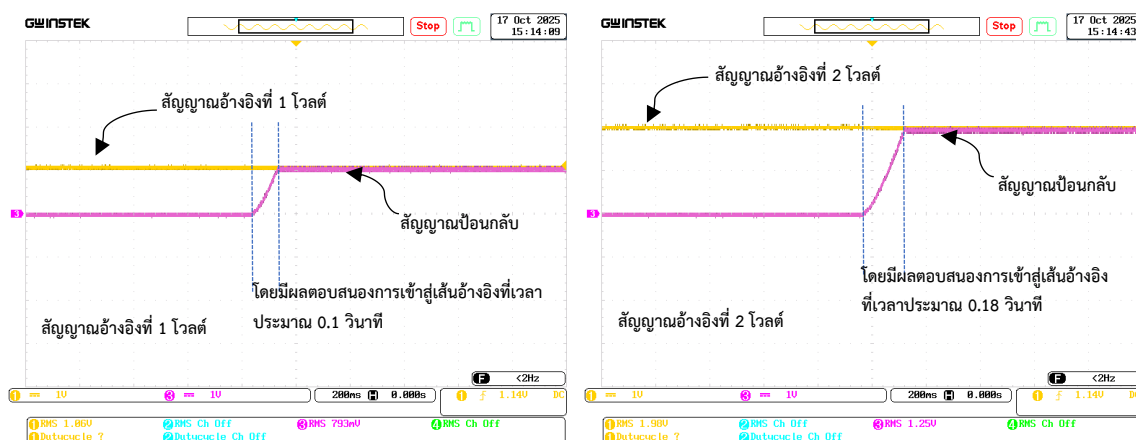
สำหรับผลการวิจัยและการอภิปรายผลในครั้งนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6-9 ดังต่อไปนี้

จากภาพที่ 6 เป็นการแสดงผลการตอบสนองของสัญญาณป้อนกลับของระบบต่อการปรับสัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ เพื่อดูผลตอบสนองของสัญญาณป้อนกลับขณะไม่มีตัวควบคุม โดยสัญญาณที่ใช้ทดสอบนั้นจะมีการทดลองที่ 2 ค่า คือ ที่สัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ ตามลำดับ โดยผลการทดลองจากภาพที่ 6 พบว่าชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไอซี TL494 ไม่สามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ทั้ง 2 กรณี คือ ที่สัญญาณอ้างอิง 1 และ 2 โวลต์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสัญญาณป้อนกลับที่ไม่สามารถเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้



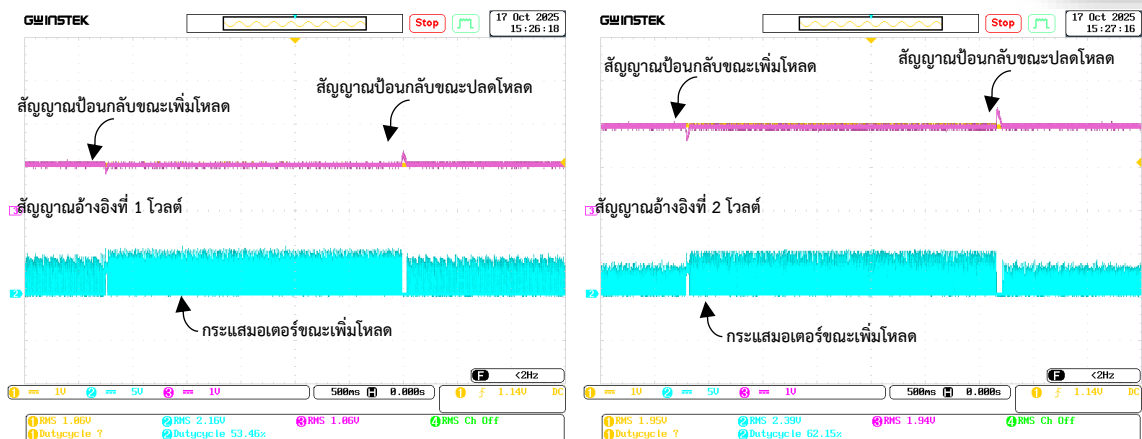
ภาพที่ 6 แสดงสัญญาณการปรับสัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ เพื่อตรวจสอบสองของสัญญาณป้อนกลับขณะไม่มีตัวควบคุม

จากภาพที่ 7 เป็นการแสดงผลการตอบสนองของสัญญาณป้อนกลับของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิง โดยสัญญาณที่ใช้ทดสอบนั้นจะมีการทดลองที่ 2 ค่า คือ ที่สัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ ตามลำดับ โดยผลการทดลองจากภาพที่ 7 พบว่าชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไอซี TL494 สามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้เป็นอย่างดี โดยสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เส้นอ้างอิงได้อย่างแม่นยำทั้ง 2 กรณี ที่เวลาประมาณ 0.1 วินาที ของสัญญาณอ้างอิงที่ 1 โวลต์ และ 0.18 วินาที ของสัญญาณอ้างอิงที่ 2 โวลต์



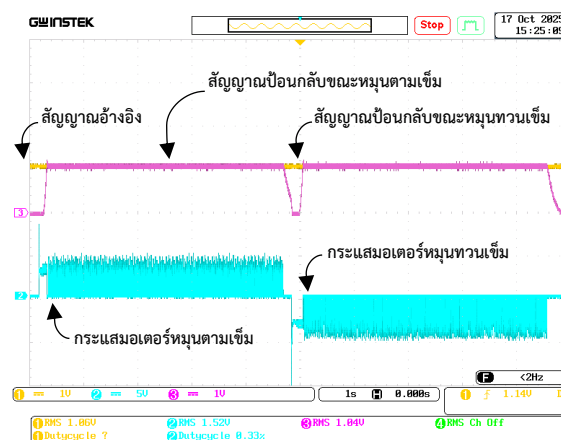
ภาพที่ 7 แสดงสัญญาณการปรับสัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ เพื่อตรวจสอบสองของสัญญาณป้อนกลับ

จากภาพที่ 8 เป็นการแสดงสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงโหลดที่สัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ รวมทั้งแสดงกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าขณะทำการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยผลการทดลองจากภาพที่ 8 พบว่าที่ขนาดสัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ ขนาดทำการเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ความเร็วของมอเตอร์มีความเร็วตกลงเล็กน้อยแต่ระบบควบคุมยังคงสามารถถึงความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เส้นอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว โดยกระแสของมอเตอร์มีการเพิ่มขึ้นตามโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้าและขณะทำการปลดโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงออก ความเร็วของมอเตอร์มีการพุ่งเกินเล็กน้อยของทั้ง 2 กรณี แต่ระบบควบคุมยังคงสามารถถึงความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เส้นอ้างอิงได้อย่างรวดเร็ว โดยเมื่อทำการปลดโหลดออกกระแสของมอเตอร์มีการลดลงเข้าสู่กระแสก่อนมีการเพิ่มโหลดซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 8 แสดงสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงโหลดที่สัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2 โวลต์ รวมทั้งแสดงกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าขณะทำการเปลี่ยนแปลงโหลด

จากภาพที่ 9 เป็นการแสดงผลการตอบสนองต่อสัญญาณการสัญญาณอ้างอิงขณะทำการกลับทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยผลการทดลองพบว่าทั้งขณะมอเตอร์หมุนตามและทวนเข็มนาฬิกาสามารถระบบสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เส้นอ้างอิงได้เป็นอย่างดี โดยการกลับทางหมุนมอเตอร์ไฟฟ้าให้พิจารณาที่กระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าขณะมอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา กระแสของมอเตอร์จะอยู่ฝั่งลบ ส่วนการพิจารณาสัญญาณบ่อนกลับนั้นเนื่องจากมีวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าของชุดวัดสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ไอซี TL494 ทำงานได้จึงแสดงค่าเป็นฝั่งบวกเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 9 แสดงผลการตอบสนองต่อสัญญาณการสัญญาณอ้างอิงขณะทำการกลับทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองข้างต้นของชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบ่อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ในครั้งนี้ เมื่อไม่มีระบบควบคุมแบบบ่อนกลับไม่สามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ตามสัญญาณอ้างอิงได้ แต่เมื่อมีระบบควบคุมสามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ทั้งในลักษณะแบบการติดตามสัญญาณอ้างอิง ซึ่งระบบสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้เข้าสู่สภาวะคงตัวได้เป็นอย่างดีและขณะทำการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ทั้งในลักษณะการทำงานแบบตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถถึงความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เข้าสู่สภาวะคงตัวตามสัญญาณอ้างอิงได้เป็นอย่างดี จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบ่อนกลับด้วยไอซี TL494 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบแบบคงที่ตามที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น สามารถให้ตอบสนองต่อการควบคุมได้เป็นอย่างดีที่น่าพอใจ

เอกสารอ้างอิง

- [1] พรรณิทธิ์ ทองมี ปัญญา แก้วซัง และอนุชิต รอดตัว. (2562). การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบฟuzzyและฟuzzyลอจิกโดยใช้โปรแกรมแลบวิว. วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 1. ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2562.
- [2] วิโรจน์ ขาวล่อ กิตติยา นาคพันธ์ และฐกฤต ปานชลธิ. (2023). การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม MATLAB. Journal of Energy and Environment Technology. JEET 2023 ; 10(1) : 77-85.
- [3] รังสรรค์ ชาญพิทยกิจ. (2557). การออกแบบตัวควบคุมและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] Ittipon, L. and Satean, T. (2020). Design of PI Controller for Voltage Controller of Four-Phase Interleaved Boost Converter Using ParticleSwarm Optimization. Hindawi. Journal of Control Science and Engineering.
- [5] ศิศิโรจณ์ เกตุแก้ว (2555). การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงขนาดเล็ก แบบปรับค่าแรงดันได้. รายงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

แบบจำลองและจำลองสถานการณ์ระบบอิเล็กโทรไลซิสแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า กระแสน้ำสำหรับแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ

Modeling and Simulation of PEM Electrolysis System Powered by DC Power Supply Using Different Water Sources

ธนยศ คิตเมตตากุล¹ บุญยัง ปลั่งกลาง^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

*Corresponding author: Tel.: 02-5493433. E-mail address: boonyang.p@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper investigates the performance of a Proton Exchange Membrane (PEM) electrolysis system under fixed operational parameters (15V, 26A) using four different water sources: tap water (130 ppm TDS), deionized (DI) water, reverse osmosis (RO) water, and distilled water. A comprehensive model was developed to simulate hydrogen production rates, system efficiency, and long-term electrode degradation. The results demonstrated that water conductivity significantly impacted electrolysis performance, with the higher purity water sources improved energy efficiency and reduced electrode degradation. This research provides valuable insights for optimizing PEM electrolysis systems in both industrial and research applications.

Keywords: PEM Electrolysis, Hydrogen Production, Solar Power, Water Quality, Energy Efficiency

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบอิเล็กโทรไลซิสแบบ Proton Exchange Membrane (PEM) ภายใต้พารามิเตอร์การทำงานคงที่ (15V, 26A) โดยใช้แหล่งน้ำ 4 ประเภท ได้แก่ น้ำประปา (130 ppm TDS) น้ำปราศจากไอออน (DI) น้ำ RO และน้ำกลั่น การพัฒนาแบบจำลองที่ครอบคลุมเพื่อจำลองอัตราการผลิตไฮโดรเจน ประสิทธิภาพของระบบ และการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดในระยะยาว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการนำไฟฟ้าของน้ำส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการอิเล็กโทรไลซิส โดยแหล่งน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ดีขึ้นและการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดที่น้อยลง งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีค่าสำหรับการปรับปรุงระบบอิเล็กโทรไลซิส PEM ทั้งในการใช้งานด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย

คำสำคัญ: อิเล็กโทรไลซิส PEM, การผลิตไฮโดรเจน, พลังงานแสงอาทิตย์, คุณภาพน้ำ, ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและการตรวจสอบเชิงฮาร์ดแวร์ First-Order Equivalent Circuit Model of a Lithium-Ion Battery and Hardware Verification

ทัต ธานากิจ¹, ณัฐพนธ์ หาดอำน¹, อมรเทพ แมนสุข¹, กมลภัสสร มั่นศิลป์², วัชรากกร ปิ่นธุรรัตน์^{1*} และ บุญเรือง มะรังศรี³
That Thannakit¹, Nattapon Hadarn¹, Amonthep mansuk¹, Kamonpad Mansilp², Watcharakorn Pinthurat^{1*}
and Boonruang Marungsri²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี 22210

²สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี 22210

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

¹Department of Electrical Engineering, RMUTTO, Chanthaburi 22010

²Department of Integrated Engineering, RMUTTO, Chanthaburi 22010

²School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

Corresponding author: watcharakorn_pi@rmutto.ac.th

Abstract

This paper presents the simulation and hardware validation of a lithium-ion battery using a first-order equivalent circuit model developed in MATLAB/Simulink environment. The model incorporates open-circuit voltage, internal resistance, and a capacitor to represent both the battery's steady-state and transient behavior. A hardware testing setup, including a real lithium-ion battery, measuring devices, and electrical loads, was implemented to evaluate the model's accuracy. Experimental results closely align with real measurements of voltage, load current, and state of charge (SOC), with minor deviations due to physical factors and operating conditions, such as temperature and sensor devices. These findings confirm that the developed model can reliably represent the key behaviors of lithium-ion batteries and is suitable for applications in energy storage systems and power management strategies.

Keywords: Lithium-ion battery, mathematical modeling, equivalent circuit model, first-order circuit

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบด้วยฮาร์ดแวร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโดยใช้แบบจำลองสมมูลวงจรอันดับหนึ่ง ซึ่งพัฒนาโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุ เพื่ออธิบายพฤติกรรมการทำงานของแบตเตอรี่ทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะชั่วคราว จากนั้นผู้วิจัยได้สร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่จริง อุปกรณ์ตรวจวัด และโหลดทางไฟฟ้า เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทำงานกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับข้อมูลและการทำงานจริงของแบตเตอรี่ ทั้งในด้านแรงดันไฟฟ้า กระแสโหลด และสถานะประจุ แม้จะมีความแตกต่างเล็กน้อยอันเนื่องมาจากปัจจัยทางกายภาพและเงื่อนไขการทำงานในสภาวะการทำงานจริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับหนึ่งที่พัฒนาขึ้นสามารถสะท้อนพฤติกรรมหลักของแบตเตอรี่ได้อย่างแม่นยำและสามารถประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมระบบกักเก็บพลังงานและการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, แบบจำลองสมมูลวงจร, วงจรอันดับหนึ่ง

ผลกระทบของการให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อมในการผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ Effects of direct and indirect heating on biochar production from coffee husks

นิกราน หอมดวง^{1*}, ประภัศร รัตนไพบูลย์¹, พนธกร เหลี่ยมเคลือบ¹, สุภกิจ ชัยเมืองเลน², อธิวัฒน์ วงษาเทียม¹,
ขจรเกียรติ กันทะหล้า¹, สุระพล ริยะนา¹ และกิตติกร สาสุจิตต์¹
Nigran Homdoun^{1*}, Praphatsorn Rattanaphaiboon¹, Phontakorn Liam-Kloub¹, Supakit Chaimuanglen²,
Kajonkiat Kantala¹, Tirawat Wongsatiam¹, Surapon Riyana¹ and Kittikorn Sasujit¹

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สันทราย เชียงใหม่ 50290

² ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ เกาะคา ลำปาง 52130

¹ School of Renewable Energy, Maejo University, Sansai, Chiang Mai 50290

² Creative Industrial Material Research and Development Center, Kokha, Lampang 52130

¹Corresponding author: Tel.: 084-1773632. E-mail address: nigranghd@gmail.com

Abstract

The problem with biochar production arises when using stable, small-sized raw materials (such as rice husks and coffee husks) in a conventional biochar production kiln, which leads to low-quality biochar, high energy consumption, and long production times. However, to solve the problem of producing higher-quality charcoal through the biochar production process. This research aims to develop, modify, and present a direct-heating technique for a 200 L circulating-gas charcoal production kiln, compared with indirect heating. Indirect heating was achieved using a conventional circulating gas charcoal kiln, while direct heating was carried out through 1 set of heat-transfer channels or flue-gas flow channels. The heat input into the system uses heat from longan wood waste, combined with the pyrolysis gas remaining from the charcoal production process. The material to produce biochar was used coffee husks from coffee production and processing plants in Chiang Mai province. The experiment was conducted to assess the comparative effects of direct and indirect heating in a gas-circulation charcoal kiln. The study found that a direct heating system achieved higher energy efficiency in charcoal and wood vinegar production than an indirect heating system. Overall, the temperature inside the charcoal production kiln was 400-500 °C, the charcoal yield was 23.37%, and the maximum thermal efficiency of the charcoal production was 40.38%. The biochar production time was approximately seven hours. The produced biochar was black in color, suitable for use as a soil improver in agriculture.

Keywords: biomass, biochar, charcoal kiln, pyrolysis process, coffee husk

บทคัดย่อ

ปัญหาการผลิตถ่านชีวภาพเมื่อใช้วัตถุดิบที่มีรูปร่างเสถียรและมีขนาดเล็ก (เช่น แกลบข้าวและแกลบกาแฟ) กับการใช้เตาผลิตถ่านชีวภาพทั่วไปทำให้ได้ถ่านชีวภาพคุณภาพต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานสูง และเวลาในการผลิตยาวนาน อย่างไรก็ตาม เพื่อแก้ไขปัญหาคะบวนการผลิตถ่านชีวภาพให้ถ่านมีคุณภาพสูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์พัฒนา ดัดแปลงและนำเสนอ เทคนิคการให้ความร้อนทางตรงเทียบกับการให้ความร้อนทางอ้อมเมื่อใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนขนาด 200 L การให้

ความร้อนทางอ้อมคือการใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบดั้งเดิม ในขณะที่การให้ความร้อนทางตรงได้เพิ่มช่องถ่ายเทความร้อนหรือการไหลของแก๊สร้อนจำนวน 1 ชุด ความร้อนป้อนเข้าระบบใช้ความร้อนจากเศษไม้ลำไยร่วมกับไฟโรไลซิสแก๊สที่เหลือจากกระบวนการผลิตถ่าน วัสดุที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพใช้เกลือกาแฟจากโรงงานผลิตและแปรรูปกาแฟในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ การทดลองได้ดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนทางตรงและแบบทางอ้อมกับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน ผลการศึกษาพบว่าการใช้ระบบการให้ความร้อนทางตรงจะทำให้เตาผลิตถ่านมีประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าการให้ความร้อนทางอ้อมในด้านของผลผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ได้ ในภาพรวมอุณหภูมิภายในเตาผลิตถ่านจะอยู่ในช่วง 400-500°C ผลผลิตถ่านที่ได้ 23.37% และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเตาผลิตถ่าน 40.38% มีระยะเวลาการผลิตถ่านชีวภาพสูงสุดประมาณ 7 h ถ่านชีวภาพที่ได้มีลักษณะสีดำสนิท เหมาะสมสำหรับการนำไปเป็นตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อการเกษตรได้

คำสำคัญ: ชีวมวล ถ่านชีวภาพ เตาผลิตถ่าน กระบวนการไพโรไลซิส เกลือกกาแฟ

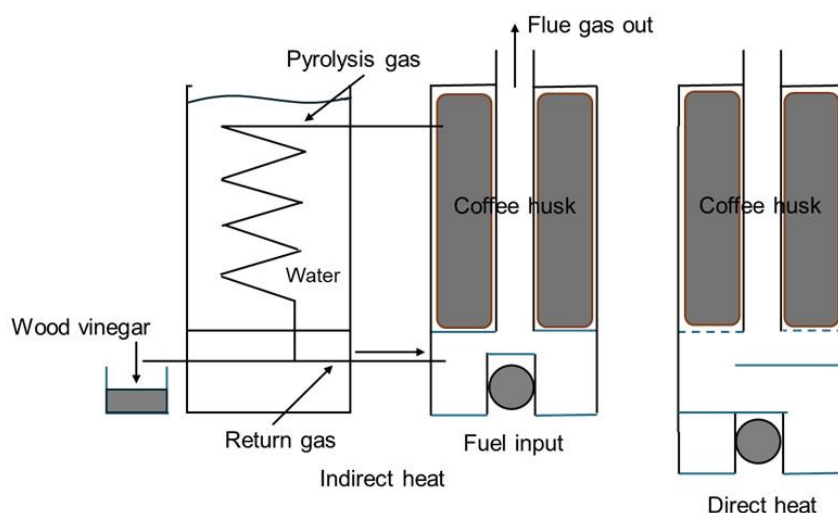
บทนำ

เตาผลิตถ่านขนาด 200 ลิตร ในปัจจุบันมีการออกแบบและพัฒนาให้มีสมรรถนะเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับเตาผลิตถ่าน แบบ 200 ลิตร แบบดั้งเดิม ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน จากการวิเคราะห์เตาผลิตถ่านที่มีอยู่มีการพัฒนาสมรรถนะเพิ่มขึ้นทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ระบบการปล่อยควันหรือแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตถ่าน การนำเอาแก๊สหลังจากการควบแน่นน้ำส้มควันไม้มาดำเนินการเผาไหม้ซ้ำ และการออกแบบห้องปฏิกริยาไพโรไลซิสเพื่อไม่ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนโดยตรง [1] การพัฒนาระบบการปล่อยควันหรือแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตถ่านมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณควันหรือแก๊สที่ปล่อยออกเตาผลิตถ่าน การพัฒนานี้มุ่งหวังเปลี่ยนควันหรือแก๊สที่ได้จากการผลิตถ่านให้เป็นของเหลวแทน ซึ่งก็คือ น้ำส้มควันไม้ ในส่วนของการนำเอาแก๊สหลังจากกระบวนการควบแน่นมาเผาไหม้ซ้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการกำจัดควันที่เกิดจากการผลิตถ่านทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการไปใช้ในชุมชนที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อได้รับความร้อนและออกซิเจนจะทำให้ลุกไหม้ได้และถ้านำความร้อนนี้มาใช้ประโยชน์ จะเป็นการนำเอาความร้อนทั้งหมดมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง ในด้านการออกแบบห้องเผาไหม้ที่ไม่ต้องการให้เปลวไฟหรือความร้อนที่บั่นทอนสัมผัสกับชีวมวลผลิตถ่านได้โดยตรง การออกแบบลักษณะนี้มุ่งเน้นต้องการให้สารระเหยของชีวมวลที่ปล่อยออกมาคุณสมบัติเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงและสามารถเผาไหม้ได้ [2] เมื่อเทียบกับโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชิงช้าหวัด เศษไม้ หรือกลุ่มเปลือกผลไม้ เป็นต้น เตาผลิตถ่านชนิดนี้สามารถดำเนินการกระบวนการไพโรไลซิสได้อย่างไม่มีปัญหาแต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำเตาผลิตถ่านชนิดนี้ไปทดลองใช้กับชีวมวลประเภท แกลบ ชี้เลี้ยง แกลบกากาแฟหรือวัสดุที่กองแล้วไม่มีช่องอากาศไหลผ่านได้หรือไหลผ่านยาก เตาผลิตถ่านชนิดนี้จะไม่สามารถทำงานหรือผลิตถ่านออกมาได้ กล่าวคืออุณหภูมิภายในเตาจะขึ้นช้ามาก และอุณหภูมิไพโรไลซิสในภาพรวมจะต่ำกว่าอุณหภูมิการผลิตถ่านทั่วไปซึ่งควรอยู่ในช่วง 400-500°C ผลที่ได้ชีวมวลจะไม่สามารถผลิตเป็นถ่านได้ทั้งหมด ที่สำคัญคุณภาพของถ่านต่ำและใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในการให้ความร้อนสูงมาก เพื่อเป็นการทำให้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนสามารถผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุกลุ่มนี้ได้ จึงจำเป็นต้องดัดแปลงระบบการให้ความร้อนเป็นแบบทางตรงเพิ่มรวมกับการให้ความร้อนแบบทางอ้อมของเตาชนิดเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยมีการดัดแปลงเพิ่มเติมในส่วนของห้องเพิ่มความร้อนที่อยู่ด้านใต้ของเตาผลิตถ่าน เพื่อเป็นการยืนยันผลการดัดแปลง พัฒนา เตาผลิตถ่านให้มีสมรรถนะเพิ่มสูงขึ้นและทำงานได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการแสดงผลการประเมินสมรรถนะเตาผลิตถ่านชีวภาพแบบแก๊สไหลเวียนที่ดัดแปลงระบบการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตถ่านเป็นการให้ความร้อนทางตรง เทียบกับเตาผลิตถ่านชีวภาพแบบแก๊สไหลเวียนดั้งเดิม (ใช้ระบบการให้ความร้อนทางอ้อม) ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจะเป็นประโยชน์และเป็นทางเลือกสำคัญสำหรับเกษตรกรและผู้สนใจทั่วไป ในการตัดสินใจเลือกนำเอาเตาผลิตถ่านนี้ไปใช้ให้เหมาะกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นตัวเองในอนาคต

วิธีการวิจัย

เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนและการดัดแปลง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนกับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบให้ความร้อนทางอ้อม (Indirect heat) และทางตรง (Direct heat) เตาผลิตถ่านชนิดให้ความร้อนทางอ้อมคือเตาที่ให้ความร้อนจากการเผาเชื้อเพลิงเชื้อมวลผ่านผนังทั้งหมด 2 ด้าน คือจากผนังปล่องไฟหรือไอเสียกับผนังด้านพื้นของเตาผลิตถ่าน ความร้อนจากเปลวไปชีวมวลจะไม่สามารถสัมผัสกับชีวมวลที่ผลิตถ่านได้โดยตรงแต่ความร้อนจะถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแผ่นโลหะแล้วไปหาชีวมวลแทน ภาพที่ 1 ประกอบ ส่วนเตาผลิตถ่านที่ให้ความร้อนทางตรงจะมีการเจาะรูให้แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไหลผ่านผนังรูเตาด้านล่างและให้ความร้อนจากแก๊สร้อนถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวลได้โดยตรง ขณะที่เปลวไฟจะไม่สัมผัสกับชีวมวลเนื่องจากมีการทำห้องกันไฟล้นประมาณ 2 ชั้น ในภาพรวมส่วนประกอบของเตาผลิตถ่านประกอบด้วย ห้องปฏิกริยาไพโรไลซิส ชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้และห้องเผาไหม้ชีวมวลเพื่อป้อนความร้อนเข้าระบบ ตรงกลางห้องเผาไหม้จะมีการติดตั้งปล่องไฟหรือแก๊สร้อนอยู่ตรงกลางเพื่อระบายควัน ที่ชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้จะทำต่อแยกเป็น 2 ทาง ด้านหนึ่งเป็นท่อปล่อยน้ำส้มควันไม้ออกจากเตาผลิตถ่านและอีกด้านจะนำมาต่อร่วมเข้าห้องเผาไหม้ชีวมวลเพื่อนำแก๊สที่เหลือจากกระบวนการผลิตถ่านมาเผาไหม้ซ้ำอีกครั้ง



ภาพที่ 1 เตาผลิตถ่านชีวภาพแบบแก๊สไหลเวียนที่นำมาทดสอบและดัดแปลง

กระบวนการไพโรไลซิสและหลักการการทำงานของเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน

หลักการทำงานของเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนใช้กระบวนการคาร์บอนเซชันหรือกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าในการผลิตถ่าน โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าคือกระบวนการให้ความร้อนกับชีวมวลในสภาวะปราศจากออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนเพียงเล็กน้อยหรือบางส่วนเท่านั้น กระบวนการผลิตถ่านเริ่มต้นด้วยการที่ชีวมวลรับความร้อนเข้าสู่ตัวเอง ความร้อนนี้จะเข้าไปทำให้ความชื้นหรือน้ำที่อยู่ในชีวมวลระเหยออก โดยน้ำจะระเหยได้และถูกขับออกจากชีวมวล อุณหภูมิในเตาผลิตถ่านหรือห้องไพโรไลซิสต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงเกิน 100°C สารระเหยที่บางตัวที่อยู่ในเนื้อชีวมวลจะเริ่มสลายตัวและถูกขับออกมาภายนอกชีวมวล มวลของชีวมวลจะเริ่มลดลงและสูญเสียรูปร่าง [4] ที่อุณหภูมิ 150°C ส่วนประกอบของชีวมวลกลุ่มลิกโนเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัว โดยที่อุณหภูมิ 200-300°C จะเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และที่อุณหภูมิ 250-380°C จะเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส กลุ่มลิกนินเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมีช่วงการสลายตัวที่กว้างที่สุด โดยการสลายตัวจะเริ่มเกิดขึ้นที่ 200-1000°C [4] ช่วงของการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสไปจนถึงลิกนิน ชีวมวลจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลเป็นสีดำสนิท การใช้งานเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนจะเริ่มต้นด้วยการใช้เชื้อเพลิงไม้ลำไยเผาให้ความร้อนทางด้านล่างของเตา ความร้อนจากไม้ลำไยจะถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวลที่อยู่ในห้องไพโรไลซิส ความชื้นและสารระเหยของชีวมวลจะไหลออกจากชีวมวลและลำเลียงเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ

ร้อนในรูปแบบของไอหรือแก๊ส เมื่อผ่านเครื่องควบแน่นไอหรือแก๊สจะควบแน่นเป็นน้ำและน้ำส้มควันไม้ ในขณะที่แก๊สไม่ควบแน่นได้จะถูกกลั่นเป็นไพโรไลซิสแก๊สและถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงหรือเผาไหม้ร่วมกับไม้ลำไยที่เผา

การเตรียมแกลบกาแฟและเชื้อเพลิงชีวมวลป้อนให้ความร้อน

แกลบกาแฟที่นำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ เป็นแกลบกาแฟที่ได้มาจากโรงงานบริษัทกาแฟชาวไทยภูเขา จำกัด ตั้งอยู่ อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ภายใต้กิจกรรมพัฒนาระบบการผลิตและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านชีวภาพ ภายใต้โครงการยกระดับธุรกิจ SME ด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลเศรษฐกิจใหม่ BCG ประจำปีงบประมาณ 2568 ของศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ จังหวัดลำปาง ลักษณะของกาแฟจะมีลักษณะเป็น ฟอยบางๆ สีน้ำตาล มีความหนาแน่นปรากฏเฉลี่ย 218 kg/m^3 มีค่าความร้อนเฉลี่ย 15.95 MJ/kg ในส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ป้อนให้ความร้อนเป็นเศษไม้ลำไยที่ได้จากการตัดแต่งกิ่งของเกษตรกร มีการตัดและตากทิ้งทิ้งไว้ประมาณ 1 เดือน มีความหนาแน่นเฉลี่ย 635 kg/m^3 มีความค่าความร้อนเฉลี่ย 15.80 MJ/kg ในการผลิตถ่านชีวภาพแต่ละครั้งจะใช้แกลบกาแฟเฉลี่ย 22.70 kg/ครั้ง และเศษไม้เพื่อเผาให้ความร้อนเฉลี่ย $50\text{--}80 \text{ kg}$

เครื่องมือวัดและการวิเคราะห์ข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักของเศษไม้ น้ำหนักถ่าน และเครื่องวัดอุณหภูมิการผลิตถ่าน การวัดน้ำหนักเศษไม้และถ่านชีวภาพที่ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลของ CST รุ่น CDR-30 ซึ่งน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg ค่าความละเอียด 1 g ในส่วนเครื่องวัดอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการผลิตถ่านได้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิของ Lutron รุ่น BTM-4208SD ช่วงการวัดอุณหภูมิ -100 ถึง 1300°C มีค่าความละเอียด 0.1°C ใช้หัววัดอุณหภูมิ Type K มีการจัดวางหัววัดตามตำแหน่งแนวตั้งเตาผลิตถ่าน การวิเคราะห์ค่าความร้อนชีวมวลและถ่าน วิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 สุดท้ายดำเนินการวิเคราะห์ผลผลิตถ่านที่ได้ (Charcoal yield: CY) ความหนาแน่นทางเชิงพลังงาน (Energy density: ED) ผลผลิตพลังงานที่ได้ (Energy yield: EY) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency: η_{th}) ดังสมการต่อไปนี้ [1]

$$CY = \frac{m_C}{m_R} \times 100 \quad (1)$$

$$ED = \frac{CV_C}{CV_R} \quad (2)$$

$$EY = CY \times ED \quad (3)$$

$$E_C = m_C \times CV_C \quad (4)$$

$$E_R = m_R \times CV_R \quad (5)$$

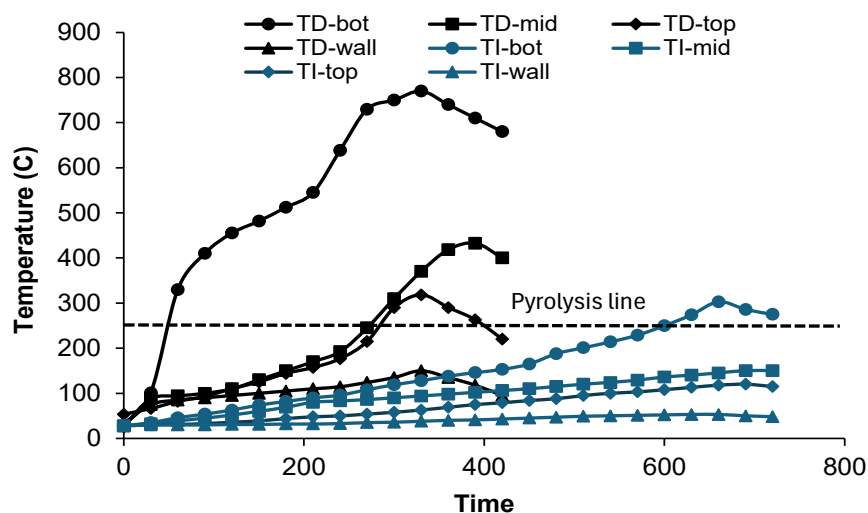
$$\eta_{th} = \frac{E_C}{E_R} \times 100 \quad (6)$$

กำหนด m_C, m_R คือมวลของถ่านที่ผลิตได้ (kg) และมวลของเศษไม้ที่นำมาผลิตถ่าน (kg) CV_C, CV_R ค่าความร้อนของถ่านที่ผลิตได้ (MJ/kg) และค่าความร้อนของเศษไม้ที่นำมาผลิตถ่าน (MJ/kg) E_C คือค่าพลังงานของถ่านที่ผลิตได้ (MJ) และ E_R ค่าพลังงานของเศษไม้ที่นำมาผลิตถ่าน (MJ)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการให้ความร้อนทางอ้อมและทางตรงต่ออุณหภูมิเตา

ภาพที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบการให้ความร้อนทางอ้อมและทางตรงให้กับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนเมื่อใช้แกลบกาแฟผลิตเป็นถ่านชีวภาพ การให้ความร้อนทางอ้อมโดยการถ่ายเทความร้อนจากผนังปล่องและพื้นที่ของเตาอย่างเดียวจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาผลิตถ่านเพิ่มสูงขึ้นค่อนข้างช้า โดยอุณหภูมิเฉลี่ยเตาที่จะทำให้ลิกโนเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวที่ 150°C เตาผลิตถ่านใช้เวลาสร้างอุณหภูมิสูงถึง 90 h สาเหตุที่อุณหภูมิของเตาผลิตถ่านเพิ่มขึ้นได้ช้าเนื่องจากแกลบกาแฟเมื่อบรรจุอยู่ในห้องปฏิริยาไพโรไลซิสมีช่องว่างหรือช่องอากาศที่ต่ำเมื่อเทียบกับการใช้ไม้ฟืนหรือวัสดุอื่นที่มีรูปร่างไม่เสถียร ด้วยรูปร่างของวัสดุที่มีความเสถียรและมีช่องว่างต่ำทำให้วัสดุก้อนนั้นมีลักษณะคล้ายเป็นฉนวนความร้อนจากจุดศูนย์กลางเตาหรือบริเวณปล่องไม่สามารถถ่ายเทแพร่กระจายไปยังด้านข้างได้หรือถ้าได้ก็ค่อนข้างต่ำมาก [5] ดังนั้นจึงทำให้ระยะเวลาการคายน้ำหรือไล่ความชื้นในภาพรวมทำได้ช้ามาก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนทางตรงคือการนำเอาความร้อนจากการเผาไหม้หรือแก๊สร้อนป้อนเข้าสู่เตาผลิตถ่านโดยตรงทางด้านล่างด้วยอุณหภูมิของแก๊สร้อนที่สูงร่วมกับความร้อนของผนังปล่องจะทำให้ประสิทธิภาพการไล่ความชื้นในแกลบกาแฟดีกว่าการใช้ความร้อนทางอ้อม อุณหภูมิการให้ความร้อนทางตรงที่สามารถทำให้ลิกโนเซลลูโลสเริ่มต้นสลายตัวที่ 150°C เตาผลิตถ่านใช้เวลาสร้างอุณหภูมิประมาณ 1 h



ภาพที่ 2 การวิเคราะห์อุณหภูมิเตาผลิตถ่านชีวภาพแบบให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อม

การเปรียบเทียบระยะเวลาและผลผลิตถ่านชีวภาพที่ได้

การประเมินด้านมิติของเวลาในการผลิตถ่านชีวภาพ ชัดเจนแล้วว่าการใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบธรรมดาที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงเพิ่มหรือการให้ความร้อนแบบทางอ้อมจะใช้ระยะเวลาในการผลิตถ่านสูงถึง 12 h หรือมากกว่านั้น ในขณะที่การใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนที่ทำการดัดแปลงห้องส่งถ่ายความร้อนทางตรงหรือการให้ความร้อนทางตรงจะใช้เวลาในการผลิตถ่านรวมไม่เกิน 7 h เท่านั้น การลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตถ่านลงจะช่วยลดต้นทุนด้านวัสดุที่ใช้เป็นแหล่งป้อนความร้อนและแรงงานได้ [6] ซึ่งต้นทุนทางด้านแรงงานเป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมต้นทุนการผลิตถ่านและในส่วนของคุณลักษณะผลผลิตถ่านชีวภาพที่ได้ การใช้เตาผลิตถ่านที่ให้ความร้อนแบบทางอ้อมจะได้ถ่านชีวภาพที่บางส่วนยังไม่แปรสภาพเป็นถ่านชีวภาพได้ทั้งหมด (ภาพซ้ายมือ) ในขณะที่ภาพขวามือ ลักษณะถ่านที่ได้จะมีสีดำสนิทและมีความเป็นคาร์บอนสูงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ปรับปรุงดิน



(Indirect heat)



(Direct heat)

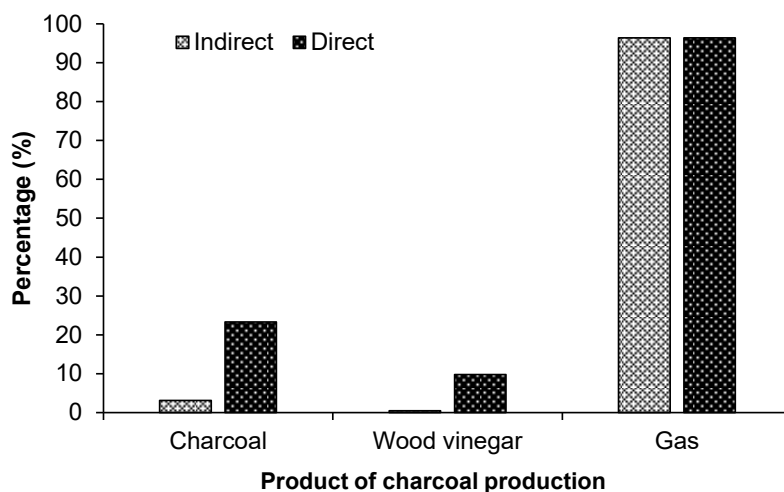
ภาพที่ 3 ลักษณะของถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟที่ได้จากการให้ความร้อนทางอ้อมและทางตรง

การวิเคราะห์สัดส่วนผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ภาพที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบสัดส่วนผลผลิตที่ได้จากเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบการให้ความร้อนทางอ้อมและแบบดัดแปลงการให้ความร้อนทางตรง โดยพบว่าการให้ความร้อนทางตรงจะให้ผลผลิตถ่านชีวภาพคิดเป็น 23.37% ได้ผลผลิตในส่วนของเหลว (น้ำส้มควันไม้) 9.80% แก๊สที่เหลือทั้งหมดจะเป็นแก๊สที่ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ให้ความร้อนร่วมกับไม้ลำไย เมื่อพิจารณาในส่วนของการใช้ความร้อนทางอ้อมได้ผลผลิตถ่านคิดเป็น 3.11% ได้ของเหลวหรือน้ำส้มควันไม้ประมาณ 0.50% และแก๊สที่เหลือประมาณ 96.40% ถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ให้ความร้อนทั้งหมด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงผลผลิตที่จำเป็นต้องได้คือ ถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ ก็พบว่าในส่วนของเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนที่ให้ความร้อนทางตรงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเตาทั้งหมด 2 ส่วน คือ ในส่วนของตัวเตาผลิตถ่านและระบบควบแน่นของเหลว โดยในส่วนของตัวเตาผลิตถ่านจำเป็นต้องสร้างกลไกที่ทำให้แกลบกาแฟเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้เกิดการสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] และระยะเวลาการผลิตจะสั้นลง ในส่วนของระบบควบแน่นจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพการควบแน่นให้สูงขึ้นกว่าเดิม เช่น การใช้ระบบน้ำไหลวนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน [8] เป็นต้น

การวิเคราะห์ศักยภาพทางพลังงานเตาผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ศักยภาพทางพลังงานของการใช้เตาผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ เนื่องจากแกลบกาแฟมีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบาเมื่อบรรจุลงถังขนาดปริมาตร 200 L จะมีมวลแกลบกาแฟอยู่ในเตาประมาณ 22.70 kg ในการศึกษาเปรียบเทียบการให้ความร้อนทางตรงได้ผลผลิตถ่านชีวภาพ (Charcoal yield) เฉลี่ย 5.31 kg ในขณะที่ การให้ความร้อนทางอ้อมได้ผลผลิตถ่านชีวภาพเฉลี่ย 0.71 kg คิดเป็นผลผลิตถ่านที่ได้เฉลี่ย 23.37% และ 3.11% ในส่วนของความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy density) หรืออัตราส่วนค่าความร้อนถ่านที่ผลิตได้ต่อค่าความร้อนของชีวมวลก่อนการผลิตถ่าน การให้ความร้อนทางตรงให้ความหนาแน่นทางพลังงานเฉลี่ย 1.73 ในขณะที่ การให้ความร้อนทางอ้อมให้ความหนาแน่นทางพลังงานเฉลี่ย 1.49 และเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ของการให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อมจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 40.38% และ 4.63% ตามลำดับ



ภาพที่ 4 สัดส่วนผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ศักยภาพทางพลังงานของการใช้เตาผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ

Output	Direct	Indirect
Mass of biomass (kg)	22.70	22.70
Charcoal yield (kg)	5.31	0.71
Charcoal yield (%)	23.37	3.11
Energy density	1.73	1.49
Energy yield (%)	40.38	4.63
Energy input (MJ)	362	362
Energy output (MJ)	146	17
Thermal efficiency (%)	40.38	4.63

สรุปผลการวิจัย

ในภาพรวมของการผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟจำเป็นต้องใช้หลักการให้ความร้อนทางตรงกับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน ซึ่งผลจากการดัดแปลงเตาผลิตถ่านและการทดสอบการให้ความร้อนทางตรงสามารถลดระยะเวลาการผลิตถ่านลงได้มากกว่า 40% ที่สำคัญการให้ความร้อนโดยตรงทำได้ผลผลิตถ่านชีวภาพ ความหนาแน่นทางพลังงาน และประสิทธิภาพทางความร้อนโดยรวมสูงกว่าการให้ความร้อนทางอ้อมหรือการใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบดั้งเดิมมากกว่า 7.7 เท่า ในด้านคุณภาพของถ่านเมื่อมองจากลักษณะของสีถ่านชีวภาพด้วยการให้ความร้อนทางตรงพบว่าสีดีมีสีน้ำตาลไหม้ไม่มีแกลบกาแฟในส่วนที่เป็นชีวมวลหลงเหลืออยู่เลย อย่างไรก็ตามเพื่อให้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบใช้ความร้อนทางตรงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นก็จำเป็นต้องทำให้แกลบกาแฟมีการขยับหรือเคลื่อนตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในส่วนของการเก็บน้ำส้มควันไม้ก็จำเป็นต้องยิ่งในการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนและใช้น้ำเย็นหรือน้ำอุณหภูมิต่ำไหลวนเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ จังหวัดลำปาง ที่สนับสนุนงบประมาณการดำเนินโครงการกิจกรรมพัฒนากระบวนการผลิตและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านชีวภาพ ภายใต้โครงการยกระดับธุรกิจ SME ด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลเศรษฐกิจใหม่ BCG ประจำปีงบประมาณ 2568 และได้มาซึ่งผลการศึกษาวิจัย

ในบทความนี้ ขอขอบคุณ บริษัทกาแฟชาวไทยภูเขา จำกัด (ฮิลล์คอฟฟี่) สนับสนุนเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน (ดั้งเดิม) และวัสดุเกลบกกาแฟ เพื่อการทดสอบ ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทนที่สนับสนุนเครื่องมือและพื้นที่การทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณิต มานะธูระ และอุกฤษ สมัครสมาน. (2022). สมรรถนะของเตาไพโรไลซิสกะลามะพร้าวชนิดให้ความร้อนด้วยตนเอง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. 11(2), 13-20.
- [2] Kryshtopa, S., Kryshtopa, L., Panchuk, M., Smigins, R., and Dolishnii, B. (2021). Composition and energy value research of pyrolysis gases. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. 628, 012008, 1-11.
- [3] นิกราน หอมดวง พันธวัฒน์ ไชยวรรณ ภูนิทัต สายแก้ว ประภัสสร รัตนไพบูลย์ กิตติกร สาสุจิตต์ เสริมสุข บัวเจริญ นงเยาว์ หอมดวง ยิ่งรัก อรรถเวชกุล และ ชูรัตน์ ธารรัตน์. (2020). การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสำหรับการใช้งานผลิตความร้อนและถ่านชีวภาพ. **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน**. 4(1), 47-53.
- [4] Diez, D., Urueña, A., Piñero, R., Barrio, A., and Tamminen, T. (2020). Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). **Processes**, 8(9), 1048, 1-21.
- [5] Raeisian, L., Mansoori, Z., Hosseini-Abardeh, R., and Bagherzadeh, R. (2013). An investigation into the structural parameters of needle-punched nonwoven fabrics on their thermal insulation property. **Fibers and Polymers**, 14(10), 1748-1753.
- [6] อาคม ปะหลามานิต พิสิฐ ทรงเลิศ ภคินี ธงไชย รวิสุตา แดงเปีย และสุเมธ ไชยประพัทธ์. (2020). ชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 28(6), 1107-1125.
- [7] Panwar, N. L. (2024). Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: a review. **Clean Energy**, 8(4), 61-78.
- [8] Than, P., and Suluksna, K. (2019). Experiment on the Influence of Parameters on the Wood Vinegar Burning Process. In **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 501, 012066, 1-20.

ผลของอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์และค่าดีกรีความร้อนยวดยิ่ง ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง ผ่านปั๊มความร้อนคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดทรานส์คริติคัล

EFFECT OF EVAPORATOR TEMPERATURE AND ITS DEGREE OF SUPERHEAT ON HIGH TEMPERATURE HOT WATER PRODUCTION VIA A TRANSCRITICAL CO₂ HEAT PUMP

อรรถกร อาสนคำ¹ ธรรณิศา ดีทยา¹ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์^{1*}
Attakorn Asanakham¹ Thoranis Deethayat¹ and Tanongkiat kiatsiriroat¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

¹Corresponding author: Tel.: 08-19508630. E-mail address: tanongkiat_k@yahoo.com

Abstract

This study investigates the effects of evaporator temperature and superheating on the hot-water outlet temperature of a transcritical carbon dioxide heat pump, focusing on operating conditions above 70 °C. Two system configurations were examined: a standard cycle and a modified cycle incorporating internal heat exchange between the refrigerant exiting the gas cooler and that leaving the evaporator. For the standard cycle, results showed that reducing the evaporator temperature from 25 °C to 15 °C, while keeping the gas cooler pressure at 140 bar, increased the hot water temperature from 70 °C to 80 °C. However, the irreversibility of the gas cooler heat exchange rose from 0.16 to 0.21, reducing the coefficient of performance (COP) from 6.09 to 4.86. In the cycle with internal heat exchange, at a constant evaporator temperature of 15 °C and a gas pressure of 130 bar, increasing the degree of superheating from 5 °C to 10 °C raised the hot water temperature from 85 °C to 90 °C. The irreversibility in the gas cooler heat exchange increased only slightly, while the COP decreased marginally.

Keyword: Transcritical carbon dioxide heat pump, High temperature hot water production, Evaporator temperature, Degree superheat

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาผลของอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ และค่าดีกรีความร้อนยวดยิ่งของปั๊มความร้อนคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดทรานส์คริติคัล ที่มีต่ออุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 70 °C ขึ้นไป ในการศึกษาจะพิจารณาในกรณีของปั๊มความร้อนที่ใช้วัฏจักรมาตรฐาน และเมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงานที่ออกจากตัวระบายความร้อน และสารทำงานที่ออกจากไอวาปอเรเตอร์ ในกรณีวัฏจักรมาตรฐาน พบว่า เมื่อลดอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์จาก 25 °C เป็น 15 °C โดยความดันของตัวระบายความร้อนเท่ากันที่ 140 bar ปั๊มความร้อนมีศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 70 °C เป็น 80 °C แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ตัวระบายความร้อน ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นจาก 0.16 เป็น 0.21 ส่งผลต่อค่า COP ของวัฏจักรที่จะมีค่าลดลงจาก 6.09 เป็น 4.86 สำหรับปั๊มความร้อนที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน ที่อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์คงที่ที่ 15 °C โดยความดันตัวระบายความร้อนเท่ากันที่ 130 bar แต่มีดีกรีความร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 10 °C พบว่า มีศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 85 °C เป็น 90 °C โดยค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ตัวระบายความร้อน เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และ COP ของวัฏจักรลดลงเล็กน้อย

คำสำคัญ: ปั๊มความร้อนคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดทรานส์คริติคัล, การผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง, อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์, ดีกรีความร้อนยวดยิ่ง

1. บทนำ

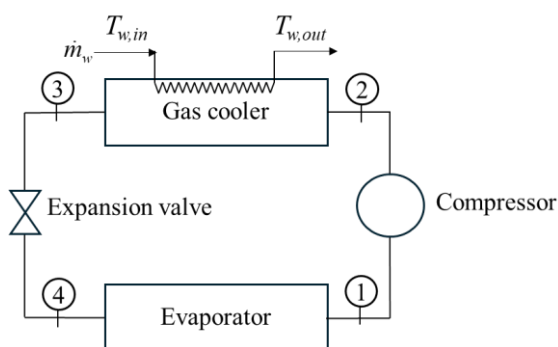
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 หรือ R744) เป็นสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤติ ประมาณ 31°C จึงได้ถูกนำไปใช้ในการทำความเย็น หรือใช้ในระบบทำความร้อน ในลักษณะทรานส์คริติคัล (Transcritical) [1] โดยอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ที่รับความร้อน จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ และในช่วงการระบายความร้อนจะอยู่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ โดยทั่วไปความดันด้านสูงจะอยู่ 100-150 bar ซึ่งสูงกว่าสารทำงานทั่วไปหลายเท่า ทำให้อุปกรณ์มีราคาสูง แต่มีข้อดี คือ สารทำงานเป็นสารธรรมชาติ ซึ่งมีผลในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential, GWP) เพียง 1 เทียบกับสารทำความเย็นสังเคราะห์ทั่วไป นอกจากนี้ ในการระบายความร้อนในตัวระบายความร้อน (Gas cooler) จะมีอุณหภูมิไม่คงที่และไล่ตามอุณหภูมิของไหลที่มารับความร้อน ทำให้ค่าสภาวะย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility) มีค่าต่ำกว่า สารทำงานทั่วไปที่อยู่ในสภาวะ 2 สถานะ [2, 3] ทำให้สามารถผลิตน้ำร้อนจากอุณหภูมิต่ำให้มีค่าสูงมากได้ทันที โดยไม่ต้องเสียเวลาสะสมพลังงาน (Once-through) [3] ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูง มักจะเกิน 70°C อาจขึ้นไปถึง 150°C [3] White et al (2002) [4] แสดงให้เห็นว่า ระบบทำความร้อน CO_2 สามารถผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 65°C ไปจนถึง 120°C โดยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) ในการผลิตน้ำร้อนลดลง เพียง 21%

อย่างก็ตาม ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง ถ้าลดอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ของระบบทำความร้อน CO_2 ชนิดทรานส์คริติคัล โดยที่ความดันสูงในตัวระบายความร้อนมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง พบว่า มีศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ ขณะเดียวกันถ้ามีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน (Internal heat exchanger) แลกเปลี่ยนความร้อนสารทำงานที่ออกจากตัวระบายความร้อน และสารทำงานก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ จะช่วยเพิ่มค่าดีกรีความร้อนยวดยิ่ง (Degree of superheat) ของสารทำงานก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ก็จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ให้มีค่าสูงขึ้นได้อีก โดยวิธีหลังเป็นวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากค่าอัตราส่วนความดัน (Pressure ratio) ที่คอมเพรสเซอร์มีค่าต่ำกว่าวิธีแรก ซึ่งจะช่วยลดกำลังงานที่ให้แก่ปั๊มความร้อน ซึ่งผลของอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์และค่าดีกรีความร้อนยวดยิ่งที่ความดันไอวาปอเรเตอร์ ที่มีต่อค่าอุณหภูมิในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง จะเป็นวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้

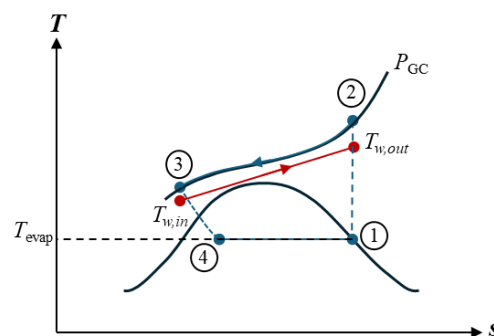
2. สมรรถนะปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง

2.1 ปั๊มความร้อนมาตรฐาน

ปั๊มความร้อน CO_2 แบบทรานส์คริติคัล สามารถผลิตน้ำร้อนจากน้ำที่อุณหภูมิห้องให้มีอุณหภูมิมากกว่า 70°C ในลักษณะ Once-through เนื่องจากผลของ Gliding temperature ในชุดระบายความร้อน ซึ่งสารทำงานอยู่ในสภาวะเหนือวิกฤติ รูปที่ 1 แสดงวัฏจักรมาตรฐานของปั๊มความร้อน CO_2 แบบทรานส์คริติคัล ในการผลิตน้ำร้อน



(ก) วัฏจักรการทำงาน



(ข) ไดอะแกรม T-s

รูปที่ 1 วัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนมาตรฐาน และไดอะแกรม T-s ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง

ในกรณีที่กำหนดอัตราการไหลและอุณหภูมิน้ำร้อนที่ต้องการจากอุณหภูมิน้ำที่ให้แก่ระบบ อัตราน้ำร้อนที่ต้องการที่ชุดระบายความร้อน จะคำนวณจาก

$$\dot{Q}_{GC} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (1)$$

เมื่อ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการไหลของน้ำ, $c_{p,w}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, $T_{w,in}$ และ $T_{w,out}$ คือ อุณหภูมิของน้ำเข้าและออก ตัวระบายความร้อน

ในการเลือกช่วงการทำงานของปั๊มความร้อน จะต้องกำหนดอุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์ ซึ่งที่สภาวะ 1 จะเป็นสภาวะอิ่มตัว ซึ่งจะถูกคอมเพรสเซอร์อัดตัวแบบไอเซนทรอปิกไปที่สภาวะที่ 2 ตามความดันของชุดระบายความร้อน, P_{GC} ซึ่งอุณหภูมิจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ต้องการ จากนั้นสารทำงานจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำโดยความดันคงที่มาที่สภาวะที่ 3 ซึ่งจะต้องมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิน้ำที่เข้าอุปกรณ์ ซึ่งในการเลือกค่าความดันของสารทำงานจะต้องให้มีค่าอุณหภูมิพินช์ (Pinch) ระหว่างอุณหภูมิของ CO_2 และอุณหภูมิน้ำร้อน มีค่าพอสมควร ซึ่งในงานนี้จะใช้ประมาณ $5^\circ C$ สารทำงานจากสภาวะที่ 3 จะขยายตัวผ่านวาล์วลดความดัน มายังสภาวะ 4 ที่ความดันอีวาपोเรเตอร์ ซึ่งจะรับความร้อนมาที่สภาวะ 1 เพื่อเริ่มวัฏจักรใหม่

ค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility) ในการแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นดัชนีตัวหนึ่ง ที่แสดงสมรรถนะของอุปกรณ์ สามารถคำนวณจาก

$$\dot{I}_{GC} = \dot{m}_R [(h_2 - h_3) - T_o (s_2 - s_3)] + \dot{m}_w c_{p,w} \left[(T_{w,in} - T_{w,out}) - T_o \ln \left(\frac{T_{w,in} + 273.15}{T_{w,out} + 273.15} \right) \right] \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{I}_{GC}$ คือ ค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ของตัวระบายความร้อน, h_2 และ h_3 คือ ค่าเอนทัลปีขาเข้าและออกของตัวระบายความร้อน, T_o คือ อุณหภูมิที่ Dead state, s_2 และ s_3 คือ ค่าเอนโทรปีขาเข้าและออกของตัวระบายความร้อน, $\dot{m}_R$ คือ อัตราการไหลของสารทำงาน ซึ่งคำนวณจาก

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{Q}_{GC}}{h_2 - h_3} \quad (3)$$

ถ้าค่า $\dot{I}_{GC}$ มีค่าสูง แสดงว่าคุณภาพพลังงานในการแลกเปลี่ยนความร้อน จะถูกทำลายมาก ตามความแตกต่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสารทำงานที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้มีการใช้กำลังงานในวัฏจักรเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ COP จะเป็นดัชนีที่ใช้วัดสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อน โดย

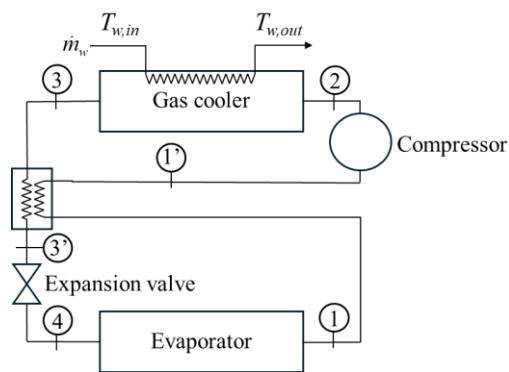
$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

เมื่อ h_1 และ h_2 คือ ค่าเอนทัลปีขาเข้าและออกของคอมเพรสเซอร์

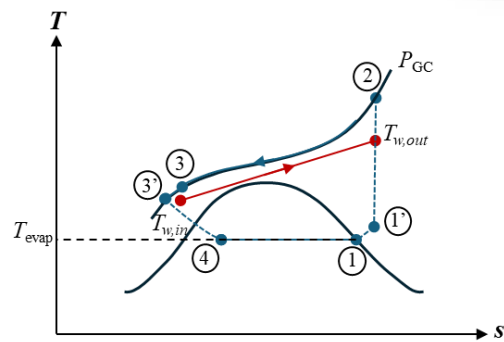
วัฏจักรที่ใช้ COP มีค่าสูง แสดงถึงสมรรถนะการทำงานที่มีการใช้กำลังงานที่ต่ำ เมื่อมีการผลิตอัตราความร้อนเท่ากัน

2.2 ปั๊มความร้อนที่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน

ในการเพิ่มสมรรถนะของปั๊มความร้อน โดยทั่วไปมักจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) วัฏจักรการทำงาน



(ข) ไดอะแกรม T-s

รูปที่ 2 วัฏจักรการทำงานปั๊มความร้อนมาตรฐานที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในและไดอะแกรม T-s ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง

จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานที่ออกจากชุดทำความร้อน และสารทำงานที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์ ทำให้เกิดดีกรีความร้อนยวดยิ่งก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิของสารทำงานที่สภาวะ 2 มีค่าสูงกว่ากรณีสารทำงานที่เข้าคอมเพรสเซอร์ในสภาพอิ่มตัวแบบวัฏจักรมาตรฐานทั่วไป ทำให้มีศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราความร้อนที่แลกเปลี่ยนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน จะคำนวณโดย

$$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_r (h_3 - h_{3'}) = \dot{m}_r (h_v - h_l) \quad (5)$$

และค่า

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_v} \quad (6)$$

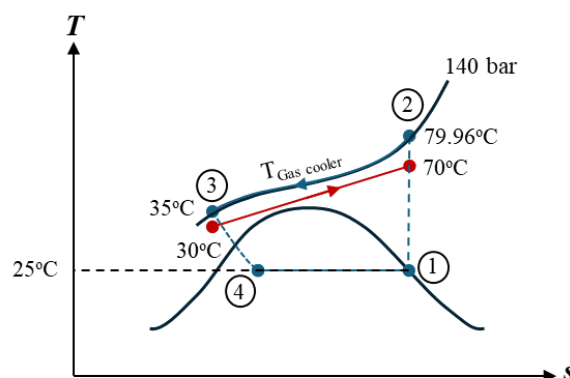
เมื่อ $\dot{Q}_{HX}$ คือ อัตราความร้อนที่แลกเปลี่ยนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน, h_l และ h_v คือ ค่าเอนทัลปีขาออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในก่อนเข้าสู่คอมเพรสเซอร์และวาล์วลดความดัน ตามลำดับ

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาผลของอุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์ที่ลดลงในวัฏจักรมาตรฐาน และผลของค่าความร้อนยวดยิ่ง ก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ในวัฏจักรมาตรฐานที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน ที่มีต่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่ต้องการ

3. ผลการศึกษา

3.1 กรณีวัฏจักรมาตรฐาน

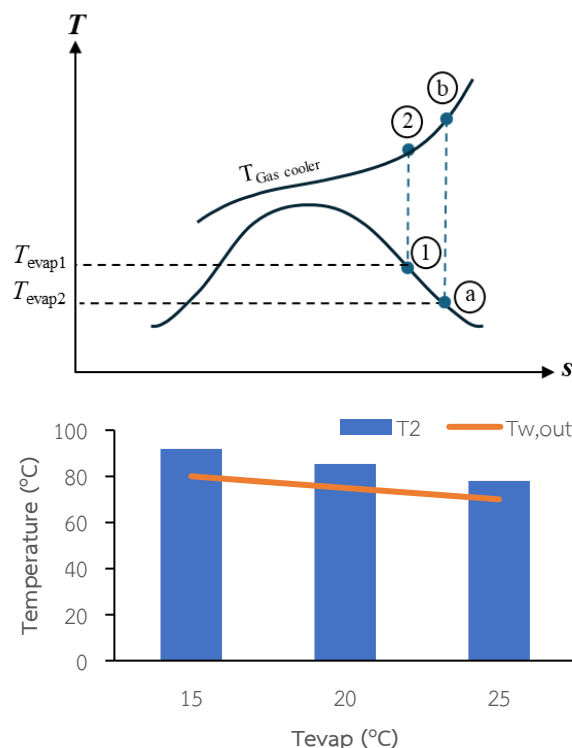
รูปที่ 3 แสดงไดอะแกรม T-s ของปั๊มความร้อน เพื่อผลิตน้ำร้อนอัตราการไหล 0.05 kg/s จากอุณหภูมิ 30 °C ไปเป็น 70 °C อุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์ 25 °C



รูปที่ 3 ไดอะแกรม T-s ของปั๊มความร้อน ในการผลิตน้ำร้อนอัตราการไหล 0.05 kg/s จาก 30 °C ไปเป็น 70 °C

จากรูปในไดอะแกรม T-s จะพบว่า ความดันที่เหมาะสมในการให้ความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนที่ 70°C จะอยู่ที่ 140 bar ซึ่งจะให้พินช์ ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ชุดทำน้ำร้อนประมาณ 5°C โดยอุณหภูมิที่สภาวะที่ 3 จะมีค่า 35°C ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว พบว่า ค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า 0.17 kW และ COP ของปั๊มความร้อนมีค่า 6.093

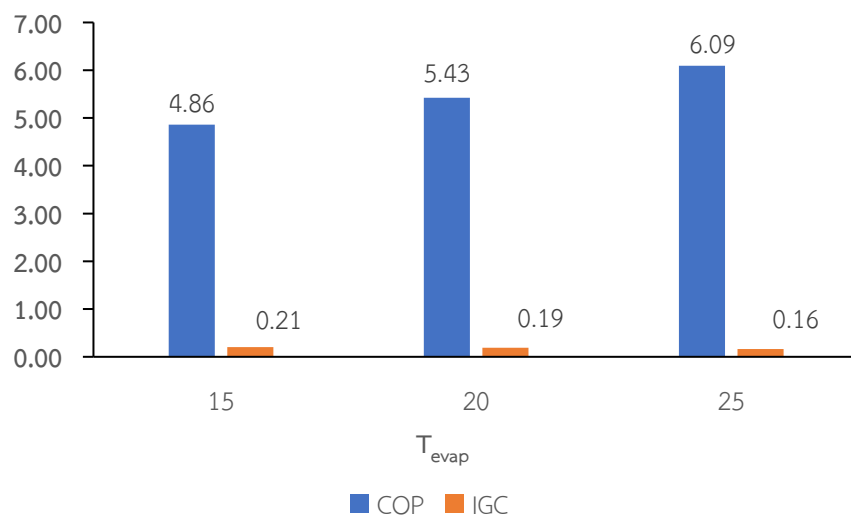
ในกรณีที่ต้องการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น สมมติ 75°C โดยที่อุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์ 25°C คงที่ พบว่า จะต้องใช้ปั๊มความร้อนในสภาวะที่ 3 ให้มีความดันสูงจาก 140 bar ขึ้นไปอีก ซึ่งไม่เหมาะสมเพราะความดันจะสูงเกินไป วิธีการที่สามารถทำได้คือการลดอุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์เพื่อให้สภาวะที่ 1 มีฐานที่กว้างขึ้น เป็นสภาวะ a ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งอุณหภูมิ T_b จะมีค่าสูงขึ้นจาก T_2



รูปที่ 4 ผลการลดอุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์ต่อศักยภาพในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อน อุณหภูมิน้ำเข้า 30°C อุณหภูมิพินช์ ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ 5°C

จากรูปที่ 4 เมื่อลดอุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์ลงจาก 25°C ไปเป็น 20°C และ 15°C พบว่า จะทำให้ปั๊มความร้อนมีศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยตัวอย่างการคำนวณที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 kg/s อุณหภูมิน้ำที่ป้อนให้แก่ปั๊มความร้อนอยู่ที่ 30°C สามารถเพิ่มอุณหภูมิจาก 70°C ไปเป็น 75°C และ 80°C เมื่ออุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์อยู่ที่ 25, 20 และ 15°C ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการลดอุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์มีศักยภาพในการเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตน้ำร้อน แต่จะพบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ตัวระบายความร้อน (Gas cooler) จะทำให้เกิดค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการใช้พลังงานในวัฏจักรปั๊มความร้อน ซึ่งในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิอีวาपोเรเตอร์ที่ลดลงเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้นในตัวระบายความร้อน ซึ่งมีผลต่อ COP ของวัฏจักร ซึ่งจะมีค่าลดลง



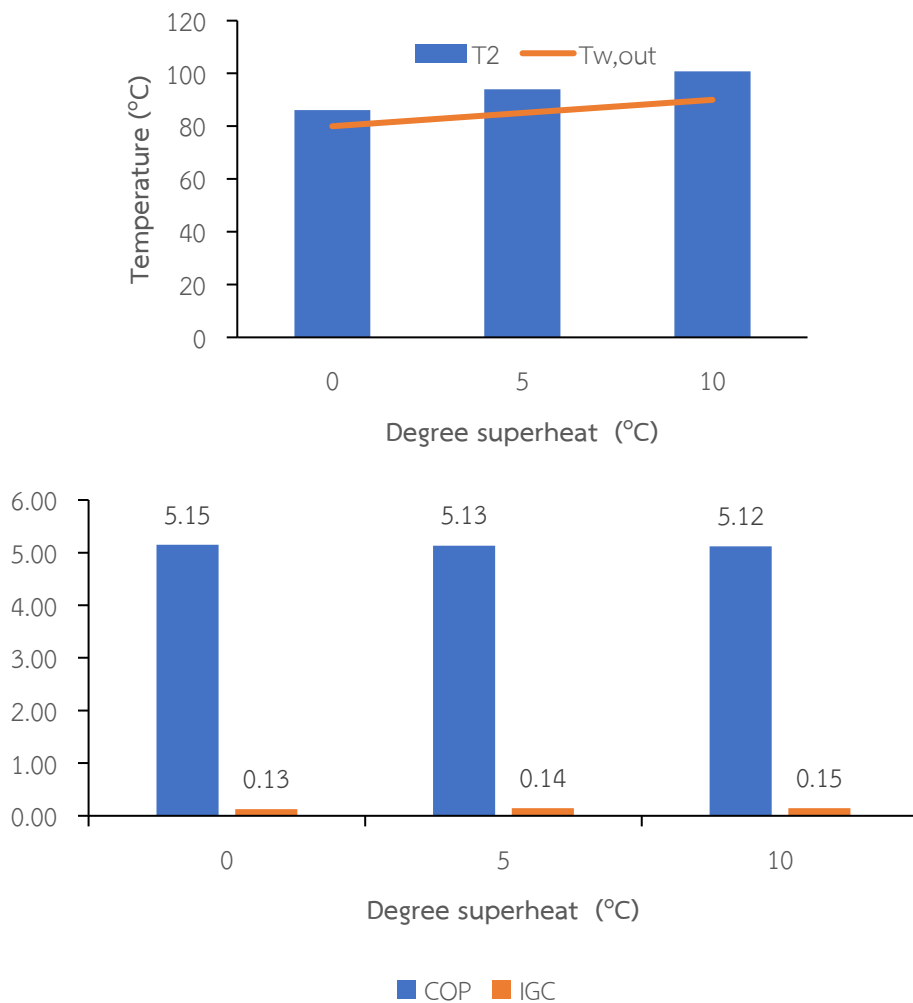
รูปที่ 5 ผลของค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ตัวระบายความร้อน และ COP ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อีวาพอเรเตอร์ สำหรับวัฏจักรมาตรฐาน

3.2 กรณีวัฏจักรมาตรฐานที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน

รูปที่ 6 แสดงศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนของปั๊มความร้อนมาตรฐาน ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน ระหว่างสารทำงานที่ออกจากตัวระบายความร้อน ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์ก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ โดยใช้ข้อมูล เมื่อปั๊มความร้อน ทำงานที่อุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์อยู่ที่ 15 °C โดยมีอุณหภูมิความร้อนยวดยิ่งที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์ 0, 5 และ 10 °C เพื่อผลิตน้ำร้อน 80, 85 และ 90 °C จากอุณหภูมิน้ำเข้า 30 °C และความดันตัวระบายความร้อนคงที่ที่ 130 bar

จากรูปที่ 6 พบว่า ในกรณีอุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์ 15 °C เมื่อตีดรีความร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นจาก 0 °C ไปเป็น 5 °C และ 10 °C สามารถผลิตอุณหภูมิความร้อนจาก 80 °C ไปเป็น 85 °C และ 90 °C ตามลำดับ และเมื่อตรวจสอบค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ที่ชุดระบายความร้อน พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 0.13 kW ไปเป็น 0.14 และ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการเพิ่มศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยวิธีการเพิ่มตีดรีความร้อนยวดยิ่ง จะเป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากค่า COP ไม่ลดลงมากนัก

อนึ่งทั้ง 2 รูปแบบของปั๊มความร้อนชนิดนี้ อุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์ค่อนข้างต่ำถ้านำปั๊มความร้อนมาใช้ในการทำความเย็นร่วมด้วยจะช่วยเพิ่ม COP ในภาพรวมทำให้ระบบสามารถนำไปใช้ในการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้และ COP ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนดีกรีความร้อนยวดยิ่งที่อีวาพอเรเตอร์ กำหนดอุณหภูมิ $T_{\text{evap}} = 15^{\circ}\text{C}$

4. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อนคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดทรานส์คริติคัล ในรูปแบบวัฏจักรมาตรฐาน และในกรณีที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในระหว่างสารทำงานที่ออกจากชุดระบายความร้อนและสารทำงานที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์ ในการศึกษาจะพิจารณาผลของอุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์ ในวัฏจักรมาตรฐาน และผลของดีกรีความร้อนยวดยิ่งในวัฏจักรที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน ที่มีต่อศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง ผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ในวัฏจักรมาตรฐาน ที่ความดันชุดระบายความร้อนคงที่ที่ 140 bar เมื่ออุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์ลดลงจาก 25°C เป็น 15°C ทำให้ศักยภาพในการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 70°C เป็น 80°C อย่างไรก็ตาม จะต้องพิจารณาค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ในชุดระบายความร้อน ซึ่งมีค่าสูงขึ้นจาก 0.16 เป็น 0.21 ส่งผลให้ COP ของวัฏจักรลดลงจาก 6.09 เป็น 4.86
- วัฏจักรที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน เมื่อทำงานที่ความดันอีวาพอเรเตอร์ และชุดระบายความร้อนที่ 130 bar เดียวกัน เมื่อดีกรีความร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นจาก 5°C เป็น 10°C ปั๊มความร้อนสามารถผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 85°C เป็น 90°C โดยค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ที่ชุดระบายความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 0.14 เป็น 0.15

ส่งผลให้ COP ลดลงเล็กน้อยจาก 5.13 เป็น 5.12 จากผลการศึกษา จะเห็นได้ว่า ป้อนความร้อนในลักษณะดังกล่าว ก่อนข้างจะเหมาะสมในการผลิตน้ำร้อน ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง โดยค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ที่ซูระบาย ความร้อนและ COP ของวัฏจักร ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

- เนื่องจากป้อนความร้อนดังกล่าว อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ค่อนข้างมีค่าต่ำ จึงมีความเหมาะสมในการมาใช้ในการทำความเย็น ซึ่งจะช่วยให้ระบบมีค่า COP รวมสูงขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดในการศึกษาการประยุกต์ใช้ป้อนความร้อนความร้อนคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดทรานส์คริติคัล สำหรับทดแทนการใช้หม้อต้มน้ำร้อนหรือหม้อต้มไอน้ำเพื่อผลิตความร้อนอุณหภูมิสูง และเนื่องจากช่วงอุณหภูมิที่ไอวาปอเรเตอร์มีค่าค่อนข้างต่ำ สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทำความเย็น ซึ่งจะทำให้ระบบป้อนความร้อนรูปแบบนี้ สามารถผลิตได้ทั้งความร้อนและความเย็นได้พร้อมกัน ทำให้สมรรถนะของระบบในภาพรวมสูงขึ้นไปอีก นอกจากนี้ ถ้าระบบดังกล่าวมีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การใช้ไฟฟ้าจากสายส่งก็จะลดลง ทำให้ระบบมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งแนวทางที่ควรศึกษาต่อไปในอนาคตจะเป็นการเลือกขนาดของป้อนความร้อนและโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เหมาะสมต่อการทำความร้อน ความเย็น และความต้องการใช้ไฟฟ้า

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sahu A.K., Agarwal N., Nanda P., (2017). A parametric study of transcritical CO₂ simple cooling and combined power cycle. *Int. J. of Low Carbon Technologies*. 12, 383-391.
- [2] Nihaj Uddin Shan A.N.M. (2020). A review of trans-critical CO₂ refrigeration cycle. *Proceedings of the International Conference on Industrial & Mechanical Engineering and Operations Management Dhaka*, December 26-27, 2020, Bangladesh.
- [3] Sarkar J., Bhattacharyya S., Gopal M. R. (2004). Transcritical carbon dioxide based heat pumps: process heat applications. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue University, <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/691>.
- [4] White S.D., Yarrall M.G., Cleland D.J., Hedley R.A. (2002). Modelling the performance of a transcritical CO₂ heat pump for high temperature heating. *International Journal of Refrigeration*, 25, 4, 479-486.

ระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน Body Mass Index Measurement System via Smartphone Application

ณัฐพล ไวยวัตร^{1*} ชนชน การะภักดี¹ อัษฎางค์ บุญศรี² จารุกิตติ์ พิบูลนฤดม³ อานนท์ วงษ์มณี² และ อนัน หยวกวัด³
Nattapon waiyuwat^{1*} Chanachon Karapakdee¹, Ussadang Boonsri², Jarukit Piboolnaruedom³
Anon Wongmanee² and Anan Yuakwat³

¹สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

²สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยี เภกิจวิศวกรรมพลังงานและระบบควบคุม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

³สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยี เภกิจวิศวกรรมวัสดุและอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

¹Energy Technology Faculty of Industrial Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University
Kamphaeng Phet 62000

²Major Engineering Technology Minor Energy and Control System Engineering Faculty of Industrial
Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University Kamphaeng Phet 62000

³Major Engineering Technology Minor Material and Industrial Engineering Faculty of Industrial Technology
Kamphaeng Phet Rajabhat University Kamphaeng Phet 62000

*Corresponding author: Tel: 0801829727. E-mail joza2018hot@gmail.com

Abstract

This article presents a body mass index (BMI) measurement system via a smartphone application. The system, which measures 30 x 50 x 200 cm, consists of a NodeMCU, an HX711 load-cell data receiver, and an HC-SR04 Ultrasonic Module. This module displays weight, height, and BMI values on the LCD screen and the Blynk application. The results show that the system has an average height measurement error of 0.85 centimeters, with an accuracy rate of 99.97 percent, and a weight measurement error of 0.75 kilograms, with an accuracy rate of 99.87 percent. This system is suitable for practical applications. Furthermore, the developed system will benefit public health by promoting good health in Thai society.

Keywords: body mass index (BMI), measurement system, smartphone

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน โดยมีโครงสร้างขนาด 30 x 50 x 200 เซนติเมตร ประกอบด้วยชุดประมวลผล NodeMCU ชุดรับข้อมูล HX711 จากโหลดเซลล์ และ Ultrasonic Module HC-SR04 เพื่อแสดงผลลัพธ์ ค่าน้ำหนัก ส่วนสูง ค่าดัชนีมวลกาย ผ่านจอ LCD และ บนแอปพลิเคชัน Blynk ผลการทดสอบพบว่า ระบบมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ในการวัดส่วนสูงเท่ากับ 0.85 เซนติเมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 99.97 เปอร์เซ็นต์ และ ค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.75 กิโลกรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 99.87 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่าดัชนีมวลกายที่คำนวณได้มีความสมเหตุสมผลต่อผู้ใช้งาน เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในงานจริง นอกจากนี้ ระบบที่พัฒนาจะเป็นประโยชน์ในด้านสาธารณสุข เพื่อสร้างสุขภาพที่ดีให้กับสังคมไทยต่อไป

คำสำคัญ: ดัชนีมวลกาย, ระบบวัดค่า , สมาร์ทโฟน

บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยีดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทั้งในด้านการศึกษา อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยเฉพาะในด้านการตรวจวัดค่าทางกายภาพของร่างกาย เช่น น้ำหนักและส่วนสูง ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการประเมินภาวะสุขภาพของบุคคล เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงแบบทั่วไปในปัจจุบันมักเป็นระบบแมนวลที่ผู้ใช้งานต้องคำนวณหรืออ่านค่าเอง ทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากการอ่านค่าและการใช้งานได้ง่าย อีกทั้งยังไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้งานต่อได้อย่างสะดวก

โดยที่ผ่านมา ปฏิภาณ สุทธิชัย และ สวณัฐ อุดมรักษ์ (1) ได้จัดทำโครงงานสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักแสดงค่าด้วยนิ้วมวลกายและสามารถเก็บข้อมูลได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รับข้อมูลน้ำหนักจากโหลดเซลล์ และข้อมูลส่วนสูงจากการป้อนค่าผ่านแป้นกดแล้วนำมาประมวลผลคำนวณเป็นค่าดัชนีมวลกาย และสามารถเก็บค่าน้ำหนัก และค่าดัชนีมวลกาย เข้าสู่ฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของร่างกายได้ ซึ่งจากการทดสอบเครื่องชั่งน้ำหนักสามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างมีความถูกต้องแม่นยำไปอีกขั้นหนึ่ง และสามารถเก็บข้อมูล น้ำหนัก ค่าดัชนีมวลกาย สัดส่วน และวันที่ทำการชั่งน้ำหนักได้อย่างถูกต้อง ถัดมา รณชัย มรกตศรีวรรณ , วชิรปัญญา ปัญญาอ่อน และ สาคร แถวโนนจัว (2) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องชั่งน้ำหนักและนับจำนวนอุปกรณ์แสดงผลอัตโนมัติ เพื่อช่วยในการนับและระบุจำนวนของวัสดุอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและมีความหลากหลายในหน่วยงาน การออกแบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง โหลดเซลล์เพื่อรับน้ำหนักของวัตถุ และอุปกรณ์ขยายสัญญาณไฟฟ้า HX711 ให้มีค่าเป็นสัญญาณ Digital 24 Bit ส่วนที่สอง ส่วนควบคุมระบบซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำการประมวลผลและควบคุมการแสดงผล และปุ่มคีย์ป้อนน้ำหนักมาตรฐานของอุปกรณ์ และส่วนที่สาม ส่วนการแสดงผลจากการชั่งและการนับจำนวนอุปกรณ์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพการชั่งน้ำหนักและนับจำนวนอุปกรณ์แสดงผลอัตโนมัติมีความผิดพลาดสูงสุดเพียง 0.2% และสามารถทำการแจ้งเตือนอย่างแม่นยำซึ่งแสดงว่าโครงการวิจัยนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดในการพัฒนา เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงด้วยระบบดิจิทัล เพื่อให้สามารถวัดและแสดงผลได้อย่าง รวดเร็ว ถูกต้อง และมีความแม่นยำสูง โดยใช้เทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU เนื่องจากมีราคาถูก ใช้งานง่าย และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของการวัดน้ำหนัก ได้ใช้เซนเซอร์วัดแรงกดแบบโหลดเซลล์ (Load Cell) ในขณะที่การวัดส่วนสูงใช้ เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) สำหรับตรวจจับระยะทางระหว่างหัวผู้ใช้งานกับจุดอ้างอิงด้านบน โดยค่าที่ได้จากทั้งสองเซนเซอร์จะถูกส่งเข้าสู่ระบบประมวลผลและแสดงผลบนจอ LCD ในรูปแบบดิจิทัล และแสดงผลบนสมาร์ตโฟนได้แบบ Real-time ผ่านแพลตฟอร์ม Blynk ดังนั้น โครงงานนี้ไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับความสะดวกและความแม่นยำในการวัดค่าทางกายภาพเท่านั้น แต่ยังเป็นจุดเริ่มต้นของการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคุณภาพชีวิตของคนไทยให้ดียิ่งขึ้น ทั้งในด้านการดูแลสุขภาพ การศึกษา และ การพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศอย่างยั่งยืน

วิธีการดำเนินการวิจัย

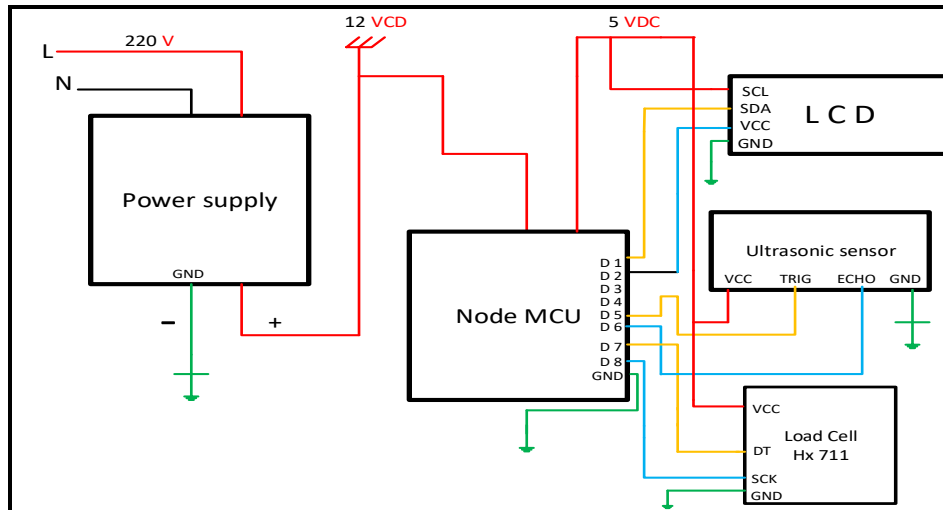
การศึกษาวิจัยเรื่องเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงด้วยระบบดิจิทัลเพื่อให้วิจัยครั้งนี้ดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดรูปแบบวิจัย ตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ทำการออกแบบและสร้างระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน
3. หาประสิทธิภาพระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน
4. วิเคราะห์และอภิปรายผลระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน
5. สรุปผลการทดลอง

การออกแบบระบบโครงสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงด้วยระบบดิจิทัล

ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน เริ่มจากตัวเครื่องมีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง 30 x 50 x 200 เซนติเมตร ประกอบด้วยฐานแผ่นอะคริลิกที่มีเซนเซอร์โหลดเซลล์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร ส่วนกลางของโครงสร้างมีชุดประมวลผล NodeMCU (3) ชุดรับข้อมูล HX711 จากโหลด

เซลล์ขนาด 200 กิโลกรัม และ Ultrasonic Module HC-SR04 ถัดมาเป็น ชุดแสดงผล LCD แสดงผลลัพธ์ ค่าน้ำหนัก ส่วนสูง ค่า BMI และ สถานะดัชนีมวลกายให้ผู้ใช้งานทราบ โดยจะติดตั้งตัววัดส่วนสูงไว้ด้านบนของโครงสร้าง นอกจากนี้ ยังสามารถแสดงผลการทำงานได้ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (IoT) บนแอปพลิเคชัน Blynk (4) ผ่านสมาร์ทโฟน โดยสามารถแสดงระบบการทำงานและโครงสร้างที่ทำเสร็จสมบูรณ์ได้ตามภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 การออกแบบระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน



(ก) ตัวเครื่อง



(ข) ชุดวงจรควบคุม

ภาพที่ 2 โครงสร้างระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน จะใช้สูตรการคำนวณดัชนีมวลกาย (5) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (1) จากนั้น จะนำไปเทียบกับเกณฑ์เบื้องต้นสถานะดัชนีมวลกายได้ตามตารางที่ 1

$$BMI = \frac{W}{h^2} \quad (1)$$

โดยที่ W คือ น้ำหนักมวลกาย มีหน่วยเป็น กิโลกรัม

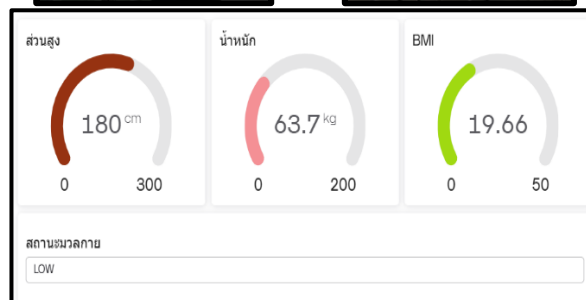
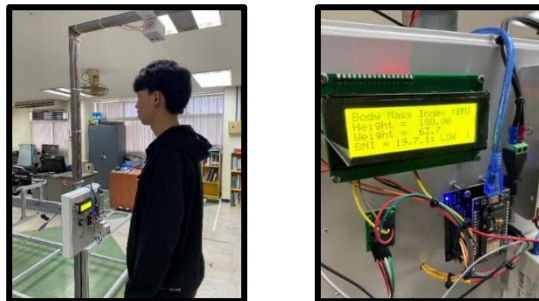
h คือ ส่วนสูง มีหน่วยเป็น เมตร
 BMI คือ ค่าดัชนีมวลกาย

ตารางที่ 3 เกณฑ์อ้างอิงดัชนีมวลกายที่ใช้ระบบ

ค่าดัชนีมวลกาย (BMI)	สถานะ
BMI น้อยกว่า 20	ผอม
BMI อยู่ระหว่าง 20 - 24	ปกติ
มากกว่า 24	อ้วน

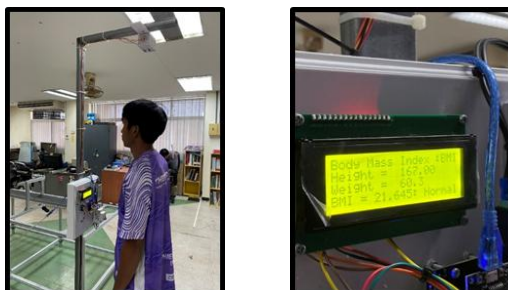
หลังจากที่ได้เกณฑ์คำนวณค่าดัชนีมวลกาย ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบตามเกณฑ์ที่ระบุไว้ข้างต้นโดยมีผู้ทดสอบจำนวน 3 ประเภท คือ 1. ประเภทผอม 2. ประเภทปกติ และ 3 ประเภทอ้วน สามารถแสดงการทดสอบได้ดังนี้

ผลการทดสอบประเภทผอม



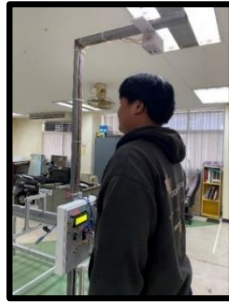
(ก) ผู้ทดสอบประเภทผอม (ข) การแสดงผลบนตัวเครื่อง (ค) การแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Blynk
 ภาพที่ 3 ผลการทดสอบระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟนประเภทผอม

ผลการทดสอบประเภทปกติ



(ก) ผู้ทดสอบประเภทปกติ (ข) การแสดงผลบนตัวเครื่อง (ค) การแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Blynk
 ภาพที่ 4 ผลการทดสอบระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟนประเภทปกติ

ผลการทดสอบประเภทอ้วน



(ก) ผู้ทดสอบประเภทอ้วน (ข) การแสดงผลบนตัวเครื่อง

(ค) การแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Blynk

ภาพที่ 5 ผลการทดสอบระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟนประเภทอ้วน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบดัชนีมวลกาย จำนวน 20 คน

ลำดับ	ส่วนสูง		น้ำหนัก		อายุ	เพศ	ค่าดัชนีมวลกาย	สถานะ
	ค่าจริง	ค่าที่วัดได้	ค่าจริง	ค่าที่วัดได้				
1	168	167	60.5	60.3	21	ชาย	21.62	ปกติ
2	181	180	64.1	63.7	22	ชาย	19.66	ผอม
3	162	160	50.1	49.6	49	หญิง	19.36	ผอม
4	166	165	53.5	54.3	35	หญิง	19.95	ผอม
5	172	171	64.1	65.7	27	ชาย	22.47	ปกติ
6	176	175	68.2	69.1	39	ชาย	22.56	ปกติ
7	169	170	85.4	85.3	20	หญิง	29.52	อ้วน
8	162	163	51.3	51.5	50	หญิง	19.38	ผอม
9	167	168	71.2	70.1	56	ชาย	24.84	อ้วน
10	168	169	56.8	55.8	51	หญิง	19.54	ผอม
11	175	175	72.5	72.7	27	ชาย	23.74	ปกติ
12	158	158	46.4	45.6	18	หญิง	18.27	ผอม
13	160	159	58.3	59.5	18	หญิง	23.54	ปกติ
14	165	166	42.6	43.8	36	หญิง	15.89	ผอม
15	180	181	90.4	90.9	23	ชาย	27.47	อ้วน
16	182	183	76.1	75.7	24	ชาย	22.60	ปกติ
17	178	179	110.3	109.5	26	ชาย	34.18	อ้วน
18	189	188	88.2	87.6	37	ชาย	24.79	อ้วน
19	162	162	76.4	75.4	53	หญิง	28.73	อ้วน
20	165	165	58.6	57.2	45	หญิง	21.01	ปกติ

จากภาพที่ 3 ภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 เป็นผลการทดสอบขั้นตอนการใช้งานและการแสดงผลของระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน โดยเริ่มจากให้ผู้ใช้งานประเภทผอม ยืนบนเครื่องซึ่งเพื่อทำการวัดน้ำหนักและส่วนสูง พบว่าผู้ใช้งานมีส่วนสูง 180 เซนติเมตร น้ำหนัก 63.7 กิโลกรัม และได้ค่า BMI เท่ากับ 19.7 ส่งผลให้ได้ค่าดัชนีมวลกายระบุเป็น LOW หรือ ผอม ถัดมาเป็นผู้ทดสอบประเภทปกติ พบว่าผู้ใช้งานมีส่วนสูง 167 เซนติเมตร น้ำหนัก 60.3 กิโลกรัม และได้ค่า BMI เท่ากับ 21.62 ส่งผลให้ได้ค่าดัชนีมวลกายระบุเป็น Normal หรือ ปกติ คนสุดท้ายประเภทอ้วน พบว่าผู้ใช้งานมีส่วนสูง 179 เซนติเมตร น้ำหนัก 109.5 กิโลกรัม และได้ค่า BMI เท่ากับ 34.17 ส่งผลให้ได้ค่าดัชนีมวลกายระบุเป็น OVER หรือ อ้วน ซึ่งจากผลการทดสอบ ระบบที่ผู้วิจัยได้จัดทำแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทำงานที่รวดเร็ว และเหมาะสมอย่างยิ่ง

สำหรับการนำไปใช้ในงานจริง การคำนวณและการแสดงผลระบบ สามารถคำนวณค่าดัชนีมวลกาย (BMI) และจัดกลุ่มภาวะน้ำหนักตัวได้อย่างถูกต้องตามสูตรที่ฝังในโปรแกรม และแสดงผลบนหน้าจอ (LCD) จากนั้นผู้ได้เก็บข้อมูลผู้ใช้เครื่องวัดดัชนีมวลกายเพิ่มอีกจำนวน 20 คน โดยเก็บข้อมูลอายุ และ เพศ เพิ่มเติม เปรียบเทียบกับค่าจริงที่ผู้ทดสอบวัดจากเครื่องชั่งส่วนสูงที่ได้มาตรฐาน สามารถแสดงผลการทดสอบข้อมูลได้ดังตารางที่ 2

บทสรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างระบบวัดค่าดัชนีมวลกายผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน เริ่มจากตัวเครื่องมีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง 30 x 50 x 200 เซนติเมตร ประกอบด้วยฐานแผ่นอะคริลิกที่มีเซนเซอร์โหลดเซลล์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร ส่วนกลางของโครงสร้างมีชุดประมวลผล NodeMCU ชุดรับข้อมูล HX711 จากโหลดเซลล์ ขนาด 200 กิโลกรัม และ Ultrasonic Module HC-SR04 ถัดมาเป็น ชุดแสดงผล LCD แสดงผลลัพธ์ ค่าน้ำหนัก ส่วนสูง ค่าดัชนีมวลกาย โดยก่อนการทดสอบผู้วิจัยได้ทำการวัดเทียบกับค่าน้ำหนักจริง (calibration) ผลการทดสอบพบว่า ระบบมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ในการวัดส่วนสูงเท่ากับ 0.85 เซนติเมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 99.97 เปอร์เซ็นต์ และ ค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.75 กิโลกรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 99.87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความแม่นยำสูงมาก ทำให้ค่าดัชนีมวลกายที่คำนวณได้มีความสมเหตุสมผลต่อผู้ใช้งาน ระบบที่พัฒนามีความฉลาด กระทัดรัด และใช้งานง่าย เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานจริง ในสถานที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก ทำให้ผู้ใช้งานได้รับข้อมูลด้านสุขภาพได้ทันที นอกจากนี้ หากมีการเก็บข้อมูลของผู้ใช้งานที่เข้ามาใช้ระบบอาจนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในด้านสาธารณสุข (แต่ควรระมัดระวังเรื่อง PDPA) เพื่อสร้างสุขภาพที่ดีให้กับสังคมไทยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโปรแกรมวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมที่สนับสนุนและ ให้คำปรึกษา และอุปกรณ์เครื่องมือสถานที่ส่วนพลังงานและในตึกชั้นเรียนของการเก็บข้อมูลงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา และ คณาจารย์ของโปรแกรมวิชาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการสร้างชิ้นงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณครับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปฏิภาณ สุขดิษฐ์ และ สวนต์ อุดมรักษ์. (2553). เครื่องชั่งน้ำหนักแสดงค่าดัชนีมวลกาย (The Body Mass Index Weighing Display Machine). วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต พิชณโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [2] รณชัย มรกตศรีวรรณ , วชิรปัญญา ปัญญาอ่อน และ สาคร แถวโนนจิว. (2566). เครื่องชั่งน้ำหนักและนับจำนวน อุปกรณ์แสดงผลอัตโนมัติ. Journal of Industrial Technology and Innovation. 2(2) , 1-11.
- [3] พัสตราภรณ์ อินสุข และ คณะฯ. (2567). ระบบคัดแยกการทิ้งขยะอัตโนมัติแบบไร้สัมผัส. การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 ประจำปี 2567, วันที่ 28-30 ตุลาคม 2567 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ศูนย์แมริม จังหวัดเชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [4] ชลิตา แจ่มจันทร์ และ คณะฯ. (2565). ระบบรายงานสภาพน้ำและควบคุมอุณหภูมิในตู้ปลาด้วยแผ่นเพลทเทอร์โมผ่าน แอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน. ใน การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 ประจำปี 2565, วันที่ 27-29 ตุลาคม 2565 ณ โรงแรมโนโวเทล ชุมพร บีช รีสอร์ท แอนด์กอล์ฟ จังหวัดชุมพร.
- [5] โรงพยาบาลขอนแก่นราม. (ม.ป.ป.). โปรแกรมคำนวณค่าดัชนีมวลกาย - BMI สืบค้นเมื่อ 21 กันยายน 2568, จาก <https://www.khonkaenram.com/th/services/health-information/health-articles/checkup-and-vaccine/program-bmi>

ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งไอเสียผ่านวัฏจักรแรงดันอินทรีย์: กรณีใช้ชุดท่อหมุนเวียนในการแลกเปลี่ยนความร้อน

Potential for Electricity Generation from Exhaust Waste Heat via an Organic Rankine Cycle: A Case Study Using a Run-Around Coil Heat Exchanger

ธณิศวรรค์ ดีทายาท¹, เหนือพล ดวงเบี้ย^{1,2}, วาสนา คำโสภาส^{1,3}, อรรถกร อาสนคำ¹ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์¹

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

² สำนักงานบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

³ สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

ABSTRACT

In this study, the potential for electricity generation from exhaust gases at various temperatures and flow rates was investigated using an Organic Rankine cycle (ORC) with R245fa as the working fluid. A run-around coil heat exchanger was employed to transfer heat from the exhaust gas to the working fluid in the ORC. The minimum exhaust gas temperature after heat exchange was maintained at 120 °C to prevent condensation of water vapor in the exhaust. A pinch temperature difference of 10 °C was specified between the evaporator temperature and the hot-water temperature. The investigation considered exhaust gas temperatures ranging from 150 °C to 350 °C, with the ratio of the total heat capacity rates of the hot water to the exhaust gas varying between 2 and 5. The results indicated that as the exhaust gas temperature increased, both the hot-water temperature produced and the ORC evaporator temperature increased, leading to higher overall efficiency and greater power output from the cycle. However, when the water heat capacity rate or the heat capacity rate ratio decreased, the evaporator temperature could rise above the cycle's operational limits. Therefore, at higher exhaust gas temperatures, the heat capacity rate ratio needed to be maintained at a higher value to prevent excessive evaporator temperatures. For an ORC using R245fa as the working fluid, the evaporator temperature was not recommended to exceed 150 °C, as values approaching the critical temperature could adversely affect cycle operation.

Keywords: Organic Rankine cycle; exhaust gas; electricity generation; run-around coil heat exchanger

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากไอเสีย ที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่างๆ ผ่านวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน โดยจะมี เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบชุดท่อหมุนเวียนในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสีย และสารทำงานในวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ทั้งนี้อุณหภูมิไอเสียหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำสุดที่ 120°C เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในไอเสีย และกำหนดอุณหภูมิพินช์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุณหภูมิไอเสียป้อนเรเตอร์ และอุณหภูมิน้ำร้อนอยู่ที่ 10°C การศึกษาจะพิจารณาในช่วงอุณหภูมิไอเสียอยู่ระหว่าง 150-350°C และอัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำร้อนและไอเสียอยู่ระหว่าง 2-5 จากผลการศึกษาเมื่ออุณหภูมิไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ และอุณหภูมิไอเสียป้อนเรเตอร์ของวัฏจักรจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพรวมและกำลัง

งานที่ได้จากวัฏจักร ซึ่งจะมีค่าสูงตามอุณหภูมิไอเสียที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าความจุความร้อนของน้ำหรืออัตราส่วนความจุความร้อนของน้ำต่อความจุความร้อนของไอเสียลดลง อุณหภูมิไอเสียปอเรเตอร์ อาจสูงเกินกว่าที่วัฏจักรจะทำงานได้ ดังนั้น ที่อุณหภูมิไอเสียมีค่าสูง ควรให้อัตราส่วนความจุความร้อนมีค่าสูง เพื่อควบคุมอุณหภูมิไอเสียปอเรเตอร์ไม่ให้สูงเกินไป สำหรับวัฏจักรที่ใช้สารทำงาน R245fa อุณหภูมิไอเสียปอเรเตอร์ไม่ควรเกิน 150°C ซึ่งใกล้กับจุดวิกฤติมากเกินไป

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงดันอินทรีย์; แก๊สไอเสีย; การผลิตไฟฟ้า; ขดท่อหมุนเวียน

อิทธิพลของความหนาของวัสดุพรุนที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำ

The Influence of Porous Material Thickness on the Thermal Performance of Steam-Powered Water Pump

ปกรณ พรหมแก้ว¹ ปฏิวัติ วรามิตร² สัญชัย รำเพยพัทธ์³ และ ภาณุศักดิ์ มูลศรี^{3*}

Pakorn Promkaew¹ Pathiwat Waramit² Sanchai Ramphueiphad³ and Panusak Moonsri^{3*}

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ภูเก็ต 83000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

³ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

¹Industrial Technology, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket 83000

²Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

³Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

^{*}Corresponding author: Tel.: 08-63974013. E-mail address: panusak.mo@rmu.ac.th

Abstract

This research aims to investigate the influence of porous material thickness on the thermal efficiency and specific energy consumption index of a steam-powered water pump using waste heat from the combustion of 60 kg of wood obtained from Rajamangala University of Technology Isan. The static suction head was set at 3 m and the static discharge head at 1 m. Experiments were conducted comparing cases with and without the installation of fibrous porous materials with a porosity of 0.954, packed in stainless steel 304 mesh, which was formed into rectangular shapes with dimensions of 148.08 mm width, 895.10 mm height, and thicknesses of 25.4 mm, 38.1 mm, and 50.8 mm, respectively. Four sheets were installed inside the steam generation tank. The research results found that installing 50.8 mm thick, porous material had the lowest SEC value of 754.86 kJ/L, while the case without porous material installation had the highest SEC value of 1,064.05 kJ/L. Therefore, installing porous materials with thicknesses of 25.4 mm, 38.1 mm, and 50.8 mm helped reduce energy consumption by 20.57%, 20.82%, and 29.06%, respectively. Installing 38.1 mm and 50.8 mm thick, porous materials showed similar thermal efficiencies of 56.9%, while the case without porous material installation had an efficiency of 48.87%. Therefore, installing 38.1 mm and 50.8 mm thick, porous materials significantly helped increase thermal efficiency by 8% and reduce the specific energy consumption index of steam-powered water pumps by 20.82% and 29.06%, respectively, compared to cases without porous material installation.

Keywords: Porous material, Charcoal Kiln, Steam-Powered Water Pump

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาของวัสดุพูนที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งจากการเผาไหม้ปริมาณ 60 kg ที่ได้จากภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กำหนดระดับเฮดสถิตด้านดูดเท่ากับ 3 m และเฮดสถิตด้านส่งเท่ากับ 1 m ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการมีและไม่มีการติดตั้งวัสดุพูนชนิดเส้นใย (Fibrous Porous Materials) มีค่าความพูน (Porosity) เท่ากับ 0.954 ถูกบรรจุในตาข่ายสแตนเลส 304 ซึ่งถูกนำมาดัดเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 148.08 mm สูง 895.10 mm หนา 25.4 mm 38.1 mm และ 50.8 mm ตามลำดับ จำนวน 4 แผ่นถูกติดตั้งภายในถังผลิตไอน้ำ ผลการวิจัยพบว่า การติดตั้งวัสดุพูนหนา 50.8 mm มีค่า SEC ต่ำที่สุดเท่ากับ 754.86 kJ/L ในขณะที่กรณีไม่มีการติดตั้งวัสดุพูนมีค่า SEC สูงที่สุดเท่ากับ 1,064.05 kJ/L ดังนั้น การติดตั้งวัสดุพูนหนา 25.4 mm 38.1 mm และ 50.8 mm จึงช่วยลดการใช้พลังงานเท่ากับ 20.57% 20.82% และ 29.06% ตามลำดับ การติดตั้งวัสดุพูนหนา 38.1 mm และ 50.8 mm มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงกันเท่ากับ 56.9% ในขณะที่กรณีไม่มีการติดตั้งวัสดุพูนมีค่าเท่ากับ 48.87% ดังนั้น การติดตั้งวัสดุพูนหนา 38.1 mm และ 50.8 mm จึงมีนัยสำคัญในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ 8% และช่วยลดค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำได้ 20.82% และ 29.06% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการไม่ติดตั้งวัสดุพูน

คำสำคัญ: วัสดุพูน, เต้าเผาถ่าน, ปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำ

บทนำ

ในพื้นที่ชนบทของประเทศไทยการใช้ถ่านไม้จากการเผาถ่านยังคงมีบทบาทสำคัญในครัวเรือนเกษตรกรรม โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบว่า การใช้ถ่านไม้เป็นพลังงานสำหรับกิจกรรมในครัวเรือนคิดเป็น 21 % ของพลังงานทั้งหมดในครัวเรือน ขณะเดียวกันในเขตชานเมืองและในเมืองมีสัดส่วนคิดเป็น 16 % และ 6 % ตามลำดับ [1] กระบวนการเผาถ่านปลดปล่อยความร้อนในปริมาณมากและมีศักยภาพในการนำความร้อนเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้เชิงสาธารณสุขประโยชน์ เช่น ระบบสูบน้ำเพื่อการอุปโภคและเกษตรกรรมในท้องถิ่น ซึ่งสามารถลดการพึ่งพาปั๊มน้ำไฟฟ้าและลดต้นทุนพลังงานของครัวเรือนได้ [2]

การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำกำลังไอน้ำมีการศึกษากันมาอย่างต่อเนื่องในแง่ผลของความดันเกจ อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิภายในถังขับเคลื่อนที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่สูบน้ำ ความสูงด้านดูดของระบบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ [3-5] แต่อย่างไรก็ตาม การสูญเสียความร้อนระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำกำลังไอน้ำต่ำ [6] เทคนิคการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการใช้วัสดุพูนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากคุณลักษณะพิเศษของวัสดุพูนที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนได้อย่างดี [7]

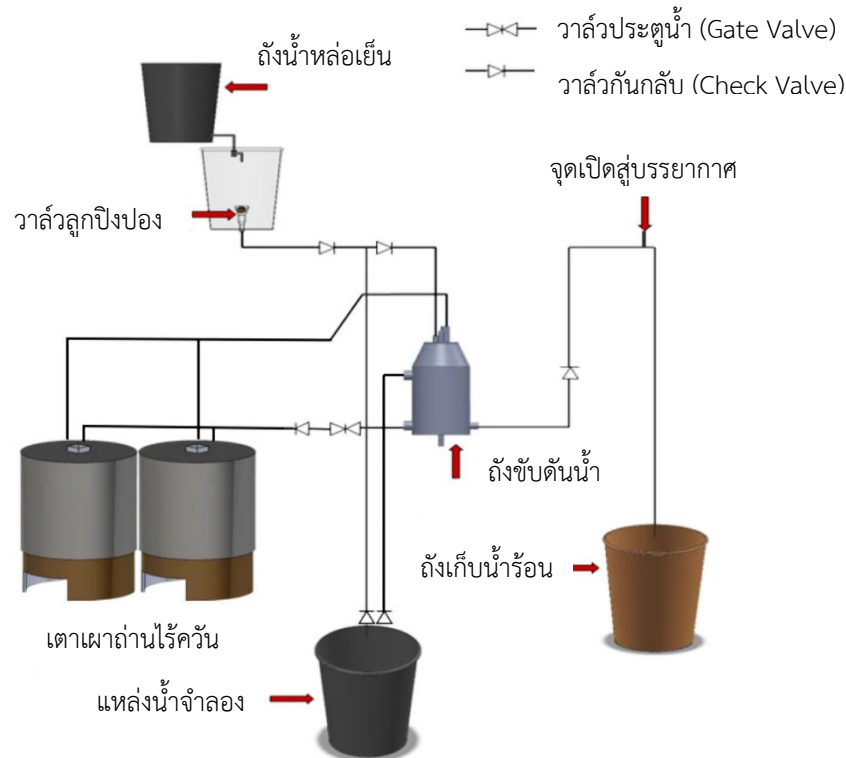
จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ามีการประยุกต์ใช้วัสดุพูนในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากความโดดเด่นในการดูดซับความร้อนของวัสดุพูนจึงน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำที่ใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่านเป็นแหล่งความร้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอุปกรณ์เก็บสะสมความร้อนจากวัสดุพูนชนิดเส้นใยหลักที่มีค่าความพูนเท่ากันแต่มีความหนาของวัสดุพูนแตกต่างกัน โดยติดตั้งบริเวณผนังด้านในส่วนผลิตไอน้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะให้กับปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำกรณีมีการติดตั้งวัสดุพูนที่มีความหนาของวัสดุพูนแตกต่างกันและกรณีไม่มีการติดตั้งวัสดุพูน งานวิจัยนี้มุ่งหวังในการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและสร้างสังคมคาร์บอนต่ำให้กับประเทศไทย

วิธีการวิจัย

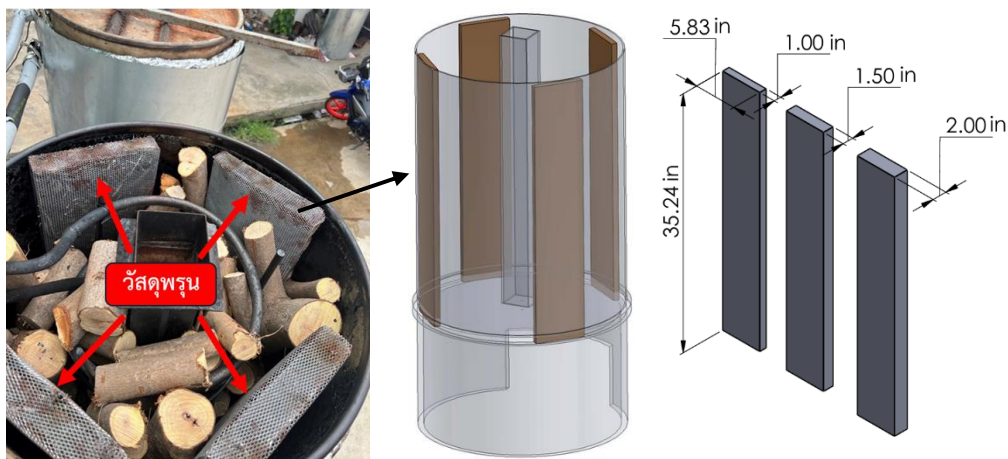
1) โครงสร้างระบบปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งจากการเผาถ่าน

การประยุกต์ใช้วัสดุพูนเพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระบบปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำ ดังภาพที่ 1 จากความร้อนเหลือทิ้งจากการเผาถ่าน ทำได้โดยการติดตั้งวัสดุพูนชนิดเส้นใย (Fibrous Porous Materials) ที่ได้จากเศษซีกกิ่ง

เหล็ก มีค่าความพรุน (Porosity) เท่ากับ 0.954 ถูกบรรจุในตาข่ายสแตนเลส 304 ซึ่งถูกนำมาตัดเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 148.08 mm สูง 895.10 mm ที่มีความหนา 25.4 mm 38.1 mm และ 50.8 mm ตามลำดับ ดังภาพที่ 2 เข้าไปในถังผลิตไอน้ำ (Heating Tank) ลักษณะเป็นถังเหล็กทรงกระบอกแนวตั้ง ขนาดความจุถึง 200 L จำนวน 2 ถัง ภายในติดตั้งชุดท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 mm หนา 0.75 mm ยาว 5,655 mm



ภาพที่ 1 โครงสร้างระบบปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำ



ภาพที่ 2 การติดตั้งวัสดุพรุนในส่วนผลิตไอน้ำ

2) การวิเคราะห์ระบบปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำ

การวิเคราะห์ระบบปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำในงานวิจัยนี้ เน้นวิเคราะห์ค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ตัวแปรที่ตรวจวัดเพื่อนำมาประกอบการ

วิเคราะห์ เช่น ค่าอุณหภูมิ เอนทัลปีด้านดูดและด้านจ่าย ปริมาณน้ำที่สูบน้ำได้ และพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ เป็นต้น โดยค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบปั๊มสูบน้ำกำลังไอน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1-4

$$SEC = \frac{Q_{in}}{V_{total}} \quad (1)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (kJ/L) Q_{in} คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับระบบ (kW) และ V_{total} คือ ปริมาณน้ำที่สูบน้ำได้ทั้งหมด (L/s)

$$Q_{in} = \frac{(HHV' \cdot m)_{Wood} - (HHV' \cdot m)_{Charcoal}}{t_{total}} \quad (2)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg) m คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg) t_{total} คือ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (s)

$$h_{th} = \frac{Q_s}{Q_{in}} \cdot 100 \quad (3)$$

เมื่อ h_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน Q_s คือ ปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับ (kW)

$$Q_s = \dot{m}_w \cdot C_{p,w} \cdot (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s) $C_{p,w}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg K) $T_{w,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำออกจากถังผลิตไอน้ำ (K) $T_{w,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำเข้าถังผลิตไอน้ำ (K)

3) วิธีการทดลอง

เมื่อตรวจเช็คความพร้อมของระบบปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำและติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ว ไม้ที่ได้จากภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปริมาณ 60 kg ถูกบรรจุในเตาเผาถ่านหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับ ไม่ถูกใช้ในการเผาถ่านและเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้กับระบบปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของไม้ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น ระดับเอนทัลปีด้านดูด เท่ากับ 3 m และเอนทัลปีด้านส่ง เท่ากับ 1 m หลังจากนั้น มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) ติดตั้งวัสดุพูนชนิดเส้นใยที่มีความหนา 25.4 mm จำนวน 4 ชุดในแนวตั้งตามแนวรัศมีรอบเตาเผาถ่านแต่ละเตา ด้วยระยะห่างที่เท่ากัน

2) บรรจุน้ำเข้าไปในชุดท่อทองแดงภายในถังผลิตไอน้ำผ่านถังขัดดันน้ำจนกระทั่งน้ำเต็มระบบ

3) จุดเตาเผาถ่านทั้ง 2 เตาพร้อมกัน พร้อมกับเริ่มบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 sec ในกระบวนการเผาถ่านใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงต่อการทดลอง เมื่อสิ้นสุดการเผาถ่านในแต่ละรอบ ถ่านชีวภาพ (Charcoal) ที่ได้จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

4) เมื่อความดันในถังขัดดันเพิ่มขึ้นระบบปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำจะสูบน้ำจากแหล่งน้ำและจ่ายไปยังถังเก็บน้ำ ถือเป็น 1 รอบการทำงาน ระยะเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลการสูบน้ำทั้งหมดคือ 120 min แล้วบันทึกปริมาณน้ำที่สูบน้ำได้ และหยุดบันทึกค่าอุณหภูมิ เก็บข้อมูลซ้ำ 2 รอบการทำงาน

5) ทำซ้ำตามข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนความหนาของวัสดุพูนเป็น 38.1 mm และ 50.8 mm ตามลำดับ

6) นำข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1) พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบปั้มน้ำกำลังไอน้ำ

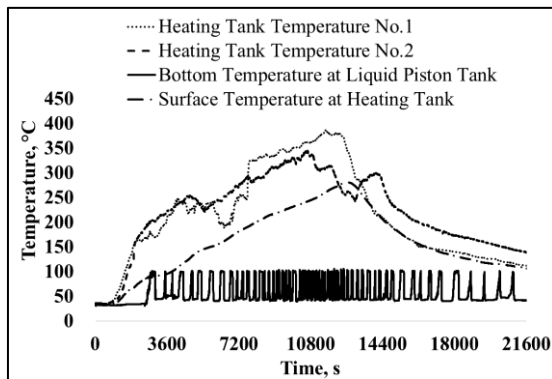
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในถังขั้ต้นน้ำ (Bottom Temperature at Liquid Piston Tank) กับอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำ (Heating Tank Temperature) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นจำนวนความร้อนในการสูบน้ำที่มีการติดตั้งวัสดุพูนที่มีความหนา 25.4 mm 38.1 mm และ 50.8 mm ตามลำดับ กับกรณีไม่มีการติดตั้งวัสดุพูน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังภาพที่ 3 ทุกกรณีอุณหภูมิภายในถังขั้ต้นน้ำและถังผลิตไอน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนจากการเผาไหม้ของไม้ภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน ทำให้สารอินทรีย์ในเนื้อไม้เป็นรูปเป็นถ่าน เรียกว่า คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) โดยที่อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดในขั้นตอนการคายความร้อนและหลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากขั้นตอนการทำให้เย็นตัว

จากภาพที่ 3a กรณีไม่ติดตั้งวัสดุพูนพบว่า เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นถึง 200 °C (ผ่านไป 45 นาที) ระบบจะเริ่มสูบน้ำด้วยความถี่ในการสูบน้ำค่าหนึ่ง กระทั่งอุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่า 300 °C (ผ่านไป 3 ชั่วโมง) สังเกตได้ว่า ความถี่ในการสูบน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในถังขั้ต้นน้ำและอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำสูงสุดเท่ากับ 106.1 °C และ 386.8 °C ตามลำดับ ส่งผลให้ในช่วงดังกล่าวมีปริมาณความร้อนสะสมในระบบสูงที่สุดจึงมีอัตราในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ขับเคลื่อนน้ำได้เร็วที่สุดด้วย หลังจากนั้น เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 200 °C ความถี่ในการสูบน้ำจะกลับมาใกล้เคียงกับช่วง 45 นาทีแรก สุดท้ายเมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 100 °C ระบบจะไม่สามารถสูบน้ำได้ หากพิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนังถังผลิตไอน้ำพบว่า อุณหภูมิผิวผนังภายนอกถังผลิตไอน้ำ (Surface Temperature at Heating Tank) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 150.2 °C

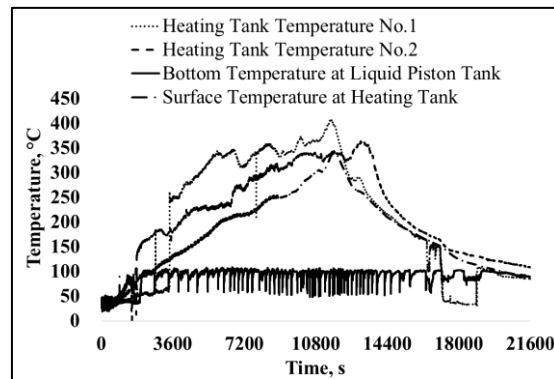
จากภาพที่ 3b กรณีติดตั้งวัสดุพูนหนา 25.4 mm พบว่า เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นถึง 160 °C (ผ่านไป 35 นาที) ระบบจะเริ่มสูบน้ำด้วยความถี่ในการสูบน้ำค่าหนึ่ง กระทั่งอุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่า 300 °C (ผ่านไป 2 ชั่วโมง 15 นาที) สังเกตได้ว่า ความถี่ในการสูบน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในถังขั้ต้นน้ำและอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำสูงสุดเท่ากับ 109.1 °C และ 408.3 °C ตามลำดับ ส่งผลให้ในช่วงดังกล่าวมีปริมาณความร้อนสะสมในระบบสูงที่สุดจึงมีอัตราในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ขับเคลื่อนน้ำได้เร็วที่สุดด้วย หลังจากนั้น เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 200 °C ความถี่ในการสูบน้ำจะกลับมาใกล้เคียงกับช่วง 35 นาทีแรก สุดท้ายเมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 100 °C ระบบจะไม่สามารถสูบน้ำได้ หากพิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนังถังผลิตไอน้ำพบว่า อุณหภูมิผิวผนังภายนอกถังผลิตไอน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 164.4 °C

จากภาพที่ 3c กรณีติดตั้งวัสดุพูนหนา 38.1 mm พบว่า เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นถึง 180 °C (ผ่านไป 60 นาที) ระบบจะเริ่มสูบน้ำด้วยความถี่ในการสูบน้ำค่าหนึ่ง กระทั่งอุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่า 300 °C (ผ่านไป 1 ชั่วโมง 35 นาที) สังเกตได้ว่า ความถี่ในการสูบน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในถังขั้ต้นน้ำและอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำสูงสุดเท่ากับ 105.6 °C และ 403.2 °C ตามลำดับ ส่งผลให้ในช่วงดังกล่าวมีปริมาณความร้อนสะสมในระบบสูงที่สุดจึงมีอัตราในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ขับเคลื่อนน้ำได้เร็วที่สุดด้วย หลังจากนั้น เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 180 °C ความถี่ในการสูบน้ำจะกลับมาใกล้เคียงกับช่วง 60 นาทีแรก สุดท้ายเมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 100 °C ระบบจะไม่สามารถสูบน้ำได้ หากพิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนังถังผลิตไอน้ำพบว่า อุณหภูมิผิวผนังภายนอกถังผลิตไอน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 136.9 °C

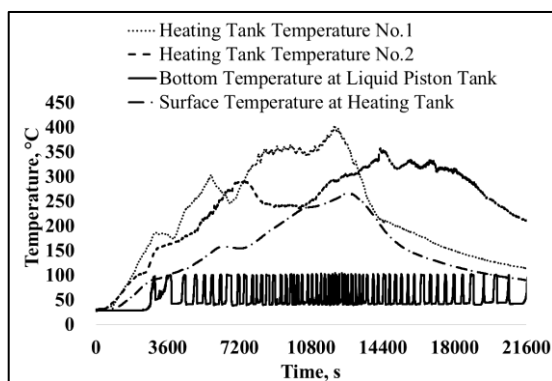
จากภาพที่ 3d กรณีติดตั้งวัสดุพูนหนา 50.8 mm พบว่า เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นถึง 210 °C (ผ่านไป 45 นาที) ระบบจะเริ่มสูบน้ำด้วยความถี่ในการสูบน้ำค่าหนึ่ง กระทั่งอุณหภูมิถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่า 300 °C (ผ่านไป 1 ชั่วโมง 40 นาที) สังเกตได้ว่า ความถี่ในการสูบน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในถังขั้ต้นน้ำและอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำสูงสุดเท่ากับ 106 °C และ 409.5 °C ตามลำดับ ส่งผลให้ในช่วงดังกล่าวมีปริมาณความร้อนสะสมในระบบสูงที่สุดจึงมีอัตราในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ขับเคลื่อนน้ำได้เร็วที่สุดด้วย หลังจากนั้น เมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 210 °C ความถี่ในการสูบน้ำจะกลับมาใกล้เคียงกับช่วง 45 นาทีแรก สุดท้ายเมื่ออุณหภูมิถังผลิตไอน้ำลดลงต่ำกว่า 100 °C ระบบจะไม่สามารถสูบน้ำได้ หากพิจารณาความร้อนสูญเสียผ่านผนังถังผลิตไอน้ำพบว่า อุณหภูมิผิวผนังภายนอกถังผลิตไอน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 148.9 °C



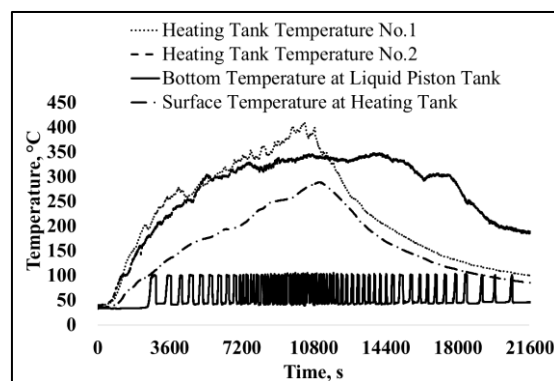
a) กรณีไม่มีการติดตั้งวัสดุพูน



b) กรณีติดตั้งวัสดุพูนหนา 25.4 mm



c) กรณีติดตั้งวัสดุพูนหนา 38.1 mm



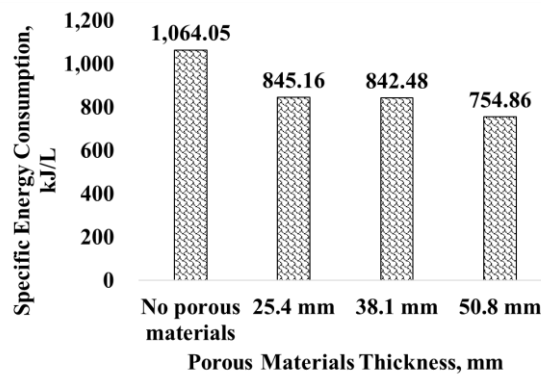
d) กรณีติดตั้งวัสดุพูนหนา 50.8 mm

ภาพที่ 3 อุณหภูมิภายในถังต้มน้ำ ถังผลิตไอน้ำ และผนังด้านนอกถังผลิตไอน้ำ

หากพิจารณาจากผลการทดลองในภาพที่ 3 พบว่า การสูญเสียความร้อนผ่านผนังถังผลิตไอน้ำยังคงมีค่าที่สูง สังเกตได้จากอุณหภูมิผิวผนังภายนอกถังผลิตไอน้ำมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 130 °C ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการติดตั้งวัสดุพูน นั้นแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งวัสดุพูนภายในผนังถังผลิตไอน้ำยังช่วยลดการสูญเสียความร้อนได้น้อยสำหรับถังผลิตไอน้ำที่มีผนังชั้นเดียว ทั้งนี้มาจากความสามารถในการสะสมความร้อนของวัสดุพูน

2) ค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของระบบปั้มน้ำกำลังไอน้ำ

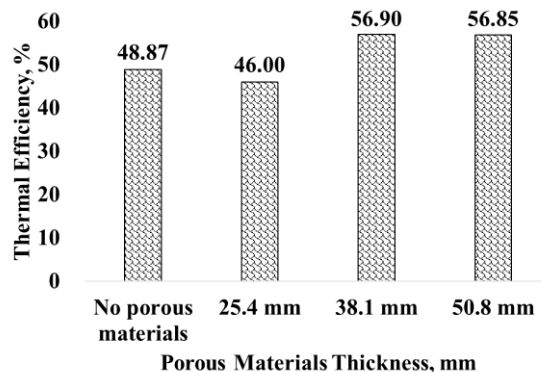
การติดตั้งวัสดุพูนช่วยลดค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของระบบปั้มน้ำกำลังไอน้ำ (SEC) เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ (Q_{in}) ลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่สูบได้ จากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่า การติดตั้งวัสดุพูนหนา 50.8 mm มีค่า SEC ต่ำที่สุดเท่ากับ 754.86 kJ/L ในขณะที่กรณีไม่มีการติดตั้งวัสดุพูนมีค่า SEC สูงที่สุดเท่ากับ 1,064.05 kJ/L ดังนั้น การติดตั้งวัสดุพูนหนา 25.4 mm 38.1 mm และ 50.8 mm จึงช่วยลดการใช้พลังงานเท่ากับ 20.57% 20.82% และ 29.06% ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุพูนที่หนากว่าจะสามารถสะสมความร้อนรวมได้มากกว่า เพราะมีมวลรวมและปริมาตรของวัสดุพูนที่มากกว่า ถึงแม้ว่าจะมีค่าความพูนเท่ากัน จึงสรุปได้ว่า ค่า SEC จะแปรผกผันกับความหนาของชั้นวัสดุพูน และเพื่อให้ระบบปั้มน้ำกำลังไอน้ำประหยัดพลังงานควรมีค่า SEC ต่ำ



ภาพที่ 4 ค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของระบบปั้มน้ำกำลังไอน้ำ

3) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบปั้มน้ำด้วยกำลังไอน้ำ

การติดตั้งวัสดุพูนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบปั้มน้ำด้วยกำลังไอน้ำ (h_{th}) เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ (Q_{in}) ลดลงเป็นผลมาจากการดูดซับความร้อนของวัสดุพูน ดังภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าการติดตั้งวัสดุพูนหนา 38.1 mm และ 50.8 mm มีค่า h_{th} สูงใกล้เคียงกันคิดเป็น 56.9% ในขณะที่กรณีไม่มีการติดตั้งวัสดุพูนมีค่า h_{th} เท่ากับ 48.87% ดังนั้น การติดตั้งวัสดุพูนหนา 38.1 mm และ 50.8 mm มีจึงมีนัยสำคัญในการช่วยลดการใช้พลังงาน จึงสรุปได้ว่า ค่า h_{th} จะแปรผันตรงกับความหนาของชั้นวัสดุพูน และเพื่อให้ระบบปั้มน้ำกำลังไอน้ำประหยัดพลังงานควรมีค่า h_{th} สูง



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบปั้มน้ำกำลังไอน้ำ

สรุปผลการวิจัย

ระบบปั้มน้ำด้วยกำลังไอน้ำจากความร้อนเหลือทิ้งจากการเผาถ่านไม้ ปริมาณ 60 kg ที่กำหนดระดับเฮดสถิตด้านดูด เท่ากับ 3 m และเฮดสถิตด้านส่ง เท่ากับ 1 m โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของปั้มน้ำกำลังไอน้ำระหว่างการมีและไม่มีการติดตั้งวัสดุพูนชนิดเส้นใยภายในถังผลิตไอน้ำ ผลการวิจัยสรุปได้ว่าการติดตั้งวัสดุพูนหนา 38.1 mm และ 50.8 mm ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ 8% และช่วยลดค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของปั้มน้ำกำลังไอน้ำได้ 20.82% และ 29.06%

เพื่อพัฒนาต่อยอดงานวิจัยนี้ในอนาคต ประเด็นที่น่าสนใจคือ การติดตั้งวัสดุพูนหนาน้อย 38.1 mm ขึ้นไปเพิ่มให้รอบผนังด้านในถังผลิตไอน้ำร่วมกับการทำผนังถังผลิตไอน้ำแบบสองชั้นโดยใช้ช่องว่างตรงกลางทำหน้าที่เป็นฉนวนคาดว่าจะช่วยเพิ่มการสะสมความร้อนและปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนในประเด็นของการวิเคราะห์ความ

คุ่มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ภายใต้เงื่อนไขต้นทุนเริ่มต้นในการสร้างระบบปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำเท่ากับ 20,000 บาท อายุโครงการเท่ากับ 5 ปี และอัตราคิดลด (Discount Rate) เท่ากับ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายเครื่องสูบน้ำเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยอากาศที่มีอัตราการสูบน้ำ 630 L/min และอัตราการใช้เชื้อเพลิง 1.52 L/h ที่มีราคาเท่ากับ 25,060 บาท ผลการวิเคราะห์พบว่า ระบบปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำที่สร้างขึ้นนี้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) เท่ากับ 74,997.12 บาท และมีค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return; IRR) เท่ากับ 123.03% นั้นแสดงให้เห็นว่า งานวิจัยนี้มีความคุ้มค่าอย่างมากในเชิงเศรษฐศาสตร์และเหมาะสำหรับการลงทุนหรือขยายผลในระดับชุมชนหรือเกษตรกรกรรม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม งบประมาณโครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 ตามสัญญาเลขที่ FF68/NKR/148 และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีของวัสดุพูน (DiTo-Lab) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Butnan, S., Toomsan, B. and Vityakon, P. (2018). Charcoal Production and Distribution as a Source of Energy and its Potential Gain for Soil Amendment in Northeast Thailand. *Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities*. 26(2), 643-658.
- [2] Tipayawong, N., Chaichana, C., Promwungkwa, A. and Rerkkriangkrai, P. (2013). Investigation of a Small Biomass Gasifier-engine System Operation and Its Application to Water Pumping in Rural Thailand. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 35, 476-486. doi: 10.1080/15567036.2010.511433.
- [3] เกรียงไกร เฉลิมธารณ์ พิชัย นามประกาย และนริส ประทินทอง. (2556). “ปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำโดยการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้”, ใน **การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 10**, 1476-1483. วันที่ 6-7 ธันวาคม 2556 ณ อาคารศูนย์เรียนรวม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม. นครปฐม : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] ภาณุศักดิ์ มูลศรี ปองพล รักการงาน ชลิตล อินยาศรี และกังสดาล สกุลพงษ์มาลี. (2558). “เครื่องสูบน้ำพลังงานความร้อนจากถ่านไม้สำหรับชุมชน”, ใน **การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8**, 324-326. วันที่ 4-6 พฤศจิกายน 2558 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [5] พยัพ สลับศรี จิรวัดน์ สิตราชนนท์ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ กรณัญญ์ นาคภิบาล และภาณุศักดิ์ มูลศรี. (2566). การศึกษาการควบคุมความดันเกจที่ส่งผลต่อการสูบน้ำของระบบสูบน้ำด้วยไอน้ำแบบอัตโนมัติ. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*. 5(2), 223-238.
- [6] นิวัฒน์ เกตุชาติ ภาณุศักดิ์ มูลศรี ปฏิวัติ วรามิตร และบัณฑิต กฤตดาตม. (2567). “การประยุกต์ใช้วัสดุพูนสำหรับระบบสูบน้ำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากการผลิตถ่าน”, ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38 ประจำปี 2567**, 40-48. วันที่ 16-19 กรกฎาคม 2567 ณ โรงแรมโนโวเทล กรุงเทพฯ ฟิวเจอร์พาร์ค รังสิต จังหวัดปทุมธานี. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [7] รุกฤต ปานชลป. (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพูน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม*. 1(2), 1-10.

การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ครั้งที่ 18 (TREC-18)

หัวข้อบทความ :

เทคโนโลยีพลังงานสำหรับชุมชน-จากทฤษฎีสู่การปฏิบัติ

การควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์สำหรับชุมชนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Production Control of Biochar for Community using Microcontroller

นงนุช ศรีเล็ก¹, อนุพงษ์ สมพฤกษ์², มิ่งขวัญ สมพฤกษ์¹, วิลาสินี ศรีสุวรรณ¹, ธนพล แสงสุวรรณ¹, ชัชชัย วรพัฒน์²,
วิภาพ ใจแข็ง¹, จริญญา คนแรง¹, ปรศักดิ์ งามสมภาค³, กมลชนก สว่างศิลป์³, กิตติภพ เพ็ชรเมื่อด³, สิทธิกฤต เหล็กพูล¹,
นเรศ ไหญ่วางศ์¹, และ ปรานต์ เมฆอาภาศ^{1*}

Nongnoot Srilek¹, Anuphong Somphruek², Mingkwan Somphruek¹, Wilasinee Srisuwan¹, Tanaphon
Saengsuwan¹, Chatchai Vorapat², Wipobh Jaikhang¹, Jarun Khonrang¹, Porrasak Ngamsompark³,
Kamolchanok Sawangsill³, Kittiphop pedmed³, Sitthikrit Leckpool¹, Naret Yaiwong¹, and Pran Makarkard^{1*}

¹โปรแกรมวิชาวิศวกรรมพลังงานและเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

²สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

³สำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงราย ศูนย์ราชการกรมโยธาธิการ ตำบลริมกก อำเภอเมืองเชียงราย

¹ Energy Engineering and Electrical Technology Program, Faculty of Industrial Technology
Chiang Rai Rajabhat University

² Industrial Arts Program, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

³ Provincial Energy of Chiang Rai, Chiang Rai Province, Rimkok Sub-district, Muang Chiang Rai

¹Corresponding author: Tel.: 08 4617 9508. E-mail address: pran.mak@crru.ac.th

Abstract

This study aims to ensure consistent quality control in biochar production and to enable reproducibility by integrating non-complex measurement technologies. These technologies are practical for community implementation and utilize microcontrollers for the application. The reaction temperature was 300 °C and 350 °C, and the reaction duration was 60 minutes. The 200-liter reactor was equipped with a temperature measurement system. Two types of biomasses were used for testing: bamboo (BB) and wasted coffee beans (WCB). The calorific value of bamboo biochar (B-BB) and wasted coffee bean biochar (B-WCB) were 30.24±2.74 and 33.67±1.27 MJ/kg, respectively. The mass yield of B-BB was 32.67 %, while B-WCB yielded 40.00 %. The energy yield was 53.70% and 68.36% for bamboo biochar (B-BB) and wasted coffee bean biochar (B-WCB), respectively. The energy densification ratio of B-WCB was 1.70, which was higher than that of 1.64 of B-BB.

Keywords: Biochar, Production control, Renewable energy, Microcontroller

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพในการผลิตไบโอชาร์ให้มีคุณภาพคงที่ สามารถทำซ้ำได้ โดยบูรณาการเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดที่ไม่ซับซ้อน ชุมชนสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาเป็น 300 °C และ 350 °C และระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ติดตั้งระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ชีวมวล 2 ชนิดใช้ในการทดสอบได้แก่ ไม้ไผ่ และเมล็ดกาแฟคั่วทั้ง พบว่า ค่าความร้อนของไบโอชาร์จากชีวมวลไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟคั่วทั้งเป็น 30.24±2.74 MJ/kg และ 33.67±1.27 MJ/kg สัดส่วนมวลของไบโอชาร์ไม้ไผ่เป็น 32.67

% ส่วนไบโอชาร์จากเมล็ดกาแฟคั่วทั้งเป็น 40.00 % สัดส่วนพลังงานเป็น 53.70 และ 68.36 % สำหรับไบโอชาร์ไม้ไผ่ และไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคั่วทั้ง ตามลำดับ สัดส่วนความหนาแน่นพลังงานของเมล็ดกาแฟคั่วทั้งมีค่า 1.70 ซึ่งสูงกว่าไม้ไผ่ซึ่งมีค่าเป็น 1.64

คำสำคัญ: ไบโอชาร์ การควบคุมการผลิต พลังงานทดแทน ไมโครคอนโทรลเลอร์

การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์
กรณีศึกษา : เกษตรกรผู้ปลูกยางพาราเขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวด อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์
Utilizing Internet of Things Technology for Enhanced Solar Energy Water
Management : Case Study Rubber Farming in the Ban Kruat Self-Help Settlement, Ban
Kruat District, Buriram Province

ณัฐวุฒิ พจน์ปริญญา และ ดุสิต อุทิศสุนทร*
Natthawut Potparinya and Dusit Uthitsunthorn*

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ บุรีรัมย์ 31000
Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriram Rajabhat University, Buriram 31000

¹Corresponding author: Tel.: 08-60258810. E-mail address: dusit.ut@bru.ac.th

Abstract

This research aims to apply Internet of Things (IoT) technology to connect environmental irrigation data for solar-powered water management by rubber farmers in the Ban Kruat Self-Help Settlement, Buriram Province. The rubber plantation area measures 14 meters in width and 42 meters in length. The experimental system was installed with a solar cell system designed to store electrical energy in a 24-volt battery, which was then used to power a 24-volt, 375-watt DC sprinkler water pump. In addition, an inverter was installed to convert DC to AC power for network equipment that distributes Internet connectivity for data transmission and collection through a data logger operating continuously for 24 hours. This system enabled online monitoring and control of irrigation devices. The experimental results showed that the battery was fully charged within 7 hours. The sprinkler pump operated automatically based on sensor thresholds set at 70% relative humidity, 25% soil moisture, and a temperature of 28°C. The rubber yield increased by approximately 20 kilograms per week. The automated irrigation system operated successfully under the conditions required for efficient water management in the rubber plantation.

Keywords: Internet of Things, Solar energy, Water management

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ในการเชื่อมต่อข้อมูลการให้น้ำตามสภาพแวดล้อมเพื่อการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราพื้นที่ปลูกยางพาราขนาด กว้าง 14 เมตร ยาว 42 เมตร เขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ ระบบทดสอบทำการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์เพื่อเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่แล้วนำมาใช้กับปั๊มน้ำสปริงเกอร์กระแสน้ำขนาด 24 โวลต์ 375 วัตต์ที่ อีกทั้งติดตั้งอินเวอร์เตอร์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับอุปกรณ์เครือข่ายที่ทำหน้าที่กระจายสัญญาณเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตในการส่งและเก็บรวบรวมบันทึกค่าข้อมูล(Data logger) ในเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อประเมินผลควบคุมอุปกรณ์แบบออนไลน์ จากการทดสอบพบว่าระบบทำการอัดประจุแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ จนเต็มใช้ระยะเวลา 7 ชั่วโมง ปั๊มน้ำสปริงเกอร์สามารถทำงานตามขอบเขตปรับตั้งเซ็นเซอร์ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70 % ความชื้นในดิน 25% และอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส มีผลผลิต

ยางพาราเพิ่มขึ้นปริมาณ 20 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ ระบบการให้น้ำในสวนยางแห่งนี้สามารถทำงานตามเงื่อนไขในการบริหารจัดการน้ำในสวนยางพารา

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง พลังงานแสงอาทิตย์ การบริหารจัดการน้ำ

การทดสอบระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าในการควบคุมการไหลอัตโนมัติ
สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาก

Performance Testing of an Automatic Flow Control System Using a Motorized Valve for
a Micro Hydropower Generator

ยุทธนา ทองอินทรราช¹ พลากร พรหมเมศรี^{2*} ปรุฬห์ มะยะเฉียว³ และ ชลธิศา รัตนชู⁴

Yoothana Thonginthat¹ Palakorn Prommet^{2*} Paroon Mayachearw³ and Chonthisa Rattanachu⁴

¹สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

³สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

¹Department of Technology and Innovation Management, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

⁴Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat 96000

*Corresponding author: Tel.: 081-5426986. E-mail address: palakorn.ep@gmail.com

Abstract

This research presents the development of an automatic electric valve control system for very small-scale hydropower plants using an ESP32 microcontroller in conjunction with a Hall-effect flow sensor (YF-DN50). The system controls a motorized ball valve in real time to maintain the target flow rate. Experimental results within the range of 10-200 liters per minute showed that the system accurately maintained the flow rate close to the set target, with standard deviations between 0.3 and 1.2 liters per minute and relative errors below 2 percent, except at the lowest target of 10 Liters per minute, where the error exceeded 5 percent. In addition, the highest stability was observed at target flow rates above 150 Liters per minute. These findings demonstrate the potential of using a low-cost automatic flow control system to improve efficiency and sustainability in very small-scale hydropower generation.

Keywords: Micro Hydropower, Flow Control System, Motorized Valve

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาก โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลแบบ Hall Effect (YF-DN50) เพื่อควบคุมวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลแบบบอลวาล์วให้คงอัตราการไหลตามค่าเป้าหมาย ณ เวลาจริง ผลการทดลองในช่วง 10-200 ลิตรต่อนาที พบว่าระบบสามารถรักษาค่าอัตราการไหลใกล้เคียงค่าเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ระหว่าง

0.3-1.2 ลิตรต่อนาที่ และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นที่ค่าเป้าหมายต่ำสุด ซึ่งสูงกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยในช่วงค่าเป้าหมายที่สูงกว่า 150 ลิตรต่อนาที่ที่มีความเสถียรมากที่สุด ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ ระบบควบคุมอัตราการไหลอัตโนมัติราคาประหยัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาก

คำสำคัญ : พลังน้ำขนาดเล็กมาก, ระบบควบคุมอัตราการไหล, วาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหล

บทนำ

ปัจจุบัน ในประเทศไทย แม้โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดใหญ่จะเป็นที่รู้จักมานาน แต่โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก และขนาดเล็กมาก (Micro Hydropower) กลับมีบทบาทสำคัญในชนบท เพราะช่วยตอบสนองความต้องการไฟฟ้าพื้นฐานโดยไม่ต้องพึ่งสายส่งขนาดใหญ่ อีกทั้งยังสอดคล้องกับนโยบายพลังงานทดแทนของไทย (PDP, AEDP, EEP) ที่มุ่งเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานน้ำขนาดเล็ก ซึ่งถูกยกให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมต่อการพัฒนาพลังงาน ในชนบท [2]

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น อัตราการไหล ระดับความสูง (Head) และประสิทธิภาพของกังหัน หากการไหลไม่คงที่ จะทำให้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพลดลง รวมทั้งเสี่ยงต่อความเสียหายของอุปกรณ์ ปัญหาที่พบโดยทั่วไปคือการควบคุมการไหลยังอาศัยการเปิดและปิดวาล์วแบบแมนนวล ซึ่งขาดความแม่นยำและตอบสนองไม่ทันต่อการเปลี่ยนแปลง [4] เพื่อลดข้อจำกัดนี้ งานวิจัยหลายชิ้นได้เสนอแนวทางใหม่ เช่น การควบคุมความเร็วรอบกังหันแบบปรับค่าได้ (Variable Speed Control, VSC) เพื่อเพิ่มผลผลิตไฟฟ้าและลดการสูญเสีย [1] ขณะเดียวกัน การใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมกับการทดลองจริง ก็ช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความเร็วรอบ และประสิทธิภาพได้อย่างละเอียด ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบระบบควบคุม [5-6]

ดังนั้น การพัฒนาระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลอัตโนมัติเพื่อควบคุมอัตราการไหลที่ทำงานแบบ วนเวลาจริงจึงมีความสำคัญ ระบบดังกล่าวสามารถตรวจวัดและควบคุมวาล์วควบคุมการไหล (Motorized Ball Valve) ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลแบบ Hall Effect และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อรักษาค่าอัตราการไหล ให้คงที่อยู่ที่ค่าเป้าหมาย โดยค่าเป้าหมาย คือ ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ และส่งผลให้กังหันน้ำทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดความเสี่ยงจากความผันผวนของปริมาณน้ำ และเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม และยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

วิธีการวิจัย

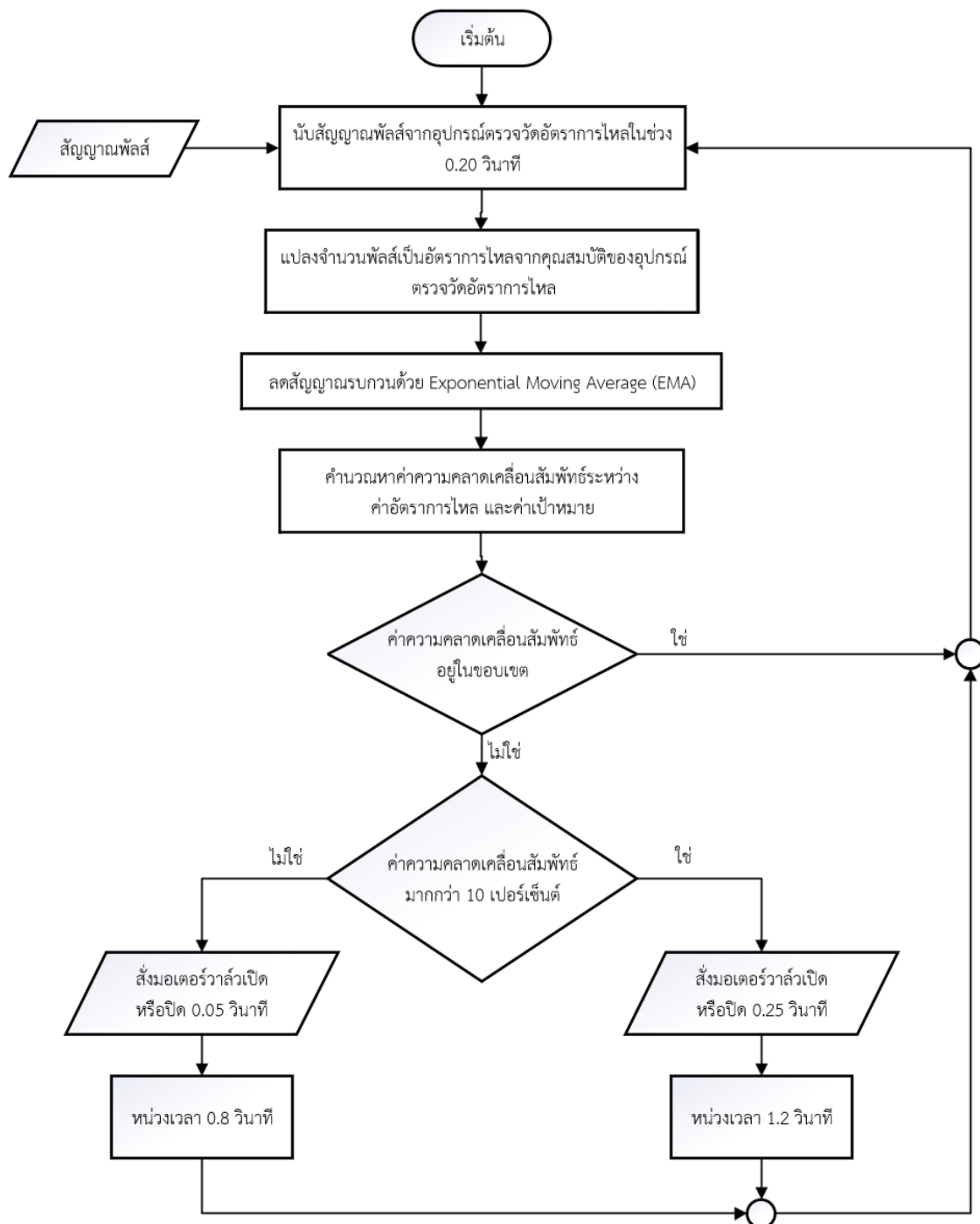
ในการออกแบบระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลอัตโนมัติ จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลแบบ Hall Effect (YF-DN50) ซึ่งใช้หลักการของการนับความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้น และแปลงเป็นค่าอัตราการไหล (ลิตรต่อนาที่) ตามคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัด ดังสมการที่ (1) จากนั้นจะทำการกรองค่าที่ได้ด้วยหลักการ Exponential Moving Average (EMA) ดังสมการที่ (2) เพื่อลดสัญญาณรบกวน [7] ถ้าค่าเป้าหมายมากกว่าค่าอัตราการไหล จะสั่งเปิดวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหล ถ้าค่าเป้าหมายน้อยกว่าค่าอัตราการไหล จะสั่งปิดวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลโดยอาศัยสัญญาณพัลส์เปิดและปิดเป็นช่วง ๆ แล้วหยุดรอเพื่อให้อัตราการไหล และแรงดันเข้าสู่สภาวะคงที่ หลักการดังกล่าวเป็นการประยุกต์แนวคิดจาก Pulse Width Modulation (PWM) [3] ดังภาพที่ 1

$$F = 0.2Q \quad (1)$$

โดย F คือ จำนวนพัลส์ต่อ 1 วินาที
 Q คือ อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที่)

$$Y_n = \alpha M + (1 - \alpha)Y_{n-1} \quad (2)$$

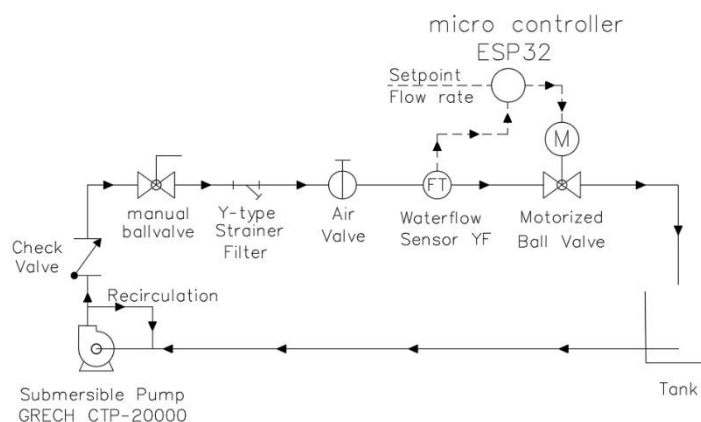
โดย Y_n คือ ผลลัพธ์รอบที่ n
 M คือ ค่าดิบของข้อมูล
 α คือ ค่าคงที่ถ่วงน้ำหนัก อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1



ภาพที่ 1 กระบวนการการทำงานของระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลอัตโนมัติ

ในการทดสอบนี้ ได้กำหนดขอบเขตความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้อยู่ที่ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของค่าเป้าหมาย และสูงสุด 1 ลิตรต่อวินาที เพื่อให้เกิดความแม่นยำสูงสุดในแต่ละช่วง และค่าคงที่ถ่วงน้ำหนักที่ 0.20 โดยค่าเป้าหมาย ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190 และ 200 ลิตรต่อวินาที บันทึกข้อมูลทุกช่วงเวลา 1 วินาทีอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 30 นาที และทำทดสอบกับระบบน้ำวน ขนาดท่อ PVC 2 นิ้ว โดยระบบสามารถสร้างอัตราการไหลสูงสุด 13,500 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 225 ลิตรต่อวินาที ร่วมกับระบบการหมุนเวียน

(Recirculation) มีการติดตั้งอุปกรณ์กรองน้ำ (Strainer Filter) และอุปกรณ์ระบายอากาศ (Air Valve) เพื่อลดสิ่งรบกวนทางกายภาพต่ออุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลให้ได้มากที่สุด ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบและระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลอัตโนมัติ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดลองควบคุมอัตราการไหลของระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลอัตโนมัติเพื่อควบคุมอัตราการไหลในแต่ละค่าเป้าหมาย อยู่ในช่วง 10 ถึง 200 ลิตรต่อนาที โดยบันทึกข้อมูลผลการทดลองทุก 1 วินาที ต่อเนื่อง 30 นาที ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลอัตโนมัติเป็นเวลา 30 นาที

ค่าเป้าหมาย	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย	S.D.	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย	S.D.	จำนวนครั้งการสั่งเปิด	จำนวนครั้งการสั่งปิด
10	9.94	0.67	5.34	4.05	453	468
20	19.93	0.32	1.11	1.18	88	84
30	30.18	0.44	1.26	0.94	65	77
40	40.02	0.45	0.72	0.86	135	114
50	49.89	0.56	0.85	0.76	161	156
60	59.96	0.52	0.61	0.62	115	129
70	69.97	0.56	0.55	0.58	126	129
80	80.05	0.52	0.46	0.46	109	125
90	90.06	0.43	0.35	0.33	107	82
100	100.11	0.45	0.34	0.32	113	116
110	110.00	0.87	0.61	0.50	377	382
120	120.08	0.81	0.47	0.49	202	208
130	130.00	0.74	0.43	0.37	209	191
140	140.14	0.56	0.30	0.28	59	67
150	150.10	0.59	0.27	0.29	36	31
160	160.22	0.70	0.35	0.29	62	66
170	169.91	0.86	0.42	0.29	90	84
180	180.01	0.61	0.24	0.24	20	35
190	190.25	1.20	0.37	0.53	65	65
200	200.29	0.68	0.26	0.26	145	58

ตารางที่ 1 อธิบายผลการทดสอบว่าค่าอัตราการไหลมีความใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายในทุกย่านการทำงาน โดยค่าที่วัดได้แตกต่างจากค่าเป้าหมายเพียงเล็กน้อย แสดงถึงความสามารถของระบบในการรักษาการไหลให้อยู่ใกล้ค่าเป้าหมาย นอกจากนี้ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอัตราการไหลมีค่าอยู่ในช่วง 0.3-1.2 ลิตรต่อนาที โดยทั่วไป ถือว่าต่ำ เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายในแต่ละย่านการทำงาน แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการไหลที่ได้มีความเสถียร และมีการแกว่งตัวเพียงเล็กน้อยตลอดการทดสอบ



ภาพที่ 3 จำนวนครั้งในการเปิดปิดวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลในแต่ละค่าเป้าหมาย

ภาพที่ 3 นำเสนอจำนวนครั้งในการเปิดปิดวาล์วไฟฟ้าควบคุมการไหลในแต่ละค่าเป้าหมาย พบว่าช่วงค่าเป้าหมายที่ต่ำมาก เช่น 10 ลิตรต่อนาที และช่วงกลาง 110-130 ลิตรต่อนาที มีจำนวนการสั่งเปิดและปิดวาล์วสูงกว่าช่วงอื่น แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่มีลักษณะไม่เชิงเส้นของวาล์วไฟฟ้าควบคุมอัตราการไหล [8] ขณะที่ในช่วงค่าเป้าหมายสูงกว่า 150 ลิตรต่อนาทีขึ้นไป การสั่งงานวาล์วลดลงและมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 4 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่าอัตราการไหลในแต่ละค่าเป้าหมาย

ภาพที่ 4 นำเสนอค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่าอัตราการไหลในแต่ละค่าเป้าหมาย พบว่าที่ค่าเป้าหมาย 10 ลิตรต่อนาที มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ และมีความแปรปรวนกว้างกว่าช่วงอื่น เนื่องจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลเอง ที่มีความสามารถในการวัดช่วง 10-300 ลิตรต่อนาที ในขณะที่เมื่อค่าเป้าหมายเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 20-200 ลิตรต่อนาที ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงมาอยู่ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และมีความสม่ำเสมอมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำในช่วงอัตราการไหลกลางถึงสูง แต่ยังมีข้อจำกัดในย่านการไหลต่ำสุด

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบควบคุมวาล์วไฟฟ้าอัตโนมัติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาก โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจวัดอัตราการไหลแบบ Hall Effect (YF-DN50) เพื่อควบคุมวาล์วในเวลาจริง ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบสามารถรักษอัตราการไหลให้อยู่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วง 10-200 ลิตรต่อนาที โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ในเกือบทุกกรณี ยกเว้นที่ค่าเป้าหมายต่ำสุด คือ 10 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหล ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของระบบในการเพิ่มความเร็ว และประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมากได้อย่างแท้จริง

ผลจากงานวิจัยนี้แนะนำให้ศึกษาสภาพของการใช้เทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ราคาประหยัด และหาได้ง่ายในท้องตลาดของประเทศไทยเพื่อยกระดับประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาก ทั้งยังสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่เน้นความยั่งยืน ความคุ้มค่า และการใช้งานจริงในพื้นที่ชนบทของประเทศไทยและภูมิภาคอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ และมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านวิชาการและอุปกรณ์ต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Barbón, L. Bayón, F. González-González, R. Georgious, **Variable-Speed Operation of Micro-Hydropower Plants in Reboluelo Micro-Hydropower Plant, Spain, *Applied Sciences*, vol. 13, no. 24, 13096, 2023.**
- [2] Ministry of Energy, **Thailand, *Thailand Power Development Plan (PDP), Alternative Energy Development Plan (AEDP), and Energy Efficiency Plan (EEP)*, Bangkok: Ministry of Energy, 2015–2036.**
- [3] Ogata, K., ***Modern Control Engineering*, 5th ed., Prentice Hall, 2010.**
- [4] Yuniarti, N., Hariyanto, D., Yatmono, S., & Abdillah, M. (2021). **Design and development of IoT based water flow monitoring for pico hydro power plant. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 15(7), 69–82. <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i07.18425>**
- [5] Darsono, F. B., Widodo, R. D., Rusiyanto, & Nurdin, A. (2022). **Analysis of the effect of flow rate and speed on four blade tubular water bulb-turbine efficiency using numerical flow simulation. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 90(2), 1–8. <https://doi.org/10.37934/arfmts.90.2.18>**
- [6] มนต์ชัย ทิวาวรรชัย. (2020). **การศึกษาอิทธิพลของวาล์วควบคุมอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.**
- [7] Alan Richard Wilson. (2014). **Event-triggered analog data acquisition using the exponential moving average. *IEEE Sensors Journal*, 14(6), 2048–2055. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2307878>**
- [8] Kang, H.-L., Park, H.-J., & Han, S.-H. (2022). **Investigation of the flow characteristics for cylinder-in-ball valve due to a change in the opening rate. *Applied Sciences*, 12(18), 8930. <https://doi.org/10.3390/app12188930>**

การประเมินประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบอัดอากาศ Performance Evaluation of Solar Energy for Compressed Air Systems

สิริศักดิ์ ปางวุฒินิชย์¹ วิรัชย์ โยชนรินทร์^{1,2*} วรเชษฐ์ แสงสีดา¹ ไวยิทธิ์ อุทัยเฉลิม¹ สันติ พลอยพรหม¹

ธนยศ คิตเมตตากุล¹ และ สุเทพ สีมาลา¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

² ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

*Corresponding author: Tel.: 02-5493433. E-mail address: wirachai.r@en.rmutt.ac.th

Abstract

This study developed a 3-kW floating photovoltaic (FPV) aeration system to address the high fossil-fuel-based electricity consumption in aquaculture farms, which incurs substantial operational costs (4,200 kg CO₂/year/farm) and is at risk of power outages. The system was tested in a 400 m² farm with 3 m depth over four months (August-November 2023). Results demonstrated that the FPV system produced an average compressed air output of 160 L/min (80 m³/day), increasing dissolved oxygen (DO) levels from 2.11 mg/L to 4.64 mg/L (120% increase), with component efficiencies of 19.28% for solar panels, 92.97% for inverters, and 45.50% for the aeration system, yielding an overall system efficiency of 8.15%. Although this efficiency was lower than the 72.40% efficiency of conventional fossil fuel-based systems, the FPV system achieved a 75% reduction in CO₂ emissions (2,956 kg/year), energy cost savings of 32,850 baht/year (at 4.50 baht/kWh electricity rate), and a payback period of 6 years (95% confidence interval: 5.5-6.5 years). Despite its 27.60% lower energy efficiency than conventional systems, the FPV system is suitable for small- to medium-scale farms due to reduced long-term operational costs, environmental benefits, and reduced power outage risk. Further data collection during summer seasons and investigation of impacts on aquatic organism survival rates are recommended.

Keywords : Floating photovoltaic, Aquaculture aeration, Compressed air oxygenation, Renewable energy systems, Dissolved oxygen enhancement, Solar energy utilisation, Sustainable aquaculture technology

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำ (FPV) ขนาด 3 kW เพื่อแก้ปัญหาการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลสูงในฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีต้นทุนดำเนินการสูง (4,200 kgCO₂/ปี) และมีความเสี่ยงจากไฟฟ้าดับ โดยทดสอบในฟาร์มขนาด 400 m² ความลึก 3 m เป็นเวลา 4 เดือน (สิงหาคม-พฤศจิกายน 2566) ผลการทดสอบพบว่าระบบ FPV สามารถผลิตอากาศอัดเฉลี่ย 160 L/min (80 m³/วัน) เพิ่มค่าออกซิเจนละลาย (DO) จาก 2.11 mg/L เป็น 4.64 mg/L (เพิ่มขึ้น 120%) มีประสิทธิภาพแผงโซลาร์เซลล์ 19.28% อินเวอร์เตอร์ 92.97% และระบบอัดอากาศ 45.50% ให้ประสิทธิภาพรวม 8.15% ซึ่งแม้จะต่ำกว่าระบบไฟฟ้าฟอสซิลที่มีประสิทธิภาพ 72.40% แต่สามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ 2,956 kg/ปี (ลด 75%) ประหยัดค่าพลังงาน 32,850 บาท/ปี (อัตราค่าไฟ 4.50 บาท/kWh) โดยมีระยะเวลาคืนทุน 6 ปี (ช่วงความเชื่อมั่น 95%: 5.5-6.5 ปี) ดังนั้นระบบ FPV จึงเหมาะสมสำหรับฟาร์มขนาดเล็ก-กลางเนื่องจากลดต้นทุนดำเนินการ

ระยะยาว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และลดความเสี่ยงจากไฟฟ้าดับ อย่างไรก็ตามควรเก็บข้อมูลต่อเนื่องในฤดูร้อนและศึกษาผลกระทบต่อการรบกวนชีวิตของสัตว์น้ำเพิ่มเติม

คำสำคัญ: โซลาร์เซลล์ลอยน้ำ, การเติมอากาศในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ, การเติมออกซิเจนด้วยอากาศอัด, ระบบพลังงานหมุนเวียน, การเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำ, การใช้พลังงานแสงอาทิตย์, เทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นภาคส่วนที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วและมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ แต่ยังคงเผชิญกับความท้าทายด้านการใช้พลังงานและความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ ระบบเติมอากาศแบบดั้งเดิมในฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่พึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้มีต้นทุนดำเนินการสูงและปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก ตามการศึกษาของ Wang et al. (2022) พบว่าฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดกลางที่ใช้ระบบเติมอากาศแบบดั้งเดิมปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 4,200 กิโลกรัมต่อปี ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อปัญหาภาวะโลกร้อน

ระบบบำบัดน้ำและเติมอากาศในปัจจุบันเผชิญกับปัญหาหลายประการที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไข ประการแรก ต้นทุนการดำเนินงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากราคาไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำให้เกษตรกรรายย่อยต้องแบกรับภาระค่าใช้จ่ายที่หนักขึ้น ประการที่สอง ระบบเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการหยุดชะงักเมื่อเกิดปัญหาไฟฟ้าดับ ซึ่งอาจส่งผลเสียหายร้ายแรงต่อสัตว์น้ำโดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทที่มีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าต่ำ ประการที่สาม ระบบแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพด้านพลังงานจำกัด โดยระบบอัดอากาศทั่วไปมีประสิทธิภาพเพียง 30-40% เท่านั้น (Li et al., 2023) ประการที่สี่ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีความรุนแรง โดยประมาณ 70% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกมีต้นกำเนิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Janjamraj & Thongchai, 2020)

แม้ว่าเทคโนโลยีพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์แบบโฟโตโวลเทอิก จะมีการพัฒนาก้าวหน้าอย่างมาก แต่การบูรณาการเข้ากับระบบเติมอากาศในฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำยังคงมีการศึกษาค้นคว้าจำกัด ระบบเติมอากาศบนผิวน้ำที่ติดตั้งบนแพลตฟอร์มพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ ได้แก่ น้ำกระเด็นทำให้แผงโซลาร์เซลล์สกปรก การสั่นไหวของคลื่นน้ำลดอายุการใช้งานของระบบ และสารหล่อลื่นเช่นจารบีปนเปื้อนลงแหล่งน้ำซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนเน้นย้ำถึงการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การลดของเสีย และการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสร้างความยั่งยืนในระยะยาว งานวิจัยนี้ตอบสนองต่อหลักการเหล่านี้โดยพัฒนาระบบอัดอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำที่แยกกลไกการอัดออกจากแหล่งน้ำ ทำให้ปราศจากการปนเปื้อนในขณะที่เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงสุด

วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนา ระบบอัดอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำขนาด 3 กิโลวัตต์สำหรับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำขนาด 400 ตารางเมตร พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพของระบบอย่างครอบคลุม ตั้งแต่ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ อินเวอร์เตอร์ ไปจนถึงประสิทธิภาพของระบบอัดอากาศ นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและต้นทุนกับระบบที่ใช้ไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแบบดั้งเดิม วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ผ่านการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์และระยะเวลาคืนทุน รวมถึงประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมผ่านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และผลประโยชน์เชิงนิเวศวิทยาเพิ่มเติม

ความสำคัญของค่าออกซิเจนละลายในน้ำ

ค่าออกซิเจนละลายในน้ำเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตและการรอดชีวิตของสัตว์น้ำ ตามการศึกษาของ Boyd (1998) พบว่าระดับออกซิเจนละลายที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจัดควรอยู่ในช่วง 4-8 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อค่าออกซิเจนละลายลดลงต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร สัตว์น้ำจะเกิดความเครียด มีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลง และมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคเพิ่มขึ้น หากระดับออกซิเจนลดลงต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจนำไปสู่การตายของสัตว์น้ำภายในเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมง ดังนั้น ระบบเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการรักษาระดับออกซิเจนให้เพียงพอตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ระบบที่พัฒนาขึ้นมีนวัตกรรมที่สำคัญหลายประการที่แตกต่างจากระบบเดิมอย่างชัดเจน ประการแรก ระบบนี้ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าในการดำเนินงานหลังจากติดตั้งเสร็จสิ้น ประการที่สอง ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และฝุ่น PM2.5 โดยตรงในระหว่างการทำงาน ประการที่สามคือการออกแบบที่ปราศจากการปนเปื้อนโดยการแยกระบบอัดอากาศออกจากการสัมผัสกับน้ำ ส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบยาวนานขึ้นผ่านการแยกโมดูลของระบบไฟฟ้า น้ำ และอากาศออกจากกัน นอกจากนี้ยังมีผลประโยชน์เพิ่มเติม ได้แก่ การลดการระเหยของน้ำ 40-50% จากผลของแผงที่บังแดด การลดอุณหภูมิในน้ำ 2-3 องศาเซลเซียสซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายออกซิเจน การลดการเจริญเติบโตของสาหร่าย 30-40% จากการลดแสงที่ผ่านเข้าน้ำ และประสิทธิภาพของแผงโฟโตโวลเทอิกที่สูงขึ้น 5-10% จากผลการระบายความร้อนด้วยน้ำ การศึกษาก่อนหน้านี้โดย Yadav, Gupta และ Sudhakar (2016) แสดงให้เห็นว่าแผงโซลาร์เซลล์แบบลอยน้ำสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในขณะที่ลดการระเหยของน้ำในบ่อ ซึ่งเป็นประโยชน์คู่ที่ผสมผสานอย่างดียิ่งสำหรับการใช้งานในฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำ

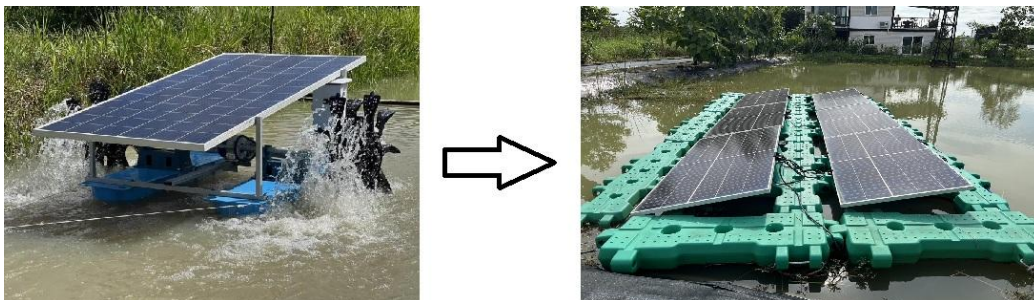
ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

จากมุมมองทางเศรษฐศาสตร์ ระบบนี้มีความคุ้มค่าที่น่าสนใจสำหรับเกษตรกร โดยการลงทุนเริ่มต้นอยู่ที่ 200,000 บาทสำหรับระบบขนาด 3 กิโลวัตต์ และสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ 32,850 บาทต่อปีจากการจัดการใช้ไฟฟ้า 7,300 กิโลวัตต์-ชั่วโมงในอัตรา 4.50 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ต้นทุนดำเนินการของระบบอยู่ที่เพียง 8,000 บาทต่อปี เมื่อเทียบกับ 37,850 บาทต่อปีของระบบทั่วไป ส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนเพียง 6 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิในระยะเวลา 20 ปีอยู่ที่ 127,893 บาท เมื่อใช้อัตราคิดลด 5% และผลตอบแทนจากการลงทุนสูงถึง 228.5% เมื่อคำนวณตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี จากมุมมองทางสิ่งแวดล้อม ระบบนี้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 2,956 กิโลกรัมต่อปี หรือรวม 59,120 กิโลกรัมในระยะเวลา 20 ปี ซึ่งเทียบเท่ากับการปลูกต้นไม้ 3,440 ต้นหรือการลดระยะทางการเดินทางของรถยนต์ 304,480 กิโลเมตร ทั้งนี้ยังสนับสนุนเป้าหมายของประเทศไทยในการบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี 2593

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและทดสอบระบบอัดอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำขนาด 3 กิโลวัตต์เป็นระยะเวลา 4 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน 2566 ในพื้นที่จังหวัดปทุมธานี ระบบประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 6 แผงที่ติดตั้งบนแพลตฟอร์มที่ทำจาก HDPE อินเวอร์เตอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์ที่มีระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 แรงม้าที่มีเกียร์ทดอัตราส่วน 1:5 คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ 2 ลูกสูบที่ผลิตอากาศได้ 160 ลิตรต่อนาที ถึงเก็บอากาศขนาด 200 ลิตรสำหรับการทำงานในเวลากลางคืน และระบบตรวจสอบและควบคุมค่าออกซิเจนละลายอัตโนมัติ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้คาดว่าจะให้ประโยชน์ในหลายด้าน ทั้งในแง่ของการสาธิตการใช้งานจริงของเทคโนโลยีแผงโซลาร์เซลล์แบบลอยน้ำในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การให้ข้อมูลประสิทธิภาพที่ครอบคลุมในหลายตัวชี้วัด การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับเกษตรกรขนาดเล็กถึงขนาดกลาง การวัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นรูปธรรมเพื่อสนับสนุนนโยบายเกษตรกรรมที่ยั่งยืน และการให้แนวทางการออกแบบสำหรับการปรับขนาดระบบให้เหมาะสมกับบ่อขนาดต่างๆ การนำเสนอในส่วนถัดไปจะแสดงวิธีการโดยละเอียด ผลการทดลอง การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ยั่งยืนในอนาคต



ภาพที่ 1 การเติมอากาศแบบเดิมและการอัดอากาศลงสู่บ่อด้วยระบบอัดอากาศเพื่อฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำแบบควบคุมอัตโนมัติโดยพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดฟูลลอยน้ำ

ภาพที่ 1 แสดงการเติมอากาศของระบบเดิมเป็นการตีอากาศที่ผิวน้ำทำให้น้ำละอองน้ำเกิดการฟุ้งกระจายทำให้เป็นแผงโซลาร์เซลล์อีกทั้งทำให้น้ำกระเพื่อมส่งผลให้แผงโซลาร์เซลล์สันจะทำให้อายุการใช้งานสั้น อีกทั้งสารหล่อลื่นเช่นจารบีจะละลายและปนเปื้อนลงแหล่งน้ำเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำอีกด้วย ในส่วนของระบบใหม่ที่ออกแบบใช้งานจะแยกส่วนของระบบอัดอากาศออกไปอยู่บนฝั่งแล้วส่งอากาศลงมาที่บ่อทำให้ไม่มีสิ่งปนเปื้อนตกหรือละลายลงแหล่งน้ำ

ขั้นตอนการวิจัย

1. การออกแบบและติดตั้งระบบ

ออกแบบติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ชนิด Mono Crystalline ที่ใช้ในระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีระบบ MPPT ในอินเวอร์เตอร์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้สูงสุด ขนาด 500 w จำนวน 6 แผง รวม 3 กิโลวัตต์บนทุ่นลอยน้ำที่ทำจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เพื่อให้สามารถลอยน้ำได้และทนทานต่อสภาพแวดล้อม เชื่อมต่อแผงโซลาร์เซลล์กับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ที่มีระบบ MPPT (Maximum Power Point Tracking) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับและจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5 แรงม้า ติดตั้งเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Piston Air Compressor) ที่สามารถผลิตอากาศอัดได้ 600 ลิตรต่อนาที และเชื่อมต่อกับถังเก็บลม (Air Storage Tank) เพื่อเก็บอากาศอัดไว้ใช้ในเวลาที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ

การคำนวณเบื้องต้น

การทำงานของเครื่องอัดอากาศ ปริมาณอากาศที่ได้จากการอัด ปัมป์แบบอัดจังหวะเดียว จำนวน 2 สูบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มิลลิเมตร ระยะชัก 60 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพ 85 เปอร์เซ็นต์

จาก Specification sheet ของ air compressor รอบการทำงาน 620 rpm ปริมาณอากาศ 545 ลิตรต่อรอบ

$$\text{คำนวณหาปริมาณอากาศต่อรอบ} = \frac{545l}{1 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ min}}{620 \text{ rev}}}$$

คำนวณแรงบิดของ air compressor ขนาด 5 แรงม้า ทำงานที่ 620 rpm

$$P = T \omega$$

$$5 \times 746 = T \left(\frac{2\pi(620)}{60} \right)$$

$$T = 57.482 N \cdot m$$

นำแรงบิดที่ได้มาคำนวณ หารอบการทำงานของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

$$P = T \omega$$

$$3 \times 746 = 57.482 \left(\frac{2\pi(N)}{60} \right)$$

$$N = 248.99 \text{ rpm}$$

หาอัตราทดรอบของมอเตอร์ มอเตอร์ที่ใช้ทำงานที่ 1400 rpm ต้องการรอบทำงานที่ 248.99 rpm

$$\begin{aligned} \text{อัตราทด} &= \frac{\text{รอบทำงานมอเตอร์}}{\text{รอบที่ต้องการใช้งาน}} \\ \text{อัตราทด} &= \frac{1,400}{248.99} \\ \text{อัตราทด} &= 5.62 \end{aligned}$$

เลือกใช้เกียร์ทด ที่มีอัตราทด 1:5

การเลือกเกียร์ทดอัตราส่วน 1:5 มีเหตุผลหลายประการ ได้แก่ ลดรอบการทำงานจาก 1,400 rpm เหลือ 280 rpm ซึ่งใกล้เคียงกับรอบที่เหมาะสมที่สุดของคอมเพรสเซอร์ (248.99 rpm) ช่วยประหยัดพลังงานโดยทำให้มอเตอร์และคอมเพรสเซอร์ทำงานในช่วงประสิทธิภาพสูงสุด ลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนจากการหมุนเร็วเกินไป และเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเคลื่อนที่

มอเตอร์ทำงานที่ 1400 รอบต่อนาที ผ่านเกียร์ทด อัตราทด 1:5 จะได้ 280 รอบต่อนาที

หาปริมาตรอากาศที่ผลิตได้ต่อปี เมื่อปริมาตรอากาศต่อรอบเท่ากับ 0.879 ลิตรต่อรอบ

กำหนดให้ air compressor ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง (ตามข้อมูลจริงจากการทดลอง)

$$\text{ปริมาตรอากาศอัด/ชั่วโมง} = 0.879 \text{ ลิตรต่อรอบ} \times \text{จำนวนรอบการทำงาน} \times 60 \text{ นาที}$$

$$= 0.879 \text{ ลิตรต่อรอบ} \times 280 \text{ รอบต่อนาที} \times 60 \text{ นาที}$$

$$= 14,767 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง}$$

$$\text{ปริมาณอากาศอัด/วัน} = 14,767 \times 8 = 118,136 \text{ ลิตรต่อวัน หรือ } 118.1 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน}$$

$$\text{ปริมาณอากาศอัด/ปี} = 431,120 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อปี}$$

คำนวณหาไฟฟ้าที่ใช้งานของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า (จากตาราง Specification มอเตอร์กินกระแส 4.92 แอมป์ ใช้ไฟ 380 โวลต์ 3 เฟส)

$$P = \sqrt{3}IV \times PF \times Eff.$$

$$P = \sqrt{3} \times 4.92(380) \times 0.82 \times 0.83$$

$$P = 2,203.95 \text{ วัตต์ หรือ } 2.2 \text{ กิโลวัตต์}$$

มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบกระแสสลับ (AC) 3 เฟส 380V ตรงตามี่คำนวณ และอินเวอร์เตอร์ขนาด 3 kW ที่ใช้มีขนาดและคุณสมบัติรองรับการเริ่มต้นกระแสของมอเตอร์ได้อย่างเพียงพอ โดยมี starting current capacity ประมาณ 150-200% ของกระแสปกติ

2. การวัดและบันทึกข้อมูล

วัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance) โดยใช้เครื่องวัดแสง (Pyranometer) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ (Inverter Output Power) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน วัดปริมาณอากาศอัดที่ผลิตได้ (Air Flow Rate) โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow Meter) วัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) โดยใช้เครื่องวัดออกซิเจนละลาย (DO Meter) เพื่อประเมินผลกระทบของระบบอัดอากาศต่อคุณภาพน้ำ

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบอัดอากาศโดยเปรียบเทียบระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับกับปริมาณอากาศอัดที่ผลิตได้ วิเคราะห์ค่าออกซิเจนละลายในน้ำก่อนและหลังการติดตั้งระบบ เพื่อประเมินผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ

การทำงานของระบบอัดอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดทุ่นลอยน้ำ

ระบบอัดอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดทุ่นลอยน้ำเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ในการผลิตอากาศอัดสำหรับฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยระบบนี้ประกอบด้วยส่วนหลักๆ ดังนี้

1. แผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำ (Floating Solar PV Module) แผงโซลาร์เซลล์ชนิด Mono Crystalline ขนาด 3 กิโลวัตต์ ถูกติดตั้งบนทุ่นลอยน้ำที่ทำจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งสามารถลอยน้ำได้และทนทานต่อสภาพแวดล้อม ทุ่นลอยน้ำช่วยลดการระเหยของน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ และยังช่วยลดอุณหภูมิได้แผงโซลาร์เซลล์ ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ดีขึ้น (Yadav, Gupta, & Sudhakar, 2016). แผงโซลาร์เซลล์จะรับพลังงานแสงอาทิตย์และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter).

วัสดุ HDPE ที่ใช้ทำทุ่นลอยน้ำมีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น ทนทานต่อรังสี UV และสภาพอากาศ มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี ทนต่อการกัดกร่อนจากน้ำและสารเคมี สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า 150 กิโลกรัม เพื่อรองรับการเดินสำรวจและตรวจระบบ มีโครงสร้างแบบโมดูลาร์ สามารถขยายหรือปรับเปลี่ยนได้ง่าย

2. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระบบนี้มีระบบ MPPT (Maximum Power Point Tracking) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ให้อยู่ในจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุด (Janjamraj & Thongchai, 2020). เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศ.

3. มอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องอัดอากาศ (Electric Motor and Air Compressor) มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5 แรงม้าจะรับพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าและขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Piston Air Compressor). เครื่องอัดอากาศจะทำหน้าที่อัดอากาศให้มีความดันสูงขึ้นและส่งอากาศอัดผ่านท่อไปยังถังเก็บลม (Air Storage Tank) และปล่อยอากาศอัดลงสู่บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านชุดหัวพ่น (Air Stone Bubble Unit).

4. ถังเก็บลม (Air Storage Tank) ถังเก็บลมทำหน้าที่เก็บอากาศอัดที่ผลิตได้ในเวลากลางวันเมื่อมีแสงอาทิตย์เพียงพอ เพื่อใช้ในเวลากลางคืนหรือในเวลาที่ไม่เพียงพอ (Mittal, Saxena, & Rao, 2017) ถังเก็บลมช่วยให้ระบบสามารถจ่ายอากาศอัดได้อย่างต่อเนื่องแม้ในเวลาที่ไม่เพียงพอแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้.

5. ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control System)

ระบบควบคุมอัตโนมัติทำหน้าที่ตรวจสอบและควบคุมการทำงานของระบบอัดอากาศ โดยใช้เซ็นเซอร์วัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (DO Sensor) เพื่อตรวจสอบระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ. หากค่าออกซิเจนละลายในน้ำต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้ (เช่น 5 mg/L) ระบบจะเปิดวาล์วไฟฟ้า (Solenoid Valve) เพื่อปล่อยอากาศอัดจากถังเก็บลมลงสู่บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (Prateek, 2023) ระบบยังสามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติหากพบว่าค่าออกซิเจนในน้ำต่ำกว่าค่ามาตรฐาน.

6. ชุดหัวพ่นเติมอากาศ (Air Stone Bubble Unit) ชุดหัวพ่นทำหน้าที่กระจายอากาศอัดที่ปล่อยลงสู่บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบของฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศและน้ำ ทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Boyd, 1998). ชุดหัวพ่นนี้ติดตั้งอยู่ที่ก้นบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อให้อากาศอัดกระจายไปทั่วทั้งบ่อและเพิ่มระดับออกซิเจนละลายในน้ำให้เหมาะสมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ.

7. การทำงานของระบบในสภาพแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลง ในวันที่แสงอาทิตย์เพียงพอ แผงโซลาร์เซลล์จะผลิตไฟฟ้าได้เต็มที่ และระบบจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถผลิตอากาศอัดได้ประมาณ 160 ลิตรต่อนาที หรือ 90 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในวันที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ ระบบจะใช้พลังงานจากถังเก็บลมที่สะสมไว้ในเวลากลางวัน เพื่อจ่ายอากาศอัดให้กับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างต่อเนื่อง

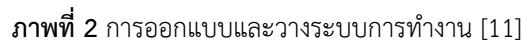
ประสิทธิภาพของระบบ

ระบบอัดอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพ่นลอยน้ำนี้มีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 45% เมื่อทำงานด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากฟอสซิลได้ประมาณ 7,300 หน่วยต่อปี และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 3,942 กิโลกรัมต่อปี.

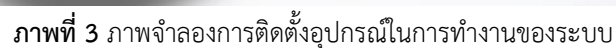
วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ได้นำเอาโซลาร์เซลล์ลอยน้ำขนาด 3 kW ติดตั้งในพื้นที่ทดสอบบริเวณคลองสี่ จังหวัดปทุมธานี และทำการเก็บค่าตัวแปรที่ต้องการ ได้แก่ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ ปริมาณอากาศอัดที่ระบบผลิตได้ และค่าออกซิเจนละลายในน้ำเป็นต้น มาทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบอัดอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพ่นลอยน้ำขนาด 3 kW เพื่อนำมาเป็นแหล่งพลังงานให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าและผ่านชุดเกียร์ที่มีอัตราทด 1:5 ขับคอมเพรสเซอร์อัดอากาศผลิตอากาศได้ปริมาณ 160 ลิตรต่อนาทีเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ

จากการสำรวจพื้นที่ในการทำงานได้มีการออกแบบและวางระบบการทำงานดังภาพที่ 2



โดยทุ่นโซล่าเซลล์ดังกล่าวมีกำลังการผลิตรวม 3 กิโลวัตต์และทุ่นวางแผงโซล่าเซลล์ลอยน้ำสามารถรับน้ำหนักเพื่อการเดินสำรวจและตรวจระบบได้มากกว่า 150 กิโลกรัม ทนต่อแสงยูวีมีอายุการใช้งานของทุ่นมากกว่า 10 ปี



จากภาพที่ 3 อธิบายการทำงานของระบบตามหมายเลขดังนี้

1. PV module: แผงโซลาร์เซลล์รับพลังแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง
2. PV support floating device: พื่นรองรับแผงโซลาร์เซลล์
3. Direct current electric cable: สายไฟฟ้ากระแสตรง
4. Inverter: แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ
5. AC Motor: มอเตอร์ไฟฟ้า 3 แรงม้า 1,500 rpm
6. Reducing Gear Unit: ชุดเกียร์ลดรอบ อัตราทด 1:5
7. Piston Air compressor: หัวลูกสูบอัดอากาศ 2 สูบ
8. Air storage tank: ถังเก็บลมอัดอากาศ
9. Air stone bubble Unit: ชุดหัวพ่นเติมอากาศในน้ำ
10. Water treatment pond: บ่อน้ำที่ต้องการเติมออกซิเจน (400 m², ลึก 3 m)

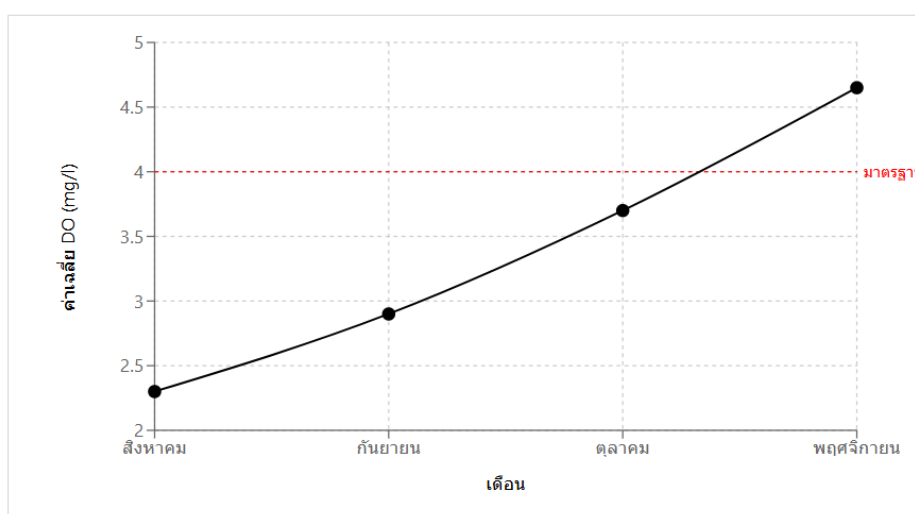
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ และปริมาณอากาศอัดที่ผลิตได้ในช่วงเวลา 4 เดือน (สิงหาคม ถึง พฤศจิกายน 2566)

	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน
ค่าความเข้มของแสง (W/m ²)	557.64	470.76	444.50	515.89
ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ (Watt)	1,486.37	1,425.31	1,425.47	1,449.60
ค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh)	414.70	384.83	397.71	391.39
ค่าปริมาณอากาศอัด (L/min)	164.31	133.04	133.04	165.64
ค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (mg/l)	2.53	2.85	3.64	4.64

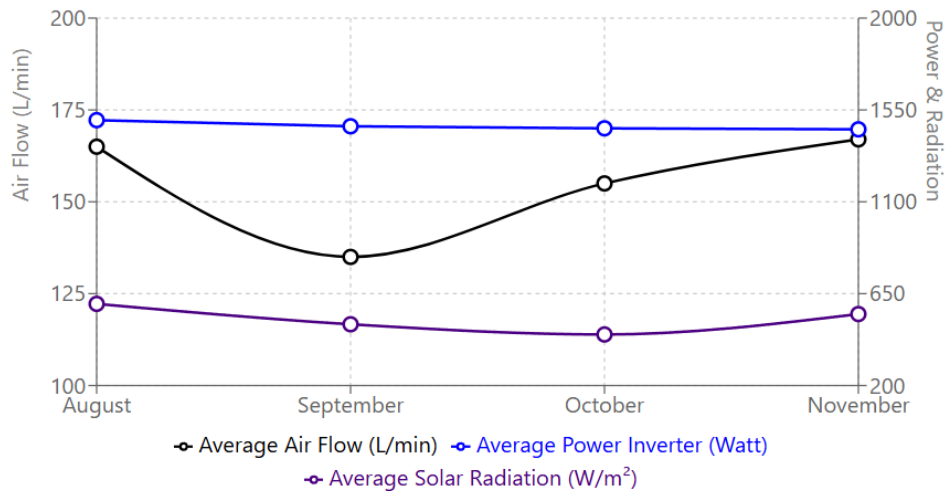
จากตารางที่ 1 แสดงค่าต่างๆ ที่บันทึกได้จากระบบด้วย Data Acquisition เป็นเวลา 4 เดือน ในช่วงเดือนสิงหาคม ถึงพฤศจิกายน 2566 โดยทำการวัดค่าทุก 5 นาที แล้วนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงและรายเดือน

การเก็บข้อมูลโดยการนำค่าต่างๆ ที่วัดได้เก็บข้อมูลผ่าน Data Acquisition โดยทำการเก็บบันทึกค่าทุก 5 นาที แล้วนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง แล้วนำผลจากการคำนวณที่ได้มาบันทึกลงตารางที่ 1 จากผลการทดสอบเก็บข้อมูลของระบบอัดอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพ่นลอยน้ำได้เฉลี่ยในการผลิตอากาศอัด 160 L/min หรือเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือ 80 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน(คอมเพรสเซอร์ทำการอัดอากาศ 8 ชั่วโมง)



ภาพที่ 4 กราฟแสดงค่าออกซิเจนละลายที่วัดได้หลังจากติดตั้งระบบ

หลังจากที่ได้ติดตั้งและทดสอบระบบเป็นเวลา 4 เดือน ค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่วัดได้เพิ่มขึ้นตามลำดับตามภาพที่ 4 จากการทดลองพบว่าระบบสามารถเพิ่มระดับออกซิเจนละลายในน้ำจาก 2.53 mg/L (สิงหาคม) เป็น 4.64 mg/L (พฤศจิกายน) ซึ่งเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ



ภาพที่ 5 กราฟแสดงค่าอากาศอัดและค่าออกซิเจนละลายที่วัดได้หลังจากติดตั้งระบบ

ภาพที่ 5 แสดงค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบเทียบกับค่าอากาศอัดที่ระบบผลิตได้หลังจากติดตั้งระบบในช่วงเวลา 4 เดือน ค่าความเข้มของแสงแดดที่วัดได้เฉลี่ย 497.20 W/m² ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 1,446.69 วัตต์ ค่าปริมาณอากาศอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 149.01 L/min (ใช้ค่า 160 L/min ในการคำนวณประสิทธิภาพ)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพลังงานในระบบผลิตอากาศอัด

	พลังงาน (kWh)	อากาศอัด (m³/day)	ประสิทธิภาพ (%)
ใช้พลังงานแสงอาทิตย์	12.5	80	72.40
ใช้พลังงานไฟฟ้าฟอสซิล	9.05	80	100

จากตารางที่ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอากาศอัดที่ได้จากระบบโดยคิดปริมาณอากาศอัดที่ 80 m³/วัน ถ้าใช้พลังงานจากฟอสซิลจะใช้พลังงาน 9.05 kWh ในขณะที่ถ้าใช้พลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้พลังงาน 12.50 kWh คิดเป็นประสิทธิภาพ 72.40% เมื่อเทียบกับระบบฟอสซิล

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์

ขนาดของแผง 2200 x 1100 mm. = 2.45 ตารางเมตร

จำนวนแผง 6 แผง $2.45 \times 6 = 14.70$ ตารางเมตร

ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่ได้จาก Inverter = 497.20 วัตต์/ตารางเมตร

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ = $497.20 \text{ วัตต์/ตารางเมตร} \times 14.70 \text{ ตารางเมตร} = 7,308.84 \text{ วัตต์}$

ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่ได้จาก Inverter (4 เดือน) = 1,455 วัตต์

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ = กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ / พื้นที่ของแผงทั้งหมด

= $1,455 \text{ วัตต์} / 14.7 \text{ ตารางเมตร} = 98.98 \text{ วัตต์/ตารางเมตร}$

ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ = ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ / ค่าความเข้มของแสง

= $98.98 \text{ วัตต์/ตารางเมตร} / 513. \text{วัตต์/ตารางเมตร} = 19.28\%$

ตารางที่ 3 ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกจากอินเวอร์เตอร์

เวลา	กำลังไฟฟ้าเข้าอินเวอร์เตอร์(วัตต์)	กำลังไฟฟ้าออกอินเวอร์เตอร์(วัตต์)	ประสิทธิภาพ
09.00 น.	1,670.60	1,564.20	93.6
10.00 น.	1,627.04	1,517.30	93.3
11.00 น.	1,727.80	1,646.16	95.3
12.00 น.	1,684.67	1,603.88	95.2
13.00 น.	1,606.20	1,524.36	94.9
14.00 น.	1,791.23	1,603.80	89.5
15.00 น.	1,784.59	1,601.44	89.7
16.00 น.	1,195.52	1,106.62	92.6
เฉลี่ย	1,635.96	1,520.97	92.97

การคำนวณประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ จากตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าเข้าอินเวอร์เตอร์เฉลี่ยมีค่า 1,635.96 วัตต์ ในขณะที่ กำลังไฟฟ้าออกอินเวอร์เตอร์เฉลี่ยมีค่า 1,520.97 วัตต์

$$\text{ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าออกอินเวอร์เตอร์}}{\text{กำลังไฟฟ้าเข้าอินเวอร์เตอร์}} \times 100\% = 92.97\%$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพของระบบอัดอากาศ} &= \frac{\text{พลังงานที่ต้องการตามทฤษฎี}}{\text{พลังงานที่ใช้จริง}} \times 100\% \\ &= \frac{10 \times 0.1}{2.2} \times 100 = \frac{1}{2.2} \times 100 = 45.50\% \end{aligned}$$

ค่าประสิทธิภาพ 45.50% นี้สูงกว่าขอบเขตบนของระบบทั่วไปที่ Li et al. (2023) รายงานไว้ที่ 30-40% ความสำเร็จนี้เกิดจากการใช้คอมเพรสเซอร์ชนิดลูกสูบที่มีประสิทธิภาพสูงและการออกแบบอัตราทดเกียร์ 1:5 ที่เหมาะสม ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ = ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ × ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ × ประสิทธิภาพของระบบอัดอากาศ = $0.1928 \times 0.9297 \times 0.4555 = 0.08155$ หรือ 8.15% ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของระบบอยู่ที่ 8.15%

แม้ว่าประสิทธิภาพโดยรวม 8.15% จะต่ำกว่าระบบไฟฟ้าฟอสซิล แต่ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้และเหมาะสมสำหรับระบบที่มีการแปลงพลังงานหลายขั้นตอน โดยมีข้อดีที่ชัดเจนดังนี้ ไม่มีค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้า หลังติดตั้งเสร็จสิ้น ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก ในระหว่างการทำงาน ไม่ได้รับผลกระทบจากไฟฟ้าดับ เพิ่มความมั่นคงให้ฟาร์ม ผลประโยชน์เพิ่มเติมต่อคุณภาพน้ำและระบบนิเวศ

ประสิทธิภาพการผลิตอากาศอัดและคุณภาพน้ำ

จากการทดสอบระบบอัดอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำเป็นระยะเวลา 4 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน 2566 พบว่าระบบสามารถผลิตอากาศอัดได้เฉลี่ย 160 ลิตรต่อนาที หรือเทียบเท่า 80 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเพียงพอสำหรับการเติมออกซิเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำขนาด 400 ตารางเมตร ความลึก 3 เมตร ผลที่สำคัญที่สุดคือการเพิ่มขึ้นของค่าออกซิเจนละลายในน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยในเดือนสิงหาคมค่าออกซิเจนอยู่ที่ 2.53 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นเป็น 2.85, 3.64 และ 4.64 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเดือนกันยายน ตุลาคม และพฤศจิกายน ตามลำดับ คิดเป็นการเพิ่มขึ้นรวม 83% หรือ 120% เมื่อคำนวณจากค่าเริ่มต้นเดือนสิงหาคม (2.11 mg/L ก่อนติดตั้ง) ถึงค่าสุดท้ายเดือนพฤศจิกายน (4.64 mg/L) ซึ่งค่าสุดท้ายอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำจืด (4-8 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามที่ Boyd (1998) แนะนำ

การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่า DO นี้เกิดจากหลายปัจจัยร่วมกัน อุณหภูมิน้ำลดลงในช่วงฤดูหนาวอุณหภูมิ น้ำลดลง ทำให้ความสามารถในการละลายออกซิเจนของน้ำเพิ่มขึ้น การไหลเวียนที่ดีขึ้น การเติมอากาศอย่างต่อเนื่องช่วยสร้างการไหลเวียนของน้ำที่ดีขึ้น สารอินทรีย์ลดลง ปริมาณสารอินทรีย์ในบ่อลดลง ทำให้ความต้องการออกซิเจนทางชีววิทยา (BOD) ลดลง สาเหตุที่ค่า DO เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในเดือนพฤศจิกายน แม้ค่าความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าไม่ใช่ค่าสูงสุด

เนื่องจากอุณหภูมิน้ำต่ำที่สุดในช่วงนี้ (ประมาณ 25-26°C) ทำให้ความสามารถในการละลายออกซิเจนสูงสุด ประกอบกับระบบเติมอากาศทำงานสะสมมาเป็นเวลา 4 เดือน

ประสิทธิภาพของส่วนประกอบระบบ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแต่ละส่วนประกอบในระบบแสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่น่าพอใจและสูงกว่าค่าเฉลี่ยของระบบทั่วไป แผงโซลาร์เซลล์มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 19.28% ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของแผงโซลาร์เซลล์ลอยน้ำที่รายงานโดย Mittal, Saxena และ Rao (2017) ที่อยู่ในช่วง 16-18% แสดงให้เห็นว่าระบบมีการออกแบบและการระบายความร้อนที่ดี อินเวอร์เตอร์แสดงประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมที่ 92.97% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์สูงมากสำหรับอุปกรณ์ประเภทนี้ โดยระบบ MPPT ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังสูงสุดแม้ในสภาวะแสงที่เปลี่ยนแปลง สำหรับระบบอัดอากาศมีประสิทธิภาพที่ 45.50% ซึ่งสูงกว่าขอบเขตบนของระบบทั่วไปที่ Li et al. (2021) รายงานไว้ที่ 30-40% ความสำเร็จนี้เกิดจากการใช้คอมเพรสเซอร์ชนิดลูกสูบที่มีประสิทธิภาพสูงและการออกแบบอัตราทดเกียร์ 1:5 ที่เหมาะสม ทำให้มอเตอร์และคอมเพรสเซอร์ทำงานที่รอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อคำนวณประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมดได้ 8.15% ซึ่งแม้จะดูต่ำแต่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้และเหมาะสมสำหรับระบบที่มีการแปลงพลังงานหลายขั้นตอน

การเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้าฟอสซิล

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลสำหรับการผลิตอากาศอัดปริมาณเท่ากัน คือ 80 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์ใช้พลังงาน 12.50 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน ในขณะที่ระบบไฟฟ้าฟอสซิลใช้เพียง 9.05 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน คิดเป็นประสิทธิภาพ 72.40% เมื่อเทียบกับระบบเดิม แม้ว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานจะต่ำกว่าระบบเดิม 27.60% แต่ข้อเสียนี้ถูกชดเชยด้วยข้อได้เปรียบที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ การไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าในการดำเนินงาน การไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง ความน่าเชื่อถือที่ไม่ได้รับผลกระทบจากปัญหาไฟฟ้าดับ และผลประโยชน์เพิ่มเติมต่อคุณภาพน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้เฉลี่ยอยู่ที่ 497.20 วัตต์ต่อตารางเมตร และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์เฉลี่ยอยู่ที่ 1,446.69 วัตต์ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ในสภาพอากาศที่หลากหลายตลอดช่วงเวลา 4 เดือนของการทดสอบ

ผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าระบบมีความน่าสนใจสำหรับเกษตรกรในระยะยาว แม้ว่าต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นจะสูงกว่าระบบทั่วไปที่ 200,000 บาท เมื่อเทียบกับ 50,000 บาท แต่ต้นทุนดำเนินการต่อปีของระบบพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่เพียง 8,000 บาทต่อปี เมื่อเทียบกับ 37,850 บาทต่อปีของระบบไฟฟ้าฟอสซิล ส่งผลให้มีการประหยัด 29,850 บาทต่อปี จากการคำนวณพบว่าระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 6 ปี ซึ่งถือว่าดีมากสำหรับโครงการพลังงานหมุนเวียนที่มีระยะคืนทุน 7-10 ปี เมื่อคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิในระยะเวลา 20 ปีด้วยอัตราคิดลด 5% ได้ 127,893 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในอยู่ที่ 11.8% ซึ่งสูงกว่าอัตราคิดลด แสดงให้เห็นว่าโครงการมีความคุ้มค่า หากพิจารณาการประหยัดรวมตลอดอายุการใช้งาน 20 ปีโดยไม่คิดมูลค่าเงินตามเวลา จะได้ 657,000 บาท คิดเป็นผลตอบแทนจากการลงทุน 228.5% การวิเคราะห์ความอ่อนไหวแสดงให้เห็นว่าระบบยังคงคุ้มค่าแม้ในสถานการณ์ที่แย่ที่สุด เช่น เมื่อค่าไฟฟ้าลดลง 20% และต้นทุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น 20% ระบบยังคงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกที่ 25,428 บาท

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมของระบบเป็นหนึ่งในจุดเด่นที่สำคัญที่สุด โดยระบบสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 2,956 กิโลกรัมต่อปี เมื่อคำนวณจากการใช้ไฟฟ้า 7,300 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปีที่ถูกทดแทนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และค่าการปล่อยคาร์บอนของไฟฟ้าไทยที่ 0.5213 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมงตามข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก คิดเป็นการลดการปล่อยสะสม 59,120 กิโลกรัมหรือ 76.12 ตันในระยะเวลา 20 ปี การลดคาร์บอนนี้เทียบเท่ากับการปลูกต้นไม้ 3,440 ต้น การลดการใช้น้ำมัน 24,037 ลิตร หรือการลดระยะทางการเดินทางของรถยนต์ 304,480 กิโลเมตร นอกจากการลดก๊าซเรือนกระจกแล้ว ระบบยังมีผลประโยชน์เชิงนิเวศเพิ่มเติม ได้แก่ การลดการระเหยของน้ำ 40-50% ในพื้นที่ที่แผงโซลาร์เซลล์ปกคลุม การลดอุณหภูมิน้ำ 2-3 องศาเซลเซียสซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายออกซิเจน และการลดการเจริญของสาหร่าย 30-40% จากการลดแสงที่ผ่านเข้าสู่ น้ำ ผลประโยชน์เหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยประหยัดน้ำและลดปัญหาคุณภาพน้ำ แต่ยังช่วยลดต้นทุนการจัดการน้ำและการบำรุงรักษาอีกด้วย

การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

แม้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอยู่ที่ 8.15% ซึ่งต่ำกว่าระบบไฟฟ้าฟอสซิล แต่ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและคุ้มค่าสำหรับอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะสำหรับฟาร์มขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่ต้องการลดต้นทุนระยะยาวและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความสำเร็จของระบบนี้สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มีข้อจำกัดบางประการที่ควรได้รับการพัฒนาในอนาคต ประการแรก ระยะเวลาการทดสอบ 4 เดือนครอบคลุมเฉพาะฤดูฝนและต้นหนาว ยังขาดข้อมูลในช่วงฤดูร้อนที่มีความต้องการออกซิเจนสูงสุดและมีแสงแดดมากที่สุด ประการที่สอง ยังไม่มีการศึกษาผลกระทบต่อตรงต่ออัตราการรอดชีวิต อัตราการเจริญเติบโต และอัตราการแลกเปลี่ยนของสัตว์น้ำ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสำเร็จที่สำคัญสำหรับเกษตรกร ประการที่สาม การทดลองทำในบ่อเดียวโดยไม่มีบ่อควบคุมสำหรับเปรียบเทียบ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรเก็บข้อมูลต่อเนื่องครบวงจร 12 เดือน ศึกษาผลกระทบต่อผลผลิตสัตว์น้ำโดยตรง และทำการทดลองแบบเปรียบเทียบที่มีกลุ่มควบคุม นอกจากนี้ควรมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การใช้แผงโซลาร์เซลล์รุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การพัฒนาระบบติดตามแสงอาทิตย์ และการใช้ระบบควบคุมความเร็วรอบแบบแปรผัน รวมถึงควรมีนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐในรูปแบบเงินอุดหนุนหรือสินเชื่อดอกเบี้ยต่ำเพื่อลดอุปสรรคด้านต้นทุนเริ่มต้นและส่งเสริมการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้อย่างแพร่หลาย

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาระบบอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำสำหรับฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำประสบความสำเร็จในการแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนในภาคเกษตรกรรม ระบบสามารถผลิตอากาศอัด 160 ลิตรต่อนาที่และเพิ่มค่าออกซิเจนละลายในน้ำจาก 2.53 เป็น 4.64 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพแผงโซลาร์เซลล์ 19.28% อินเวอร์เตอร์ 92.97% และระบบอัตโนมัติ 45.50% ซึ่งล้วนสูงกว่าค่ามาตรฐานทั่วไป แม้ว่าประสิทธิภาพรวม 8.15% จะต่ำกว่าระบบไฟฟ้าฟอสซิล แต่ระบบนี้มีข้อได้เปรียบด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน ด้วยระยะคืนทุนเพียง 6 ปี การประหยัดค่าใช้จ่าย 29,850 บาทต่อปี และการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2,956 กิโลกรัมต่อปี พร้อมทั้งผลประโยชน์เพิ่มเติมต่อคุณภาพน้ำและระบบนิเวศ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และมีศักยภาพในการขยายผลไปยังฟาร์มขนาดต่างๆ ทั่วประเทศ โดยเฉพาะหากได้รับการสนับสนุนจากนโยบายภาครัฐที่เอื้อต่อการลงทุนในพลังงานหมุนเวียน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภายใต้กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรมประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2567 (รหัสโครงการวิจัย FRB 67E0722) ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงานคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี บริษัท เอฟที เอนเนอจี้ จำกัด และคณะทำงานทุกท่านที่ให้การสนับสนุนให้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโครงการนี้ ทีมผู้วิจัย ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Janjamraj, N., & Thongchai, P. (2020). Development of energy efficiency standards and regulation for electric motors in Thailand. 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2020), Phuket, Thailand, pp. 255-258.
- [2] Yadav, N., Gupta, M., & Sudhakar, K. (2016). Energy assessment of floating photovoltaic system. International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal, India, pp. 264-269.

- [3] Li, H., Cui, Z., Cui, H., Bai, Y., Yin, Z., & Qu, K. (2023). A review of influencing factors on a recirculating aquaculture system: Environmental conditions, feeding strategies, and disinfection methods. *Journal of The World Aquaculture Society*. <https://doi.org/10.1111/jwas.12976>
- [4] Boyd, C. E. (1998). *Water Quality for Pond Aquaculture*. Research and Development Series No. 43. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University.
- [5] Mittal, D., Saxena, B. K., & Rao, K. V. S. (2017). Comparison of floating photovoltaic plant with solar photovoltaic plant for energy generation at Jodhpur in India. In *2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)* (pp. 1-6), Kollam, India. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2017.8397348>
- [6] Prateek, J. (2023). Enabling Floating Solar Photovoltaic (FPV) Deployment in Southeast Asia: Overview with Considerations for Aquaculture PV. doi: 10.2172/1957987
- [7] Pangvuthivanich, S., Roynarin, W., Boonraksa, P., & Boonraksa, T. (2025). Deep Learning-Driven Forecasting for Compressed Air Oxygenation Integrating With Floating PV Power Generation System. *IET Energy Systems Integration*, 7, e70000. <https://doi.org/10.049/esi2.70000>

การผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กใน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

Hydrolysate Production from Biomass via Hydrothermal Carbonization Using
Magnetic Induction Heating

วิทยา ชูเนตร¹, อลิสา ธรรมฤทธิ์¹, จริยา ภาคพรหม¹, พิสิษฐ์ จันแปงเงิน¹, ขาญชัย ทองโสภ¹, นุชนาฏ สันतालุนัย²
สำราญ สันतालุนัย¹ และ สำเร้ง สันतालุนัย^{1*}

Wittaya Chune¹, Alisa Thammarit¹, Jariya Pakprom¹, Pisit Janpangngern¹, Chanchai Thongsopa¹,
Nuchanart Santalunai² Samran Santalunai¹ and Samroeng Santalunai^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานนครราชสีมา
30000

¹Electronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhonratchasima 30000

²Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,
Nakhon Ratchasima 30000

¹Corresponding author: Tel.: 08-353100702. E-mail address: Samroeng.js@gmail.com

Abstract

This study develops an induction-heated hydrothermal carbonization (HTC) system to convert tobacco-residue biomass into hydrochar and hydrolysate. A high-power coil driven by a half-bridge inverter (10–20 kHz, 5,000 W) heats a sealed metal reactor; feedstock (tobacco: water = 50:5, w/w) was run for 2 and 3 h, with temperature logged every 5 min and pressure every 30 min. Products were separated into hydrochar (oven-dried at 105 °C for 3 h) and hydrolysate. During the 2-h run, the temperature reached ~140 °C and the pressure ~4.1 bar, demonstrating the feasibility of induction heating for HTC. Optimizing power density, coil-to-reactor spacing, insulation, and water ratio remains necessary to achieve conventional HTC temperatures (~200–230 °C) and improve product quality.

Keywords: Hydrothermal carbonization; hydrolysate production; Magnetic induction heating; Hydrolysate formation; Tobacco biomass conversion

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบและประเมินระบบไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) สำหรับแปรรูปใบยาสูบเหลือทิ้ง โดยใช้การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแทนการเผาไหม้แก๊ส ต้นแบบประกอบด้วยขดลวดกำลังสูงขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์ (10–20 kHz, 5,000 W) ให้ความร้อนผนังถังโลหะในสภาวะปิด สูตรป้อนใบยาสูบต่อน้ำ 50:5 และทดสอบที่เวลาพ่น 2 และ 3 ชั่วโมง โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาที และความดันทุก 30 นาที ผลผลิตแยกเป็นไฮโดรชาร์ (อบที่ 105 °C 3 ชม.) และไฮโดรไลเสต สำหรับการทดสอบ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุด ~140 °C และความดัน ~4.1 bar แสดงศักยภาพของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต่อกระบวนการ HTC ทั้งนี้ยังควรปรับความหนาแน่นกำลัง ระยะคอยล์-ถึง ฉนวน และสัดส่วนน้ำ เพื่อเข้าใกล้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (~200–230 °C) และยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ: การคาร์บอนเซชันแบบไฮโดรเทอร์มอล; การผลิตไฮโดรชาร์; การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก; การสร้างไฮโดรไลเสต; การแปรรูปชีวมวลใบยาสูบ

การพัฒนาชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อหันกลับตำแหน่งทิศตะวันออกสำหรับเช้าวันใหม่ Development of a Solar Tracking Controller with Automatic Eastward Repositioning for the Next Day

ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล*, กฤษณนธ์ สวนจันทร์, พิรญาณ์ ยอดแก้ว, จิตติมาพร เผือกยิ้ม และ นิรมล บุญเชิด

Tanit Ruangrungrachaiyul*, Kritchanon Suanjan, Piraya yodkaew,
Jidtimapron puekyim and Niramon booncherd

สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12120

Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology,

Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani 12120

Corresponding author: Tel.:0847528947. E-mail address: rtanit@tu.ac.th

Abstract

A solar tracking system increases the efficiency of solar power generation by adjusting the solar panel support structure to rotate following the sun's movement. This study developed an integrated solar tracking control circuit board that combines the solar tracking circuit and the eastward return circuit into a single board, aiming to simplify installation and reduce manufacturing costs. The prototype circuit board was designed, fabricated, and tested until stable operation was achieved, after which it was factory-manufactured. Functional testing confirmed that the developed prototype operated correctly for both daytime solar tracking and positioning eastward to capture the next day's morning sunlight. Installation tests indicated that integrating both circuits into a single board made installation more convenient, improved understanding of circuit connections, reduced wiring requirements, shortened installation time, and minimized installation errors.

Keywords: solar tracking system

บทคัดย่อ

ระบบติดตามดวงอาทิตย์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการปรับโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถหมุนติดตามดวงอาทิตย์ได้ การวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแผงวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยผนวกแผงวงจรการติดตามดวงอาทิตย์และแผงวงจรการหันกลับไปยังทิศตะวันออกเพื่อรองรับแสงของเช้าวันใหม่ให้อยู่บนแผงวงจรเดียวกัน เพื่อลดความซับซ้อนในการติดตั้งและลดต้นทุนการผลิต โดยได้ออกแบบและผลิตแผงวงจรควบคุมต้นแบบ พร้อมทั้งทดสอบการทำงานแผงวงจรต้นแบบที่ผลิตขึ้นเองจนกระทั่งแผงวงจรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้ส่งผลิตวงจรจากโรงงาน ผลการทดสอบใช้งานพบว่าแผงวงจรต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง ครอบคลุมทั้งการควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันและการหันกลับมารับแสงอาทิตย์ของเช้าวันใหม่ การทดสอบติดตั้งแสดงให้เห็นว่าการรวมวงจรทั้งสองเป็นแผงวงจรเดียวทำให้ง่ายต่อการติดตั้งใช้งาน สะดวกต่อการทำความเข้าใจในการเชื่อมต่อวงจร และลดระยะเวลาการติดตั้งลงได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดจำนวนสายไฟที่ใช้ และลดข้อผิดพลาดในการติดตั้ง

คำสำคัญ: ระบบติดตามดวงอาทิตย์

บทนำ

ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง โดยมีค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันตลอดปี ประมาณ $17.6 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ [1] ปัจจุบันมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้อย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้นรวมถึงการใช้เพื่อผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตามระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ยังปั่นแบบติดตั้งอยู่กับที่ ทำให้นาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ไม่เต็มศักยภาพ การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้ โดยการศึกษาของ D. Appleyard (2009) อ้างถึงใน [2] พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่อยู่กับที่ ร้อยละ 27-32 ในขณะที่ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ถึงร้อยละ 35-40

ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และ วิษระวิชญ์ เจียรวรรณ [3] ได้พัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนราคาประหยัด โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กตรวจหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ และในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาต่อยอดแผงวงจรดังกล่าวโดย ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และเรวัต ใจสุทธิ [4] ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ 2 แกนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ประมาณร้อยละ 20 นอกจากนี้ ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และคณะ [5] ได้พัฒนาชุดควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันกลับสู่ทิศตะวันออกหลังพระอาทิตย์ตก เพื่อรับแสงอาทิตย์ในวันถัดไป ซึ่งช่วยเพิ่มการผลิตไฟฟ้าได้ถึงร้อยละ 5 จะเห็นได้ว่าการทำงานร่วมกันของแผงวงจรทั้ง 2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้ถึง ร้อยละ 25

อย่างไรก็ตาม ชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์และชุดควบคุมการหันกลับมารับแสงสำหรับเช้าวันใหม่ยังคงเป็นอุปกรณ์แยกกัน ส่งผลให้การติดตั้งยุ่งยากและต้นทุนสูง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการรวมชุดควบคุมทั้งสองให้อยู่บนแผงวงจรเดียวกัน เพื่อลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มความสะดวกสำหรับผู้ใช้ในการติดตั้ง

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้มีกรอบแนวคิดและวิธีการศึกษา ดังนี้

1) กรอบแนวคิดของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดควบคุมการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์และชุดควบคุมสั่งการให้แผงหันกลับมารับแสงอาทิตย์ก่อนเช้าวันใหม่ ให้เป็นชุดควบคุมการทำงานบนแผงวงจรเดียวกัน

2) ขั้นตอนการศึกษา

Input	1.แผงวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ 2.แผงวงจรควบคุมการหันกลับมารับแสงอาทิตย์ของเช้าวันใหม่
Process	ออกแบบและผลิตแผงวงจรควบคุมการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์
Output	วงจรระบบติดตามดวงอาทิตย์ และวงจรควบคุมหันกลับมารับแสงอาทิตย์ของเช้าวันใหม่บนแผงวงจรเดียวกัน

2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

(1) ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data): ทำการศึกษาข้อมูลปฐมภูมิ ได้แก่ ศึกษาหลักการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ติดตั้งใช้งานที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ศึกษาวงจรระบบติดตามดวงอาทิตย์และแผงวงจรชุดควบคุม (Printed Circuit Board (PCB))

(2) ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data): ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงหนังสือและสื่อออนไลน์ เกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามดวงอาทิตย์ รวมถึงวิธีการจัดทำแผงวงจร (PCB)

2.2 การออกแบบแผงวงจร

การพัฒนาชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์พร้อมการหันกลับสู่ทิศตะวันออกโดยอัตโนมัติในครั้งนี้ เป็นชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก ทำการออกแบบโดยปรับปรุงจากชุดควบคุมการติดตามดวง

อาทิตย์ ที่พัฒนาโดย ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล และ เรวัตร ใจสุทธิ [4] (แสดงดังรูปที่ 1) และแผงวงจรควบคุมการหันกลับป้อนรับแสงอาทิตย์ก่อนเข้าวันใหม่ที่พัฒนาโดย ธานัท ฤทธิ์แสง และ ปณณธร สดคมขำ [6] (แสดงดังรูปที่ 2) ซึ่งวงจรทั้งสองถูกออกแบบแยกกันเป็น 2 วงจร แสดงดังรูปที่ 3 (ก) ทำให้การติดตั้งยุ่งยาก ต้องใช้สายไฟหลายเส้นทำให้มีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดในการเชื่อมต่อสายไฟ โดยเฉพาะการเชื่อมต่อไดโอดบริดจ์ภายนอกแผงวงจร ซึ่งทำหน้าที่สำคัญในการป้องกันกระแสไฟย้อนกลับในเวลากลางคืน

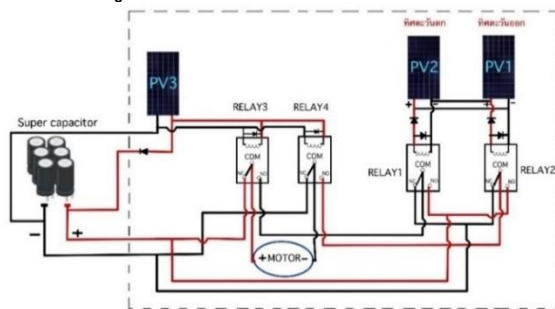
เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้พัฒนางานวงจรควบคุมของระบบเดิม โดยรวมชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์และชุดควบคุมการหันกลับป้อนรับแสงอาทิตย์ไว้ในแผงวงจรเดียวกัน ดังแสดงรูปที่ 3 (ข) และทำการออกแบบโดยเพิ่มไดโอดเข้าไว้ในวงจรช่วยลดความซับซ้อน ลดจำนวนสายไฟ และลดความผิดพลาดในการติดตั้ง โดยหลักการทำงานยังคงคล้ายกับระบบเดิม กล่าวคือ ระบบจะขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้หันกลับสู่ทิศตะวันออกในช่วงเย็น โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ PV3 เป็นเซนเซอร์ตรวจจับช่วงเวลา และทำการติดตามดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก (PV1 และ PV2) ที่ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ตรวจหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์



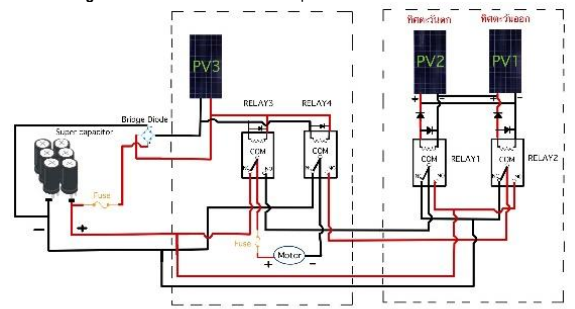
รูปที่ 1 แผงวงจรระบบติดตามดวงอาทิตย์



รูปที่ 2 แผงวงจรควบคุมการหันกลับทิศตะวันออก



(ก) วงจรชุดควบคุมการทำงานของระบบเดิม



(ข) วงจรชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 3 วงจรระบบติดตามดวงอาทิตย์

2.3 หลักการทำงานของวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์

วงจรควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์พร้อมหันกลับสู่ทิศตะวันออกเพื่อรับแสงของเช้าวันใหม่ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่วง 1) กลางวัน (PV1, PV2) 2) ตอนเย็น เมื่อดวงอาทิตย์ตกดิน (แบต) โดย PV3 เป็นตัวบอกว่าเป็นเวลากลางวันหรือเวลาเย็น เป็นระบบที่ออกแบบขึ้นเพื่อปรับทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้หันเข้าหาดวงอาทิตย์โดยอัตโนมัติ ในแนวตะวันออก-ตะวันตก และการหันกลับสู่ทิศตะวันออกเพื่อรับแสงของเช้าวันใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดตลอดวัน โดยอาศัยการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กผลิตได้ (PV1, PV2) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (Position Sensor) ร่วมกับรีเลย์เพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าหมุนขับเคลื่อนโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้หันตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

1) หลักการทำงานช่วงกลางวัน – การติดตามดวงอาทิตย์ (Daytime Operation: Sun Tracking)

ในช่วงเวลากลางวัน ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก แผงโซลาร์เซลล์ที่ออกแบบให้ติดตั้งเซนเซอร์รับแสงสองชุด ได้แก่ PV1 (East) และ PV2 (West) จะทำหน้าที่ตรวจจับความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในแต่ละ

ช่วงเวลา โดยในตอนเช้า ดวงอาทิตย์จะอยู่ทางทิศตะวันออกก่อน ส่งผลให้ PV1 ได้รับแสงมากกว่า PV2 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างระหว่าง PV1 และ PV2 จะถูกส่งเข้าสู่วงจรควบคุมรีเลย์ (Relay1–Relay2) รีเลย์ทั้งสองจะทำหน้าที่สั่งการให้มอเตอร์หมุนในทิศทางที่ทำให้แผงโซลาร์เซลล์หันไปยังทิศทางที่มีแสงมากกว่า กล่าวคือ หาก PV1 มีแรงดันสูงกว่า ระบบจะสั่งให้มอเตอร์หมุนแผงไปทางทิศตะวันออกเพื่อรับแสงได้ตรงที่สุด แต่เมื่อดวงอาทิตย์ค่อย ๆ เคลื่อนเข้าสู่ทิศตะวันตก ความเข้มแสงที่ตกกระทบ PV2 จะมากกว่า PV1 วงจรจะตรวจจับความต่างนี้และสลับการทำงานของรีเลย์ให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางตรงข้าม เพื่อให้แผงหันตามดวงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันตกอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น ระบบนี้จะทำให้แผงโซลาร์เซลล์ปรับมุมรับแสงได้อย่างเหมาะสมตลอดทั้งวัน เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อเทียบกับแผงที่อยู่กับที่

2) หลักการทำงานช่วงเย็น – การหันกลับรอเช้า (Evening Operation: Return to Morning)

เมื่อเข้าสู่ช่วงเย็นหรือดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า แสงที่ตกกระทบ PV1 และ PV2 จะลดลงจนไม่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ วงจรจะตรวจจับสถานะนี้และเปลี่ยนเข้าสู่โหมด “การหันกลับรอเช้า” โดยใช้พลังงานที่เก็บสะสมไว้ใน Super Capacitor ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุขนาดใหญ่สำหรับจ่ายพลังงานให้วงจรทำงานในระยะสั้น

เมื่อ Super Capacitor ปล่อยพลังงานเข้าสู่วงจร รีเลย์อีกชุดหนึ่งคือ Relay3 และ Relay4 จะถูกกระตุ้นให้ทำงานในโหมดย้อนกลับ (Reverse rotation) เพื่อสั่งให้มอเตอร์หมุนแผงโซลาร์เซลล์กลับไปยังทิศตะวันออกโดยอัตโนมัติ หลังจากการหมุนกลับเสร็จสิ้น ระบบจะเข้าสู่ภาวะพัก (Standby Mode) เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการรับแสงในตอนเช้าของวันถัดไป การออกแบบระบบเช่นนี้ช่วยให้แผงโซลาร์เซลล์สามารถเริ่มต้นรับพลังงานจากแสงแรกของวันได้ทันที โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากแหล่งภายนอกในการปรับทิศทางในช่วงเริ่มต้นของวัน

2.4 การทดสอบแผงวงจร

(1) การทดสอบใช้งานแผงวงจร: แผงวงจรควบคุมต้นแบบที่ทำการผลิตเอง ได้นำมาติดตั้งทดลองใช้งาน ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2568 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการใช้งานแผงวงจรที่ผลิตขึ้น หากมีข้อบกพร่องจะได้ทำการปรับปรุงแก้ไขต่อไป

(2) การทดสอบติดตั้ง: ทำการทดสอบโดยใช้เวลาในการติดตั้งเป็นตัวแปรเปรียบเทียบ ผู้ทดสอบคือให้นักศึกษาชั้นปีที่ 2 สาขาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนายั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จำนวน 2 คน ที่ยังไม่มีประสบการณ์ในการติดตั้งหรือต่อวงจร โดยให้ผู้ทดสอบอ่านและทำความเข้าใจวิธีการติดตั้งจากคู่มือการติดตั้งที่จัดทำขึ้น

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1) แผงวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น

จากการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการออกแบบและพัฒนาแผงวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์พร้อมควบคุมการหันกลับสู่ทิศตะวันออกโดยอัตโนมัติเพื่อรองรับแสงอาทิตย์ของวันใหม่ได้สำเร็จ แผงวงจรแสดงดังรูปที่ 4(ก) และแผงวงจรที่ส่งผลิตจากโรงงานแสดงดังรูปที่ 4(ข) ค่าใช้จ่ายในการผลิตแผงวงจรเองและสั่งผลิต แสดงดังตารางที่ 1 และรายการแสดงอุปกรณ์ที่ใช้บนแผงวงจรจากโรงงาน แสดงดังตารางที่ 2



(ก) แผงวงจรที่ผลิตขึ้นเองพร้อมอุปกรณ์
รูปที่ 5 แผงวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นพร้อมอุปกรณ์ที่ติดตั้ง



(ข) แผงวงจรที่ผลิตจากโรงงานพร้อมอุปกรณ์

ตารางที่ 1 ราคาเปรียบเทียบการผลิตแผงวงจรเอง กับการสั่งผลิตจากโรงงาน

อุปกรณ์	ราคาแผงวงจร (บาท/แผง)	
	ผลิตแผงวงจรเอง	สั่งผลิตแผงวงจรจากโรงงาน
แผงวงจร (แผ่น PCB)	15	39
กระดาดไฟโต้	5	-
น้ำยากัดแผงวงจร	2.5	-
รวม	22.5	39

หมายเหตุ : ไม่รวมราคาปากกา PERMANENT MARKER สำหรับแก้ไขลายเส้นวงจรในกรณีผลิตแผงวงจรเอง

จากตารางที่ 1 การผลิตแผงวงจรด้วยตนเองมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการสั่งผลิตจากโรงงาน อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตด้วยตนเองมีความยุ่งยากและมีความเสี่ยงที่ลายวงจรไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งาน ในทางตรงกันข้าม การสั่งผลิตจากโรงงานแม้จะมีต้นทุนสูงกว่า แต่ลายวงจรที่ได้มีความคมชัดและได้มาตรฐาน ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงเพิ่มเติม

ตารางที่ 2 รายการและจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งบนแผงวงจรที่พัฒนาขึ้น

รายการอุปกรณ์ที่ใช้บนแผงวงจรชุดควบคุมการทำงาน	จำนวนที่ใช้ (ชิ้น)
แผงวงจร (PCB)	1
รีเลย์ 6 โวลต์	2
รีเลย์ 12 โวลต์	2
ฟิวส์ 2 แอมป์	2
ไดโอด 1 แอมป์	4
ไดโอด 3 แอมป์	3
เทอร์มินอล 8 ช่อง	1

2) การทดสอบการทำงานของแผงวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น

หลังจากผลิตแผงวงจรควบคุมต้นแบบขึ้นเองสำเร็จ ได้นำแผงวงจรดังกล่าวไปทดสอบใช้งานกับโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ ณ แปลงเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าแผงวงจรต้นแบบมีความยุ่งยากในการเชื่อมต่อสายไฟและต้องติดตั้งไดโอดเพิ่มเติมเพื่อป้องกันไฟไหลย้อนกลับในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ จึงได้ปรับปรุงแผงวงจร โดยติดตั้งไดโอดให้อยู่บนแผงวงจรเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบจุดบกพร่องในการผลิตแผงวงจรเองที่มีลายเส้นวงจรไม่ต่อเนื่อง และการบัดกรีเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ไม่แน่นหนา ส่งผลให้ชุดควบคุมทำงานผิดพลาด หลังจากแก้ไขข้อบกพร่องข้างต้นเรียบร้อยแล้ว ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งการติดตามดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน และการหันกลับไปรอรับแสงอาทิตย์ของเข้าวันใหม่ได้อย่างถูกต้อง และหลังจากที่แผงวงจรควบคุมต้นแบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการสั่งผลิตแผงวงจรจากโรงงาน ซึ่งได้ติดตั้งทดสอบใช้งานแผงวงจรที่พัฒนาขึ้นตั้งแต่ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2568 หลังจากปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติม ได้มีการใช้แผงวงจรดังกล่าวมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงปัจจุบัน (ตุลาคม 2568) แผงวงจรที่พัฒนาขึ้นยังคงใช้งานได้ปกติ



รูปที่ 6 โครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบการทำงานชุดควบคุมที่พัฒนาขึ้น

3) การทดสอบติดตั้งแผงวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น

จากการทดสอบติดตั้งแผงวงจรที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งแผงวงจรเดิม ได้ผลทดสอบดังนี้

แผงวงจรควบคุมเดิม (แบบ 2 แผงวงจรแยกกัน) : การทดสอบติดตั้งแผงวงจรเดิมแสดงดังรูปที่ 7(ก) ซึ่งใช้เวลาในการติดตั้งเฉลี่ยประมาณ 16 นาที 2 วินาที โดยผู้ติดตั้งคนแรกใช้เวลา 16 นาที 22 วินาที และผู้ติดตั้งคนที่สอง ใช้เวลา 15 นาที 41 วินาที พบว่ามีความยุ่งยากในการเดินสายไฟเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แต่ละชิ้น ทำให้การติดตั้งมีความซับซ้อนและใช้เวลานาน นอกจากนี้ยังพบข้อผิดพลาดในการเชื่อมต่อวงจร ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้ต้องใช้เวลาในการแก้ไขเพิ่มเติม นอกเหนือจากเวลาในการติดตั้งข้างต้น



(ก) แผงวงจรเดิม



(ข) แผงวงจรที่พัฒนาแล้ว

รูปที่ 7 ผลการทดสอบติดตั้งแผงวงจรเดิม

แผงวงจรควบคุมที่พัฒนาขึ้น : รูปที่ 7(ข) แสดงผลการทดสอบติดตั้งแผงวงจรที่พัฒนาขึ้น โดยผู้ติดตั้งคนแรกใช้เวลา 2 นาที 28 วินาที และผู้ติดตั้งคนที่สอง ใช้เวลา 3 นาที 58 วินาที ซึ่งใช้เวลาในการติดตั้งเฉลี่ยประมาณ 3 นาที 13 วินาที จากการสัมภาษณ์ผู้ติดตั้งอุปกรณ์พบว่าการรวมแผงวงจรเป็นแผงวงจรเดียวกัน ช่วยลดระยะเวลาในการศึกษาทำความเข้าใจในการเชื่อมต่อวงจรและการลงมือปฏิบัติเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ทำให้มีความสะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น

สรุปแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบติดตั้งวงจรควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบเดิมกับระบบที่พัฒนาขึ้น

รายการ	ระยะเวลาในการต่อชุดอุปกรณ์ (นาที)		
	คนที่ 1	คนที่ 2	เวลาเฉลี่ย
แผงวงจรเดิม	16:22	15:41	16:02
แผงวงจรที่พัฒนาขึ้น	2:28	3:58	3:13

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์โดยผนวกแผงวงจรการติดตามดวงอาทิตย์และแผงวงจรควบคุมการหันกลับมารอรับแสงอาทิตย์ก่อนเข้าวันใหม่ให้อยู่บนแผงวงจรเดียวกัน ซึ่งชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ ลดความยุ่งยากในการติดตั้ง โดยการทดสอบติดตั้งใช้งานจริง พบว่าแผงวงจรที่พัฒนาขึ้น ง่ายต่อการติดตั้งใช้งาน ช่วยลดระยะเวลาในการศึกษาทำความเข้าใจในการเชื่อมต่อวงจรและขั้นตอนการต่อสายไฟ ทำให้มีความสะดวกในการติดตั้งใช้งาน รวมถึงช่วยลดระยะเวลาในการติดตั้งลงได้ถึง 5 เท่าช่วยส่งเสริมให้มีการเผยแพร่และนำเทคโนโลยีระบบติดตามดวงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่สนับสนุนงบประมาณ และ สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ คุณกฤษณชัย ยอดอรรถัย ผู้ช่วยวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2567). ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์. สืบค้นเมื่อ 28 กรกฎาคม 2568, จาก <https://www.dede.go.th/articles?id=3751>.
- [2] N. Barsoum, "Fabrication of dual-axis solar tracking controller project," *Intelligent Control and Automation*, 2, pp. 57-68, 2011.
- [3] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล และ วัชรวิทย์ เจียรวรรณ. (2558, 4-6 พฤศจิกายน). "ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนราคา ถูกสำหรับบ้านพลังงานแสงอาทิตย์" , ใน การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 (น. 156-159). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล และเรวัต ใจสุทธิ. (2563). การประยุกต์ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์. รายงานผลการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย. สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.).
- [5] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล, กฤษณนธ์ สอนจันทร์, ธนัท ฤทธิ์แสง, และปณณธร สดคมขำ (2566, 2-4 พฤศจิกายน) "การปรับปรุงชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อปรับโครงสร้างให้หันกลับมารอสำหรับเข้าวันใหม่" , ใน การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 (น. 46-52). มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
- [6] ธนัท ฤทธิ์แสง, และปณณธร สดคมขำ. (2565). การพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

การพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน Development of Moisture and Temperature Control System for Melon Greenhouses

ชาร์ฟ จ้าววัง ยูวารี เวาะและ ลุตฟี สือนิ อีลีหัยะ สนิโซ วาริชา วาแม และมุฮัมมัดคอยรี หะยีบากา*
Charif Jawang, Yuwaree Wohlaeh, Lutfee Sueni, Eleeyah Saniso, Warisa Wamae
and Muhammadkhoiri Hayibaka*

สาขาวิชาพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ยะลา 95000
Renewable Energy Technology Program, Faculty of Science Technology and Agriculture,
Yala Rajabhat University, Yala 90000

¹Corresponding author: Tel.: 0862968790. E-mail address: muhammadkhoiri.h@yru.ac.th

Abstract

This study aimed to develop a soil moisture, relative humidity, and temperature control system for melon greenhouses located in Raman District, Yala Province, Thailand. The control system was designed and installed with components including a soil moisture sensor, a drip irrigation system, ventilation fans, and a misting unit, all connected to a microcontroller to regulate environmental conditions suitable for melon growth. The system operated based on a threshold-based control principle, whereby the microcontroller automatically activated or deactivated each device when the measured values deviated from predefined set points. The experiment was conducted from June to August 2023, during which data on soil moisture, relative humidity, and the greenhouse's internal and external temperatures were recorded. The results revealed that the system effectively maintained soil moisture levels consistent with melon water requirements across different growth stages, controlled the internal temperature within the range of 25–30 °C despite an average external temperature of 33.18 °C, and sustained relative humidity between 65–80% throughout the experiment. These findings indicate that the developed control system can assist farmers in effectively managing climatic variability, thereby improving both the quality and stability of melon production.

Keywords: Soil Moisture Control System, Temperature Control System, Melon Greenhouses

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อนในพื้นที่อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยออกแบบและติดตั้งระบบควบคุมที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ระบบน้ำหยด พัดลมระบายอากาศ และระบบพ่นหมอกเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเมล่อน โดยระบบควบคุมทำงานตามหลักการแบบกำหนดค่ามาตรฐาน ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งเปิด-ปิดอุปกรณ์อัตโนมัติเมื่อค่าที่วัดได้เบี่ยงเบนจากค่าที่ตั้งไว้ล่วงหน้า การทดลองดำเนินการระหว่างเดือนมิถุนายน-สิงหาคม 2566 โดยเก็บข้อมูลความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน และอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกโรงเรือน ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถรักษาความชื้นในดินให้อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับความต้องการของเมล่อนแต่ละระยะการเจริญเติบโต ควบคุมอุณหภูมิภายในให้อยู่ในช่วง 25-30 °C แม้อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยอยู่ที่ 33.18 °C และรักษาความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่

ในช่วง 65-80% ตลอดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยเกษตรกรจัดการความแปรปรวนของสภาพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การผลิตเมล็ดพันธุ์มีคุณภาพและมีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ระบบควบคุมความชื้น ระบบควบคุมอุณหภูมิ โรงเรือนปลูกเมล็ดพันธุ์

การศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัว

A Study of Fuel Properties of Cow Dung Briquette

กฤษณนธ์ สวนจันทร์*, ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล, กฤษฎา แสนคำ, กิตติพัทธ์ พูลสวัสดิ์ และ ปาณทัสบดีน อักษรกลาง

Kritchanon Suanjan*, Tanit Ruangrunghchaikul, Kitsada Saenkhram, Kittiphath Poonsawat and

Paruehatsabodin Aksornklang

สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12120

Department of Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology,

Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani 12120

Corresponding author: Tel.: 084-9693112. E-mail address: ksuanjan@tu.ac.th

Abstract

This research investigated the optimal moisture content of cow dung briquettes using a hand-operated briquette-making device without heat or binder. The physical fuel properties of the briquettes were also studied, including proximate analysis (moisture content, ash content, volatile matter content, and fixed carbon content), fuel ratio, heating value, and water boiling test. The results showed that the optimum moisture content for hand briquetting was 63.8%, obtained using a mixture of 1.8 liters of water, 0.6 kg of ground cow dung, and 0.4 kg of rice husk. The drop shatter test for the friability index revealed that the briquettes had an index of 0.94, indicating suitability for use and transportation. The experimental results of cow dung briquettes showed that pure cow dung briquettes had a lower fuel heating value than the standard briquettes. Therefore, the researchers mixed rice husks with cow dung in ratios of 80:20 and 60:40, thereby improving fuel properties. The briquette ratio of 60:40 had the best properties, including moisture content, ash content, volatile matter content, fixed carbon content, fuel ratio, and fuel heating value of 9.2%, 18.6%, 69%, 3.2%, 0.046%, and 3,549 cal/g, respectively. These properties passed the pellet fuel standards (normal grade) and could boil water at a maximum temperature of 96°C in as little as 6 minutes and 40 seconds. Cow dung briquettes can be used as an alternative fuel for household cooking, insect repellent, and heating, thereby reducing livestock waste and being utilized. Furthermore, cow dung briquettes can be made more efficient and expanded for use as an industrial fuel in the future.

Keywords: biomass briquette, cow dung, proximate analysis, heating value

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความชื้นที่เหมาะสมในการอัดแท่งของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัว โดยใช้อุปกรณ์อัดแท่งด้วยแรงคน อัดแบบไม่ใช้ความร้อนและไม่ใช้ตัวประสาน และ ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว) อัตราส่วนเชื้อเพลิง ค่าความร้อน และการทดสอบการใช้งานในการหุงต้ม ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการอัดแท่งด้วยแรงคน อยู่ที่ร้อยละ 63.8 มีส่วนผสมของน้ำ 1.8 ลิตร และส่วนผสมของมูลวัวแห้งที่ย่อยแล้ว 0.6 กิโลกรัม กับ แกลบ 0.4 กิโลกรัม และเมื่อทดสอบความแข็งแรงของเชื้อเพลิง เพื่อหาดัชนีการแตกร่วน พบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งมีค่าดัชนีแตกร่วน 0.94 ซึ่งเหมาะสมในการนำไปใช้งานและขนส่งได้ หลังจากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัวมาทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง ผลการทดลอง

พบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัวล้วน มีค่าความร้อนต่ำกว่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่ง ผู้วิจัยจึงนำกลับมาผสมกับมูลวัวในอัตราส่วนมูลวัวต่อแกลบ 80:20 และ 60:40 ทำให้มีคุณสมบัติของเชื้อเพลิงสูงขึ้น โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัวผสมแกลบที่อัตราส่วน 60:40 มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด คือ มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว อัตราส่วนเชื้อเพลิง และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง เท่ากับ ร้อยละ 9.2, ร้อยละ 18.6, ร้อยละ 69, ร้อยละ 3.2, 0.046 และ 3,549 cal/g ตามลำดับ ซึ่งผ่านมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด (เกรดธรรมดา) และสามารถต้มน้ำได้อุณหภูมิสูงสุดที่ 96 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาน้อยสุด 6 นาที 40 วินาที ซึ่งสามารถนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับครัวเรือนภายในชุมชน เช่น การหุงต้ม การไล่แมลง การให้ความอบอุ่น เพื่อลดของเสียทางปศุสัตว์ แล้วนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งสามารถพัฒนาเชื้อเพลิงอัดแท่งจากมูลวัวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และขยายผลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงอัดแท่ง มูลวัว การวิเคราะห์เชิงปริมาณ ค่าความร้อน

การพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้น เรื่องการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
ในจังหวัดพิษณุโลก

Development of a short-term training course on charcoal briquette production from
agricultural waste materials in Phitsanulok Province.

วีระบุญกิตติ ชุมพรพอง^{1*} ชัชวินทร์ นวลศรี² ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด¹ และสมิทธิ์ถ์ แก้วมาคุณ¹

Veeraboonkitt Chumpompong^{1*} Chatchawin Nualsri² Nattawut Khaosaad¹ and Samittouch Kaewmakhoon¹

¹ หลักสูตรสาขาวิชาการศึกษา วิชาเอกวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 65000

² หลักสูตรสาขาวิชาเทคโนโลยีระบบเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 65000

¹General Science Education, Faculty of Education, Pibulsongkram Rajabhat University 65000

²Department of Agricultural System Technology, Faculty of Food and Agricultural Technology,
Pibulsongkram Rajabhat University 65000

¹Corresponding author: Tel : 088-2938403 E-mail address: veeraboonkitt.tae2535@gmail.com

Abstract

This research aimed to 1. create and determine the core qualities of a short-term training course on the production of charcoal briquettes from agricultural waste; 2. compare post-training achievement scores against the 70% criteria; and 3. Examine trainees' satisfaction with the short-term training course. The target group for this research was 20 participants from the Ban Wang Krut Community Enterprise Group and the Muang Song Kwae Agricultural Product Processing Community Enterprise Group. The participants were recruited voluntarily and with interest. The research instruments were: 1) a short-term training course component suitability and consistency assessment form; 2) a short-term training plan component consistency assessment form; 3) a knowledge and understanding test regarding the training course; and 4) a satisfaction questionnaire for the Ban Wang Krut Community Enterprise Group and the Muang Song Kwae Agricultural Product Processing Community Enterprise Group regarding the short-term training course. The results of the research revealed: 1) the results of the short-term training course construction and quality assessment; and the results of the training course component suitability assessment form. Overall, it was found to be most appropriate ($\bar{X}=4.58$, S.D.=0.16). 2) Study the results of using the short-term training course as follows: 2.1 Compare the achievement scores after training with the 70% criterion. The average total score was 24.45 points, or 83.33%, exceeding the specified criterion. 2.2 The results of the study of the satisfaction of the trainees with the short-term training course found that the Wang Krut Community Enterprise Group and the Song Kwae Agricultural Product Processing Community Enterprise Group were overall the most satisfied ($\bar{X}=4.72$, S.D.=0.47).

Keywords: Training courses / Agricultural waste materials / Charcoal briquettes

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1. สร้างและหาคุณภาพหลักของสูตรฝึกอบรมระยะสั้น เรื่องการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรฯ 2. เพื่อเปรียบเทียบคะแนนผลสัมฤทธิ์หลังการฝึกอบรมกับเกณฑ์ร้อยละ 70 และ 3. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้เข้ารับการฝึกอบรมที่มีต่อหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้น ฯ โดยกลุ่มตัวอย่างของการวิจัยครั้งนี้คือ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านวังครุฑ และกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลผลิตเกษตรเมืองสองแควจำนวน 20 คน ได้มาโดยความสมัครใจและความสนใจ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ 1) แบบประเมินความเหมาะสมและสอดคล้องขององค์ประกอบ

หลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้นฯ 2) แบบประเมินความสอดคล้องขององค์ประกอบภายในแผนการจัดการฝึกอบรมระยะสั้นฯ 3) แบบทดสอบวัดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักสูตรฝึกอบรม และ 4) แบบสอบถามความพึงพอใจของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านวังครุฑ และกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลผลิตเกษตรเมืองสองแควที่มีต่อหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้นฯ ผลการวิจัยพบว่า 1) ผลการสร้างและหาคุณภาพหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้นฯ ผลการประเมินความเหมาะสมขององค์ประกอบหลักสูตรฝึกอบรม ในภาพรวมมีความเหมาะสมระดับมากที่สุด ($\bar{x}=4.58$ S.D.=0.16) 2) ศึกษาผลการใช้หลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้นฯ ดังนี้ 2.1 เปรียบเทียบคะแนนผลสัมฤทธิ์หลังการฝึกอบรมกับเกณฑ์ร้อยละ 70 พบว่า คะแนนรวมเฉลี่ย 24.45 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 83.33 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด 2.2 ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้เข้ารับการฝึกอบรมที่มีต่อหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้นฯ พบว่ากลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านวังครุฑ และกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลผลิตเกษตรเมืองสองแควโดยรวมมีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด ($\bar{x}=4.72$ S.D.=0.47)

คำสำคัญ: หลักสูตรฝึกอบรม/วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร/ถ่านอัดแท่ง

การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อแนวทางการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะ ใช้งานเป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำ

Economic evaluation for use goat dung pellets as boiler fuel

ชินวร ศุภวงศ์¹และ ชานนท์ บุญมีพิพิธ^{*1}

Chinnavon Suphawong¹ and Chanon Bunmephiphit^{*1}

¹ การจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73170

¹ Smart Energy and Environmental Management, Rattanakosin College for Sustainable Energy and
Environment, Rajamangala

University of Technology Rattanakosin, Nakhonpathom 73170, Thailand

¹Corresponding author: Tel: 0847772994 E-mail address: Chanon.bun@rmutr.ac.th

Abstract

The rising demand for energy in economic and industrial sectors has reinforced dependence on fossil fuels, despite their high calorific value. However, fossil energy sources are constrained by limited availability, high import costs, and adverse environmental impacts, particularly greenhouse gas emissions that drive global warming. Biomass energy has emerged as a sustainable alternative, with goat manure, a livestock-derived waste, showing potential as a pelletized fuel. Experimental characterization revealed that goat-manure pellets have a calorific value of 9.29 MJ/kg, a moisture content of 12.14%, a fixed carbon content of 10.35%, an ash content of 41.38%, and a volatile matter content of 36.13%, which did not comply with the limits specified in the Thai Industrial Standard (TIS 2772-2560). However, When the analytical results of goat-manure pellet properties were used in the evaluation of their potential as a substitute for fuel oil in a 1,000 kg boiler, the economic review revealed a significant reduction in fuel cost, yielding a positive Net Present Value (NPV), a satisfactory Internal Rate of Return (IRR), and a payback period of approximately 3.39 years. Furthermore, the use of goat manure pellets can mitigate CO₂ emissions by approximately 1.841 tons/day. These findings underscore the dual benefits of goat-manure pelletizations as a viable waste-to-energy pathway, offering both economic feasibility and environmental sustainability.

Keywords: Biomass Energy, Goat Manure, Pellet Fuel, Fixed Carbon, Economics

บทคัดย่อ

ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นในภาคเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมได้ส่งผลให้เกิดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้น แม้ว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลจะมีความร้อนสูง แต่ก็มีข้อจำกัดด้านปริมาณที่มีอยู่จำกัด ต้นทุนการนำเข้าสูง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน พลังงานชีวมวลจึงได้กลายเป็นทางเลือกที่ยั่งยืน โดยมูลแพะซึ่งเป็นของเสียจากปศุสัตว์แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำมาอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์เชิงทดลองพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะมีค่าความร้อนเท่ากับ 9.29 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่ความชื้น 12.14% และมีคาร์บอนคงเหลือ 10.35% ปริมาณเถ้า 41.38% และสารระเหย 36.13% ไม่สอดคล้องขอบเขตที่กำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2772-2560) เมื่อนำผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะมาประเมินศักยภาพในการเป็นพลังงาน

ทดแทนน้ำมันเตาในหม้อต้มไอน้ำขนาด 1,000 กิโลกรัม ผลการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าการลดต้นทุนเชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นบวก อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ และระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3.39 ปี. นอกจากนี้ การใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะยังสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ประมาณ 1.841 ตันต่อวัน ผลการศึกษานี้จึงเน้นย้ำถึงประโยชน์สองด้านของการอัดเม็ดมูลแพะในฐานะทางเลือกการจัดการของเสียที่สามารถผลิตพลังงานได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม.

คำสำคัญ: พลังงานชีวมวล, มูลแพะ, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, คาร์บอนคงตัว, เศรษฐศาสตร์

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจแต่พลังงานส่วนใหญ่ที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน มีจำกัดและไม่สามารถทดแทนได้ในเวลา ทำให้ต้องพัฒนาพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานชีวมวลจากสารอินทรีย์ ของพืชและสัตว์ รวมถึงพลังงานแสงอาทิตย์ น้ำ ลม และนิวเคลียร์ พลังงานชีวมวลได้รับความนิยมเพราะมีราคาถูก เป็นพลังงานสะอาดและช่วยลดการปลดปล่อย ก๊าซเรือนกระจก (GHG) ซึ่งส่วนใหญ่ปัจจุบันอยู่ภาคพลังงานสูงถึง 73 % ส่งผลต่อภาวะโลกร้อนอย่างมากที่สุด อีกทั้งยังสนับสนุนการใช้ทรัพยากรจากการเกษตรในประเทศไทย สร้างเชื้อเพลิงจากมูลสัตว์และผลิตปุ๋ยจากของเหลือจากการเกษตรและปศุสัตว์ พลังงานชีวมวลมีบทบาทสำคัญต่อการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งเสริมเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และพัฒนาคุณภาพชีวิตมนุษย์และสิ่งมีชีวิต โดยสามารถนำไปได้ทั้งในบ้านเรือน การเกษตร และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ถือเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืนในหลายมิติ

พลังงานชีวมวล เป็นพลังงานที่มาจากสารอินทรีย์ที่สามารถกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและผลิตพลังงานได้ โดยสารอินทรีย์ จะได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือทางการเกษตร และมูลสัตว์ [1] เป็นต้น พลังงานชีวมวลสามารถนำมาเผาไหม้ เพื่อแปรรูปเป็นพลังงานความร้อน หรือผลิตพลังงานไฟฟ้า สามารถนำมาทดแทนพลังงานฟอสซิลที่ประเทศนำเข้า ซึ่งพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ช่วยรักษาสภาพแวดล้อม รวมถึงเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและสามารถหาได้ทุกที่ในประเทศไทย การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล จากการวัสดุเหลือจากการเกษตร วัชพืช และมูลสัตว์ [2] ซึ่งแต่ละประเภทของชีวมวลมีแนวทางการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในเชิงเทคนิคและวิธีการผลิต และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความชื้นของวัตถุดิบ [3] ก่อนเข้ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล และอัตราส่วนที่ศึกษาของแต่ละงานวิจัย ประกอบด้วย การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไม่ร่วมกับใบอ้อย [4] ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย ที่เป็นเศษพืชเหลือจากงานเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม [4] มูลสุกร มูลไก่ [5] มูลวัว มูลเป็ด แกลบ ขี้เลื่อย และใบมะม่วง ขุยมะพร้าวและชีวมวลเหลือในชุมชน [1] พบว่าโดยทั่วไปขนาดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm และความยาว 15-20 mm [3] หรือแล้วแต่การนำไปงาน

ดังนั้นในการศึกษานี้ ผู้วิจัยมีความสนใจต่อการศึกษาความเหมาะสมต่อการนำมูลแพะมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทให้ความร้อน ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเป็นเชื้อเพลิง และประเมินความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ ประกอบด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) อัตราส่วน ผลตอบแทนต่อเงินลงทุน (Benefit-Cost Ratio, B/C) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ในการใช้งานเพื่อทดแทนน้ำมันเตาของหม้อไอน้ำ Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1 Ton ใช้ชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะ เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

วิธีการวิจัย

1. กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากมูลแพะ

1.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ใช้เครื่องวัดความชื้นในดิน (Capacitance) สำหรับกระบวนการผลิตชีวมวลเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งมูลแพะจะมีลักษณะเป็นเม็ดคล้ายเม็ดมะขาม โดยนำมูลแพะแยกเศษผงเจือปนออกโดยมีความชื้น 1 ตามมาตราวัด และมีความหนาแน่น 290 Kg/m³ แสดงดังภาพที่ 1(A,B) และนำเข้าเครื่องตีป่น แสดงดังภาพที่ 1(C) นำผงมูลแพะผสมน้ำให้

มีความชื้นเพียงพอจะทำให้สามารถจับตัวเป็นก้อนได้ เนื่องจากกรณีศึกษาที่ใช้มูลแพะเท่านั้น น้ำจึงเป็นตัวประสานและมี ส่วนผสม 1:0.8 คลุกเคล้าให้มีความชื้น 8 ค่าความหนาแน่น 410 Kg/m^3 ต่อบรรยากาศการอัดเม็ด ดังแสดงในภาพที่ 2(A-B) ก่อนอัดเม็ดจะต้องอุ่นเครื่องอัดเม็ดโดยปล่อยให้เครื่องเย็นและลูกกลิ้งอัดทำงานประมาณ 10-15 นาที ให้อุณหภูมิของระบบ สูงประมาณ 60°C

1.2 กระบวนการอัดเม็ดมูลแพะและลดความชื้นดังแสดงดังภาพที่ 2(A-F) โดยการนำมูลแพะที่มีความชื้นเหมาะสม นั้นลำเลียงหรือโรยเข้าสู่เครื่องอัดเม็ดอัตราการป้อน 40 kg/hr. แสดงในภาพที่ 2(C) มูลแพะจะถูกลูกกลิ้งบดอัดกระแทกผ่านรู ของถาดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. และไหลออกมาจากเครื่องอัด แสดงในภาพที่ 2(D) อย่างต่อเนื่อง และมูลแพะ อัดเม็ดยังไม่ถึงแม้จะถูกอัดด้วยแรงดันสูงและมีอุณหภูมิทำงานของเครื่องมากกว่า 60°C ได้เม็ดเชื้อเพลิง ภาพที่ 2(E) มีความชื้น สูง ทำการลดความชื้นโดยการผึ่งแดด 3 วัน แสดงดังภาพที่ 2(F)



ภาพที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการอัดเม็ดมูลแพะ (A) มูลแพะที่เหลือทิ้งจากกระบวนการเลี้ยงสัตว์ (B) มูลแพะที่คัดสิ่งปนเปื้อนออก และ (C) มูลแพะที่ผ่านกระบวนการตีปน



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตมูลแพะอัดเม็ด (A) มูลแพะที่ตีปนจนมีขนาดเล็ก (B) การเพิ่มความชื้นให้มูลแพะเพื่อให้สามารถจับตัวเป็นก้อนได้ (C) เครื่องอัดเม็ด (D) ลักษณะการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (E) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความชื้นสูง และ (F) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 12.14

1.3 การทดสอบคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดขึ้นรูปแบบอัดเม็ด โดยใช้ชีวมวลตัวอย่างอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลและเก็บตัวอย่างทดสอบ การวิเคราะห์สมบัติประกอบไปด้วยความหนาแน่น (Bulk Density มาตรฐาน ASTM E873-62) ความชื้น (Moisture มาตรฐาน ASTM E 871) ปริมาณเถ้า (Ash มาตรฐาน ASTM D1102) ปริมาณสารระเหย (Volatile Mater มาตรฐาน ASTM E 872) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon มาตรฐาน ASTM E 872) ค่าความร้อน (Heating value) ด้วยเครื่อง Boom calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 การวิเคราะห์เชิงการเผาไหม้ TG/DTA เครื่อง

THERMORAIMETIC ANALYZER ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 Tarsus เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ C, H, N, S ด้วยเครื่อง ELEMENTAL ANALYZER ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Flash Smart

2. การวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) อัตราผลตอบแทนของโครงการ คือ อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ที่ทำให้ค่า NPV มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น อัตราผลตอบแทนของโครงการจึงได้แก่อัตราดอกเบี้ยหรือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้ NPV=0 สำหรับการคำนวณอัตราผลตอบแทนทางการเงิน เพื่อหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{\text{Benefit}}{(1+IRR)^t} - \frac{\text{Cost}}{(1+IRR)^t} \quad (1)$$

โดยที่	IRR	คือ	อัตราผลตอบแทนทางการเงินตราสุดท้ายยอมรับได้
	n	คือ	อายุโครงการ
	t	คือ	จำนวนปีโครงการ
	Cost	คือ	มูลค่าของต้นทุนในปีที่ t (บาท)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) การตัดสินใจลงทุนอาจขึ้นกับปัจจัยแบบเดียว หรือหลายแบบพิจารณา ร่วมกันได้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) มูลค่าปัจจุบันหมายถึง มูลค่าผลตอบแทนที่เป็นมูลค่าปัจจุบัน ซึ่งอาจแปลงมาจากมูลค่า ผลตอบแทนรายคาบหรือผลตอบแทนในอนาคต สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+K)^t} \quad (2)$$

โดยที่	NPV	คือ	มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิตลอดอายุโครงการ
	n	คือ	อายุโครงการ
	t	คือ	จำนวนปีโครงการ
	B _t	คือ	มูลค่าผลตอบแทนเกิดขึ้นในปี t (บาท)
	C _t	คือ	มูลค่าต้นทุนในปี t (บาท)
	K	คือ	อัตราดอกเบี้ย (Discount rate) 7.75 %

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PP) หมายถึงระยะเวลาที่ทำให้ผลตอบแทนมีค่าเท่ากับมูลค่าที่ลงทุนนั้น คือการพิจารณาจำนวนปีที่ "ได้รับผลประโยชน์" คุ้มกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน ดังนั้นหากดำเนินงานแล้วผลตอบแทน หรือผลประโยชน์ คุ้มกับจำนวนเงินที่ลงทุนได้รวดเร็วก็จะดีเพราะความเสี่ยงน้อยและผู้ลงทุนสามารถนำเงินที่ ถอนทุนได้ไปลงทุน เพื่อหาประโยชน์ในกิจการอื่นๆ ต่อไป

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Cost of Investment}}{\text{Average Annual Cash Flow}} \quad (3)$$

อัตราส่วนผลตอบแทนต่อเงินลงทุน (Benefit-Cost Ratio, B/C) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อเงินลงทุน คืออัตรา ส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนหรือมูลค่าผลตอบแทนของโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของกระแสต้นทุนหรือ ต้นทุนรวมของโครงการ ค่าพารามิเตอร์นี้ใช้วัดความคุ้มค่าของโครงการ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$B/C \text{ Ratio} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (4)$$

จากการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมูลแพะที่ใช้มูลแพะเป็นสิ่งที่เหลือทิ้งจากการทำ ปศุสัตว์เลี้ยงแพะของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ใช้เป็นพลังงานชีวมวลทดแทนน้ำมันเตาสำหรับเชื้อเพลิงให้ความร้อนของหม้อต้มไอน้ำประเภทสตีมบอยเลอร์ท่อไฟชีวมวล Fire Tube Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1 Ton แสดงดังภาพที่ 3 คุณสมบัติและตารางที่ 1



ภาพที่ 3 หม้อต้มไอน้ำประเภทท่อไฟชีวมวล Fire Tube Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1,000 kg

คุณลักษณะเฉพาะของสตีมบอยเลอร์ท่อไฟชีวมวล Fire Tube Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1 Ton

- รุ่น Type สตีมบอยเลอร์ ท่อไฟนอน เชื้อเพลิงชีวมวล Fire Tube Boiler
- เชื้อเพลิง Fuel น้ำมันเตากลาง ค่าความร้อน 42 MJ/Kg
- น้ำมันเตาความหนาแน่น 0.95 Kg/Lr ราคา 22 Bath/L
- ประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ 75-80 %
- แรงดันใช้งาน 7.0-10 Bar / Temp.160-180°C
- แรงดันสูงสุด 12.0 Bar-Max.
- ทดสอบแรงดัน 25.0 Bar
- Operation 8 Hr/day
- ปริมาณการใช้น้ำมันเตากลาง 575.36 L/Day
- ค่าน้ำมัน 12,657.92 Bath/Day

ตารางที่ 1 ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง Steam Boiler (KBS-WC) ขนาด 1Ton

ลำดับ	ขนาดหม้อไอน้ำ Ton	พลังงาน กิโลแคลอรี	กำลัง กิโลวัตต์	BHP แรงม้า หม้อน้ำ	ปริมาณการใช้น้ำมันเตากลาง (ลิตร/วัน)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท)		หมายเหตุ ประหยัดวันละ
						น้ำมันเตา 22 บาท/ลิตร	ชีวมวลเม็ด 3.92 บาท	
1	1.0	600	700	63.50	575.36	12,657.92	10,229.75	2,358.17

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากมูลแพะ ภาพที่ 2(E) ก่อนลดความชื้น มีผิวที่เรียบ โครงสร้างประสานยึดเกาะและจับตัวกันได้ดี สีของมูลแพะอัดเม็ดสีน้ำตาล ความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 12.56 mm. เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 6.0 mm. Bulk Density 790 kg/m³ และหลังลดความชื้นโดยผึ่งแดด 3 วัน แสดงดังภาพที่ 2(F) ลักษณะทางกายภาพของมูลแพะอัดเม็ดมีผิวที่เรียบ ความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 9.33 mm. เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 4.37 mm. Bulk Density 869 kg/m³

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลเชื้อเพลิงอัดเม็ดมูลแพะ หลังผึ่งแดด 3 วัน ความชื้น 12.14% ทดสอบมาตรฐาน ASTM E871-82:2013 ,ปริมาณสารระเหย 26.13% ทดสอบมาตรฐาน ASTM E872-82:2013 , ปริมาณเถ้า 41.38% ทดสอบมาตรฐาน ASTM E 1534-93:2013 ปริมาณคาร์บอนคงตัว 10.35% ทดสอบมาตรฐาน ASTM D3172

ความร้อนมีค่า 2,220.26 Cal/g หรือ 9.29 MJ/Kg โดยใช้เครื่อง Boom calorimeter วิเคราะห์ CHNS/O Carbon (C) 25.23 Hydrogen (H) 3.23 Nitrogen (N) 2.75 Sulfur (S) 0.47 ใช้เครื่อง Elemental Analyzer วิเคราะห์ค่าการสลายตัวแสดงพฤติกรรมเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analysis ของชีวมวลเชื้อเพลิงอัดเม็ดมูลแพะ โดยแบ่ง เป็นช่วงอุณหภูมิเป็น 3 ระยะหลักวิเคราะห์ TG/DTG ตามช่วงอุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 85–276°C) เป็นขั้นตอนเตรียมก่อนการเผาไหม้จริง ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (ประมาณ 276–332°C) เป็นช่วงที่มีการเผาไหม้หลักของชีวมวล ช่วงอุณหภูมิสูง (ประมาณ 660–678°C) เป็นการสลายตัวของ lignin และสารอนินทรีย์บางชนิด

3. การวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ ปัจจัยต่อการพิจารณาการเปรียบเทียบเมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากมูลแพะใช้ทดแทนน้ำมันเตา พบว่าเมื่อ ชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะ ทำการผึ่งแดด 3 วัน ความชื้นลดลงเหลือ 12.14% น้ำหนักลดลง 16% โดยคำนวณจากค่าความหนาแน่น จากการผลิตชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะอัตราการผลิต 400 kg/Day นำมาผึ่งแดด 3 วัน คงเหลือ 336 kg นำมาคำนวณหาต้นทุนเป็น kg/Bath ต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดมูลแพะ (ต้นทุนวัตถุดิบ) กรณีการผลิตขั้นต่ำ 400 kg โดยมีมูลค่าκιโลกรัมละ 1.5 บาท รวมต้นทุนวัตถุดิบ 600 บาท แรงงานบุคลากรในการผลิต (2 คน) คนละ 300 บาท รวมทั้งสิ้น 600 บาท ต้นทุนน้ำมันเชื้อเพลิง 117.12 บาท รวมรายจ่ายต้นทุน 1,317.12 บาท/วัน ชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตได้ต้องทำการให้แห้งด้วยการผึ่งแดดอย่างน้อย 3 วัน ผลผลิตที่พร้อมใช้งานเมื่อทำให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือ 336 kg เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิต 3.92 B/kg

ปริมาณความร้อนของชีวมวลอัดเม็ดจากมูลแพะจะนำไปพิจารณาเพื่อทดแทนน้ำมันเตาของหม้อไอน้ำขนาด 1 Ton ซึ่งโดยปกติจะใช้น้ำมันเตา 575.36 L/day ต่อการใช้งานแต่ละวัน น้ำมันเตามีค่าความร้อนเท่ากับ 42 MJ/kg จึงทำให้การใช้งานน้ำมันเตาในแต่ละวันจะต้องการค่าพลังงาน 24,165.12 MJ/Day เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวพิจารณาเพื่อนำชีวมวลอัดเม็ดที่มีความชื้น 12.14% มีค่าความร้อน 9.26 MJ/kg เท่ากับ 2,609.63 kg/Day ต้นทุนในการใช้น้ำมันเตาวันละ 12,657.92 Bath/Day ซึ่งมีราคาต่อลิตร 22.00 Bath/L และเมื่อนำชีวมวลอัดเม็ด 2,609.63 Kg/Day จะสามารถนำมาทดแทนเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเตา โดยชีวมวลอัดเม็ดมีราคา 3.92 Bath/kg รวมเป็นทั้งสิ้น 10,229.75 Bath/Day ซึ่งมีผลการประหยัด 2,358.17 Bath/Day จะมีค่าการประหยัดเมื่อทดแทนน้ำมันเตา 4.10 Bath/Liter และกำหนดโครงการต้องผลิตชีวมวลอัดเม็ดวันละ 2.6 Ton/Day เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ Boiler ขนาด 1 Ton ทดแทนได้ และการลงทุนเครื่องจักรโดยเพิ่มจำนวนเครื่องจักร เครื่องตีปราคา 115,000.00 บาท เครื่องอัดเม็ด Flat Die ราคา 176,586.79 บาท รวมเท่ากับ 291,586.79 บาท รวมซ่อมบำรุง 5 ปี จำนวน 10 กลุ่ม รวมต้นทุนการลงทุน 2,915,867.94 บาท อายุโครงการ 5 ปี

สรุปการวิจัย

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดชีวมวลมูลแพะสามารถขึ้นรูปได้ด้วยความหนาแน่น เส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว อยู่ในเกณฑ์ ความชื้น แต่ ค่าความร้อน และ เถ้า ไม่อยู่ในเกณฑ์ มอก.2772-2560 ซึ่งสามารถพัฒนา กระบวนการผลิตได้ หลายวิธี เช่น การลดความชื้นโดยการผึ่งแดด เพิ่มจำนวนวัน และ นำของเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม กากตะกอนดีแคเตอร์ กากตะกอนน้ำเสีย [13] ใช้ผสมกับมูลแพะหรือการใช้ ขบวนการนำมูลแพะมาเผาถ่านแบบชาโคล [11] จากงานวิจัยอื่นพบว่า มูลควาสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงที่ใช้ในบ้านเรือนได้ เช่น ถ่าน เป็นต้น [9] ผู้วิจัยเก็บรวบรวมมูลแพะ จาก ศพก. นายสุสันต์ เครือแดง วิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงแพะ-แกะ อำเภอบางสะพานน้อย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ในพื้นที่ มี สมาชิก 10 กลุ่ม มี แพะพ่อพันธุ์รวม 198 ตัว แม่พันธุ์รวม 147 ตัว อื่นๆ 3,176 ตัว [25] ประมาณการมูลแพะ 5,870 Kg/Day [25] สามารถพัฒนาเป็นโครงข่ายในการผลิตอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมูลแพะ เป็นการเพิ่มมูลค่าและให้โอกาสแก่เกษตรกร ในแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียการปศุสัตว์จำนวนมาก เป็นทางเลือกเพิ่มจากการนำมูลแพะไปแปรรูปสำหรับบำรุงดิน จากการทดลองขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลแพะสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงประเภทให้ความร้อน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อการเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาสำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลขนาด 1,000 kg นั้นจะมีระยะเวลาในการคืนทุน ภายใน 3.39 ปี

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์จากการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิง

พารามิเตอร์	เม็ดเชื้อเพลิงมูลแพะ	หน่วย
กำลังการผลิต	2,609.63	กก./วัน
ต้นทุนการลงทุน	2,915,867.94	บาท
วัสดุต้นทุน	4,659.66	บาท
ต้นทุนการดำเนินการ	5,570.10	บาท
ค่าความร้อนรวม	23,013.40	เมกะจูล/วัน
ต้นทุนพลังงานเฉพาะ	10,229.75	บาท
การประหยัดพลังงาน	สมดุล	น้ำมันเตา = ชีวมวล
การประหยัดพลังงาน ต้นทุน/หน่วย	4.10	บาท/ลิตร
ต้นทุนในการกำจัด/หน่วย	0.00	บาท
ประหยัดรวม บาท/วัน	2,358.17	บาท/วัน
การประหยัดเป็นร้อยละ	19.00	%
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ NPV	346,983.73	บาท
อัตราผลตอบแทนภายใน IRR	14.56	%
อัตราผลตอบแทนต่อเงินทุน B/C	1.119	> 1 (คุ้มค่าต่อการลงทุน)
ระยะเวลาคืนทุน Payback Period	3.39	ปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] นภาดา วิเชียรพงษ์ และคณะ. (2563). การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขุยมะพร้าวผสมชีวมวลเหลือทิ้ง. PSRU Journal of Science and Technology. 5(3): 112-126 (2020)
- [2] ศิริชัย ต่อสกุล และคณะ. (2558). การออกแบบและสร้างเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยระบบดายนัด. การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, หน้า 91-94
- [3] ณัฐกิตติ์ ก้อยผ่านกิจ และคณะ. (2560). การศึกษากระบวนการผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากถั่วแระ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, หน้า 292-298
- [4] อธิรัตน์ จีระมะกร และคณะ. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไผ่ร่วมกับใบอ้อย. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14, หน้า 1040-1047
- [5] ยุวัฒน์ เงินเย็น และคณะ. (2561). เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากมูลสุกรและมูลไก่โดยไม่ตัวประสาน. การเกษตรราชภัฏ. RAJABHAT AGRIC. 17 (1) : 8-16 (2018)
- [6] รัฐกร สวัสดิ์แดง และคณะ (2561). การประเมินความเหมาะสมการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจาก เปลือกกะลาเผา. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย ปีที่ 32 ฉบับที่ 1: หน้า 25-31 (2561)
- [7] โกสินทร์ จิรินรัมย์ และคณะ (2567) การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและขยะกำพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 29 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2567
- [8] ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก (2558). เม็ดเชื้อเพลิงจากไม้. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม 2558
- [9] เสรีย์ ตู๊ประกาย และคณะ (2563) การศึกษาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากมูลกวาง. วารสารวิจัยรามคำแหง (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2563

- [10] ปัทมา สารนิธ และคณะ (2022).การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งจากฟาร์มจระเข้ผสมซีลี้อยไม้ไฟอัดเม็ด. _Life Sciences and Environment Journal 2022; 23(1): 208-218
- [11] สันติ คู่กระสังข์ และคณะ (2567) การพัฒนาถ่านชีวมวลจากมูลแพะในการสร้างมูลค่าเพิ่มของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะในจังหวัดตาก วารสารสังคมศาสตร์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2567 หน้า 46
- [12] ศิวโรจน์ ศิริลักษณ์ (2555) แนวทางสำหรับการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินเกรดต่ำด้วยเทคนิค “NP & P Separation” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม 2555
- [13] สุกฤษ มณีรัตน์ (2567). การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนน้ำเสีย
วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ปีการศึกษา 2567
- [14] นฤมล ภาณุภาพ (2554) การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอไรไฟด์เพื่อการประโยชน์ไม้ด้านพลังงานเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
- [15] สนทยา มูลศรีแก้ว และคณะ (2555) การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลแพะ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ กองทุนส่งเสริมงานวิจัยปี 2555
- [16] รอมสัน หมาดมานัง (2566) การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกทุเรียน
ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้ ประจำปี 2566 มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
- [17] นิกรศิลป์ บุญสมบัติ (2560) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิส แบบเร็ว ของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ
SWU Engineering Journal (2017) 12(2), 58-70 วารสารวิศวกรรมศาสตร์
- [18] ลักขณา พัทธักษ์ (2563) การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากใบอ้อย
Industrial Technology Journal ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2563
- [19] รัชมี ลิทธิชันแก้ว (2560) การผลิตและการประเมินศักยภาพของหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดโดยน้ำหมักชีวภาพเป็นตัวประสาน เพื่อเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน - 2560
- [20] จุฬารณ ชนะถาวร (2562) ผลของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟต่อสมบัติของเชื้อเพลิง ชีวมวลอัดเม็ด วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ ฉบับที่ มกราคม-มิถุนายน 2562
- [21] กฤติเดช ดวงใจบุญ (2566) การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนน้ำเสียและชีวมวลเพื่อ
พลังงานทดแทน
วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน เมษายน – มิถุนายน 2566
- [22] จิตรา รู้กิจการพานิช (2565) เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อยสำหรับเตาถ่าน ใน
ครัวเรือน วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2565
- [23] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ (2018) ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลอัดเม็ดโดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น
วารสาร มทร.อสน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2561
- [24] สุพัตรา บุตรเสรีชัย (2561) การศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านอัดเม็ดจากมูลวัว เพื่อเป็นเชื้อเพลิง
-แข็ง วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2561
- [25] เอกสารข้อมูล เครือข่ายเกษตรกรเลี้ยงแพะและข้อมูลพื้นฐานการผลิตแพะ ในพื้นที่ปศุสัตว์เขต 1-9 ประจำปี 2566

การศึกษาผลกระทบด้านพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ในประเทศไทย Case Study: Energy Losses from Transformer Implementation in Thailand

อดิสร พลเสนา¹ ทรงยศ มาลีวงศ์¹ เด่น คอกพิมาย¹ มนต์รี ชาลีเคลือ พิษณุ บุญรัตน์² สมพล โคศรี³
และรุ่งเพชร ก่องนอก^{1*}

Adisorn Polsena Songyote Maleewong Den Kogphimai¹ Montre Chaleekure Phitsanu Bunrat²
Somphol Khosri³ and Rungphet Kongnok^{1*}

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

² การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดนครราชสีมา ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30110

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์ 77110

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,
Nakhon Ratchasima 30000

² Provincial Electricity Authority, Nakhon Ratchasima, Mook Montri Road, Nai Mueang Subdistrict, Mueang
District, Nakhon Ratchasima 30000

³ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus,
Prachuap Khiri Khan province 77110

¹Corresponding author: Tel.: 08-15253985. E-mail address: rungphet.ko@rmuti.ac.th

Abstract

This research presents a comparative study of transformer use and the value loss of transformers, which affects energy loss. Consider installing a transformer in each of 75,668 villages across the country. This research examines transformer operation at 30%, 40%, and 50%. This research has shown that even when transformers operate at less than full efficiency, they still incur energy losses. This research studied the operation at 50% of the installed transformer rating and found that the transformer loss for 3 months of a 100 kVA transformer is 68,356,579.50 kWh, which is 273,426,318.00 baht; the carbon amount is 34,171,454.09 kg.CO₂e, which is compared as a percentage of Thailand's energy use at 0.125977%, the 160 kVA transformer is 92,177,811.75 kWh, which is 368,711,247.00 baht, and the carbon amount is 46,079,688.09 kg.CO₂e is compared as a percentage of Thailand's energy use at 0.169879%. A 160 kVA transformer is 128,427,513.00 kWh, which is 513,710,052.00 baht, and the carbon amount is 64,200,913.75 kg.CO₂e, which is compared as a percentage of Thailand's energy use at 0.236685%. This research can be used as a guideline for managing transformer usage to ensure optimal performance for current applications.

Keywords: Transformer and energy loss of transformers

บทคัดย่อ

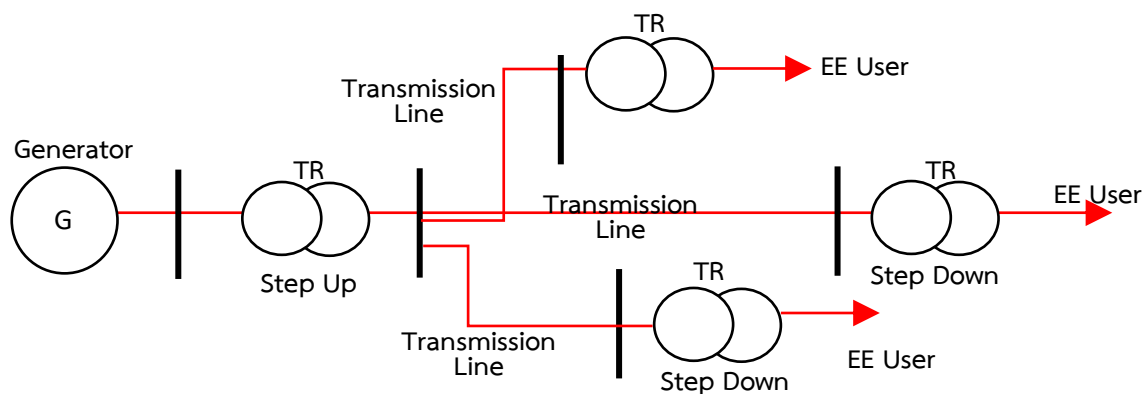
บทความนี้ นำเสนอแนวทางการศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบด้านค่าพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า คิดการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งประเทศ ที่ 75,668 หมู่บ้าน หมู่บ้านละ 1 หม้อแปลงไฟฟ้า การใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ 30% 40% และ 50% ตามลำดับ การศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้หม้อแปลงไม่เต็มประสิทธิภาพหม้อแปลงก็ยังมีค่าความสูญเสียพลังงานบางส่วนอยู่ งานวิจัยนี้ศึกษาการทำงานที่ 50% ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งพบว่ามีความสูญเสียหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เดือน หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์แอมป์ 68,356,579.50 kWh คิดเป็นเงิน 273,426,318.00 บาท ปริมาณคาร์บอนด 34,171,454.09 kg.Co₂e

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับการใช้พลังงานของประเทศได้ 0.125977% หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 160 กิโลโวลต์แอมป์ มีความสูญเสีย 92,177,811.75 kWh คิดเป็นเงิน 368,711,247.00 บาท ปริมาณคาร์บอนด 46,079,688.09 kg.Co2e เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับการใช้พลังงานของประเทศได้ 0.169879% และหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 250 กิโลโวลต์แอมป์ 128,427,513.00 kWh คิดเป็นเงิน 513,710,052.00 บาท ปริมาณคาร์บอนด 64,200,913.75 kg.Co2e เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับการใช้พลังงานของประเทศได้ 0.236685% การศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบันได้

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้า และพลังงานสูญเสียหม้อแปลงไฟฟ้า

บทนำ

บทความนี้ ทำการศึกษาจากจำนวนประชากรในประเทศไทย โดยข้อมูลจกกรมการปกครองประเทศไทย ณ เดือน กุมภาพันธ์ 2568 พบว่า ประเทศไทยมีประชากรทั้งสิ้น 65,923,105 คน ของทั้ง 76 จังหวัด 878 อำเภอ 7,256 ตำบล และ 75,668 หมู่บ้าน เพื่อชี้ให้เห็นค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าในประเทศไทย ให้ความสนใจเกี่ยวกับการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยคำนึงถึงสถานะไม่มีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานโดยอาศัยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เพื่อเปลี่ยนระดับแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าให้สูงขึ้น หรือต่ำลงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังการส่งจ่ายระบบไฟฟ้า

ภาพที่ 1 เป็นแผนผังสำหรับการส่งจ่ายระบบไฟฟ้า ซึ่งจะทำการผลิตจากโรงไฟฟ้า แล้วทำการยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังที่ห่างไกล จากนั้นจะมีสถานีไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันลง เพื่อให้มีระดับแรงดันใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ ทั้งในระบบ 1 เฟส และระบบ 3 เฟส หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบนั้น จะมีค่าความสูญเสียที่เกิดจากตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าเอง ประกอบด้วย ค่าความสูญเสียจากขดลวด และการสูญเสียที่เกิดจากแม่เหล็ก ซึ่งการสูญเสียทั้งสองนี้ มีรายละเอียด ดังนี้

1. การสูญเสียจากขดลวดทองแดง (Copper Loss) เป็นการสูญเสียที่เกิดจากค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเอง สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$P = I^2 R \quad (1)$$

โดยที่ P คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (W)
 I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (A)
 R คือ ค่าความต้านทานของขดลวด (Ω)

2. ค่าความสูญเสียที่เกิดจากแม่เหล็ก การสูญเสียนี้เกิดจากการเหนี่ยวนำขึ้นเมื่อใช้งาน จะทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยฮีสเตอร์ซิส และเอ็ดดี้เคอร์เรนท์ นั้นเอง

โดยมาตรฐานแล้ว ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีค่าไม่เกิน 5 % หากเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าความสูญเสียทั้งสองค่านี้ จะมีค่าน้อยลงเป็นยิ่งดี ซึ่งค่า ณ ปัจจุบัน มีค่าที่ 1.5% ของพิกัดตัวหม้อแปลง

ไฟฟ้าเอง จากข้อมูลเรื่องการสูญเสียของตัวหม้อแปลงไฟฟ้านี้เอง คณะวิจัย ได้ทำการตั้งสมมุติฐานเพื่อศึกษาว่า ในประเทศไทย ที่มีประชากรโดยประมาณ 70 ล้านคน ซึ่งจะมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สัมพันธ์กันอย่างเป็นนัยยะ และมีความสูญเสียที่เกิดขึ้นอย่างไรกับค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้น

วิธีการวิจัย

การศึกษานี้ จะใช้ข้อมูลการศึกษาจากจำนวนประชากรในประเทศไทย และจำนวนหมู่บ้านที่มีอยู่ในประเทศมาเป็นแนวทางของการตั้งสมมุติฐานศึกษา และใช้ข้อมูลค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่ โดยทำการศึกษาจากหม้อแปลงไฟฟ้า จำนวน 2 ยี่ห้อ และข้อมูลจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ใช้งานในปัจจุบัน [4] มาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น

ในการศึกษานี้ จะคำนวณทั้งค่าความสูญเสียขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะที่มีโหลด โดยคำนวณเป็นค่าพลังงานสูญเสียในแต่ละวันโดยคิดที่ 24 ชั่วโมง ในระยะเวลา การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละขนาดโดยสมการที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังสมการที่ 2

$$E_y = P_{T-No} \cdot h \cdot D \quad (kWh) \quad (2)$$

โดยที่	P_{T-No} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	(W)
	h คือ ค่าชั่วโมงการทำงาน	(hr)
	D คือ จำนวนวันทำงานในรอบปี	(วัน)
	E_y คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด	(kWh)

$$C_{EL} = E_y \cdot B \quad (3)$$

โดยที่	C_{EL} คือ ค่าพลังงานสูญเสียหม้อแปลงไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	(บาท/ปี)
	B คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย/หน่วย (คิดที่ 4 บาท/หน่วย)	(บาท)

จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) สามารถคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด และมีโหลดได้ดัง ทั้งนี้ ในตารางที่ 1 จะประกอบไปด้วยค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดทางไฟฟ้า/วัน ต่อปี และเงินค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่ายของหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละขนาด ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 กิโลโวลต์แอมป์ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 160 กิโลโวลต์แอมป์ และหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 250 กิโลโวลต์แอมป์ ตารางที่ 1 ซึ่งค่าที่แสดงนี้เป็นค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ปัจจุบันที่สามารถสืบค้นได้ ทางคณะ ฯ จึงได้นำมาศึกษาต่อเพื่อใช้เป็นแนวคิดในการลดค่าความสูญเสียจากการติดตั้งและใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าลงได้ โดยที่ศึกษาที่ การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำงานที่ 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 เป็นคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการค้นคว้า โดยที่ หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าความสูญเสียขณะไม่จ่ายโหลด (No load loss) และขณะที่จ่ายโหลดให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า จากทางคณะผู้วิจัยศึกษาพบว่า หากมีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าตามพิกัดขนาด 100 กิโลโวลต์แอมป์ ขนาด 160 กิโลโวลต์แอมป์ และขนาด 250 กิโลโวลต์แอมป์ ก็จะมีค่าความสูญเสียขณะไม่ได้จ่ายโหลด และขณะจ่ายโหลด ดังแสดงในตารางที่ 1 นั่นเอง

ตารางที่ 3 แสดงการคิดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ตามจำนวนหมู่บ้านของประเทศไทย โดยที่คิดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ 100% การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่คาดเดาการติดตั้งในหมู่บ้านของประเทศไทย ซึ่งสภาวะการทำงานจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า จะไม่ถึง 100% ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการติดตั้ง

ตารางที่ 5 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง [2], [3], [4]

TR	หม้อแปลง บริษัท A			หม้อแปลง บริษัท B			หม้อแปลง PEA ทดสอบ		
	No Load Loss		Load Loss	No Load Loss		Load Loss (75	No Load Loss		Load Loss (75
	22kV	33kV	(75 °C)	22kV	33kV	°C)	22kV	22kV	°C)
100	-	-	-	250	260	1,550	295	305	1,650
160	-	-	-	360	370	2,100	420	435	2,225
250	-	-	-	500	520	2,950	585	610	3,100
315	700	-	3,900	600	630	3,500	650	630	3,700
400	850	-	4,600	720	750	4,150	790	800	4,217
500	1,000	-	5,500	860	900	4,950	940	950	4,983
630	1,200	-	6,500	1,010	1,050	5,850	1,120	1,125	5,950
750	1,250	-	10,600	-	-	-	-	-	-
800	1,300	-	11,000	1,200	1,270	9,900	1,283	1,335	9,133
1,000	1,600	-	13,500	1,270	1,300	12,150	1,290	1,533	6,625
1,250	1,800	-	16,000	1,500	1,530	14,750	1,867	1,940	15,717
1,500	2,000	-	18,900	1,820	1,850	17,850	2,207	2,350	18,850
1,600	2,100	-	19,500	-	-	-	2,100	-	19,500
2,000	2,700	-	22,700	2,110	2,140	21,600	2,687	2,720	22,767
2,500	3,200	-	26,800	2,300	2,350	25,650	2,750	2,350	26,225

ตารางที่ 6 คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่า 100% ขณะไม่มีโหลด

TR Rate	100% kWh/year	No Load Losses 50%	
		kWh/year	Baht/year (@75,668)
100 kVA	195,541,245.60	97,770,622.80	391,082,491.20
160 kVA	278,397,705.60	139,198,852.80	556,795,411.20
250 kVA	387,768,232.80	193,884,116.40	775,536,465.60
ผลรวมเปรียบเทียบค่าพลังงาน และเงิน ที่ 100% กับ 50% ของหม้อแปลงไฟฟ้า			
TR (100+160) kVA		118,484,737.80	473,938,951.20
TR (160+250) kVA		166,541,484.60	666,165,938.40
เปรียบเทียบค่าพลังงานที่ลดลงจากเงื่อนไขการใช้หม้อแปลงรวม			
ลดจาก 160 kVA		159,912,967.80	639,651,871.20
ลดจาก 250 kVA		221,226,748.20	884,906,992.80

ตารางที่ 3 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อปี คิดขณะมีโหลด 100% (4 บาท/หน่วย)

TR Rated (kVA)	Load Loss (75 °C)	kWh	kWh/D	kWh/year	Baht/Year	kWh/year (@75,668)	Baht (@75,668)
100	1,650	1.65	39.60	14,454.00	57,816.00	1,093,705,272.00	4,374,821,088.00
160	2,225	2.23	53.40	19,491.00	77,964.00	1,474,844,988.00	5,899,379,952.00
250	3,100	3.10	74.40	27,156.00	108,624.00	2,054,840,208.00	8,219,360,832.00

ตารางที่ 4 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อปี ขณะมีโหลด 30%

TR Rate	100% of 30%	Losses 50% of 30% on Load Transformer Operate	
	kWh/year (@75,668)	kWh/year (@75,668)	Baht/year (@75,668)
100 kVA	328,111,581.60	164,055,790.80	656,223,163.20
160 kVA	442,453,496.40	221,226,748.20	884,906,992.80
250 kVA	616,452,062.40	308,226,031.20	1,232,904,124.80
ผลรวมเปรียบเทียบค่าพลังงาน และเงิน โดยคิดหม้อแปลงทั้ง 2 พิกัด ติดตั้งอย่างละ 50%			
TR (100+160) kVA		385,282,539.00	1,541,130,156.00
TR (160+250) kVA		529,452,779.40	2,117,811,117.60
ค่าความสูญเสียของพลังงานไฟฟ้าจากการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าตามขนาดพิกัดติดตั้ง			
ลดจาก 160 kVA		57,170,957.40	228,683,829.60
ลดจาก 250 kVA		86,999,283.00	347,997,132.00

ตารางที่ 5 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ขณะมีโหลด 40%

TR Rate	100% of 40%	The Load Losses 50% of 40% TR Operate	
	kWh/year (@75,668)	kWh/year (@75,668)	Baht/year (@75,668)
100 kVA	437,482,108.80	218,741,054.40	874,964,217.60
160 kVA	589,937,995.20	294,968,997.60	1,179,875,990.40
250 kVA	821,936,083.20	410,968,041.60	1,643,872,166.40
ผลรวมเปรียบเทียบค่าพลังงาน และเงิน ที่ 100% กับ 50% ของหม้อแปลงไฟฟ้า			
TR (100+160) kVA		513,710,052.00	2,054,840,208.00
TR (160+250) kVA		705,937,039.20	2,823,748,156.80
ค่าความสูญเสียของพลังงานไฟฟ้าจากการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าตามขนาดพิกัด			
ลดจาก 160 kVA		76,227,943.20	304,911,772.80
ลดจาก 250 kVA		115,999,044.00	463,996,176.00

ตารางที่ 6 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ขณะมีโหลด 50%

	100% of 50%	50% of 50% TR Operate	
	kWh/year	kWh/year	Baht/year
100 kVA	546,852,636.00	273,426,318.00	1,093,705,272.00
160 kVA	737,422,494.00	368,711,247.00	1,474,844,988.00
250 kVA	1,027,420,104.00	513,710,052.00	2,054,840,208.00
ผลรวมเปรียบเทียบค่าพลังงาน และเงิน ที่ 100% กับ 50% ของหม้อแปลงไฟฟ้า			
TR (100+160) kVA		642,137,565.00	2,568,550,260.00
TR (160+250) kVA		882,421,299.00	3,529,685,196.00
ค่าความสูญเสียของพลังงานไฟฟ้าจากการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าตามขนาดพิกัด			
ลดจาก 160 kVA		95,284,929.00	381,139,716.00
ลดจาก 250 kVA		144,998,805.00	579,995,220.00

ตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 แสดงการคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้ง 3 ขนาดที่นำมาคำนวณ โดยคิดค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะมีโหลดที่ 100% ของการทำงานหม้อ

แปลงไฟฟ้า 30% 40% และ 50% ตามลำดับ พร้อมทั้งคิดค่าความสูญเสียพลังงานของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการนำหม้อแปลงไฟฟ้าที่ 50% ของการทำงาน มารวมกัน จะมีค่าความสูญเสียลดลงดังแสดงในตารางที่กล่าว ข้างต้น

ตารางที่ 7 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ขณะมีโหลด 50%

พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ศึกษา	หน่วยที่ใช้	พิกัดการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งของแต่ละขนาด @75,668 หมู่บ้าน		
		30%	40%	50%
100 kVA	kWh/year	164,055,790.80	218,741,054.40	273,426,318.00
	Baht/Year	656,223,163.20	874,964,217.60	1,093,705,272.00
160 kVA	kWh/year	221,226,748.20	294,968,997.60	368,711,247.00
	Baht/Year	884,906,992.80	1,179,875,990.40	1,474,844,988.00
250 kVA	kWh/year	308,226,031.20	410,968,041.60	513,710,052.00
	Baht/Year	1,232,904,124.80	1,643,872,166.40	2,054,840,208.00

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งโดยใช้พื้นฐานของจำนวนประชากร และหมู่บ้านที่มีอยู่ ซึ่งพบว่าในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้านั้น จะมีค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า อยู่ 2 กรณี ประกอบด้วยสถานะไม่มีโหลด และสถานะใช้งานโหลด ซึ่งในการศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาค่าความสูญเสียทั้งกรณีที่ไม่มีโหลด และการใช้งานโหลด โดยให้ความสำคัญกับหม้อแปลงขนาด 100, 160 และ 250 กิโลโวลต์แอมป์ ที่ถูกใช้ในประเทศไทย เพื่อชี้ให้เห็นค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อปีจากการใช้งานมีค่ามากมายเพียงใด

ผลของการศึกษาการจ่ายโหลดที่การทำงานที่ 50% ของการจ่ายโหลดที่ 30% 40% และ 50% ของหม้อแปลงไฟฟ้า ชี้ให้เห็นว่า หากมีการปรับใช้ขนาดที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ศึกษาได้

ทั้งนี้ หากมีการเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ผลิตของประเทศ ซึ่งในช่วงเดือนมกราคม ถึงเดือนมีนาคม 2568 พบว่ามีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ 54,261 กิกะวัตต์ชั่วโมง [5] หากนำค่ามาทำการเปรียบเทียบกับค่ากำลังการผลิตนี้ ในระบบจะมีค่าความสูญเสียอื่น เช่น ระบบส่งจ่ายซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวของสาย และระดับแรงดันที่ใช้ การศึกษานี้จึงให้ความสำคัญกับส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งหากทำการเปรียบเทียบกับค่าการปล่อยก๊าซเข้าสู่บรรยากาศ หรือเรียกว่าคาร์บอนดฟุตพริ้นท์ ก็จะมีสัดส่วนของการปล่อยก๊าซที่สามารถลดลงมาได้ โดยที่ 1 หน่วยไฟฟ้า มีค่าที่ 0.4999 kg.Co₂e [6] ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย เดือนมกราคม – เดือนมีนาคม 2568 โดยเทียบขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานมีโหลด 50%

TR Size (kVA)	kWh	คิดเป็นเงิน (บาท)	kg.Co ₂ e (kWh x 0.4999)	% เทียบกับการผลิตพลังงานของประเทศ
100	68,356,579.50	273,426,318.00	34,171,454.09	0.125977%
160	92,177,811.75	368,711,247.00	46,079,688.09	0.169879%
250	128,427,513.00	513,710,052.00	64,200,913.75	0.236685%
เมื่อสมมุติการติดตั้งของหม้อแปลง 2 ขนาด แล้วเทียบกับขนาดสูง จะสามารถลดค่าพลังงานสูญเสียได้				
100+160	160,534,391.25	642,137,565.00	80,251,142.19	0.295856%
160+250	220,605,324.75	882,421,299.00	110,280,601.84	0.406563%
เทียบค่าการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ขนาด เทียบกับขนาดที่สูงกว่า สามารถลดค่าพลังงานสูญเสียได้				
เทียบกับ 160	23,821,232.25	95,284,929.00	11,908,234.00	0.043901%
เทียบกับ 250	36,249,701.25	144,998,805.00	18,121,225.65	0.066806%

ตารางที่ 8 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศ ช่วงเดือนมกราคม – เดือนมีนาคม 2568 โดยมีค่าการใช้พลังงานของประเทศที่ 54,261,000,000 kWh ในการเปรียบเทียบ ตารางนี้จะเปรียบเทียบในระยะเวลา 3 เดือนนี้เช่นกัน โดยคิดค่าการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าใช้งาน 50% และพิกัดการทำงานที่ 50% ของทั้ง 3 ขนาดการติดตั้งใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ค่าพลังงาน 1 kWh มีค่าเท่ากับ 0.4999 kg.Co₂e

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาการคาดการณ์ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้ง โดยใช้พื้นฐานของหมู่บ้านในประเทศไทยที่ 75,668 หมู่บ้าน ซึ่งได้ทำการศึกษานาการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าของการไฟฟ้าที่ติดตั้งทั่วประเทศ จำนวน 3 ขนาด ประกอบด้วย 100 กิโลโวลต์แอมป์ 160 กิโลโวลต์แอมป์ และ 250 กิโลโวลต์แอมป์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสม หรือปรับตำแหน่งการติดตั้งของหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในการศึกษาครั้งนี้ว่า หากทำการสำรวจการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจากที่ใช้งานจริง จากการไฟฟ้าจะทำให้ได้ข้อมูลการใช้งาน และทราบค่าความสูญเสียพลังงานจากการติดตั้ง และใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ทั้งยังสามารถช่วยลดค่าความสูญเสียที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบกรับอยู่ลงได้อีกทาง ทั้งนี้ คณะวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าผลกระทบทางด้านคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการเปรียบเทียบในช่วงระยะเวลา 3 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่า หากหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานที่ 50% ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้ง พบว่า การเปรียบเทียบของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าความสูญเสียที่ 3 เดือนของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 กิโลโวลต์แอมป์ 68,356,579.50 kWh คิดเป็นเงิน 273,426,318.00 บาท ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 34,171,454.09 kg.Co₂e เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับการใช้พลังงานของประเทศได้ 0.125977% หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 160 กิโลโวลต์แอมป์ จะมีค่าความสูญเสียที่ 3 เดือน 92,177,811.75 kWh คิดเป็นเงิน 368,711,247.00 บาท ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 46,079,688.09 kg.Co₂e เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับการใช้พลังงานของประเทศได้ 0.169879% และหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 250 กิโลโวลต์แอมป์ 128,427,513.00 kWh คิดเป็นเงิน 513,710,052.00 บาท ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 64,200,913.75 kg.Co₂e เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับการใช้พลังงานของประเทศได้ 0.236685% ทั้งนี้หากทำการศึกษาอย่างจริงจัง จะช่วยให้สามารถลดค่าการใช้พลังงานสูญเสียในส่วนนี้ได้

ข้อเสนอแนะ ข้อมูลที่ได้การศึกษานี้ สามารถเป็นแนวทางที่ช่วยให้การไฟฟ้า ตระหนักถึงข้อมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น จากการติดตั้งใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า และหากนำไปสู่การปฏิบัติงานจริง จะช่วยให้การไฟฟ้าสามารถลดค่าพลังงานที่เกิดจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ให้กับประเทศได้อีกทาง

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัย ขอกราบขอบพระคุณคุณอาจารย์ ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ได้ให้การศึกษานี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คณะวิจัยขอขอบคุณความดีทั้งหลายเหล่านี้ ให้กับบิดา มารดา ตลอดจนบูรพาจารย์ ที่ให้กำเนิด ตลอดจนประสิทธิ์ ประสาท วิชาความรู้ ขอขอบพระคุณผู้จัดทำข้อมูลต่างๆที่ใช้ในการศึกษางาน ในครั้งนี้ คณะผู้วิจัย ขออาราธนาคุณพระศรีรัตนตรัย ตลอดจนสิ่งศักดิ์สิทธิ์ ของทุกศาสนา ความเชื่อ จงดลบันดาลให้ทุกท่านพบแต่ความสุข ความเจริญ ตลอดไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย. ข้อมูลจำนวนประชากร. ที่มา <https://www.dopa.go.th/news/cate1/view10445> สืบค้น ส.ค. 68
- [2] บริษัท เกร็ดวิศวกรรม จำกัด(มหาชน). Aluminium vs Copper สำหรับการผลิตในหม้อแปลงไฟฟ้า. ที่มา <https://ekarot.co.th/information-new/> สืบค้น ส.ค. 68
- [3] เอกสารเผยแพร่ภาคอุตสาหกรรม. หมวดที่ 13 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า หน้า 28. ที่มา [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial\(PDF\)/Bay35%20Power%20Distribution.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay35%20Power%20Distribution.pdf) สืบค้น ส.ค. 68
- [4] ห้องไฟฟ้า (Electrical Room)'s (บริษัท ซีซี หม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด). การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า. ที่มา

- https://www.facebook.com/ElectricalRm/posts/663196367027100/?locale=th_TH สืบค้น ส.ค. 68
- [5] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. สถานการณ์พลังงาน(รายไตรมาส) สามเดือนแรกของปี 2568. ที่มา <https://www.eppo.go.th> > item > download สืบค้น ส.ค. 68
- [6] เนติยา กรีธาชาติ. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพื่อความยั่งยืน. ที่มา https://coe.or.th/wp-content/uploads/2023/09/Carbon-Footprint-for-Organization_NK-080966.pdf สืบค้น ก.ย. 68

ผลการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและระยะคืนทุนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
สำหรับครอบครัวขนาดเล็ก

Thermal Efficiency and Payback Period investigation of the Solar Dryer
for small families

ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด^{1*} อนุพล อัครพิณ² ประภาศิริ ใจผ่อง³ และวีระบุญยักิตติ ชุมพรพ่อง¹

Nattawut khaosaad^{1*} Anupon Akkapin² Prapasiri Jaipong³ and Veeraboonkitt Chumpornpong¹

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก 65000

² หลักสูตรสัตวศาสตร์และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
65000

³ ศูนย์เรียนรู้เกษตรทฤษฎีใหม่ จังหวัดพิษณุโลก มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก 65000

¹General Science, Faculty of Education, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok 65000

² Animal Sciences and Aquaculture Program, Faculty of Food and Agricultural Technology, Pibulsongkram
Rajabhat University, Phitsanulok 65000

³ New Agricultural Theory Learning Center, Phitsanulok Province, Pibulsongkram Rajabhat University,
Phitsanulok 65000

¹Corresponding author: Tel.: 0817178093. E-mail address: nattawut.kh@psru.ac.th

Abstract

This article presented the results of the Thermal Efficiency and Payback Period investigation of the Solar Dryer for small families (3-4 members). This project operated from July to August 2025 and was based on a community survey. The solar dryer used a natural-convection inlet and exhaust fan, a transparent polycarbonate sheet, two trays, and weighed 8 kilograms. The solar dryer was tested from 7:30 AM to 4:30 PM between August and September 2025. The automatically recorded data consisted of ambient temperature and machine temperature every minute. The experiment revealed that the temperature distribution within the drying chamber varied between the layers. The upper, middle, and lower layers were 55.21°C, 53.50°C, and 45.83°C, respectively. The layers' temperature ranged from 7 to 9°C, which was considered acceptable for natural convection, and the outlet was equipped with a 0.24 W fan and a solar panel. The maximum temperature was 68.3°C, with solar radiation at 850 W/m² and an average ambient temperature of 35.2°C. The thermal efficiency of the solar dryer was 17.50% and the drying rate was 0.05 kilograms of water/hour. The self-consumption payback period was 6.67 months, and the buyer's payback period was 3.34 months. Both cases had different payback periods, with 49.83%.

Keywords: Solar Dryer Thermal Efficiency Payback Period

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลจากการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและระยะคืนทุนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับครอบครัวขนาดเล็ก (ขนาด 3 – 4 คน) โดยในช่วงเดือนกรกฎาคม - สิงหาคม 2568 ซึ่งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ถูกสร้างตามผลการสำรวจความต้องการของชาวชุมชนให้เป็นเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบพา

ความร้อนธรรมชาติเข้า และใช้พัดลมดูดความชื้นขาออก โดยประกอบด้วยส่วนประกอบห้องอบแห้งทำจากแผ่นโพลีคาร์บอนไส ติดตั้งถาดอบแห้ง 2 ชั้น และมีตะแกรงสำหรับวางผลิตภัณฑ์ มีน้ำหนักประมาณ 8 กิโลกรัม โดยเริ่มทดลองใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อบแห้งเห็ดสดเดียว ในช่วงเดือนสิงหาคม และกันยายน 2568 เวลา 07.30 – 16.30 น. โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ บันทึกข้อมูลอุณหภูมิในเครื่องฯ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ทุกๆ 1 นาที และเครื่องชั่งแบบดิจิทัล จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีการกระจายที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยชั้นบน ชั้นกลาง ชั้นล่าง เท่ากับ 55.21°C , 53.50°C และ 45.83°C ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างชั้นอยู่ในช่วง $7-9^{\circ}\text{C}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการอบแห้งแบบธรรมชาติเข้า และขาออกติดตั้งพัดลมขนาด 0.24 วัตต์เชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และมีอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ภายในห้องอบแห้งคือ 68.3°C เมื่อการแผ่รังสีแสงอาทิตย์อยู่ที่ระดับสูงสุด 850 W/m^2 และอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยอยู่ที่ 35.2°C โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เท่ากับ 17.50 % และอัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เท่ากับ 0.05 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง โดยมีระยะคืนทุนในกรณีชาวชุมชนทำเห็ดสดเดียวบริโภคเอง จะมีระยะคืนทุน เท่ากับ 6.67 เดือน และ กรณีชาวชุมชนซื้อเห็ดสดเดียวจากแพลตฟอร์มออนไลน์ จะมีระยะคืนทุน เท่ากับ 3.34 เดือน ทั้ง 2 กรณีมีระยะคืนทุนแตกต่างกัน เท่ากับ 49.83 %

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ระยะคืนทุน

การออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดไส้ควบคุม

อุณหภูมิอัตโนมัติในระบบออฟกริด

Design and Development of Solar Dryer with Automatic Temperature Control

Incandescent Lamp in Off-Grid System

ณัฐศาสตร์ สาแช¹ เพชรพิชญ จิระเดชประไพ^{1*} เทพ เกื้อทวีกุล¹ และ ปากิน มณีโชติ¹Nattasat sarchai¹ Phetpitsanu Jiradesprapai^{1*} Thep Kueathaweekun¹ and Pakin Maneechot¹¹โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร 62000¹Energy Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet, 62000

*Corresponding author: Tel.: 095-594-3368 E-mail address: Phetpitsanu@icloud.com

1.1 Abstract

The solar dryer integrated with a heating element and automatic temperature control was developed to design and build a solar drying cabinet capable of automatic temperature control and operation during periods without sunlight. The structure consists of a solar dryer combined with a heating element and includes one drying tray. Additionally, an automatic control system was implemented to enhance drying efficiency. This research studied the solar dryer with automatic temperature control compared to natural sun drying. The solar dryer with temperature control maintained an average maximum temperature of 40°C, suitable for drying applications in community enterprises. Natural sun drying had an average temperature of 42.6°C, and drying was not possible during rainfall. When comparing the drying time of the solar dryer integrated with a heating element, the developed dryer was found to reduce drying time by up to 16 hours compared to conventional sun drying.

Keywords: Solar dryer, Heating element, Automatic temperature control, Off-grid system

บทคัดย่อ

ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดไส้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถควบคุมแบบอุณหภูมิอัตโนมัติและสามารถใช้งานได้ในช่วงที่ไม่มีแสงแดดโดยมีโครงสร้างของตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์รวมกับการใช้หลอดไส้ให้ความร้อน และมีตะแกรงในการอบแห้งจำนวน 1 ถาด นอกจากนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติเปรียบเทียบการตากแดดธรรมดา ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส เหมาะสมในการอบแห้งเพื่อกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจำเป็นต้องใช้การอบแห้ง ส่วนการตากแดดแบบธรรมดาจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 42.6 องศาเซลเซียส และเมื่อฝนตกจะไม่สามารถตากได้ เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดไส้พบว่าตู้อบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระยะเวลาในการอบได้ถึง 16 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการตากแดดแบบธรรมดา

คำสำคัญ: ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, หลอดไส้, ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ, ระบบออฟกริด

อิทธิพลของจำนวนปลาเกลือต่อคุณภาพและการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสำหรับการทำปลาเกลือเค็มด้วยตู้ลดความชื้นพลังงานไฟฟ้า

Influence of Fish Quantity on Quality and Electrical Energy Consumption in Salted Gulao Fish (*Eleutheronema Tetradactylum*) Production Using an Electric Dehumidification Chamber

สามารถ ยอดเสาร์¹ พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์¹ วีรพล ทองคุปต์² มุฮัมมัดรอซดี มุดอ² และ นิโอะ ปูซู^{3*}
Samart Yodsao¹ Phanpen Thavornprasit¹ Weraphol Thongkup² Muhammadrosdee Mudor²
and Ni-oh Puzu^{3*}

¹สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ 96000

²สาขาวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคนราธิวาส มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

³สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹Department of Technology and Innovation Management, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, 96000

²Department of Auto Mechanic, Narathiwat Technical College, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, 9600

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, 96000

¹Corresponding author: Tel.: +66-850813199. E-mail address: nioh.p@pnu.ac.th

Abstract

This research aimed to investigate the influence of the number of gulao fish on quality and energy consumption during dehumidification with an electric dehumidifier. The experiments were performed to dehumidify gulao fish weighing $550 \text{ g} \pm 50 \text{ g}$ at a constant temperature of 45°C , with the weight decreased every 5 hours. This calculated the moisture reduction as 30%. It was found that dehumidifying 1 gulao fish takes 48 hours and consumes 14 kWh of electricity; dehumidifying 2 gulao fish takes 70 hours and consumes 20 kWh of electricity; and dehumidifying 3 gulao fish takes 80 hours and consumes 23 kWh of electricity. Increasing the number of fish affects the time and energy consumption. As the number of fish increases, the total weight of the dehumidifier rises, resulting in longer dehumidification time and higher energy consumption. The average electricity consumption is 19 kWh, equivalent to 0.25 kW/hr. However, this does not affect the quality and physical characteristics of the fish compared to natural sun-drying. This indicates that using an electric dehumidifier to dehumidify salted gulao fish enables the production of consistently high-quality salted gulao fish, even in the absence of sunlight. Or in the monsoon season

Keywords: *Eleutheronema Tetradactylum*, Drying room, Moisture

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนปลาเกลือที่มีผลต่อคุณภาพและการใช้พลังงานไฟฟ้า เมื่อลดความชื้นด้วยตู้ลดความชื้นพลังงานไฟฟ้า ทดลองลดความชื้นปลาเกลือน้ำหนัก $550 \text{ g} \pm 50 \text{ g}$ ครั้งละ 1, 2 และ 3 ตัวด้วย

อุณหภูมิคงที่ 45°C ซึ่งน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 5 ชั่วโมง นำมาคิดเป็นความชื้นลดลง 30% พบว่า การลดลงของความชื้นปลา กุเลา 1 ตัว ใช้เวลา 48 ชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้า 14 kWh ลดความชื้นปลา กุเลา 2 ตัว ใช้เวลา 70 ชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้า 20 kWh และเมื่อลดความชื้น ปลา กุเลา 3 ตัว เวลาในการลดความชื้น 80 ชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้า 23 kWh การเพิ่มจำนวน ปลาให้มากขึ้น จะส่งผลต่อระยะเวลาและการใช้พลังงานไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อจำนวนปลามากขึ้น น้ำหนักรวมภายในตู้ลด ความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาในการลดความชื้นเพิ่มขึ้น และสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยใช้พลังงานไฟฟ้า 19 kWh คิดอัตราสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.25 kW/hr แต่จะไม่ส่งผลต่อคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของปลาเมื่อเทียบกับ กรรมวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าการนำเอาตู้ลดความชื้นพลังงานไฟฟ้ามาใช้ลดความชื้นปลา กุเลาเค็ม ช่วย ให้การผลิตปลา กุเลาเค็ม มีคุณภาพต่อเนื่อง แม้ในสภาวะที่ไม่มีแสงแดด หรือในฤดูมรสุม

คำสำคัญ: ปลา กุเลา ห่ออบแห้ง ความชื้น



การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ครั้งที่ 18
(TREC-18)

หัวข้อบทความ :

นโยบายและกฎหมายส่งเสริมพลังงานและพลังงานสะอาด
สู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน

กรณีศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบโซลาร์บนหลังคา เปรียบเทียบผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจริงกับการทำนายผลเพื่อนำไปสู่คาร์บอนเครดิต

A case study of electrical energy production using rooftop solar systems : comparing actual electrical energy production with forecasting results forward to carbon credits

บงกช ประสิทธิ์* วิกานต์ วันสูงเนิน และ สุรนาท แซ่ย่าง

Bongkot Prasit* Wikarn Wansungnern and Suranat Saeyang

วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกริดเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 65000

¹Corresponding author: Tel.: 083-6259396. E-mail address: bongkotprasit19@gmail.com

Abstract

The purpose of this research was to compare the forecasted electric power production from rooftop solar panels with the measured actual production, expressed as carbon credits. The procedure for conducting the study included (1) running the PV_{syst} simulation software to predict the electrical energy production data for the installation, (2) calculating the actual GHG emission data using the TVER-METH-AE-01 Version 04 methodology, (3) comparing the results from each, and (4) analyzing the results to show the amount of greenhouse gas (GHG) emission reduced and electrical energy production per year. The research equipment included the rooftop solar system at Naresuan University, Thailand, with a capacity of 998.2 kWp. Simulations and measurements were done with the PV_{syst} simulation software. The difference in results for electrical energy production, payback period, and carbon credits was 1.64%, 0%, and 1.66%, respectively. Using the PV_{syst} simulation software design. This demonstrated that the rooftop solar project at Naresuan University had a payback period (PB) of 6 years from actual operation data, which the system was shown to have a Net Present Value (NPV) of 2,074,578 USD, an Internal Rate of Return (IRR%) of 22.47%, and a Benefit and Cost ratio (BCR) of 2.73. The main reason is that the PV_{syst} simulation software design program, the power output from PV is calculated theoretically using standard test conditions at STC with solar radiation intensity 1000 W/m², temperature 25 °C, and air mass 1.5, while the actual operating conditions are solar radiation intensity less than 1000 W/m², temperature more than 25 °C, and air mass not equal to 1.5. The consideration of inserting parameters in the PV_{syst} simulation software design program is essential and must be detailed enough. Selecting the energy database, energy losses in the system, installation tilt angle, and installation location are clear and definite, including the Degradation of PV (%). The accumulated dust factor reduces the amount of solar radiation by 3.71%, resulting in a 2.83% decrease in electrical energy yield for polycrystalline silicon (p-Si). In this research, a consideration factor approach and method is found that will make the prediction results, when compared to the actual results, have the least error and difference as shown in Fig. 3. The Difference in the error of electrical energy production, payback period, and the carbon credits was 1.25%, 0%, and 1.22%, respectively.

Keywords: Carbon Credits, Rooftop Solar Systems, Evaluation Guidelines for Discrepancies, Forecasted VS. Actual Electric Power Production

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่คาดการณ์ไว้จากระบบโซลาร์บนหลังคา กับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจริงที่วัดเป็นคาร์บอนเครดิต ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย (1) การ RUN ซอฟต์แวร์จำลอง PV_{syst} เพื่อคาดการณ์ข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับการติดตั้ง (2) การคำนวณข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจริงโดยใช้ระเบียบวิธี TVER-METH-AE-01 เวอร์ชัน 04 (3) การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแต่ละข้อมูล และ (4) การวิเคราะห์ผลลัพธ์เพื่อแสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas; GHG) ที่ลดลงและปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปี อุปกรณ์วิจัยประกอบด้วยระบบโซลาร์บนหลังคาที่มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งมีกำลังการผลิต 998.2 kW_p การจำลองและการวัดผลดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์จำลอง PV_{syst} ผลต่างของความคลาดเคลื่อนของการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน และคาร์บอนเครดิต เท่ากับ 1.64%, 0% และ 1.66% ตามลำดับ โดยใช้การออกแบบซอฟต์แวร์จำลอง PV_{syst} สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าโครงการโซลาร์บนหลังคามหาวิทยาลัยนเรศวรมีระยะเวลาคืนทุน (PB) 6 ปีจากข้อมูลการดำเนินการจริงซึ่งระบบมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) เท่ากับ 2,074,578 USD\$ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR%) เท่ากับ 22.47% อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 2.73 สาเหตุสำคัญเนื่องจากโปรแกรมออกแบบซอฟต์แวร์จำลอง PV_{syst} กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกจาก PV ถูกคำนวณในทางทฤษฎีโดยใช้เงื่อนไขการทดสอบมาตรฐานที่ STC มีความเข้มรังสีอาทิตย์ 1,000 W/m² อุณหภูมิ 25 °C และมวลอากาศ 1.5 ในขณะที่สภาวะการใช้งานจริงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ น้อยกว่า 1,000 W/m² อุณหภูมิ มากกว่า 25 °C และมวลอากาศไม่เท่ากับ 1.5 การพิจารณาการแทรกพารามิเตอร์ในโปรแกรมออกแบบซอฟต์แวร์จำลอง PV_{syst} มีความสำคัญและต้องมีรายละเอียดเพียงพอ การเลือกฐานข้อมูลพลังงาน การสูญเสียพลังงานในระบบ มุมเอียง-มุมเอียงในการติดตั้ง และตำแหน่งการติดตั้งที่ชัดเจนและแน่นอน รวมถึง Degradation of PV (%) ปัจจัยของฝุ่นที่สะสมส่งผลต่อปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ลดลง 3.71% ส่งผลให้ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลง 2.83% สำหรับ polycrystalline silicon (p-Si) ในการวิจัยนี้พบแนวทางและวิธีการพิจารณาปัจจัยที่จะทำให้ผลการทำนายเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จริงมีความคลาดเคลื่อนและความแตกต่างน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3 ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ความแตกต่างของการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน และเครดิตคาร์บอนเท่ากับ 1.25%, 0% และ 1.22% ตามลำดับ

คำสำคัญ: คาร์บอนเครดิต ระบบโซลาร์บนหลังคา แนวทางการประเมินความคลาดเคลื่อน การทำนายผลกับผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจริง

การศึกษาสภาพปัญหาและแนวทางการปรับตัวของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานคร เพื่อเตรียมความพร้อมต่อการประเมิน Carbon Footprint

A Study on Challenges and Adaptation Strategies of Plastic Packaging Printing Companies in Bangkok to Prepare for Carbon Footprint Assessment.

เอกวุฒิ เรืองสง¹ ธนธร ทองสัมฤทธิ์² และนิตศน์ ทิพย์โสตนัยนา³

Ekawut Ruangsong¹ Tanatorn Tongsumrith² and Nitus Tipsotnaiyana³

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี^{1,2,3}

E-mail: ekawut.rua@outlook.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความตระหนัก สภาพปัญหา และแนวทางการปรับตัวของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานครเพื่อเตรียมความพร้อมในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) โดยใช้วิธีวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) เก็บข้อมูลเชิงปริมาณจากกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกด้วยวิธีสุ่มหลายขั้นตอน ซึ่งมีจำนวน 216 โรงพิมพ์ แต่สามารถเก็บข้อมูลได้จริง 42 โรงพิมพ์ เครื่องมือที่ใช้คือแบบสอบถาม ซึ่งผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC) และได้รับการรับรองด้านจริยธรรมการวิจัย ผลการวิจัยพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง อายุ 20–30 ปี วุฒิมัธยมศึกษาตอนปลายปริญญาตรี ทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน และทำงานในสถานประกอบการขนาดใหญ่ที่มีกำลังเครื่องจักรเกิน 75 แรงม้า และทุนจดทะเบียนมากกว่า 100 ล้านบาท ผู้ที่เคยประเมิน Carbon Footprint ส่วนใหญ่เคยทำการประเมิน Carbon Footprint of Product (CFP) มีความตระหนักสูง เหตุผลสำคัญในการดำเนินการคือสร้างภาพลักษณ์องค์กร ส่วนสภาพปัญหาที่พบมากนั้นคือข้อมูลด้านพลังงานและวัตถุดิบไม่ครบถ้วน รวมถึงการขาดเทคโนโลยีและบุคลากรที่มีความรู้ในการจัดการข้อมูล ขณะที่ผู้ที่ไม่เคยประเมิน แม้จะตระหนักถึงความสำคัญ แต่ขาดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและมาตรฐาน อีกทั้งยังมองว่าการประเมินยังไม่ถูกบังคับใช้ในประเทศ แนวทางการปรับตัวที่สำคัญ ได้แก่ การจัดเก็บข้อมูลด้านพลังงาน วัตถุดิบ และเทคโนโลยีการผลิตอย่างเป็นระบบ การอบรมเพิ่มความรู้บุคลากร การร่วมมือกับหน่วยงานภาครัฐ เช่น องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) และการส่งเสริมผ่านนโยบายสิ่งแวดล้อมในสมาคมอุตสาหกรรม ผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงนโยบายเพื่อสนับสนุนการเตรียมความพร้อมของอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์พลาสติกต่อการประเมิน Carbon Footprint และการพัฒนาอย่างยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ : การประเมิน Carbon Footprint, โรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติก, สภาพปัญหาและแนวทางการปรับตัว

Abstract

This research aimed to conduct A Study on Challenges and Adaptation Strategies of Plastic Packaging Printing Companies in Bangkok to prepare for the Carbon Footprint Assessment. A survey research method was employed to collect quantitative data from a multi-stage random sample of 216 establishments, with actual responses obtained from 42 establishments. The research instrument was a questionnaire, validated for the Index of Item Objective Congruence (IOC) and approved by the Institutional Review Board (IRB). The findings revealed that most respondents were female, aged 20–30 years, holding a bachelor's degree, working as operational staff in large establishments with machinery capacity exceeding 75 horsepower and registered capital over 100 million baht. Among those who conducted Carbon Footprint

assessments, most had assessed the Carbon Footprint of Product (CFP) and demonstrated high awareness, with the primary motivation being to enhance corporate image. The most frequently cited problems included incomplete energy and raw material data, as well as a lack of technology and skilled personnel for data management. For those who had never conducted an assessment, although they recognized its importance, they lacked knowledge of the process and standards. They perceived that assessments were not yet mandated in Thailand. Key adaptation strategies included systematic data collection on energy, raw materials, and production technology; personnel training; collaboration with government agencies such as the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO); and promoting environmental policies within industry associations. The findings can serve as policy guidance to support the plastic packaging industry's readiness for Carbon Footprint assessment and contribute to sustainable development in the future.

Keywords : Carbon Footprint, Plastic Companies, Challenges and Adaptation Strategies

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมทั่วโลกมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emissions) ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดย NOAA Global Monitoring Lab (GML) ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบปริมาณก๊าซเรือนกระจกและศึกษาวัฏจักรคาร์บอนที่เป็นผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศโลก (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024) รายงานว่า ในปี 2023 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของชั้นบรรยากาศโลก เฉลี่ยสูงถึง 419.3 ppm ซึ่งเป็นระดับที่สูงสุดตั้งแต่ที่เคยมีมา (Climate.gov., 2023) การเพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อนและเหตุการณ์ทางธรรมชาติมากขึ้น เช่น อุทกภัย ภัยแล้ง และไฟป่าที่รุนแรง (NASA, 2024)

การลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้รับความสำคัญในต่างประเทศ มีการจัดตั้งกฎหมายและมาตรฐานต่างๆ เพื่อควบคุมการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวอย่างเช่น นโยบาย European Green Deal (EGD) ของสหภาพยุโรป มุ่งเน้นให้ทวีปยุโรปกลายเป็นทวีปแรกที่มีความเป็นกลางทางสภาพภูมิอากาศภายในปี 2050 ซึ่งหมายถึงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเท่ากับศูนย์ สหภาพยุโรปได้กำหนดเป้าหมายระยะกลางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างน้อย 55% ภายในปี 2030 เมื่อเทียบกับระดับในปี 1990 และเป้าหมายเหล่านี้ได้ถูกกำหนดให้เป็นกฎหมายผ่าน European Climate Law เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินนโยบายทั้งหมดสอดคล้องกับเป้าหมายดังกล่าว (European Commission, 2024) นอกจากนี้ หลายประเทศยังได้กำหนดมาตรการบังคับใช้คำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือการประเมิน Carbon Footprint เพื่อช่วยให้ธุรกิจปรับตัวตามมาตรฐานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น สหภาพยุโรป (EU) ได้กำหนดมาตรการปรับคาร์บอนข้ามพรมแดน (Carbon Border Adjustment Mechanism หรือ CBAM) เพื่อกระตุ้นให้ประเทศผู้ส่งออกสินค้าปรับกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับมาตรฐานสิ่งแวดล้อม โดยเริ่มใช้ช่วงเปลี่ยนผ่านระหว่างปี 2566–2568 เพื่อให้ผู้นำเข้าสินค้าหลัก 5 ประเภท เช่น ซีเมนต์ เหล็ก และอลูมิเนียม

รายงานข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และจะบังคับใช้เต็มรูปแบบในปี 2569 ซึ่งผู้นำเข้าต้องจัดหาใบรับรอง CBAM เพื่อประกอบการนำเข้า(Bangkok Biz News, 2566)

ในประเทศไทย การประเมิน Carbon Footprint เริ่มเป็นที่ยอมรับในหลายภาคส่วน โดยมีการใช้มาตรการต่างๆ เพื่อส่งเสริมการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก บริษัทใหญ่ๆ อย่าง SCG Packaging ได้เริ่มดำเนินการประเมิน Carbon Footprint ของผลิตภัณฑ์หลายประเภทในประเทศไทย โดยได้รับการรับรองจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น กระดาษบรรจุภัณฑ์ และบรรจุภัณฑ์พลาสติก การรับรองนี้ช่วยให้ SCG Packaging สามารถระบุปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของการผลิตได้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการมุ่งเน้นไปสู่การพัฒนาสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและการสร้างสังคมคาร์บอนต่ำ(SCG News Channel, 2024) สาเหตุที่ทำให้โรงพิมพ์ในไทยต้องปรับตัวเรื่อง Carbon Footprint เพราะแรงกดดันจากกฎระเบียบระหว่างประเทศ เช่น มาตรการ CBAM ของสหภาพยุโรปที่กำหนดให้สินค้าต้องรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิต(Ministry of Foreign Affairs of the Kingdom of Thailand, 2564) รวมถึงความต้องการของตลาดที่เพิ่มขึ้นสำหรับสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมาตรการในประเทศที่สนับสนุนการลดก๊าซเรือนกระจก เช่น องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้ การลด Carbon Footprint ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร ลดต้นทุน และสร้างภาพลักษณ์ที่ดีในการแข่งขันในอุตสาหกรรม(Thai Print, 2566)

ดังนั้น จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงทั่วโลก การเพิ่มขึ้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และความสำคัญของการประเมิน Carbon Footprint ที่เข้ามาสู่ประเทศไทย ผู้จัดทำจึงมุ่งเน้นศึกษาสภาพปัญหาและแนวทางการปรับตัวของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์เพื่อเตรียมความพร้อมต่อการประเมิน Carbon Footprint งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อช่วยให้โรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์สามารถปรับตัวตามมาตรฐานที่จำเป็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และหวังว่าจะมีส่วนช่วยในการผลักดันให้องค์กรในประเทศไทยได้เตรียมความพร้อมต่อการประเมินรับรอง Carbon Footprint อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาความตระหนักโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานครต่อการเตรียมความพร้อมในการประเมิน Carbon Footprint
2. เพื่อศึกษาสภาพปัญหาโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานครต่อการเตรียมความพร้อมในการประเมิน Carbon Footprint
3. เพื่อศึกษาแนวทางการปรับตัวโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานครต่อการเตรียมความพร้อมในการประเมิน Carbon Footprint

การทบทวนวรรณกรรม

Carbon Footprint

Carbon Footprint หมายถึง ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งวัดในหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยก๊าซที่เกี่ยวข้องมี

ทั้งหมด 7 ชนิด เช่น CO₂, CH₄ และ N₂O ซึ่งมีผลต่อภาวะโลกร้อน การประเมิน Carbon Footprint แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ CFO (ขององค์กร) และ CFP (ของผลิตภัณฑ์) (Optiwise, 2568)

CFO วัดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมขององค์กร โดยแบ่งเป็น 3 ขอบเขต (Scope 1–3) และต้องมีการเก็บข้อมูลย้อนหลัง คำนวณตาม Emission Factor และรายงานผลตามมาตรฐาน GHG Protocol หรือ ISO 14064(สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (FTI), 2566b) ส่วน CFP ใช้หลัก Life Cycle Assessment (LCA) ในการวิเคราะห์ตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การผลิต ขนส่ง ใช้งาน จนถึงการกำจัด(สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (FTI), 2566a)

ทั้งสองประเภทช่วยให้องค์กรสามารถวางแผนและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีระบบ โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ภาพลักษณ์ และต้นทุนระยะยาว และยังสามารถขอรับรองหรือฉลากสิ่งแวดล้อมจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อยืนยันความยั่งยืนของธุรกิจ

อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์พลาสติก

อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์พลาสติกใช้พลาสติกหลากหลายประเภท เช่น PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS และกลุ่ม OTHER ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานต่างกัน เช่น การผลิตขวดน้ำ ถังพลาสติก หรือภาชนะบรรจุอาหาร อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตพลาสติกเหล่านี้เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการผลิตพลาสติกในปัจจุบันปล่อยก๊าซเรือนกระจกราว 2.24 กิกะตันต่อปี คิดเป็น 5% ของการปล่อยก๊าซทั่วโลก และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหากไม่มีการควบคุม(Taragraphies, 2567)

การปล่อยก๊าซเหล่านี้มาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิตวัตถุดิบ เช่น เอทิลีนและโพรพิลีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพลาสติก นอกจากนี้ยังมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาหรือฝังกลบขยะพลาสติกในระยะสุดท้ายของวงจรชีวิต รัฐบาลไทยจึงได้เสนอร่างพระราชบัญญัติส่งเสริมการลดก๊าซเรือนกระจก เพื่อสร้างกลไกในการบังคับใช้และส่งเสริมการลด Carbon Footprint อย่างเป็นระบบ เช่น การกำหนดมาตรฐานการรายงาน การเก็บภาษีคาร์บอน และการใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม(รัฐสภา, 2567)

อุตสาหกรรมพลาสติกจึงจำเป็นต้องปรับตัว ด้วยการใช้วัสดุรีไซเคิลหรือชีวภาพ ติดตามข้อมูลการปล่อยก๊าซอย่างต่อเนื่อง และปรับกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับนโยบายคาร์บอนต่ำในอนาคต

ระเบียบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) โดยการรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณกลุ่มตัวอย่างจากผู้ประกอบการและผู้จัดการของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานคร ทนจดทะเบียนเกิน 100 ล้านบาท จำนวน 18 โรงพิมพ์ ทนจดทะเบียนเกิน 10 ล้านบาทแต่ไม่ถึง 100 ล้านบาท จำนวน 30 โรงพิมพ์ และทนจดทะเบียนไม่เกิน 10 ล้านบาท จำนวน 168 โรงพิมพ์ โรงพิมพ์ละ 1 คน รวมเป็นจำนวนทั้งหมด 216 คน แต่จากข้อจำกัดด้านการเข้าถึงและความร่วมมือของผู้ตอบแบบสอบถาม ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้จริงเพียง 42 คน ผู้วิจัยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือ โดยคำถามแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ทำแบบสอบถาม ส่วนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับความตระหนักต่อการประเมิน Carbon Footprint ของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานคร (เคย / ไม่เคยประเมิน Carbon Footprint) ส่วนที่ 3 ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพปัญหาสำหรับการเตรียมความพร้อมต่อการประเมิน Carbon footprint ของโรง

พิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานคร (เคย / ไม่เคยประเมิน Carbon Footprint) ส่วนที่ 4 ข้อมูลเกี่ยวกับแนวทางการปรับตัวเพื่อเตรียมความพร้อมต่อการประเมิน Carbon footprint ของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานคร (เคย / ไม่เคยประเมิน Carbon Footprint) ซึ่งเครื่องมือวิจัยได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือหาค่าดัชนีความสอดคล้องของเครื่องมือจากผู้เชี่ยวชาญ(IOC) และได้มีการรับรองการประเมินจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ หมายเลขใบรับรอง KMUTT-IRB-2025-0508-153 โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (descriptive analytics) และการวิเคราะห์เชิงอนุมาน (Inferential Analysis)

ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลนำมาสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ตอบแบบสอบถาม ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ตอบแบบสอบถาม บุคคลส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง 26 คน คิดเป็นร้อยละ 61.9 และเพศชาย 16 คน คิดเป็นร้อยละ 38.1 ส่วนใหญ่ อายุ 20-30 ปี จำนวน 18 คน คิดเป็นร้อยละ 42.9, อายุ 31-40 ปี 12 คน คิดเป็นร้อยละ 28.6, อายุ 41-50 ปี 10 คน คิดเป็นร้อยละ 23.8 และอายุ 51-60 ปี 2 คน คิดเป็นร้อยละ 4.8 โดยมีวุฒิการศึกษาสูงสุดปริญญาตรีหรือเทียบเท่า 34 คน คิดเป็นร้อยละ 81.0 รองลงมาเป็นปริญญาโทหรือเทียบเท่า 4 คน คิดเป็นร้อยละ 9.5, ต่ำกว่าระดับปริญญาตรีและสูงกว่าระดับปริญญาโทจำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 4.8, ตำแหน่งปัจจุบันของแต่ละคน ส่วนใหญ่เป็นเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานจำนวน 26 คน คิดเป็นร้อยละ 61.9, ผู้จัดการจำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 23.8 และผู้ประกอบการ / เจ้าของกิจการจำนวน 6 คน คิดเป็นร้อยละ 14.3 ต่อไปคือประสบการณ์ในสถานประกอบการส่วนใหญ่อยู่ที่ 1-5 ปี จำนวน 24 คน คิดเป็นร้อยละ 57.1, มากกว่า 5 ปีขึ้นไปอีก 14 คน คิดเป็นร้อยละ 33.3 และต่ำกว่า 1 ปีอีก 4 คน คิดเป็นร้อยละ 9.5 ในส่วนของประเภทโรงงานของสถานประกอบการ กว่า 14 คน คิดเป็นร้อยละ 33.3 อยู่ที่โรงงานเป่าพลาสติก, โรงพิมพ์ฟลิกซ์กับโรงงานผลิตของและถุงพลาสติกมีจำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 28.6, โรงพิมพ์กราเวียร์ โรงพิมพ์ออฟเซต และโรงงานฉีดพลาสติกมีจำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 23.8, โรงพิมพ์ดิจิทัลมีจำนวน 8 คน คิดเป็นร้อยละ 19.0, อื่นๆ เช่น โรงงานผลิตแม่พิมพ์พลาสติก มีจำนวน 6 คน คิดเป็นร้อยละ 14.3 และโรงงานรีดพลาสติกเช่นกัน ต่อมากำลังของเครื่องจักรรวมในสถานประกอบการ จำนวน 36 คน คิดเป็นร้อยละ 85.7 มีกำลังของเครื่องจักรรวมมากกว่า 75 แรงม้า, จำนวน 4 คน คิดเป็นร้อยละ 9.5 มีกำลังของเครื่องจักรรวมมากกว่า 50 แรงม้า แต่ไม่เกิน 75 แรงม้า และจำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 4.8 มีกำลังของเครื่องจักรรวมไม่เกิน 50 แรงม้า ซึ่งขนาดของสถานประกอบการส่วนใหญ่เป็นขนาดใหญ่ (การจ้างงานมากกว่า 200 คน) ด้วยจำนวน 26 คน คิดเป็นร้อยละ 61.9, สถานประกอบการขนาดกลาง (การจ้างงาน 50-200 คน) จำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 23.8 และสถานประกอบการขนาดเล็ก (การจ้างงานไม่เกิน 50 คน) จำนวน 6 คน คิดเป็นร้อยละ 14.3 สำหรับทุนจดทะเบียนของสถานประกอบการ ส่วนใหญ่อยู่ที่ทุนจดทะเบียนมากกว่า 100 ล้านบาทจำนวน 24 คน คิดเป็นร้อยละ 57.1, ทุนจดทะเบียนมากกว่า 10 ถึง 100 ล้านบาท 10 คน คิดเป็นร้อยละ 23.8 และอีก 8 คน คิดเป็นร้อยละ 19.0 ทุนจดทะเบียนน้อยกว่า 10 ล้านบาท สุดท้าย ผู้ที่เคยประเมิน Carbon Footprint มี

จำนวน 22 คน คิดเป็นร้อยละ 52.4 และผู้ที่ไม่เคยประเมิน Carbon Footprint อีกจำนวน 20 คน คิดเป็นร้อยละ 47.6

2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความตระหนัก สภาพปัญหา และแนวทางการปรับตัวต่อการประเมิน Carbon footprint (เคย / ไม่เคยประเมิน) จำนวน 42 คน ปรากฏตามตารางที่ 1, ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ ดังนี้

ตารางที่ 1 ความตระหนักต่อการประเมิน Carbon Footprint

ความตระหนักต่อการประเมิน Carbon Footprint	เคยประเมิน (N = 22)		ไม่เคยประเมิน (N = 20)	
	ความถี่	ร้อยละ	ความถี่	ร้อยละ
1. Carbon Footprint กำลังเป็นสิ่งจำเป็นต่อการทำธุรกิจในปัจจุบันและอนาคต				
ทราบ (หากตอบข้อนี้ กรุณาตอบข้อ 1.1)	22	100.0	16	80.0
ไม่ทราบ (หากตอบข้อนี้ กรุณาตอบข้อ 1.2)	0	0	4	20.0
1.1 แหล่งที่มาข้อมูล				
สื่อออนไลน์ (เว็บไซต์, โซเชียลมีเดีย)	14	63.6	7	43.8
การอบรม / สัมมนา	17	77.3	14	87.5
องค์กรที่เกี่ยวข้อง (เช่น องค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก)	16	72.7	9	56.3
เครือข่ายธุรกิจ / พันธมิตร	14	63.6	8	50.0
อื่นๆ	0	0	3	18.8
1.2 แหล่งที่มาข้อมูลที่ต้องการให้ประชาสัมพันธ์				
สื่อออนไลน์ (เว็บไซต์, โซเชียลมีเดีย)	-	-	2	50.0
การอบรม / สัมมนา	-	-	3	75.0
2. องค์กรเกี่ยวข้องกับ Carbon Footprint ที่รู้จัก				
องค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO)	22	100.0	8	40.0
UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)	12	54.5	0	0
Verified Carbon Standard (VCS)	5	22.7	2	10.0
ISO (International Organization for Standardization)	16	72.7	15	75.0
อื่นๆ เช่น GHG Protocol Corporate Standard, ไม่รู้จักเลย	1	4.5	2	10.0

ตารางที่ 2 สภาพปัญหาต่อการประเมิน Carbon Footprint

สภาพปัญหาต่อการประเมิน Carbon Footprint	เคยประเมิน (N = 22)		ไม่เคยประเมิน (N = 20)	
	ความถี่	ร้อยละ	ความถี่	ร้อยละ
1.การเก็บข้อมูล				
ด้านพลังงาน	22	100.0	14	70.0
ด้านวัตถุดิบ	22	100.0	16	80.0
ด้านเทคโนโลยีการผลิต	13	59.1	11	55.0
อื่นๆ	2	9.1	4	20.0
2.ระดับปัญหาของการเก็บข้อมูลด้านพลังงาน				
ปัญหาระดับใหญ่	7	31.8	7	35.0
ปัญหาระดับปานกลาง	11	50.0	9	45.0
ปัญหาระดับเล็กน้อย	0	0	0	0
ไม่ใช่ปัญหา	4	18.2	4	20.0
2.1 อุปสรรคที่พบจากการเก็บข้อมูลด้านพลังงาน				
ข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือไม่ต่อเนื่อง	10	55.6	5	31.5
ขาดเครื่องมือหรือเทคโนโลยีในการจัดการข้อมูล	10	55.6	12	75.0
ขาดความรู้หรือทักษะของบุคลากร	8	44.4	10	62.5
ขาดต้นทุนในการเก็บข้อมูล	0	0	6	37.5
3.ระดับปัญหาของการเก็บข้อมูลด้านวัตถุดิบ				
ปัญหาระดับใหญ่	7	31.8	4	20.0
ปัญหาระดับปานกลาง	13	59.1	7	35.0
ปัญหาระดับเล็กน้อย	0	0	3	15.0
ไม่ใช่ปัญหา	2	9.1	6	30.0
3.1 อุปสรรคที่พบจากการเก็บข้อมูลด้านวัตถุดิบ				
ข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือไม่ต่อเนื่อง	14	70.0	6	42.9
ขาดเครื่องมือหรือเทคโนโลยีในการจัดการข้อมูล	12	60.0	11	78.6
ขาดความรู้หรือทักษะของบุคลากร	9	45.0	10	71.4
ขาดต้นทุนในการเก็บข้อมูล	0	0	4	28.6
4.ระดับปัญหาของการเก็บข้อมูลด้านเทคโนโลยีการผลิต				
ปัญหาระดับใหญ่	6	27.3	6	30.0
ปัญหาระดับปานกลาง	12	54.5	8	40.0
ปัญหาระดับเล็กน้อย	0	0	0	0
ไม่ใช่ปัญหา	4	18.2	6	30.0
4.1 อุปสรรคที่พบจากการเก็บข้อมูลด้านเทคโนโลยีการผลิต				
ข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือไม่ต่อเนื่อง	11	61.1	5	35.7
ขาดเครื่องมือหรือเทคโนโลยีในการจัดการข้อมูล	9	50.0	10	71.4
ขาดความรู้หรือทักษะของบุคลากร	11	61.1	9	64.3
ขาดต้นทุนในการเก็บข้อมูล	3	16.7	6	42.9

ตารางที่ 3 แนวทางการปรับตัวต่อการประเมิน Carbon Footprint

แนวทางการปรับตัวต่อการประเมิน Carbon Footprint	เคยประเมิน (N = 22)		ไม่เคยประเมิน (N = 20)	
	ความถี่	ร้อยละ	ความถี่	ร้อยละ
1.วิธีการแก้ปัญหาปัจจัยด้านพลังงาน				
จัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ	22	100.0	17	85.0
จัดอบรมให้ความรู้แก่พนักงาน	16	72.7	16	80.0
ขอสนับสนุนเงินทุนจากหน่วยงานรัฐ	6	27.3	8	40.0
อื่นๆ	0	0	1	5.0
2.วิธีการแก้ปัญหาปัจจัยด้านวัตถุดิบ				
จัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ	22	100.0	20	100.0
จัดอบรมให้ความรู้แก่พนักงาน	17	77.3	16	80.0
ขอสนับสนุนเงินทุนจากหน่วยงานรัฐ	1	4.5	5	25.0
3.วิธีการแก้ปัญหาปัจจัยด้านเทคโนโลยีการผลิต				
จัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ	21	95.5	18	90.0
จัดอบรมให้ความรู้แก่พนักงาน	18	81.8	18	90.0
ขอสนับสนุนเงินทุนจากหน่วยงานรัฐ	4	18.2	3	15.0
4.หน่วยงานที่ร่วมมือ / อยากให้ช่วยเหลือเพื่อปรับตัวต่อการประเมิน Carbon Footprint				
รัฐบาล/หน่วยงานรัฐ	4	18.2	17	85.0
องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO)	13	59.1	12	60.0
บริษัทที่ปรึกษาเอกชน	12	54.5	8	40.0
พันธมิตรทางธุรกิจ	8	36.4	12	60.0
มหาวิทยาลัย	1	4.5	9	45.0
ไม่มี	6	27.3	1	10.0
5.ความร่วมมือ / แผนในการรณรงค์ที่ทำให้ปรับตัวง่ายขึ้น				
มีแคมเปญในการประชาสัมพันธ์	12	54.5	11	55.0
ได้รับความร่วมมือกับคู่ค้าในอุตสาหกรรม	14	63.6	16	80.0
ผลักดันการใช้นโยบายสิ่งแวดล้อมภายในสมาคมอุตสาหกรรม	15	68.2	0	0
จัดอบรมหรือให้คำปรึกษาแก่สถานประกอบการ	12	54.5	20	100.0
สนับสนุนให้หน่วยงานรัฐมีนโยบายส่งเสริม	8	36.4	13	65.0

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยเรื่องการศึกษาสภาพปัญหาและแนวทางการปรับตัวของโรงพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกในกรุงเทพมหานครเพื่อเตรียมความพร้อมต่อการประเมิน Carbon Footprint ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ทำแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง อายุอยู่ระหว่าง 20-30 ปี วุฒิการศึกษาสูงสุดอยู่ที่ปริญญาตรีหรือเทียบเท่า ทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานในปัจจุบัน ประสบการณ์ทำงานมากกว่า 1-5 ปี สถานประกอบการส่วนใหญ่เป็นโรงพิมพ์เพล็กซ์กับโรงงานผลิตซองและถุงพลาสติก กำลังของเครื่องจักรมีขนาดรวม

มากกว่า 75 แรงม้า เป็นสถานประกอบการขนาดใหญ่ (การจ้างงานมากกว่า 200 คน) พุนจตทะเบียนมากกว่า 100 ล้านบาท และเคยประเมิน Carbon Footprint

จากผลการวิจัย พบว่ากลุ่มที่เคยประเมิน Carbon Footprint มีความตระหนักรู้ในระดับสูง เนื่องจากคิดว่าการประเมินเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำเนินธุรกิจในปัจจุบันและอนาคต โดยได้รับข้อมูลจากการอบรมและสัมมนา ซึ่งทุกคนที่เคยประเมินรู้จักองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก ขณะที่กลุ่มของผู้ที่ไม่เคยประเมินก็รับรู้ถึงความสำคัญในระดับหนึ่ง โดยทราบจากการอบรมหรือสัมมนาเช่นกัน ซึ่งคนที่ไม่เคยประเมินส่วนใหญ่จะรู้จักองค์การอย่าง ISO

จากผลการวิจัยสภาพปัญหา พบว่า กลุ่มที่เคยประเมินพบปัญหาระดับกลางด้านการเก็บข้อมูลพลังงาน วัตถุดิบ และเทคโนโลยีการผลิต อุปสรรคที่พบคือข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือไม่ต่อเนื่อง ขาดเครื่องมือหรือเทคโนโลยีจัดการข้อมูล และขาดความรู้หรือทักษะของบุคลากร ทำให้กระบวนการประเมินใช้เวลานานและต้องอาศัยการจัดระบบข้อมูลอย่างเข้มงวด ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ วารุณี ดือระ ที่แนะนำให้มีการใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพและจัดฝึกอบรมพนักงานในอุตสาหกรรม(วารุณี ดือระ, 2566) ขณะที่กลุ่มที่ไม่เคยประเมินก็พบปัญหาในระดับใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะข้อจำกัดเครื่องมือหรือเทคโนโลยีในการจัดการข้อมูล

สำหรับแนวทางการปรับตัว จากผลการวิจัยพบว่า กลุ่มที่เคยประเมินมักเลือกใช้การจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบและจัดอบรมบุคลากรเพื่อเพิ่มทักษะ โดยมีความร่วมมือกับองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) เพื่อสนับสนุนด้านเทคนิคและมาตรฐานการประเมิน(GastalkTH, 2025) ขณะที่กลุ่มที่ไม่เคยประเมินแม้ยังขาดประสบการณ์ แต่ก็พยายามเตรียมความพร้อมโดยใช้การจัดเก็บข้อมูลเป็นระบบ และเสริมด้วยการอบรมให้ความรู้แก่พนักงานเพื่อชดเชยข้อจำกัดด้านบุคลากร อีกทั้งยังมีความต้องการความช่วยเหลือจากภาครัฐหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น การฝึกอบรมด้านการเก็บข้อมูล ทั้งนี้สอดคล้องกับบทบาทของ TGO และนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐที่มุ่งผลักดันภาคอุตสาหกรรมสู่การดำเนินงานอย่างยั่งยืน(GastalkTH, 2025)

ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมิติ โดยเฉพาะในการส่งเสริมให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจัดทำแนวทางการสนับสนุนการประเมิน Carbon Footprint ที่สอดคล้องกับขนาดของธุรกิจ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับตัวของสถานประกอบการแต่ละประเภท ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัยยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบหลักสูตรอบรมให้ตอบโจทย์ปัญหาจริงที่สถานประกอบการเผชิญ ช่วยให้การพัฒนาศักยภาพบุคลากรมีความตรงจุดมากขึ้น ในขณะเดียวกันสถานประกอบการสามารถใช้ผลการวิจัยเป็นเครื่องมือประเมินความพร้อมภายในและวางแผนปรับปรุงกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว สำหรับการวิจัยในอนาคต ควรขยายขอบเขตไปสู่โรงพิมพ์ประเภทอื่น เช่น โรงงานกระดาษหรือโรงงานกระป๋อง เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยและแนวทางการปรับตัวอย่างครอบคลุมมากขึ้น รวมถึงควรใช้วิธีการวิจัยเชิงคุณภาพ เช่น การสัมภาษณ์เชิงลึกหรือการสนทนากลุ่มกับผู้บริหารเพื่อเข้าถึงแรงจูงใจและกลยุทธ์ในการปรับตัว ตลอดจนศึกษาผลกระทบเชิงบวกหลังการประเมิน Carbon Footprint เช่น การ

ลดต้นทุน การเพิ่มประสิทธิภาพองค์กร หรือการเติบโตของยอดขาย เพื่อสะท้อนถึงคุณค่าในการดำเนินการในระดับองค์กรและระบบอุตสาหกรรมโดยรวม

บรรณานุกรม

- Bangkok Biz News. (2566). รัฐเตรียมเร่งใบรับรอง Carbon Footprint รองรับ EU บังคับใช้ “CBAM”. สืบค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://www.bangkokbiznews.com/Environment/>.
- Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- European Commission. (2024). *European Climate Law*. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2567 จาก https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en
- GastalkTH. (2025). องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.). GastalkTH. สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม 2568 จาก <https://www.gastalkth.com/knowledge-base/108>
- Ministry of Foreign Affairs of the Kingdom of Thailand. (2564). สหภาพยุโรปเผยแพร่ร่างกฎหมายว่าด้วยมาตรการปรับคาร์บอนข้ามพรมแดน. สืบค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://europetouch.mfa.go.th/>
- NASA. (2024). *Extreme Weather*. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://climate.nasa.gov/extreme-weather.amp>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2024). *About Global Monitoring Laboratory*. สืบค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://www.gml.noaa.gov/about/aboutgml.html>
- Optiwise. (2568). *Carbon Footprint คืออะไร? รู้จักความหมาย องค์ประกอบ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม*. สืบค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2568 จาก <https://www.optiwise.io/th/blog/115/carbon-footprint>
- SCG News Channel. (2024). *SCGP Achieves Carbon Footprint of Products Certification, including all Paper Packaging SKUs, Ready to Team Up with Customers to Minimize Greenhouse Gas Emissions and Promote Environmental Sustainability*. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://scgnewschannel.com/en/scg-news/scgp-achieves-carbon-footprint-of-products-certification-including-all-paper-packaging-skus-ready-to-team-up-with-customers-to-minimize-greenhouse-gas-emissions-and-promote-environmental-sustainability/>
- Taragraphies. (2567). การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลาสติกอาจเพิ่มเป็น 3 เท่า คิดเป็น 1/5 ของงบประมาณคาร์บอนของโลก. สืบค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2568 จาก <https://taragraphies.org/2024/04/20/emissionfromplastic/>
- Thai Print. (2566). คาร์บอนฟุตพริ้นท์สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์และแนวทางการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตสิ่งพิมพ์. สืบค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://www.thaiprint.org/2023/07/vol142/knowledge142-03/>
- รัฐสภา. (2567). ร่างพระราชบัญญัติส่งเสริมการลดก๊าซเรือนกระจก และคาร์บอนเครดิต สืบค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2568 จาก https://web.parliament.go.th/section77/manage/files/file_20240623152619_2_381.pdf
- วารุณี ดือระ. (2566). การศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกระบวนการผลิตเครื่องดื่ม. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2016/18244/1/6410920020.pdf>



สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (FTI). (2566a). ความรู้เบื้องต้นการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. สืบค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2568 จาก <https://km.fti.or.th/wp-content/uploads/2023/05/>

สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (FTI). (2566b). ความรู้เบื้องต้นการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร. สืบค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2568 จาก <https://km.fti.or.th/>

อิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสต่อสมบัติถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ Effects of Pyrolysis Temperature and Residence Time on the Physicochemical Properties of Bamboo Biochar

ประภัสสร รัตนไพบูลย์¹, กิตติกร สาสุจิตต์¹, พชร อินธนู², Ramehprabu Ramaraj¹ และ นิกราน หอมดวง^{1*}
Praphatsorn Rattanaphaiboon¹, Kittikorn Sasujit¹, Patcharee Intanoo², Ramehprabu Ramaraj and
Nigran Homduang^{1*}

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

²คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

¹School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

²Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai 50290

¹Corresponding author: Tel.: 084-1773632. E-mail address: nigranghd@gmail.com

Abstract

Biochar is a carbon-rich material derived from the pyrolysis of biomass under limited oxygen conditions. It possesses a porous structure and high chemical stability, enabling long-term carbon sequestration in the environment. This characteristic helps mitigate greenhouse gas emissions from biomass decomposition, enhances natural carbon capture, and supports the development of a sustainable, low-carbon economy. This study aimed to investigate the effects of pyrolysis temperature and residence time on the properties of bamboo-derived biochar. Pyrolysis was conducted at 400 and 500 °C for 1 and 2 h, with a heating rate of 10 °C/min. The results revealed that both temperature and residence time significantly influenced the chemical composition and thermal properties of the produced biochar. Volatile matter content decreased with increasing temperature and time, whereas fixed carbon increased, reaching a maximum of 51.19% at 500 °C for two hours. The high heating value (HHV) increased from 15.30 MJ/kg in raw bamboo to 32.63 MJ/kg in biochar, with the maximum thermal efficiency of 81.05% observed at 400 °C for one hour. However, higher pyrolysis temperatures improved the carbon stability and overall quality of the biochar. These findings suggest that optimizing pyrolysis temperature and duration can yield biochar with superior energy potential and enhanced carbon sequestration capability.

Keywords: Bamboo, Pyrolysis process, Biochar, Fixed carbon, High heating value

บทคัดย่อ

ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นวัสดุคาร์บอนที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด มีลักษณะโครงสร้างรูพรุนและเสถียรภาพทางเคมีสูง สามารถกักเก็บคาร์บอนในรูปแบบที่ไม่ย่อยสลายได้ยาวนานในสิ่งแวดล้อม คุณสมบัตินี้ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการย่อยสลายของชีวมวล ส่งเสริมการดักจับคาร์บอนตามกลไกธรรมชาติ และสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบบของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 และ 2 h ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสมีผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของถ่านชีวภาพอย่างชัดเจน ปริมาณสารระเหยลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น ขณะที่

คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ 51.19% ที่อุณหภูมิ 500 °C ระยะเวลา 2 h ค่าความร้อนสูง (HHV) เพิ่มขึ้นจาก 15.30 MJ/kg ในไม้ไผ่วัตถุดิบตั้งต้นเป็น 32.63 MJ/kg ในถ่านชีวภาพ ประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนสูงสุด 81.05% ที่ 400 °C เป็นเวลา 1 h อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงจะเพิ่มความเสถียรของคาร์บอนและคุณภาพของถ่านชีวภาพให้ดีขึ้น ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสสามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีสมบัติเด่นทั้งด้านพลังงานและการกักเก็บคาร์บอน สนับสนุนการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเหลือทิ้งอย่างยั่งยืนและการพัฒนาเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำในอนาคต

คำสำคัญ: ไม้ไผ่ กระบวนการไพโรไลซิส ถ่านชีวภาพ คาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาระดับโลกที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และความมั่นคงทางอาหารของมนุษยชาติ มีสาเหตุสำคัญมาจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การผลิตทางอุตสาหกรรม และการตัดไม้ทำลายป่า [1] ปัจจุบันปริมาณ CO₂ ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แนวทางหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติในการลดการสะสมของคาร์บอนในบรรยากาศ คือ การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage: CCS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหรือกระบวนการที่มุ่งเน้นการดึง CO₂ จากแหล่งกำเนิดหรือจากบรรยากาศมาเก็บรักษาไว้ในรูปแบบที่มั่นคงและไม่ย้อนกลับไปสู่บรรยากาศในระยะยาว [2] โดยแนวทาง CCS หนึ่งในที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนต่ำคือ การใช้ถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ของชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด [3] ถ่านชีวภาพจากไม้เป็นวัสดุหนึ่งที่มีความสนใจในด้านวัสดุกักเก็บคาร์บอน เนื่องจากไม้เป็นพืชที่มีอัตราการเติบโตเร็ว ผลผลิตชีวมวลสูง และสามารถ ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศได้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับไม้ยืนต้นชนิดอื่น [4] การเปลี่ยนไม้ให้เป็นถ่านชีวภาพจึงช่วยกักเก็บคาร์บอนในรูปของโครงสร้างคาร์บอนเสถียร สามารถคงอยู่ในดินได้นานหลายร้อยถึงหลายพันปี ทำให้ถ่านชีวภาพมีบทบาทสำคัญทั้งในด้านการลดการปล่อยคาร์บอน และการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาว สมบัติสำคัญที่กำหนดศักยภาพของถ่านชีวภาพในการกักเก็บคาร์บอน ได้แก่ สัดส่วนของคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนที่คงอยู่ในโครงสร้างของถ่านและไม่ระเหยออกในกระบวนการเผาไหม้หรือย่อยสลายทางชีวภาพ [5] ถ่านชีวภาพที่มีสัดส่วนคาร์บอนคงที่สูงมักเกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง (400–700 °C) ส่งผลให้เกิดโครงสร้างคาร์บอนแบบอะโรมาติก (aromatic carbon structure) ซึ่งมีความเสถียรและต้านทานการย่อยสลายได้ดีกว่าคาร์บอนรูปแบบอื่น [6] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสต่อคุณสมบัติถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ ซึ่งถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ไม่เพียงเป็นทางเลือกในการจัดการชีวมวลเหลือทิ้งและปรับปรุงคุณภาพดินเท่านั้น แต่ยังมีบทบาทสำคัญในด้านวัสดุกักเก็บคาร์บอนธรรมชาติที่สามารถช่วยบรรเทาผลกระทบจากภาวะโลกร้อนและสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำในอนาคตได้

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ไม้ไผ่ที่เป็นเศษวัตถุดิบเหลือทิ้งเป็นวัตถุดิบหลัก มีคุณสมบัติค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว คือ 9.05% 82.36% 3.21% และ 5.38% ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนมีค่าอยู่ที่ 15.30 MJ/kg การเตรียมไม้ไผ่ได้นำมาผ่าเป็นชิ้นให้มีความยาวประมาณ 5 cm กว้าง 0.5-0.7 cm และไม้ไผ่มีความหนา 0.15-1.2 cm ดังภาพที่ 1 จากนั้นนำมาใส่ลงในภาชนะเซรามิกที่มีฝาปิดปริมาณ 280-300 g/ครั้ง เพื่อเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส คือ 400 และ 500 °C เป็นระยะเวลา 1 และ 2 h อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ในตาเผาอุณหภูมิสูงระดับห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ MAGMA THERM รุ่น MT-1100-5-B2



ภาพที่ 1 การเตรียมไม้ผุ

การวิเคราะห์สมบัติถ่านชีวภาพ

การผลิตถ่านชีวภาพได้ทำการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพ สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (1) [7] การวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพทางเคมี ด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-3175 สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (2)-(5) [8] การวิเคราะห์ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D5865 [9] ด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนแบบแคลอริมิเตอร์ รุ่น AC500 ยี่ห้อ LECO ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถประเมินได้จากสมการที่ (6)-(7) [7] โดยในการทดลองแต่ละสมบัติได้ทดลอง 3 ซ้ำ

$$CY(\%) = \frac{C_m}{W_{raw}} \times 100 \quad (1)$$

$$MC(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

$$VC(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

$$ASH(\%) = \frac{W_4}{W_1} \times 100 \quad (4)$$

$$FC(\%) = 100 - (MC + VM + ASH) \quad (5)$$

$$E = m' \cdot HHV \quad (6)$$

$$h_{th}(\%) = \frac{E_{Biochar}}{E_{raw}} \times 100 \quad (7)$$

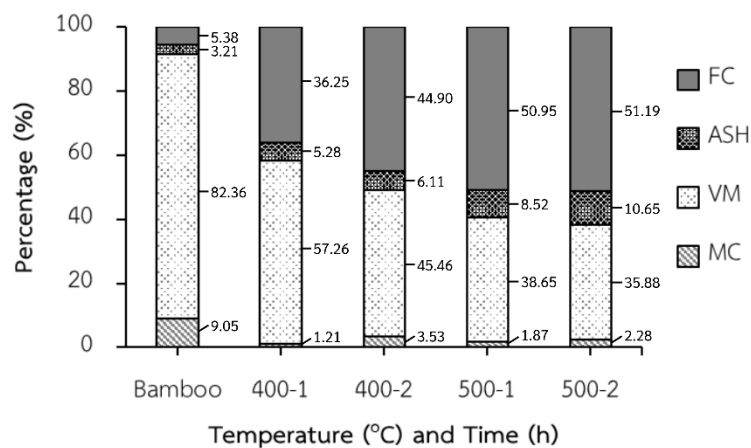
เมื่อ CY คือ ร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพ C_m คือ มวลของถ่านชีวภาพ (g) W_{raw} คือ มวลของวัตถุดิบตั้งต้น (g) MC คือ ค่าความชื้น W_1 คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g) W_2 คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบที่ 105 °C (g) VM คือ ปริมาณสารระเหย W_3 คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังให้ความร้อนที่ 950 °C (ไม่รวมเถ้า) ASH คือ ปริมาณเถ้า W_4 คือ น้ำหนักของเถ้าที่เหลือหลังการเผา (g) FC คือ คาร์บอนคงตัว E คือ พลังงาน m คือ มวล (g) HHV คือ ค่าความร้อนสูง (MJ/kg) η_{th} ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%) $E_{Biochar}$ คือ พลังงานของถ่านชีวภาพ (MJ) และ E_{raw} คือ พลังงานของวัตถุดิบตั้งต้น (MJ)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ของถ่านชีวภาพไม้ไผ่ภายใต้อุณหภูมิและเวลาการไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิและเวลาส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในด้านของความชื้น (MC) ปริมาณ

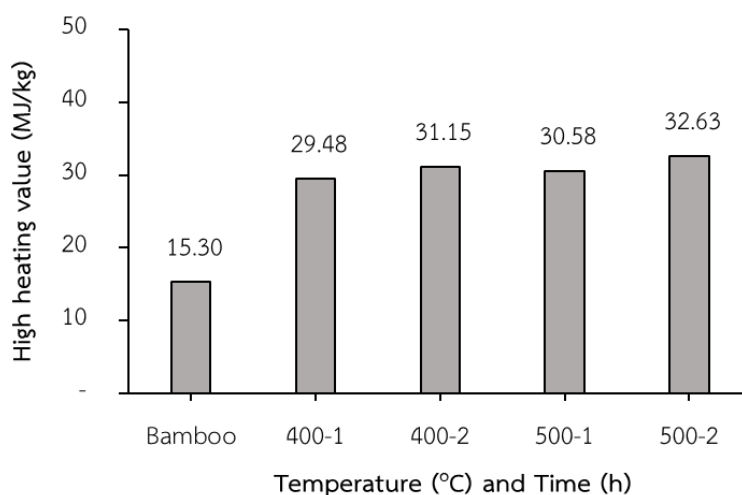
สารระเหย (VM) ปริมาณเถ้า (Ash) และคาร์บอนคงตัว (FC) ปริมาณสารระเหยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิและเวลาการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 500 °C ระยะเวลา 2 h มีปริมาณสารระเหยต่ำที่สุดคือ 35.88% ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zhou et al. (2019) [10] รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์และการปลดปล่อยสารระเหยมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างคาร์บอนภายในถ่านชีวภาพมีความเสถียรมากขึ้น ในขณะที่คาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่ 500 °C ระยะเวลา 2 h มีคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดอยู่ที่ 51.19% แสดงถึงการเกิดคาร์บอนที่เสถียรและมีศักยภาพสูงในการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาว [11] ปริมาณความชื้นของถ่านชีวภาพลดลงเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากการสูญเสียไอน้ำที่ดูดซับและน้ำภายในโครงสร้างไม้ [12] สำหรับ ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิซึ่งอาจเกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์หลังการเผาไหม้ขององค์ประกอบระเหย [13] ดังภาพที่ 2 การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวและความเสถียรภาพของโครงสร้างถ่านส่งผลโดยตรงต่อสมบัติ การกักเก็บคาร์บอนและการดูดซับมลพิษ เช่น โลหะหนัก และสารอินทรีย์ระเหย [14] นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่มีค่าคาร์บอนคงตัวสูงและปริมาณสารระเหยต่ำยังเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีค่าความร้อนสูงและ การเผาไหม้สะอาด [15]



ภาพที่ 2 ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ

ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อคุณสมบัติค่าความร้อนถ่านชีวภาพ

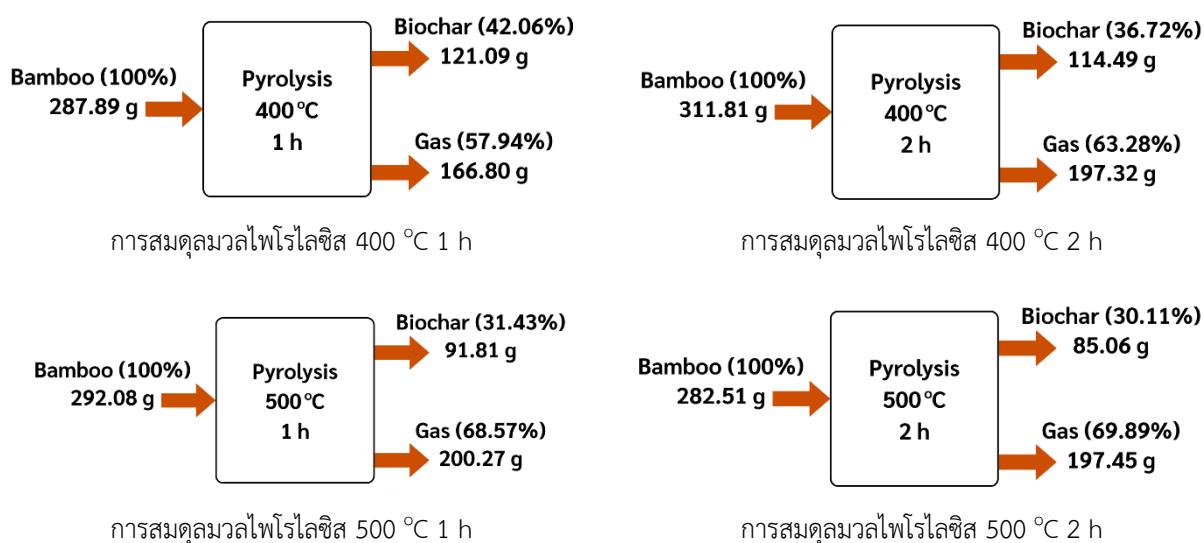
ค่าความร้อนสูง (HHV) ของไม้ไผ่วัตถุดิบตั้งต้นมีค่าเพียง 15.30 MJ/kg ในขณะที่ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 1 และ 2 h ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 29.48 และ 31.15 MJ/kg ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 500 °C ค่าความร้อนอยู่ที่ 30.58 และ 32.63 MJ/kg ตามลำดับ แสดงให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Chen et al. (2021) [11] ระบุว่า การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ทำให้ค่าความร้อนโดยรวมของถ่านชีวภาพสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มเวลาไพโรไลซิสจาก 1 h เป็น 2 h ที่อุณหภูมิเดียวกันส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 29.48 เป็น 31.15 MJ/kg ที่อุณหภูมิ 400 °C และจาก 30.58 เป็น 32.63 MJ/kg ที่อุณหภูมิ 500 °C ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 ซึ่งบ่งชี้ว่าเวลากระบวนการไพโรไลซิสที่ยาวนานขึ้นช่วยให้ การสลายตัวขององค์ประกอบระเหยเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนสูงขึ้น [12] การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนนี้จึงสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัว และการลดลงของออกซิเจนภายในเนื้อถ่าน ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผ่านการไพโรไลซิสในอุณหภูมิสูง ซึ่งมีโครงสร้างที่เสถียรและมีพลังงานสะสมสูง [3]



ภาพที่ 3 ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อคุณสมบัติค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ

การสมดุลมวลในกระบวนการไพโรไลซิส

การสมดุลมวลในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าการไพโรไลซิสอุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 1 h เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 2 h ร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพลดลง จากจาก 42.06% เป็น 36.72% ซึ่งลดลง 12.7% ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิ 400 °C เป็น 500 °C ที่ระยะเวลา 1 h ร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพลดลง 42.06% เป็น 31.43% ซึ่งลดลง 25.3% และที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อเพิ่มระยะเวลาจาก 1 h เป็น 2 h ร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพลดลงเล็กน้อยจาก 31.43% เป็น 30.11% ซึ่งลดลง 4.2% จากผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับหลักการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงและเวลานาน จะส่งผลต่อ การแตกตัวขององค์ประกอบอินทรีย์เป็นก๊าซและของเหลวทำให้ผลผลิตถ่านลดลง [3-4] ในด้านปริมาณก๊าซของค์ประกอบสารระเหยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสโดยปริมาณก๊าซเพิ่มจาก 57.94% ที่อุณหภูมิ 400 °C ระยะเวลา 1 h เป็น 68.57% 500 °C ระยะเวลา 1 h และสูงสุด 69.89% ที่ 500 °C ระยะเวลา 2 h ดังภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการให้พลังงานความร้อนมากขึ้นเร่งการสลายตัวเป็นสารระเหยหรือก๊าซ [16] ผลการสมดุลมวลข้างต้นสอดคล้องกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อน การไพโรไลซิสอุณหภูมิสูงขึ้นแม้จะให้ร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพลดลง แต่คุณภาพของถ่านชีวภาพดีขึ้นเนื่องจากการสูญเสียองค์ประกอบระเหยส่งผลให้ได้คาร์บอนคงตัวมีความเสียร [3, 5]



ภาพที่ 4 การสมดุลมวลในกระบวนการไพโรไลซิส

ประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 h มีค่าพลังงานเชิงความร้อนสูงสุด โดยมีค่าพลังงานวัตถุดิบตั้งต้นเท่ากับ 4.40 MJ และพลังงานถ่านชีวภาพเท่ากับ 3.57 MJ ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนสูงถึง 81.05% จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสอุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้นมีประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนสูงเนื่องจากได้ปริมาณถ่านชีวภาพที่ยังมีมวลสูง เมื่อเพิ่มระยะเวลาไพโรไลซิสที่ 400 °C เป็น 2 h พบว่าประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนลดลงเป็น 74.75% เนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยเพิ่มขึ้นทำให้พลังงานที่เหลือมวลถ่านชีวภาพลดลง ในกรณีของอุณหภูมิ 500 °C ค่าพลังงานวัตถุดิบตั้งต้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจาก 4.47 MJ ที่ 1 h เหลือ 4.32 MJ ที่ 2 h และค่าพลังงานถ่านชีวภาพก็ลดลงจาก 2.81 MJ เหลือ 2.78 MJ ส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 62.83–64.20% อย่างไรก็ตามการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C อาจเหมาะสมกว่าในกรณีที่ต้องการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อการกักเก็บคาร์บอนหรือการปรับปรุงคุณสมบัติดิน เนื่องจากได้ถ่านชีวภาพที่มีคาร์บอนคงตัวสูงและมีความเสถียรต่อการย่อยสลายในธรรมชาติ [3, 5]

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนของถ่านชีวภาพ

เงื่อนไข	E _{raw} (MJ)	E _{Biochar} (MJ)	η_{th} (%)
ไพโรไลซิส 400 °C 1 h	4.40	3.57	81.05
ไพโรไลซิส 400 °C 2 h	4.77	3.57	74.75
ไพโรไลซิส 500 °C 1 h	4.47	2.81	62.83
ไพโรไลซิส 500 °C 2 h	4.32	2.78	64.20

สรุปผลการวิจัย

อุณหภูมิและระยะเวลาในการไพโรไลซิสมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมี ค่าความร้อน และประสิทธิภาพพลังงานของถ่านชีวภาพไม่ไผ่ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ปริมาณสารระเหยลดลง ขณะที่คาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนเพิ่มขึ้น แสดงถึงความเสถียรของคาร์บอนที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามร้อยละผลผลิตถ่านชีวภาพและประสิทธิภาพพลังงานเชิงความร้อนลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เงื่อนไขที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ 400 °C เป็นเวลา 1 h ส่วนอุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 h ให้ถ่านที่มีคาร์บอนคงตัวสูงสุด (51.19%) ถ่านชีวภาพไม่ไผ่จึงเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการส่งเสริมความเป็นกลางทางคาร์บอนโดยการนำไปใช้กักเก็บคาร์บอนในระยะยาว และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระบบเกษตรกรรม อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับ นโยบาย Net Zero Emission 2050 ของประเทศไทยและระดับนานาชาติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย และห้องปฏิบัติการพลังงานสะอาดและเกษตรอัจฉริยะ (Clean Energy & Smart Agricultural Laboratory) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] IPCC. (2023). **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [2] Lal, R. (2020). Soil carbon sequestration and climate change. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(1), 1–9.
- [3] Lehmann, J. and Joseph, S. (2015). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation (2nd ed.)**. Routledge.

- [4] Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J. and Cao, X. (2021). Production and characterization of bamboo biochar for carbon sequestration and soil improvement. **Renewable Energy**, 171, 839–848.
- [5] Zhao, L., Cao, X., Mašek, O. and Zimmerman, A. (2022). Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Bioresource Technology**, 344, 126234.
- [6] Keiluweit, M., Nico, P. S., Johnson, M. G. and Kleber, M. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental Science & Technology**, 44(4), 1247–1253.
- [7] คณิต มานะธุระ และอุกฤษฏ์ สัมครสมาน (2565). สมรรถนะของเตาไพโรไลซิสกะลามะพร้าวชนิดให้ความร้อนด้วยตนเอง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 11(2), 13-21.
- [8] ASTM International. (2013). ASTM D3172–13, D3173–11, D3174–12, and D3175–11: Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [9] ASTM International. (2019). Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. DOI: 10.1520/D5865_D5865M-19.
- [10] Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A. R. and Chen, H. (2019). Biochar-supported metal nanoparticles for environmental remediation: A review. **Chemical Engineering Journal**, 372, 624–640.
- [11] Chen, W., Meng, J., Han, X. and Lan, Y. (2021). Influence of pyrolysis temperature on bamboo biochar and its application for carbon sequestration. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 159, 105299.
- [12] Liu, Z., Zhang, F. S. and Wu, J. (2018). Characteristics and carbon sequestration potential of biochar from bamboo. **Biomass and Bioenergy**, 108, 479–485.
- [13] Kwon, E. E., Yi, H. and Jeon, Y. J. (2020). Effects of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar derived from biomass. **Bioresource Technology**, 295, 122253.
- [14] Zhang, X., Wang, H., He, L., Lu, K., Sarmah, A., Li, J. and Bolan, N. S. (2019). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. **Environmental Science and Pollution Research**, 26(7), 6960–6975.
- [15] Zhou, Y., Jin, Y., Liu, H. and Wang, Y. (2022). Influence of pyrolysis temperature on bamboo biochar properties and its potential application as a solid biofuel. **Renewable Energy**, 183, 1225–1234.
- [16] Zhang, Q., Xu, J. and Chen, J. (2022). Thermal stability and fixed carbon characteristics of bamboo-derived biochar at various pyrolysis conditions. **Renewable Energy**, 193, 276–285.

การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ครั้งที่ 18 (TREC-18)

หัวข้อบทความ :

นวัตกรรมการจัดการเมืองอัจฉริยะสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนเพาะเห็ดหอม หมู่บ้านปางมะโอ ตำบล
วังเงิน อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

The Application of IoT Technology for Smart Farm Control in a Shiitake Mushroom Greenhouse at Pangmao Village, Wang Ngoen Subdistrict, Mae Tha District, Lampang Province

อดิสร ธมยา¹, นิวัต กิจไพศาลสกุล^{2*}, สมพร ตีบขัต³, ดอนสัน ปงผาบ⁴, ภูวสิษฐ์ ตุ่นแก้ว⁵, วศินวีโรตม์ เนติศักดิ์⁶
และ สกอล จิโนสวัสดิ์⁷

Adisorn Thomya¹, Niwat Kitphaisansakul^{2*}, Somporn Tipkad³, Donson Pongphab⁴, Phuwasit Tunkeaw⁵,
Wasiviro Netisak⁶ and Skol Jinoswat⁷

^{1,2,4,5,6,7}สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

³สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

^{1,2,4,5,6,7}Production Engineering, Faculty of Industrial Technology,

Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

³Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology,

Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

*Corresponding author: Tel.: 081-8832511 E-mail address: niwat_lp@glpru.ac.th

Abstract

Ban Pang Mao, Village No. 8, Wang Ngoen Subdistrict, Mae Tha District, Lampang Province, has a climate suitable for cultivating shiitake mushrooms, which has become a primary source of income for the community for over ten years. However, mushroom cultivation still faces significant challenges, including green mold disease, which reduces yield and requires contaminated mushroom bags to be discarded; pests that eat and destroy the mushroom mycelium; and unsuitable environmental conditions such as high temperatures or improper humidity, all of which negatively impact production. This research aimed to address these issues by developing a system to control temperature and humidity in mushroom houses via a website and mobile app. The system uses the Internet of Things (IoT) and a NodeMCU board, along with the Blynk application, to improve environmental management. The experiment was conducted in two parts: first, measuring temperature and humidity with an SHT21 sensor, collecting data every hour for two days, and comparing the values between a smart farm greenhouse and a conventional one, and second, testing remote control via the Blynk app to automate the system and test remote operation. The results showed that the smart farm system controls temperature and humidity more effectively and accurately than traditional manual watering. It had an error rate below 10% and increased mushroom yield by up to 10%. On days 1 and 2, the conventional greenhouse's temperature reached a maximum of 37°C, which is unsuitable for shiitake mushroom growth. In contrast, the automated system effectively managed both temperature and humidity, maintaining an internal temperature up to 7°C lower than the outside temperature and keeping humidity at a level suitable for mushroom growth. This research clearly

demonstrates that the automated system is more precise and effective, providing a straightforward solution to enhance mushroom cultivation efficiency.

Keywords: Temperature and humidity control, Automation system, Smart greenhouse, Shiitake mushroom.

บทคัดย่อ

บ้านปางมะโอ หมู่ที่ 8 ตำบลวังเงิน อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง สภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมได้นำมาซึ่งการเพาะปลูกเห็ดหอม ซึ่งกลายเป็นอาชีพสร้างรายได้หลักให้กับชุมชนมานานกว่าสิบปี การเพาะเห็ดหอมยังคงเผชิญกับปัญหาหลายอย่าง เช่น โรคราเขียวที่ทำให้ผลผลิตลดลงและต้องกำจัดทิ้งเพื่อป้องกันการระบาด, แมลงศัตรูเห็ดที่กัดกินทำลายเส้นใย, และสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิที่สูงเกินไปหรือความชื้นที่ไม่พอเหมาะ ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อผลผลิตทั้งสิ้น การเพาะเห็ดหอมยังคงเผชิญกับปัญหาหลายอย่าง เช่น โรคราเขียวที่ทำให้ผลผลิตลดลงและต้องกำจัดทิ้งเพื่อป้องกันการระบาด, แมลงศัตรูเห็ดที่กัดกินทำลายเส้นใย, และสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิที่สูงเกินไปหรือความชื้นที่ไม่พอเหมาะ ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อผลผลิตทั้งสิ้น การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ดผ่านเว็บไซต์และมือถือ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และ NodeMCU ร่วมกับแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสภาพแวดล้อมของโรงเรือนเพาะเห็ดให้เหมาะสมมากขึ้น การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. การตรวจวัด อุณหภูมิและความชื้นผ่านเซ็นเซอร์ SHT21 โดยเก็บข้อมูลทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วัน และเปรียบเทียบค่าระหว่างโรงเรือนสมาร์ทฟาร์มกับโรงเรือนแบบปกติ 2. การควบคุมระยะไกล ผ่านแอป Blynk เพื่อเปิด-ปิดระบบอัตโนมัติ และทดสอบการควบคุมการทำงานของโรงเรือนจากระยะไกล ผลการทดลองพบว่า ระบบสมาร์ทฟาร์มสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำกว่าการรดน้ำแบบปกติ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% และช่วยเพิ่มผลผลิตเห็ดได้มากขึ้นถึง 10% โดยอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 1 และ 2 คือ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งโรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือนั้นไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้พอเหมาะต่อการเติบโตของเห็ดหอมได้ แต่โรงเรือนระบบอัตโนมัติ สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ดีกว่า ซึ่งสามารถอุณหภูมิภายในเมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกได้ถึง 7 องศาเซลเซียส และความชื้นยังอยู่ในระดับที่เห็ดสามารถเติบโตได้ดีซึ่งแสดงให้เห็นงานวิจัยนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะเห็ดได้อย่างชัดเจน โรงเรือนระบบอัตโนมัติมีความแม่นยำและควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า

คำสำคัญ : การควบคุมอุณหภูมิและความชื้น, ระบบอัตโนมัติ, โรงเรือนอัจฉริยะ, เห็ดหอม

บทนำ

บ้านปางมะโอ หมู่ที่ 8 ตำบลวังเงิน อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง สภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมได้นำมาซึ่งการเพาะปลูกเห็ดหอม ซึ่งกลายเป็นอาชีพสร้างรายได้หลักให้กับชุมชนมานานกว่าสิบปี โดยเริ่มต้นจากการได้รับความช่วยเหลือและองค์ความรู้จากศูนย์การศึกษานอกโรงเรียนในภาคเหนือและจังหวัดลำปาง รวมถึงศูนย์บริการการศึกษานอกโรงเรียนอำเภอแม่ทะ ที่เข้ามาช่วยให้ชาวบ้านลดต้นทุนการผลิตได้ ปัจจุบัน เห็ดหอมจากหมู่บ้านนี้ถูกจำหน่ายในราคากิโลกรัมละ 150-200 บาท โดยมีพ่อค้าเข้ามารับซื้อถึงในหมู่บ้านและนำไปขายต่อในจังหวัดลำปางและจังหวัดใกล้เคียง เนื่องจากราคาที่สูงกว่าเห็ดทั่วไป ทำให้ตอนนี้มีถึง 80% ของ 100 ครัวเรือนในหมู่บ้านหันมาประกอบอาชีพนี้ แต่ละครัวเรือนมีโรงเรือนเพาะเห็ด 2-5 แห่ง โดยมีผลผลิตเฉลี่ย 3-5 กิโลกรัมต่อวันต่อครัวเรือน รวมผลผลิตทั้งหมู่บ้านอยู่ที่ 240-400 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งผลผลิตจะมากที่สุดในช่วงฤดูหนาว (ตุลาคมถึงกุมภาพันธ์) และน้อยที่สุดในช่วงฤดูร้อน (เมษายนถึงมิถุนายน) ในขณะที่ฤดูฝนจะมีผลผลิตปานกลาง อย่างไรก็ตาม การเพาะเห็ดหอมยังคงเผชิญกับปัญหาหลายอย่าง เช่น โรคราเขียวที่ทำให้ผลผลิตลดลงและต้องกำจัดทิ้งเพื่อป้องกันการระบาด, แมลงศัตรูเห็ดที่กัดกินทำลายเส้นใย, และสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิที่สูง

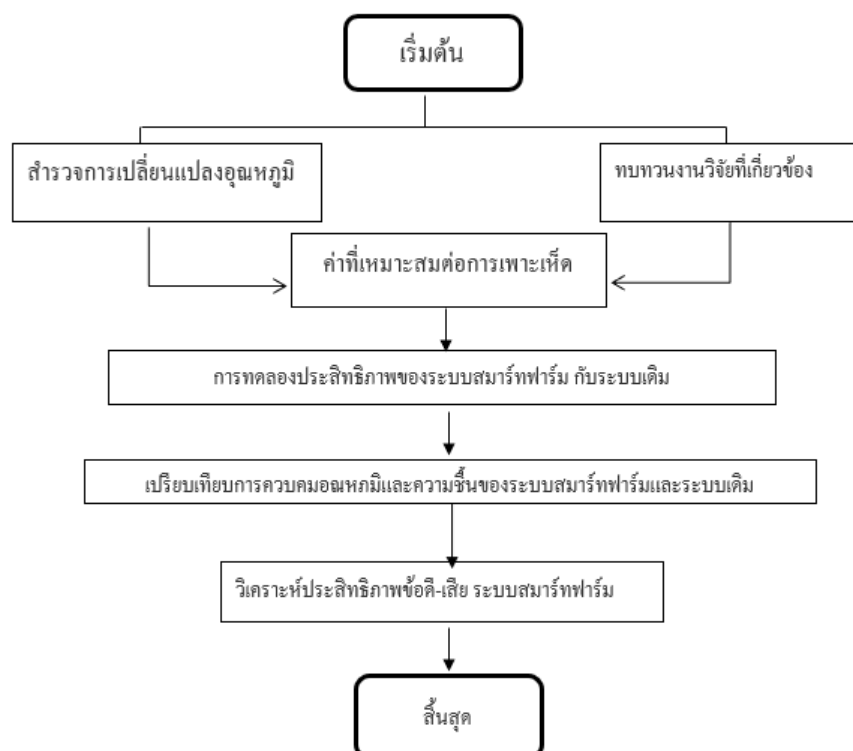
เกินไปหรือความชื้นที่ไม่พอเหมาะ ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อผลผลิตทั้งสิ้น ด้วยแนวโน้มที่จำนวนโรงเรือนเพาะเห็ดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยปีละ 2-5 โรงเรือน และความจำเป็นในการควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านี้อย่างแม่นยำ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มุ่งหวังจะนำเทคโนโลยี สมาร์ทฟาร์ม เข้ามาช่วยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ดหอมหมู่บ้านปางมะโอ เพื่ออำนวยความสะดวกและเพิ่มความแม่นยำในการผลิต พร้อมทั้งส่งเสริมให้เป็นแหล่งเรียนรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะให้กับเกษตรกรรุ่นใหม่ต่อไป [1], [3], [2], [5], [7]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมการเพาะเห็ดหอมประยุกต์ใช้งาน IoT Platform
- เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ควบคุมระบบภายในโรงเรือนเพาะเห็ดหอม

วิธีการวิจัย

การทำงานของระบบโรงเรือนอัตโนมัติจะควบคุมและคำนวณโดย ESP8266 ซึ่งต่างจากแบบธรรมดาหรือการรดน้ำด้วยมือ คือสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ผ่าน Blynk ซึ่งการรดน้ำด้วยมืออาจจะเสียเวลาและใช้แรงงานที่มากกว่า อีกทั้งยังไม่มีความแน่นอนในด้านอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งระบบโรงเรือนอัตโนมัติจะแสดงอุณหภูมิและความชื้น จะกำหนดความชื้นที่เหมาะสมกับการออกดอกของเห็ดหอมที่ ไม่ต่ำกว่า 80% แบบตลอดเวลาและมีความแน่นอน[5], [6], [8]



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงาน

ทำการคลิกไปที่ไอคอนของแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ตโฟน จะปรากฏหน้าจอภายในแอปพลิเคชันขึ้นมา โดยจะแสดงหน้าบันทึกความชื้นและอุณหภูมิ และมีอีกหน้าที่สามารถสั่งการปิด เปิด บั้ม พัดลม และเลือกอุณหภูมิความชื้น และเลือกโหมดการทำงาน ผ่านในแอปพลิเคชัน Blynk [4],[6]



รูปที่ 2 การต่อESP8266 เข้ากับเซ็นเซอร์ SHT21



รูปที่ 3 โรงเพาะเห็ดหอมที่พัฒนาขึ้น

วิธีการเก็บข้อมูลวิจัยและการหาประสิทธิภาพของระบบ[9]

1. เปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้น ของโรงเรือนเปรียบเทียบกับระหว่างโรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือ กับโรงเรือนระบบอัตโนมัติ
2. เปรียบเทียบการเกิดดอกของเห็ดหอมระหว่างโรงเรือนระบบอัตโนมัติ กับโรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือ
3. เปรียบเทียบน้ำหนักของผลผลิตระหว่างตรงเรือนระบบอัตโนมัติ และโรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือ

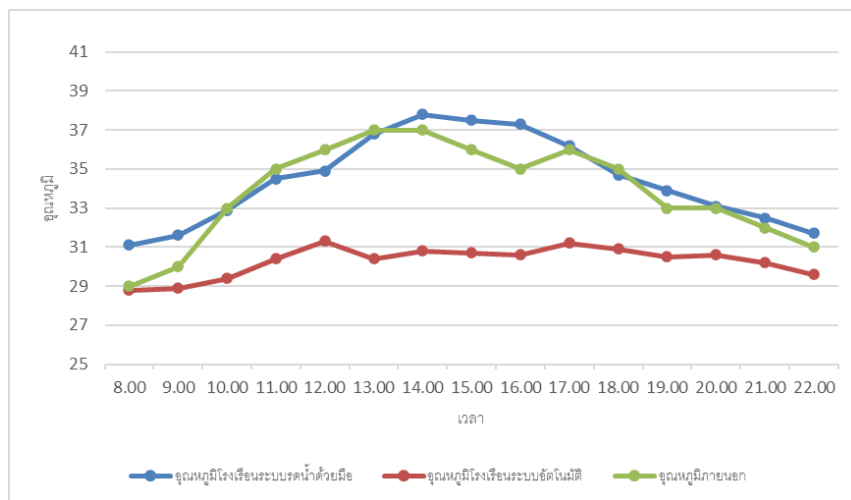


รูปที่ 4 การแสดงผลผ่านระบบ blynk [10]

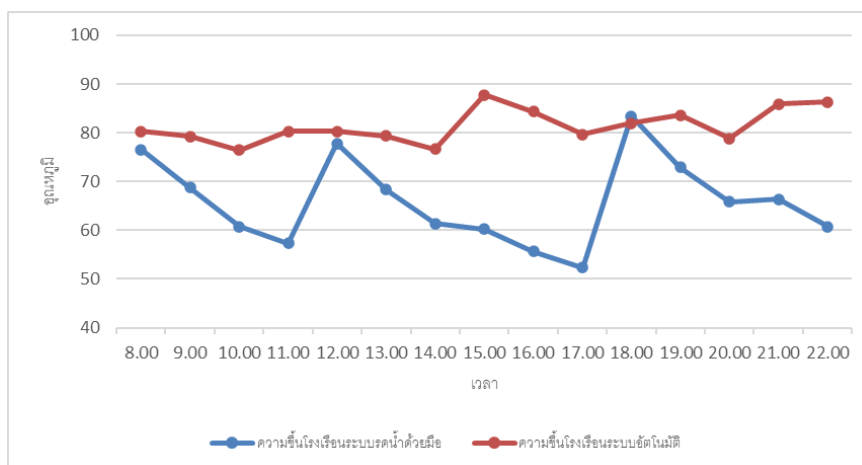
การแสดงค่าการใช้พลังงานโดยผ่านเครือข่ายระบบอินเทอร์เน็ตแสดงค่าไปยังแอปพลิเคชันซึ่งเป็นการแสดงค่าทางความชื้นและอุณหภูมิแสดงเป็นตัวเลข แอปพลิเคชันเป็นความสะดวกสบายไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนก็สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนได้ว่าในเวลาปัจจุบันมีอุณหภูมิและความชื้นเท่าไร และสามารถตั้งค่าระบบให้ทำงานได้โดยอัตโนมัติซึ่งเซตค่าได้ตามที่ต้องการ แอปพลิเคชันยังสามารถนำค่าที่บันทึกมาออกเป็นไฟล์ Excel เพื่อดูประวัติย้อนหลัง แอปพลิเคชันยังเป็นการประยุกต์อุปกรณ์ต่างเพื่อกับระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อรับรู้สถานการณ์ใช้งานอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การทำงานของระบบโรงเรือนอัตโนมัติจะควบคุมและคำนวณโดย ESP8266 ซึ่งต่างจากแบบธรรมดาหรือการรดน้ำด้วยมือ คือสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ผ่าน Blynk ซึ่งการรดน้ำด้วยมืออาจจะเสียเวลาและใช้แรงงานที่มากกว่า อีกทั้งยังไม่มีความแน่นอนในด้านอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งระบบโรงเรือนอัตโนมัติจะแสดงอุณหภูมิและความชื้นแบบตลอดเวลา และมีความแน่นอน



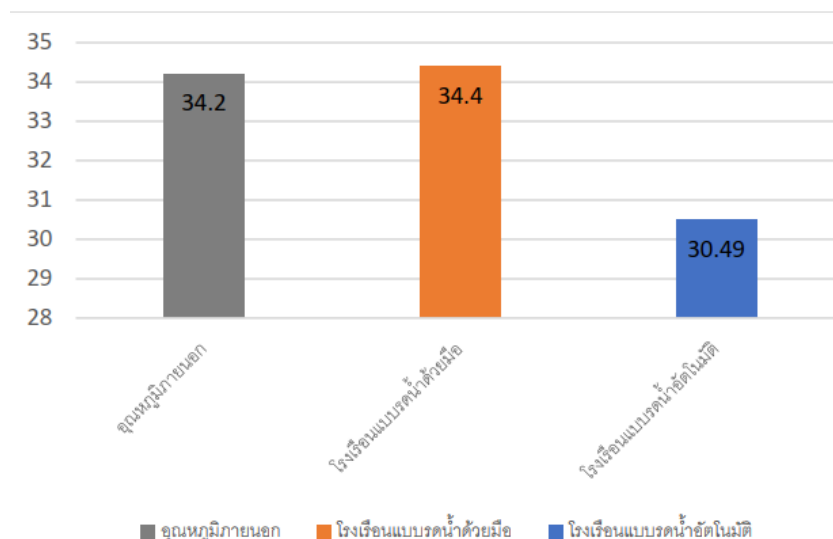
รูปที่ 5 แสดงความชื้นเปรียบเทียบระหว่างโรงเรือนรดน้ำด้วยมือกับโรงเรือนระบบอัตโนมัติ



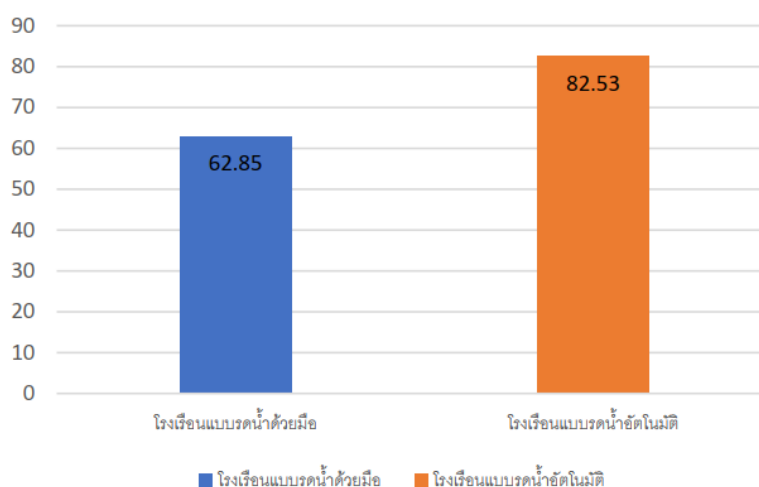
รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างโรงเรือนรดน้ำด้วยมือกับโรงเรือนระบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิความชื้นระหว่างโรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือและโรงเรือนระบบอัตโนมัติ

โรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือ		โรงเรือนระบบอัตโนมัติ		อุณหภูมิภายนอก C
อุณหภูมิ C	ความชื้น %	อุณหภูมิ C	ความชื้น %	
34.4	62.85	30.49	82.53	34.2



รูปที่ 7 ความแตกต่างของอุณหภูมิของโรงเรือนทั้งสองระบบ



รูปที่ 8 ความแตกต่างของความชื้นของโรงเรือนทั้งสองระบบ

จากภาพที่ 7 – 8 แสดงให้เห็นความแตกต่างของความชื้นของโรงเรือนทั้งสองระบบ ซึ่งมีความแตกต่างกันโดยเฉลี่ยถึงร้อยละ 19.68

จากการเก็บข้อมูลเปรียบเทียบทั้งสองวันทำให้ทราบว่าโรงเรือนระบบอัตโนมัติมีความแม่นยำและควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า โดยอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 1 และ 2 คือ 37 องศา ซึ่งโรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือนั้นไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้พอเหมาะต่อการเติบโตของเห็ดหอมได้ แต่โรงเรือนระบบอัตโนมัติ สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ดีกว่า ซึ่งสามารถอุณหภูมิภายในเมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกได้ถึง 7 องศา และความชื้นยังอยู่ในระดับที่เห็ดหอมสามารถเติบโตได้ดี

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ดผ่านเว็บไซต์และมือถือ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และ NodeMCU ร่วมกับแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสภาพแวดล้อมของโรงเรือนเพาะเห็ดให้เหมาะสมมากขึ้น การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. การตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นผ่านเซ็นเซอร์ SHT21 โดยเก็บข้อมูลทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วัน และเปรียบเทียบค่าระหว่างโรงเรือนสามารถฟาร์มกับโรงเรือนแบบปกติ 2. การควบคุมระยะไกล ผ่านแอป Blynk เพื่อเปิด-ปิดระบบอัตโนมัติ และทดสอบการควบคุมการทำงานของโรงเรือนจากระยะไกล ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถฟาร์มสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำกว่าการรดน้ำแบบปกติ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% และช่วยเพิ่มผลผลิตเห็ดได้มากขึ้นถึง 10% โดยอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 1 และ 2 คือ 37 องศา ซึ่งโรงเรือนแบบรดน้ำด้วยมือนั้นไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้พอเหมาะต่อการเติบโตของเห็ดหอมได้ แต่โรงเรือนระบบอัตโนมัติ สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ดีกว่า ซึ่งสามารถอุณหภูมิภายในเมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกได้ถึง 7 องศา และความชื้นยังอยู่ในระดับที่เห็ดสามารถเติบโตได้ดีซึ่งแสดงให้เห็นงานวิจัยนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะเห็ดได้อย่างชัดเจน โรงเรือนระบบอัตโนมัติมีความแม่นยำและควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมจัดสรรงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมปีงบประมาณ 2567 ที่ให้เงินสนับสนุนในงานวิจัยนี้จนเป็นผลสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Maheswari, R., Ashok, K. R., & Prahadeeswaran, M. (2008). Precision farming technology, adoption decisions, and productivity of vegetables in resource-poor environments. *Agricultural Economics Research Review*, 21, 415–424.
- [2] PShashwathi, N., Priyam, B., & Suhas, K. (2012). Smart farming: A step towards techno-savvy agriculture. *International Journal of Computer Applications*, 57(18), 45–48.
- [3] กรรณิกา วงศ์พิมพ์. (2559). จุดเริ่มต้นของภาษา C. สืบค้นเมื่อ 17 สิงหาคม 2563, จาก <http://nun.anc.ac.th/prawati-khxng-phas-a-si>
- [4] เจษฎา ขจรฤทธิ์, ปิยนุช ชัยพรแก้ว, & หนึ่งฤทัย เอ็งฉ้วน. (2560). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things ในการควบคุมระบบส่องสว่างสำหรับบ้านอัจฉริยะ. วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- [5] จีรเกียรติ์ เกิดเจริญ. (2550). ฟาร์มอัจฉริยะ ตอนที่ 1. วารสารอพเทค, 22(241), 93–96.
- [6] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2560). Internet of Things. เข้าถึงได้จาก <http://oho.ipst.ac.th/internet-of-things>
- [7] NECTEC. (2559). IoT Education Kit: ชุดเรียนรู้และพัฒนาอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) ด้วย NodeMCU. คู่มือการใช้งาน NETPIE. <https://www.nectec.or.th/innovation/innovation-software/netpie.html>
- [8] สำนักงานรัฐบาลอิเล็กทรอนิกส์. (2560). Internet of Things. เข้าถึงได้จาก <https://www.ega.or.th/th/content/890/882>
- [9] fodgeasy. (2568, 15 กันยายน). fodgeasy. สืบค้นจาก <https://fodgeasy.com/>

การปรับปรุงสมบัติของโพลียูรีเทนด้วยขานอ้อยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์แทนยิปซัม Development of Polyurethane for Ceiling Applications

พัชรี อินธนู^{1*} และ ชนัดดา จันดาหาญ¹

Patcharee Intanoo^{1*} and Chanutda Chandahan¹

¹ สาขาวิศวกรรมเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

¹Industrial Chemistry Innovation, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai 50290

* Corresponding author: Tel.: E-mail address: patchareeintanoo@gmail.com

Abstract

This study aimed to enhance the mechanical properties and flame-retardant performance of polyurethane (PU) using bagasse, a byproduct of the sugar production process, as a sustainable alternative to gypsum. The effects of bagasse content ranging from 5 %, 7 %, 10 %, to 20 % by weight were investigated. The mechanical properties, including water absorption and flammability, were evaluated in accordance with ASTM D570-98 and UL 94, respectively. The results indicated that PU exhibited negligible water absorption over time, thereby demonstrating superior stability and durability compared to gypsum boards, whose strength decreased with increased moisture uptake. Furthermore, the addition of bagasse improved both the mechanical property and flame-retardant capability of PU, with the highest flame resistance observed at 20 % by weight of bagasse. When the bagasse was converted to carbon and incorporated into PU at the same loading (20 % by weight), the flame-retardant performance was further improved, resulting in a self-extinguishing behavior within 30 seconds without dripping. Substituting gypsum with PU not only addresses the short lifespan and low strength of gypsum boards but also reduces environmental impacts, particularly the global warming potential (GWP), by 20.46%. Specifically, the production of a single gypsum board (1.20 × 2.40 × 0.012 m, 30.24 kg) generates approximately 6.0480 kg CO₂eq. Incorporating bagasse and bagasse-derived carbon into PU at the exact proportions of 20 wt.% enhanced the mechanical property and further reduced GWP by 15.50 % and 18.84 %, respectively, compared to neat PU. These findings demonstrate that modifying PU with bagasse offers a viable pathway to repurpose agricultural residues, contributing to the development of environmentally friendly materials aligned with the principles of the circular economy and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), while adding value to agricultural waste streams.

Keywords: Polyurethane, bagasse, mechanical property, flame-retardant performance

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมบัติเชิงกลและสมบัติการลามไฟของโพลียูรีเทนด้วยขานอ้อยที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานแทนยิปซัม ในการพัฒนาสมบัติเชิงกลและสมบัติการลามไฟของโพลียูรีเทนด้วยขานอ้อยเป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 5 7 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำและการลามไฟตามวิธีมาตรฐาน ASTM D570-98 และ UL 94 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าโพลียูรีเทนไม่แสดงความสามารถในการดูดซึมน้ำตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โพลียูรีเทนมีความเสถียรและมีอายุการใช้งานนานเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นยิปซัมที่มีความแข็งแรงลดลงตามปริมาณน้ำหรือความชื้นที่ดูดซึม มากไปกว่านั้นโพลียูรีเทนจะมีความแข็งแรงขึ้นและมีความสามารถในการต้านทานการลามไฟได้ดีขึ้นเมื่อปริมาณขานอ้อยเพิ่มขึ้นโดย

ความสามารถต้านทานการลามไฟที่ดีที่สุดพบที่ปริมาณขานอ้อยสูงสุดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อีกทั้งเมื่อนำขานอ้อยเปลี่ยนเป็นคาร์บอนและนำไปผสมกับโพลียูรีเทนในอัตราส่วนที่เท่ากันคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้โพลียูรีเทนมีความสามารถต้านทานการลามไฟได้ดีขึ้นไปอีกในลักษณะการลุกไหม้ที่ไม่เกิดการลุกลามต่อและสามารถหยุดไหม้ได้เองภายใน 30 วินาที โดยไม่มีไฟหยด ดังนั้นการนำโพลียูรีเทนมาใช้ประโยชน์แทนยิปซัมนอกจากจะช่วยลดการใช้ยิปซัมที่มีอายุการใช้งานสั้นและความแข็งแรงต่ำแล้วยังทำให้มีส่วนร่วมในการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งภาวะโลกร้อนคิดเป็นร้อยละ 20.46 (ซึ่งการใช้ยิปซัม 1 แผ่นขนาด $1.20 \times 2.40 \times 0.012$ เมตร น้ำหนัก 30.24 กิโลกรัม ก่อให้เกิดการแก๊สเรือนกระจกในปริมาณ 6.0480 kgCO₂eq) และการนำโพลียูรีเทนที่มีขานอ้อยและคาร์บอนจากขานอ้อยในปริมาณที่เท่ากันจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โพลียูรีเทนรวมถึงยังลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อนลงคิดเป็นร้อยละ 15.50 และ 18.84 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โพลียูรีเทนเพียงอย่างเดียว จากงานวิจัยนี้ทำให้เห็นว่าการนำขานอ้อยมาปรับปรุงสมบัติโพลียูรีเทนเพื่อนำไปใช้งานแทนยิปซัมจัดเป็นแนวทางการลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร อีกทั้งยังเป็นการสร้างโอกาสในการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals-SDGs) ที่สามารถสร้างมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

คำสำคัญ : โพลียูรีเทน ขานอ้อย สมบัติเชิงกล สมบัติการลามไฟ

การระบุตำแหน่งและขนาดสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะของเทศบาลนครอุดรธานี
โดยอ้างอิงจากการพยากรณ์ความต้องการ
Location and Sizing of Public Electric Vehicle Charging Stations of Udon Thani
Municipality based on Demand Forecasting

สุนทร สุทธิบาท¹ ชญานนท์ แสงมณี² อธิกา จันทนปุม³ กมลรัตน์ ดีสภา⁴ บรรณญัตติ บริบูรณ์⁵ และ สรวิศา แสงศาลา^{6*}

^{1,2,3,4} สาขาวิชาเครื่องกล คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อุดรธานี 41000

⁵ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและยานยนต์ไฟฟ้าวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อุดรธานี 41000

⁶ แผนกช่างไฟฟ้ากำลังและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพิชญพัฒน์ อุดรธานี 41240

^{1,2,3,4} Department of Mechanical, Faculty of Technology and Engineering,
Udon Thani Rajabhat University, Udon Thani, 41000

⁵ Department of Smart Electronics and Electric Vehicles,
Udon Thani Rajabhat University, Udon Thani, 41000

⁶ Department of Electronics and Electrical Power,
Pitchayapit Technological College, Udon Thani, 41000

Corresponding author: Tel.: 0885366069 E-mail address: sangsala91@gmail.com

Abstract

The rapid growth of electric vehicles (EVs) in Udon Thani Municipality presents a challenge for developing adequate public charging infrastructure. This research presents a model to identify optimal station locations and sizes by integrating demand forecasting with spatial analysis. Simulation results pinpoint the necessity for 5 strategic stations, focusing on 2 major commercial areas, 1 government complex, and 1 large recreational park. The model also recommends a DC Fast Charging station on the outer ring road to serve transient traffic. The research concludes that a hybrid strategy, which matches charger types (AC/DC) to the land-use characteristics of each location, is the most effective approach. Furthermore, this model can serve as a template for other regional cities in planning their EV infrastructure.

Keywords: Electric vehicle charging station, charging demand forecasting, sizing and location of charging station

บทคัดย่อ

การเติบโตอย่างรวดเร็วของยานยนต์ไฟฟ้าในเทศบาลนครอุดรธานี สร้างความท้าทายในการพัฒนาสถานีอัดประจุสาธารณะให้เพียงพอ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองเพื่อระบุตำแหน่งและขนาดสถานที่ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ข้อมูลการพยากรณ์ความต้องการพลังงานอัดประจุร่วมกับการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ ผลการจำลองชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการติดตั้งสถานี 5 แห่งในตำแหน่งยุทธศาสตร์ โดยเน้นพื้นที่พาณิชยกรรมหนาแน่น 2 แห่ง ศูนย์ราชการ 1 แห่ง และพื้นที่สันทนาการขนาดใหญ่ 1 แห่ง พร้อมเสนอแนะให้ติดตั้งสถานีอัดประจุแบบเร็วบริเวณถนนวงแหวนรอบนอกเพื่อรองรับการเดินทางข้ามเมือง จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า แนวทางการวางแผนแบบผสมผสานที่พิจารณาประเภทหัวอัดประจุตามลักษณะการ

ใช้งานของพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และโมเดลนี้สามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับเมืองรองอื่นๆ ในการวางแผนโครงสร้างพื้นฐานยานยนต์ไฟฟ้าได้

คำสำคัญ: สถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า การพยากรณ์ความต้องการอัดประจุ การระบุขนาดและตำแหน่งสถานีอัดประจุ

บทนำ

กระแสแห่งการเปลี่ยนผ่านสู่ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยกำลังเติบโตอย่างก้าวกระโดด สะท้อนให้เห็นถึงความตื่นตัวด้านพลังงานสะอาดและเทคโนโลยีแห่งอนาคต (สมาคมยานยนต์ไฟฟ้าไทย, 2568) นโยบายสนับสนุนจากภาครัฐ โดยเฉพาะเป้าหมาย 30@30 ที่มุ่งผลิตรถยนต์ไร้มลพิษให้ได้ร้อยละ 30 ของการผลิตทั้งหมดภายในปี พ.ศ. 2573 (คณะกรรมการนโยบายยานยนต์ไฟฟ้าแห่งชาติ, 2564) ได้กลายเป็นแรงขับเคลื่อนสำคัญที่ทำให้จำนวนรถยนต์ไฟฟ้าบนท้องถนนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการเติบโตนี้ได้สร้างความท้าทายที่สำคัญยิ่งต่อโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ นั่นคือการพัฒนาเครือข่ายสถานีอัดประจุไฟฟ้าสาธารณะให้เพียงพอและครอบคลุม เพื่อขจัดความกังวลด้านระยะทาง และสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค

จังหวัดอุดรธานีที่เป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจ การคมนาคม และการบริการของภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน (สำนักงานจังหวัดอุดรธานี, 2565) ดังนั้นเทศบาลนครอุดรธานีจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ การเพิ่มขึ้นของประชากรและจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่จำเป็นต้องได้รับการสนับสนุนจากโครงสร้างพื้นฐานที่วางแผนมาอย่างดี การติดตั้งสถานีอัดประจุที่ไม่มีการวิเคราะห์เชิงลึก อาจนำไปสู่การกระจุกตัวของสถานีในบางพื้นที่ ในขณะที่อีกหลายพื้นที่ที่ยังขาดแคลน ส่งผลให้การลงทุนไม่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการที่แท้จริงของผู้ใช้งานได้

บทความนี้จึงนำเสนอแนวทางการระบุตำแหน่งและขนาดของสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะสำหรับเทศบาลนครอุดรธานีอย่างเป็นระบบ โดยอาศัยการพยากรณ์ความต้องการในอนาคต ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงพื้นที่เพื่อค้นหาตำแหน่งทางยุทธศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด แบบจำลองที่นำเสนอใช้เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่ควรลงทุนติดตั้งสถานีอัดประจุและประเมินขนาดหรือจำนวนหัวอัดประจุที่เหมาะสมในแต่ละตำแหน่ง โดยมีเป้าหมายสูงสุดเพื่อสร้างพิมพ์เขียวสำหรับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านยานยนต์ไฟฟ้าที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ รองรับการเติบโตของเมืองอัจฉริยะและส่งเสริมคุณภาพชีวิตที่ดีให้กับประชาชนในอนาคตอย่างยั่งยืน

วิธีการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

งานวิจัยของบทความนี้จัดทำขึ้นโดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณซึ่งมีลักษณะเป็นการวิจัยเชิงจำลองที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ และแบบจำลองการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นเครื่องมือหลักในการดำเนินงาน รูปแบบการวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างปัจจัยเชิงพื้นที่และปัจจัยเชิงเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากประยุกต์ใช้ข้อมูลการพยากรณ์ความต้องการใช้สถานีอัดประจุในอนาคต ร่วมกับข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเมือง เช่น โครงข่ายถนน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และที่ตั้งของสถานที่สำคัญ เป็นต้น เพื่อสร้างสถานการณ์จำลองที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

กระบวนการทั้งหมดอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิที่รวบรวมจากหน่วยงานภาครัฐและฐานข้อมูลสาธารณะที่น่าเชื่อถือ ซึ่งช่วยให้สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดและเงื่อนไขที่กำหนดได้อย่างเป็นระบบและปราศจากอคติ ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นข้อเสนอแนะเชิงปริมาณที่สามารถวัดผลและนำไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจในการวางแผนนโยบายด้านโครงสร้างพื้นฐานของเทศบาลนครอุดรธานีได้อย่างเป็นรูปธรรม

2. ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาในพื้นที่เขตการปกครองของ เทศบาลนครอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี
- 2) พยากรณ์จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าสะสมในพื้นที่เป้าหมาย เพื่อระบุพื้นที่ที่มีศักยภาพในการติดตั้งสถานี หาดำแหน่ง และจำนวนหัวอัดประจุที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากเกณฑ์การเข้าถึงที่ครอบคลุมและระยะทางที่สั้นที่สุด
- 3) ใช้ข้อมูลสถิติย้อนหลังถึงปี พ.ศ. 2567 เพื่อพยากรณ์ความต้องการล่วงหน้า 5 ปี (พ.ศ. 2568 – 2572)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ปัญหาการระบุตำแหน่งสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

การระบุตำแหน่งสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้น เป็นปัญหาการระบุตำแหน่งและการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ ทฤษฎีที่ได้รับความนิยมและสอดคล้องกับเป้าหมายการให้บริการสาธารณะมากที่สุดคือปัญหา p-Median (ปรุพท์ มะยะเฉี่ยว, 2557) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดระยะทางหรือเวลาเดินทางโดยรวมของทั้งระบบให้เหลือน้อยที่สุด หากต้องการสร้างสถานีจำนวน p แห่ง แบบจำลองจะคำนวณหาตำแหน่งที่ทำให้ผลรวมของระยะทางจากผู้ใช้ทุกคนไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นการสร้างความสะดวกและลดภาระการเดินทางให้กับผู้ใช้ในภาพรวม นอกจากนี้ยังมีทฤษฎีอื่นที่เกี่ยวข้องที่มุ่งใช้สถานีน้อยที่สุดเพื่อครอบคลุมผู้ใช้ทุกคน (ชำนาญ พูลสวัสดิ์, 2560) ที่มุ่งเน้นการให้บริการครอบคลุมผู้ใช้ให้มากที่สุดภายใต้งบประมาณที่จำกัด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎี p-Median กับปัญหานี้กำหนดให้ I คือเซตของตำแหน่งที่มีความต้องการอัดประจุ J คือเซตของตำแหน่งที่เป็นไปได้ในการติดตั้งสถานี p คือจำนวนสถานีที่ต้องการติดตั้ง h_i คือขนาดความต้องการในพื้นที่ i ตัวแปร d_{ij} คือระยะทางจากพื้นที่ i ไปยังตำแหน่งสถานีที่เป็นไปได้ j และตัวแปรตัดสินใจ x_{ij} และ y_j แทนการจัดสรรผู้ใช้และการตัดสินใจสร้างสถานีตามลำดับ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขข้อบังคับของปัญหานี้คือ (Tian et al., 2020)

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize} \quad & Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} x_{ij} \\
 \text{Subjected to:} \quad & \sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \\
 & \sum_{j \in J} y_j = p \\
 & x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in J \\
 & x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J
 \end{aligned} \tag{1}$$

เป้าหมายของสมการคือการหาค่า Z หรือผลรวมระยะทางเดินทางทั้งหมดที่ถ่วงน้ำหนักด้วยความต้องการ ให้มีค่าน้อยที่สุด การคำนวณนี้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อบังคับที่สำคัญดังนี้ เงื่อนไขข้อบังคับแรกกำหนดให้ความต้องการทุกจุด (i) จะถูกจัดสรรให้มีสถานีเพียง 1 แห่งเท่านั้น เงื่อนไขข้อบังคับที่สองกำหนดให้จำนวนสถานีที่จะถูกเลือกสร้าง ($y_j = 1$) ต้องเท่ากับ p ตามที่คำนวณได้จากค่าที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขข้อบังคับที่สามกำหนดว่าการจัดสรรจุดความต้องการ i ให้ไปใช้สถานีที่ j ได้ ($x_{ij} = 1$) ก็ต่อเมื่อมีการตัดสินใจสร้างสถานีที่ตำแหน่ง j แล้วเท่านั้น ($y_j = 1$) เงื่อนไขข้อบังคับสุดท้ายกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจทั้งหมดต้องเป็นเลขฐานสองเท่ากับ 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งสื่อความหมายว่าไม่สร้างหรือไม่จัดสรร และสร้างหรือจัดสรรตามลำดับ

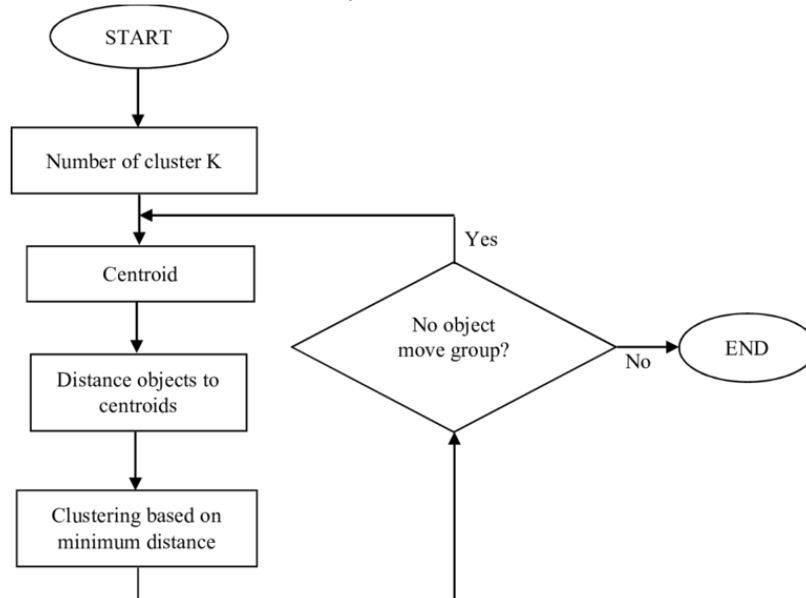
3.2 การวิเคราะห์การจัดกลุ่ม

การวิเคราะห์การจัดกลุ่มเป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบไม่มีผู้สอน วัตถุประสงค์คือเพื่อจัดกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันโดยไม่จำเป็นต้องมีคำตอบที่ถูกต้องมาก่อน ขั้นตอนวิธีที่นิยมใช้คือการจับกลุ่มข้อมูลแบบค่าเฉลี่ย K (Abdullahi et al., 2024) หลักการของขั้นตอนวิธีคือการแบ่งข้อมูลออกเป็น K กลุ่ม โดยมีเป้าหมายเพื่อลดผลรวมของระยะทางกำลังสองภายในแต่ละกลุ่มให้มีค่าน้อยที่สุด (Within-Cluster Sum of Squares, WCSS) ส่งผลทำให้สมาชิกในกลุ่มเดียวกันอยู่ใกล้กันมากที่สุด และสมาชิกต่างกลุ่มอยู่ห่างกันมากที่สุด สมการคำนวณค่า WCSS สำหรับแต่ละกลุ่มคือ

$$WCSS = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \tag{2}$$

โดยที่ K คือจำนวนกลุ่มทั้งหมด C_k คือเซตของจุดข้อมูลทั้งหมดในกลุ่มที่ k x_i คือจุดข้อมูลแต่ละจุด μ_k คือจุดศูนย์กลางของกลุ่มที่ k และ $\|x_i - \mu_k\|^2$ คือระยะทางแบบยูคลิดกำลังสองระหว่างจุดข้อมูล x_i กับจุดศูนย์กลางของกลุ่ม ในการ

ประยุกต์ใช้กับปัญหานี้จุดข้อมูล (x_i) คือพิกัดของผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้า หรือจุดความต้องการที่กระจายอยู่บนแผนที่ การจับกลุ่มข้อมูลแบบค่าเฉลี่ย K คือการแบ่งพื้นที่ให้บริการออกเป็น K โซนโดยมีจุดศูนย์กลาง (μ_k) ที่คำนวณได้เป็นตัวแทนของตำแหน่งในอุดมคติที่ควรสร้างสถานีอัดประจุ เพื่อให้บริการผู้ใช้ในโซนนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีระยะทางการเดินทางรวมน้อยที่สุด รายละเอียดของผังงานการจับกลุ่มข้อมูลแบบค่าเฉลี่ย K แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผังงานการจับกลุ่มข้อมูลแบบค่าเฉลี่ย K (Yang et al., 2021)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การจำลองเพื่อระบุตำแหน่งและขนาดสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะของเทศบาลนครอุดรธานี ใช้ข้อมูลที่สำคัญดังนี้

- 1) สถิติการจดทะเบียนยานยนต์ไฟฟ้าจังหวัดอุดรธานีย้อนหลัง 7 ปี (พ.ศ. 2563 - 25667) จำนวน 2,445 คัน เพื่อใช้วิเคราะห์อัตราการเติบโต และพยากรณ์ความต้องการอัดประจุในอีก 5 ปีข้างหน้า (กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงานกรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม, 2568)
- 2) ข้อมูลจำนวนและความหนาแน่นของประชากรในเขตเทศบาลนครอุดรธานี ปัจจุบันมีประชากร 112,889 คน ความหนาแน่นของประชากรเฉลี่ยคือ 103 คน/ตารางกิโลเมตร พื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นกว่าจะมีความต้องการในการอัดประจุสูงกว่า
- 3) แผนที่ผังเมืองรวมที่แสดงสีแดงจะเป็นพื้นที่พาณิชยกรรม สีส้มคือพื้นที่ที่อยู่อาศัยหนาแน่นปานกลาง และสีน้ำเงินเป็นที่ดินประเภทสถาบันราชการ เพื่อใช้ในการคัดเลือกตำแหน่งที่เป็นไปได้ในการติดตั้งสถานี
- 4) ข้อมูลตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดเพื่อระบุตำแหน่งสถานที่ซึ่งประกอบไปด้วยศูนย์การค้า ไฮเปอร์มาร์เก็ต โรงพยาบาล ศูนย์ราชการ สวนสาธารณะ และตลาด

จากการประมวลผลแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลข้างต้น ผลการวิจัยได้ระบุตำแหน่งและขนาดของสถานีอัดประจุที่เหมาะสมที่สุด 5 แห่งดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งสามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้ในพื้นที่ศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีผลรวมระยะทางเดินทางทั้งหมดที่ถ่วงน้ำหนักด้วยความต้องการมีค่าน้อยที่สุด โดยแบบจำลองได้เลือกตำแหน่งที่ตั้ง 5 แห่งที่กระจายตัวตามกิจกรรมในเมืองอย่างมีกลยุทธ์ ซึ่งได้แก่โซนพาณิชยกรรมหนาแน่นสองแห่งคือบริเวณศูนย์การค้าเซ็นทรัลพลาซ่า และยูดี ทาวน์ โซนศูนย์ราชการหนึ่งแห่งในบริเวณศาลากลางจังหวัด โซนเส้นทางคมนาคมหลักบริเวณจุดตัดถนนวงแหวนรอบนอก

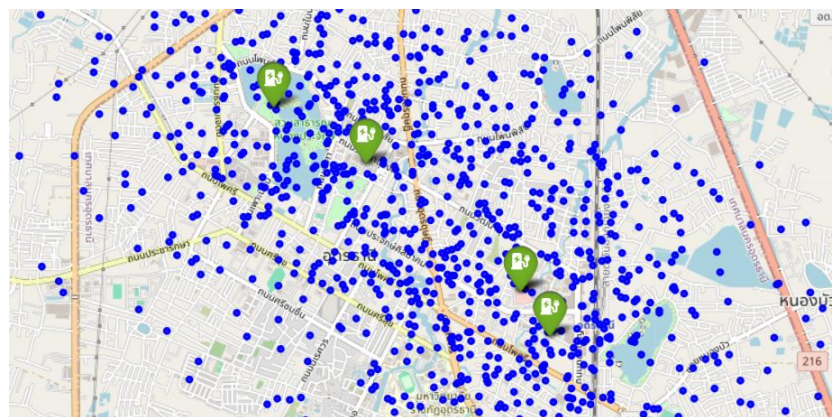
2. ขนาดและประเภทหัวอัดประจุที่ได้จากผลการวิเคราะห์ที่ควรติดตั้งในแต่ละตำแหน่ง เพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้งานในพื้นที่แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ขนาดและประเภทหัวอัดประจุของสถานีอัดประจุในเขตเทศบาลนครอุดรธานี

ตำแหน่ง	ลักษณะพื้นที่	จำนวนเครื่องอัดประจุ (หัว)	ประเภทและขนาด
1-2	พาณิชยกรรมและ ศูนย์การค้า	12	AC: 22 kW, DC: 60 kW
3	ศูนย์ราชการ	6	AC: 22 kW
4	สวนสาธารณะและที่พักอาศัย	6	AC: 22 kW
5	ถนนวงแหวนและจุดพักรถ	4	DC: 120 kW

สรุปผลการวิจัย

บทความงานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการระบุตำแหน่ง และขนาดสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับเทศบาลนครอุดรธานีโดยใช้กลยุทธ์แบบผสมผสาน ผลการจำลองระบุตำแหน่งยุทธศาสตร์ห้าสถานีที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้เมืองสำหรับโซนพาณิชยกรรมหนาแน่น ศูนย์ราชการ พื้นที่สันหนากการ และเส้นทางคมนาคมหลัก พร้อมทั้งมีการระบุประเภทและขนาดหัวอัดประจุให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน โดยเน้นการใช้หัวอัดประจุแบบธรรมดากระแสสลับ 22 kW สำหรับการจอดระยะยาวในเมือง และอัดประจุแบบเร็วกระแสตรง 120 kW สำหรับการเดินทางข้ามเมืองที่ต้องการความรวดเร็ว แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปเป็นต้นแบบให้กับเทศบาลนครของประเทศเพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่สังคมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศอย่างเป็นระบบและยั่งยืน



ภาพที่ 2 ตำแหน่งเหมาะที่สุด 5 ตำแหน่งของสถานีอัดประจุในเขตเทศบาลนครอุดรธานี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่สนับสนุนและจัดสรรทุนการวิจัย ทุนสำหรับการนำเสนอผลงานวิจัย สนับสนุนการใช้พื้นที่ และเครื่องมือสำหรับการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdullahi, M. R., Lu, Q.-C., Hussain, A., Tripura, S., Xu, P.-C., & Wang, S. (2024). Location optimization of EV charging stations: A custom K-means cluster algorithm approach. *Energy Reports*, 12, 5367-5382. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.075>

- [2] Tian, D., Yan, H., Duan, X., Cao, Y., Zhou, J., Hao, W., . . . Gu, J. (2020). Optimal Location for Electric Vehicles Charging Stations Based on P-Median Model. In (pp. 278-289).
- [3] Yang, F., Yin, S., Zhou, S., Li, D., Fang, C., & Lin, S. (2021). Electric vehicle charging current scenario generation based on a generative adversarial network combined with a clustering algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31. doi:10.1002/2050-7038.12971
- [4] กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม. (2568). กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก. Retrieved from <https://web.dlt.go.th/statistics/>
- [5] คณะกรรมการนโยบายยานยนต์ไฟฟ้าแห่งชาติ. (2564). มาตรการสนับสนุนการใช้นโยบายไฟฟ้า (EV) 30@30. Retrieved from
- [6] ชำนาญ พูลสวัสดิ์. (2560). วิธีการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางรถขนส่งสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล. (วิทยานิพนธ์). มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.
- [7] ปุรพท์ มะยะเจีย. (2557). การแก้ปัญหาการเลือกสถานที่ตั้ง. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 6(1).
- [8] สมาคมยานยนต์ไฟฟ้าไทย. (2568). รายงานสรุปสถานการณ์ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย ประจำปี 2567. Retrieved from กรุงเทพฯ:
- [9] สำนักงานจังหวัดอุดรธานี. (2565). แผนพัฒนาจังหวัดอุดรธานี (พ.ศ. 2566-2570). Retrieved from จังหวัดอุดรธานี:

การสร้างแบบจำลองพลวัตเพื่อประเมินการใช้พลังงานและสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง
สำหรับวัฏจักรการขับขี่ที่แตกต่างกัน
Dynamic Modeling and Performance Analysis of Fuel Cell Electric Vehicles for Various
Driving Cycles

แสงเพชร กองชัยภูมิ¹ บรรณณัติ บริบูรณ์² ไพบุลย์ บุปผา³ นพรัตน์ ธรรมวงษา⁴
สราวุฒิ แสงศาลา⁵ และ ญัฐกิตติ์ แสนทอง^{6*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

^{2,3,4} สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและยานยนต์ไฟฟ้าวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อุดรธานี 41000

⁵ แผนกช่างไฟฟ้ากำลังและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพิชญพัฒน์ อุดรธานี 41240

^{6*} สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อุดรธานี 41000

¹ Department of Industrial Electrical Engineering,
Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Nakhon Ratchasima, 30000

^{2,3,4} Department of Smart Electronics and Electric Vehicles,
Udon Thani Rajabhat University, Udon Thani, 41000

⁵ Department of Electronics and Electrical Power, Pitchayapit Technological College, Udon Thani, 41240

^{6*} Department of Robotics and Automation Engineering, Udon Thani Rajabhat University, Udon Thani,
41000

¹Corresponding author: Tel.: 0933214942, E-mail address: mt8@udru.ac.th

Abstract

The transition to sustainable transportation powered by clean energy is a crucial global objective, with fuel cell electric vehicles (FCEVs) emerging as an up-and-coming option. This paper presents the development and application of an integrated dynamic model for FCEVs to evaluate hydrogen fuel consumption and performance under various driving conditions. The model encompasses key powertrain components and is analyzed using standard driving cycles. The results of this research provide insights into the impact of driving behavior on hydrogen consumption and FCEV performance, informing improved energy management strategies, system design optimization, and practical deployment assessment. This model also serves as a vital tool for future research and development, ultimately reducing the time and cost of bringing FCEVs to market and supporting sustainable transportation.

Keywords: Fuel cell electric vehicles, dynamic modeling, hydrogen consumption, vehicle performance

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนผ่านสู่การขนส่งที่ยั่งยืนด้วยพลังงานสะอาดเป็นเป้าหมายสำคัญ โดยยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (FCEVs) คือทางเลือกที่โดดเด่น บทความนี้นำเสนอการพัฒนาและการประยุกต์ใช้แบบจำลองพลวัตเชิงบูรณาการสำหรับ

FCEV เพื่อประเมินการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและสมรรถนะภายใต้สภาพการขับขี่ที่แตกต่างกัน แบบจำลองครอบคลุมองค์ประกอบหลักของระบบขับเคลื่อน และวิเคราะห์ด้วยวิธีการการขับขี่มาตรฐาน ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของพฤติกรรมการขับขี่ต่อการใช้ไฮโดรเจนและสมรรถนะ ซึ่งสามารถนำไปปรับปรุงกลยุทธ์การควบคุมพลังงาน การออกแบบระบบ และการประเมินศักยภาพการใช้งานจริง แบบจำลองนี้ยังเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการวิจัยและพัฒนาในอนาคต ซึ่งจะช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการนำ FCEVs เข้าสู่ตลาด และสนับสนุนการขนส่งที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง, การจำลองพลวัต, การใช้พลังงานไฮโดรเจน, สมรรถนะยานยนต์

ระบบ Edge-AI สำหรับตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยและทะเบียนรถจักรยานยนต์แบบเรียลไทม์ Edge-AI System for Real-Time Motorcycle Helmet Detection and License Plate Recognition

ศักดิ์ชัย ศรีมากรณ์¹, วีรชัย สว่างทุกซ์^{2*}, ประสงค์ หน่อแก้ว³, ศุภวุฒิ ผากา⁴

ธนวรกฤต โอฬารธนพร⁵, ไพจิตร สุขสมบุญ⁶, อนุกิจ เสาร์แก้ว⁷ และ โอฬาร เขียวชาญ⁸

Sakchai Srimakorn¹, Weerachai Sawangtuk^{2*}, Prasong Norkaew³, Suphawut Paka⁴

Tanaworakit Orantanaporn⁵, Pajit Suksomboon⁶, Anukit Saokeaw⁷ and Oran Chieochan⁸

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100

² สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100

^{3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100

⁵ สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100

⁶ สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100

^{7,8} สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ลำปาง 52100

^{1,2} Software Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

^{3,4} Industrial Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

⁵ Industrial Arts, Faculty of Industrial Technology,
Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

^{6,7} Information Technology, Faculty of Science,
Lampang Rajabhat University, Lampang 52100

¹Corresponding author: Tel.: 081-4732159. E-mail address: wrchaitc@lpru.ac.th

Abstract

This study aims to design and develop a real-time Edge-AI system to detect helmet use and recognize motorcycle license plates using the YOLOv8s object detection model. The model was trained with field image datasets collected from CCTV cameras installed within the university area. All images were annotated and divided into training, validation, and testing sets, with Data Augmentation techniques applied to increase dataset diversity. The trained model was then deployed and evaluated on edge devices to assess its performance in real-world environments with limited computational resources.

The evaluation results indicate that the model can detect both helmet usage and motorcycle license plates with high efficiency, achieving an accuracy greater than 92% and a mean Average Precision at IoU threshold 0.5 (mAP@0.5) of approximately 0.94, while maintaining a processing speed of no less than 15 FPS. These results demonstrate the feasibility of applying the system in real-time scenarios. The developed system can provide timely alerts to riders and report to traffic officers, offering a novel approach

to enhancing road safety within the university. Furthermore, the proposed system can be extended to public areas to support traffic safety measures and help reduce road accidents in broader contexts.

Keywords: Edge Artificial Intelligence (Edge-AI), Helmet Detection, License Plate Recognition, Real-time Processing, Road Safety

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบ Edge-AI แบบเรียลไทม์ สำหรับตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยและการอ่านป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ โดยใช้โมเดลการตรวจจับวัตถุ YOLOv8s ที่ผ่านการฝึกด้วยชุดข้อมูลภาพภาคสนามจากกล้องวงจรปิดในพื้นที่มหาวิทยาลัย ข้อมูลที่ได้ถูกกำกับฉลาก (Annotation) และแบ่งเป็นชุดฝึกตรวจสอบ และทดสอบ พร้อมทั้งประยุกต์เทคนิค Data Augmentation เพื่อเพิ่มความหลากหลายของข้อมูล จากนั้นจึงนำโมเดลไปประเมินผลบนอุปกรณ์ปลายทาง (Edge Device) เพื่อทดสอบการทำงานจริง

ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยและป้ายทะเบียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า Accuracy มากกว่า 92% และค่า mAP@0.5 ประมาณ 0.94 พร้อมความเร็วการประมวลผลไม่น้อยกว่า 15 FPS ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานจริงในสถานการณ์เรียลไทม์ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแจ้งเตือนผู้ขับขี่และรายงานต่อเจ้าหน้าที่ได้อย่างทันเวลา ถือเป็นแนวทางใหม่ในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ปลายทางเพื่อสนับสนุนมาตรการความปลอดภัยและลดอุบัติเหตุภายในมหาวิทยาลัย ทั้งยังสามารถต่อยอดไปสู่การใช้งานในพื้นที่สาธารณะเพื่อยกระดับความปลอดภัยทางถนนได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์ปลายทาง, การตรวจจับหมวกนิรภัย, การรู้จำป้ายทะเบียน, การประมวลผลแบบเรียลไทม์, ความปลอดภัยทางถนน

บทนำ

อุบัติเหตุทางถนนโดยเฉพาะจากรถจักรยานยนต์ยังคงเป็นสาเหตุสำคัญของการบาดเจ็บและเสียชีวิตในประเทศไทย สาเหตุหลักที่พบได้บ่อยคือการไม่สวมหมวกนิรภัยของผู้ขับขี่และผู้ซ้อนท้าย แม้ว่าจะมีการรณรงค์และมาตรการทางกฎหมาย แต่การบังคับใช้ยังมีข้อจำกัดทั้งด้านบุคลากรและการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีอัจฉริยะเพื่อสนับสนุนการเฝ้าระวังและลดพฤติกรรมเสี่ยง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ปลายทาง (Edge Device) เพื่อให้สามารถตรวจจับและแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แนวคิดของระบบ Edge-AI ช่วยให้การประมวลผลข้อมูลกล้องวงจรปิดและอุปกรณ์ IoT โดยไม่จำเป็นต้องส่งข้อมูลทั้งหมดไปยังศูนย์กลาง ทำให้ลดความหน่วงเวลา (latency) และเพิ่มความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบ Edge-AI ที่สามารถตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยและป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ในสภาวะแวดล้อมจริง พร้อมประเมินประสิทธิภาพของระบบทั้งด้านความแม่นยำ ความเร็ว และความพึงพอใจของผู้ใช้ เพื่อนำไปสู่การยกระดับมาตรการความปลอดภัยภายในมหาวิทยาลัยและต่อยอดสู่การใช้งานในพื้นที่สาธารณะต่อไป

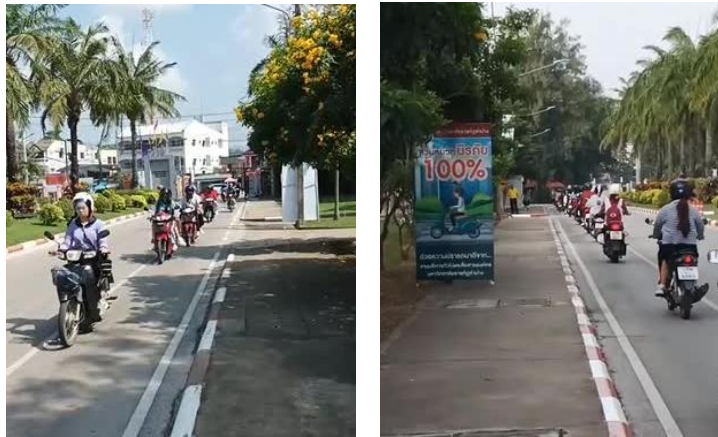
วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบ Edge-AI แบบเรียลไทม์สำหรับตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยและอ่านป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์บนอุปกรณ์ปลายทาง
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของระบบ โดยวัดความแม่นยำการตรวจจับความเร็วประมวลผลบนอุปกรณ์จริงและอัตราความผิดพลาดของการตรวจหมวกนิรภัยและการอ่านทะเบียน

วิธีการวิจัย

ข้อมูลนำเข้า (Input)

ข้อมูลนำเข้าของการวิจัยประกอบด้วยภาพและวิดีโอที่ได้จากกล้องซึ่งติดตั้งในจุดตรวจจราจรหรือบริเวณทางเข้า โดยกล้องจะบันทึกทั้งภาพนิ่งและการเคลื่อนไหวของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์การสวมหมวกนิรภัยและการตรวจสอบป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ ข้อมูลที่ได้ยังรวมถึงปัจจัยด้านสภาพการจราจร ความหนาแน่นและความเร็วของยานพาหนะ ตลอดจนสภาพอากาศและสภาพถนน ซึ่งอาจมีผลต่อความแม่นยำของการตรวจจับ นอกจากนี้ยังพิจารณาพฤติกรรมขับขี่ เช่น ความเร็วและทิศทางของผู้ขับขี่ เพื่อใช้ประกอบการประเมินความเสี่ยงและสนับสนุนการพัฒนาโมเดลให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพในสภาวะแวดล้อมจริง



ภาพที่ 1 บริเวณทางเข้าจุดตรวจจราจรภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
(ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)



ภาพที่ 2 อุปกรณ์บันทึกกล้องแบบเคลื่อนที่และตำแหน่งจุดติดตั้งบริเวณทางเข้า
(ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)



ภาพที่ 3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับภาพและการรับส่งข้อมูล
(ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)

การจัดเก็บข้อมูล (Data Set)

การจัดเก็บข้อมูลดำเนินการในช่วงเวลา เช้า กลางวัน และเย็น เพื่อให้ครอบคลุมสภาพแสงที่หลากหลาย โดยกล้องถูกติดตั้งในตำแหน่งที่สามารถเห็น ด้านหลังของรถจักรยานยนต์ ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่สามารถตรวจจับ หมวกนิรภัยของผู้ซ้อนท้าย และ ป้ายทะเบียน ได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างภาพจากกล้องวงจรปิดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4 ชุดข้อมูลภาพผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์
(ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)

ชุดข้อมูล (Dataset)

ภาพป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ จำนวน 976 ภาพ ครอบคลุมทั้งป้ายทะเบียนไทยและภาษาอังกฤษ มีทั้งภาพป้ายชัดเจน และป้ายที่มีสภาพแสงสะท้อน/เงา เพื่อทดสอบความสามารถของระบบ OCR โดยออกแบบระบบให้ครอบคลุมทั้งการตรวจจับการ สวมหมวกนิรภัย และการ รู้จำป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ ผ่านการประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดภาคสนามระบบที่พัฒนา



ภาพที่ 5 ชุดข้อมูลภาพป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์
(ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)

กระบวนการ (Process)

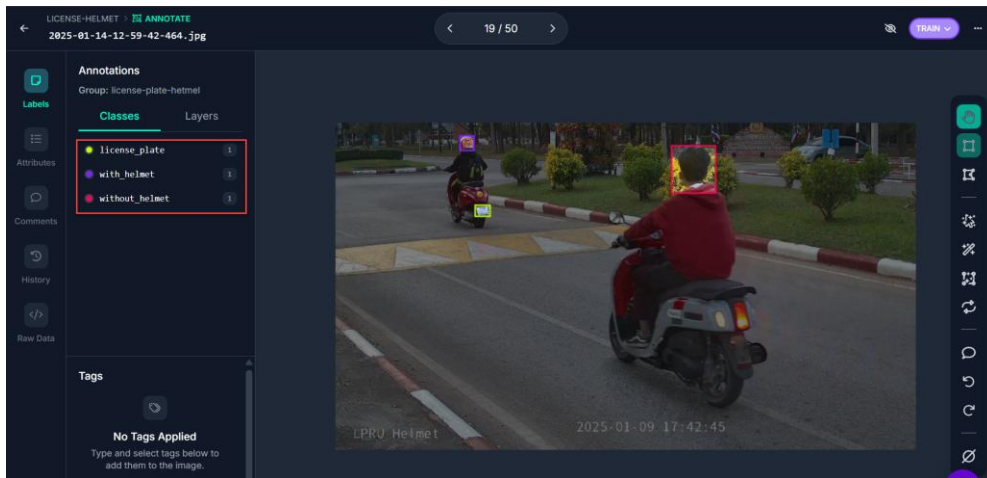
กระบวนการของการวิจัยเริ่มจาก การเตรียมข้อมูล โดยรวบรวมภาพและวิดีโอจากกล้องที่ติดตั้ง ณ จุดตรวจจราจร หรือพื้นที่ทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ทั้งที่สวมและไม่สวมหมวกนิรภัย รวมถึงป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาทำการกำกับฉลาก (Annotation) โดยใช้เครื่องมือ Roboflow (<https://roboflow.com/>) เพื่อกำหนดขอบเขตและระบุคลาส ได้แก่ “สวมหมวกนิรภัย”, “ไม่สวมหมวกนิรภัย” และ “ป้ายทะเบียน” จากนั้นจะแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (Training set) ชุดตรวจสอบ (Validation set) และชุดทดสอบ (Testing set) พร้อมทั้งทำการเพิ่มข้อมูล (Data Augmentation) เช่น การหมุนภาพ ปรับความสว่าง หรือสะท้อนภาพ เพื่อเพิ่มความหลากหลายและลดการลำเอียงของข้อมูล โดยใช้ฟังก์ชันการปรับขนาดภาพ (resize), แปลงภาพเป็น grayscale, ปรับแสง หรือ crop เฉพาะส่วนสำคัญ ทำให้สามารถเตรียมภาพให้อยู่ในรูปแบบที่โมเดล YOLO ต้องการ เช่น 416x416 หรือ 640x640 pixels

ตารางที่ 1 สรุปประเภทของวัตถุ (Classes) ที่ทำการ Annotate ด้วย Roboflow

ชื่อคลาส	รายละเอียด/คำอธิบาย	จำนวนภาพ
helmet	ผู้ขับขี่หรือผู้ซ้อนท้ายที่สวมหมวกนิรภัย	624
no_helmet	ผู้ขับขี่หรือผู้ซ้อนท้ายที่ไม่สวมหมวกนิรภัย	352
license_plate	ป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ที่เห็นได้ชัดเจน	976

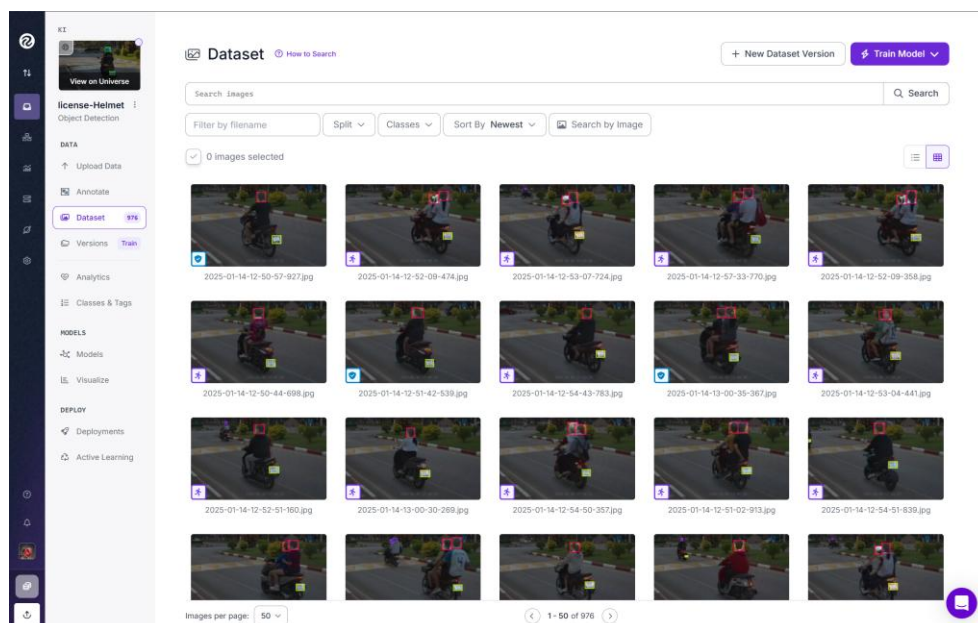
การทำงานของ Roboflow ขณะติดป้ายกำกับวัตถุภายในภาพ โดยผู้วิจัยได้ทำการลากกรอบ (bounding box) ครอบวัตถุ และเลือกคลาสให้ตรงกับลักษณะที่ปรากฏจริงในภาพ ในภาพตัวอย่าง กรอบสีเขียวแสดงถึง ป้ายทะเบียน (license_plate) ที่จะนำไปใช้ในการรู้จำอักษร กรอบสีม่วงแสดงถึงบุคคลที่ สวมหมวกนิรภัย (with_helmet) กรอบสีชมพู

แสดงถึงบุคคลที่ไม่สวมหมวกนิรภัย (without_helmet) การติดป้ายกำกับเช่นนี้จะช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้เพื่อแยกแยะวัตถุได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ



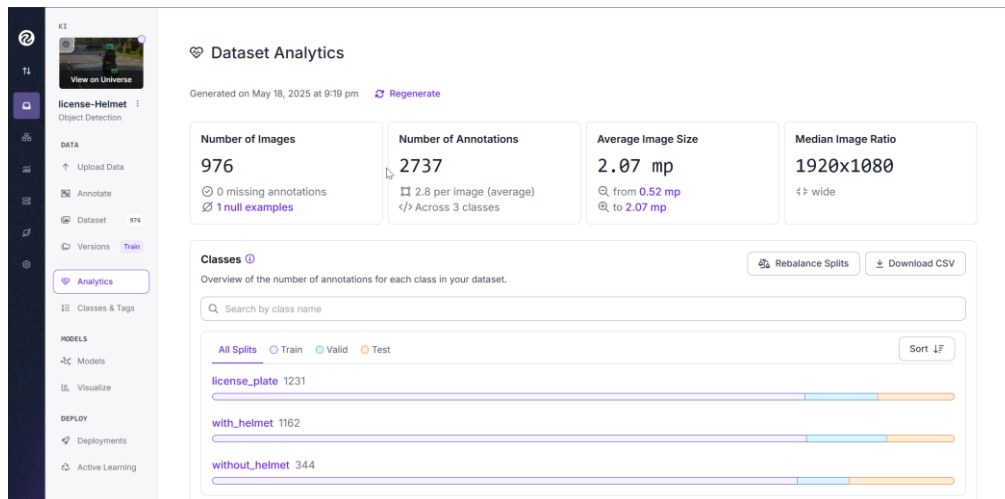
ภาพที่ 6 การติดป้ายกำกับภาพ
(ที่มา: <https://roboflow.com/>)

การติดป้ายกำกับ (Annotation) ให้กับภาพถ่ายทั้งหมด ทีมวิจัยได้นำภาพเข้าสู่กระบวนการจัดการผ่าน Roboflow Dataset Dashboard ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบที่ใช้ในการควบคุม ตรวจสอบ และเตรียมความพร้อมของชุดข้อมูลสำหรับฝึกโมเดล (Train Model) จากภาพจะเห็นได้ว่าระบบแสดงรายการภาพจำนวนมาก (ในที่นี้คือ 976 ภาพ) ซึ่งผ่านการ Annotate แล้ว



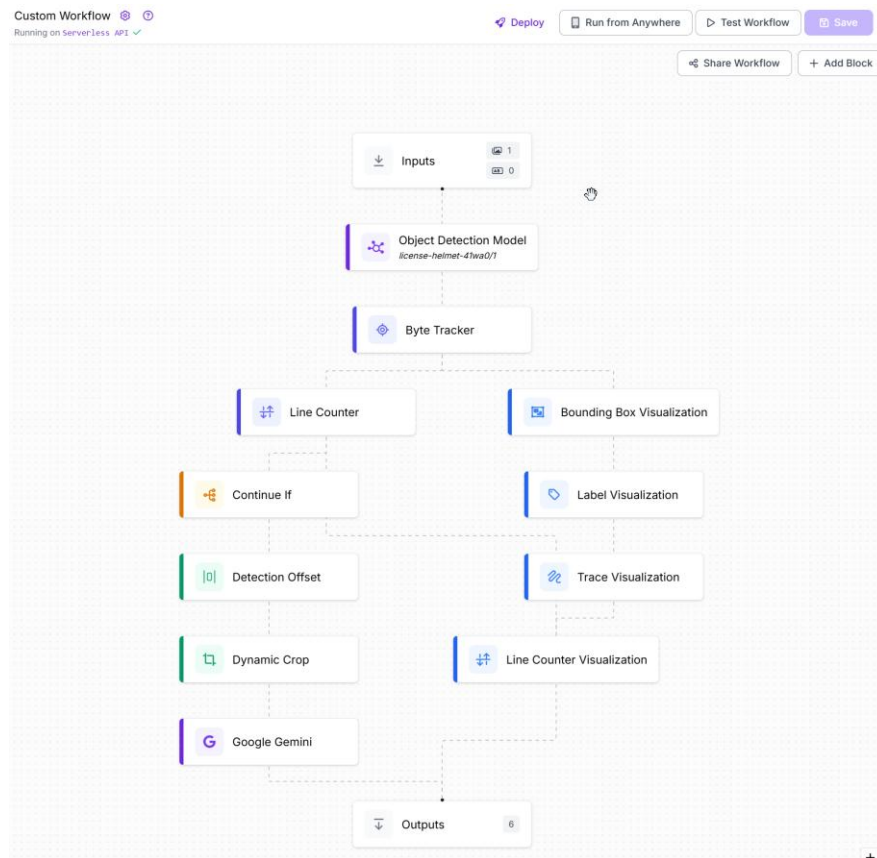
ภาพที่ 7 ภาพซึ่งผ่านการ Annotate
(ที่มา: <https://roboflow.com/>)

การแบ่งชุดข้อมูล (Dataset Splitting) สามารถแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Training Set, Validation Set และ Testing Set โดยตั้งค่าสัดส่วนได้ เช่น 70:20:10



ภาพที่ 8 การแบ่งชุดข้อมูล Annotate (ที่มา: <https://roboflow.com/>)
(ที่มา: <https://roboflow.com/>)

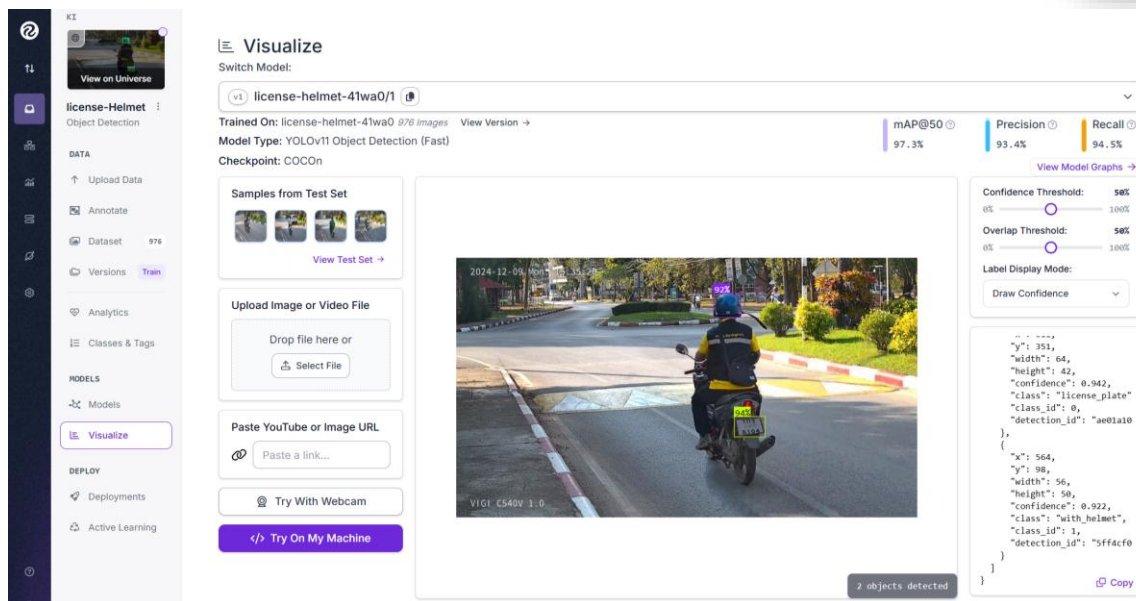
โดยการสร้าง Workflow บนแพลตฟอร์ม Roboflow สำหรับการตรวจจับหมีกนิรภัยและป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ เริ่มต้นจากการกำหนดโมดูล Inputs เพื่อนำเข้าข้อมูลภาพหรือวิดีโอเข้าสู่โมเดลตรวจจับวัตถุ ผ่านการฝึกด้วย YOLOv8s หลังจากนั้นผลลัพธ์ถูกประมวลผลด้วย Byte Tracker เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการติดตามวัตถุระหว่างเฟรมต่อเนื่องและลดความซ้ำซ้อนในการตรวจจับ ในลำดับถัดมา Workflow จะดำเนินการผ่านโมดูลย่อย ได้แก่ Bounding Box Visualization, Label Visualization, และ Trace Visualization สำหรับการแสดงผลการตรวจจับ รวมถึง Line Counter และ Line Counter Visualization เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการผ่านจุดตรวจ โมดูล Continue If, Detection Offset, และ Dynamic Crop ถูกใช้เพื่อควบคุมเงื่อนไขและปรับปรุงตำแหน่งการตรวจจับ ข้อมูลที่ได้สามารถประมวลผลเพิ่มเติมผ่าน Google Gemini ก่อนสรุปผลที่ Outputs กระบวนการดังกล่าวทำให้ Workflow สามารถทำงานได้ครบวงจร ตั้งแต่การรับข้อมูล การตรวจจับและติดตามวัตถุ ไปจนถึงการวิเคราะห์และการส่งออกผลลัพธ์ในรูปแบบเรียลไทม์



ภาพที่ 9 Workflow บนแพลตฟอร์ม Roboflow
(ที่มา: <https://roboflow.com/>)

โมเดลปัญญาประดิษฐ์สำหรับการตรวจจับวัตถุ ใช้โมเดล YOLOv8s สำหรับการตรวจจับหมวกนิรภัย โดยสามารถแยกแยะบุคคลที่ สวมหมวกนิรภัย และ ไม่สวมหมวกนิรภัย ได้ในเวลาใกล้เคียงจริง โดยการฝึกและทดสอบทำการบันทึกค่า Loss, Accuracy, Precision, Recall, mAP ในแต่ละ Epoch ในส่วนของการตรวจจับหมวกนิรภัยและป้ายทะเบียนแบบเรียลไทม์ ความเร็วที่ไม่น้อยกว่า 15 FPS

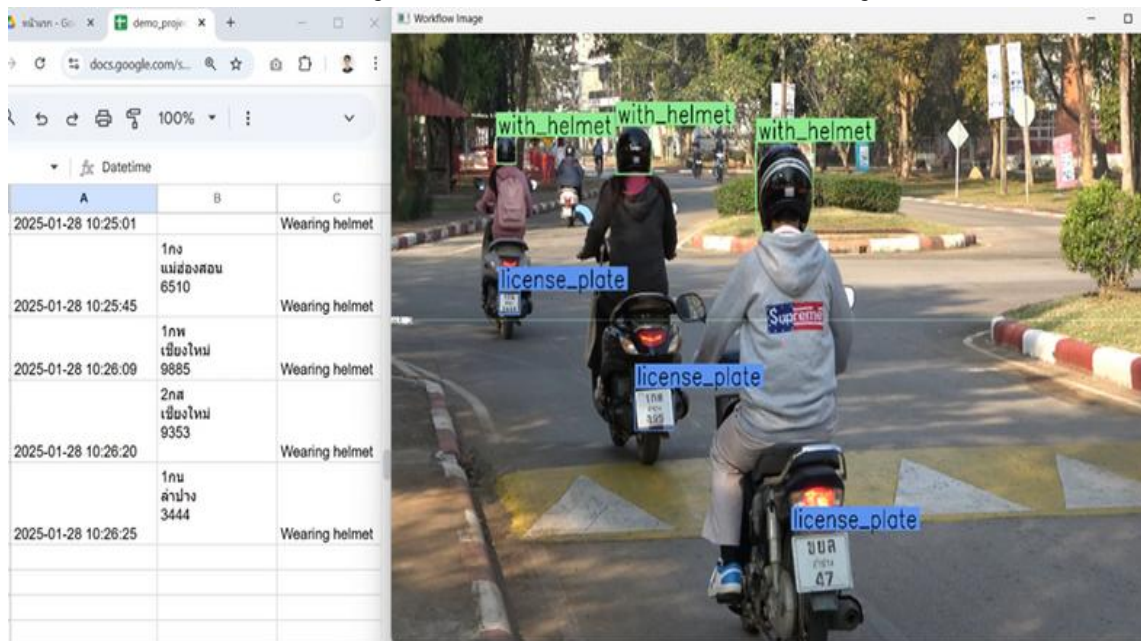
ผลการตรวจจับวัตถุด้วยโมเดล YOLOv8s บนแพลตฟอร์ม Roboflow โมเดลตรวจจับวัตถุในภาพได้ 2 ประเภท ได้แก่ ป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ และ ผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ที่สวมหมวกนิรภัย วัตถุแต่ละชนิดจะมีกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบ และมีป้ายชื่อกำกับบนภาพเพื่อแสดงชื่อคลาสและค่าความเชื่อมั่น (confidence) ของการตรวจจับนั้น กรอบรอบป้ายทะเบียนเป็นสีเขียว พร้อมป้ายชื่อ license_plate และค่าความเชื่อมั่น 0.942 (ประมาณ 94.2%) ซึ่งหมายความว่าโมเดลมีความมั่นใจราว 94.2% ว่าวัตถุดังกล่าวคือป้ายทะเบียนจริง. ส่วนผู้ขับขี่ที่สวมหมวกนิรภัยจะมีกรอบสีม่วงล้อมรอบ พร้อมป้ายชื่อ with_helmet และค่าความเชื่อมั่น 0.922 (92.2%) ซึ่งแสดงถึงความมั่นใจระดับสูงของโมเดลว่าบุคคลนี้ได้สวมหมวกนิรภัยอย่างถูกต้อง



ภาพที่ 10 ผลการตรวจจับวัตถุด้วยโมเดล YOLOv8s (ที่มา: <https://roboflow.com/>)

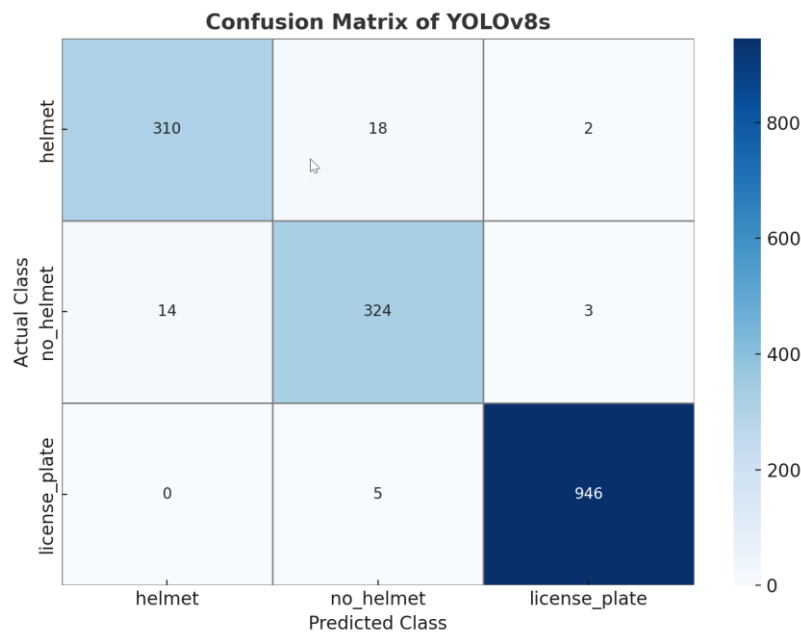
ผลการวิจัย

ผลการตรวจจับด้วยโมเดล YOLOv8 สามารถเห็นได้ว่าระบบสามารถตรวจจับได้ทั้งหมดกรณี (with_helmet) ที่ผู้ขับขี่และผู้ซ้อนท้ายสวมอยู่ ป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ (license_plate) ซึ่งถูกดึงมาทำ OCR แปลงเป็นข้อความ ระบบได้ทำการ บันทึกผลการตรวจจับใน Google Sheet โดยอัตโนมัติ ผ่านการเชื่อมต่อกับ Google Sheets API

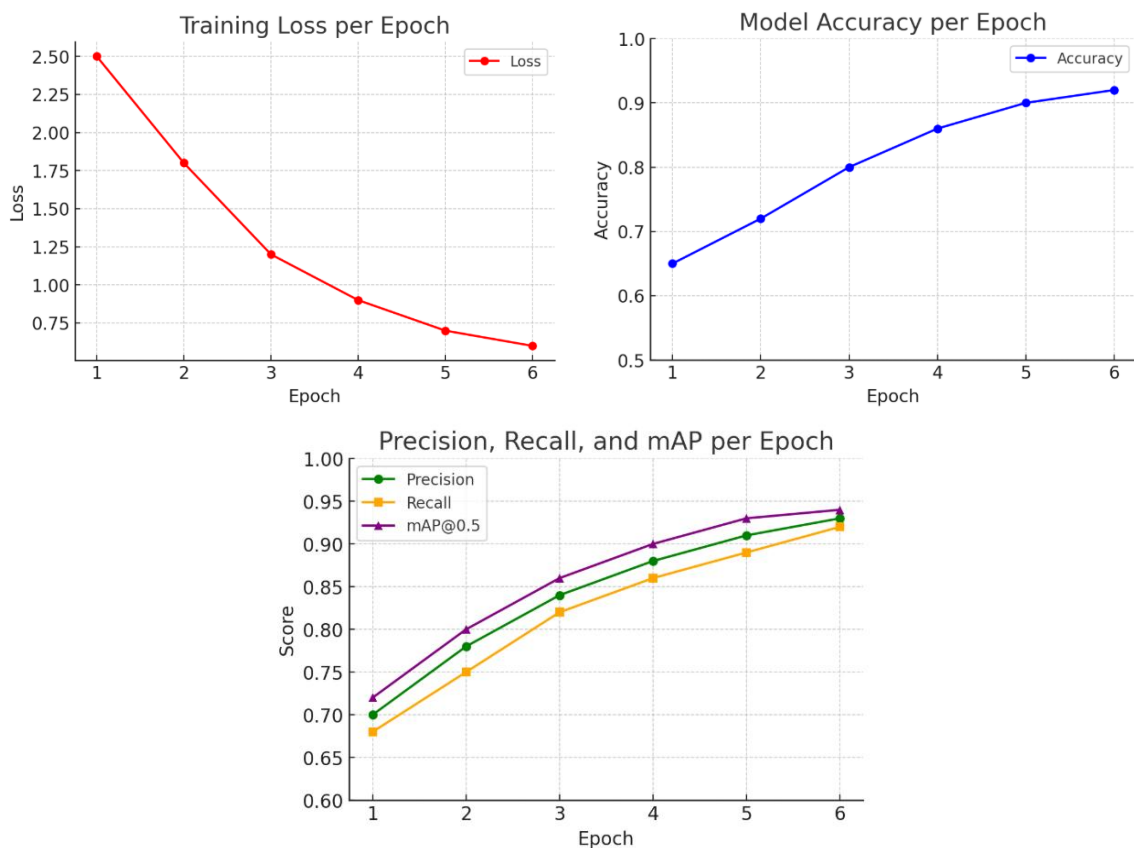


ภาพที่ 11 ผลการตรวจจับวัตถุด้วยโมเดล YOLOv8s (ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)

การประเมินผลเชิงลึกของโมเดลด้วย Confusion Matrix เพื่อให้เห็นภาพรวมความถูกต้องของการจำแนกวัตถุแต่ละประเภท ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ Confusion Matrix ของโมเดล YOLOv8s บนชุด Testing Set โดยแบ่งเป็น 3 คลาส ได้แก่ helmet, no_helmet, และ license_plate ดังแสดงในตาราง ที่ 2



ภาพที่ 12 ผลการวิเคราะห์ Confusion Matrix (ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)



ภาพที่ 13 ผลการเรียนรู้ของโมเดล YOLOv8
(ที่มา: ผู้วิจัย, 2568)

ผลการเรียนรู้ของโมเดล YOLOv8s แสดงให้เห็นว่าค่า Loss มีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องจาก 2.5 เหลือประมาณ 0.6 ภายใน 6 Epoch สะท้อนว่าโมเดลสามารถเรียนรู้และปรับปรุงการทำนายได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่เกิดการ overfitting

ชัดเจน ในขณะที่ความแม่นยำค่า Accuracy เพิ่มขึ้นจากราว 65% เป็นมากกว่า 92% แสดงถึงความสามารถของโมเดลในการจำแนกหwmกนรภัยและป้ายทะเบียนได้แม่นยำมากขึ้นตามรอบการฝึก ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ Precision, Recall และ mAP@0.5 ต่างก็มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเกิน 90% หลัง Epoch ที่ 5 โดยค่า Precision สูงแสดงว่าการตรวจจับที่โมเดลทำขึ้นมาส่วนใหญ่ถูกต้องจริง ในขณะที่ Recall สูงบ่งบอกว่าโมเดลตรวจจับวัตถุที่ปรากฏจริงได้ครบถ้วน และค่า mAP@0.5 ที่ใกล้เคียง 0.94 ยืนยันถึงประสิทธิภาพโดยรวมของโมเดลที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานจริงในระบบ Edge-AI แบบเรียลไทม์ทั้งในด้านความแม่นยำและความรวดเร็วในการตรวจจับ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโมเดลอื่น (Model Comparison) ประกอบด้วย YOLOv5s, EfficientDet-D0 และ SSD-MobileNet บนชุดข้อมูลเดียวกัน (976 ภาพ) ดังแสดงในตาราง ที่ 3

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโมเดลอื่น

โมเดล	พารามิเตอร์ (M)	mAP@0.5	Precision	Recall
YOLOv5s	7.2	0.91	91.8%	90.5%
EfficientDet-D0	4.0	0.88	89.2%	88.7%
SSD-MobileNet	2.3	0.84	87.9%	86.2%
YOLOv8s	11.2	0.94	94.6%	95.8%

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับวัตถุระหว่าง YOLOv8s, YOLOv5s, EfficientDet-D0 และ SSD-MobileNet แสดงให้เห็นว่า YOLOv8s มีความแม่นยำและประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด โดยให้ค่า mAP@0.5 เท่ากับ 0.94 Precision 94.6% และ Recall 95.8% ซึ่งเหนือกว่าโมเดลอื่นทั้งหมด ในขณะที่ YOLOv5s และ EfficientDet-D0 ให้ความแม่นยำลดลงเล็กน้อย ส่วน SSD-MobileNet มีความแม่นยำต่ำสุด จึงสรุปได้ว่า YOLOv8s เป็นโมเดลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานในระบบ Edge-AI ตรวจจับหwmกนรภัยแบบเรียลไทม์ในงานวิจัยนี้

จากงานวิจัยนี้ได้นำมาวิเคราะห์และปรับปรุงระบบงานจราจร เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ผ่านการวิเคราะห์กระบวนการเรียนรู้การสวมหwmกนรภัย เพื่อลดความเสี่ยงอุบัติเหตุในพื้นที่มหาวิทยาลัย โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลเชิงสถิติของอุบัติเหตุ สภาพการจราจร ความหนาแน่นในช่วงเวลาเร่งด่วน และพฤติกรรมผู้ขับขี่ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาคอขวด (Bottleneck) และจุดเสี่ยง จากนั้นใช้แนวทางเครื่องมือ Simulation Modeling และ Ergonomics เพื่อออกแบบผังการจราจรใหม่ ปรับปรุงจุดตัด ถนน และตำแหน่งป้ายจราจรให้เหมาะสม รวมถึงการกำหนดมาตรฐานเวลาในการผ่านทางเพื่อลดการชนหรือการเปิดเส้นทาง

การจัดการเชิงระบบและการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยการใช้ระบบตรวจจับอัตโนมัติร่วมกับการบันทึกข้อมูลในฐานข้อมูลกลางเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาว พร้อมทั้งจัดทำการดูแลป้องกันอุปกรณ์ตรวจจับ กล้องวงจรปิด และสัญญาณเตือน เพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ควรพัฒนากิจกรรมรณรงค์ความปลอดภัยและอบรมเชิงปฏิบัติการให้กับนักศึกษาและบุคลากรอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดจำนวนอุบัติเหตุและสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยอย่างยั่งยืนภายในมหาวิทยาลัย

สรุปผลการวิจัย

ระบบ Edge-AI แบบเรียลไทม์ ที่สามารถตรวจจับการสวมหwmกนรภัยและอ่านป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์จากภาพวิดีโอที่บันทึก ณ จุดตรวจจราจรภายในมหาวิทยาลัย โดยใช้โมเดล YOLOv8s บนแพลตฟอร์ม Roboflow ร่วมกับขั้นตอนการกำกับฉลากและเตรียมข้อมูลอย่างเป็นระบบ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถแยกแยะผู้ขับขี่ที่สวมหwmกนรภัยและตรวจจับป้ายทะเบียนได้อย่างถูกต้องในสภาพแสงและมุมมองที่หลากหลาย

ผลการประเมินเชิงเทคนิคพบว่า ค่า Loss ลดลงอย่างต่อเนื่อง จาก 2.5 เหลือราว 0.6 ภายใน 6 Epoch ในขณะที่ Accuracy เพิ่มขึ้นจาก 65% เป็นมากกว่า 92% แสดงถึงความสามารถของโมเดลในการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพ ตัวชี้วัด Precision และ Recall มีค่ามากกว่า 90% หลัง Epoch ที่ 5 และค่า mAP@0.5 อยู่ที่ประมาณ 0.94 ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำโดยรวมในระดับสูง นอกจากนี้ความเร็วการประมวลผลไม่น้อยกว่า 15 FPS ทำให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริงบนอุปกรณ์ปลายทางที่มีทรัพยากรจำกัด

โดยสรุป ระบบ Edge-AI ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำงานได้อย่างครบวงจร ตั้งแต่การรับข้อมูล การตรวจจับ การติดตามวัตถุ ไปจนถึงการแจ้งเตือนและการบันทึกผลแบบเรียลไทม์ ผลงานดังกล่าวไม่เพียงแต่สนับสนุนนโยบาย “สวมหมวกนิรภัย 100%” ภายในมหาวิทยาลัย แต่ยังสามารถต่อยอดไปสู่การใช้งานจริงในพื้นที่สาธารณะ เพื่อเพิ่มมาตรการความปลอดภัยและลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุทางถนนในระดับชุมชนและสังคมต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณปี 2568 จากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Raj, R., & Subramanian, K. (2021). Helmet detection on motorcyclists using image processing and machine learning techniques. *International Journal of Computer Applications*, 183(7), 1–6
- [2] Hossain, M. D., & Lee, D. J. (2019). Deep learning-based real-time multiple-object detection and tracking from aerial imagery via a flying robot with GPU-based embedded devices. *Sensors*, 19(15), 3371.
- [3] Aboyomi, D. D., & Daniel, C. (2023). A comparative analysis of modern object detection algorithms: YOLO vs. SSD vs. Faster R-CNN. *Information Technology Engineering Journals*, 8(2), pp.96-106.
- [4] Ali, M. L., & Zhang, Z. (2024). The YOLO framework: A comprehensive review of evolution, applications, and benchmarks in object detection. *Computers*, 13(12), 336.
- [5] Wang, J., & Perez, L. (2017). The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning. *Convolutional Neural Networks Vis. Recognit*, 11(2017), pp.1-8.
- [6] Yash Shambharkar, Shailaja Salagrama, Kanhaiya Sharma, Om Mishra, & Deepak Parashar. (2023). An Automatic Framework for Number Plate Detection using OCR and Deep Learning Approach. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 14(4), 42–49.
- [7] Pradyut Agrawal, A. Jha, R. Kaur, & A. Agrawal. (2024). Automatic License Plate Detection and Recognition using Deep Learning and OCR. In *Proceedings of the Symposium on Computing & Intelligent Systems (SCI)*, Vol. 3682, pp. 1–8.
- [8] ธวัชชัย แซ่ลี. (2566). การตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ภายในพื้นที่โรงพยาบาลศิริราช ด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึก (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [9] สุกฤษฏ์ อัครเมธากุล. (2566). การพัฒนาระบบตรวจจับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ที่ไม่สวมหมวกนิรภัย (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [10] ณัฐพงศ์ บัวพรวน, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี, วิทยา ศรีสมบุรณ์. (2025). การพัฒนาเทคโนโลยีตรวจจับและจำแนกหมวกนิรภัยเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของแรงงานในงานก่อสร้าง.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30, หน้า CEM-26-1- CEM-26-7.

ระบบจองคิวรับบริการออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Online Service Queue Reservation and Notification System via LINE Application,
Faculty of Industrial Technology, KamphaengPhet Rajabhat University.

รุ่งโรจน์ สงวนวัฒนา*

Rungroj Sanguanwattana*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet 62000

¹Corresponding author: Tel.: 095-9923971. E-mail address: rungroj@kpru.ac.th

Abstract

The objective of this research is to design and develop a prototype online queue-reservation and notification system using the LINE application. This system is tailored for service management within the Faculty of Industrial Technology at Kamphaeng Phet Rajabhat University. It is engineered to address the issues of overcrowding and prolonged waiting times inherent in traditional walk-in service models. Furthermore, the system aims to reduce operational costs by minimizing paper consumption, thereby contributing to a lower carbon footprint. This prototype builds upon a previous research project involving a LINE application chatbot for research and academic support services. The current system enables users to reserve a service queue via a LINE Official Account on their smartphones. Subsequently, an automated email notification is dispatched to the relevant staff. Upon a staff member confirming the reservation, the system sends a final confirmation email to the user, prompting them to come in for their scheduled service. Performance evaluation of the prototype yielded the following key findings: The system demonstrated high Performance, successfully supporting 50 concurrent users without failure and exhibiting an average response time of 2.5 seconds. In terms of Security, it effectively prevented unauthorized access to data. The automated "acknowledgment" email function was also highly efficient, with a delivery time of under 15 seconds. Conversely, the evaluation identified two critical deficiencies requiring immediate attention: (1) Usability: The user interface design, specifically the buttons and access icons, lacked clarity, resulting in user confusion and prolonged task completion times. (2) Functionality: A key functional requirement was unmet, as the final confirmation email failed to include the user's "queue number," which is a critical piece of information. In conclusion, while the prototype exhibits high performance and efficiency, it necessitates further refinement of its user interface and core functionality before full implementation.

Keywords: Online queue reservation system, LINE application, system development, user satisfaction

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบจองคิวรับบริการออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ รองรับการใช้บริการภายในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร เพื่อแก้ไขปัญหาความ

แออัด ระยะเวลาการรอคอยที่ยาวนาน ของระบบบริการแบบดั้งเดิม (Walk-in) และสามารถลดการสิ้นเปลืองงบประมาณในการจัดซื้อกระดาษสำนักงาน ลดการใช้กระดาษ ลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอน ระบบต้นแบบนี้พัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยเดิม เรื่อง ระบบแชทบอทแอปพลิเคชันไลน์เพื่อสนับสนุนงานบริการให้ข้อมูลด้านงานวิจัยและบริการวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร เป็นมุ่งวิจัยแก้ปัญหาให้ผู้รับบริการสามารถจองคิวผ่านแอปพลิเคชัน LINE Official Account บนสมาร์ตโฟนได้ จากนั้นระบบจะส่งอีเมลแจ้งเตือนไปยังเจ้าหน้าที่โดยอัตโนมัติ เมื่อเจ้าหน้าที่กดยืนยันคิวในระบบแล้ว ระบบจะส่งอีเมลยืนยันกลับไปยังผู้รับบริการอีกครั้ง เพื่อเข้ามาติดต่อรับบริการ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบต้นแบบพบว่า ระบบมีความแข็งแกร่งด้านประสิทธิภาพ (Performance) โดยสามารถรองรับผู้ใช้งานพร้อมกัน 50 คนได้โดยไม่เกิดปัญหา และมีเวลาตอบสนองเฉลี่ยที่ 2.5 วินาที ด้านความปลอดภัย (Security) สามารถป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาตได้อย่างถูกต้อง และฟังก์ชันการส่งอีเมล "รับเรื่อง" อัตโนมัติทำงานได้รวดเร็วภายใน 15 วินาที อย่างไรก็ตาม พบข้อบกพร่องที่ต้องแก้ไขเร่งด่วน 2 ประการ ได้แก่ ด้านการใช้งาน (Usability) คือ การออกแบบปุ่มกดไอคอนเข้าใช้งานไม่ชัดเจน ทำให้ผู้ใช้สับสนและใช้เวลานานเกินไป และด้านฟังก์ชัน (Functional) คือ อีเมลยืนยันคิวไม่มี "หมายเลขคิว" ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับผู้รับบริการ ดังนั้น ระบบต้นแบบนี้จึงมีประสิทธิภาพสูง แต่ต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงข้อผิดพลาดดังกล่าว

คำสำคัญ: ระบบจองคิวออนไลน์, ไลน์แอปพลิเคชัน, การพัฒนาระบบ, ความพึงพอใจ

บทนำ

ในบริบทของสถาบันอุดมศึกษา การให้บริการแก่นักศึกษาและบุคลากรเป็นหัวใจสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและประสบการณ์โดยรวมภายในองค์กร อย่างไรก็ตาม หน่วยงานบริการหลายแห่ง รวมถึงภายในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ยังคงพึ่งพาระบบการให้บริการแบบดั้งเดิม คือการให้ผู้รับบริการเดินทางมาติดต่อด้วยตนเอง (Walk-in) และรับบัตรคิว ณ จุดบริการ รูปแบบดังกล่าวได้ก่อให้เกิดปัญหาเชิงโครงสร้างที่ส่งผลกระทบในวงกว้าง ทั้งต่อผู้รับบริการและผู้ให้บริการ

ปัญหาที่เด่นชัดที่สุดคือ ระยะเวลาการรอคอยที่ยาวนาน จากการศึกษานี้ในหน่วยงานของมหาวิทยาลัย พบว่าผู้รับบริการต้องใช้เวลารอคอยนานที่สุดถึง 15 นาที และเกิดสภาพความแออัดอย่างมากบริเวณหน้าห้องบริการ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้บริการหนาแน่น สภาวะเช่นนี้ทำให้เกิดปรากฏการณ์คอขวด (Bottleneck) ซึ่งทำให้กระบวนการให้บริการขาดความต่อเนื่องและประสิทธิภาพ นอกจากนี้ จากการสำรวจกระบวนการทำงานเดิมของฝ่ายงานวิจัยและบริการวิชาการภายในคณะฯ พบว่า การสื่อสารผ่านช่องทางที่ไม่เป็นทางการ เช่น กลุ่มไลน์ของบุคลากร ทำให้ข่าวสารสำคัญถูกข้อความอื่นบดบังหรืออาจถูกลบไปโดยไม่ตั้งใจ ส่งผลให้บุคลากรต้องเดินทางมาติดต่อสอบถามข้อมูลกับเจ้าหน้าที่โดยตรง ณ สำนักงาน ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระงานและสร้างความไม่สะดวก ปัญหาเหล่านี้ไม่เพียงแต่สร้างความไม่สะดวกสบาย แต่ยังส่งผลกระทบต่อประสบการณ์ของนักศึกษาและบุคลากร

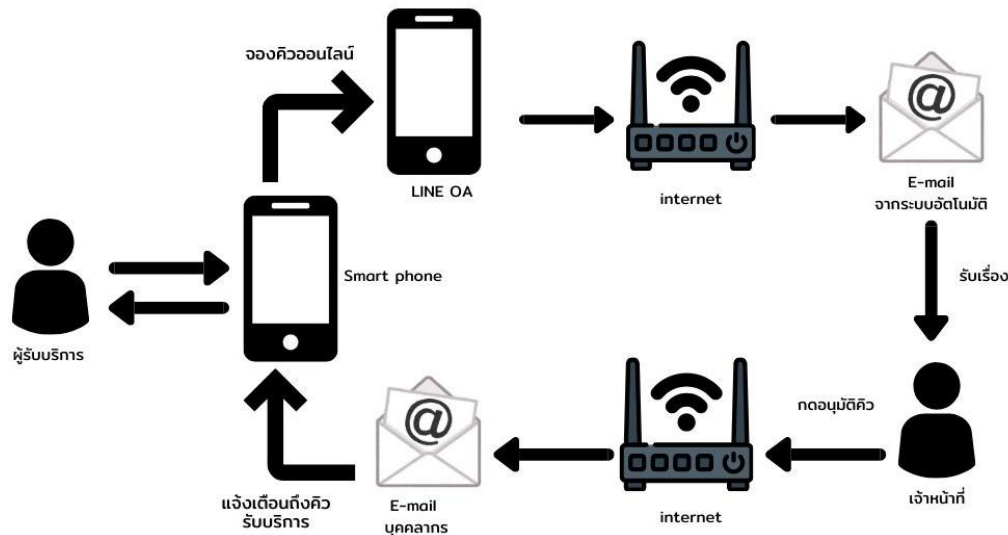
ด้วยเหตุนี้ การปรับเปลี่ยนกระบวนการทัศนจากการให้บริการเชิงรับ (Passive) ไปสู่การให้บริการเชิงรุก (Proactive) โดยการนำเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาประยุกต์ใช้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การพัฒนาระบบจองคิวรับบริการออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันที่แพร่หลายอย่าง LINE จึงเป็นแนวทางแก้ไขปัญหามุ่งตรงจุด สามารถและสามารถลดการสิ้นเปลืองงบประมาณในการจัดซื้อกระดาษสำนักงาน ลดการใช้กระดาษ ลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอน เพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการ และยกระดับความพึงพอใจของผู้รับบริการ ซึ่งจะส่งผลดีต่อภาพลักษณ์และความสามารถในการแข่งขันของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในยุคดิจิทัล

วิธีการวิจัย

1.การออกแบบระบบต้นแบบ

ในยุคดิจิทัลที่ผู้คนต้องการความสะดวกและรวดเร็ว การจัดการคิวเพื่อเข้ารับบริการแบบดั้งเดิมอาจทำให้เสียเวลาและขาดประสิทธิภาพ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบต้นแบบระบบจองคิวรับบริการออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์สำหรับคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรขึ้น โดยประยุกต์ใช้

แพลตฟอร์ม LINE Official Account ที่ผู้ใช้ส่วนใหญ่คุ้นเคยเป็นอย่างดี ระบบนี้มุ่งหวังที่จะสร้างช่องทางการสื่อสารที่ไร้รอยต่อระหว่างผู้รับบริการและเจ้าหน้าที่ ช่วยลดระยะเวลาการรอคอย ลดการสิ้นเปลืองงบประมาณจากการใช้กระดาษ และยกระดับประสิทธิภาพในการให้บริการให้ทันสมัยและมีคุณภาพยิ่งขึ้น



ภาพที่ 1 แสดงการออกแบบกระบวนการทำงานของระบบต้นแบบ

ขั้นตอนของระบบต้นแบบระบบจองคิวรับบริการออนไลน์และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์สำหรับคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

1.1 ฟังก์ชันผู้รับบริการ

1.1.1 เริ่มต้นจองคิว: ผู้รับบริการ (User) ใช้สมาร์ทโฟน (Smart phone) เข้าไปที่ LINE Official Account (LINE OA) เพื่อทำการ "จองคิวออนไลน์"

1.1.2 รับการแจ้งเตือน: หลังจากเจ้าหน้าที่ยืนยันคิวแล้ว ผู้รับบริการจะได้รับอีเมล "แจ้งเตือนถึงคิวรับบริการ" กลับมาที่สมาร์ทโฟนของตนเอง

1.2 ฟังก์ชันเจ้าหน้าที่

1.2.1 รับเรื่องอัตโนมัติ: เมื่อผู้รับบริการจองคิวเข้ามา คำขอจะถูกส่งผ่านอินเทอร์เน็ต (Internet) และระบบจะส่ง "E-mail จากระบบอัตโนมัติ" เพื่อแจ้งเรื่องไปยังเจ้าหน้าที่

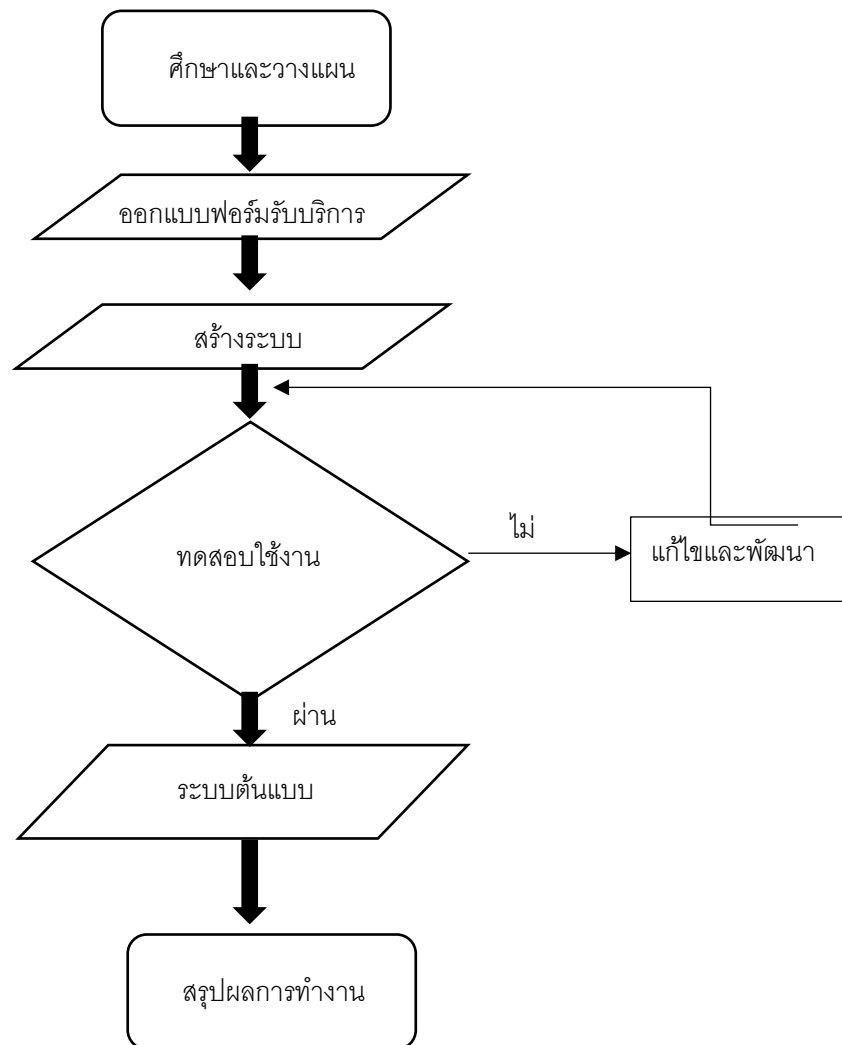
1.2.2 เจ้าหน้าที่ยืนยันคิว: เจ้าหน้าที่ (Officer) "รับเรื่อง" และตรวจสอบข้อมูล จากนั้นทำการ "กดยืนยันคิว" ในระบบ

1.2.3 ส่งการแจ้งเตือน: การยืนยันของเจ้าหน้าที่จะถูกส่งผ่านอินเทอร์เน็ต และระบบจะส่งอีเมลแจ้งเตือน (E-mail บุคลากร) กลับไปหาผู้รับบริการ

เป็นระบบที่ให้ผู้ใช้บริการสามารถจองคิวผ่าน LINE OA บนสมาร์ทโฟนได้อย่างสะดวก เมื่อจองแล้ว ระบบจะส่งเรื่องให้เจ้าหน้าที่โดยอัตโนมัติผ่านอีเมล จากนั้นเจ้าหน้าที่จะเป็นผู้กดยืนยันคิวในระบบ และระบบจะส่งอีเมลแจ้งเตือนกลับไปให้ผู้รับบริการทราบอีกครั้ง เป็นการสื่อสารสองทางที่ช่วยลดขั้นตอนและเพิ่มความสะดวกทั้งสองฝ่าย

2.การออกแบบฟอร์มรับบริการ

การออกแบบฟอร์มรับบริการส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ สำหรับระบบจองคิวออนไลน์ต้นแบบนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถระบุเป้าหมายจองคิว ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดความพึงพอใจสูงสุด โดยจะมีกระบวนการออกแบบในขั้นตอนต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 2 แสดงแนวคิดในการออกแบบขั้นตอนการทำงาน



ภาพที่ 3 แสดงการออกแบบไอคอนทางลัดของระบบจองคิวออนไลน์

▼ ลงทะเบียนระบบบริหารจัดการ... ×
https://docs.google.com/forms/d/e/

ลงทะเบียนระบบบริหารจัดการคิวเพื่อเข้ารับบริการ

งานวิจัย บริการวิชาการ และพัฒนาท้องถิ่น คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ampzkmutt@gmail.com สลับบัญชี

✉ ไม่ใช้ร่วมกัน

🔒

* ระบุว่าเป็นคำถามที่จำเป็น

ชื่อ-นามสกุลของท่าน *

คำตอบของคุณ

เบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้ *

คำตอบของคุณ

ส่ง

สร้างแบบฟอร์ม

ภาพที่ 4 แสดงฟอร์มคำร้องเพื่อรับบริการของระบบจองคิวออนไลน์

3.ทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบ

ตารางที่ 1 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบต้นแบบ

ลำดับ ที่	รายการ ทดสอบ	สิ่งที่ต้องการ ทดสอบ (Test Scenario)	ผลลัพธ์ที่ คาดหวัง (Expected Result)	ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น จริง (Actual Result)	สถานะ	หมายเหตุ / ข้อเสนอแนะ
01	การใช้งาน Usability	ผู้ใช้ครั้งแรก สามารถจองคิว สำเร็จได้โดยไม่ต้อง มีคู่มือ	ผู้ใช้ควรจองคิว สำเร็จภายใน 2 นาที	ผู้ใช้ใช้เวลา 3 นาที เนื่องจากหา ปุ่ม "ยืนยันการ จอง" ไม่เจอ ในทันที	ไม่ผ่าน	ควรปรับสีหรือ ขนาดของปุ่ม "ยืนยันการจอง" ให้โดดเด่นและ สังเกตง่ายขึ้น
02	ฟังก์ชันการ ทำงาน Functional	ระบบส่งอีเมล อัตโนมัติหาผู้ใช้ ทันทีหลังจองคิว สำเร็จ	ผู้ใช้ได้รับอีเมล "รับเรื่องการจอง คิว" ภายใน 1 นาที	ได้รับอีเมล ภายใน 15 วินาที เนื้อหาในอีเมล ถูกต้องครบถ้วน	ผ่าน	
03	ฟังก์ชันการ ทำงาน Functional	เจ้าหน้าที่กดยืนยัน คิวแล้ว ผู้ใช้ได้รับ อีเมลแจ้งเตือน	ผู้ใช้ได้รับอีเมล "ยืนยันคิวของ ท่าน" พร้อม รายละเอียด	ได้รับอีเมลยืนยัน ถูกต้อง แต่ไม่มี หมายเลขคิวแนบ มาในอีเมล	ไม่ผ่าน	ต้องแก้ไขให้ระบบ ดึง "หมายเลขคิว" มาแสดงในอีเมล ยืนยันด้วย
04	ประสิทธิภาพ Performance	ระบบรองรับ ผู้ใช้งานจองคิว พร้อมกัน 50 คน	ระบบยังคงทำงาน ได้เสถียร และใช้ เวลาตอบสนองไม่ เกิน 3 วินาที	เวลาตอบสนอง เฉลี่ย 2.5 วินาที ไม่พบ ข้อผิดพลาด	ผ่าน	ระบบสามารถ รองรับการใช้งาน ในช่วงเวลาเร่งด่วน ได้ดี
05	ความปลอดภัย Security	บุคคลภายนอกไม่ สามารถเข้าถึง หน้าจอบริการคิว ของเจ้าหน้าที่ได้	เมื่อเข้าถึง URL ของฝั่งเจ้าหน้าที่ โดยตรง ระบบจะ บังคับให้ไปหน้า ล็อกอิน	ระบบปฏิเสธการ เข้าถึงและ Redirect ไปยัง หน้าล็อกอินอย่าง ถูกต้อง	ผ่าน	

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบ สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในด้านต่างๆ ได้ดังนี้:

1. ด้านการใช้งาน (Usability)

สิ่งที่เราทดสอบ: เราต้องการทราบว่าผู้ใช้งานใหม่ที่ไม่เคยใช้ระบบนี้มาก่อน จะสามารถเรียนรู้และทำการจองคิวได้สำเร็จด้วยตนเองหรือไม่ โดยตั้งเป้าหมายว่าควรจะทำสำเร็จภายใน 2 นาที

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง: ผู้ใช้สามารถจองคิวได้สำเร็จ แต่ใช้เวลาถึง 3 นาที ซึ่งนานกว่าที่คาดไว้ จากการสังเกตพบว่าผู้ใช้เกิดความลังเลและใช้เวลาในการค้นหา "ปุ่มยืนยันการจอง"

ผลการทดสอบนี้ "ไม่ผ่าน" เพราะแม้จะใช้งานได้ แต่ก็ยังไม่ราบรื่นพอ ทำให้ผู้ใช้อาจเกิดความหงุดหงิดได้

ข้อเสนอแนะ: ทีมพัฒนาควรปรับปรุงดีไซน์ของปุ่มยืนยันการจองให้มีความโดดเด่นมากขึ้น เช่น การเปลี่ยนสีให้สดใส, เพิ่มขนาด, หรือจัดวางในตำแหน่งที่เห็นได้ชัดเจนทันที เพื่อลดขั้นตอนการค้นหาและทำให้ผู้ใช้จองคิวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

2. ด้านฟังก์ชันการทำงาน (Functional)

สิ่งที่เราทดสอบ: ตรวจสอบฟังก์ชันพื้นฐานที่สุด คือเมื่อผู้ใช้งานคลิกสำเร็จ ระบบจะต้องส่งอีเมลอัตโนมัติเพื่อ "รับเรื่อง" กลับไปหาผู้ใช้งานที่

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง: ระบบทำงานได้อย่างยอดเยี่ยม สามารถส่งอีเมลกลับไปหาผู้ใช้งานได้ภายใน 15 วินาที ซึ่งเร็วกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ (1 นาที) และเมื่อตรวจสอบเนื้อหาในอีเมลก็พบว่าถูกต้องครบถ้วน

ผลการทดสอบนี้ "ผ่าน" แสดงว่าฟังก์ชันการส่งอีเมลอัตโนมัติเบื้องต้นทำงานได้ถูกต้องและรวดเร็ว

3. ด้านฟังก์ชันการทำงาน (Functional)

สิ่งที่เราทดสอบ: เป็นการทดสอบขั้นตอนสำคัญ คือเมื่อเจ้าหน้าที่ "กดยืนยันคิว" ในระบบหลังบ้านแล้ว ระบบจะต้องส่งอีเมลฉบับที่สองเพื่อแจ้งยืนยันคิวให้กับผู้ใช้

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง: ผู้ใช้ได้รับอีเมลยืนยันจริง แต่เกิดข้อผิดพลาด คือ ไม่มี "หมายเลขคิว" แสดงอยู่ในเนื้อหาอีเมล ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญที่สุดที่ผู้ใช้งานต้องทราบ

ผลการทดสอบนี้ "ไม่ผ่าน" และถือเป็นข้อบกพร่อง (Bug) เพราะทำให้การจองคิวไม่สมบูรณ์ ผู้ใช้ไม่ทราบลำดับของตนเอง

ข้อเสนอแนะ: แก้ไขโดยให้โปรแกรมเมอร์ดึงข้อมูล "หมายเลขคิว" จากฐานข้อมูลมาแสดงในอีเมลฉบับยืนยันให้ถูกต้อง

4. ด้านประสิทธิภาพ (Performance)

สิ่งที่เราทดสอบ: เราได้จำลองสถานการณ์ที่มีผู้ใช้งานเข้ามาจองคิวพร้อมๆ กันถึง 50 คน เพื่อดูว่าระบบจะสามารถรองรับภาระหนักๆ (Load) ได้หรือไม่

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง: ระบบสามารถรองรับผู้ใช้ทั้ง 50 คนได้โดยไม่ล่มหรือเกิดอาการหน่วง เวลาในการตอบสนองเฉลี่ยอยู่ที่ 2.5 วินาที ซึ่งถือว่ารวดเร็วและเป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้

ผลการทดสอบนี้ "ผ่าน" แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของเซิร์ฟเวอร์และซอฟต์แวร์มีความแข็งแกร่งพอที่จะรองรับการใช้งานในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้งานหนาแน่นได้

5. ด้านความปลอดภัย (Security)

สิ่งที่เราทดสอบ: ตรวจสอบความปลอดภัยพื้นฐาน โดยลองเข้าถึงหน้าจอสําหรับจัดการคิวของเจ้าหน้าที่โดยตรง (ผ่านการพิมพ์ URL) โดยที่ยังไม่ได้ล็อกอิน

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง: ระบบทำงานตามที่ควรจะเป็น คือ ไม่อนุญาตให้เข้าถึงหน้านั้น และบังคับให้ผู้ใช้กลับไปยังหน้าล็อกอินก่อนเสมอ

ผลการทดสอบนี้ "ผ่าน" แสดงว่าระบบมีการป้องกันการเข้าถึงข้อมูลจากบุคคลที่ไม่ได้รับอนุญาตในระดับพื้นฐาน

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่าระบบจองคิวมีความแข็งแกร่งด้านประสิทธิภาพและความปลอดภัย โดยสามารถรองรับผู้ใช้งานจำนวนมากได้โดยไม่ล่ม และมีการป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างถูกต้อง ฟังก์ชันการส่งอีเมลแจ้งเตือนเบื้องต้นทำงานได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม พบข้อบกพร่องที่ต้องแก้ไขเร่งด่วน 2 จุด คือ การออกแบบปุ่มกด ไอคอนเข้าใช้งานไม่ชัดเจน ทำให้ผู้ใช้สับสนและใช้เวลานานเกินไป และที่สำคัญที่สุดคือ ระบบไม่แสดง "หมายเลขคิว" ในอีเมลยืนยัน ซึ่งถือเป็นข้อผิดพลาดที่ต้องแก้ไข

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและการสนับสนุนด้านทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ประจำปีงบประมาณ 2568 ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และผู้บริหารคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่ได้ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่กรุณาสละเวลาในการตรวจสอบและให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อเครื่องมือ

ที่ใช้ในการวิจัย ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาและบุคลากรคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการตอบแบบสอบถามและทดลองใช้งานระบบ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ทำให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุดารัตน์ จันทิมา. (2564). การพัฒนาระบบการจัดตารางการให้บริการสำหรับหน่วยบริการสุขภาพ กรณีศึกษา: หน่วยบริการสุขภาพ มหาวิทยาลัยนเรศวร [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยนเรศวร]. NUIR. <http://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/bitstream/123456789/5926/3/SudaratChantima.pdf>
- [2] ศิวพร เพชรวิสัย และนันทนา ศรีพรหมทอง. (2561). ระบบการจองคิวและจัดการร้านทำผมออนไลน์แอร์ทูลส์ไดร์ [โครงการ, มหาวิทยาลัยสยาม]. E-Research Siam University. <https://e-research.siam.edu/wp-content/uploads/2019/05/Com-Science-2018-project-Hair-salon-online-appointment-and-management-system-compressed.pdf>
- [3] ภัทธา รัตนโมรานนท์. (2561). การพัฒนาระบบการจองห้องและยืม-คืนอุปกรณ์ออนไลน์ วิทยาลัยศรีโศภิตาไซส์ แอนด์ เอ็นเตอร์เทนเมนต์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ [การค้นคว้าอิสระปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์]. DPU. <https://libdoc.dpu.ac.th/thesis/Phattara.Rat.pdf>
- [4] รินรดา เตือนดารา. (2561). การบริการจองคิวแบบครบวงจรผ่านแอปพลิเคชัน [โครงการ, มหาวิทยาลัยสยาม]. E-Research Siam University. <https://e-research.siam.edu/wp-content/uploads/2021/08/Liberal-Arts-Tourism-and-Hospitality-Industry-2020-coop-One-Stop-Service-for-Booking.pdf>

การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ครั้งที่ 18
(TREC-18)

หัวข้อบทความ 5

นวัตกรรมพลังงานเพื่อความยั่งยืนของทรัพยากรธรรมชาติ

การใช้ประโยชน์เชิงมูลค่าอย่างยั่งยืนจากก้อนเชื้อเห็ดใช้แล้ว: ความเป็นไปได้ในการผลิต
เม็ดเชื้อเพลิงชีวภาพ

Sustainable Valorization of Spent Mushroom Substrate: Feasibility of Bio-Pellet
Production

ปฎิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ¹ ศิวัตม์ กมลคุณานนท์² ลลิตา เพชรใจหาญ³ และ ภคมน ปินตานา^{4*}

Patipat Thanompongchart¹ Siwat Kamonkunanon² Lalita Petchaihan³ and Pakamon Pintana^{4*}

¹ สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงานในงานอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

¹ Industrial Energy Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Uttaradit 53000

² สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

² Construction Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Uttaradit 53000

³ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

³ Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน (ต่อเนื่อง) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

⁴ Energy Conservation Engineering (Continuing Program), School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290

¹Corresponding author: Tel.: 09-86196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

Abstract

This study aimed to evaluate the feasibility of producing fuel pellets from spent mushroom substrate (SMS) of oyster mushrooms, focusing on their physical properties, energy potential, and economic viability. The SMS materials were collected from mushroom farms after six months of use and pelletized using a flat-die biomass pellet machine with a 8 mm die diameter to compare the performance between 2-roller and 3-roller compression systems. SMS was mixed with cassava starch binder at ratios of 100:0, 80:20, and 60:40 (w/w). The results showed that the 3-roller system produced pellets with a density of 426–529 kg/m³ and significantly reduced moisture content. The heating value of the pellets increased with higher binder proportions, with the 60:40 ratio achieving the highest calorific value of 12.74 MJ/kg. All pellet formulations demonstrated sufficient durability and low dust content, meeting ISO 17829 and DINplus standards. In terms of economics, the 100:0 formulation yielded the lowest production cost, highest profit, and a payback period of 0.20–0.35 years. The 80:20 formulation required a selling price of at least 8 THB/kg to break even, while the 60:40 formulation resulted in losses under all scenarios. Increasing binder content improved the physical and energy characteristics but also raised production costs. In conclusion, fuel pellets produced from spent mushroom substrate can achieve enhanced density and energy value through appropriate binder ratios and moisture control, making them a suitable and economically viable green fuel alternative to firewood.

Keywords: Spent mushroom substrate, Biomass pellets, Feasibility study, Sustainable resource utilization, Renewable energy

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจากก้อนเห็ดนางฟ้าใช้แล้ว (SMS) โดยมุ่งเน้นสมบัติทางกายภาพ พลังงาน และศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ วัสดุใช้ในการทดลองเก็บจากฟาร์มเพาะเห็ดหลังใช้งานครบ 6 เดือน ใช้เครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบ Flat Die ขนาดรูผ่านอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm เพื่อเปรียบเทียบระบบอัด 2 และ 3 ลูกกลิ้ง และทดสอบการผสม SMS กับแป้งมันสำปะหลังสัดส่วน 100:0 80:20 และ 60:40 พบว่า ระบบ 3 ลูกกลิ้ง ให้ความหนาแน่น $426\text{--}529\text{ kg/m}^3$ และลดความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพค่าความร้อนของเม็ดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนตัวประสาน โดยสูตร 60:40 ให้ค่าความร้อนสูงสุด 12.74 MJ/kg ทุกสูตรมีความคงทนและฝุ่นละออง ผ่านมาตรฐาน ISO 17829 และ DINplus ด้านเศรษฐศาสตร์ สูตร 100:0 มีต้นทุนต่ำ กำไรสูงสุด และคืนทุน $0.20\text{--}0.35\text{ year}$ สูตร 80:20 ต้องราคาขาย $\geq 8\text{ B/kg}$ จึงคืนทุนได้ ส่วนสูตร 60:40 ขาดทุนทุกกรณี การเพิ่มสัดส่วนตัวประสานช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และพลังงาน แต่เพิ่มต้นทุน สรุปได้ว่า เม็ดเชื้อเพลิงจากก้อนเห็ดใช้แล้วสามารถปรับปรุงความหนาแน่นและค่าพลังงานได้ด้วยการเลือกสัดส่วนผสมและควบคุมความชื้นอย่างเหมาะสม ทำให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนการใช้ฟืนได้ และมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

คำสำคัญ: ก้อนเห็ดใช้แล้ว เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ความเป็นไปได้ การใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน พลังงานทดแทน

การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนแบบต่อเนื่องในระบบเปิดลำคลองแม่ข่า Wastewater Treatment Using Continuous Micro-Nano Bubbles Technology in the Open Ma Kha Canal System

สมภาพ บุญศรี¹, นำพร ปัญญาใหญ่², รณชาติ มั่นศิลป์¹, และ ธนวรรณ วัชรดำรงศักดิ์^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง
จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย
จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road Chang Phueak
Subdistrict, Mueang District, Chiang Mai Province 50300

²Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, San Sai, Chiang Mai, 50290

*Corresponding author: Tel.: +66 92351-5465 E-mail address: thanawatwatcharadumrongsak@gmail.com

Abstract

This research aims to design a wastewater treatment plant in the Mae Kha canal open system. To test efficiency and compare with the surface water standard, the wastewater treatment machine was designed to use continuous micro-nano bubble technology, with a flow rate of 4 m³/h. Because the water quality in the canal is at level 5, the highest quality, it is unsuitable for consumption. The oxygen content is lower than the standard, and the water is contaminated with oil and fat, as well as Escherichia coli (E. coli) and phosphorus, all of which are higher than usual. This causes the water to smell bad and become cloudy, necessitating the expenditure of hundreds of millions of baht on wastewater treatment each year. The result is the design and construction of a wastewater treatment machine using continuous micro-nano bubble technology with a flow rate of 4 m³/h. The test results showed that the quality of Mae Kha Canal water has improved. The DO values have increased on average across the three tests, from the sample values of 0.60, 0.73, 0.67 mg/L to the highest values of 1.58, 1.51, 1.37 mg/L, representing 62.03, 51.66, and 51.09 percent, respectively. BOD values decreased in all three tests. The sample water values of 22.2, 31.5, and 14.60 mg/L decreased to 20.2, 29.2, and 10.4 mg/L, representing decreases of 9.0, 7.30, and 28.77 percent, respectively. Phosphorus values from all three tests decreased from the sample water values of 2.00, 2.04, 1.68 mg/L to 1.19, 1.73, 1.36 mg/L, representing 40.5, 15.20, and 17.58 percent, respectively. The prototype wastewater treatment machine using continuous micro-nano bubble technology is movable and effective, resulting in a better wastewater environment and benefiting society, while being environmentally friendly.

Keywords: Wastewater treatment, Micro/Nano bubble technology

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเครื่องบำบัดน้ำเสียในระบบเปิดลำคลองแม่ข่า เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำผิวดิน ด้วยการออกแบบเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนแบบต่อเนื่อง มีอัตราการไหล 4 m³/h เพราะคุณภาพน้ำลำคลองแม่ข่าอยู่ในระดับที่ 5 คือ คุณภาพเสียสูงสุด ไม่สามารถนำมาใช้อุปโภค

บริโภคน้ำได้ มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่ามาตรฐาน มีสารปนเปื้อนหรือเจือปนน้ำมันและไขมัน เช่น อีโคไลในเตรต และฟอสฟอรัส สูงกว่าปกติ ทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นและมีสีขุ่นดำ ผลทดสอบพบว่า คุณภาพของน้ำคลองแม่ข่ามีคุณภาพที่ดีขึ้น ค่า DO มีค่าเฉลี่ย เพิ่มขึ้นจากการทดสอบ 3 ครั้ง จากค่าน้ำตัวอย่าง 0.60, 0.73, 0.67 mg/L เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 1.58, 1.51, 1.37 mg/L คิดเป็น ร้อยละ 62.03, 51.66, 51.09 ตามลำดับ ค่า BOD มีค่าลดลงทั้ง 3 การทดสอบ ค่าน้ำตัวอย่าง 22.2, 31.5, 14.60 mg/L มีค่า ลดลงเป็น 20.2, 29.2, 10.4 mg/L คิดเป็นร้อยละ 9.0, 7.30, 28.77 ค่า Phosphorus จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง มีค่าลดลง จากค่าน้ำตัวอย่าง 2.00, 2.04, 1.68 mg/L ลดลงเป็น 1.19, 1.73, 1.36 mg/L คิดเป็นร้อยละ 40.5, 15.20, 17.58 ตามลำดับ เครื่องต้นแบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนบับเบิลแบบต่อเนื่องสามารถเคลื่อนย้ายได้ และเทคโนโลยีมี ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียส่งผลให้น้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้นและส่งผลดีต่อสังคมเป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การบำบัดน้ำเสีย, เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล

การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษา
ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

Geospatial Artificial Intelligence for Solar Energy Potential Analysis: A Case Study of
Northern and Northeastern Thailand

วัชรพงศ์ ศรีแสง¹ พรรวินท์ นารีกุลภักทรวงศ์² ปรีชา ศรีประภาคาร² และ ยุทธนา อุไรชื่น^{2*}
Wacharapong Srisang¹ Phornrawin Narikulphattarawong² Preecha Sriprapakhan²
and Yuthana Uraichuen^{2*}

¹ หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง
52000

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

¹Information Technology Program, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University
of Technology Lanna, Lampang 52000, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150

¹Corresponding author: Tel.: 08-19236136. E-mail address: yuthana.u@msu.ac.th

Abstract

This study investigates the solar energy potential in Thailand by integrating geospatial artificial intelligence (GeoAI) techniques with ERA5-Land climate reanalysis data through the Google Earth Engine (GEE) platform. The study areas include Lampang Province in the Northern region and Nakhon Ratchasima Province in the Northeastern region, with the aim of comparing surface solar radiation patterns and environmental factors affecting photovoltaic electricity generation. The analysis of surface solar radiation downwards data covers five years from January 1, 2020, to December 31, 2024, totaling 1,827 observation days. Results show a significant difference in solar radiation levels between the two provinces: Nakhon Ratchasima has a mean daily solar radiation of 18.6 MJ/m²/day (SD = 4.55) while Lampang has a mean of 17.9 MJ/m²/day (SD = 4.80). The maximum recorded values are 27.2 MJ/m²/day for Nakhon Ratchasima and 27.0 MJ/m²/day for Lampang, with minimum values of 2.03 and 2.60 MJ/m²/day, respectively. Statistical analysis confirms a significant difference ($t_{3652} = 4.68$ $p < .001$) with Nakhon Ratchasima exhibiting higher average solar radiation and lower data variability. A significant negative correlation between rainfall and solar radiation was also observed, highlighting the impact of the rainy season on solar energy availability. This approach demonstrates the capability of using open climate data and cloud-based geospatial processing for practical large-scale renewable energy assessment. The findings can support policy-making, investment planning, and sustainable development of solar energy across Thailand.

Keywords: Geospatial Artificial Intelligence, Solar Energy ERA5-Land Google Earth Engine Renewable Energy

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย โดยการผสมผสานเทคนิคปัญญาประดิษฐ์เชิงภูมิสารสนเทศ (GeoAI) กับข้อมูลวิเคราะห์ภูมิอากาศ ERA5-Land ผ่านแพลตฟอร์ม Google Earth Engine (GEE) พื้นที่ศึกษาตัวอย่าง

ประกอบด้วยจังหวัดลำปางในภาคเหนือ และจังหวัดนครราชสีมาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบรังสีสุริยะที่ผิวพื้นและปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ ได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ผิวพื้น (surface solar radiation downwards) ครอบคลุมระยะเวลา 5 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2563 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567 รวมจำนวนวันสังเกตการณ์ 1,827 วัน พบว่าจังหวัดนครราชสีมามีค่าเฉลี่ยรังสีสุริยะสูงกว่าลำปางอย่างมีนัยสำคัญ โดยนครราชสีมามีค่าเฉลี่ย $18.6 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.55) ขณะที่ลำปางมีค่าเฉลี่ย $17.9 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.80) ค่าสูงสุดในนครราชสีมาอยู่ที่ $27.2 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ และลำปาง $27.0 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ส่วนค่าต่ำสุดของทั้งสองพื้นที่อยู่ที่ 2.03 และ $2.60 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ตามลำดับ ผลการทดสอบทางสถิติ ($t_{3652} = 4.68$ $p < .01$) แสดงให้เห็นความแตกต่างที่มีนัยสำคัญระหว่างสองพื้นที่ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญระหว่างปริมาณน้ำฝนและรังสีสุริยะ สะท้อนถึงผลกระทบของฤดูกาลฝนต่อการเข้าถึงพลังงานแสงอาทิตย์ วิธีการนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ข้อมูลภูมิอากาศแบบเปิดและเทคโนโลยีคลาวด์ในการประเมินพลังงานทดแทนในระดับพื้นที่กว้างอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการวางนโยบาย การวางแผนลงทุน และการพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์อย่างยั่งยืนในประเทศไทย

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์เชิงภูมิสารสนเทศ พลังงานแสงอาทิตย์ ERA5-Land Google Earth Engine ศักยภาพพลังงาน

**การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้
ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร : กรณีศึกษาการปลูกกระเจี๊ยบแดง**
**Performance Evaluation of Conventional PV and Colored PV (Red) Panels on Electricity
Generation and Roselle Growth under an Agrivoltaics System**

รุ่งเพชร กองนอก¹ ศศิวิมล ทรงไตร^{2*}, พีระวุฒิ ชินวรรังสี³, สิริมงคล สังฆะวงศ์², สุพจน์ โสดารัตน์³, นพดล นันทวงศ์²,
เกรียงไกร โมสาเลี่ยนนท์⁴ และ กอบศักดิ์ ศรีประภา²
Rungphet Kongnok¹ Sasiwimon Songtra^{2*}, Perawut Chinnavornrungssee³, Sirimongkon Sangkhawong³, Supoj
Sodarat³, Noppadon Nuntawong², Kriengkrai Mosaleeyanon⁴ and Kobsak Sriprapha²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000
²ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120
³ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120
⁴ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,
Nakhon Ratchasima 30000

²National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC),
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120

³National Energy Technology Center (ENTEC),
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120

⁴National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC),
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120

*Corresponding author: Tel.: 02-5647000 ext. 2718. E-mail address: sasiwimon.songtra@nectec.or.th

Abstract

This study investigates the effects of different photovoltaic (PV) panel structures on plant growth under an agrivoltaics system, using roselle, an economically important crop, as a case study. The experiment was conducted at the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Pathum Thani, Thailand, over 30 days under two PV configurations: Conventional PV and Colored PV (Red). The results showed that the Conventional PV system generated a higher average electricity output of 84 kWh/day, compared with 40 kWh/day from the Colored PV (Red). However, both systems exhibited similar performance ratios (PR) of approximately 70%. Notably, the Colored PV (Red) transmittance (%TT) exceeded 55% for infrared light, and the system maintained a lower temperature, which enhanced light availability for photosynthesis. As a result, roselle grown under the Colored PV (Red) panels exhibited superior crop quality, with an average inflorescence length of 57 cm and a fresh weight of 10 g, outperforming both field conditions and growth under Conventional PV. These findings suggest that although the Colored PV (Red) produces less electricity, it significantly supports plant growth and crop quality, demonstrating strong potential for agrivoltaics applications that balance energy generation, food security, and environmental sustainability.

Keywords: Photovoltaic, Solar Cell, Colored PV, Agrivoltaics System, Roselle

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตของพืชภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร (Agrivoltaics System) โดยใช้พืชเศรษฐกิจ คือ กระเจี๊ยบแดง เป็นกรณีศึกษา การดำเนินการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี เป็นระยะเวลา 30 วัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิด คือ Conventional PV และ Colored PV (Red) พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีปริมาณการผลิตไฟฟ้ามากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) แต่ค่า Performance Ratio (PR) ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 70% โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) สามารถส่งผ่านแสงในช่วง Infrared ได้มากกว่า 55% และมีอุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ซึ่งทำให้ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช เป็นผลให้กระเจี๊ยบแดงที่ปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีคุณภาพผลผลิตที่ดีกว่า โดยมีความยาวช่อดอกเฉลี่ย 57 cm และน้ำหนักเปียกประมาณ 10 g มากกว่าการปลูกแบบกลางแจ้งและการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ดังนั้นถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) จะผลิตไฟฟ้าได้น้อย แต่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและมีคุณภาพผลผลิตที่ดีกว่า จึงมีศักยภาพต่อการประยุกต์ใช้ในระบบ Agrivoltaics

คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร, กระเจี๊ยบแดง, แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีส้มสวยงาม

การพัฒนาต้นแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลงปลูกพืชแถวตรงที่ถูกควบคุมจากระยะไกลโดยใช้คลื่นวิทยุ

Developing a Prototype of Solar-Powered Mowers for Weed Control in Straight-Row Crop Fields Operated by a Radio Frequency Remote Control

ยุทธพงษ์ ตาระปิน, นิกราน หอมดวง, กิตติกร สาสุจิตต์, สุระพล รียะนา*
Yuthapong Tarapin, Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit, Surapon Riyana*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290
School of Renewable Energy, Maejo University, Nongharn, Sansai, Chiangmai, 50290

*Corresponding author: Tel.: 0933036346. E-mail address: surapon_r@mju.ac.th

Abstract

This work aims to develop a solar-powered mower for weed control in straight-row crop fields, controlled by a 2.4 GHz RF remote. Its drive system is based on differential steering systems. Moreover, the farmer can view the mower's environment on the remote control using the ESP32-CAM. The dimension of the mower is 1.30 m × 1.50 m × 0.75 m. The frame of the mower is constructed from 3.81 cm steel square tubes. The mower's primary electrical source is two 200 W solar panels, along with 12 VDC, 20 Ah batteries. Aside from the solar panels, the battery can be recharged by 220 VAC. A 12,000 rpm motor drives the blade for cutting or destroying weeds, and the blade measures 15 cm long. The mower's drive motor has a torque of 50 kg-cm. From the experimental results, the battery voltage decreases from 12.6 VDC to 12.45 VDC after the mower runs continuously for 1 hour, i.e., the battery voltage decreases by 0.025 VDC every 10 minutes. The battery capacity decreases from 40 Ah to 38.46 Ah, i.e., it decreases by 0.26 Ah every 10 minutes. With a control range of up to 70 m, the remote-control success rate is at least 97.05% without signal obstructions and 91.14% with obstructions. Furthermore, we found that the mower has a payback period of 0.80 years. It has a weed-destroying percentage of 90%. However, the mower's performance will depend on the farmer's ability to operate it.

Keywords: Weed removal machine, Solar energy, Differential steering, ESP32-CAM, RF Remote control

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการเพาะปลูกพืชแบบแถวตรง โดยใช้ความถี่วิทยุ เป็นคลื่นสัญญาณสำหรับการควบคุมระยะไกลร่วมกับระบบเลี้ยวดีเฟอเรนเชียลและกล้องอีเอสพี 32 แคม รถตัดหญ้าที่พัฒนามีขนาด 1.30 m × 1.50 m × 0.75 m โครงสร้างผลิตจากเหล็กกล่องขนาด 3.81 cm แหล่งพลังงานหลักของเครื่องคือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์กำลังผลิต 200 w จำนวน 2 แผง สำหรับชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 VDC ความจุ 20 Ah จำนวน 2 ก้อน นอกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบตเตอรี่ของเครื่องตัดหญ้ายังสามารถชาร์จไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 VAC ได้ ใบมีดสำหรับการตัดหรือทำลายวัชพืชขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์มีความเร็วรอบ 12,000 rpm โดยมีขนาดใบมีด 15 cm ส่วนมอเตอร์ขับเคลื่อนของเครื่องมีค่ากำลังบิดที่ 50 kg-cm ผลการทดลองพบว่า แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงจาก 12.6 VDC เหลือ

12.45 VDC หลังจากเครื่องทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 1 h หรือคิดเป็นการลดลง 0.025 VDC ทุกๆ 10 min ความจุแบตเตอรี่ลดลงจาก 40 Ah เหลือ 38.46 Ah หรือคิดเป็นการลดลง 0.26 Ah ทุกๆ 10 min เครื่องสามารถควบคุมได้ไกลสูงสุด 70 m โดยมีอัตราความสำเร็จของการควบคุมไม่น้อยกว่า 97.05% ในสภาวะที่ไม่มีสิ่งกีดขวางสัญญาณ และ 91.14% ในสภาวะที่มีสิ่งกีดขวางมากไปกว่านั้นผู้วิจัยพบว่าจุดคุ้มทุนของรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์คือ 0.80 ปี รถตัดหญ้ามอเตอร์การทำลายวัชพืชเท่ากับ 90% อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเครื่องตัดหญ้าจะขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้ควบคุม

คำสำคัญ: รถตัดหญ้า, พลังงานแสงอาทิตย์, ระบบเลี้ยงแบบดิฟเฟอเรนเชียล, ไอเอสพี 32 แคม, การควบคุมระยะไกล

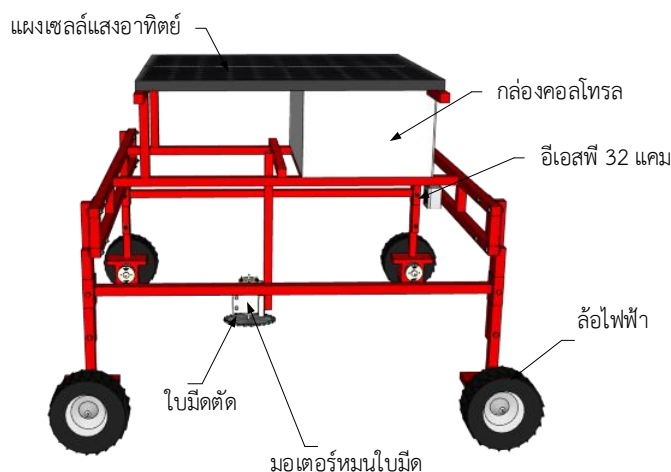
บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศเกษตรกรรม [1] เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่จะประกอบอาชีพหลักทางด้านการทำเกษตรกรรมสำหรับใช้ในการเลี้ยงชีพและสร้างรายได้ให้กับครอบครัว และจากการศึกษาพบว่าเกษตรกรไทยส่วนใหญ่จะทำเกษตรในรูปแบบกสิกรรม [2] ด้วยเหตุผลนี้หนึ่งในอุปสรรคหรือปัญหาหลักที่เกษตรกรจะต้องพบเจอและต้องทำการแก้ไขปัญหาลดเวลาตั้งแต่ปลูกจนถึงก่อนการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร คือ ปัญหาวัชพืชที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทำการเกษตร นั่นก็คือหากไม่มีการกำจัดวัชพืชอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้พืชที่ปลูกไม่สมบูรณ์หรือผลผลิตไม่มีคุณภาพเนื่องจากสารอาหารแสงแดด และน้ำที่พืชต้องการจะถูกวัชพืชแย่ง มากไปกว่านั้นยังพบอีกว่าวัชพืชยังเป็นต้นเหตุของปัญหาการระบาดของโรคพืชและแมลงศัตรูพืชเนื่องจากวัชพืชเป็นแหล่งสะสมโรคพืช และเป็นที่อยู่อาศัยของแมลงศัตรูพืช โดยทั่วไปวิธีการกำจัดวัชพืชเบื้องต้นในพื้นที่ทำการเกษตรกรรมคือการถอนวัชพืชโดยใช้มือ [3, 4] ข้อดีของการกำจัดวัชพืชวิธีนี้คือง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะไม่ต้องใช้อุปกรณ์ใดๆ ในการกำจัดวัชพืช แต่อย่างไรก็ตามวิธีการกำจัดวัชพืชโดยวิธีนี้มักจะไม่มีความมีประสิทธิภาพเมื่อวัชพืชที่มีรากที่แข็งแรงหรือโตเต็มที่ มีความหนาแน่น และมีพื้นที่ขนาดใหญ่ เพื่อแก้ไขปัญหานี้เกษตรกรจึงนำเอาเครื่องจักรกลทางการเกษตรมาใช้ในการกำจัดวัชพืช เช่น รถไถ รถพรวนดิน และอื่นๆ ถึงแม้วิธีการกำจัดวัชพืชวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการถอนวัชพืชโดยใช้มือมนุษย์ แต่จากการศึกษาของผู้วิจัยพบว่าการใช้งานเครื่องจักรกลทางการเกษตรยังมีปัญหาหลายๆ ด้านที่เกษตรกรจะต้องพิจารณาเพื่อนำมาใช้งานคือมีต้นทุนสูง มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล ขาดแคลนแรงงานที่มีทักษะ และปัญหาเกี่ยวกับสภาพพื้นที่และภูมิประเทศที่ไม่เอื้ออำนวย นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความพร้อมของอะไหล่ การเข้าถึงแหล่งเงินทุน และความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องจักรอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปพลังงานที่ใช้ในเครื่องจักรกลทางการเกษตรคือน้ำมันเชื้อเพลิงหรือพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ข้อดีของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องจักรกลคือมีความสะดวกและมักจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้พลังงานไฟฟ้า [5] แต่การใช้น้ำมันจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเครื่องจักรที่ใช้ไฟฟ้า เพราะการเผาไหม้ของน้ำมันจะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) ออกมา [6] ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) หรือภาวะโลกร้อน [6] โดยเหตุผลนี้จึงมีการส่งเสริมให้มีการนำเอาพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในภาคส่วนของการเกษตรมากขึ้น เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานสะอาดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง [7] มากไปเครื่องจักรกลทางการเกษตรจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืชเฉพาะในช่วงก่อนการปลูกพืชเท่านั้น ด้วยเหตุผลนี้การใช้สารเคมีทางการเกษตรจึงเป็นหนึ่งทางเลือกที่เกษตรกรมักจะเลือกใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดวัชพืชในพื้นที่ขนาดใหญ่และพื้นที่ที่มีวัชพืชจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีต้นทุนที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีทางการเกษตรมีข้อเสียสำคัญที่เกษตรกรจะต้องพิจารณาเพื่อนำมาใช้งานคือหากมีการใช้สารเคมีที่ไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การใช้มากเกินไปความเหมาะสม การใช้ชนิดหรือประเภทของสารเคมีที่ไม่เหมาะสม และการใช้โดยขาดความระมัดระวัง อาจนำไปสู่ปัญหาสุขภาพของเกษตรกรและผู้บริโภคได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การระคายเคือง การแพ้ การเกิดโรคเรื้อรัง หรือแม้กระทั่งเป็นพิษร้ายแรงถึงชีวิต นอกจากนี้สารเคมียังสามารถตกค้างในดิน น้ำ และอากาศ ทำให้เกิดมลพิษและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ นอกจากนี้จากการศึกษาของผู้วิจัยยังพบอีกว่าการปลูกพืชในหลายพื้นที่เกษตรกรรมของประเทศไทยจะมีการปลูกพืชแบบแถวตรง [8] เนื่องจากเป็นวิธีที่ช่วยให้การจัดการเกี่ยวกับงานทางด้านอารักขาพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการให้น้ำ การใส่ปุ๋ย และการกำจัดวัชพืช รวมไปถึงการเก็บเกี่ยวผลผลิต

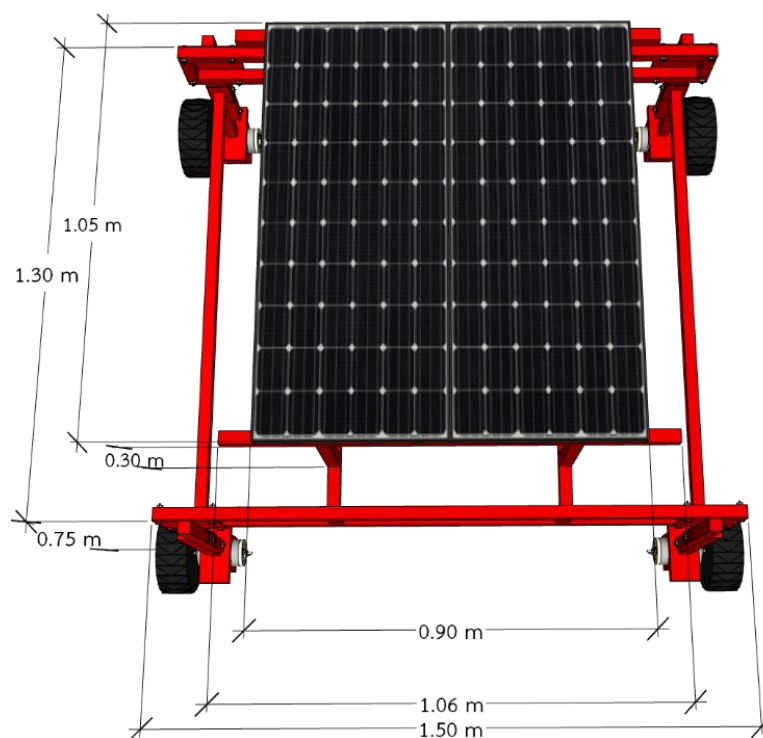
จากปัญหาและข้อจำกัดต่างๆ เกี่ยวกับวัชพืชและวิธีการกำจัดวัชพืชในพื้นที่เกษตรกรรมที่ผู้วิจัยได้กล่าวถึงข้างต้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอรถตัดหญ้าที่สามารถควบคุมจากระยะไกลสำหรับกำจัดวัชพืชในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปลูกพืชแบบที่เป็นแถวที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถลดต้นทุนเกี่ยวกับการใช้พลังงานในเครื่องจักรกลสำหรับกำจัดวัชพืชในระยะยาว [9] และเพิ่มความสะดวกรสบายและความปลอดภัยในด้านใช้งานแก่เกษตรกร โดยรถตัดหญ้าที่นำเสนอจะใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์เป็นหลักและจะใช้คลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz ในการสื่อสารระหว่างระบบควบคุมและตัวรถตัดหญ้าเพื่อควบคุมการทำงาน เช่น เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา ตัดหญ้า และหยุดตัดหญ้า และเพื่อให้วงล้อของรถตัดหญ้าไม่กว้างเกินไปและเหมาะสมในการใช้งานในพื้นที่จำกัดรถตัดหญ้าที่นำเสนอจะใช้ระบบการเลี้ยวแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) และเพื่อให้ผู้บังคับสามารถเห็นสภาพแวดล้อมที่อยู่ข้างหน้ารถตัดหญ้าผู้วิจัยจะใช้ไอเอสพี 32 แคม (ESP32-CAM) ในการแสดงสภาพแวดล้อมที่อยู่ข้างหน้ารถตัดหญ้าแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser)

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกควบคุมจากระยะไกลสำหรับการปลูกพืชแบบแถวตรง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยจะมีขนาดที่ 1.30 m x 1.50 m x 0.75 m ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนรูปที่ 3 คือรูปจริงของเครื่องตัดหญ้าที่นำเสนอ โครงสร้างหลักของเครื่องตัดหญ้าที่นำเสนอจะสร้างจากเหล็กกล่องขนาด 3.81 cm มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 แผงต่ออนุกรมกันด้านบนของโครงสร้าง โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงให้กำลังไฟฟ้า 100 w ดังนั้นกำลังไฟฟหารวมที่จะได้คือ 200 w ทำหน้าที่ในการชาร์จไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ขนาด 12 VDC 20 Ah จำนวน 2 ก้อนต่อขนานกันผ่านชุดควบคุมการชาร์จ ชุดควบคุมการชาร์จมีคุณสมบัติในการป้องกันการชาร์จเกิน ป้องกันการคายประจุเกิน และควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่ ในส่วนของระบบการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าจะใช้ไดรฟ์มอเตอร์ (Drive Motor) แยกฝั่งซ้ายและขวาแบบอิสระเพื่อให้สามารถควบคุมการเลี้ยวแบบดิฟเฟอเรนเชียลได้ โดยมอเตอร์ที่ใช้จะมีแรงบิดสูงสุด 50 kg-cm รถตัดหญ้าจะถูกควบคุมการทำงานผ่านรีโมทคอนโทรลที่ใช้คลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz ส่วนกลไกสำหรับใช้ในการตัดหญ้าจะใช้มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบ 12,000 RPM ร่วมกับใบมีดตัดหญ้าขนาดความยาว 15 cm ที่ติดตั้งกับเพลายึดแบบถาวร สำหรับการส่งสัญญาณภาพจากกล้องไอเอสพี 32 แคม จะทำงานผ่านเครือข่ายไวไฟที่ตัวของไอเอสพี 32 แคมสร้างขึ้นในโหมดแอคเซสพอยท์ (Access Point) และผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงภาพแบบเรียลไทม์ (Realtime) ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ในมือถือหรือคอมพิวเตอร์ โดยภาพที่ส่งออกมาเป็นวิดีโอสดเพื่อให้เกษตรกรสามารถเห็นสภาพแวดล้อมด้านหน้า



รูปที่ 1 มุมมองการออกแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์

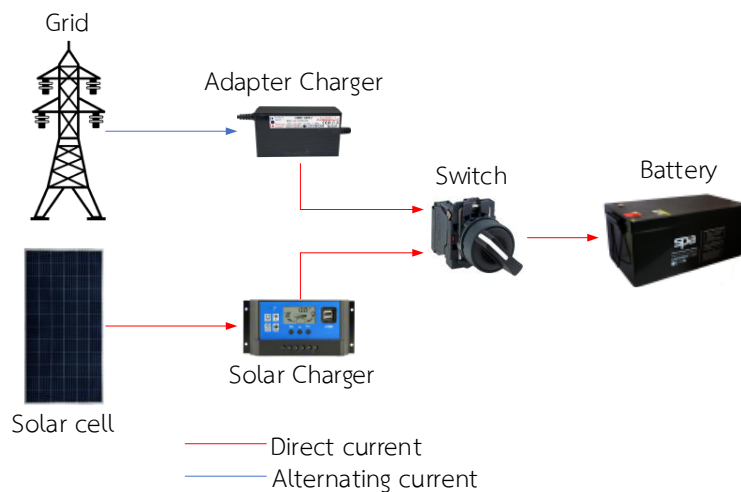


รูปที่ 2 ขนาดของเครื่องตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 3 รถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำเสนอ

แหล่งพลังงานไฟฟ้าหลักของรถตัดหญ้าที่นำเสนอจะมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และแหล่งไฟฟ้าสำรองของรถตัดหญ้าจะมาจากระบบสายส่งไฟฟ้าที่ให้บริการจากภาครัฐ ซึ่งระบบไฟฟ้าสำรองจะถูกเลือกใช้งานเมื่อเกษตรกรต้องการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ด้วยตนเอง โดยเกษตรกรสามารถเลือกโหมดการเพิ่มประจุให้กับแบตเตอรี่ระหว่างแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์และไฟฟ้าจากภาครัฐ โดยการปิดสวิตช์เพื่อควบคุมการทำงานของระบบประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ได้ตามความต้องการ จะมีหลักการดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการเลือกประจุแบตเตอรี่สำหรับรถตัดหญ้า

$$P = GA\eta \quad (1)$$

โดยที่

- P คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผง (m^2)
- G คือ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m^2)
- η คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

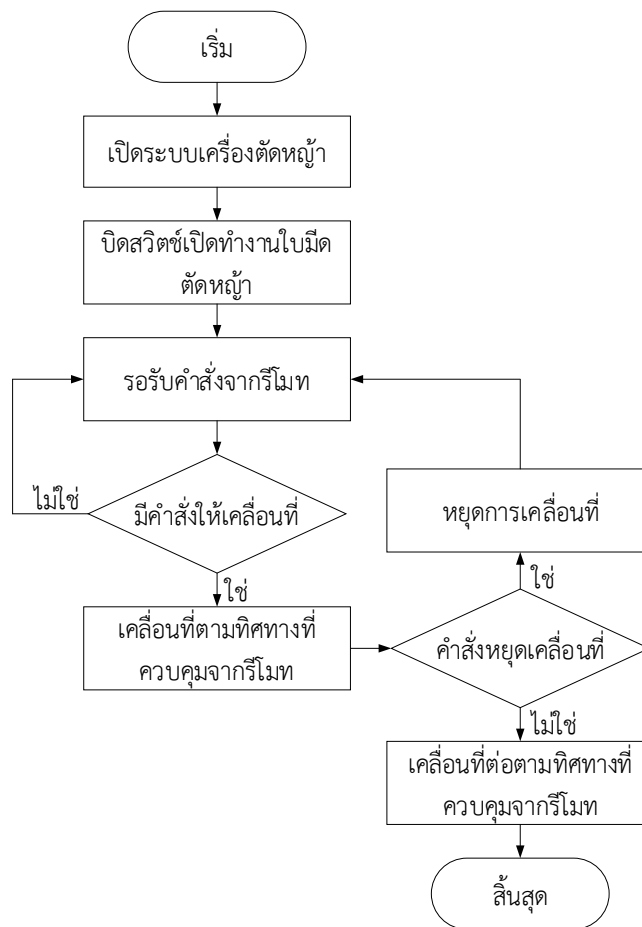
พลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกส่งเข้าสู่ระบบควบคุมการชาร์จประจุให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมแรงดันและกระแสให้เหมาะสมต่อแบตเตอรี่ โดยสามารถคำนวณพลังงานที่จ่ายให้แบตเตอรี่ได้จากสมการที่ 2

$$E = Pt \quad (2)$$

โดยที่

- E คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าแบตเตอรี่ (Wh)
- P คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง (W)
- t คือ ระยะเวลาในการชาร์จ (h)

จากรูปที่ 5 คือการแสดงกระบวนการทำงานของระบบรถตัดหญ้า โดยกระบวนการทำงานของรถตัดหญ้าจะเริ่มจากเกษตรกรเปิดการทำงานระบบของรถตัดหญ้า หลังจากเปิดการทำงานรถตัดหญ้าจะเข้าสู่โหมดรอรับคำสั่งจากรีโมทควบคุมที่เชื่อมต่อกับรถตัดหญ้า ในโหมดนี้รถตัดหญ้าจะหยุดการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ เพื่อรอรับคำสั่งการทำงานจากรีโมทควบคุม เมื่อรถตัดหญ้าได้รับคำสั่งจะทำการสั่งให้ระบบต่างๆ ทำงานให้สอดคล้องตามคำสั่งที่ได้รับ เช่น เดินไปข้างหน้า เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา ถอยหลัง หรือหยุดเคลื่อนที่ เป็นต้น โดยระบบควบคุมเครื่องตัดหญ้าจะทำงานวนลูปไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกษตรกรทำการปิดการทำงานของรถตัดหญ้า



รูปที่ 5 กระบวนการทำงานของระบบรถตัดหญ้า

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์จุดต้นทุนของเครื่องตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพิจารณาทั้งกรณีที่ใช้แบตเตอรี่ชาร์จจากไฟฟ้าที่ให้บริการจากภาครัฐ และกรณีที่ชาร์จจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว เพื่อนำไปเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและเวลาต้นทุนของการลงทุน โดยใช้สูตรคำนวณจุดต้นทุนดังนี้

$$PB = \frac{TC}{AB} \quad (3)$$

โดยที่

- PB คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
- TC คือ ต้นทุนทั้งหมด (บาท)
- AB คือ ผลประโยชน์เฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาต้นแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลงปลูกพืชแถวตรงที่ถูกควบคุมจากระยะไกลโดยใช้คลื่นวิทยุ เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นด้านการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับใช้งานในภาคส่วนเกษตรกรรม เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของรถตัดหญ้า ผู้วิจัยจะแสดงถึงอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถตัดหญ้า ประสิทธิภาพในด้าน

การควบคุมตามระยะทางของรถตัดหญ้าทั้งภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวาง ประสิทธิภาพของการตัดหญ้าและแสดงถึงจุดคุ้มทุนของรถตัดหญ้า

การใช้พลังงานไฟฟ้า

การทดลองที่หนึ่งผู้วิจัยจะแสดงให้เห็นถึงอัตราการงานพลังงานไฟฟ้า (อัตราการลดลงของแรงดันในแบตเตอรี่) ตามระยะเวลาการใช้งาน โดยจะทำการเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าในแบตเตอรี่เมื่อใช้งานรถตัดหญ้าในระยะเวลา 1 h และวัดแรงดันในแบตเตอรี่ทุกๆ 10 min โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในเครื่องตัดหญ้าจะเป็นชนิดลิเธียมฟอสเฟตขนาด 12 V ความจุ 20 Ah จำนวน 2 ก้อน ที่ถูกต่อแบบขนานกัน โดยโหลดที่ใช้พลังงานทั้งหมดของรถตัดหญ้าที่คำนวณได้คือ 1.5 A ประกอบด้วยการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงสุด การทำงานของมอเตอร์ใบมีดตัดหญ้า ระบบควบคุมระยะไกล และกล่องอิเล็กทรอนิกส์ 32 แคมที่มีการส่งภาพเป็นวิดีโอออกมาตลอดระยะเวลาในการทำงาน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในหนึ่งชั่วโมง

เวลา (min)	กระแสที่ใช้ไป (Ah)	ความจุที่เหลือในแบตเตอรี่ (Ah)	เปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ (%)	แรงดันที่วัดได้ (V)
0	0	40	100	12.60
10	0.26	39.74	99.35	12.58
20	0.51	39.49	98.73	12.55
30	0.77	39.23	98.08	12.53
40	1.02	38.98	97.45	12.50
50	1.28	38.72	96.80	12.48
60	1.54	38.46	96.15	12.45

จากตารางที่ 1 พบว่าจากข้อมูลพบว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลากการทดสอบ โดยแบตเตอรี่จะมีแรงดันเริ่มต้นที่ 12.6 V และลดลงเหลือ 12.45 V เมื่อถูกใช้งานไป 1 h นั่นก็คือแรงดันไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 0.025 V ต่อ 10 min ในส่วนความจุที่เหลือของแบตเตอรี่เกิดจากการคำนวณตามหลักทฤษฎี ภายใต้โหลดคงที่ 1.5 A พบว่า ความจุลดลงจาก 40 Ah เหลือ 38.46 Ah หรือคิดเป็นอัตราการลดลงเฉลี่ยประมาณ 0.26 Ah ต่อช่วงเวลา 10 นาที ดังนั้นหลังจากใช้งาน 1 h แบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต จะมีความจุของแบตเตอรี่ที่ยังเหลือใช้ (State of Charge: SoC) ประมาณ 96% ของความจุเต็ม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการคายประจุแบบใกล้เคียงเส้นตรง (Quasi-linear Discharge) ของแบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต

ประสิทธิภาพระบบควบคุมรถตัดหญ้า

การทดลองที่สองผู้วิจัยจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมรถตัดหญ้าตามระยะทางของรถตัดหญ้าทั้งภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยทำการทดลองในระยะทางรวม 100 m มีควบคุมการเคลื่อนที่ให้มีการเดินหน้าและถอยหลังอย่างละ 1 m จำนวน 10 ครั้ง รวมถึงเลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวาในมุม 90° อย่างละ 10 ครั้ง ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง คือ ผนังอิฐมวลเบาที่มีความหนา 10.16 cm และไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยการทดสอบจะเว้นระยะห่างทุกๆ 10 m ซึ่งผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมรถตัดหญ้าในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

ระยะทาง (m)	ผลลัพธ์จากการบังคับจำนวน 10 ครั้ง (ไม่มีสิ่งกีดขวาง)			
	เดินหน้า (ครั้ง)	ถอยหลัง (ครั้ง)	เลี้ยวซ้าย (ครั้ง)	เลี้ยวขวา (ครั้ง)
0	10	10	10	10
10	10	10	10	10
20	10	10	10	10
30	10	10	10	10
40	10	10	10	10
50	10	10	10	10
60	10	10	10	10
70	10	10	10	10
80	10	10	10	10
90	9	9	8	9
100	8	8	8	8

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมรถตัดหญ้าในกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง

ระยะทาง (m)	ผลลัพธ์จากการบังคับจำนวน 10 ครั้ง (มีสิ่งกีดขวาง)			
	เดินหน้า (ครั้ง)	ถอยหลัง (ครั้ง)	เลี้ยวซ้าย (ครั้ง)	เลี้ยวขวา (ครั้ง)
0	10	10	10	10
10	10	10	10	10
20	10	10	10	10
30	10	10	10	10
40	10	10	10	10
50	10	10	10	10
60	10	10	10	10
70	9	9	10	9
80	9	8	8	8
90	7	7	8	6
100	5	6	6	6

จากตารางที่ 2 และตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบระบบควบคุมระยะไกลด้วยรีโมทวิทยุที่ระยะทาง 0 m และเพิ่มระยะทางทดสอบเป็นระยะทางช่วงละ 10 m จนถึงระยะทางสูงสุดที่ 100 m โดยค่าความสำเร็จของการควบคุมทิศทางในการทดสอบภาคสนามจริงภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางผลปรากฏว่า รถตัดหญ้าสามารถดำเนินการตามคำสั่งจากการกดเคลื่อนที่ผ่านรีโมทได้โดยมีอัตราความสำเร็จที่ 97.05% หรือคิดเป็น 427 ครั้งจากทั้งหมด 440 ครั้ง ซึ่งพบว่าระยะทางในช่วง 90 m ถึง 100 m เป็นระยะทางที่สั่งการได้ไม่ต่อเนื่องหรือไม่ตอบสนองบางคำสั่ง และการทดสอบภาคสนามจริงภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง ผลปรากฏว่ารถตัดหญ้าสามารถดำเนินการตามคำสั่งจากการกดเคลื่อนที่ผ่านรีโมทได้โดยมีอัตราความสำเร็จที่ 91.14% หรือคิดเป็น 401 ครั้งจากทั้งหมด 440 ครั้ง ซึ่งพบว่าระยะทางในช่วง 70 m ถึง 100 m เป็นระยะทางที่สั่งการได้ไม่ต่อเนื่องหรือไม่ตอบสนองบางคำสั่ง และการทดสอบภาคสนามจริงภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางผลปรากฏว่ารถตัดหญ้าสามารถดำเนินการตามคำสั่งจาก

การกวดเคลื่อนที่ผ่านรีโมทได้โดยมีอัตราความสำเร็จที่ 91.14% หรือคิดเป็น 401 ครั้งจากทั้งหมด 440 ครั้ง ซึ่งพบว่าระยะทางในช่วง 70 m ถึง 100 m เป็นระยะทางที่สั่งการได้ไม่ต่อเนื่องหรือไม่ตอบสนองบางคำสั่ง โดยสาเหตุหลักที่ทำให้การควบคุมไม่ต่อเนื่องหรือไม่ตอบสนองในช่วงระยะทางไกล ได้แก่ การลดลงของความแรงสัญญาณวิทยุ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น และการเกิดสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์อื่น หรือการสะท้อนของคลื่นวิทยุจากพื้นผิวต่างๆ ซึ่งส่งผลให้คำสั่งบางคำสั่งไม่สามารถส่งถึงตัวรับได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้การไม่ตอบสนองบางคำสั่งที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม ไม่ได้เกิดกับคำสั่งเดิมเป็นประจำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัญหาเกิดจากคุณภาพของสัญญาณในช่วงเวลานั้นๆ

ประสิทธิภาพระบบตัดหญ้า

การทดลองลำดับสุดท้ายผู้วิจัยจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการตัดหญ้าของรถตัดหญ้าที่นำเสนอ โดยจะทำการทดลองตัดหญ้าในแปลงเกษตรขนาด 0.5 m x 2 m x 0.1 m จำนวน 10 แปลง ที่มีการปลูกพืชหลัก ได้แก่ ผักชี จำนวน 5 ต้นต่อ 1 แถว และมีการปลูกจำนวน 2 แถว โดยเว้นระยะห่างระหว่างแถว 20 cm ที่เลือกใช้ผักชีเนื่องจากมีลักษณะสี ลำต้น และความสูงที่ใกล้เคียงกับหญ้าที่พบได้ทั่วไป เช่น หญ้าตีนนกและหญ้าแห้วหมู เพื่อประเมินความสามารถของกล้องอัลตราโซนิก ในการแยกแยะเป้าหมายและการตัดหญ้าโดยไม่กระทบต่อพืชหลัก โดยผลการทดลองที่ได้จะแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการตัดหญ้า

รอบในการตัด (ครั้ง)	พืชที่ยังคงอยู่ (ต้น)	พืชที่ถูกตัดบางส่วน (ต้น)	พืชที่ถูกตัดขาด (ต้น)
1	8	1	1
2	9	0	1
3	6	2	2
4	6	2	2
5	8	2	0
6	5	3	2
7	9	0	1
8	6	3	1
9	6	2	2
10	6	2	2

จากตารางที่ 4 ผลการทดลองพบว่าจำนวนพืชที่ยังคงอยู่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 7 ต้นต่อรอบ โดยมีจำนวนสูงสุดอยู่ที่ 9 ต้น ในรอบที่ 2 และ 7 และต่ำสุดที่ 5 ต้น ในรอบที่ 6 ขณะเดียวกันจำนวนพืชที่ถูกตัดบางส่วนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5 ต้นต่อรอบ โดยมีจำนวนสูงสุดที่ 3 ต้น ในรอบที่ 6 และ 8 และต่ำสุดที่ 0 ต้น ในรอบที่ 2 และ 7 ส่วนจำนวนพืชที่ถูกตัดขาดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2 ต้นต่อรอบ โดยพบค่าสูงสุดที่ 2 ต้น ในรอบที่ 3, 4, 6, 9 และ 10 และต่ำสุดที่ 0 ต้น ในรอบที่ 5

จุดคุ้มทุน

ต้นทุนคงที่ (Fixed costs) ของรถตัดหญ้าที่นำเสนอมีค่าเท่ากับ 13,400 บาท ซึ่งเกิดจากการลงทุนเกี่ยวกับระบบควบคุมระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ โครงสร้างตัวเครื่อง และระบบตัดหญ้า ส่วนต้นทุนแปรผัน (Variable costs) จะมีค่าเท่ากับ 55,310 บาทต่อปี ซึ่งเกิดจากการลงทุนเกี่ยวกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ชาร์จแบตเตอรี่จากไฟฟ้าที่ให้บริการจากภาครัฐจำนวน 640 บาทต่อปี โดยจะคิดจากขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้คือ 12 v 40 Ah ที่เก็บประจุได้ประมาณ 0.48 kWh เมื่อคิดค่าไฟฟ้าเฉลี่ยตามอัตราค่าไฟฟ้าครัวเรือนที่ 4.2 บาทต่อหน่วย (kWh) ค่าขนส่งไปยังพื้นที่ที่ต้องการใช้งานจำนวน 18,000 บาทต่อปี

ค่าจ้างผู้ควบคุมเครื่องตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 1 คน ส่งผลให้ต้องจ่ายค่าจ้างเท่ากับ 36,000 บาทต่อปี โดยอ้างอิงจากอัตราค่าจ้างแรงงานตามค่าจ้างขั้นต่ำของกระทรวงแรงงานปี 2568 อยู่ที่ประมาณ 400 บาทต่อวัน และค่าซ่อมบำรุงกำหนดไว้ในอัตราร้อยละ 5 ของต้นทุนคงที่ รวมเป็นเงินจำนวน 670 บาทต่อปี เนื่องจากความเร็วสูงสุดของรถตัดหญ้าอยู่ที่ไม่เกิน 10 km/h และประสิทธิภาพการทำงานถูกจำกัดด้วยสิ่งกีดขวาง สภาพพื้นดิน ความเชี่ยวชาญของผู้ควบคุม และช่วงพักการใช้งาน หากพิจารณาว่ารถตัดหญ้าสามารถปฏิบัติงานได้ 1 ไร่ต่อวัน และใช้งานได้ประมาณ 24% ต่อปี หรือโดยประมาณ 90 วันต่อปี ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ควรดูแลพื้นที่เพราะปลูกตามวงจรการเจริญเติบโตของพืชทั่วไป ซึ่งต้องมีการควบคุมวัชพืชเป็นช่วงๆ ตลอดปี และการเว้นระยะเวลากการใช้งานรถตัดหญ้าตลอดปี ทำให้รอบการตัดหญ้าเฉลี่ยอยู่ที่ ประมาณ 2-4 สัปดาห์ต่อรอบ ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช พื้นที่ และสภาพอากาศ ซึ่งด้วยเหตุผลนี้จึงส่งผลให้มีผลตอบแทนประมาณ 72,000 บาทต่อปี ดังนั้นกำไรสุทธิจะมีค่าเท่ากับ 16,690 บาทต่อปี โดยคำนวณได้จากสมการที่ 4 และจุดคุ้มทุนคือ 0.80 ปี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$\text{กำไรสุทธิ} = (\text{ผลตอบแทน} - \text{ต้นทุนแปรผัน}) = (72,000 - 55,310) = 16,690 \text{ บาทต่อปี} \quad (4)$$

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \left(\frac{\text{ต้นทุนคงที่}}{\text{กำไรสุทธิ}} \right) = \left(\frac{13,400}{16,690} \right) = 0.80 \text{ ปี} \quad (5)$$

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาต้นแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลงปลูกพืชในแปลงปลูกพืชแบบตรงที่ถูกควบคุมจากระยะไกล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ด้าน ได้แก่ ด้านระบบจ่ายพลังงาน ด้านระบบควบคุมระยะไกล ด้านความสามารถในการตัดหญ้าในพื้นที่ที่มีการปลูกพืชแบบแถวตรงและของจุดคุ้มทุน ในด้านของระบบจ่ายพลังงาน จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่จ่ายโหลดคงที่เฉลี่ย 1.5 A พบว่าแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นที่ 12.6 V และลดลงเหลือ 12.45 V หลังการใช้งานต่อเนื่อง 1 h คิดเป็นการลดลงเฉลี่ย 0.025 V ต่อ 10 min ขณะที่ความจุแบตเตอรี่ลดลงจาก 40 Ah เหลือ 38.46 Ah หรือเฉลี่ยประมาณ 0.26 Ah ต่อ 10 min ส่วนในด้านของระบบควบคุมระยะไกล จากการทดสอบทั้งในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง พบว่าเครื่องสามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้โดยมีอัตราความสำเร็จ 97.05% ในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง และ 91.14% ในกรณีมีสิ่งกีดขวาง อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางเกิน 70 m ขึ้นไป เริ่มควบคุมได้ไม่ต่อเนื่องหรือไม่ตอบสนองบางคำสั่ง โดยเฉพาะในช่วง 90 ถึง 100 m สำหรับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง และช่วง 70 ถึง 100 m สำหรับกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง ในด้านของการทดสอบตัดหญ้าในพื้นที่ที่มีการปลูกพืชแบบแถวตรง พบว่าในการบังคับรถตัดหญ้าสามารถหลีกเลี่ยงพืชได้บางส่วน โดยมีพืชที่ยังคงอยู่เฉลี่ย 7 ต้นต่อรอบจากทั้งหมด 10 ต้น ขณะที่พืชที่ถูกตัดบางส่วนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5 ต้นต่อรอบ และพืชที่ถูกตัดขาดเฉลี่ย 1.2 ต้นต่อรอบ แม้อาจยังมีข้อผิดพลาดบ้างในบางรอบของการทำงาน ในส่วนของจุดคุ้มทุน โดยมีต้นทุนคงที่ 13,400 บาท และต้นทุนแปรผัน 55,310 บาทต่อปี เมื่อประเมินผลตอบแทนจากการประหยัดค่าแรงงาน 72,000 บาทต่อปี จะได้กำไรสุทธิ 16,690 บาทต่อปี ส่งผลให้จุดคุ้มทุนของการลงทุนอยู่ที่ประมาณ 0.80 ปี อย่างไรก็ตามจากการทดลอง พบว่า ระบบสามารถตัดวัชพืชได้ถึง 90% ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ถูกตัดสำเร็จต่อพื้นที่ปลูกทั้งหมด ทั้งนี้ผลลัพธ์ของการควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้าในสภาวะแวดล้อมจริงยังขึ้นอยู่กับทักษะความชำนาญ และมุมมองของผู้ควบคุมในขณะปฏิบัติงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ผู้ควบคุมต้องอาศัยการมองเห็นผ่านภาพจากกล้องหรือในระยะไกล ซึ่งอาจส่งผลต่อการตัดสินใจในการกดสั่งการเคลื่อนไหว ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในบางจังหวะของการหลีกเลี่ยงพืชหรือสิ่งกีดขวาง

ข้อเสนอแนะ

จากผลการพัฒนาต้นแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลงปลูกพืชแบบตรงที่ถูกควบคุมจากระยะไกล พบว่ายังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง ได้แก่ ทักษะและประสบการณ์ของผู้ควบคุม ซึ่งมี

ความสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำในการตัดหญ้า โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้การควบคุมผ่านกล้องหรือระบบสั่งงานระยะไกล ดังนั้นควรฝึกใช้งานให้มีความชำนาญในการควบคุมและการดูภาพผ่านกล้องก่อนการใช้งานจริง เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นใกล้บริเวณพืชหลักหรือสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้ควรมีการปรับปรุงระบบสื่อสารให้มีความเสถียรมากขึ้น เช่น การใช้เสาอากาศที่มีอัตราขยายสูงหรือเสาอากาศแบบทิศทาง เพื่อเพิ่มระยะการส่งสัญญาณและลดการรบกวนของคลื่นสัญญาณ อีกทั้งควรพิจารณาการเปลี่ยนระบบสื่อสารเป็นแบบที่มีความทนทานต่อสิ่งกีดขวางมากกว่า เช่น ระบบ วิทยุ (Wi-Fi) หรือลอรา (LoRa) ทั้งนี้เพื่อให้การใช้งานเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ควรดำเนินการตัดหญ้าในพื้นที่โล่ง มีแนวแถวพืชที่เป็นระเบียบและมีสิ่งกีดขวางน้อย พร้อมทั้งควรตรวจสอบสภาพแบตเตอรี่และระบบตัดหญ้าก่อนการใช้งานทุกครั้ง เพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์และลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการทำงานต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาที่ดิน. (2562). แผนการใช้ที่ดินของประเทศไทย Land Use Plan of Thailand กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- [2] สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า กระทรวงพาณิชย์ (2566). การยกระดับและเพิ่มรายได้ภาคเกษตร.
- [3] REPAY THAILAND. (2564). ทางเลือกในการกำจัดวัชพืช. <https://repaythailand.com/ทางเลือกในการกำจัดวัชพืช/>
- [4] Tech, M. & Akola. (2024). Performance Evaluation and Comprehensive Review of Weeders: Advancing Agricultural Efficiency. INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN TECHNOLOGY. 11(7). 2874-2889.
- [5] Ali, D., de Castro, R., Ehsani, R., Vougioukas, S., & Wei, P. (2024). Unlocking the Potential of Electric and Hybrid Tractors via Sensitivity and Techno-Economic Analysis. Applied Energy, 377, 123410.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press.
- [7] Ritchie, H. (2020). What are the safest and cleanest sources of energy. Our World in Data. https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy?utm_source=
- [8] สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน). (ม.ป.ป.). 2.1 การปลูกพืชบนพื้นที่สูง. <https://research.hrdi.or.th/public/upload/386g4o494x.pdf>.
- [9] Greenyellow. (2564). เทคโนโลยีโซลาร์เซลล์กำหนดแนวพลังงานในอนาคต. <https://www.greenyellow.co.th/blogs/solarcell-technology-improvement-and-future-of-energy-industry/>

การพัฒนานวัตกรรมเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจจ่ายน้ำ เข้าพื้นที่เกษตรกรรม
กรณีศึกษา พื้นที่ระบบจ่ายน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตำบลหัวเมือง อำเภอสอง จังหวัดแพร่
Development of innovation to increase efficiency in water distribution decision-making
Into agricultural areas Case study: Solar water distribution system area
Huamuang Subdistrict, Song District, Phrae Province

พิเชฐ ลือโฮ้ง^{1*} กันต์ อินทวงศ์² กาญจนา ดาวเด่น³ และ อภิศักดิ์ พรหมผาย⁴
Pichet Luehong^{1*} Gun Intuwong² Kanchana Daoden³ and Apisak Phromfai⁴

สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อุตดิตถ์ 53000

Engineering Management, Faculty of Industrial Technology,

Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000

Corresponding author: Tel.: 06-3669-1615. E-mail address: piched@uru.ac.th

Abstract

This research aimed to apply innovative computer technology to improve decision-making efficiency in water distribution to agricultural areas in Hua Mueang Subdistrict, Song District, Phrae Province. This approach seeks to optimize water distribution, reduce excess water, and enable data verification for each activity. Furthermore, it was modern and easy to use, aligned with current smartphone technology. The research utilized a research and development approach. The study began with examining water distribution patterns within the area, following a well-defined research framework. This approach included surveys, document analysis, and data collection from local experts and farmers. The data was then analyzed, and the system was designed in collaboration with agricultural personnel, including a review of relevant documents and research. The innovation was developed following system design and validation to enhance decision-making efficiency for water distribution, enabling practical use in the area via the Internet. Finally, the program surveyed farmers' satisfaction with the program, evaluated its performance, and summarized the findings.

The results showed that the innovation supporting decision-making in agricultural water distribution activities, as demonstrated in a solar-powered water distribution system case study in Hua Mueang Subdistrict, Song District, Phrae Province, was adequate and appropriate for the area. It reduced the distribution of excess water and enabled data verification for each activity. The overall system efficiency assessment was highly satisfactory ($\bar{X}=4.70$, S.D.=0.34). Overall user satisfaction was highly satisfactory ($\bar{X}=4.67$, S.D.=0.41)

Keywords: Innovation to increase efficiency in agricultural water distribution, water distribution decision making

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์จะประยุกต์ใช้นวัตกรรมทางเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เกษตรกรรม ชุมชนตำบลหัวเมือง อำเภอสอง จังหวัดแพร่ให้ดีขึ้น เพื่อให้พื้นที่จ่ายออกมามีปริมาณที่

เหมาะสม ลดการจ่ายน้ำส่วนเกินและในแต่ละกิจกรรมสามารถตรวจสอบข้อมูลได้ อีกทั้งยังมีความทันสมัยและใช้งานได้ง่ายตามเทคโนโลยีสมาร์ทโฟนในปัจจุบัน โดยใช้วิธีการวิจัยแบบวิจัยและพัฒนา จะดำเนินการศึกษาโดยเริ่มต้นจากการศึกษารูปแบบการจ่ายน้ำในพื้นที่ตามกรอบของงานวิจัย ทั้งในรูปแบบการสำรวจ การวิเคราะห์จากเอกสาร การเก็บข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญและเกษตรกรในพื้นที่ แล้วจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษานำมาวิเคราะห์และออกแบบระบบ ร่วมกับบุคลากรในพื้นที่เกษตรกรรมรวมถึงการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หลังการออกแบบระบบและตรวจสอบแล้ว ขั้นตอนก็นำมาจัดสร้างเป็นชิ้นงานนวัตกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจจ่ายน้ำเพื่อนำไปใช้จริงในพื้นที่ผ่านช่องทางระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ขั้นตอนสุดท้ายสำรวจความพึงพอใจของเกษตรกรผู้ใช้โปรแกรม ประเมินการทำงานของนวัตกรรมและสรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่านวัตกรรมสนับสนุนการตัดสินใจในกิจกรรมการจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เกษตรกรรม กรณีศึกษาพื้นที่ระบบจ่ายน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตำบลหัวเมือง อำเภอสอง จังหวัดแพร่มีประสิทธิภาพในการทำงานเหมาะสมกับพื้นที่ ช่วยลดการจ่ายน้ำส่วนเกินและในแต่ละกิจกรรมสามารถตรวจสอบข้อมูลได้ ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}=4.70$, S.D.=0.34) ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}=4.67$, S.D.=0.41)

คำสำคัญ: นวัตกรรมเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำการเกษตร, การตัดสินใจการจ่ายน้ำ

การพัฒนาแบบจำลองการทำนายสถานะประจุของแบตเตอรี่สำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้วิธีการ
ถดถอยเชิงเส้นและการถดถอยแบบเวกเตอร์สนับสนุน

Development of a Battery State of Charge Prediction Model for Electric Motorcycles
Using Linear Regression and Support Vector Regression

วรรณฤทธิ์ ทวีชาติ¹ และ บุษบง โสมัสสา^{2*}

Wannaris Taveechara¹ and Bussabong Somussa^{2*}

¹สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

²สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹Technology and Innovation Management, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

²Technology and Innovation Management, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

¹Corresponding author : Tel.: 0851248109. E-mail address : bussabong.s@pnu.ac.th

Abstract

This study focuses on developing a prediction model for the State of Charge (SOC) of electric motorcycle batteries using experimental data under various speed and load conditions to enhance the accuracy of remaining energy estimation. The results show that the Linear Regression model accurately predicts SOC, with time identified as a key factor influencing SOC variation, which decreases linearly under all experimental conditions. Furthermore, the Support Vector Regression (SVR) model's performance was compared across different kernel functions—Linear, Gaussian (RBF), and Polynomial. Experiments were conducted at speeds of 33 and 38 km/h under an 80-kg load for 60 minutes. The Linear kernel achieved the most accurate predictions, yielding the lowest Root Mean Squared Error (RMSE) of 1.1074. In contrast, the Gaussian/RBF and Polynomial kernels produced higher RMSE values of 1.3743 and 1.5934, respectively. These findings indicate that the linear model is suitable for SOC prediction in electric motorcycles under real-world operating conditions and can serve as a foundation for developing advanced models to enhance SOC estimation further and predict the Remaining Driving Range (RDR) more effectively in future applications.

Keywords: Electric Motorcycle, Linear Regression, Support Vector Regression (SVR), State of Charge (SOC)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองการทำนาย สถานะประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge: SOC) สำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลเชิงทดลองภายใต้เงื่อนไขความเร็วและน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าพลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) สามารถทำนายค่า SOC ได้อย่างถูกต้อง โดยพบว่าเวลาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ SOC ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามเส้นตรงในทุกสภาวะการทดลอง นอกจากนี้ ยังได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (Support Vector Regression: SVR) ที่ใช้ฟังก์ชันเคอร์เนลต่าง ๆ ได้แก่ เคอร์เนลเชิงเส้น (Linear), เคอร์เนลแบบเกาส์เซียน (Gaussian/RBF) และเคอร์เนลพหุนาม (Polynomial) โดยทำการทดลองที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใต้น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม เป็นเวลา 60 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เคอร์เนลเชิงเส้นให้ผล

การทำนายที่แม่นยำที่สุด โดยมีค่า รากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Squared Error: RMSE) ต่ำสุดที่ 1.1074 ขณะที่คอร์เนลแบบ Gaussian/RBF และ Polynomial ให้ค่า RMSE ที่สูงกว่า คือ 1.3743 และ 1.5934 ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเชิงเส้นมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายค่า SOC ของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าในสภาวะการทำงานจริง และสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองขั้นสูง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่า SOC และการทำนายระยะทางที่สามารถขับได้ต่อไป (Remaining Driving Range: RDR) ในการประยุกต์ใช้งานในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า, การถดถอยเชิงเส้น, ซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (SVR), สถานะประจุของแบตเตอรี่ (SOC)

บทนำ

การใช้งานรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการจัดการพลังงานของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อให้ผู้ใช้สามารถวางแผนการเดินทางได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ระบบจัดการพลังงาน (Energy Management System: EMS) จึงมีบทบาทสำคัญในการติดตามและคาดการณ์สถานะการคายประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge: SOC) ซึ่งแสดงถึงระดับพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ภายในแบตเตอรี่ในขณะใช้งาน [1-3]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการประยุกต์ใช้วิธีทางสถิติและแมชชีนเลิร์นนิงในการทำนายค่า SOC อย่างหลากหลาย เช่น การใช้แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Regression) ซึ่งสามารถทำนายค่า SOC ได้อย่างแม่นยำภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด [2] รวมถึงการใช้แบบจำลองการถดถอยแบบเวกเตอร์สนับสนุน (Support Vector Regression: SVR) ร่วมกับ Kernel Function ที่เหมาะสม ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า Kernel Function แบบ Linear ให้ผลการทำนายค่า SOC ใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด (Root Mean Squared Error: RMSE) เมื่อเปรียบเทียบกับ Kernel Function แบบ Gaussian/RBF และ Polynomial [3]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการสร้างและประเมินแบบจำลองการทำนายค่า SOC สำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินพลังงานคงเหลือของแบตเตอรี่ และยกระดับประสิทธิภาพของระบบจัดการพลังงานให้สูงขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างและประเมินแบบจำลองการทำนายแบตเตอรี่ (SOC) สำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจริงภายใต้เงื่อนไขความเร็วและโหลดที่แตกต่างกัน
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการทำนายค่า SOC ระหว่าง Linear Regression และ Support Vector Regression (SVR) ที่ใช้ Kernel Function ต่าง ๆ ได้แก่ Linear, Gaussian (RBF) และ Polynomial

วิธีการวิจัย

1. การหาความสัมพันธ์ของเวลา ความเร็ว และสถานะของแบตเตอรี่ (SOC)

ข้อมูลที่เก็บจากการทดสอบทั้งสี่เงื่อนไข ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) กำลังไฟฟ้า (Power) ความเร็ว (Speed) เวลา (Time) และสถานะของแบตเตอรี่ (SOC) จะถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้โปรแกรม Excel และ MATLAB เพื่อตรวจสอบแนวโน้มและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 หัวข้อดังนี้

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทั้งในสภาวะไร้โหลดและมีโหลด 80 กิโลกรัม

1.2 ความสัมพันธ์ของเวลาและค่า SOC ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทั้งในสภาวะไร้โหลดและมีโหลด 80 กิโลกรัม

2. การสร้างโมเดลทำนาย SOC

การสร้างโมเดลถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ โมเดลทำนายสถานะของแบตเตอรี่ (SOC) แบบไม่อิสระ และ โมเดลทำนายสถานะของแบตเตอรี่ (SOC) แบบอิสระ โดยรายละเอียดดังนี้

2.1 โมเดลทำนายสถานะของแบตเตอรี่ (SOC) แบบไม่อิสระ (Dependent) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และค่า SOC ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ด้วยโปรแกรม MATLAB ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการนำข้อมูลเข้าจากไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟีเจอร์ที่ต้องการใช้ในการทำนาย โดยกำหนดให้ x เป็นตัวแปรต้นประกอบด้วย Voltage (x_1), Current (x_2), และ Power (x_3) โดย y เป็นตัวแปรตาม เพื่อทำนายสถานะของแบตเตอรี่ SOC (y)

ขั้นตอนที่ 3 ทำการนอร์มข้อมูลโดยใช้วิธี z-score แสดงดังสมการที่ 1

$$z\text{-score} = \frac{\text{Data} - \text{Mean}}{\text{Standard Deviation}} \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างโมเดลการทำนายสถานะของแบตเตอรี่ SOC โดยใช้ Linear regression ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น ข้อมูลฝึกสอน (80%) และข้อมูลทดสอบ (20%)

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินประสิทธิภาพของโมเดล โดยแสดงเป็นกราฟของค่า SOC ที่วัดได้กับค่า SOC ที่ทำนายได้

2.2 โมเดลทำนายสถานะของแบตเตอรี่ (SOC) แบบอิสระ (Independent) เป็นการประเมินเปอร์เซ็นต์สถานะของ แบตเตอรี่ (SOC) ที่ความเร็วต่าง ๆ ในสภาวะมีโหลด 80 กิโลกรัม การสร้างและประเมินประสิทธิภาพของโมเดลสำหรับทำนาย สถานะของแบตเตอรี่ (SOC) แบบอิสระ โดยใช้ Support Vector Regression (SVR) ในโปรแกรม MATLAB ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการนำข้อมูลเข้าจากไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel กำหนดฟีเจอร์ดังนี้ Speed, Voltage, และ Current และเอาต์พุตคือ %SOC (label)

ขั้นตอนที่ 2 นอร์มข้อมูลด้วยวิธี Z-Score จากนั้นแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น Training (XTrain) และ Testing (XTest) ด้วยวิธี Holdout (80% Train, 20% Test)

ขั้นตอนที่ 3 สร้างโมเดล Support Vector Regression (SVR) โดยใช้ Kernel Function 3 แบบคือ Gaussian Kernel, Linear Kernel และ Polynomial Kernel

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า Mean Squared Error (MSE) ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดระหว่าง %SOC ที่คาดการณ์และ ค่าจริงของชุดข้อมูลทดสอบ แสดงผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจริง (Actual SOC) และค่าที่คาดการณ์ (Predicted SOC)

2.3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโมเดลแบบไม่อิสระ และโมเดลแบบอิสระ วัตถุประสงค์ของการสร้างโมเดล สำหรับทำนายสถานะของแบตเตอรี่ (SOC) แบบไม่อิสระคือ การได้ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า SOC ซึ่งพิจารณา ตัวแปรสามตัวคือแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทั้งในสภาวะไร้โหลด และมีโหลด 80 กิโลกรัม ขณะที่การสร้างโมเดลแบบอิสระเน้นที่โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สามารถประมาณค่า %SOC ที่ ความเร็วต่าง ๆ ได้ และพิจารณาในสภาวะมีโหลดเท่านั้น

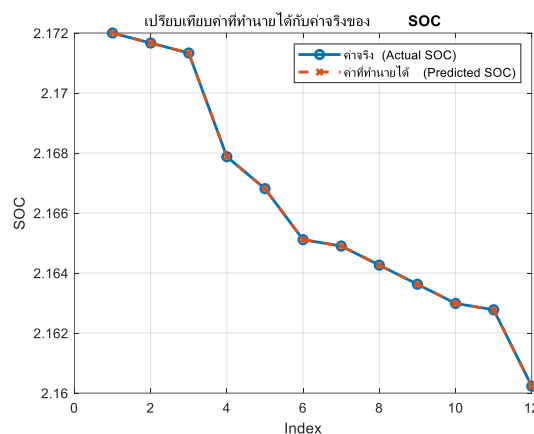
โมเดลแบบไม่อิสระถูกสร้างโดยใช้ฟังก์ชัน Linear Regression ซึ่งเป็นโมเดลเชิงเส้น (Linear Model) ตัวแปร อินพุตได้แก่ Voltage, Current และ Power เป็นค่าที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับพฤติกรรมของแบตเตอรี่ นอกจากนี้จากการศึกษา ก่อนหน้าพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage, Current, Power และค่า SOC มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทั้งในสภาวะไร้โหลดและมีโหลดที่ 80 กิโลกรัม

โมเดลแบบอิสระถูกจำลอง และสร้างโดยใช้ฟังก์ชัน Support Vector Regression (SVR) โดยมีลักษณะเด่นคือ Speed, Voltage, และ Current เมื่อเทียบกับโมเดลแบบไม่อิสระพบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุตโดยเพิ่มฟีเจอร์ Speed เพื่อสามารถใช้ทำนาย %SOC ในสภาวะใช้งานจริงได้ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลเมื่อใช้

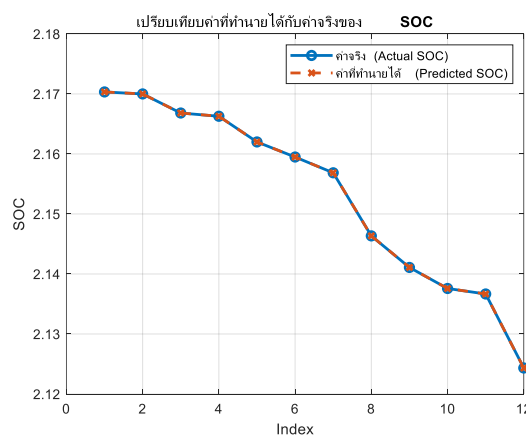
Kernel Function 3 แบบคือ Gaussian, Linear และ Polynomial โมเดลนี้มีความซับซ้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ส่งผลต่อการลดลงของค่า SOC ดังนั้นโมเดลนี้ไม่ได้ถูกจำกัดแค่ความสัมพันธ์เชิงเส้น

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดลองในหัวข้อ 2.1 พบว่าการลดลงของ SOC เป็นแบบเชิงเส้น ทั้งในสภาวะไร้โหลดและมีโหลด ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการสร้างโมเดลทำนายค่า SOC แบบไม่อิสระ ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามสภาวะของการทดสอบคือ สภาวะไร้โหลดและสภาวะมีโหลด ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบถดถอยเชิงเส้น กำหนดให้ x_1 คือค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) x_2 คือกระแสไฟฟ้า (Current) และ x_3 คือกำลังไฟฟ้า (Power) ขณะที่ y คือ ค่าสถานะแบตเตอรี่ (SOC) การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลทำนายค่า SOC ภายใต้การทดสอบในสภาวะไร้โหลด ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แสดงดัง ภาพที่ 1 แกน x คือชุดข้อมูลของตัวแปรต้น ซึ่งประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า จากภาพที่ 1 (ก) ในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็ว 33 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของค่า SOC ที่ทำนายได้ (Predicted SOC) ใกล้เคียงกับค่าจริง (Actual SOC) ซึ่งบ่งบอกว่าโมเดลสามารถทำนายค่า SOC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็ว 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 1 (ข) SOC ที่ทำนายได้โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ดังนั้นโมเดลสามารถทำนายค่า SOC ได้อย่างแม่นยำทั้งที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยบางจุด ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดของจำนวนข้อมูล



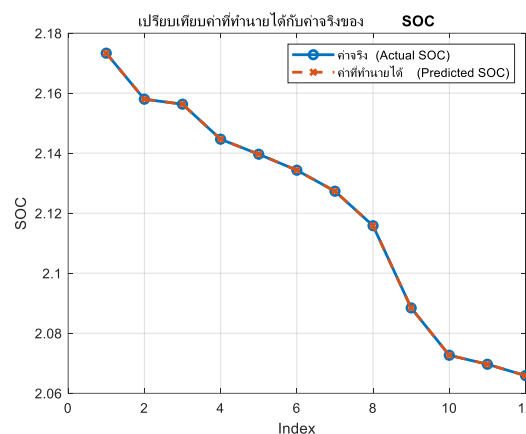
(ก) ในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็ว 33 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



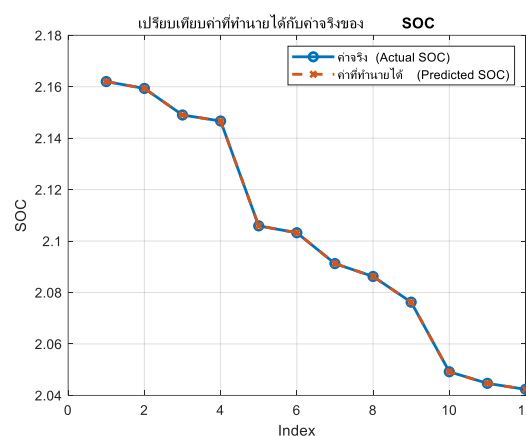
(ข) ในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็ว 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ภาพที่ 1 เปรียบเทียบค่า SOC ที่ทำนายกับค่าจริง ในสภาวะไร้โหลด ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลทำนายค่า SOC ในสภาวะมีโหลด 80 กิโลกรัม แสดงดัง **ภาพที่ 2** โดย **ภาพที่ 2 (ก)** แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงของ SOC กับค่าที่ทำนายได้ที่ความเร็ว 33 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของค่าที่ทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าจริง ตลอดช่วงระยะเวลาการทดสอบ แต่ในบางจุดอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย **ภาพที่ 2 (ข)** แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงของ SOC กับค่าที่ทำนายได้ที่ความเร็ว 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าที่ทำนายได้ยังคงมีความใกล้เคียงกับค่าจริง แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่สร้างขึ้นสามารถทำนายค่า SOC ได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่มีโหลด 80 กิโลกรัมที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยอาจเกิดขึ้นในบางจุด โดยเฉพาะในกรณีของความเร็วที่สูงขึ้น (38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)



(ก) ในสภาวะโหลด 80 กก. ที่ความเร็ว 33 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

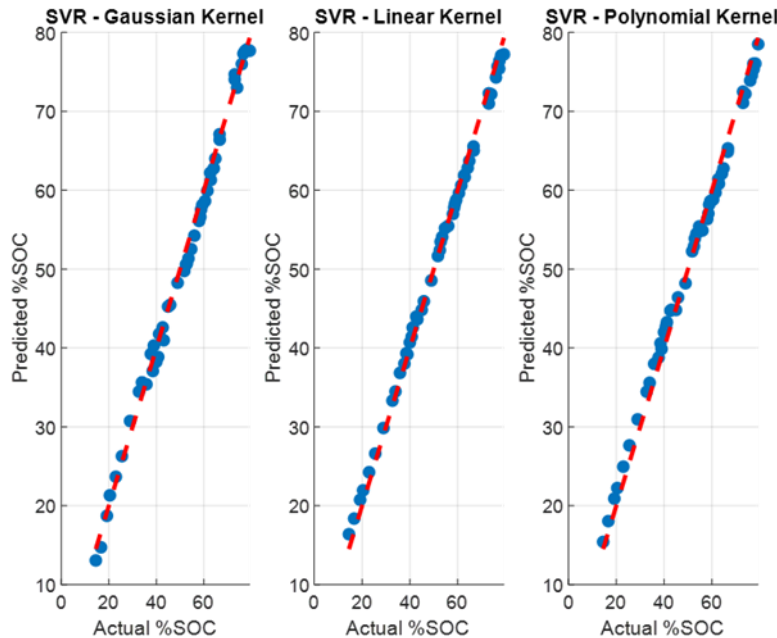


(ข) ในสภาวะโหลด 80 กก. ที่ความเร็ว 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ภาพที่ 2 เปรียบเทียบค่าที่ทำนายกับค่าจริงของ SOC ในสภาวะโหลดที่ 80 กิโลกรัม
ที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากผลการทดลองหัวข้อที่ 2.2 ได้กล่าวถึงกระบวนการในการสร้างโมเดลแบบอิสระ ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลทำนาย %SOC ของแบตเตอรี่ โดยเปรียบเทียบการใช้ Kernel ต่างๆ ได้แก่ Gaussian, Linear และ Polynomial จากข้อมูลความเร็ว แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ทำการเก็บข้อมูลภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในสภาวะมีโหลด 80 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นสร้างโมเดลโดยใช้ Support Vector Regression (SVR) พร้อมการทำ Normalization ด้วยวิธี Z-score เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผลการทดลองแสดงดัง **ภาพที่ 3** พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า %SOC จริง (Actual %SOC) และ %SOC

ประมาณ (Predicted %SOC) เมื่อใช้ Linear Kernel มีแม่นยำที่สุด รองลงมาคือ Gaussian Kernel และ Polynomial Kernel ซึ่งมีข้อผิดพลาดสูงกว่า Kernel อื่นๆ



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การพยากรณ์ %SOC ของแบตเตอรี่
โดย Gaussian, Linear และ Polynomial Kernel

ตารางที่ 1 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของโมเดล Support Vector Regression (SVR) ที่ใช้ Kernel ต่าง ๆ ได้แก่ Gaussian, Polynomial และ Linear พบว่า SVR (Linear Kernel) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีค่า RMSE (Root Mean Squared Error) ต่ำสุดเท่ากับ 1.1074 และ MAE (Mean Absolute Error) เท่ากับ 0.9665 ขณะที่ SVR (Gaussian Kernel) มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นไปเล็กน้อย RMSE (Root Mean Square Error) เท่ากับ 1.3743 และ MAE (Mean Absolute Error) เท่ากับ 1.2040 และ SVR (Polynomial Kernel) มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด RMSE (Root Mean Squared Error) เท่ากับ 1.5934 และ MAE (Mean Absolute Error) เท่ากับ 1.4818 จะเห็นได้ว่าการใช้ SVR (Linear Kernel) เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์เปอร์เซ็นต์ SOC ของแบตเตอรี่ เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการพยากรณ์ค่า State of Charge (SOC) ของ Kernel Function 3 แบบ

Kernel Function	สมการ Kernel	RMSE	MAE	หมายเหตุ
Gaussian/RBF	$G(x_j, x_k) = \exp(-\ x_j - x_k\ ^2)$	1.3743	1.2040	เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น
Linear	$G(x_j, x_k) = (x_j' x_k)$	1.1074	0.9665	เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง
Polynomial	$G(x_j, x_k) = (1 + x_j' x_k)^q$	1.5934	1.4818	ใช้ได้เมื่อความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นและซับซ้อนขึ้น

สรุปผลการวิจัย

การสร้างแบบจำลอง SOC แบบไม่อิสระ จากผลการทดลองพบว่าโมเดล Linear Regression สามารถทำนายค่า SOC ได้อย่างแม่นยำ โดยเวลาถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการทำนาย SOC ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า SOC ลดลงแบบเป็นเชิงเส้นสำหรับทุกเงื่อนไขของการทดลอง

ประสิทธิภาพของโมเดลการทำนายค่า SOC โดยใช้ Support Vector Regression (SVR) และปรับเปลี่ยน Kernel Function ให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของข้อมูลที่ได้ ขณะทำการทดสอบที่ความเร็ว 33 และ 38 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในสถานะมีโหลด 80 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 60 นาที ผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้ Kernel Function แบบ Linear โมเดลสามารถทำนายค่า %SOC ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง มากที่สุด โดยมีค่า RMSE (Mean Squared Error) ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.1074 ขณะที่การใช้ Kernel Function แบบ Gaussian/RBF และ Polynomial ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 1.3743 และ 1.5934 ตามลำดับ งานวิจัยในอนาคตจะเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimize) ระหว่างความเร็วและระยะทางเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รวมถึงการปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถทำนาย SOC ได้แม่นยำยิ่งขึ้นในสถานะที่มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ในด้านสถานที่และสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Babu, P. S., Kumar, R. V., & Sudha, M. (2024). Enhanced SOC estimation of lithium-ion batteries with real-time data using machine learning algorithms. *Scientific Reports*, 14, 16036. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66997-9>
- [2] Mei, P., Karimi, H. R., Huang, C., Chen, F., & Yang, S. (2023). Remaining driving range prediction for electric vehicles: Key challenges, methods, and future directions. *IET Control Theory & Applications*. <https://doi.org/10.1049/cth2.12486>
- [3] Zhou, W., Zhao, X., Liu, J., & Zhang, L. (2021). Review on the battery model and SOC estimation method. *Processes*, 9(9), 1685. <https://doi.org/10.3390/pr9091685>

ประวัติผู้เขียนบทความ

วรรณฤทธิ์ ทวีชาติ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ งานวิจัยที่สนใจ คือ ด้านพลังงาน , รถไฟฟ้า และ ด้าน IoT เป็นต้น

บุษบง โสมัสสา จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ งานวิจัยที่ สนใจ คือ ด้าน IoT , ระบบควบคุมวาล์วแก๊สหุงต้มแอลพีจี (LPG) และการประยุกต์ใช้ Machine , Deep Learning เป็นต้น

การพัฒนารถกอล์ฟพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับสวนพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
Development of Solar-powered Golf Carts for the Energy Park, Kamphaeng Phet
Rajabhat University

เกียรติศักดิ์ สุขสำราญ¹ สิริยากร สีชมภู¹ พรพิมล พลอาจ¹ พรรณทิพา ประสาทแก้ว¹ นิวัติ คลังสีดา¹
เทพ เกื้อทวีกุล¹ รุ่งโรจน์ สงวนวัฒนา¹ และภาคิน มณีโชติ^{1*}

Kiattisak Suksamran¹ Siriyakorn Seechomphu¹ Pornpimol Phonart¹ Phanthipa Prasartkaew¹
Rungroj Sanguanwattana¹ Nivadee Klungsida¹ Thep Kueathaweekun¹ and Pakin Maneechot^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมสมารถกริดและยานยนต์ไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร 62000

¹Program in Smart Grid and Electric Vehicles Engineering Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng
Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet, 96000

Corresponding author: Tel. 091-8929196 E-mail address: Pakin0843@gmail.com

Abstract

This research aimed to design, develop, and evaluate the performance of a solar-assisted electric golf cart to extend its driving range and reduce dependence on grid electricity. The developed system comprised two 580 W monocrystalline solar panels, with a total installed capacity of 1.16 kWp, connected via two MPPT charge controllers to a 48 V 170 Ah deep-cycle battery bank mounted on the roof of an eight-seater electric golf cart. Experimental results revealed that the system could fully charge the batteries within two days and generate an average of 3.46 kWh-DC per day. When operating without solar charging, the vehicle achieved a driving range of 57.4 km per charge; however, when the solar charging system was activated during driving, the range increased to 89.98 km, representing a 57.4% improvement over battery-only operation. The generated solar energy contributed to an average electricity cost saving of 17.3 THB per day, or approximately 519 THB per month, and reduced carbon dioxide emissions by 1.38 kgCO₂e per day, equivalent to about 41.4 kgCO₂e per month. The results demonstrate that integrating a photovoltaic system with an electric golf cart can enhance energy efficiency, reduce charging costs, and promote low-carbon transportation, aligning with sustainable energy development goals.

Keywords: Electric golf cart, Solar energy, charging performance, Energy saving, Carbon footprint

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพของรถกอล์ฟไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มระยะทางการขับขี่และลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากโครงข่าย ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ขนาด 580 วัตต์ จำนวน 2 แผง คิดเป็นกำลังผลิตรวม 1.16 kWp ต่อผ่านตัวควบคุมการชาร์จแบบ MPPT จำนวน 2 ชุด เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ Deep Cycle ขนาด 48 V 170 Ah เพื่อติดตั้งบนหลังคารถกอล์ฟไฟฟ้า 8 ที่นั่ง ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้จนเต็มภายใน 2 วัน และผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยวันละ 3.46 kWh-DC เมื่อทดลองขับขี่โดยปิดระบบชาร์จจากแสงอาทิตย์รถสามารถวิ่งได้ระยะทาง 57.4 กิโลเมตร แต่เมื่อเปิดระบบรับพลังงาน

จากแสงอาทิตย์ขณะขับเคลื่อนระยะทางเพิ่มขึ้นเป็น 89.98 กิโลเมตร หรือคิดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ 57.4 % เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว การผลิตไฟฟ้าดังกล่าวสามารถช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าได้เฉลี่ยวันละ 17.3 บาท หรือประมาณ 519 บาทต่อเดือน และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 1.38 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อวัน หรือประมาณ 41.4 กิโลกรัมต่อเดือน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการบูรณาการระบบโซลาร์เซลล์เข้ากับรถกอล์ฟไฟฟ้าเป็นแนวทางที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดต้นทุนการชาร์จ และส่งเสริมลดคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: รถกอล์ฟไฟฟ้า, พลังงานแสงอาทิตย์, การชาร์จพลังงาน, การประหยัดพลังงาน, คาร์บอนฟุตพริ้นต์

การพัฒนาระบบตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ IoT Development of a solar tracking system monitoring system using IoT

ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล¹, กฤษณนัท สวนจันทร์, พิรญาณ์ ยอดแก้ว, จิตติมาพร เพื่อกออี๋ และ นิรมล บุญเชิด

Tanit Ruangrungrunchaikul*, Kritchanon Suanjan, Piraya Yodkaew,
Jitdimapron puekyim and Niramon booncherd

สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology,

Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani 12120

Corresponding author: Tel.:0847528947. E-mail address: rtanit@tu.ac.th

Abstract

This study presents the development of an IoT-based monitoring device for solar tracking systems. The device integrates an ESP8266 microcontroller, Arduino UNO, GY-521 angle sensor, and a voltage sensor to measure panel orientation and supply voltage. System performance is displayed via the Blynk application, while abnormal conditions are reported through Line notifications. Experimental validation against standard instruments shows that the calibrated GY-521 sensor provides high accuracy, with R^2 values of 0.9940 and 0.9959 for north-south and east-west panel angles, respectively. The voltage sensor also demonstrates strong agreement with a digital multimeter ($R^2 = 0.9996$). These results confirm the reliability and precision of the proposed device, highlighting its potential for effective real-time monitoring of solar tracking systems.

Keywords: Solar tracking, IoT, ESP8266, Angle sensor, Voltage measurement

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคโนโลยี IoT อุปกรณ์ต้นแบบประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 บอร์ด Arduino UNO เซนเซอร์ GY-521 สำหรับวัดมุม และ เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้ตรวจวัดตำแหน่งของแผงและแรงดันไฟเลี้ยงระบบ ผลการทำงานจะแสดงผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และส่งการแจ้งเตือนความผิดปกติผ่าน Line การทดสอบเปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานพบว่า เซนเซอร์ GY-521 ที่ปรับเทียบแล้วให้ค่ามีความแม่นยำสูง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9940 และ 0.9959 สำหรับมุมแผงในทิศเหนือ-ใต้ และทิศตะวันออก-ตะวันตก ตามลำดับ ส่วนเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าให้ค่าที่สอดคล้องกับดิจิตอลมัลติมิเตอร์อย่างใกล้ชิด ($R^2 = 0.9996$) ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันความน่าเชื่อถือและความแม่นยำของอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งมีศักยภาพสำหรับการตรวจสอบระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบติดตามดวงอาทิตย์, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT), ESP8266, เซนเซอร์วัดมุม, การวัดแรงดันไฟฟ้า

บทนำ

¹Corresponding author: Tel.: 084 752 8947. E-mail address: rtanit@tu.ac.th

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงและได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นทั้งในและต่างประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) จึงได้มีการพัฒนาและประยุกต์ระบบติดตามดวงอาทิตย์ (Solar Tracking) เพื่อปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้หันรับแสงอาทิตย์ได้เหมาะสมตลอดวัน การศึกษาของ D. Appleyard (2009) อ้างถึงใน [1] พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าระบบติดตั้งคงที่ร้อยละ 27-32 ในขณะที่ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ถึงร้อยละ 35-40 และได้มีการออกแบบและพัฒนาชุดควบคุมการติดตามดวงอาทิตย์อย่างง่าย ราคาประหยัดขึ้น โดยได้ติดตั้งทดสอบระบบติดตามดวงอาทิตย์ ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต [2-4] อย่างไรก็ตามการใช้งานระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นนี้ยังขาดระบบการตรวจสอบการทำงาน ซึ่งบางครั้งระบบอาจทำงานผิดพลาด ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้หันติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าลดลงหรือเกิดความเสียหายต่อระบบได้ โดยเฉพาะการใช้งานในระดับครัวเรือน ที่ผู้ใช้ขาดความรู้ด้านการดูแลและบำรุงรักษา

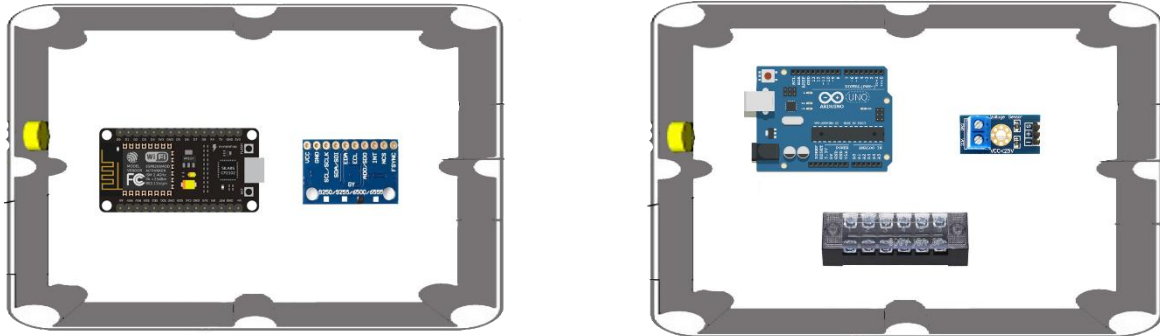
ในยุคปัจจุบันเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น การเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) การจัดการพลังงานในอาคาร (Smart Energy Management) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation Systems) เพื่อยกระดับความปลอดภัยและประสิทธิภาพการเดินทาง [5-6] เทคโนโลยี IoT ช่วยให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ ตรวจสอบ และควบคุมการทำงานได้แบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ได้มีการนำ IoT มาใช้ในการตรวจวัดมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบบอิสระ (PV Stand-Alone System) ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และแจ้งเตือนความผิดปกติผ่านแอปพลิเคชัน Line [7] สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนา “ระบบตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ IoT” ที่สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบแบบเรียลไทม์ เก็บบันทึกข้อมูลลงใน Cloud แจ้งเตือนผ่านสมาร์ตโฟนเมื่อระบบทำงานผิดปกติ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยให้การบำรุงรักษาของระบบ ลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มความสะดวกในการบำรุงรักษา

วิธีการวิจัย

ระบบตรวจสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ IoT แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ช่วง ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับติดตามการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

เซนเซอร์วัดมุมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดัดแปลงจากโมดูล GY-521 (MPU6050) ออกแบบให้ติดตั้งภายในกล่องกันน้ำ แสดงดังภาพที่ 1(ก) แล้วนำไปติดตั้งบนโครงสร้างรองรับแผงเพื่อวัดและติดตามมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ส่วนเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor) แสดงดังภาพที่ 1(ข) ติดตั้งภายในกล่องกันน้ำอีกกล่อง และเชื่อมต่อสายไฟไปยังแหล่งพลังงานเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์ผิดปกติของระบบ

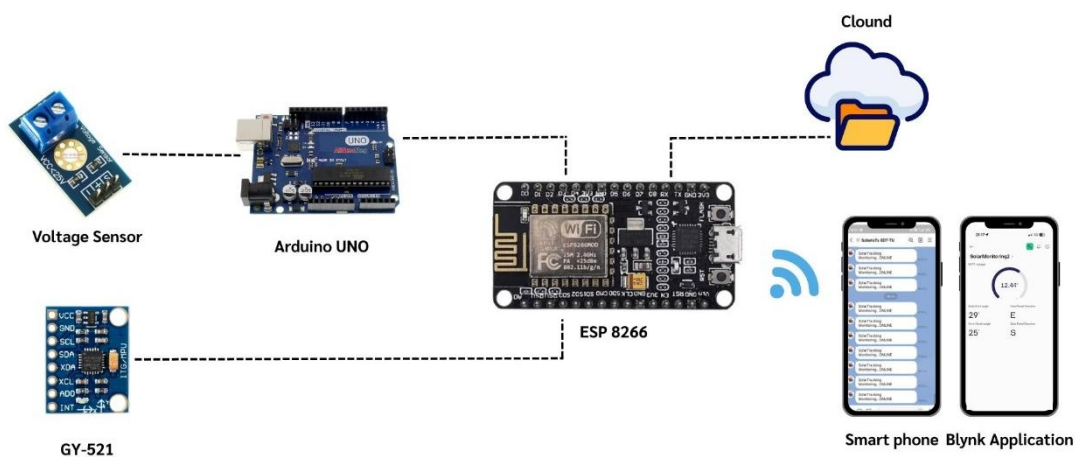


(ก) เซนเซอร์วัดมุมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ GY-521 (MPU6050) (ข) เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor)

ภาพที่ 1 เซนเซอร์ระบบติดตามการทำงานของระบบ ติดตามดวงอาทิตย์

ระบบติดตามและตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์นี้ใช้เซนเซอร์ 2 ชนิด ได้แก่ เซนเซอร์แรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor) สำหรับวัดแรงดัน และเซนเซอร์ GY-521 (MPU6050) สำหรับวัดมุมเอียงของแผง ข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกส่งไปยังบอร์ด Arduino UNO เพื่ออ่านค่าจากเซนเซอร์แรงดัน และส่งต่อไปยังบอร์ด ESP8266 ซึ่งเชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดมุม บอร์ด ESP8266 ซึ่งมีโมดูล WiFi ในตัวจะประมวลผลข้อมูลจากทั้งสองเซนเซอร์ และส่งขึ้นไปเก็บบนคลาวด์ผ่านการเชื่อมต่อไร้สาย พร้อมทั้งส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ไปยังสมาร์ทโฟนของผู้ใช้ผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ เช่น Blynk และ Line แสดงดังภาพที่ 2

การเขียนคำสั่งควบคุมระบบใช้ภาษาซีและซีพลัสผ่านโปรแกรม Arduino IDE และอัปโหลดไปยังบอร์ดผ่านสาย USB เพื่อให้ระบบตรวจวัดมุมของระบบติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา โดยแสดงค่าบนแอปพลิเคชัน Blynk และตั้งให้ดึงค่าจากเซนเซอร์ทุก 1 ชั่วโมง (ตามข้อจำกัดของการรับข้อความใน Blynk) หากระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำงานผิดปกติ จะส่งการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานผ่าน Line ด้วย Line Messaging API



ภาพที่ 2 ผังการเชื่อมต่อระบบติดตามและการตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

2) การทดสอบและบันทึกข้อมูลระบบติดตามการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

หลังจากติดตั้งระบบ ได้ทำการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นโดยนำค่ามุมและค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดของระบบ มาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานสำหรับการวัดมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และวัดแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายพลังงาน ณ เวลาเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 3 โดยใช้แอปพลิเคชัน Clinometer ในการวัดมุม และใช้ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ในการวัดแรงดันไฟฟ้า และส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ไปยังสมาร์ตโฟนของผู้ใช้ผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ เช่น Blynk และ Line



ภาพที่ 3 การทดสอบเซนเซอร์วัดมุมและแรงดันไฟฟ้าของระบบติดตามการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาระบบตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) **อุปกรณ์ติดตามและตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์** 2) การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ติดตามและตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

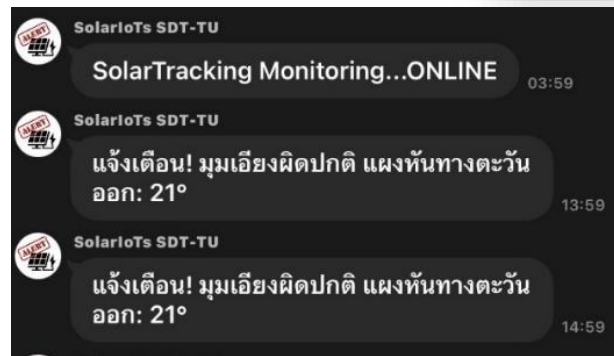
1) อุปกรณ์ติดตามและตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

การศึกษานี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ได้สำเร็จ มีการประยุกต์ใช้ระบบ IoT เพื่อติดตามและตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น โดยติดตามมุมเอียงของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ และติดตามค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ ตลอดเวลา (Real-time) โดยใช้เซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ที่หาได้ทั่วไป นอกจากนั้นสามารถแจ้งเตือนมายังผู้ใช้งานอย่างรวดเร็ว เมื่อระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำงานผิดปกติ ผ่านแอปพลิเคชันที่เข้าถึงได้ง่าย

การแสดงผลบนแอปพลิเคชันในสมาร์ตโฟน แสดงดังภาพที่ 4 โดยแสดงค่าของแรงดันไฟฟ้า มุมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นยังสามารถเขียนแอปพลิเคชันเป็นกราฟความสัมพันธ์เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลและเรียกดูได้ทั้งแบบย้อนหลังและเรียลไทม์ ในส่วนของการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบติดตามดวงอาทิตย์ ใช้ LINE Messaging API ซึ่งเป็นชุดเครื่องมือที่ช่วยให้นักพัฒนาสามารถสื่อสารกับผู้ใช้ได้ และสามารถสร้างฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น การส่งข้อความ ส่งรูปภาพ ส่งไฟล์ หรือแม้แต่การตอบกลับมายังผู้ใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5



ภาพที่ 4 จอแสดงผลบนแอปพลิเคชัน BLYNK



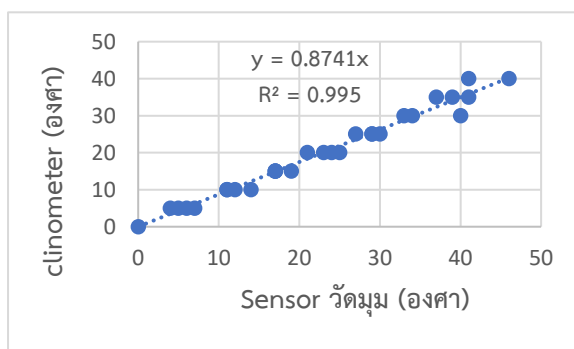
ภาพที่ 5 การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE

จากภาพที่ 5 แสดงหน้าต่างการแจ้งเตือนเมื่อระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำงานผิดปกติ เช่น ในช่วงเวลาเช้าถึงเที่ยงวัน ระบบติดตามดวงอาทิตย์จะควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศตะวันออก หากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงหันไปทางทิศตะวันตกในช่วงเช้า จะมีการแจ้งเตือนการทำงานที่ผิดปกติมายังแอปพลิเคชัน Line ผ่าน Line Messaging API พร้อมทั้งแสดงค่ามุมของโครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งภาพที่ 5 ระบบมีการแจ้งเตือนมายังผู้ใช้ในช่วงบ่ายว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำงานผิดปกติ โดยแสดงข้อความแจ้งเตือน “แจ้งเตือน! มุมเอียงผิดปกติ แผงหันทางตะวันออก: 21°” ในเวลา 13:59 และ 14:59

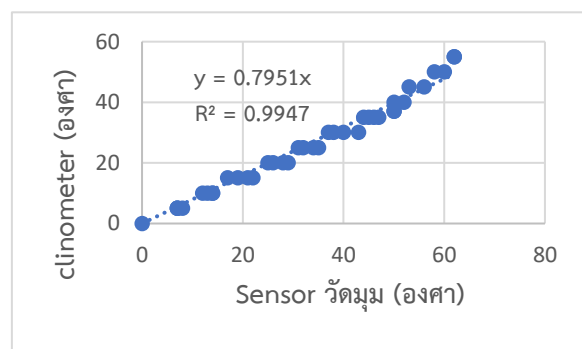
2) การทดสอบระบบตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

การทดสอบของอุปกรณ์ระบบตรวจสอบการทำงานผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน โดยทำการทดลองระหว่างเดือนเมษายน 2568 – พฤษภาคม 2568 โดยทดสอบค่ามุม และแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์แต่ละตัวซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ในการทดสอบ ได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์ GY-521 กับอุปกรณ์ Clinometer พบว่าค่ามุมทั้งในทิศเหนือ-ใต้ และ ตะวันออก-ตะวันตก ที่วัดได้มีค่าแตกต่างกับค่ามาตรฐาน จึงได้สร้างสมการปรับแก้ ในแนวทิศ เหนือ-ใต้ เท่ากับ $0.8741x$ ดังแสดงในภาพที่ 6(ก) และในแนวทิศ ตะวันออก-ตะวันตก เท่ากับ $0.7951x$ ดังแสดงในภาพที่ 6(ข) เพื่อนำไปคำนวณใน Arduino IDE



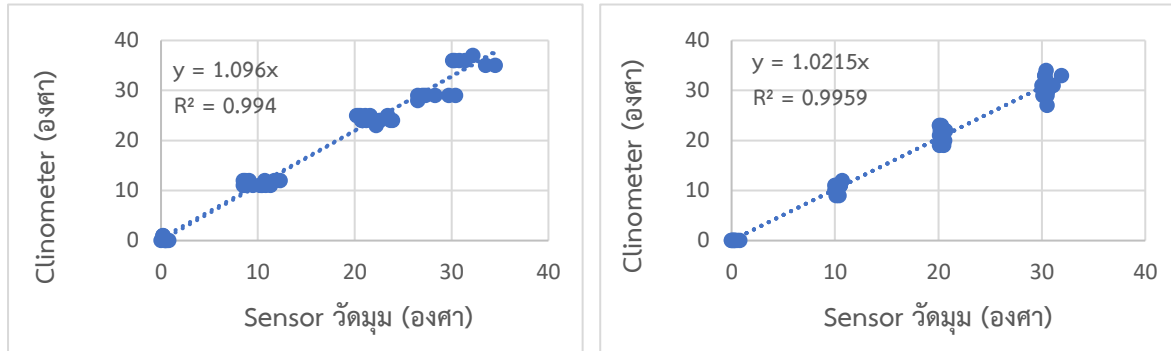
(ก) แนวทิศ เหนือ-ใต้



(ข) แนวทิศ ตะวันออก-ตะวันตก

ภาพที่ 6 กราฟแสดงค่ามุมก่อนปรับเทียบ

หลังจากการปรับเทียบค่ามุมจากเซนเซอร์ GY-521 กับค่ามุมจริงจาก Clinometer แล้วอัปโหลดผลการเพื่อคำนวณค่ามุมใหม่ในโปรแกรม Arduino IDE ผลจากการปรับตั้งค่า พบว่า ค่าที่ได้จากเซนเซอร์ GY-521 มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9940 และ 0.9959 ดังแสดงภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่าสามารถนำเซนเซอร์วัดมุมใช้งานในระบบติดตามดวงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

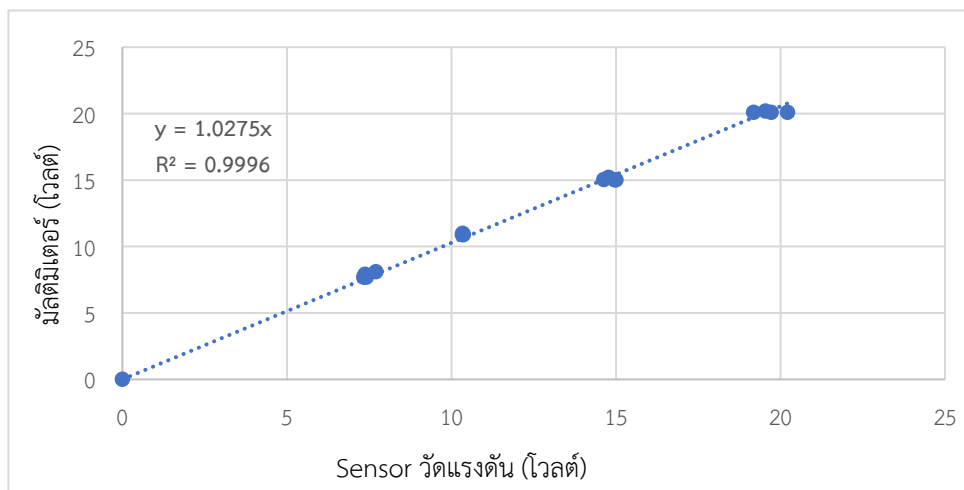


(ก) แนวทิศ เหนือ-ใต้

(ข) แนวทิศ ตะวันออก-ตะวันตก

ภาพที่ 7 กราฟแสดงค่ามุมจากเซนเซอร์หลังการปรับเทียบ

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากเซนเซอร์เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจากดิจิตอลมิเตอร์ ได้ทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรงดันประมาณ 7-20 โวลต์ ซึ่งเป็นช่วงแรงดันที่สอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ของโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ขนาด 10 แผงที่ใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 12 โวลต์ ผลการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันที่ได้จากเซนเซอร์มีความใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานอย่างมาก โดยสมการเชิงเส้นที่ได้จากการวิเคราะห์ดังแสดงในกราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าคือ $y = 1.0275x$ และ $R^2 = 0.9996$ ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ตรงระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์และค่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์มีความถูกต้องและความแม่นยำเพียงพอ และสามารถนำไปใช้งานจริงในการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสำหรับขับเคลื่อนระบบติดตามอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสมและน่าเชื่อถือ



ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่วัดได้จากเซนเซอร์และค่ามาตรฐานจากมัลติมิเตอร์

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนาและติดตั้งระบบตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยอาศัยเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามและตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ อุปกรณ์ต้นแบบประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 บอร์ด Arduino UNO เซนเซอร์วัดมุม GY-521 และ เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า โดยสามารถเชื่อมต่อข้อมูลและแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk รวมถึงส่งการแจ้งเตือนความผิดปกติผ่านแอปพลิเคชัน Line

ผลการทดสอบพบว่า ค่ามุมของเซนเซอร์ GY-521 กับอุปกรณ์มาตรฐาน Clinometer มีความแม่นยำอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า R^2 อยู่ที่ 0.9940 และ 0.9959 สำหรับมุมแผงในแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ และ ทิศตะวันออก - ตะวันตก ตามลำดับ ในขณะที่การตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ของโครงสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ พบว่าเซนเซอร์สามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงกับดิจิตอลมิเตอร์มาตรฐาน โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9996 แสดงถึงความน่าเชื่อถือและความแม่นยำของเซนเซอร์ที่ใช้งาน

นอกจากนี้ ระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นยังสามารถแจ้งเตือนการทำงานผิดปกติได้อย่างทันท่วงที ทั้งในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันผิดจากตำแหน่งที่เหมาะสม และกรณีที่แรงดันไฟฟ้าผิดปกติ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน ลดความเสี่ยงของความเสียหาย และสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในการตรวจสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสมและเชื่อถือได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Barsoum, "Fabrication of dual-axis solar tracking controller project," *Intelligent Control and Automation*, 2, pp. 57-68, 2011.
- [2] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล และเรวัตร ใจสุทธิ. (2563). การประยุกต์ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์. รายงานผลการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย. สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.).
- [3] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล และ วชิระวิญญู เจียรวรรณ. (2558, 4-6 พฤศจิกายน). "ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนราคาถูกละเอียดสำหรับบ้านพลังงานแสงอาทิตย์", ใน การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 (น. 156-159). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล, กฤษณนัท สอนจันทร์, ธานัท ฤทธิแสง, และปณณธร สดคมขำ (2566, 2-4 พฤศจิกายน) "การปรับปรุงชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อปรับโครงสร้างให้หันกลับมารอสำหรับเช้าวันใหม่" , ใน การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 (น. 46-52). มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
- [5] Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. สืบค้นเมื่อ 28 กรกฎาคม 2568 จาก <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
- [6] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. สืบค้นเมื่อ 28 กรกฎาคม 2568 จาก <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>.
- [7] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล, กัญญาภัทร์ มงคลพรสุข และ อารยา เลิศสกุลภัทร. (2564). อุปกรณ์ตรวจวัดมุมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ IoT. *วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน*. 4(1), 25-32.

การพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด Development of a smart hydroponic vegetable growing system combined with smart microgrid technology

พิพัฒน์ วงศ์จักร^{1*}, จริญญา คนแรง¹, ธนพล แสงสุวรรณ¹, ชูชาติ ม่วงโกสัย² และ วิภพ ไจแข็ง¹
Pipat Wongjak^{1*}, Jarun Khonrang¹, Thanapon Saengsuwan¹, Chuchart Mongkosa² and Wipobh Jaikhang¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เชียงราย 57100

² แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคเชียงราย เชียงราย 57000

¹ Department of Electrical Engineering and Smart Grid Technology, Faculty of Industrial Technology,
Chiang Rai Rajabhat University, Chiang Rai 57100

² Electrical Power Department, Chiang Rai Technical College, Chiang Rai 57000

¹Corresponding author: Tel.: 0860969055. E-mail address: pipat@cmtc.ac.th

Abstract

This research aimed to develop an intelligent hydroponic vegetable-growing system integrated with smart microgrid technology, focusing on the integration of precision agriculture and efficient energy management. The system comprises two components: 1. An automatic hydroponic vegetable growing control system that utilizes intelligent sensors to measure and control key factors; and 2. A smart microgrid system that integrates solar power and energy storage systems. Test results showed that the smart microgrid system reduced energy consumption by up to 42.62% and maintained stable performance. The hydroponic vegetable growing system accurately controlled pH and nutrient solution concentration, averaging 6.38 and EC values averaging 1.50 mS/cm, compared to traditional growing methods. The integration of these two technologies successfully improved the control efficiency of key cultivation factors. It significantly reduced energy costs at the 0.05 statistical significance level, representing an essential approach for the future development of sustainable smart agriculture.

Keywords: Smart microgrid, Hydroponics, genius

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด โดยมุ่งเน้นบูรณาการระหว่างเทคโนโลยีการเกษตรแม่นยำและการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบของระบบประกอบด้วย 2 ส่วน 1. ระบบควบคุมการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัตโนมัติที่ใช้เซนเซอร์อัจฉริยะในการตรวจวัดและควบคุมปัจจัยสำคัญ 2. ระบบสมาร์ทไมโครกริดที่ผสมผสานการใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน ผลการทดสอบพบว่าระบบสมาร์ทไมโครกริดช่วยลดการใช้พลังงานได้ถึงร้อยละ 42.62 และยังมีเสถียรภาพในการทำงาน สำหรับระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์สามารถควบคุมค่า pH ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร เฉลี่ยอยู่ที่ 6.38 และค่า EC เฉลี่ยอยู่ที่ 1.50 mS/cm ได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกแบบดั้งเดิม การบูรณาการเทคโนโลยีทั้ง 2 ส่วนนี้ประสบความสำเร็จ

ในการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมปัจจัยสำคัญในการเพาะปลูก และลดต้นทุนพลังงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการพัฒนาการเกษตรอัจฉริยะที่ยั่งยืนในอนาคต ต่อไป

คำสำคัญ: สมาร์ทไมโครกริด, ไฮโดรโปนิคส์, อัจฉริยะ

การศึกษาแนวทางการพัฒนาศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา
ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

A Study of Guidelines for Potential Development of Rooftop Solar Power Generation
Systems in Chiang Rai Rajabhat University Area

พิพัฒน์ วรรณิกา^{1*} จรรย์ คนแรง¹ ธนพล แสงสุวรรณ¹ และ วิภพ ไจขันธ์¹

Phiphat Kannika^{1*} Jarun Khonrang¹ Thanapon Saengsuwan¹ and Wipobh Jaikhang¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เชียงราย 57100

¹Department of Electrical Engineering and Smart Grid Technology, Faculty of Industrial Technology,
Chiang Rai Rajabhat University, Chiang Rai 57100

¹Corresponding author: Tel.: 0896362576. E-mail address: Phiphat.kan@crri.ac.th

Abstract

This study aims to evaluate the potential for developing rooftop solar photovoltaic (PV) systems at Chiang Rai Rajabhat University. Ten buildings were selected from a total of 121 based on specific evaluation criteria, excluding those with PV systems already installed. The average solar radiation in the area was found to be 4.73 kWh/m²/day. Simulation using PVSyst software indicated an installed capacity of 2,482 kWp, capable of generating approximately 3,663.85 MWh/year and reducing greenhouse gas emissions by 1,868.93 tCO₂/year. From an economic perspective, under the assumptions of a 7.295% discount rate, an electricity tariff of 4.73 THB/kWh (average for 2024), a project lifespan of 25 years, and inverter replacement every 10 years, the analysis showed a Net Present Value (NPV) of 257.58 million THB, an Internal Rate of Return (IRR) of 26.49%, and a payback period of 3.60 years. The system could reduce electricity costs by up to 65%, demonstrating both economic and environmental feasibility of the proposed project.

Keywords: Rooftop Solar System, PVSyst Program, Carbon Credit

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพในการพัฒนาระบบโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งบนหลังคาในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย โดยคัดเลือกอาคาร 10 หลังจากทั้งหมด 121 หลังตามเกณฑ์การประเมิน (ไม่รวมอาคารที่ติดตั้งระบบแล้ว) พบว่าค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ 4.73 kWh/m²/วัน การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PVSyst มีกำลังการผลิตติดตั้ง 2,482 kWp สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 3,663.85 MWh/ปี และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 1,868.93 ตัน CO₂/ปี ในด้านเศรษฐศาสตร์ภายใต้สมมติฐานอัตราคิดลด 7.295%, ค่าไฟฟ้า 4.73 บาท/ kWh (ค่าเฉลี่ยปี 2567), อายุโครงการ 25 ปี, และเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ทุก 10 ปี พบว่าโครงการมีให้ผลลัพธ์ดังนี้ NPV 257.58 ล้านบาท, IRR 26.49% และคืนทุนใน 3.60 ปี ช่วยลดค่าไฟได้ถึง 65% แสดงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา, โปรแกรม PVSyst, คาร์บอนเครดิต

บทนำ

การเติบโตทางเศรษฐกิจและจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นำไปสู่ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและวิกฤตพลังงาน ทำให้หลายประเทศรวมถึงประเทศไทยหันมาเน้นพัฒนาพลังงานทดแทน โดยกำหนดเป้าหมายผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 15,574 เมกะวัตต์ภายในปี 2580 เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [1] พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง [2] มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ตั้งอยู่ทางภาคเหนือ มีพื้นที่กว่า 940 ไร่ ประกอบด้วยอาคารเรียน อาคารปฏิบัติการ และหอพักนักศึกษา มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง และติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์บนหลังคาแล้ว 10 หลัง กำลังผลิตรวม 501.12 kWp [3] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศชี้ให้เห็นศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม เช่น การประเมินระบบบนหลังคาในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [9] โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า [10] และเทศบาลตำบลแม่เกาะ [11] ในขณะที่งานวิจัยในอดีตชี้ว่าขนาดกำลังผลิตและต้นทุนส่งผลต่อระยะเวลาคืนทุนและต้นทุนการผลิตไฟฟ้า [12] งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้า ผลกระทบสิ่งแวดล้อม และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบโซลาร์เซลล์บนหลังคาในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เพื่อสนับสนุนการพัฒนาพลังงานทดแทนในสถาบันการศึกษาอย่างยั่งยืนต่อไป

วิธีการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยการศึกษาแนวทางการพัฒนาศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ประกอบด้วย ดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

1.1 คัดเลือกอาคารสำหรับติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 10 หลัง จาก 121 หลัง โดยใช้เกณฑ์ ได้แก่ 1) หลังคาหันทางทิศใต้หรือทิศตะวันออกเฉียงใต้ 2) มีพื้นที่หลังคาเพียงพอ โดยเลือกเฉพาะอาคารคอนกรีตหรือเมทัลชีท 3) โครงสร้างหลังคารับน้ำหนักแผงและแรงลมได้อย่างปลอดภัย 4) ระบบไฟฟ้ามีความพร้อมและใกล้จุดเชื่อมต่อการไฟฟ้า ทั้งนี้ ใช้ Google Earth ในการคำนวณพื้นที่อาคาร

1.2 ทำการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายในปี 2567 โดยใช้ข้อมูลจากมิเตอร์ AMR และบิลค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [5] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงาน

1.3 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงรายมีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคารวมขนาด 501.12 kWp ติดตั้งบนอาคารจำนวน 10 หลัง ใช้เป็นข้อมูลแหล่งพลังงานทดแทนภายในมหาวิทยาลัย [3]

2. การวิเคราะห์ศักยภาพและความเหมาะสม แบ่งเป็น 4 ด้าน ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงกายภาพ

2.1.1 การศึกษาความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ ใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูล V.660317 ของ พพ. โดยเลือกพื้นที่ตำบลบ้านดู่ จังหวัดเชียงราย ผ่านสถานีเชียงราย ซึ่งมีข้อมูลย้อนหลัง 5 ปี (พ.ศ. 2559–2563) จาก 38 สถานีทั่วประเทศ ที่ทำการหาค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรายวัน รายเดือนและรายปี การผลิตไฟฟ้ามีความแตกต่างตามฤดูกาล โดยฤดูร้อนและฤดูแล้งให้พลังงานมากกว่าฤดูฝน เนื่องจากมีระยะเวลาแสงอาทิตย์ยาวนานกว่าและมีเมฆฝนน้อยกว่า เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ [6]

2.1.2 พื้นที่หลังคาที่ใช้ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คำนวณจากพื้นที่หลังคารวมของอาคารทั้ง 10 หลัง โดยหักพื้นที่ที่ไม่สามารถติดตั้งได้ออก 25% เพื่อความแม่นยำในการออกแบบระบบ

2.2 การวิเคราะห์ทางเทคนิค

2.2.1 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst Version 8.0.12 เป็นการออกแบบระบบ Solar Rooftop แบบเชื่อมต่อสายส่ง (On Grid) [7] โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Monocrystalline ขนาด 600 Wp (STC 22.21%) และอินเวอร์เตอร์รวม 17 เครื่อง ติดตั้งบนอาคาร 10 หลัง โดย 9 หลังหันทางทิศใต้ (Azimuth 0°, Tilt 20°) และ 1 หลังหันทางตะวันออกเฉียงใต้ (Azimuth 107°, Tilt 6°) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมจริง

2.2.2 ทำการเปรียบเทียบปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากระบบ Solar Rooftop กับปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริง โดยอ้างอิงข้อมูลจากบิลค่าไฟฟ้าและระบบ AMR ของปี 2567 เพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องและประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้า

2.3 การวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม ในโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนใช้ระเบียบวิธี T-VER-S-METH-01-01 ภายใต้โครงการ T-VER โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ โดยคำนวณค่าคาร์บอนเครดิตจากความแตกต่างระหว่างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกรณีฐาน (Baseline) กับโครงการ (Project) ซึ่งใช้ค่าปล่อยก๊าซเรือนกระจก 0.5101 tCO₂/MWh อ้างอิงจากประกาศของ อบก. ปี 2568 [4] โดยมีระยะเวลาคาร์บอนเครดิต 10 ปี คำนวณได้จากสมการ (1)

$$\text{Carbon Credit} = \text{Energy Produced} \times \text{Emission Factor} \quad (1)$$

โดยที่ Carbon Credit คือ ค่าคาร์บอนเครดิต (tO₂e/MWh), Energy Produced คือ ค่าพลังงานที่ผลิตได้ (MWh), Emission Factor คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (tO₂e/MWh)

กำหนดสมมติฐานว่าไฟฟ้าจากระบบ Solar PV ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสามารถทดแทนไฟฟ้าจากกริดได้ทั้งหมด โดยใช้ค่า Emission Factor เท่ากับ 0.5101 tCO₂e/MWh โดยไม่มีการใช้ดีเซลหรือพลังงานอื่นในโครงการ

2.4 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์หาผลตอบแทนด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์ โดยการวิเคราะห์ต้นทุนผลได้ (Cost-Benefit Analysis) ได้แก่

2.4.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (NPV) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [13]

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_o \quad (2)$$

โดยที่ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (บาท), Est คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละปี (บาท), n คือ อายุโครงการ (ปี), i คือ อัตราคิดลด (Discount Rate), t คือ Time Of cash flow, I_o คือ เงินลงทุนตอนเริ่มโครงการ (บาท)

2.4.2 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3) [13]

$$I_o = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (3)$$

โดยที่ IRR คือ อัตราผลตอบแทนภายใน, Est คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละปี (บาท), I_o คือ เงินลงทุนตอนเริ่มโครงการ (บาท), r คือ อัตราคิดลด (Discount Rate), t คือ Time Of cash flow, n คือ อายุโครงการ (ปี)

2.4.3 ระยะเวลาคืนทุน (Discounted Payback Period) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4) [14]

$$DPP = \sum_{t=1}^m \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = C_o \quad (4)$$

โดยที่ DPP คือ ระยะเวลาคืนทุนแบบคิดลด, B_t คือ ผลตอบแทนของโครงการที่เกิดขึ้นในแต่ละปี, C_t คือ ต้นทุนโครงการที่เกิดขึ้นในแต่ละปี, r คือ อัตราคิดลด (Discount Rate), m คือ ปีที่คืนทุน หรือระยะเวลาคืนทุนเป้าหมาย (Target Payback Period), t คือ ปี (0 แทนปีปัจจุบัน, 1 แทนอีก 1 ปีข้างหน้า ตามลำดับ)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เป็นการประเมินผลกระทบจากความไม่แน่นอนของต้นทุนและผลประโยชน์ในอนาคต โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV), อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (B/C Ratio) และอัตราผลตอบแทนทางการเงิน (IRR) เพื่อพิจารณาความเหมาะสมทางการเงินของโครงการภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลง

3. การพัฒนาแนวทางและข้อเสนอแนะ คือ การนำผลวิเคราะห์มาพัฒนาเป็นแนวทางที่เป็นรูปธรรม

4. แนวทางการพัฒนาศักยภาพที่เหมาะสมและยั่งยืน คือ ผลลัพธ์สุดท้ายของงานวิจัย

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา วิเคราะห์การลดก๊าซเรือนกระจก (Carbon Credit) และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ดังนี้

1. ผลการเก็บรวบรวมข้อมูล

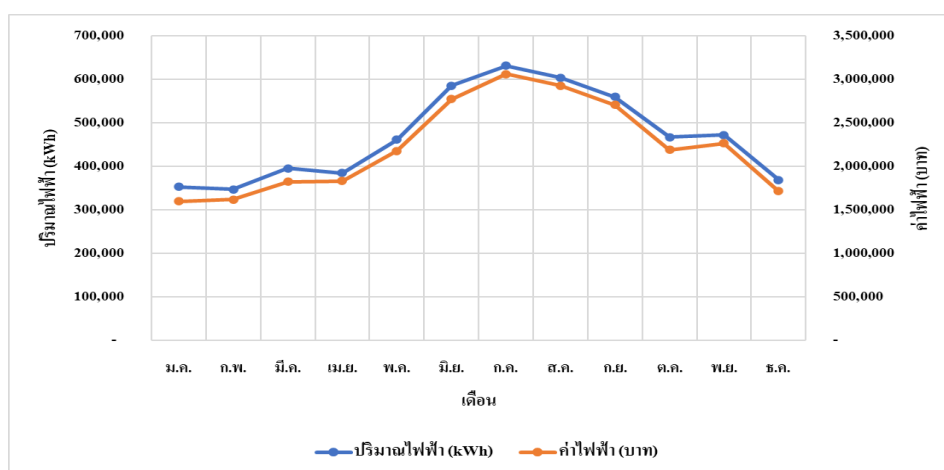
1.1 ผลคัดเลือกอาคารพื้นที่ที่สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามเกณฑ์การประเมินอาคารของมหาวิทยาลัย จำนวน 10 อาคาร จาก 121 อาคาร ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคัดเลือกอาคาร ตามเกณฑ์การประเมินอาคารของมหาวิทยาลัย

เกณฑ์การประเมินอาคาร	จำนวนอาคาร
ทิศทางของหลังคา	82
พื้นที่หลังคาที่ใช้งานได้	57
ความแข็งแรงและโครงสร้างของหลังคา	28
ความเหมาะสมด้านระบบไฟฟ้าและการเชื่อมต่อ	10

ทำการคำนวณพื้นที่ติดตั้งระบบ Solar Rooftop โดยใช้ Google Earth วัดพื้นที่หลังคาและหักพื้นที่ที่ไม่สามารถติดตั้งได้ ได้แก่ พื้นที่เงาบัง 15% และพื้นที่สำหรับทางเดิน/บำรุงรักษา 10% ของพื้นที่รวมทั้ง 10 อาคาร พบว่าพื้นที่ติดตั้งสุทธิเท่ากับ 11,516.29 ตารางเมตร

1.2 ผลการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ของปี 2567 การใช้ไฟฟ้ารวม 5,637,000 kWh ค่าใช้จ่ายรวม 26,734,291.08 บาท ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.73 บาท/kWh



ภาพที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าปี 2567

จากภาพที่ 1 พบว่าเดือนกรกฎาคมมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้างรวมมากที่สุด คือ 632,160 kWh/เดือน เป็นเงิน 3,065,503.8 บาท/เดือน และเดือนมกราคมมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้างรวมน้อยที่สุด คือ 347,820 kWh/เดือน เป็นเงิน 1,601,345.80 บาท/เดือน

1.3 ผลการเก็บข้อมูลแหล่งพลังงานทดแทนภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ขนาด 501.12 KWp จำนวน 10 อาคาร

2. ผลการวิเคราะห์ศักยภาพและความเหมาะสม แบ่งเป็น 4 ด้าน ดังนี้

2.1 ผลการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงกายภาพ

2.1.1 ผลความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiance) พบว่าค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 17.03 MJ/m²/day หรือ 4.73 kWh/m²/day (1 Kwh เท่ากับ 3.6 MJ)

2.1.2 พื้นหลังคาของอาคารที่ติดตั้ง โดยคำนึงถึงพื้นที่ที่ไม่สามารถติดตั้งได้ คิดเป็น 25% ของทั้ง 10 อาคาร มีพื้นที่รวม 11,516.29 ตารางเมตร ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 4.73 kWh/m²/day จะมีศักยภาพเชิงกายภาพรวม 54,472.04 kWh/day

2.2 ผลการวิเคราะห์ทางเทคนิค

2.2.1 ผลการสร้างแบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์ PVsyst คือ ทำการจำลองติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) แบบเชื่อมต่อกับสายส่ง (On Grid) แสดงผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Pvsyst

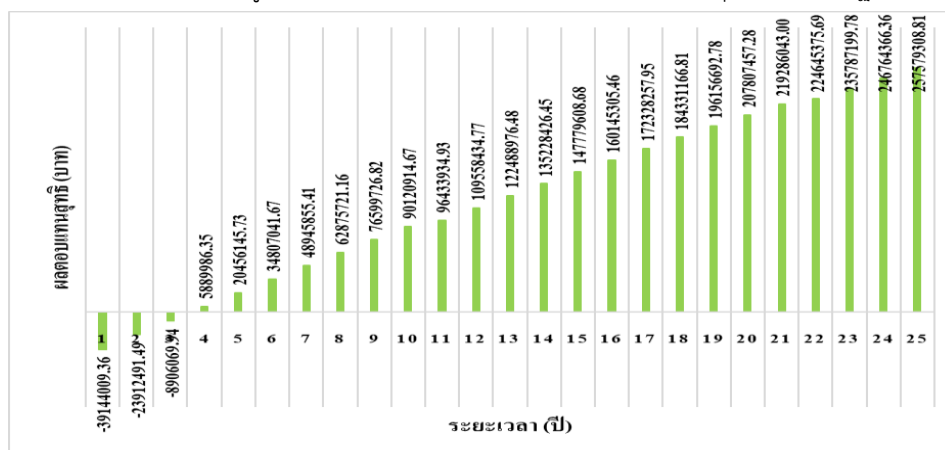
ลำดับที่	ชื่ออาคาร	พื้นที่หลังคา (ตร.ม.)	ขนาดติดตั้ง (kWp)	ผลผลิตไฟฟ้า (MWh/ปี)	PR (%)	พลังงานสุทธิที่ได้ (kWh/kWp/ปี)
1	หอประชุมใหญ่	5,897.12	1,267.00	1,814.70	85.77	1,432
2	หอประชุมสุพรรณิการ์	474.89	101.00	153.96	85.99	1,527
3	คณะนิติศาสตร์	401.61	86.40	132.37	86.25	1,532
4	คณะรัฐศาสตร์ฯ	542.82	120.00	181.91	85.35	1,516
5	ไบโอเทค 1	372.73	81.60	125.12	86.32	1,533
6	หอหญิงราชภัฏ 8	638.15	140.00	211.76	84.93	1,508
7	หอหญิงราชภัฏ 9	638.15	140.00	211.76	84.93	1,508
8	หอหญิงราชภัฏ 11	638.15	140.00	211.76	84.93	1,508
9	โรงเรียนเนเซียม	1,590.23	343.00	523.61	85.89	1,525
10	ฟิตเนส	322.44	63.00	96.90	86.60	1,538
รวม		11,516.29	2,482.00	3,663.85		

จากตารางที่ 2 พบว่าการจำลองด้วยโปรแกรม Pvsyst อาคารฟิตเนสมีค่าพลังงานสุทธิที่ได้มีค่ามากที่สุด คือ 1,538 kWh/kWp/ปี เพราะหลังคาหันไปทางทิศใต้ และอาคารหอประชุมใหญ่มีค่าน้อยที่สุด คือ 1,432 kWh/kWp/ปี เพราะหลังคาหันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้

2.2.2 ผลการเปรียบเทียบการผลิตกับการใช้ไฟฟ้า พบว่า ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยปี 2567 เท่ากับ 5,637 Mwh การผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ทั้งปี เท่ากับ 3,663.85 Mwh คิดเป็น 65 % และการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบภายนอก (การไฟฟ้า) เท่ากับ 1,973.15 Mwh คิดเป็น 35 % ของปริมาณการใช้ไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยปี 2567

2.3 ผลการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม ค่าคาร์บอนเครดิตใช้ T-VER-S-METH-01-01 มีค่าเท่ากับ 1,868.93 tCO₂/ปี และมีระยะเวลาคาร์บอนเครดิต 10 ปี มีค่าเท่ากับ 18,689.3 tCO₂ โดยราคาซื้อขายเฉลี่ยในประเทศไทยไตรมาสแรกปีงบประมาณ 2568 อยู่ที่ 174.52 บาท/ตัน

2.4 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการติดตั้งระบบ Solar PV ขนาด 2,482 kWp มีต้นทุนรวม 54.60 ล้านบาท อายุโครงการ 25 ปี พบว่า NPV เท่ากับ 257.58 ล้านบาท, IRR เท่ากับ 26.49% และระยะเวลาคืนทุน 3.60 ปี การวิเคราะห์ความอ่อนไหวเมื่อราคาต้นทุนลดลง 5% ทำให้ IRR เพิ่มขึ้นเป็น 28.16% และ NPV เพิ่มขึ้นเป็น 261.97 ล้านบาท ส่วนกรณีใช้อัตราส่วนลด 3% พบว่า NPV สูงถึง 393.49 ล้านบาท แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ



ภาพที่ 2 ผลการประเมินจุดคุ้มทุนจากการติดตั้งระบบ Solar PV

จากภาพที่ 2 พบว่าผลตอบแทนสุทธิของการติดตั้งระบบ Solar PV ตลอด 25 ปี มีการคืนทุนได้เร็วในปีที่ 3-4 จากนั้นสร้างกำไรสะสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณ 257,579,308.81 บาท ในปีที่ 25 แสดงให้เห็นว่าโครงการมีความคุ้มค่ากับการลงทุนสูงมาก

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์วิเคราะห์ศักยภาพระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ครอบคลุมด้านกายภาพ เทคนิค สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ โดยคัดเลือกอาคาร 10 หลังจากทั้งหมด 121 หลัง พบค่าความเข้มรังสีเฉลี่ย 4.73 kWh/m²/day และพื้นที่หลังคาที่เหมาะสมผลิตไฟฟ้าได้รวม 54,472.04 kWh/day ระบบขนาดติดตั้ง 2,482 kWp ให้พลังงาน 3,663.85 MWh/ปี ลดก๊าซเรือนกระจก 1,868.93 tCO₂/ปี ด้านเศรษฐศาสตร์ ภายใต้อัตราคิดลด 7.295% ค่าไฟฟ้า 4.73 บาท/ kWh อายุโครงการ 25 ปี พบว่ามูลค่า NPV 257.58 ล้านบาท IRR 26.49% และระยะเวลาคืนทุน 3.60 ปี อีกทั้งยังช่วยลดค่าไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยได้ 65% การวิเคราะห์ความอ่อนไหวเมื่อราคาต้นทุนลดลง 5% ทำให้ IRR เพิ่มขึ้นเป็น 28.16% และ NPV เพิ่มขึ้นเป็น 261.97 ล้านบาท ส่วนกรณีใช้อัตราส่วนลด 3% พบว่า NPV สูงถึง 393.49 ล้านบาท ผลศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของการณัย ชัยวนิชย์ และคณะ (2561) ที่ศึกษาระบบขนาด 1,500 kW ในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ผลิตไฟฟ้าได้ 2.73 GWh/ปี ลดก๊าซเรือนกระจก 1,549 tCO₂/ปี และระยะคืนทุน 12.3 ปี รวมถึงงานของธัญญพัทธ์ ทิพย์ศุภวงศ์ และคณะ (2565) ที่ศึกษาระบบ Solar Rooftop ในเทศบาลแม่มาะ ผลิตไฟฟ้าได้ 152.12 MWh/ปี ลดก๊าซเรือนกระจก กว่า 2,100 ตันตลอดอายุโครงการ มีมูลค่า NPV กว่า 2.36 ล้านบาทและระยะคืนทุน 8.3 ปี แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าของการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2563). **แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1**. สืบค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2568, จากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน: https://www.eppo.go.th/images/Information_service/relations/PDP2018/PDP2018 Rev1.pdf
- [2] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2564). **คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์**. สืบค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2568, จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน : https://oldwww.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf
- [3] มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย. (2563). **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในหน่วยงานภาครัฐ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย งบประมาณปี 2560**. เชียงราย : มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
- [4] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2559). **โครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย(T-VER) มิถุนายน 2559**. สืบค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2568, จากกลไกลดก๊าซเรือนกระจก : <https://ghgreduction.tgo.or.th/about-tver/t-ver.html>
- [5] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.(2568). **Automatic Meter Reading (AMR)**. สืบค้นเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568, จาก: <https://www.amr.pea.co.th/AMRWEB/Index.aspx>
- [6] กระทรวงพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2564). **ฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย V. 660317**. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2568, จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน : <https://maps.su.ac.th/solarth/>
- [7] PVsyst SA. (2562). **โปรแกรม PVsyst**. สืบค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2568, จาก PVsyst SA: <https://www.pvsyst.com>

- [8] ธนาคารกรุงไทย. (2568). อัตราดอกเบี้ยเงินกู้. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2568, จากตารางที่ 2 อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อ เริ่มใช้ตั้งแต่วันที่ 15 พฤษภาคม 2568: https://krungthai.com/Download/rateFee/RateFeeDownload_4979RateFeeDownload_15May25_TH.pdf
- [9] ญัฐพงศ์ สุวรรณสังข์ และโสภิตสุดา ทองโสภิต. (2558). การประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วารสารวิจัยพลังงาน. ปีที่ 12 (ฉบับที่ 2), 59 – 74.
- [10] การุณย์ ชัยวณิชย์, พุทธิ อุลลสุข และมนตรี สังข์ทอง. (2561). การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. วารสารวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. ปีที่ 10 (ฉบับที่ 12), 35 – 46.
- [11] ธัญญพัทธ์ ทิพย์สุภาวงศ์, วัชร วงศ์ปัญญา, บุญวัฒน์ วิจารย์พล, เกศนีย์ อ้นอ้าย และวราคม วงศ์ชัย. (2565). การจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา แบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เม่า จังหวัดลำปาง. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์. ปีที่ 17 (ฉบับที่ 1), 81 – 97.
- [12] Satish Kumar Yadav and Usha Bajpai. (2020). Energy, economic and environmental performance of a solar rooftop photovoltaic system in India. International Journal of Sustainable Energy. 39 (1), 51 – 66 : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786451.2019.1641499>
- [13] พชรินทร์ อินทมาศ, มณีรัตน์ ชัยสกุลนิยม, พเนตร์ สุขสิงห์, อีระพงษ์ บุญรักษา และพรหมพักตร์ บุญรักษา. (2565). การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา ระดับครัวเรือน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์. เล่มที่ 4 (ฉบับที่ 3), 47 – 56.
- [14] กนิกันต์ กล้าหาญ. (2556). แบบจำลองการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนโครงการด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ กรณีศึกษาหน่วยงานของมหาวิทยาลัยของรัฐ. วิทยานิพนธ์ (วท.ม. (การจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศ)) : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ
เพื่อเพิ่มผลผลิตและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากกาบหมาก

Study of Optimal Conditions for Physical Activation in Activated Carbon Production to
Enhance Yield and BET Surface Area from Areca Spathe

ลลิตา เพชรใจหาญ¹ ธเนศ ไชยชนะ¹ กิตติกร สาสุจิตต์¹ และ ภคมน ปินตานา^{2*}

Lalita Petchaihan¹ Tanate Chaichana¹ Kittikorn Sasujit¹ and Pakamon Pintana^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

¹ Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

² สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน (ต่อเนื่อง) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

² Energy Conservation Engineering (Continuing Program), School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290

¹Corresponding author: Tel.: 09-86196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

Abstract

This study aimed to determine the optimal conditions for producing activated carbon from areca spathe via physical steam activation, to enhance the yield and BET surface area of the produced activated carbon. The experiments were designed using the Response Surface Methodology (RSM) with the Box–Behnken Design (BBD) under three main factors: activation temperature (700–900 °C), activation time (1–3 h), and steam flow rate (50–100 cm³/min). The results showed that activation temperature and time significantly influenced the characteristics of the activated carbon, particularly yield and surface area. Increasing the temperature and activation time improved surface area and pore development but reduced the yield due to carbon structure decomposition. The steam flow rate had less influence; however, excessively high values led to material degradation and ash formation. From the mathematical model and experimental results, the optimal conditions were found to be 800 °C, two hours, and a steam flow rate of 50 cm³/min, yielding approximately 60% and achieving a maximum BET surface area of 652.97 m²/g. These values are consistent with the standard range for biomass-based activated carbon and are suitable for adsorption and environmental treatment applications. Moreover, the process does not involve chemical agents, making it environmentally friendly.

Keywords: Activated Carbon, Physical Activation, Yield, BET Surface Area, Areca Spathe

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบหมากด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ เพื่อเพิ่มผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แบบ Box–Behnken Design (BBD) ภายใต้ตัวแปรสำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ 700–900 °C เวลา 1–3 h และอัตราการไหลของไอน้ำ 50–100 cm³/min ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะค่าพื้นที่ผิวและผลผลิต

การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แต่ทำให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากการสลายโครงสร้างคาร์บอน ส่วนอัตราการไหลของไอน้ำมีผลน้อยกว่า แต่หากสูงเกินไปจะทำให้ถ่านสลายตัวเป็นเถ้า จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง และอัตราการไหลของไอน้ำ 50 ตารางเซนติเมตรต่อนาที ซึ่งให้ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 60% และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 652.97 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของถ่านกัมมันต์จากชีวมวล และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานดูดซับและบำบัดสิ่งแวดล้อม ทั้งยังเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้สารเคมี จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นทางกายภาพ ผลผลิต พื้นที่ผิวจำเพาะ กาบหมาก

การอบกระเจูดด้วยตู้อบแห้งพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล Baking of Krajoed (*Lepironia articulata*) With biomass heat energy dryer

ปนิพันธ์ สีสุวรรณ¹, พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์¹ และ นิโอะ ปูซู^{2*}
Panipan Sisuwarn¹, Phanpen Thavornprasit¹ and Ni-oh Puzu^{2*}

¹ สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ นราธิวาส 96000

¹ Department of Technology and Innovation Management, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, 96000

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwat, 96000

Corresponding author: Tel.: +66-850813199. E-mail address: nioh.p@pnu.ac.th

Abstract

This research designed and developed a (krajoed) drying room powered by biomass fuel to overcome the limitations of sun drying for community enterprises. The drying room was intended to have double-sided walls to allow heat from the waste-biomass stove to pass through. Drying tests were conducted using 1 kg of krajoed, starting at 56% humidity and reaching approximately 2% humidity at the end of the experiment. The room temperature was controlled at 55, 60, and 65°C. The results showed that higher drying temperatures accelerated moisture absorption but affected the physical characteristics of the krajoed. At 55°C, the drying time was 420 min, and the krajoed shrank and faded significantly. At 60°C, the drying time was reduced to 300 min, and the krajoed still retained its color close to its original state, making it optimal for weaving. At 65°C, the drying time was reduced to 240 min, but the krajoed warped and darkened, making it unsuitable for weaving. Conclusion: The results show that the designed drying room can effectively control temperature and produce krajoed with the desired physical properties for weaving, thus providing an alternative to traditional sun drying. The most suitable drying temperature is 60°C.

Keywords: sedge, drying chamber, moisture, reduction

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งกระเจูดโดยใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อลดข้อจำกัดจากวิธีตากแดดให้กับวิสาหกิจชุมชน ตู้อบแห้งออกแบบให้มีผนังด้านข้างสองชั้นเพื่อให้ความร้อนที่ไล่จากเตา ชีวมวลร้อนจากการเผาไหม้ไหลผ่าน จากการทดลองอบแห้งกระเจูดน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 56 เปอร์เซ็นต์ และสิ้นสุดการทดลองที่ความชื้นเหลือ 2 เปอร์เซ็นต์ ภายในตู้อบควบคุมตามเงื่อนไขที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ช่วยลดความชื้นได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้ง 420 นาที ลักษณะกระเจูดมีการหดตัวและสีต่างไปจากธรรมชาติ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้ง 300 นาที ลักษณะกระเจูดมีสีใกล้เคียงกับกระเจูดที่ผ่านการตากแดดจากธรรมชาติ ซึ่งกรณีนี้เหมาะสมต่อการนำไปจักสานมากที่สุดและอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้ง 240 นาที กระเจูดมีลักษณะบิดงอ ไม่เหมาะสมสำหรับ

เป็นวัตถุดิบที่นำไปจักสานเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องจักสาน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าตู้อบกระจุที่ได้ออกแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิและอบแห้งกระจุให้มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับการจักสานแทนการตากแดดธรรมชาติได้ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 60 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: กระจุ ตู้อบ ลดความชื้น ความชื้น

การอบแห้งพริกจินดาแดงโดยใช้ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานกับแหล่ง
ความร้อนเสริมจากก๊าซหุงต้ม

Drying of Jinda Red Chili Using a Solar Water Heating System Combined with an
Auxiliary Heat Source from Liquefied Petroleum Gas

Xai HER² สุระพล รียะนา² นิกราน หอมดวง¹ และ กิตติกร สาสุจิตต์^{1*}

Xai HER² Surapon Riyana² Nigran Homdoun¹ and Kittikorn Sasujit^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

² สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

¹ Energy Conservation Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

² Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

¹Corresponding author: Tel.: 089-9988203. E-mail address: k.sasujit@yahoo.com

Abstract

Drying is a widely used method for processing agricultural products. However, further study is needed on factors affecting drying quality, as well as on the potential of alternative energy technologies for the drying process to reduce fossil fuel energy consumption. This research aims to study the drying of 50 kg of Jinda red chili using a primary heat source from a solar water heating system, combined with an additional heat source from liquefied petroleum gas (LPG) to maintain the water temperature at the required drying temperature. The hot water storage tank transfers heat to the surrounding air, which is then converted into hot air for drying. The temperature is maintained at $55 \pm 3^\circ\text{C}$ by an intelligent control system that manages the circulation pump and the hot-air exchange fan before the air enters the drying chamber. The results showed that at a water flow rate of 15 kg/min, the heat value of the hot water was 1,705 MJ, with the highest water temperature from the solar panel reaching 83.20°C . When the hot water was sent to the cross-flow heat exchanger to transfer heat to the surrounding air, the average temperature of the hot air before entering the drying chamber was 73.93°C , with a hot air heat value of 1,336 MJ. The moisture content of Jinda chili was reduced from an initial 307.49 % db to a final 3.66 % db within 48 hours. The economic evaluation showed an initial investment of 50,000 Baht for the system, with variable costs of 377,729.44 Baht/year, net return of 28,350.56 Baht/year, and a payback period of 1.76 years. The specific energy consumption (SEC) from electricity and LPG was 12.72 MJ/kg_{water-evap}. Therefore, the study demonstrates that using solar energy, combined with supplementary heat from LPG, to produce hot water for heat exchange and increase the temperature of the surrounding air to hot air for drying is an interesting alternative in renewable energy drying technology. The dried products also maintain their quality and standards.

Keywords: solar energy dryer, hot water, hot air, Jinda chili

บทคัดย่อ

การอบแห้งถือว่าเป็นกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรอย่างหนึ่งที่มีความนิยม อย่างไรก็ตามยังคงต้องศึกษาถึงปัจจัยที่ผลต่อคุณภาพของการอบแห้งรวมถึงเทคโนโลยีทางด้านพลังงานทดแทนที่จะนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากการอบแห้งพริกจินดาแดงจำนวน 50 kg โดยใช้แหล่งความร้อนหลักจากระบบผลิตน้ำร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนเสริมก๊าซหุงต้มสำหรับการรักษาอุณหภูมิของน้ำให้สอดคล้องกับอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้ง ดังเก็บน้ำร้อนจะถ่ายเทความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศแวดล้อมเป็นลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิในช่วง $55 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ผ่านระบบควบคุมแบบอัจฉริยะในการควบคุมระบบเครื่องสูบน้ำหมุนเวียนและพัดลมแลกเปลี่ยนอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ 15 kg/min จะให้ค่าความร้อนของน้ำร้อนเท่ากับ $1,705 \text{ MJ}$ ที่อุณหภูมิความร้อนออกจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุด 83.20°C เมื่อน้ำร้อนถูกส่งไปยังชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศแวดล้อม พบว่ามีอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย 73.93°C ปริมาณความร้อนอากาศร้อน $1,336 \text{ MJ}$ เมื่อทำการอบแห้งพริกจินดาแดงพบว่าสามารถลดความชื้นเริ่มต้น $307.49 \text{ \%db}$ จนเหลือความชื้นสุดท้าย $3.66 \text{ \%db}$ ภายในระยะเวลา 48 h เมื่อประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ พบว่ามีเงินลงทุนเริ่มต้นค่าระบบ 50,000 บาท มีค่าใช้จ่ายแปรผันรวม $377,729.44 \text{ Baht/y}$ ให้ผลตอบแทนสุทธิ $28,350.56 \text{ Baht/y}$ ระยะเวลาคืนทุนภายใน 1.76 ปี โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากไฟฟ้าและแก๊สหุงต้ม (SEC) เท่ากับ $12.72 \text{ MJ/kg}_{\text{water-evap}}$ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริมจากแก๊สหุงต้มโดยผลิตน้ำร้อนเพื่อนำไปแลกเปลี่ยนกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเป็นลมร้อนในการอบแห้ง เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในด้านเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานทดแทน และผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ยังคงซึ่งคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ: ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ น้ำร้อน ลมร้อน พริกจินดาแดง

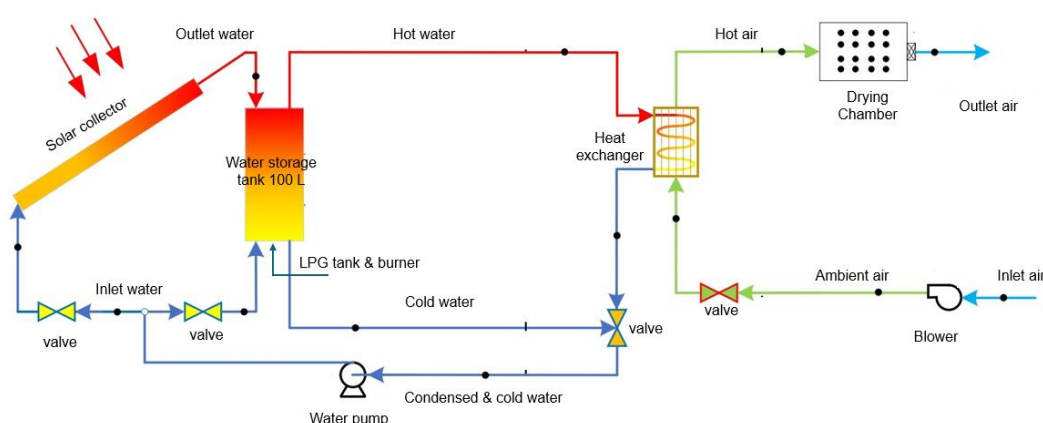
บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมีหลากหลายรูปแบบทั้งรูปแบบการใช้พลังงานจากไฟฟ้า พลังงานจากก๊าซหุงต้ม และพลังงานในกลุ่มฟอสซิลอื่น ๆ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าราคาพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อภาคธุรกิจที่แปรรูปอาหาร หรือกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่ทำการแปรรูปอาหารผ่านกระบวนการอบแห้งทำให้มีต้นทุนทางด้านพลังงานสูงขึ้น การอบแห้ง (Drying) ถือว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยิยมในการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรไว้ให้นานขึ้น สามารถนำมาบริโภคในช่วงที่ไม่มีผลผลิต นอกจากนั้นยังเป็นการถนอมอาหารขึ้นเริ่มต้นที่นิยมมาตั้งแต่โบราณกาลซึ่งนิยมนำผลผลิตทางการเกษตรมาตากแห้งด้วยวิธีการทางธรรมชาติ (Open sun drying) ซึ่งมักพบปัญหาในเรื่องความสะอาด ระยะเวลาการตากแดดให้แห้งใช้เวลานาน รวมไปถึงผลผลิตที่มีน้ำในผลิตภัณฑ์มาก ๆ เช่นกลุ่มผลไม้ มะม่วง ลำไย ก็มักจะเกิดเชื้อราเน่า หากไม่สามารถไล่ความชื้นในผลิตภัณฑ์ออกให้หมดจนผลิตภัณฑ์แห้ง ต่อมามีการพัฒนาใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยอาศัยแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง แต่ก็พบปัญหาในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ และช่วงกลางคืนก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดเชื้อราขึ้น ต่อมาก็มีการใช้ไฟฟ้าหรือก๊าซหุงต้มอย่างเดียวนในการอบแห้งพบว่าให้อัตราการอบแห้งที่ดี และผลิตภัณฑ์อบแห้งได้คุณภาพแต่ก็ยังคงพบปัญหาเรื่องต้นทุนทางด้านพลังงานทั้งราคาไฟฟ้าและก๊าซหุงต้ม ต่อมาก็มีการพัฒนาการใช้ตู้อบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานกับแหล่งความร้อนเสริมจากไฟฟ้าหรือก๊าซหุงต้ม ก็ยังคงพบปัญหาข้อจำกัดทางด้านการใช้งานตู้อบแห้ง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่านอกจากตู้อบแห้งแล้วระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งก็มีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการอบแห้งหากเกษตรกรต้องการผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรแห้งที่มีคุณภาพ โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความโดดเด่นที่นำมาใช้สร้างระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งคือเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things) [1] เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก แม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์งานร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดให้ใช้งานได้ โดยปกติระบบควบคุมที่สร้างโดยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่งจะแบ่งออกเป็นสามส่วนใหญ่ ๆ คือระบบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งพริกโดยใช้ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานกับระบบแหล่งความร้อนก๊าซหุงต้มที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบอัจฉริยะผ่านเซนเซอร์ตรวจวัดต่าง ๆ โดยใช้พริกจินดาแดงเป็นตัวอย่างในการทดลอง โดยควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งในช่วง $55 \pm 3^{\circ}\text{C}$ [2] ซึ่งใช้แหล่งความร้อนจากระบบผลิตน้ำร้อนเก็บสะสมในถังเก็บน้ำร้อน และยังมีแหล่งความร้อนเสริมที่ใช้พลังงานก๊าซหุงต้มร่วมด้วย จากนั้นนำน้ำร้อนไปแลกเปลี่ยนกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับอากาศแวดล้อมได้ลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อใช้ในการอบแห้ง ท้ายที่สุดในงานวิจัยนี้ก็จะประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ เพื่อใช้เป็นตัวตัดสินใจในการลงทุน นอกจากนี้ยังเป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนร่วมกับแหล่งความร้อนเสริมสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางเกษตรอีกทางหนึ่งด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งพริกโดยใช้ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานกับระบบแหล่งความร้อนก๊าซหุงต้ม โดยใช้พริกในการอบแห้งจำนวน 50 kg และระบบควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้ง $55 \pm 3^{\circ}\text{C}$ [2] ผ่านชุดเซนเซอร์และระบบควบคุมแบบอัจฉริยะ โดยชุดการทดลองประกอบไปด้วยแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบสุญญากาศ ขนาดพื้นที่รับแสง 2.84 m^2 พร้อมถังเก็บน้ำร้อนขนาด 100 l และชุดให้ความร้อนเสริมจากก๊าซหุงต้มขนาด 15 kg ซึ่งใช้ในกรณีช่วงไม่มีแสง โดยระบบจะสั่งการผ่านชุดควบคุมแบบอัจฉริยะเพื่อกำหนดการทำงานของเครื่องสูบน้ำหมุนเวียนผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์กับชุดให้ความร้อนเสริมจากก๊าซหุงต้ม เมื่อทำการอบแห้งน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนจะแลกเปลี่ยนกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง (Cross flow heat exchanger) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับอากาศแวดล้อมเพื่อให้ได้อากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งที่กำหนดอุณหภูมิอบแห้งไว้ข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2 โดยการทดลองจะทำการศึกษาศักยภาพการผลิตความร้อนจากระบบผลิตน้ำร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และทำการศึกษาเชิงการทดลองเพื่ออบแห้งพริกที่ควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้ง $55 \pm 3^{\circ}\text{C}$ [2] โดยใช้แหล่งความร้อนผสมผสานกับก๊าซหุงต้ม และท้ายที่สุดจะทำการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของระบบสำหรับการอบแห้ง



12 - 14 พฤศจิกายน 2568



ภาพที่ 2 ระบบอบแห้งพริกโดยใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับก๊าซหุงต้ม

การวิเคราะห์ค่าความชื้นผลิตภัณฑ์

ค่าความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้ในการอบแห้งสามารถตรวจวัดโดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน AOAC โดยใช้วิธีการอบในตู้อบลมร้อน ตั้งค่าอุณหภูมิ 103-105°C ระยะเวลา 72 h หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์หาความชื้น ซึ่งมีวิธีการแสดงค่า 2 รูปแบบตามสมการที่ 1 และสมการที่ 2 [1, 3]

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d} \right) \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb) w คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง (kg) และ d คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (kg)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) คือพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำระเหยซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ สามารถหาได้จากสมการที่ 3 [4, 5]

$$SEC = \frac{3.6P_e + E_{lpg}}{W_i - W_f} \quad (3)$$

โดยที่ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{evap}) W_i คือ น้ำหนักของวัตถุดิบ (kg) W_f คือ น้ำหนักของวัตถุดิบหลังอบแห้ง (kg) P_e คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh) และ E_{lpg} คือค่าพลังงานของก๊าซหุงต้ม (MJ)

การประเมินระยะเวลาคืนทุน

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นการประเมินผลความสามารถในการทำงานโดยการศึกษาต้นทุน ค่าบำรุงรักษา ค่าใช้จ่ายคงที่ ค่าใช้จ่ายแปรผัน และระยะเวลาคืนทุน สามารถประเมินได้จากสมการที่ 4

$$PBP = \frac{P_i}{R_i} \quad (4)$$

โดยที่ PBP คือระยะเวลาคืนทุน (y) P_i คือเงินลงทุนเริ่มต้น (Baht) และ R_i คือผลตอบแทนสุทธิ (Baht/y)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

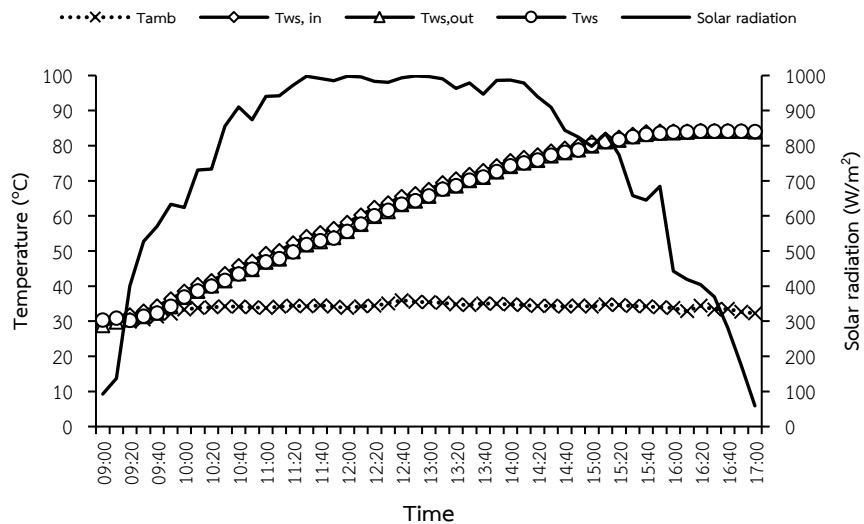
ผลการทดสอบอุณหภูมิของระบบผลิตความร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และความเข้มข้นรังสีแสงอาทิตย์

ผลการทดสอบการผลิตความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเท่ากับ 9.50 kg/min และ 15 kg/min พบว่าแนวโน้มข้อมูลผลการทดลองของอุณหภูมิน้ำเข้า น้ำออกของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะอุณหภูมิน้ำจะเพิ่มตามระยะเวลาของรังสีแสงอาทิตย์ และมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 16.00-16.20 น. โดยในการทดลองนี้ยังไม่มีทำให้ความร้อนเสริมจากก๊าซหุงต้ม จากผลการศึกษาจะเห็นว่าอุณหภูมิน้ำเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ($T_{ws, in}$) สูงสุดเท่ากับ 84.10°C และ 83.20°C อุณหภูมิน้ำออกจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ($T_{ws, out}$) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 84.30°C และ 83.50°C และอุณหภูมิของน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (T_{ws}) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 84.10 °C และ 83.30°C ซึ่งทั้งสองอัตราการไหลของน้ำมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อประเมินค่าพลังงานความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนของน้ำพบว่าจะมีค่าเท่ากับ 1,098.62 MJ และ 1,705.36 MJ ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุด 998.70 W/m² หรือคิดเป็นค่าพลังงานจากแสงอาทิตย์เท่ากับ 2.84 kW ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก) และ (ข) อย่างไรก็ตามความร้อนที่ถังเก็บน้ำร้อนนี้จะถูกนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางระหว่างน้ำร้อนกับอากาศแวดล้อม เพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศให้อยู่ในช่วง 55±3°C สำหรับนำไปอบแห้งพริกในห้องอบแห้ง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ 15 kg/min จะให้ค่าความร้อนสูงกว่าเพื่อที่จะนำไปแลกเปลี่ยนความร้อน งานวิจัยนี้จึงเลือกเงื่อนไขนี้เพื่อใช้ในการทดสอบการอบแห้งพริกในขั้นตอนต่อไป

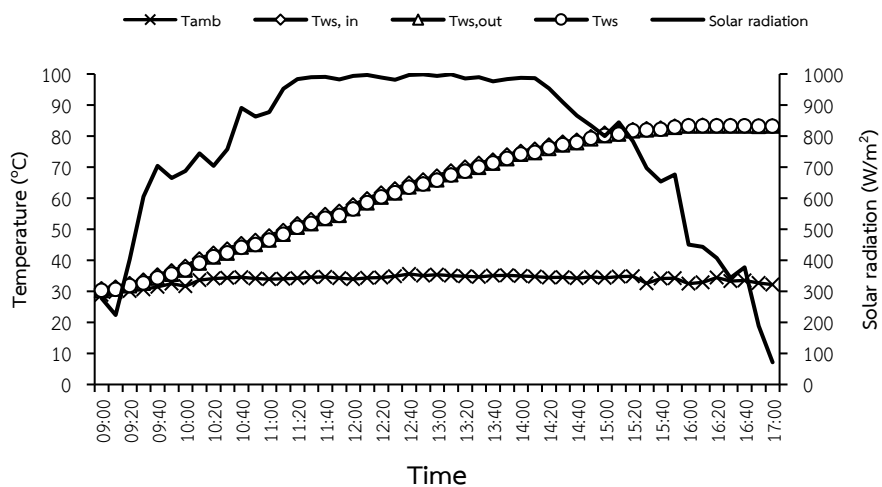
ผลของการใช้พลังงานในการอบแห้งพริกโดยใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับก๊าซหุงต้ม

จากผลการทดสอบการอบแห้งพริกสด 50 kg ที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งในช่วง 55±3°C และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ 15 kg/min และอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ย 1.50 kg/h โดยควบคุมผ่านระบบควบคุมแบบอัจฉริยะ พบว่าอุณหภูมิน้ำเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ($T_{ws, in}$) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 83.20°C อุณหภูมิน้ำออกจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 83.50°C จากข้อมูลจะเห็นว่าระบบเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันซึ่งความร้อนที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์สะสมอยู่ในน้ำร้อนที่ผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และสะสมในถังเก็บน้ำร้อนจะมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 83.30°C ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาอุณหภูมิน้ำออกจากถังเก็บน้ำร้อน ($T_{w-exc, in}$) หรืออุณหภูมิน้ำที่เข้าสู่ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 88.90°C เมื่อผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิ ($T_{w-exc, out}$) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 83.70°C โดยใช้อากาศแวดล้อมอุณหภูมิ ($T_{a, ex-i}$) เฉลี่ยเท่ากับ 28.90 °C ผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 73.93 °C ($T_{a, ex-o}$) จากนั้นผ่านท่อลมส่งเข้าห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 57.20°C (T_{dryer}) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ส่งเข้าห้องอบแห้งแตกต่างกับลมร้อนที่ออกจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น เนื่องจากกระยะทางและท่อส่งลมมีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อส่งลมร้อน ดังภาพที่ 4 (ก.) และเมื่อพิจารณาในส่วนห้องอบแห้งพบว่าอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งมีค่าเฉลี่ย 57.20°C โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพริกในห้องอบแห้งมีการระเหยความชื้นซึ่งส่งผลทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (RH_{dryer}) มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในห้องอบแห้งเทียบกับช่วงระยะเวลาการอบแห้งแล้วพบว่าระบบมีการรักษาอุณหภูมิค่อนข้างสม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลทำให้การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรมีการถ่ายเทความร้อนและมวลไม่เปลี่ยนแปลงทำให้รักษาคุณภาพของพริกแห้งได้ดี ดังภาพที่ 4 (ข.) อย่างไรก็ตามในเงื่อนไขการทดลองนี้จะใช้ก๊าซหุงต้มเป็นแหล่งความร้อนเสริมเพื่อรักษาอุณหภูมิให้ได้ตามเงื่อนไขข้างต้น โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 8.80 kg/ครั้ง และใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 0.30 kW หรือ 14.40 kWh/ครั้ง ที่ระยะเวลาอบแห้งพริกที่ 48 h สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fudholi et al., (2014) มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ 5.26 kWh/kg สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งพริก

โดยสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบพัดลมและขดลวดความร้อนในการอบแห้ง [5] ซึ่งใช้พลังงานต่ำกว่าเนื่องจากไม่มีการใช้เชื้อเพลิงเสริมในกลุ่มของก๊าซหุงต้ม

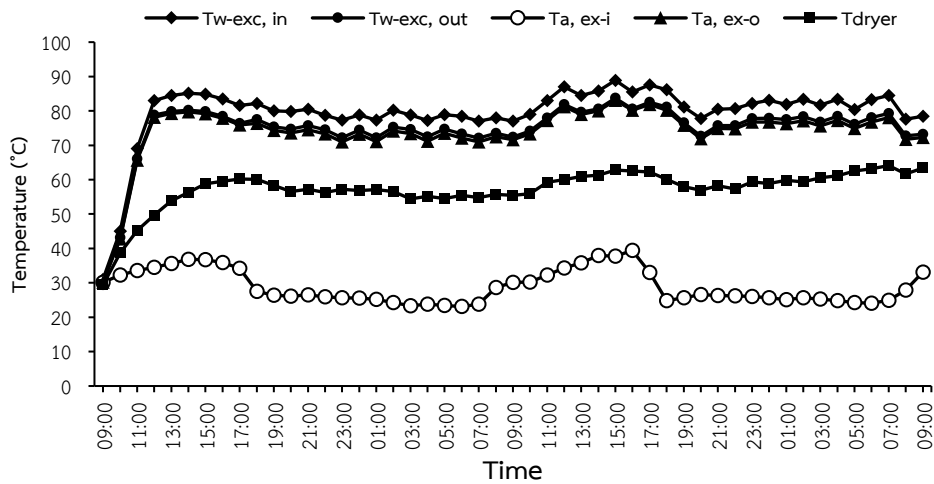


ก.) ผลของอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวล 9.50 kg/min

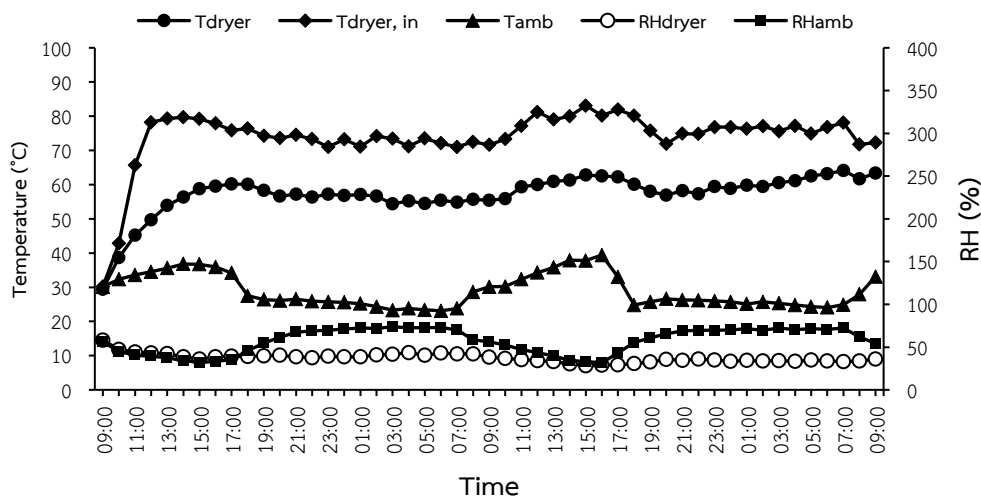


ข.) ผลของอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวล 15 kg/min

ภาพที่ 3 ผลการกระจายอุณหภูมิของระบบผลิตน้ำร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์



ก.) ผลของอุณหภูมิน้ำเข้า ($T_{w-exc, in}$) อุณหภูมิน้ำออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{w-exc, out}$) อากาศเข้า ($T_{a, ex-i}$) อากาศออก ($T_{a, ex-o}$) อุณหภูมิห้องอบแห้ง (T_{dryer}) ตามช่วงระยะเวลาอบแห้ง

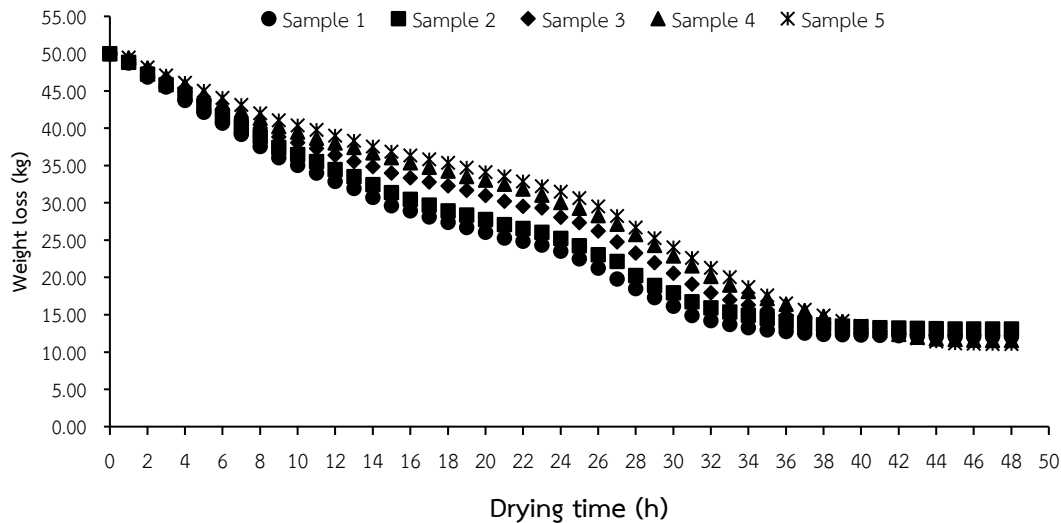


ข.) ผลของลมร้อนเข้าห้องอบแห้ง ($T_{dryer, in}$) อุณหภูมิห้องอบแห้ง (T_{dryer}) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศในห้องอบแห้ง (RH_{dryer}) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม (RH_{amb}) และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_{amb}) ตามช่วงระยะเวลาอบแห้ง

ภาพที่ 4 ผลการกระจายอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ที่ช่วงระยะเวลาอบแห้ง ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำคั่งที่เท่ากับ 15 kg/min

ภาพที่ 5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักฟริกที่ใช้ในการอบแห้งแต่ละตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างที่สุ่มมาซึ่งน้ำหนัก พบว่าน้ำหนักของฟริกจะมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกันทุกตัวอย่าง โดยน้ำหนักเริ่มต้น 50 kg เมื่อผ่านการอบแห้งไประยะเวลา 48 h พบว่าน้ำหนักสุดท้ายในช่วง 11-13 kg ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นของฟริกพบว่ามีความชื้นเริ่มต้น 75.45 %wb (307.49 %db) และความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 3.53 %wb (3.66 %db) ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ สุทธิดี และคณะ (2562) ที่อบแห้งฟริกด้วยเครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน โดยมีความชื้นสุดท้ายของฟริกเท่ากับ 10.63 %db สอดคล้องกับมาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน 13 %wb เพื่อคงคุณภาพและสีที่ดีที่สุด [6] โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าสีด้วยวิธีการตาม International

Commission on illumination (CIE) [3] ระหว่างพริกสด กับพริกแห้งพบว่ามีค่า L^* , a^* , b^* ใกล้เคียงกัน โดยพริกสดให้ค่า $L^* = 31.83 \pm 3.45$, $a^* = 29.99 \pm 6.63$, $b^* = 14.30 \pm 6.88$ ส่วนพริกแห้งพบว่ามีค่า $L^* = 32.13 \pm 3.91$, $a^* = 24.61 \pm 3.38$, $b^* = 15.07 \pm 2.93$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักพริกตามช่วงเวลาการอบแห้ง



ก.) พริกจินดาแดงสด



ข.) พริกจินดาแดงแห้งจากงานวิจัยนี้

ภาพที่ 6 ลักษณะของพริกจินดาแดงสดกับพริกจินดาแดงแห้งที่ผ่านการอบแห้งในงานวิจัยนี้

การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของระบบอบแห้ง

จากผลการประเมินเศรษฐศาสตร์ของระบบอบแห้งในงานวิจัยนี้ มีเงื่อนไขที่เงินลงทุนระบบทั้งหมด 50,000 Baht/y โดยมีต้นทุนแปรผันรวม 377,729.44 Baht/y ประกอบไปด้วยค่าพริกสด 288,000 Baht/y ค่าไฟฟ้าที่ใช้ 8,294.40 Baht/y ค่าก๊าซหุงต้ม 35,735.04 Baht/y ค่าแรงงานดูแลระบบ 43,200 Baht/y และค่าบำรุงรักษาคิดเป็น 5% ของราคาเครื่องอบ เท่ากับ 2,500 Baht/y โดยราคาพริกสด 40 Baht/kg ราคาพริกแห้ง 235 Baht/kg ราคาไฟฟ้า 4.00 Baht/kWh ราคาก๊าซหุงต้ม 28.20 Baht/kg ค่าแรงงาน 300 Baht/ครั้ง โดยใช้ระยะเวลาอบแห้ง 48 h/ครั้ง ทำการอบแห้ง 144 ครั้ง/y ซึ่งจากผลการอบแห้งพริกสด 50 kg จะได้พริกอบแห้ง 12-15 kg ให้ผลตอบแทนการขายพริกทั้งหมด 406,080 Baht/y และผลตอบแทนสุทธิ 28,350.65 Baht/y ให้ระยะเวลาคืนทุนภายใน 1.76 ปี ทั้งนี้มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจากไฟฟ้าและก๊าซหุงต้ม (SEC) เท่ากับ 12.72 MJ/kg_{w-evap} อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าผลตอบแทนสุทธียังมีค่าต่ำเนื่องจากมีต้นทุนราคาพริกสดที่ต้องซื้อในราคาสูง และค่าแรงงานสูงตามเกณฑ์ขั้นต่ำการจ้างงานในจังหวัดเชียงใหม่ประมาณ 300 Baht/day รวมไปถึงราคาก๊าซหุงต้มที่มี

ราคาสูง ดังนั้นหากสามารถลดค่าใช้จ่ายแปรผันดังกล่าวได้ก็จะส่งผลทำให้ได้ผลตอบแทนสุทธิเพิ่มขึ้น และระยะเวลาคืนทุนต่ำลง ดังแสดงข้อมูลการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 8 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของระบบตู้อบแห้งพริก

ตัวแปร	ค่าใช้จ่าย	หน่วย
1. ต้นทุนคงที่	50,000.00	Baht
1.1 ระบบอบแห้งงานวิจัยนี้	50,000.00	Baht
2. ต้นทุนแปรผัน	377,729.44	Baht/y
2.1 ค่าพริกสด	288,200.00	Baht/y
2.2 ค่าไฟฟ้า	8,294.40	Baht/y
2.3 ค่าก๊าซหุงต้ม	35,735.04	Baht/y
2.4 ค่าแรงงาน	43,200.00	Baht/y
2.5 ค่าบำรุงรักษาระบบ (คิดที่ 5% ของราคาเครื่อง)	2,500.00	Baht/y
3. ผลตอบแทนการรอบแห้ง		
3.1 ผลตอบแทนการขายพริกแห้ง	406,080.00	Baht/y
3.2 ผลตอบแทนสุทธิ	28,350.56	Baht/y
4. ระยะเวลาคืนทุน	1.76	y

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 15 kg/min จะให้ความร้อนสูงสุด 1,705 MJ ที่อุณหภูมิน้ำร้อนออกจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุด 83.2°C เมื่อน้ำร้อนถูกส่งไปยังชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศแวดล้อม พบว่ามีอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย 83.70°C ปริมาณความร้อนอากาศร้อน 1,336 MJ โดยสามารถลดความชื้นพริกจินดาแดงจาก 307.49 %db จนเหลือความชื้นสุดท้าย 3.66 %db ภายในระยะเวลา 48 h ที่น้ำหนักพริกจินดาแดงเริ่มต้น 50 kg โดยสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ 12.72 MJ/kg_{water-evap} เมื่อประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์พบว่ามีเงินลงทุนเริ่มต้นค่าระบบ 50,000 บาท มีค่าใช้จ่ายแปรผันรวม 377,729.44 Baht/y ให้ผลตอบแทนสุทธิ 28,350.56 Baht/y ระยะเวลาคืนทุนภายใน 1.76 ปี ดังนั้นจะเห็นว่าเทคโนโลยีผลิตแหล่งความร้อนสำหรับการอบแห้งในงานวิจัยนี้ก็คือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งของการเลือกใช้ในระบบการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรซึ่งให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ยังคงซึ่งคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และห้องปฏิบัติการพลังงานสะอาดและเกษตรอัจฉริยะ (Clean Energy & Smart Agricultural Laboratory)

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีรวัตร คำภู, ขาญชัย นามพล และสุทิพย์ เป้งทอง. (2024). การพัฒนานวัตกรรมการอบแห้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT). *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 43(1), 8-15.
- [2] Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., & Benjapiyaporn, C. (2009). Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. *Food and Bioprocess Processing*, 88(2-3), 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2009.09.006>

- [3] สุทธิพงษ์ เรืองจิตร, นิกราน หอมดวง, ชูรัตน์ ธารารักษ์ และ กิตติกร สาสุจิตต์. (2025). การอบแห้งชิ้นแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานจากขดลวดความร้อนที่ควบคุมสภาวะอากาศอบแห้ง. **วารสารวิชาการพลังงานสู่ชุมชน**, 8(1), 107-116.
- [4] Borah, A., Sethi, L., Sarkar, S., & Hazarika, K. (2016). Drying Kinetics of Sliced Turmeric (*Curcuma longa* L.) in a Solar-Biomass Integrated Drying System. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12904–e12904. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12904>
- [5] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Gabbasa, M., & Kazem, H. A. (2013). Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, 99, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.019>
- [6] สุทธิดี นิเช็ง, ภาณุมาศ สุยบางดำ, กฤษณพงศ์ สังขวาสี และ สุพัตรา เพ็งเกลี้ยง. (2562). การศึกษาผลของขนาดช่องระบายความชื้นสำหรับการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานผสมผสาน. **วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย**, 11(1), 158-168.



การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ครั้งที่ 18 (TREC-18)

หัวข้อบทความ :

บทบาทของชุมชนในการเปลี่ยนผ่านพลังงานสะอาด

กระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

The pyrolysis process for converting waste plastic into fuel oil

ฉันทวิช เจริญสุข¹ สุระพล ริยะนา² นิกราน หอมดวง² เตชัส พรมตา³ และ กิตติกร สาสุจิตต์^{2*}Chatawat Charoensuk¹ Surapon Riyana² Nigran Homdoung² Techut promta³ and Kittikorn Sasujit^{2*}¹สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290²สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290³ห้องปฏิบัติการพลังงานสะอาดและเกษตรอัจฉริยะ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290¹Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290²Energy Conservation Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290³Clean Energy & Smart Agricultural Laboratory, Maejo University, Chiang Mai 50290¹Corresponding author: Tel.: 089-9988203. E-mail address: k.sasujit@yahoo.com

Abstract

The pyrolysis process has gained significant attention as a method for converting plastic waste into energy. This study aims to investigate the pyrolysis process of high-density polyethylene plastic to produce pyrolysis oil. Plastic waste, specifically 5 kg of plastic bottle caps, was processed in a 200-liter batch reactor and a 50-liter water-cooled gas condensation system. The experiments were conducted at pyrolysis temperatures of $190\pm5^{\circ}\text{C}$, $280\pm5^{\circ}\text{C}$, and $340\pm5^{\circ}\text{C}$. The results indicated that increasing the temperature increased the pyrolysis oil yield. At $340\pm5^{\circ}\text{C}$ and a reaction time of 140 min, the maximum oil yield reached 12.90% by weight. The properties of the pyrolysis oil included a pH of 5.0, a density of 737 kg/m^3 , and a heating value of 52.23 MJ/kg. The energy conversion efficiency was 14.68%, the specific oil production rate was 174 liters per tonne, and the energy consumption for oil production was 79 MJ/liter. Therefore, this plastic waste management process not only offers an effective means of converting waste into energy but also serves as a viable environmental solution for waste management and energy transformation.

Keywords: pyrolysis, pyrolysis oil, hot air, waste plastic

บทคัดย่อ

กระบวนการไพโรไลซิสถือว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสนใจในการเปลี่ยนรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้พลาสติกประเภทโพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับการเปลี่ยนเป็นน้ำมันไพโรไลซิส ขยะพลาสติกใช้ฝาขวดน้ำดื่มจำนวน 5 kg โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งขนาดปริมาตร 200 liter รวมกับชุดควบแน่นแก๊สไพโรไลซิสแบบใช้น้ำหมุนเวียนในถังขนาดปริมาตร 50 liter โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ $190\pm5^{\circ}\text{C}$, $280\pm5^{\circ}\text{C}$ และ $340\pm5^{\circ}\text{C}$ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิ $340\pm5^{\circ}\text{C}$ ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 140 min จะให้ผลผลิตน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 12.90 %wt และสมบัติน้ำมันไพโรไลซิสมีความเป็นกรดที่ pH เท่ากับ 5.0 ความหนาแน่นของน้ำมันเท่ากับ 737 kg/m^3 และให้ค่าความร้อนน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 52.23 MJ/kg มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานเท่ากับ 14.68% อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำเพาะเท่ากับ 174 liter/tonne และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 79 MJ/liter ดังนั้นจะเห็นได้

ว่ากระบวนการจัดการขยะพลาสติกโดยนำมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานด้วยวิธีการนี้สามารถจัดการขยะพลาสติกได้ และถือว่าเป็นแนวทางการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนรูปขยะเป็นพลังงานอีกทางหนึ่งเช่นกัน

คำสำคัญ: ไพโรไลซิส น้ำมันไพโรไลซิส ขยะพลาสติก

การประเมินมาตรการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
ด้วยต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก กรณีศึกษาเทศบาลเมืองลาดสวาย
Assessment of Greenhouse Gas Emission Mitigation Measures
Using Marginal Abatement Cost: A Case Study in Ladsawai Municipality

ศุภวิชญ์ ขำเดช¹ และวีรินทร์ หวังจิรินันตร์^{2*}
Supavit Khamdech¹ and Weerin Wangjiraniran^{2*}

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

² สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

¹Department of Energy Technology and Management, Graduate School, Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand 10330

²Energy Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330

¹Corresponding author: Tel.: 02-2188083 E-mail address: weerin.w@chla.ac.th

Abstract

This study aims to evaluate greenhouse gas mitigation measures using the Marginal Abatement Cost (MAC) approach within Ladsawai Municipality, Pathum Thani Province. Four major sectors were considered: stationary energy, transportation, waste management, agriculture, forestry, and land use. Based on investment net present value and greenhouse gas reduction potential, the LED lighting replacement measure had the lowest MAC at -35,804.81 Baht/tonCO₂eq. Other effective options included establishing a community organic fertilizer production center, recycling projects, rooftop solar panels, cooling system upgrades, tree planting, and low-emission vehicle promotion, the latter of which had the highest MAC at 311,483.66 Baht/tonCO₂eq.

Furthermore, additional mitigation measures aligned with the municipality's energy intensity reduction target were assessed. Results indicated that energy intensity could be reduced to 2.70 tonCO₂eq per capita by 2032, representing a 20% reduction. Potential measures include promoting community biogas production from food waste, converting waste into refuse-derived fuel (RDF), expanding electric public transport, and upgrading water pumping systems. These strategies will help advance low-carbon city development and achieve future carbon neutrality.

Keywords: greenhouse gas mitigation measures, marginal abatement cost, energy intensity, greenhouse gas reduction potential, low-carbon city

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประเมินมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยใช้ต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก (Marginal Abatement Cost) ในเขตพื้นที่ของเทศบาลเมืองลาดสวาย จังหวัดปทุมธานี ภายใต้กิจกรรม 4 กลุ่มหลักที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ กลุ่มเผาไหม้ของเครื่องยนต์ กลุ่มขนส่ง กลุ่มการจัดการของเสีย และ กลุ่มการเกษตร ป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งเมื่อพิจารณามาตรการดังกล่าวถึงต้นทุนการลงทุนต่อหน่วยผ่านมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจก พบว่า มาตรการเปลี่ยนอุปกรณ์แสงสว่าง LED มีค่าต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุด คือ -35,804.81 บาทต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า รองลงมา ได้แก่ โครงการ

จัดตั้งศูนย์ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อประชาชน โครงการขยะรีไซเคิล มาตรการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อลดการใช้ไฟฟ้า มาตรการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ทำความเย็น มาตรการปลูกต้นไม้เพิ่มพื้นที่สีเขียว และมาตรการส่งเสริมการใช้นานยนต์มลพิษต่ำ ที่มีค่าต้นทุนหน่วยสุดท้ายมากที่สุด คือ 311,483.66 บาทต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ

นอกจากนี้ เมื่อประเมินทางเลือกของมาตรการที่มีศักยภาพเพิ่มเติมจากค่าเป้าหมายในการลด **ความเข้มพลังงาน** (Energy Intensity) ที่เทศบาลกำหนด พบว่าสามารถลดค่าความเข้มพลังงาน เป็น 2.70 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน ในปี พ.ศ. 2575 หรือคิดเป็น 20% เมื่อเทียบกับค่าฐานในปี พ.ศ. 2565 โดยมีมาตรการที่มีศักยภาพเพิ่มเติม ได้แก่ มาตรการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพชุมชนจากเศษอาหาร มาตรการส่งเสริมการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF) มาตรการส่งเสริมการใช้นานยนต์สาธารณะยานยนต์ไฟฟ้า และมาตรการปรับเปลี่ยนเครื่องสูบน้ำ ซึ่งจะช่วยต่อยอดการขับเคลื่อนแผนพัฒนา **เมืองคาร์บอนต่ำ** และเป็นส่วนหนึ่งในการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนต่อไป

คำสำคัญ: มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก ความเข้มพลังงาน ศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจก เมืองคาร์บอนต่ำ

บทนำ

ปัญหาสภาวะโลกรวน หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ในปัจจุบัน มีสาเหตุหลักมาจากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่มากขึ้น โดยเฉพาะการเจริญเติบโตของเมืองที่สอดคล้องกับจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นประเทศไทยทั้งหน่วยงานภาครัฐและเอกชนจึงได้ร่วมกันพัฒนาเมืองคาร์บอนต่ำ (Low Carbon City) เพื่อมุ่งสู่การบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 โดยเริ่มจากการจัดการระดับพื้นที่ (Area Based) [1] ซึ่งเทศบาลเมืองลาดสวาย อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี เป็นหนึ่งในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่ให้ความสำคัญกับเรื่องดังกล่าว ผ่านการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของเมือง (City Carbon Footprint: CCF) ในปี พ.ศ. 2567 พบว่าตำบลลาดสวาย มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 241,229 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า [2] โดยเทศบาลเมืองลาดสวายมีเป้าหมายในการลดความเข้มพลังงาน (Energy Intensity) 10% จากปี พ.ศ. 2565 ให้ได้ภายในปี พ.ศ. 2575 และได้จัดทำมาตรการที่มีศักยภาพ 7 มาตรการ ในการลดก๊าซเรือนกระจก รวม 23,423 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยมาตรการดังกล่าวยังไม่มีงบประมาณต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วย และจากศักยภาพเชิงพื้นที่ที่สามารถเพิ่มความเข้มข้นของการขับเคลื่อนมาตรการต่าง ๆ ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก (MAC) รวมถึงวิเคราะห์และประเมินทางเลือกของมาตรการที่มีศักยภาพเพิ่มเติมจากค่าเป้าหมายในการลดความเข้มพลังงานเดิมที่เทศบาลกำหนดในแผนพัฒนาเมืองคาร์บอนต่ำ

วิธีการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ มุ่งเน้นการศึกษารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการประเมินศักยภาพของมาตรการในด้านการลงทุนจากการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) และศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจก ที่เกิดขึ้นจากการดำเนินมาตรการหรือเทคโนโลยีในการลดก๊าซเรือนกระจก โดยมีการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่ตำบลลาดสวาย การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของเมือง (CCF) และการคำนวณศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกเพิ่มเติม ซึ่งอ้างอิงระเบียบวิธีลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ (T-VER Methodology) ที่จัดทำโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) โดยตั้งสมมติฐานในการลดความเข้มพลังงานลง 20% เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2565

ศักยภาพของมาตรการลดก๊าซเรือนกระจก 7 มาตรการ ภายในปี พ.ศ. 2575 ที่เทศบาลเมืองลาดสวายได้ร่วมกับสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศึกษาและจัดทำข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 9 ศักยภาพของมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกในตำบลลาดสวาย ณ ปี พ.ศ. 2575

กลุ่ม	มาตรการ	ปริมาณลดก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ eq/ปี)
เผาไหม้อยู่กับที่	การเปลี่ยนอุปกรณ์แสงสว่าง LED	1,070
	การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ทำความเย็น	7,799
	การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อลดการใช้ไฟฟ้า	10,493
ขนส่ง	การส่งเสริมการใช้น้ำมันดีเซลพิษต่ำ	1,196
การจัดการของเสีย	การจัดตั้งศูนย์ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อประชาชน	2,603
	การคัดแยกขยะรีไซเคิล	36
เกษตร ป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน	การปลูกต้นไม้เพิ่มพื้นที่สีเขียว	219
รวม		23,416

ต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก (MAC) เป็นเครื่องมือที่ใช้การวิเคราะห์และคัดเลือกมาตรการ โดยใช้เกณฑ์ “ต้นทุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วย (บาท)” และ “ศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (tonCO₂eq)” ของแต่ละมาตรการ [3] ดังสมการที่ (1) และ (2) โดยมีข้อมูลประกอบการคำนวณ ดังตารางที่ 2

$$MAC = \frac{NPV \times (-1)}{\text{Total GHG emission abated over the life of the project}} \quad (1)$$

$$NPV = \frac{\text{Total project cost} - \text{Total project saving}}{(1 + \text{discount rate})^{\text{project lifetime}}} \quad (2)$$

ตารางที่ 2 สรุปข้อมูลประกอบการคำนวณต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก (MAC)

มาตรการ	ข้อมูลประกอบการคำนวณ
การเปลี่ยนอุปกรณ์แสงสว่าง LED	อัตราค่าไฟเฉลี่ย (ม.ค.-เม.ย.68) / ราคาหลอดไฟ LED
การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ทำความเย็น	อัตราค่าไฟเฉลี่ย (ม.ค.-เม.ย.68) / ราคาอุปกรณ์ทำความเย็น/ ค่าบำรุงรักษา
การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อลดการใช้ไฟฟ้า	อัตราค่าไฟเฉลี่ย (ม.ค.-เม.ย.68) / ค่าติดตั้งระบบ / ค่าบำรุงรักษา
การส่งเสริมการใช้น้ำมันดีเซลพิษต่ำ	ราคาเชื้อเพลิง / ราคายานยนต์ไฟฟ้า / ค่าบำรุงรักษา
การจัดตั้งศูนย์ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อประชาชน	ค่าโรงเรือนและวัสดุอุปกรณ์ / ค่าแรงงาน
การคัดแยกขยะรีไซเคิล	ค่าวัสดุอุปกรณ์ / ค่าแรงงาน
การปลูกต้นไม้เพิ่มพื้นที่สีเขียว	ราคาต้นไม้ / ค่าขนส่ง

เส้นโค้งต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (MAC Curve) จะกำหนดเป็นแผนภาพที่แสดงข้อมูลระหว่างต้นทุนและปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยแกนตั้ง (แกน Y) จะแสดงต้นทุนสุทธิในการลดก๊าซเรือนกระจก (บาท/tonCO₂eq) และแกนนอน (แกน X) แสดงปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (tonCO₂eq) โดยเรียงลำดับตามความคุ้มค่าของแต่ละมาตรการจากค่า MAC ต่ำสุดไปสูงสุด [4]

วิเคราะห์และประเมินทางเลือกของมาตรการที่มีศักยภาพเพิ่มเติม โดยอ้างอิงระเบียบวิธีลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ (T-VER Methodology) [5-7] ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระเบียบวิธีลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ (T-VER Methodology) ที่ใช้ประเมิน

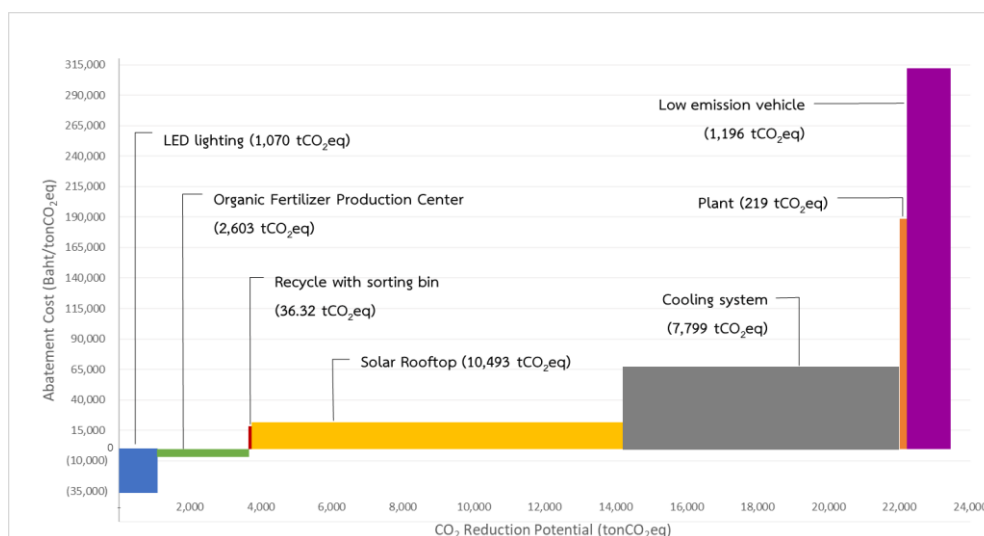
มาตรการ	ระเบียบวิธี
การส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพชุมชนจากเศษอาหาร	T-VER-S-METH-09-05
การส่งเสริมการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF)	T-VER-S-METH-09-03
การส่งเสริมการใช้ขนส่งสาธารณะยานยนต์ไฟฟ้า	T-VER-S-METH-04-03

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก โดยมีสมมติฐาน ได้แก่ ค่า discount rate เท่ากับ 10% และอายุโครงการ 9 ปี ตามแผนการดำเนินงานของเทศบาล พ.ศ. 2567-2575 ดังแสดงในตารางที่ 4 และเส้นโค้งต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (MAC Curve) ดังแสดงในภาพที่ 1

ตารางที่ 4 ต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดก๊าซเรือนกระจก (MAC) ณ ปี พ.ศ. 2575

กลุ่ม	มาตรการ	ปริมาณลด ก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ eq/ปี)	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)	ต้นทุนหน่วยสุดท้าย ของการลด ก๊าซเรือนกระจก (บาท/tCO ₂ eq)
เผาไหม้อยู่กับที่	การเปลี่ยนอุปกรณ์แสงสว่าง LED	1,070	38,311,149.37	-35,804.81
	การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ทำความเย็น	7,799	-515,356,802.23	66,079.86
	การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อลดการใช้ไฟฟ้า	10,493	-215,292,017.51	20,517.68
ขนส่ง	การส่งเสริมการใช้น้ำมันดีเซลพิษต่ำ	1,196	-372,534,454.96	311,483.66
การจัดการของเสีย	การจัดตั้งศูนย์ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อประชาชน	2,603	15,302,546.02	-5,878.81
	การคัดแยกขยะรีไซเคิล	36.32	-643,733.77	17,723.95
เกษตร ป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน	การปลูกต้นไม้เพิ่มพื้นที่สีเขียว	219	-41,420,000.00	189,132.42



ภาพที่ 1 เส้นโค้งต้นทุนหน่วยสุดท้ายของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (MAC Curve)

จากการวิเคราะห์และประเมินทางเลือกของมาตรการที่มีศักยภาพเพิ่มเติมจากค่าเป้าหมายในการลดความเข้มพลังงานเดิมที่เทศบาลกำหนด แบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่

1. กรณีที่ 1 ดำเนินมาตรการที่มีศักยภาพเพิ่มเติม จำนวน 4 มาตรการใหม่ พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 7,981.95 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และเมื่อรวมกับมาตรการเดิม พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 31,397.95 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คิดเป็นค่าความเข้มพลังงาน เท่ากับ 2.84 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน ณ ปี พ.ศ. 2575 หรือคิดเป็นลดลง 16% เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2565 ดังแสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 2

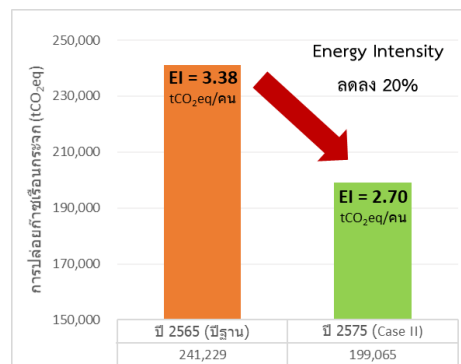
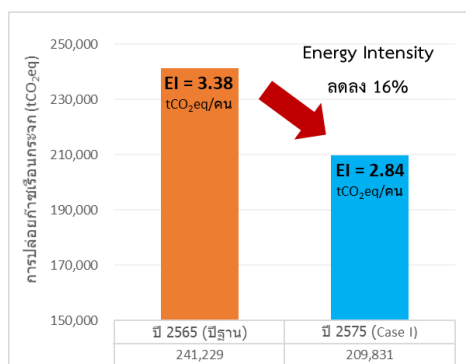
ตารางที่ 5 กรณีที่ 1 ศักยภาพของมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกเพิ่มเติม ปี พ.ศ. 2569-2575

กลุ่ม	มาตรการใหม่	ปริมาณลดก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ eq/ปี)
เผาไหม้อยู่กับที่	การปรับเปลี่ยนเครื่องสูบน้ำ	1,630.7
ขนส่ง	การส่งเสริมการใช้ขนส่งสาธารณะยานยนต์ไฟฟ้า	142.8
การจัดการของเสีย	การส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพชุมชนจากเศษอาหาร	2,625.45
	การส่งเสริมการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF)	3,583
รวม		7,981.95

2. กรณีที่ 2 ดำเนินมาตรการที่มีศักยภาพเพิ่มเติม จำนวน 4 มาตรการใหม่ และเพิ่มค่าเป้าหมายของมาตรการเดิม จำนวน 4 มาตรการ พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 18,748.45 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และเมื่อรวมกับมาตรการเดิม พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 42,164.45 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คิดเป็นค่าความเข้มพลังงาน เท่ากับ 2.70 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน ณ ปี พ.ศ. 2575 หรือคิดเป็นลดลง 20% เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2565 ดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 2

ตารางที่ 6 กรณีที่ 2 ศักยภาพของกรณีที่ 1 และการเพิ่มค่าเป้าหมายของมาตรการเดิม ณ ปี พ.ศ. 2575

กลุ่ม	มาตรการ	ปริมาณลดก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ eq/ปี)
	กรณีที่ 1 (มาตรการใหม่)	7,981.95
เผาไหม้อยู่กับที่	การเปลี่ยนอุปกรณ์แสงสว่าง LED (206,600 หลอด)	945
	การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อลดการใช้ไฟฟ้า (บ้านอยู่อาศัย 3,000 หลัง และร้านค้า 175 แห่ง)	8,128
การจัดการของเสีย	การจัดตั้งศูนย์ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อประชาชน (500 ตัน/ปี)	1,627
เกษตร ป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน	การปลูกต้นไม้เพิ่มพื้นที่สีเขียว (7,000 ต้น)	66.5
รวม		18,748.45



ภาพที่ 2 ค่าความเข้มพลังงานที่ลดลงจากกรณีที่ 1 (ซ้าย) และกรณีที่ 2 (ขวา)

สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยฉบับนี้ พบว่ามาตรการที่เทศบาลเมืองลาดสวายได้กำหนดไว้ในแผนพัฒนาเมืองคาร์บอนต่ำ จำนวน 7 มาตรการ ที่จะสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ในปี พ.ศ. 2575 ได้ 23,416 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับมุมมองการลงทุน แสดงให้เห็นว่ามาตรการเปลี่ยนอุปกรณ์แสงสว่าง LED มีความคุ้มค่าในการดำเนินการมากที่สุด ที่ -35,804.81 บาทต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า รองลงมา คือ โครงการจัดตั้งศูนย์ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อประชาชน ที่ -5,878.81 บาทต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และมาตรการส่งเสริมการใช้น้ำมันดีเซลที่มีค่าความ

ความคุ้มค่าในการดำเนินการน้อยที่สุด เนื่องจากต้องลงทุนปรับเปลี่ยนยานยนต์คันใหม่ที่ใช้งบประมาณสูง ในขณะที่มุมมองการลดก๊าซเรือนกระจก แสดงให้เห็นว่ามาตรการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อลดการใช้ไฟฟ้า มีการลดก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด แต่เนื่องจากการคำนวณอายุโครงการที่ 9 ปี ทำให้การลงทุนในมาตรการดังกล่าวอยู่ในลำดับที่ 4 ที่ 20,517.68 บาทต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งหากพิจารณาในระยะยาวคาดว่าจะมีความคุ้มค่ามากขึ้น

การเสนอมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพเพิ่มเติมให้สามารถลดความเข้มพลังงานได้ 20% เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2565 ตามสมมติฐานนั้น พบว่า หากดำเนินการตามกรณีที่ 1 คือมาตรการใหม่เพียงอย่างเดียว จะลดความเข้มพลังงานได้ 16% แต่หากเพิ่มค่าเป้าหมายของมาตรการเดิมให้มากขึ้น ตามกรณีที่ 2 รวมด้วย จะมีความเข้มพลังงาน คือ 2.70 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน สามารถลดความเข้มพลังงานได้ 20% โดยมาตรการที่มีศักยภาพ ได้แก่ มาตรการส่งเสริมการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF) และมาตรการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพชุมชนจากเศษอาหาร

ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย เทศบาลเมืองลาดสวายควรพิจารณาจัดตั้งคณะทำงานขับเคลื่อนเมืองคาร์บอนต่ำที่มีหน่วยงานภาครัฐ เอกชน สถาบันการศึกษา และผู้นำชุมชนในพื้นที่ ร่วมพิจารณาแนวทางดำเนินมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมทั้งในเชิงเศรษฐกิจการลงทุนและสิ่งแวดล้อมเพื่อกำหนดแผนและนโยบายที่ชัดเจน จัดหาแหล่งงบประมาณและสิทธิประโยชน์ที่เหมาะสม พัฒนาระบบติดตาม ประเมินผล และรายงานผลข้อมูล พร้อมทั้งสร้างความตระหนักรู้และการมีส่วนร่วมของประชาชนที่เป็นส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนงานเชิงพื้นที่ให้ประสบความสำเร็จ

ทั้งนี้ หากเทศบาลต้องการเพิ่มค่าเป้าหมายในการลดความเข้มพลังงานของตำบลลาดสวายให้ได้ถึง 20% ถือเป็นการท้าทายและกรอบแนวทางเพิ่มเติมให้หน่วยงานต่าง ๆ นำไปขับเคลื่อนแผนพัฒนาเมืองคาร์บอนต่ำให้บรรลุเป้าหมายการสนับสนุนนโยบายการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนของประเทศต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] จักรพงษ์ พงศ์ไฉนศวรรย์ และคณะ. (2562). การพัฒนาเมืองคาร์บอนต่ำเพื่อบรรลุเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน. UNISEARCH (Unisearch Journal). 6 (3), 17-26.
- [2] สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2567). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจ้างที่ปรึกษาพัฒนาโครงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในตำบลลาดสวาย (Low Carbon Emission Development Strategy). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] Du Plessis, D. (2022). **Marginal abatement cost curves for the built environment: Developing a methodology**. BRANZ Study Report SR470. Judgeford, New Zealand, BRANZ Ltd.
- [4] Kesicki, F. & Strachan, N. (2011). Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice. *Environmental Science & Policy*. 14 (8), 1195–1204.
- [5] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2566). T-VER-S-METH-09-05 การกักเก็บก๊าซมีเทนจากการหมักขยะอินทรีย์แบบไร้อากาศ ขนาดเล็กเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ สืบค้นเมื่อ 11 สิงหาคม 2568, จาก <https://ghgreduction.tgo.or.th>.
- [6] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2566). T-VER-S-METH-09-03 การผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยชุมชน Refuse Derived Fuel: RDF สืบค้นเมื่อ 11 สิงหาคม 2568, จาก <https://ghgreduction.tgo.or.th>.
- [7] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2568). T-VER-S-METH-04-03 การใช้อยานพาหนะไฟฟ้าในระบบขนส่งสาธารณะ สืบค้นเมื่อ 11 สิงหาคม 2568, จาก <https://ghgreduction.tgo.or.th>.



การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ครั้งที่ 18
(TREC-18)

Asia Renewable Energy for Community Conference (AREC)

Circular Economy and Value-Added Analysis of Cacao Pod Husk By-products for Wood Vinegar Production

Arisara Romyen^{1,4,*}, Nuttaporn Rochanahastin², and Juntima Chungsiriporn³

¹ Department of Agricultural Economics and Agri-Business, Faculty of Economics, Prince of Songkla University, 90110, ¹Corresponding author: arisara.r@psu.ac.th

² Department of Economics, Faculty of Economics, Prince of Songkla University, 90110, nuttaporn.r@psu.ac.th

³ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, 90110, juntima.c@psu.ac.th

⁴ Research Center for Fundamental Economic Development and Agricultural Economic Potential in the Southern Region

Abstract

This study analyzes the production of wood vinegar and biochar from fresh cocoa husks by applying the Circular Economy concept, guided by the Ellen MacArthur Foundation's Butterfly Model, to create value from agricultural residue for community enterprises. The system is structured around two cycles: the Biological Cycle, in which biodegradable husks undergo innovative pyrolysis to produce valuable agrarian inputs (wood vinegar for pest control and soil improvement, and biochar for long-term carbon sequestration); and the Technical Cycle, which focuses on sustainable packaging design, recycling, and optimized logistics.

A core achievement is the development of an innovative biomass furnace with advanced Pyrolysis technology. This furnace is engineered with a multi-stage condensation system and toxic-substance filters to strictly control the temperature within the optimal 280–450°C range. This process yields exceptionally pure wood-smoke vapor with high biological activity and minimal undesirable compounds during the initial distillation. This eliminates the need for post-production aging, significantly shortening production time and boosting cost-efficiency on scale. Product quality is preserved using tailored opaque PE packaging to meet diverse user demands.

The findings confirm that transforming cocoa husks into these co-products generates significant value added and a net economic value that exceeds all production input costs (firewood, electricity, labor). This approach successfully aligns resource utilization with core circular economy principles, reducing waste and enhancing resource efficiency while actively distributing economic benefits to local communities and promoting both sustainable resource management and regional economic development.

Keywords: Circular Economy, Cocoa Husk, Wood Vinegar, Biochar, Value Added

LSTM-Enhanced Multi-Agent Soft Actor-Critic for Coordinated Voltage Regulation and Energy Management in the Distribution System

^[1] Thandar Aung¹, Khin Phyu Ye Myint¹, Ashok Paudel¹, Watcharakorn Pinthurat^{2*}, Terapong Boonraksa³, Promphak Boonraksa⁴ and Boonruang Marungsri^{1*}

^[2]

¹School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

²Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi

³School of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom

⁴Department of Mechatronics Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi

Corresponding author: E-mail address: watcharakorn_pi@rmutto.ac.th, bmshvee@sut.ac.th

1. Abstract

The integration of photovoltaic (PV) systems and battery energy storage systems (BESS) into distribution networks can lead to voltage fluctuations and potential stability issues. Traditional control methods struggle to manage this complexity. This paper presents an improved Long Short-Term Memory Multi-Agent Soft Actor-Critic (LSTM-MASAC) framework for coordinated voltage regulation and energy management in the IEEE 33-bus distribution system. The setup includes six Battery Energy Storage Systems (BESS), seven PV units, four multi-zone partitions, and thirty-two residential loads. The main components of this approach include a voltage regulation mechanism that scales with the severity of violations, to verify the system reliability, and a customized reward function designed to enhance stability and efficiency. Each BESS operates as an independent agent model through a Markov Decision Process (MDP), while an LSTM network forecasts load demand and renewable generation. Simulation results show that this approach keeps all bus voltages from 0.95 to 1.05 p.u. It also reduces operational costs, minimizes power losses, and achieves all control goals.

Keywords: LSTM-MASAC, IEEE 33-bus distribution network, Multi-agent Reinforcement Learning (MARL), Intelligent agent, Battery Energy Storage System (BESS).

Multi-Agent Soft Actor-Critic Based Peer-to-Peer Energy Trading Model Incorporating Battery Energy Storage with Active Voltage Control for a Microgrid

Ashok Paudel¹, Thandar Aung¹, Khin Phyu Ye Myint¹, Watcharakorn Pinthurat^{2*}, Terapong Boonraksa³,
Promphak Boonraksa⁴ and Boonruang Marungsri^{1*}

¹School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

²Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi

³School of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom

⁴Department of Mechatronics Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi,
Nonthaburi

Corresponding author: E-mail address: bmshvee@sut.ac.th

Abstract

The model employs the MASAC algorithm, based on a centralized training with decentralized execution (CTDE) paradigm, using the RLlib library, enabling prosumers and consumers to learn adaptive bidding strategies in a double-sided auction market. Results demonstrate significant economic improvements: prosumers increased their net income by 67–180%, while consumers reduced electricity costs by 5–37% compared to a grid-only exchange baseline. Technically, the coordinated operation of photovoltaic (PV) systems and battery energy storage (BESS) provides substantial grid support. The learned policy successfully mitigates voltage violations, with post-deployment profiles maintained within statutory limits, and reduces total daily active power losses by 36.29%. This underscores the framework's dual capability to enhance local renewable energy utilization while ensuring network stability through decentralized, learning-driven control.

Keywords: MASAC, IEEE 33-bus distribution network, Multi-agent Reinforcement Learning (MARL), Intelligent agent, Battery Energy Storage System (BESS).

OPTIMIZATION OF CALCIUM HYDROXIDE PRETREATMENT CONDITIONS AND BIOETHANOL PRODUCTION FROM SUGARCANE BAGASSE

Techut Promta² Surapon Riyana¹ Nigran Homdoun¹ and Kittikorn Sasujit^{1*}

¹ Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand 50290

² Clean Energy and Smart Agricultural Laboratory, School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand 50290

*Corresponding author: Tel.: (+66) 89-9988203. E-mail address: k.sasujit@yahoo.com

Abstract

Bioethanol has been identified as a key fuel for both the industrial and transportation sectors. However, challenges remain in the production process, particularly due to phenolic compounds and furans in the hydrolysate, which inhibit microbial growth and consequently reduce ethanol fermentation efficiency. This study investigates the optimal conditions for bioethanol production from sugarcane bagasse hydrolysate, which was subjected to hydrolysis with 2.0% (w/v) sulfuric acid and then neutralized with a Ca(OH)₂ solution at pH 7.0, 10.0, and 12.0. The reaction was conducted at 45°C for a fixed duration of 60 min. The analysis revealed a decrease in reducing sugar concentration, while residual phenolic compounds and furans persisted. Subsequently, a Central Composite Design (CCD) experiment was conducted, which identified the optimal conditions for inhibitor removal from sugarcane bagasse hydrolysate: pH 7.75, reaction temperature 60°C, and reaction time 90 minutes. Under these conditions, 64.92% of furan compounds and 51.40% of phenolic compounds were removed. When fermented with *Pichia stipitis* (TISTR5806), the ethanol yield reached 57.63% and 0.2945 g_{ethanol}/g_{sugar}, respectively, compared with theoretical values. The results of this study demonstrate that removing inhibitors from sugarcane bagasse hydrolysate by pH adjustment enhances yeast growth and facilitates more efficient conversion of substrate into ethanol. These findings provide valuable insights into the industrial-scale production of bioethanol from agricultural waste materials.

Keywords: Optimization, hydrolysate, bagasse, inhibitor, bioethanol

Introduction

The current global energy crisis has significantly impacted both the household and industrial sectors. For centuries, humans have relied on fossil fuels, including crude oil, natural gas, and coal, which have served as the primary energy sources. However, the rising global population is projected to reach 9.7 billion by 2050 [1], and will substantially increase energy demand while fossil fuel reserves continue to decline. Additionally, the consumption of these fuels, particularly in the electricity and heating sectors, contributes to the emission of greenhouse gases, especially carbon dioxide, which leads to a continuous rise in global temperatures. This situation has not only resulted in energy shortages but has also exacerbated global warming, triggered climate change, and intensified the frequency and severity of natural disasters. Consequently, there is an urgent need to transition towards renewable energy sources to mitigate these

challenges. This transition aligns with Thailand's commitment under the COP26 summit to achieve carbon neutrality by 2050 and net-zero greenhouse gas emissions by 2065 [2]. One of the key components is the Alternative Energy Development Plan (AEDP 2024), which emphasizes promoting renewable and alternative energy sources. Among these, biofuels are considered environmentally friendly alternatives to replace the declining fossil fuels. In 2037, total biofuel demand is projected to reach 2,318 ktOE. Specifically, ethanol is expected to account for 654 ktOE, which is equivalent to approximately 3.51 million liters per day [3]. Thailand is an agricultural country with abundant natural resources. Each year, the country generates a substantial amount of agricultural residues, estimated at 83.51 Mton, from crops such as rice, maize, sugarcane bagasse, cassava, fruit trees, and perennial woody plants. Among these, sugarcane bagasse has the highest potential, with an annual availability of approximately 28.74 Mton. These agricultural residues are classified as lignocellulosic biomass, primarily composed of cellulose, hemicellulose, and lignin. These materials hold significant potential for bioenergy production, particularly biofuels. One of the most promising biofuels is bioethanol, which can be produced through anaerobic biological fermentation. Bioethanol can serve as a substitute for conventional fossil fuels in the transportation sector. It is typically blended with gasoline to produce gasohol. For example, E20 contains 20% ethanol and 80% gasoline, while E85 consists of 85% ethanol and 15% gasoline [4]. The ethanol production process involves several steps. First, physical pretreatment aims to reduce particle size, increase surface area for enzymatic reactions, and decrease the crystallinity of the lignocellulosic structure. Second, chemical pretreatment, typically through hydrolysis, breaks down the complex lignocellulosic matrix into monosaccharides, especially five-carbon (C5) and six-carbon (C6) sugars. These fermentable sugars include glucose, xylose, and arabinose. These sugars serve as the primary carbon sources for fermentation. During fermentation, yeast or other microorganisms convert them into ethanol under controlled anaerobic conditions [5]. During acid hydrolysis, by-products known as inhibitory compounds are formed through the degradation of monosaccharides and lignin. These inhibitors include furan derivatives such as furfural and 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), and organic acids such as acetic acid, formic acid, and levulinic acid. These compounds result from the breakdown of cellulose and hemicellulose, while phenolic compounds released from lignin degradation are also present. These inhibitory substances interfere with yeast metabolism, reducing ethanol fermentation efficiency. In this context, detoxifying the lignocellulosic hydrolysate is essential to enhance ethanol yields. Detoxification methods have been developed, including overliming (alkaline neutralization), adsorption using activated carbon, solvent extraction, membrane separation, and enzymatic treatment. Among these, overliming using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is widely employed due to its operational simplicity, low cost, rapid and complete reaction, and the formation of gypsum as a by-product [6]. In previous research, Haq et al. (2018) studied the inhibitory compounds in wheat straw hydrolysate, which were removed through the overliming method using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at pH 12, for 2 hrs at a temperature of 80 °C, resulting in the removal of approximately 60% of phenolic compounds [7]. Similarly, Jing-Ping et al. (2011) pretreated corn cob hydrolysate with 1.0% v/v H_2SO_4 , followed by detoxification via overliming with CaO at pH 7.0 and 100 °C for 15 minutes. It can remove 99.00% of furfural, 16.70% of phenolics, and 51.40% of acetic acid. Subsequent ethanol fermentation using *Candida shehatae* ACCC20335 was 0.30 $\frac{\text{g}_{\text{ethanol}}}{\text{g}_{\text{substrate}}}$ ethanol yield [8]. Furthermore, Stoutenburg et al. (2011) pretreated maple wood hydrolysate

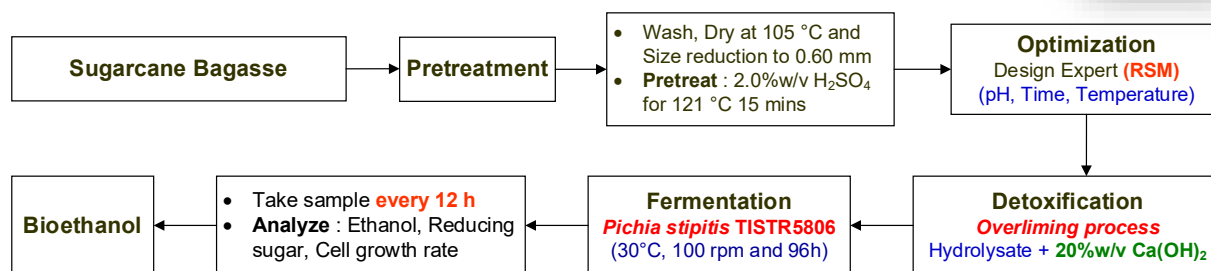
with 1.5% v/v H_2SO_4 , followed by overliming at pH 10.5 using $\text{Ca}(\text{OH})_2$. This process reduced the sugar content by 9.6 g/l. Fermentation detoxified hydrolysate with *Pichia stipitis* NRRL Y7124, the ethanol yield was 0.12 g_{ethanol}/g_{sugar}, compared to only 0.03 g_{ethanol}/g_{sugar} in non-detoxified hydrolysate [9].

However, the detoxification process can lead to a loss of reducing sugars. Key factors influencing inhibitor removal efficiency include temperature, reaction time, and pH, all of which can significantly affect ethanol yield. The impact of these factors can be systematically assessed using statistical tools for experimental design, such as the Design of Experiments (DOE) methodology. This approach facilitates the thorough investigation of influential variables. For example, Yaya et al. (2023) employed a Box-Behnken design to optimize the detoxification conditions of cocoa pod husk hydrolysate using activated carbon. The study assessed the effects of critical process variables, including contact time, the activated carbon-to-hydrolysate ratio, and agitation speed. The optimal conditions were found to be 60 minutes, 1.984% w/v activated carbon, and 180 rpm, resulting in the successful removal of 95.18% of phenolic compounds. However, the process also led to a 28.88% loss of reducing sugars [10]. In addition, this research aims to investigate the enhancement of ethanol fermentation efficiency from sugarcane bagasse hydrolysate through the detoxification process using overliming with $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The detoxified hydrolysate is compared with the non-detoxified hydrolysate to assess the impact of inhibitor removal on ethanol yield. Furthermore, the optimal detoxification conditions are determined using Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD) model to evaluate the effects of pH, temperature, and reaction time on the detoxification process. The efficiency of ethanol production is then compared based on the ethanol yield (%) obtained from fermentation using *Pichia stipitis* TISTR5806.

Materials and Methods

Hydrolysate Preparation and Detoxification

Sugarcane bagasse was selected as the raw material for the study. The sugar cane bagasse was thoroughly washed with distilled water and subsequently dried in a hot air oven at 105°C for 72 h. For hydrolysis, the sugar cane bagasse was pretreated with 2.0% (w/v) H_2SO_4 in an autoclave at 121°C (15 psi) for 60 min with a solid-to-liquid ratio of 1:20. Following pretreatment, the hydrolysate was detoxified using 20% (w/v) $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The pH of the hydrolysate was adjusted to 7.0, 10.0, and 12.0 to evaluate the impact of pH on detoxification efficiency. The reaction was conducted at 45°C for 30 minutes with continuous agitation at 120 rpm. The experimental conditions were designed based on 15 trials. An overview of the bioethanol production process is presented in Figure 1.



1q

Figure 1 Overall process for bioethanol production and optimization through detoxification by overliming.

Optimization of overliming detoxification and Ethanol fermentation

Optimization of the detoxification conditions was performed using Design-Expert version 13 (trial version). The experimental design was based on a Central Composite Design (CCD) combined with Response Surface Methodology (RSM). The design included three independent variables: pH (7.0–12.0), temperature (20–60 °C), and reaction time (30–90 min), each tested at three levels. A total of 15 experimental trials were generated to evaluate the effects of these variables on three response variables: reducing sugar concentration, total phenolics, and total furans. The experimental data were fitted to second-order (quadratic) polynomial models to develop empirical equations for predicting the response variables under different detoxification conditions. The performance and statistical significance were evaluated using the coefficient of determination (R^2) and p-values, and response models were assessed to identify the importance of each independent variable on the corresponding response. The hydrolysate was detoxified and then fermented using *Pichia stipitis* TISTR 5806. The inoculum of 1.0 L was prepared using a nutrient medium composed of 3.0 g yeast extract, 3.0 g malt extract, 5.0 g peptone, and 20.0 g glucose. The medium was prepared in a 200 ml conical flask and sterilized by autoclaving at 121 °C for 20 min. After cooling, the inoculum was used to achieve an initial cell concentration of 5.0 g/l in the fermentation medium. Fermentation was carried out in an incubated shaker (OHAUS Guardian 5000 Series) at 30 °C with a shaking speed of 100 rpm for 96 h. Samples were collected at 12 h intervals for analysis of specific growth rate, reducing sugar concentration, and ethanol production, as shown in Figure 2.

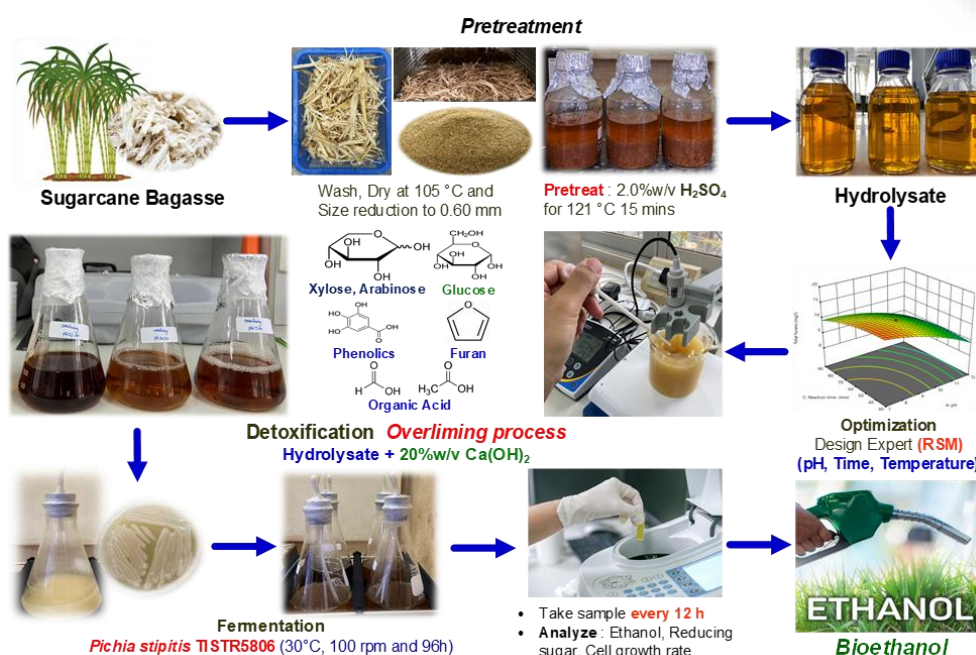


Figure 2: Pretreatment of bagasse, overliming process in detoxification, and fermentation for bioethanol production.

Analytical methods

The analytical methods employed in this study were based on spectrophotometric techniques. A Hanon i3 spectrophotometer, operating in the 190–1000 nm wavelength range, was used to analyze the chemical composition of the samples. Reducing sugars were quantified using the dinitrosalicylic acid method at 540 nm [11]. Ethanol concentration was determined using the dichromate oxidation method at 595 nm [12]. Inhibitory compounds, including total phenolics, were measured using the Folin-Ciocalteu method at 725 nm [13]. Additionally, total furans were quantified by comparison with a calibration curve at wavelengths of 284 nm and 320 nm [14].

Results and Discussion

Detoxification and Chemical Composition

The hydrolysis of sugarcane bagasse with diluted H₂SO₄ yields a liquid hydrolysate. During this process, the lignocellulosic structure is disrupted, cleaving the β -1,4-glycosidic linkages and releasing monomeric sugars such as xylose, arabinose, mannose, and glucose. Microorganisms consumed these sugars as a carbon source. In addition to fermentable sugars, acid hydrolysis also produces inhibitory by-products, including furans, phenolic compounds, and organic acids, arising from the degradation of structural components in lignocellulose. These compounds can adversely affect microbial growth and metabolic activity. The analytical chemical compositions of sugar cane bagasse were found to be 53.90 g/l of reducing sugars, 20.96 μ g/l of total phenolics, and 16.85 mg/l of total furans, as illustrated in Table 1. The detoxification of inhibitory compounds was performed using overliming methods. Hydrolysate reacts with 20.0 %w/v Ca(OH)₂ at different pH to remove these toxic compounds. The detoxification results indicated

that total phenolics were removed by 39.31%, 47.33%, and 74.43%, while total furans were removed by 24.87%, 40.83%, and 92.58% at pH 7.0, 10.0, and 12.0, respectively. These results suggest that overliming at higher pH values is more effective in removing furans than phenolic compounds. However, during detoxification, reducing sugars are also lost due to complex reactions that convert them into non-fermentable sugars, in addition to the heat generated during the process. The experiment conducted by Yucel and Aksu (2015) successfully removed 100% and 89% of furans and phenolic compounds, respectively, from sugar beet pulp hydrolysate. Their experiment utilized overliming with CaO at pH 10.0 [15].

Table 1 Chemical compositions of sugar cane bagasse after treatment by overliming detoxification.

Sample	Chemical Compositions of Sugar Cane Bagasse		
	Reducing sugar (g/l)	Total Phenolics ($\mu\text{g/l}$)	Total Furans (mg/l)
Non-detoxified	53.90	20.96	16.85
Overliming pH 7.0	49.82	12.72	12.66
Overliming pH 10.0	43.51	11.04	9.97
Overliming pH 12.0	33.83	5.36	1.25
Optimization with DOE	51.43	10.17	5.91

Optimization of the detoxification process

Optimization was performed using a statistical approach with Design-Expert version 13 (trial version). A Central Composite Design (CCD) based on Response Surface Methodology (RSM) was employed to evaluate and optimize the process parameters. The independent variables selected for this study were pH (A), reaction time (B), and temperature (C). The response variables (Y) included the concentrations of reducing sugars, total phenolics, and furans in the detoxified hydrolysate. The experimental design generated a total of 15 runs, and corresponding mathematical models were developed, as presented in Equations (1) – (3). These models are expressed as second-order (quadratic) polynomial equations, which were used to predict the chemical composition under different detoxification conditions. For statistical analysis, ANOVA was employed to evaluate the significance and adequacy of each response model. The coefficient of determination (R^2) and p-value were used to assess the model fit and statistical significance, as shown in Figure 3.

The results indicated that all models had p-values <0.05 , demonstrating statistical significance and adequate fit to the experimental data. Additionally, the R^2 values, which were close to 1, confirmed a strong correlation between predicted and actual values, further supporting the models' reliability for optimizing the overliming detoxification process. Among the models, the one predicting total furan removal showed the highest R^2 value, indicating that it was the most accurate and significant model for describing the efficiency of Ca(OH)_2 overliming in removing furans.

$$Y_{\text{Reducing sugar (g/L)}} = 37.60 - 15.38A + 0.55B - 0.05C - 3.42AB - 2.09AC - 0.01BC - 5.06A^2 + 2.66B^2 - 1.17C^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Y_{\text{Total Phenolics (}\mu\text{g/L)}} = 10.46 - 1.94A + 0.02B - 0.41C - 0.07AB - 0.27AC - 0.06BC + 0.11A^2 - 0.30B^2 - 0.68C^2 \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Y_{\text{Total Furans (mg/L)}} = 10.40 - 3.89A - 1.11B - 1.38C + 1.94AB + 0.91AC - 0.16BC - 1.49A^2 - 0.67B^2 - 1.15C^2 \quad \text{Eq. (3)}$$

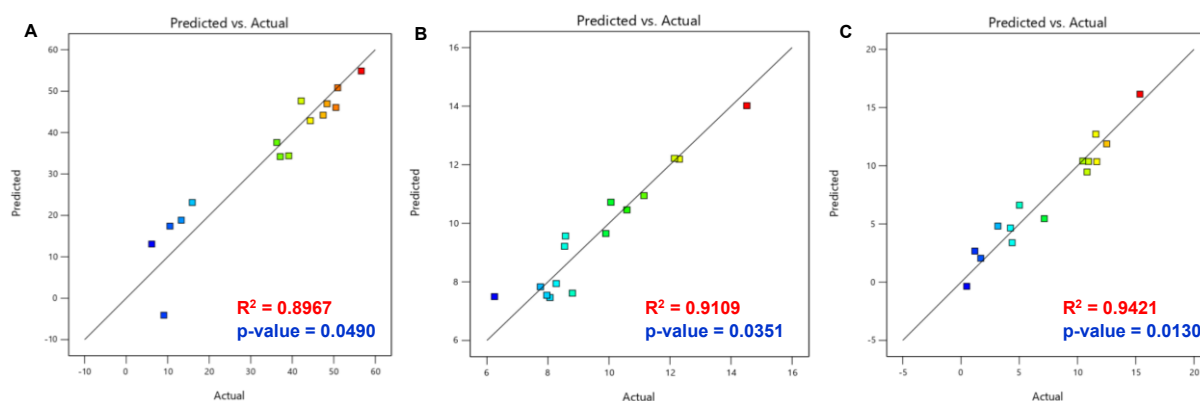


Figure 3 Actual and Predicted of each quadratic model from DOE (A) Reducing sugar (B) Total phenolics and (C) Total furans.

Figure 4 presents three-dimensional (3D) response surface plots that illustrate the interactions among pH, reaction time, and temperature. For the reducing sugar model, an increase in pH due to Ca(OH)_2 addition was associated with a reduction in sugar content, indicating sugar loss under highly alkaline conditions. Conversely, prolonged reaction times and elevated temperatures increased the concentration of reducing sugars. This suggests that under these conditions, the breakdown of cellulose and hemicellulose into monomeric sugars was enhanced by extended hydrolysis. The response surface plots for total phenolics and furans, shown in Figures 4C-4F demonstrated that increasing pH significantly reduced the concentration of these inhibitory compounds. Similarly, longer reaction times and higher temperatures also contributed to a decrease in phenolics and furans. These results suggest that increasing these variables could effectively reduce the concentration of these compounds in the hydrolysate. Previous experiments have shown that higher pH values during Ca(OH)_2 detoxification lead to a loss of reducing sugars, which could negatively affect ethanol fermentation. To mitigate this effect, the experimental design aimed to minimize sugar loss. The optimal overliming detoxification conditions were pH 7.75, 60°C, and 90 min. Under these conditions, the concentrations obtained were 51.43 g/L reducing sugars, 10.17 $\mu\text{g/L}$ total phenolics, and 5.91 mg/L total furans, respectively. Furthermore, a 4.58% loss in reducing sugars was observed, with removal efficiencies of 64.92% for total furans and 51.40% for total phenolic compounds.

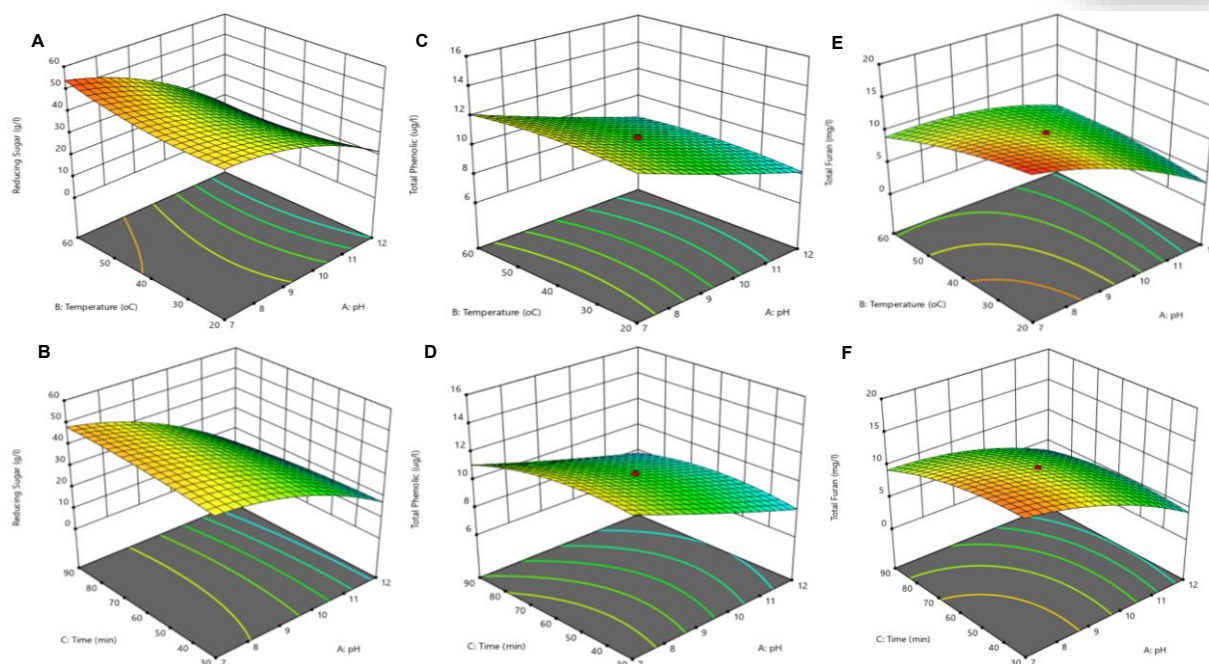


Figure 4 Response surface curves illustrating the effects of pH, temperature, and reaction time during overliming detoxification on reducing sugars and inhibitory compounds.

Fermentation and bioethanol yield

Ethanol fermentation from sugarcane bagasse, using non-detoxified hydrolysate, detoxified hydrolysate, and optimally overlimed detoxified hydrolysate, was performed with *Pichia stipitis* TISTR5801, as presented in Table 2. Reducing sugar served as the primary carbon source for ethanol production. During the bioethanol fermentation process, from the initial phase to 96 h, reducing sugar concentrations decreased while ethanol concentrations increased, as shown in Figure 5. In the first 12 h, sugars were rapidly consumed by the yeast, resulting in a corresponding sharp increase in ethanol production. After approximately 96 h, ethanol production decreased slightly as the carbon source was depleted in the system. Figure 5 illustrates that the hydrolysate subjected to optimized overliming detoxification achieved the highest fermentation efficiency. Under these conditions, sugar consumption was reduced to 98.44%. Reducing sugar consumption was rapid in the first 12 h, followed by a gradual decline as the sugars were nearly exhausted. Concurrently, ethanol production increased quickly to 36 h, reaching a peak of 14.75 g/L. This condition yielded the highest ethanol-to-sugar ratio of $0.2945 \text{ g}_{\text{ethanol}}/\text{g}_{\text{sugar}}$, a theoretical yield of 57.63%, an ethanol productivity of 0.4097 g/L/h , and a specific growth rate of 0.2055 h^{-1} . In comparison, ethanol fermentation from non-detoxified hydrolysate resulted in the lowest ethanol production. Reducing sugars were gradually consumed, and the highest remaining concentration was observed at 96 h. Ethanol production steadily increased throughout the fermentation period, peaking at 10.06 g/L at 96 h. This condition resulted in the lowest ethanol-to-sugar ratio of $0.1951 \text{ g}_{\text{ethanol}}/\text{g}_{\text{sugar}}$, a theoretical yield of 38.19%, ethanol productivity of 0.1048 g/L/h , and a specific growth rate of 0.0790 h^{-1} .

The previous results indicate the significant impact of inhibitory compounds such as furans, phenolics, and organic acids produced during acid hydrolysis. These compounds interfere with yeast metabolism, thereby reducing ethanol yields. Phenolic compounds, which are derived from lignin

degradation, could penetrate the microbial cell membrane, disrupt membrane integrity, and inhibit cell growth. Furan compounds, including furfural and 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), result from the breakdown of cellulose and hemicellulose structures. Furans are of particular concern due to their high concentration, toxicity, and potential to affect intracellular respiration in microorganisms. Additionally, these compounds can reduce the specific growth rate of the yeast [16]. Furthermore, minor sugar losses during detoxification, along with pH, temperature, and reaction time, may influence fermentation outcomes. Optimizing the detoxification process can mitigate the effects of these variables, effectively reduce inhibitory impacts, and significantly improve ethanol production, leading to higher ethanol yields.

To evaluate the feasibility of this process for industrial applications, scaling to an industrial level is considered. The overliming detoxification process demonstrates high efficiency in enhancing bioethanol production, reducing operational costs, and offering ease of implementation. Moreover, the method also generates gypsum as a by-product during the reaction [17]. In the economic evaluation of the investment, the payback period at the industrial scale is expected to be relatively short. Additionally, the by-products generated can be further commercialized, contributing to overall profitability.

Table 2 Bioethanol production by *Pichia stipitis* TISTR5801.

Parameters	Hydrolysate	Overliming Detoxification			Optimization DOE
		pH 7.0	pH 10.0	pH 12.0	
Reducing sugar (g/l)	51.58	49.82	43.51	33.83	50.07
Consumed reducing sugar (%)	35.49	78.06	82.33	96.76	98.77
Ethanol (g/l)	10.06	11.99	11.50	9.34	14.75
Ethanol Yield ($g_{\text{ethanol}}/g_{\text{sugar}}$)	0.1951	0.2407	0.2643	0.2762	0.2945
Theoretical yield (%)	38.19	47.10	51.71	54.05	57.63
Ethanol productivity (g/l/h)	0.1048	0.1999	0.1916	0.1947	0.4097
Specific growth rate (h^{-1})	0.0790	0.1163	0.1255	0.1566	0.2055

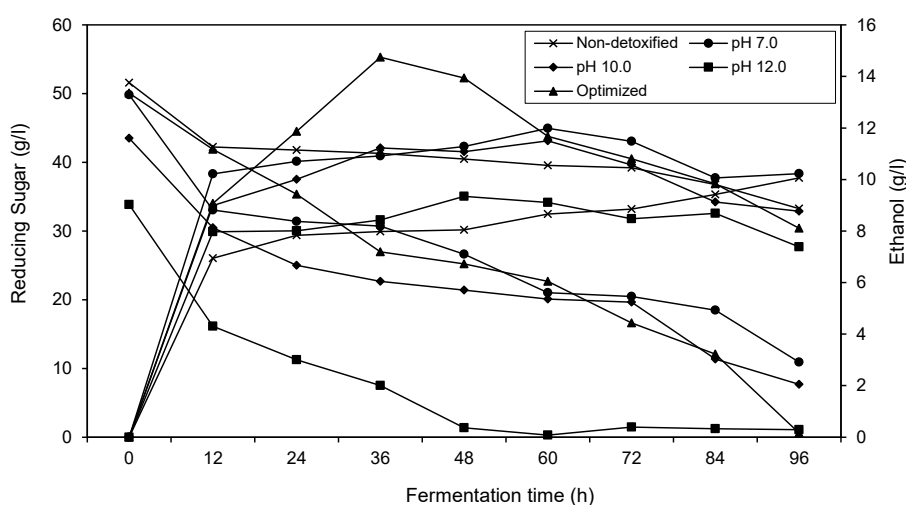


Figure 5 Bioethanol fermentation from sugarcane bagasse by *Pichia stipitis* TISTR5801.

Conclusions

This study investigates the enhancement of bioethanol production through Ca(OH)_2 overliming detoxification. The optimization conditions were determined using the Design of Experiments (DOE) approach, specifically the Central Composite Design (CCD). Sugarcane bagasse was selected as the raw material and hydrolyzed using 2.0% (w/v) dilute H_2SO_4 . The resulting hydrolysate was then detoxified by treating it with 20.0% (w/v) Ca(OH)_2 at varying pH levels, followed by 15 trials to eliminate inhibitory compounds. The optimized detoxification conditions were pH 7.75, reaction temperature 60°C , and reaction time 90 minutes. Under these conditions, total phenolics and total furans were reduced by 64.92% and 51.40%, respectively, while only 4.58% of reducing sugars were lost. This resulted in the highest ethanol yield of $0.2945 \text{ g}_{\text{ethanol}}/\text{g}_{\text{sugar}}$, corresponding to a theoretical yield of 57.63%. In contrast, fermentation using non-detoxified hydrolysate yielded the lowest ethanol yield of $0.1951 \text{ g}_{\text{ethanol}}/\text{g}_{\text{sugar}}$, with a theoretical yield of 38.19%. These findings demonstrate that inhibitory compounds negatively affect ethanol fermentation and reduce ethanol yields. These compounds diffuse into the cell membranes of microorganisms and disrupt their integrity, potentially reducing their ability to ferment. The overliming detoxification process was shown to be an effective method for eliminating these inhibitory compounds, thereby enhancing bioethanol production.

Acknowledgements

The author would like to thank the School of Renewable Energy and Clean Energy and the Smart Agricultural Laboratory, Maejo University, Chiangmai, for supporting the research budget and facilities. The Thailand Institute of Scientific and Technological Research for supporting the Culture of *Pichia stipitis* TISTR5801.

References

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2024). WORLD POPULATION PROSPECTS 2024: SUMMARY OF RESULTS (UN DESA/POP/2024/TR/NO.9). Retrieved September 3, 2025 from <https://desapublications.un.org/publications/world-population-prospects-2024-summary-results>.
- [2] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2021). Thailand's long-term low greenhouse gas emission development strategy (LT-LEDS). Retrieved September 3, 2025 from <https://www.onep.go.th>
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2024). Alternative Energy Development Plan (AEDP 2024): B.E. 2567–2580 (2024–2037). Retrieved September 3, 2025 from <https://www.dede.go.th/articles?id=450>
- [4] Germec, M., & Turhan, I. (2018). Ethanol production from acid-pretreated and detoxified rice straw as sole renewable resource. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(3), 607-619.
- [5] Baruah, J., Nath, B. K., Sharma, R., Kumar, S., Deka, R. C., Baruah, D. C., & Kalita, E. (2018). Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products. *Frontiers in Energy Research*, 6, 141.

- [6] Lu, Y., Han, Y., Shen, Y., Thangalazhy-Gopakumar, S., Shi, S., & Han, L. (2025). A Review on the Over-liming Detoxification of Lignocellulosic Biomass Prehydrolysate for Bioethanol Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1-33.
- [7] Haq, I., Arshad, Y., Nawaz, A., Aftab, M., Rehman, A., Mukhtar, H., ... & Syed, Q. (2018). Removal of phenolic compounds through overliming for enhanced saccharification of wheat straw. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(10), 3011-3017.
- [8] Ge, J. P., Cai, B. Y., Liu, G. M., Ling, H. Z., Fang, B. Z., Song, G., ... & Ping, W. X. (2011). Comparison of different detoxification methods for corn cob hemicellulose hydrolysate to improve ethanol production by *Candida shehatae* ACCC 20335. *African Journal of Microbiology Research*, 5(10), 1163-1168.
- [9] Stoutenburg, R. M., Perrotta, J. A., & Nakas, J. P. (2011). Overcoming inhibitors in a hemicellulosic hydrolysate: improving fermentability by feedstock detoxification and adaptation of *Pichia stipitis*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38(12), 1939-1945.
- [10] Yaya, O. L., Appiah, K. E. K., Doudjo, S., Nassirou, A. K. M., Didier, F. G., Benjamin, Y. K., ... & Tyagi, D. R. (2023). Multi-response and multi-criteria optimization of acid hydrolyzate detoxification of cocoa pod husks: Effect on the content of phenolic compounds and fermentable sugars. *Heliyon*, 9(4).
- [11] Jain, A., Jain, R., & Jain, S. (2020). Quantitative analysis of reducing sugars by 3, 5-dinitrosalicylic acid (DNSA method). In *Basic Techniques in Biochemistry, Microbiology and Molecular Biology: Principles and Techniques* (pp. 181-183). New York, NY: Springer US.
- [12] Sayyad, S. F., Chaudhari, S. R., & Panda, B. P. (2015). Quantitative determination of ethanol in arishta by using UV-visible spectrophotometer. *Pharmaceutical and Biological Evaluations*, 2(5), 204-207.
- [13] Medina, M. B. (2011). Determination of the total phenolics in juices and superfruits by a novel chemical method. *Journal of Functional Foods*, 3(2), 79-87.
- [14] Martinez, A., Rodriguez, M. E., York, S. W., Preston, J. F., & Ingram, L. O. (2000). Use of UV absorbance to monitor furans in dilute acid hydrolysates of biomass. *Biotechnology progress*, 16(4), 637-641.
- [15] Yücel, H. G., & Aksu, Z. (2015). Ethanol fermentation characteristics of *Pichia stipitis* yeast from sugar beet pulp hydrolysate: use of new detoxification methods. *Fuel*, 158, 793-799.
- [16] Sjulander, N., & Kikas, T. (2020). Origin, impact, and control of lignocellulosic inhibitors in bioethanol production—A review. *Energies*, 13(18), 4751.
- [17] Devi, A., Singh, A., Bajar, S., Pant, D., & Din, Z. U. (2021). Ethanol from lignocellulosic biomass: An in-depth analysis of pre-treatment methods, fermentation approaches and detoxification processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105798.

Production of Biomass Pellets and Biochar from Rubber Seed Cake

Piyapat Limprechachai¹ Kiatkamjon Intani^{1*} Ratiya Thuwapanichayanan¹ Donludee Jaisut¹
Shinji Kanehashi² and Supakit Sayasoonthorn¹

¹ Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

² Institute of Global Innovation Research, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16
Nakacho, Koganei-shi 184-8588, Japan

¹Corresponding author: Tel.: 02-561-3482. E-mail address: kiatkamjon.i@ku.th

Abstract

This study evaluates the potential of rubber seed cake as a raw material for producing biomass pellets. Cassava starch was used as a binder at two concentrations (5% and 10%) to compare the physical properties of the resulting pellets. The findings indicate that rubber seed cake can be successfully formed into biomass pellets. The 10% cassava starch formulation produced pellets with a stickier and more cohesive texture, resulting in more efficient pelletization. The 10% starch formula required an average electrical current of 14.54 A for pelletizing, higher than the 13.37 A for the 5% formula. The produced pellets had an average diameter of 7.33-7.35 mm and an average length of 26.39-27.55 mm. In terms of durability, the 10% starch formula showed no breakage, whereas the 5% formula had a 10% breakage rate. The bulk density of pellets in both formulations remained below the TIS standard (0.60 g/cm³), with the 10% formula achieving an average bulk density of 0.51 g/cm³ and a tapped density of 0.59 g/cm³. Pellets from the 10% starch formulation were thermally converted at 600°C for 120 minutes, yielding 26.74% biochar, 44.43% bio-oil, and 28.84% pyrolysis gas by weight. In conclusion, rubber seed cake is a promising agricultural waste material that can be value-added through pelletization, especially when using 10% cassava starch as a binder.

Keywords: Biochar, Biomass Pellets, Pelletization, Pyrolysis, Rubber Seed Cake

Introduction

Currently, the reliance on fossil fuels such as crude oil, coal, and natural gas, has become a significant global challenge with wide-ranging impacts on the economy, environment, and national energy security [1]. Price volatility in the global energy market, diminishing reserves, and adverse environmental effects, especially the emission of greenhouse gases that cause global warming and climate change [2], have spurred the international community to seek solutions, particularly the development and use of sustainable, domestically producible renewable energy [3]. Among renewable energy sources, biomass energy is considered a high-potential alternative in many countries, including Thailand. It is derived from renewable organic materials such as agricultural residues, bagasse, rice straw, corn stover, and various seed cakes [4]. Utilizing biomass not only reduces fossil fuel dependency but also promotes the value-added management of agricultural waste, contributing to a circular economy that emphasizes resource reuse and valorization [5]. One promising alternative material comes from rubber trees. Thailand is a major global

producer and exporter of rubber, with cultivation areas spanning the South, East, and parts of the Northeast [6]. The rubber production process yields not only latex but also a significant by-product from processing rubber seeds: Rubber Seed Cake (RSC). This cake is the residue left after oil extraction from the seeds, and the extracted oil can be used in the biodiesel industry or for other purposes [7].

Historically, rubber seed cake was often overlooked and underutilized, mainly as an organic fertilizer or in small amounts in ruminant feed [8]. However, studies of its chemical composition reveal that RSC has high potential for value addition as a biomass energy feedstock. This material primarily consists of cellulose, hemicellulose, and lignin in proportions suitable for processing into solid fuel [9]. Furthermore, rubber seed cake has a higher heating value (HHV), ranging from approximately 17,000 to 19,000 kJ/kg [10], comparable to other popular biomass types such as corn cobs, rice husks, and bagasse.

These properties make rubber seed cake an up-and-coming candidate for producing biomass pellets, which have gained global popularity due to their high energy density, uniform combustion, and low ash content, thereby making them environmentally friendly and reducing management costs [11-12]. Transforming rubber seed cake into biomass pellets adds value to agricultural waste, aligning with the principles of the circular economy [5] and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) [13].

Therefore, this research aims to assess the potential of rubber seed cake for producing biomass pellets. It compares the physical properties of pellets made using different proportions of cassava starch as a binder (5% and 10%) and investigates the products obtained from the pyrolysis of these pellets.

Materials and Methods

For biomass pelletization, the researchers used rubber seed cake (RSC), the residue from the oil extraction process, as the primary raw material (Figure 1). The moisture content of the RSC was 8.66%. Two formulations were prepared using cassava starch as a binder at 5% and 10% of the RSC weight. These were mixed with 17% water to achieve an optimal moisture content for pelletization (21%) (Figure 2). The mixture was fed into a pelletizer (Model 160, Samyodmotor Co., Ltd., Thailand) equipped with an 8 mm die (Figure 3). The mixture was passed through the pelletizer six times to grind the particles to less than 3 mm and heat the die to 50°C. During pelletization, the electrical current used was measured with a clamp meter. The resulting pellets were dried in a hot air oven at 105°C for 24 hours. Subsequently, the physical properties of the pellets were analyzed, including: size (length and diameter) using a vernier caliper; durability against breakage (drop test) by dropping them from a height of 1 meter and calculating the breakage rate according to Equation (1); and bulk density and tapped density. In the final step, pellets from the best-performing formula were pyrolyzed in an electric furnace (Model KJ-TX1000, Zhengzhou KJ Technology Co., Ltd., China) (Figure 3) at 600°C for 120 minutes. The resulting product proportions (biochar, bio-oil, and pyrolysis gas) were then analyzed.



FIGURE 1 (A) RUBBER SEEDS (B) RUBBER SEED CAKE



FIGURE 2 (A) PREPARING THE RSC AND CASSAVA STARCH MIXTURE (B) THE MIXTURE AFTER THOROUGH MIXING

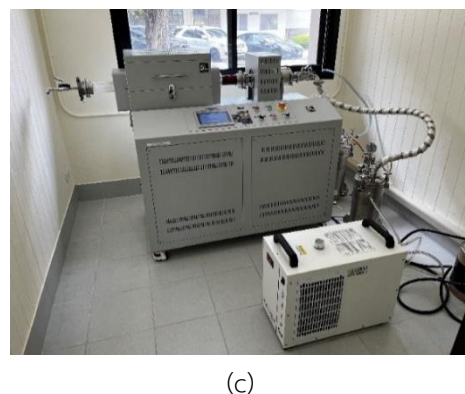
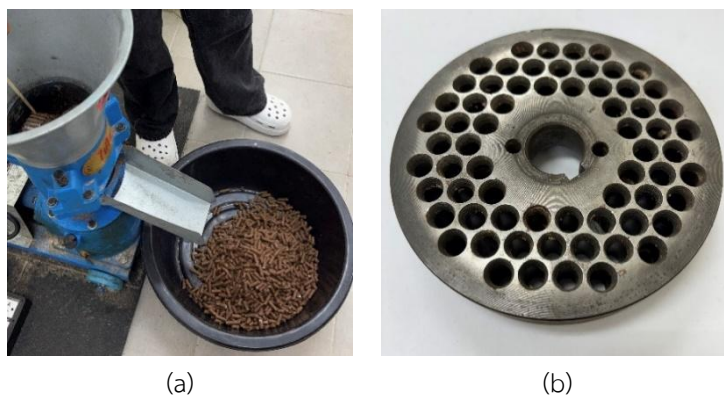


FIGURE 3 (A) BIOMASS PELLETIZATION (B) PELLETIZER DIE (C) PYROLYSIS FURNACE MODEL KJ-TX1000

$$Breakage(\%) = \left(\frac{N_f - N_o}{N_o} \right) \times 100 \quad (1)$$

where, Breakage represents the breakage percentage (%), N_f is the number of pellets after the drop test (dropped from 1 m) (pieces), and N_o is the number of pellets before the drop test (pieces).

Results and Discussion

During mixture preparation, the 10% cassava starch formula was observed to be stickier, more viscous, and clumped together better than the 5% formula. This affected the energy consumption of the pelletization process. The 10% formula required a higher average electrical current (14.54 A) compared to the 5% formula (13.37 A), as shown in Table 1. This is because the stickier mixture created higher resistance in the pelletizer [14]. This result aligns with research indicating that the optimal binder content is crucial for the physical properties of biomass pellets [15].

Table 1 Average electrical current measured during the pelletization process

Motor operating condition	Average electrical current (A)
The maximum current used by the motor	18.00
Pelletizing 5% starch formula	13.37
Pelletizing 10% starch formula	14.54

The physical dimensions of the pellets from both formulas were similar, with an average diameter of 7.33-7.35 mm and an average length of 26.39-27.55 mm, falling within the TIS 2772-2560 standard [16]. However, the durability test showed a clear difference: the 10% formula pellets had a 0% breakage rate, while the 5% formula had a 10% breakage rate. This demonstrates that a higher binder content significantly increases pellet strength. The density of both pellet formulas was still below the standard (0.60 g/cm³). The 10% formula, which had a higher density, recorded an average bulk density of 0.51 g/cm³ and a tapped density of 0.59 g/cm³. This low density might be due to limitations of the pelletizer, the number of pelletizing cycles, and the RSC particle size.

The pellets from the 10% formula, which had the best durability, were subjected to pyrolysis at 600°C for 120 minutes (Figure 4). The yields are shown in Table 2. Bio-oil was produced in the highest proportion, followed by pyrolysis gas and biochar, respectively. This confirms the potential of rubber seed cake as a feedstock for various biofuel production processes [17].

Table 2 Products from the pyrolysis of rubber seed cake biomass pellets

Run	Biochar yield (%)	Bio-oil yield (%)	Pyrolysis gas yield (%)
1	26.68	42.00	31.32
2	26.80	46.85	26.35
Mean ± SD	26.74 ± 0.08	44.43 ± 3.43	28.84 ± 3.51

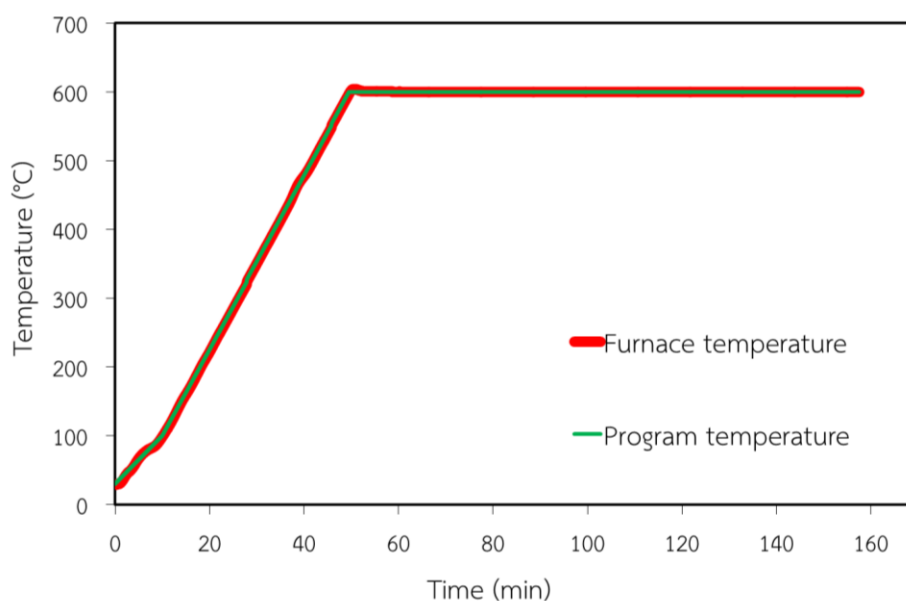


FIGURE 4 GRAPH SHOWING THE TEMPERATURE OF THE PYROLYSIS FURNACE.

Conclusion

Rubber seed cake (RSC) can be successfully manufactured into biomass pellets. Using 10% cassava starch as a binder yielded the best results in terms of physical properties, particularly durability (0% breakage rate). It led to an efficient pelletization process, despite the higher binder content requiring more energy. The bulk density of the resulting pellets (0.51 g/cm^3) was still below the TIS 2772-2560 standard. However, this could likely be improved by increasing the number of pelletizing cycles and reducing the RSC particle size. The produced pellets show high potential for further processing via pyrolysis, yielding 26.74% biochar, 44.43% bio-oil, and 28.84% pyrolysis gas. This research confirms that rubber seed cake is a high-potential agricultural waste material that can be value-added as a renewable energy source.

Acknowledgements

The researchers would like to thank the Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, for the research funding, and the SATREPS Project “Utilization Technology of Rubber Seeds for Green Products to Mitigate Global Warming and Plastic Pollution” for the materials and financial support.

References

- [1] IEA (International Energy Agency). (2024). **World energy outlook 2024**. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- [2] GHG Emissions Working Group, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). **Climate change 2023: Mitigation of climate change**. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

- [3] IRENA (International Renewable Energy Agency). (2024). **Renewable capacity statistics 2024**. Retrieved from <https://www.irena.org/publications>
- [4] Faaij, A., & Tabak, E. (2017). “Bioenergy for electricity generation”, In J. R. Vanier (editor). **Encyclopedia of Sustainable Technologies**, 41-65. Elsevier.
- [5] Ellen MacArthur Foundation. (2017). **What is a circular economy?** Retrieved from <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- [6] Office of Agricultural Economics. (2023). **Report on the rubber situation 2023**. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- [7] Pianthong, K., & Thaiyasuit, P. (2011). Rubber seed oil as a biodiesel resource in Thailand. **Journal of Renewable Energy and Environment**, 29(4), 385–390.
- [8] Department of Agriculture. (2017). **Utilization of rubber seed cake in the animal feed industry**. Bangkok: Department of Agriculture.
- [9] Shafiq, M., & Ismail, Z. (2021). Characterization of lignocellulosic components of rubber seed shells for biofuel applications. **Bioresource Technology Reports**, 13, 100662.
- [10] Kamsamran, W., Laoonual, Y., & Punsuvon, V. (2017). “Properties of biomass pellets produced from rubber seed shells”, In **Energy Procedia**, 138, 1120–1125.
- [11] Obermoser, M., & Lehner, M. (2011). Benefits of biomass pellets for power generation. **Renewable Energy Review**, 5(2), 41–50.
- [12] IEA Bioenergy. (2018). **Status overview of torrefaction technologies: A review of the commercialisation status of biomass torrefaction**. Retrieved from https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/10/Torrefaction-status-overview_final_Oct2018.pdf
- [13] United Nations. (2015). **Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development**. Retrieved from <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [14] Adapa, P. K., Tabil, L. G., & Schoenau, G. J. (2015). Factors affecting the quality of biomass pellet for biofuel and energy analysis of pelleting process. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 8(3), 11-20.
- [15] Zhang, H., Yu, J., & Fu, L. (2015). Effects of binders on the properties of bio-char pellets. **Bioresource Technology**, 178, 269-275.
- [16] TIS (Thai Industrial Standard) 2772-2560. (2017). **Industrial product standard for densified solid biofuel pellets**. Retrieved from https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf_files/tis/a2772-2560.pdf
- [17] Altikat, A., Alma, M. H., Altikat, A., Bilgili, M. E., & Altikat, S. (2024). A Comprehensive Study of Biochar Yield and Quality Concerning Pyrolysis Conditions: A Multifaceted Approach. **Sustainability**, 16(2), 937.

Cost-Optimal Home Energy Management under Thai TOU Tariffs using Multi-Agent Deep Reinforcement Learning

Khin Phyu Ye Myint¹, Thandar Aung¹, Ashok Paudel¹, Watcharakorn Pinthurat^{2*}, Terapong Boonraksa³, Promphak Boonraksa⁴, and Boonruang Marungsri^{1*}

¹School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

²Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi

³School of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom

⁴Department of Mechatronics Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi

¹Corresponding author: E-mail address: watcharakorn_pi@rmutto.ac.th, bmshevee@sut.ac.th

Abstract

This paper introduces a multi-agent deep reinforcement learning (MADRL) framework for home energy management systems (HEMS) under the Thai time-of-use (TOU) tariffs. The system optimizes the scheduling of electric-vehicle (V2G-capable) charging and discharging, air-conditioning cooling, and battery-storage operations. We evaluate and compare two MADRL controllers: a multi-agent Deep Q-Network (MADQN) with independent learners and a discrete-action multi-agent Soft Actor-Critic (MASAC) that uses twin critics and a learnable entropy temperature. The model is trained on 30 days of real-world data, and evaluated on the 31st day; both methods significantly outperform a normal base case. The MADQN controller lowers the average daily cost by 63.6% (from 595.1 THB to 217.0 THB) and slightly enhances thermal comfort. The MASAC controller also exhibits notable savings (55.6%) with smoother action sequences and improved exploration. All simulation results demonstrate that MADQN outperforms MASAC.

Keywords: Home energy management system (HEMS), vehicle-to-grid (V2G), time-of-use (TOU) tariff.

1. Introduction

The rapid adoption of rooftop PV, vehicle-to-grid (V2G) capable electric vehicles, and battery storage is transforming residential energy systems. Unscheduled and random addition of home appliances and EV fleets affects the power quality of the utility grid in terms of real power, reactive power, power factor, and harmonic components. Controlling the main appliances in residential households, such as the air conditioning, home battery system, and EV with V2G capability [1], becomes necessary. Coordinating these distributed resources is complex due to uncertainties in generation and demand, necessitating a Home Energy Management System (HEMS) to solve a multi-objective optimization problem that balances cost, comfort, and constraints [2]. Traditional rule-based methods are inflexible [3], while Model Predictive Control requires accurate models. Although Deep Reinforcement Learning (DRL) in Figure 1 offers a model-free alternative, single-agent approaches lack effective coordination, and standard multi-agent DRL often suffers from instability and a narrow focus on cost minimization.

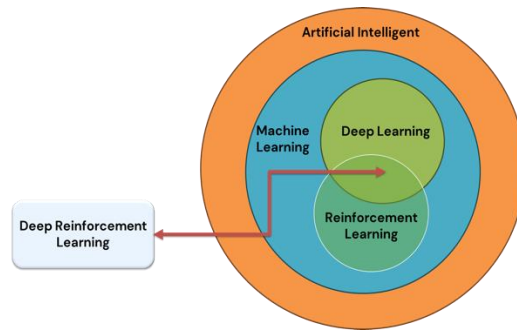


Figure 5 Conceptual hierarchy of deep reinforcement learning within artificial intelligence

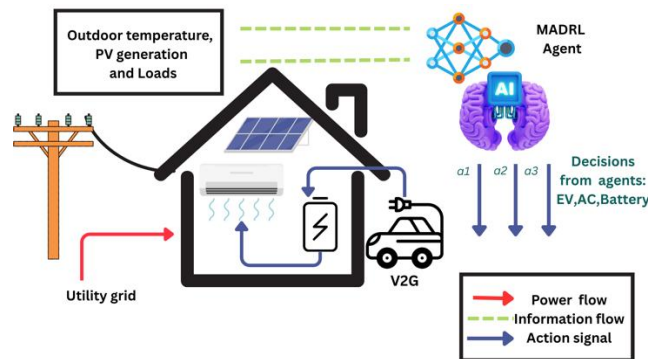


Figure 6 The architecture of the proposed multi-agent deep reinforcement learning (MADRL) framework for home energy management

In Figure 2, this work investigates multi-agent deep reinforcement learning for Home Energy Management Systems under Thai TOU pricing, addressing a gap in existing research. The primary contribution is the development and comparison of two MADRL algorithms: a Multi-Agent Deep Q-Network (MADQN) and a Multi-Agent Soft Actor-Critic (MASAC). Featuring a multi-objective reward function that balances cost, comfort, and grid stability, the proposed controllers are evaluated against a base case (normal condition), demonstrating superior cost savings while maintaining operational constraints.

2. Methodology

This study develops a Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL) framework to coordinate a residential energy system with solar PV, a V2G-capable EV, battery storage, and an air conditioner. Using a centralized training with decentralized execution (CTDE) paradigm, three independent agents (for the EV, home battery system, and AC) learn control policies based on a shared state.

2.1 Power Flow Analysis

Power Flow Analysis evaluates the power system to determine the voltage and angle at each bus. These values enable the calculation of power loss using the Newton-Raphson method [4], a commonly used iterative technique in power flow analysis for determining voltage, angle, and power loss. The total power loss is presented in Equation (1).

$$P_{total}^{loss} = \sum_i^n I_i^2 R_i \quad (1)$$

Let I_i represents the current, R_i represents resistance, and i is the index for each node (bus). n represent the number of nodes.

2.2 Discomfort Cost

Equation (2) presents the calculation for discomfort associated with the shifting of home appliances. The discomfort associated with each postponement or advancement operation is user-defined and varies with the number of periods by which the appliance is shifted [5].

$$D_{Total} = \sum_{l=1}^{N_l} \varphi_l \times \tau_L \quad (2)$$

Where, φ_l represents the discomfort of the load l , τ_L is the priority of the load l .

2.3 Optimum Energy Management for the Air Conditioning

Equation (3) considers only the cooling operation, but it may be easily modified to consider heating as well. The occupants define the required set-point for several periods [6].

$$T_t^r = \left(1 - \frac{\Delta T}{1000 \times M_a C_a R^{eq}}\right) + T_{t-1}^r + \frac{\Delta T}{1000 \times M_a C_a R^{eq}} - T_{t-1}^a \quad (3)$$

This section develops a model to correlate air conditioner (AC) energy consumption with key thermal dynamics. Since heat gain is a function of the indoor-outdoor temperature difference and the building's thermal resistance, the model defines the AC's energy consumption at any time instant as a function of the current and previous indoor temperatures, along with the prevailing outdoor temperature [7] in Equation (4).

$$P_{AC,t} = \frac{T_{t-1}^r \left(1 - \frac{\Delta T}{1000 \times M_a C_a R_h}\right) + T_{t-1}^a \times \frac{\Delta T}{1000 \times M_a C_a R_h} - T_t^r}{\frac{COP \times \Delta T}{0.000277 \times M_a C_a}} \quad (4)$$

Where M_a = Mass of air in the room (kg), C_a = Specific heat capacity of air (kJ/kg.°C), T_{t-1}^r = Indoor temperature at the previous time step $t - 1$ (°C), COP = Coefficient of Performance of the AC (unitless), $P_{AC,t}$ = Electrical power consumption of the AC at time t (kW) and ΔT = Length of the time step (hours).

$$T_i^r = T_{SP} \forall i \in [t_{SP}, t_{end}] \quad (5)$$

Equation (5) describes that the room temperature needs to be maintained at T_{SP} from the time when the customer wants to achieve the desired set-point temperature until the T_{tnd}^{th} instant. To achieve the desired temperature at $t = t_{end}$, the room temperature at the previous time instants needs to be maintained as in Equation (4).

2.4 Design of the Discomfort Score

The Daily Discomfort Score (DDS) is calculated by summing the Hourly Discomfort Scores for each day, plus a penalty for consecutive hours of discomfort [8]. The Hourly Discomfort Score (HDS) is assigned based on Equation (6):

$$HDS = \begin{cases} 1, & |\Delta| \geq 3.5 \\ 0.5, & |\Delta| \geq 2.5 \text{ and } |\Delta| < 3.5 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

2.5 Energy cost

The trade-off between minimizing energy costs and discomfort should be considered based on the end-user's preferences. In Equation (7), the minimization of incomes is presented (*Min Inc*) in Equations (8) as one of the objective functions [5].

$$\mathbf{Min\ Inc} = \mathbf{EC}_{Total} + \omega \times \mathbf{D}_{Total} \quad (7)$$

Where $\mathbf{EC}_{Total}$ represents the energy costs, ω weight value, and $\mathbf{D}_{Total}$ is the total discomfort.

$$\mathbf{EC}_{Total} = \sum_{t=1}^{Nt} (\mathbf{E}_t^B \times \mathbf{C}_t^B - \mathbf{E}_t^S \times \mathbf{C}_t^S) \times \Delta t \quad (8)$$

Where $\mathbf{EC}_{Total}$ represents the total costs associated with energy usage, $\mathbf{E}_t^B$ and $\mathbf{E}_t^S$ represents the energy bought and sold, $\mathbf{C}_t^B$ and $\mathbf{C}_t^S$ are the costs of buying and selling energy, respectively. Δt represents the hourly adjustment parameter, and $\mathbf{Nt}$ represents the total number of periods.

2.6 Battery of EV

The control scheme is used for charging/discharging by the DC/DC bidirectional converter for the EV battery. The primary control signals, frequency, and $\mathbf{SOC}$ have been normalized to $\mathbf{f}_{nom}$ and $\mathbf{SOC}_{nom}$ to actuate both quantities so that any corresponding change of any amount is equally weighted [9] for the control scheme to operate in Equations (9) and (10).

$$\mathbf{f}_{nom} = \frac{\mathbf{f} - 0.5[\mathbf{f}_{max} + \mathbf{f}_{min}]}{0.5[\mathbf{f}_{max} - \mathbf{f}_{min}]} \quad (9)$$

$$\mathbf{SOC}_{nom} = \frac{\mathbf{SoC} - 0.5[\mathbf{SoC}_{max} + \mathbf{SoC}_{min}]}{0.5[\mathbf{SoC}_{max} - \mathbf{SoC}_{min}]} \quad (10)$$

2.7 Multi-Agents Soft Actor-Critic Algorithm (MASAC)

Figure 3 defines the household energy management problem in the context of a Markov Game, which is the multi-agent version of a Markov Decision Process (MDP). Here, the agents (EV control, HVAC control, and battery storage control) are each part of the system and interact with the system environment; the system dynamics are affected by the joint actions of each agent. To address this, we utilize the Multi-Agent Soft Actor-Critic (MASAC) framework. In continuous and dynamic environments, and in a system with a multitude of SAC policies, the actor-critic framework enhances the system's stability and robustness by separating the policy function (actor) from the value function (critic) [10]. In our MASAC, we use the advanced method to manage hybrid action spaces (continuous + discrete) and attention-based critics to promote scalability and manage information privacy between agents.

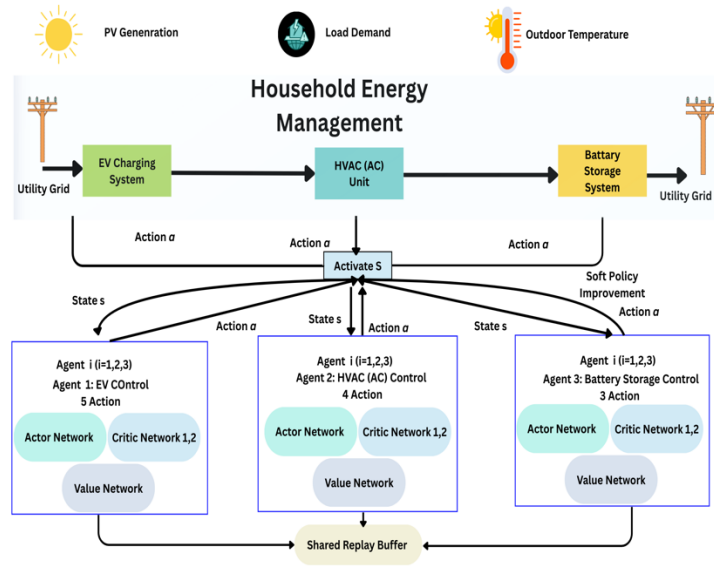


Figure 7 The structure of the MASAC algorithm.

2.8 Multi-Agent Deep Q-Network (MADQN)

The household energy management issue is modeled as a Markov Game, which is the multiple agents' version of the Markov Decision Process (MDP). In this case, every agent (EV, HVAC, and Battery) perceives the combined system state and chooses one action, and the environment transitions are the result of their coordinated actions. For solving such a case, we use the Multi-Agent Deep Q-Network (MADQN). Each agent has their own Q-network, which is a multi-layer perceptron (MLP) [11] that takes a normalized state vector (time, PV generation, load, TOU price, outside and inside temperatures, and SoCs) and computes the Q values for a set of predefined actions. The structure of the proposed MADQN is illustrated in Figure 4. The Q value function of every agent is defined in Equation (11):

$$Q_{t+1}^i(s_t^i, a_t^i) = (1 - \alpha) Q_t^i(s_t^i, a_t^i, \theta^i) + \alpha [r_{t+1}^i(s_{t+1}^i) + \gamma \max_{a \in A^i} Q_t^i(s_{t+1}^i, a; \theta^{i,-}) - Q_t^i(s_t^i, a_t^i, \theta^i)] + \sum_{j \in N} \eta^{ij} \quad (11)$$

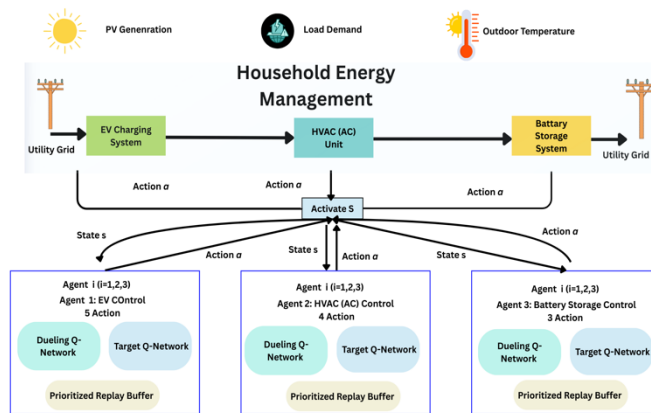


Figure 8. The structure of the MADQN algorithm.

Figure 5 presents a comprehensive, technical, and direct summary of the proposed method's entire process. It focuses on the specific Centralized Training, Decentralized Execution (CTDE) framework and pseudocode of the proposed method.

3. Simulation procedures

This study presents a simulation framework that integrates a Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL) algorithm with Pandapower and is implemented on a PC (AMD Ryzen 7 7735HS processor). Configured with three agents to optimize cost, user satisfaction, and grid compliance, the model uses simulated PV data and household load profiles derived from processed historical data obtained from the Australian Energy Market Operator (AEMO), specifically focusing on the South Australian region [12]. The key innovation is the application of realistic energy pricing conditions from Thailand, specifically incorporating the Time-of-Use (TOU) tariff scheme. This scheme features on-peak (9:00 AM – 10:00 PM, ~5 THB/kWh) and off-peak (10:00 PM – 9:00 AM, ~2.5 THB/kWh), periods on weekdays. This setup provides a region-specific evaluation of MADRL's effectiveness for the Thai energy market.

3.1 Experimental setup

The experimental setup and key hyperparameters of the proposed MADRL method are summarized in Table 1. The model was trained on data from Days 1 to 30 and evaluated on Day 31 data.

Algorithm 1: MASAC Simulation Process	Algorithm 2: MADQN Simulation Process
Initialize environment and building parameters	Initialize environment and building parameters
Initialize SAC agents (EV, AC, Battery) with random networks	Initialize DQN agents (EV, AC, Battery) with random networks
Initialize shared replay buffer	Each agent maintains its own replay buffer
Repeat (for each episode)	Repeat (for each episode)
Initialize state s	Initialize state s
repeat	repeat
Select actions a_i from each agent's policy (stochastic)	For each agent:
Execute joint action (a_{EV}, a_{AC}, a_{Bat}) in environment	Select action a_i using ϵ -greedy policy
Observe next state s' and reward r	Execute joint action (a_{EV}, a_{AC}, a_{Bat}) in environment
Store (s, a, r, s') in shared replay buffer	Observe next state s' and reward r
Sample batch from replay buffer	For each agent:
For each agent:	Store (s, a_i, r, s') in its replay buffer
Update critics using TD target	Sample batch from buffer
Update actor using policy gradient	Update Q-network with Double DQN target
Soft update target networks	Soft update target network
$s \leftarrow s'$	$s \leftarrow s'$
until s is terminal	until s is terminal
end	end

Figure 9 CTDE architecture: pseudocodes of MASAC and MADQN

Table 3 Implementation & hyperparameters

Parameters	Value
Training / Testing	Train on Days 1–30, test on Day 31
Replay buffer size	1×10^6 transitions
Batch size	128
learning rate alpha	3×10^{-4}
Discount factor (γ)	0.99
Number of episodes	4000
Network hidden dimension	512
Optimizer	Adam

4. Simulation Results and Discussion

The following simulation results provide a detailed analysis of the system's performance and reliability under various conditions. MADQN is chosen as the most effective algorithm because it consistently achieves the highest rewards and demonstrates superior stability across all case studies.

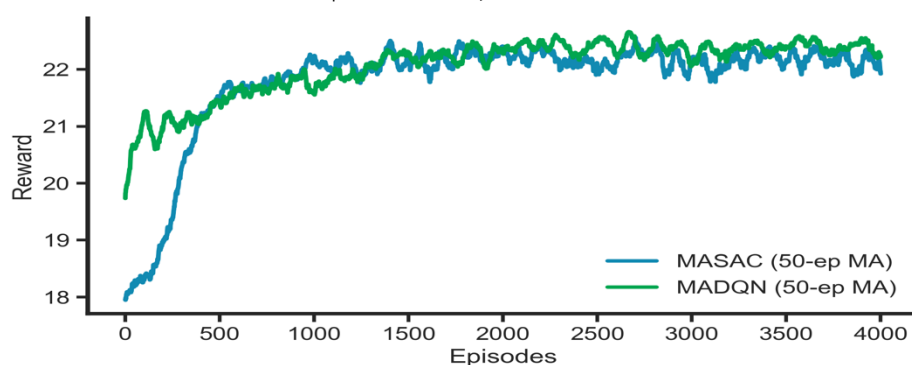


Figure 10. Learning curve: total episode reward over 4,000 training episodes

The reward simulation results in Figure 6 compare the performance of the MASAC and MADQN algorithms with 4000 training episodes. Both achieve stable convergence to a similar final reward, but with distinct learning dynamics: MADQN demonstrates faster initial convergence, while MASAC offers smoother, more stable long-term learning. This indicates a trade-off, where MADQN provides rapid early adaptation and MASAC excels in long-term robustness.

Figure 7 illustrates the Time-of-Use (TOU) price simulation for Thailand, contrasting weekday and weekend/holiday tariffs. On weekdays, a clear on-peak (9:00 AM – 10:00 PM, ~5 THB/kWh) and off-peak (10:00 PM – 9:00 AM, ~2.5 THB/kWh) structure is shown, while weekends maintain a flat off-peak rate. This strategy incentivizes load shifting from high-cost peak periods to lower-cost hours, promoting energy efficiency and cost savings for consumers.

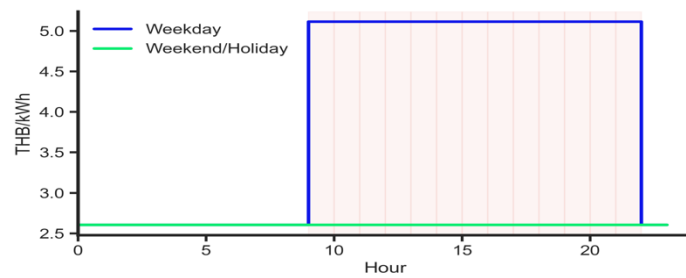


Figure 11. Daily time-of-use (TOU) electricity pricing schedule: weekday vs. weekend/holiday rates.

Figure 8. Daily grid energy consumption comparison for MASAC, MADQN, and the baseline strategy. The results show that the MADQN algorithm achieves the best performance, with the lowest daily grid energy imports, followed by MASAC. The baseline consistently shows the highest grid dependence, indicating limited adaptability and a lack of effective load-shifting capability.

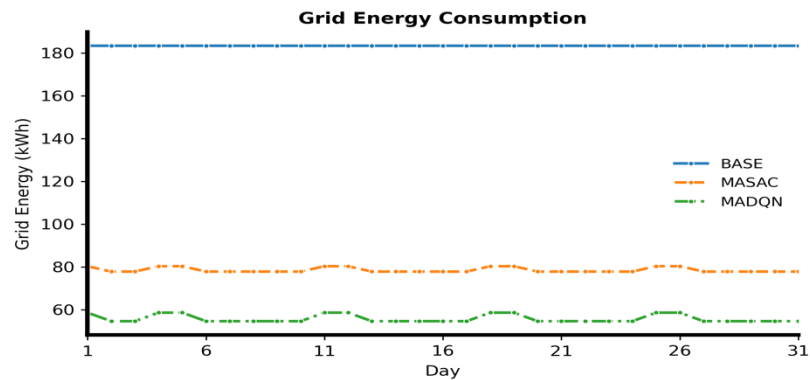


Figure 12. Comparison of importing energy from the grid under different control strategies

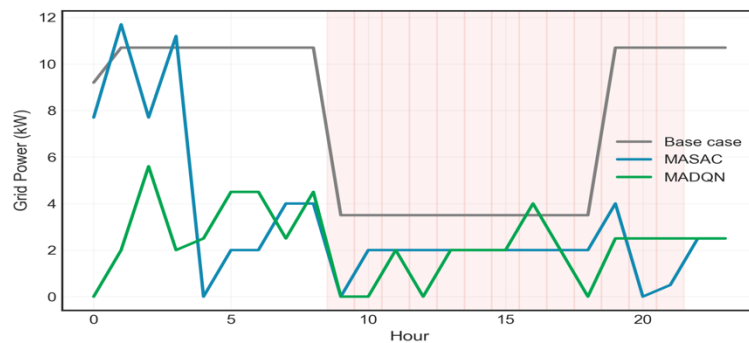


Figure 13 Hourly grid power consumption comparison under different control strategies

Figure 9 compares the hourly grid power consumption, showing that both MASAC and MADQN strategies significantly reduce peak demand compared to the rigid base case. MASAC achieves this with smoother, more stable load adjustment, while MADQN employs more aggressive reductions. Figure 10 confirms that this effective scheduling directly translates to lower costs, with MADQN achieving the lowest daily energy expenditure. Together, these results indicate a key trade-off: MADQN excels in maximum cost reduction, while MASAC offers greater operational smoothness.

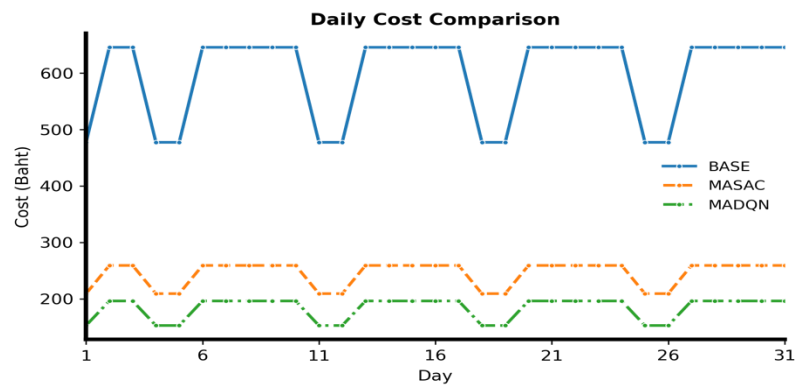


Figure 14. Daily cost for smart home energy management under different control strategies

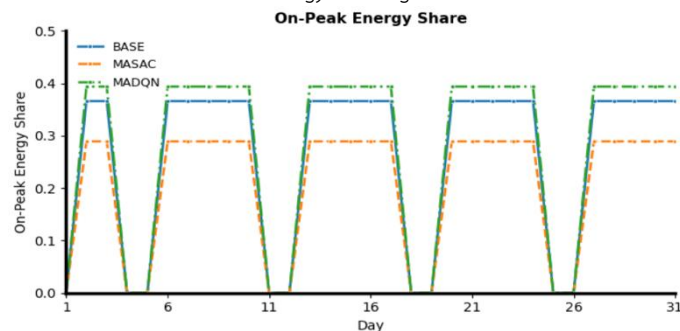


Figure 15. The on-peak energy share comparison under different control strategies

As illustrated in Figure 11, MADQN consistently produces the highest on-peak energy share (0.40), compared with the baseline (~ 0.33 – 0.36) and MASAC (~ 0.28 – 0.30). MADQN prioritizes user comfort by keeping appliance operation times closer to natural preferences, with less aggressive shifting to off-peak hours. This is advantageous in scenarios where consumer satisfaction and acceptance of demand response programs are critical, and it balances energy management objectives with user convenience, making it more suitable for consumer-centric applications.

Table 2 presents a comparative analysis of the proposed MADRL, revealing two key insights. The integration of MADRL leads to substantial economic benefits, with the MADQN and MASAC algorithms reducing daily electricity costs by 378.15 THB and 330.90 THB, respectively. So, we can see that the MADQN can lower the cost more than MASAC.

Table 4. Performance Comparison of Control Strategies

Metric	Baseline	MADQN	Improvement vs. Baseline	MASAC	Improvement vs. Baseline
Electricity Cost (THB/day)	595.14	216.99	-63.50%	264.24	-55.60%
Comfort Temperature (h/day)	24	21.19	-11.70%	21.26	-11.40%

5. Conclusion

Based on a comprehensive evaluation of simulation results, MADQN is the most suitable choice for the proposed home energy management system. It achieved the highest reward and lowest average daily cost of 217.0 THB, representing a significant 63.6% reduction compared to the baseline, thereby most effectively fulfilling the primary objective of minimizing electricity expenses. Although the Multi-Agent Soft Actor-Critic (MASAC) method demonstrated smoother operational stability and slightly better peak demand

reduction, MADQN's superior cost-efficiency, faster learning convergence, and more aggressive yet effective scheduling strategy make it the optimal algorithm for maximizing economic savings under the given Thai time-of-use tariff structure. Loading the EV fleet to the grid is the basic concept for employing the V2G technique.

Acknowledgment

The author wishes to express their sincere and deepest gratitude to Suranaree University of Technology, Thailand, for the generous financial support provided through the Vithedbundit Scholarship. This invaluable assistance made the pursuit and completion of this research possible.

References

- [1]. Mojumder, M. R. H., Antara, F. A., Hasanuzzaman, M., Alamri, B., & Alsharef, M. (2021). Electric vehicle-to-grid (V2G) technologies: Impact on the power grid and battery. *Energies*, 14(19), 6199.
- [2]. Liu, X., Wu, Y., & Wu, H. (2021). PV-EV integrated home energy management considering residential occupant behaviors. *Sustainability*, 13(24), 13826.
- [3]. Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., & Abel, D. (2021). Review on model predictive control: An engineering perspective. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5–6), 1327–1349.
- [4]. Ahmadi, A., Smith, M. C., Collins, E. R., Dargahi, V., & Jin, S. (2022). Fast Newton-Raphson power flow analysis based on sparse techniques and parallel processing. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(3), 1695–1705.
- [5]. Faia, R., Faria, P., & Vale, Z. (2025). Optimal energy management with discomfort calculation in residential buildings considering load shifting and home battery storage system. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 41, 101624.
- [6]. Paterakis, N. G., Erdinc, O., Bakirtzis, A. G., & Catalão, J. P. S. (2015). Optimal household appliances scheduling under day-ahead pricing and load-shaping demand response strategies. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, DOI: 10.1109/TII.2015.2438534
- [7]. Philip, A., Islam, S. N., Phillips, N., & Anwar, A. (2022). Optimum energy management for air conditioners in IoT-enabled smart homes. *Sensors*, 22(19), 7102.
- [8]. Kampelis, N., Ferrante, A., Kolokotsa, D., Gompakis, K., Standardi, L., & Cristalli, C. (2017). Thermal comfort evaluation in HVAC demands response control. *Energy Procedia*, 134, 675–682.
- [9]. Mishra, S., Sahoo, S., & Pullaguram, D. R. (2015). A systematic state-of-charge-based V2G charging framework for frequency response. In *9th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems* (pp. 31–36).
- [10]. Nazemi, S. D., & Jafari, M. A. (2023). *A multi-agent deep reinforcement learning framework for real-time energy management in smart building communities* [Preprint]. SSRN.
- [11]. Fang, X., Zhao, Q., Wang, J., Han, Y., & Li, Y. (2021). Multi-agent deep reinforcement learning for distributed energy management and strategy optimization of microgrid market. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 29, 100444.
- [12]. Sharma, V., Haque, M. H., & Aziz, S. M. (2019). PV generation and load profile data of net zero energy homes in South Australia. *Data in Brief*, 25, 104235.

Energy Recovery in Electronics Plant Considering Economic Constraints

Prayad Boonkham¹ Chaimongkol Pengtem¹ Promsak Apiratikul² and Nikorn Saengngam^{1*}

¹Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, (RMUTT), Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

²Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, (RMUTT), Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*Corresponding author: Tel. : +669-1935-1995. E-mail address: nikorn@rmutt.ac.th

Abstract

This paper presents a comparative feasibility analysis of an energy-conservation project implemented at an electronics manufacturing facility. The study investigates the utilization of waste heat from compressed air systems to preheat water, thereby replacing hot water generated by diesel steam boilers. The project involves an initial investment of THB 3,000,000, yielding annual savings of THB 2,025,000 through reduced electricity consumption, elimination of diesel boiler operation, and avoidance of yearly boiler maintenance and legally required inspection costs. A review of the original assessment revealed that only a single economic indicator—the payback period—was used to evaluate feasibility. To enhance the decision-making framework, this research incorporates additional financial parameters, including Net Cash Flow, Net Present Value (NPV) through the discount rate, and the Internal Rate of Return (IRR), alongside the traditional payback period. The results demonstrate that all evaluated economic indicators meet or exceed the investment criteria, confirming the financial viability of the energy recovery project. Consequently, this analysis provides a more robust basis for managerial decision-making, enabling prompt and confident investment in energy conservation measures.

Keywords: Heat Exchanger, Economic Constraint, Energy Recovery

A Prototype of Online Control and Monitoring Systems based on NodeMCU ESP8266 in conjunction with MQTT and Node-RED dashboard-UI

Yuthapong Tarapin, Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit, Surapon Riyana*

School of Renewable Energy, Maejo University, Nongharn, Sansai, Chiangmai, 50290

* Corresponding author: Tel.: 0933036346. E-mail address: surapon_r@mju.ac.th

ABSTRACT

This work presents a prototype system for controlling and monitoring the operation of electrical devices in smart farms—specifically, the water pump and the ventilation fan—via the Internet. The proposed system is built on the NodeMCU ESP8266, along with a soil moisture sensor and a temperature and humidity sensor. Furthermore, it is based on a website developed with Node-RED. It is proposed to control and display the state of farm equipment and farm environment by using the Node-RED Dashboard UI in conjunction with MQTT. Assuming no errors in internet network connectivity or electrical power issues, the system is evaluated over 8 hours, from 09:00 to 17:00, under varying internet data transfer speeds of 512 kb, 1024 kb, 2048 kb, and 3072 kb. We found that the proposed system could accurately control the target equipment and accurately display environmental data across all tested internet speeds. That is, the proposed system successfully controls the target equipment and accurately measures the sensor values on the proposed website. Therefore, we can conclude that the proposed system is efficient and practical to apply.

Keywords: Internet of Things (IoT), Node-RED, Node-RED Dashboard, ESP8266, Moisture content sensor, Water pump control system, MQTT, Online control system, Online monitoring system.

Development of A Solar-Powered Mower for Row Crop Cultivations based on Differential Steering Systems and Radio Frequency Remote Controls in conjunction with ESP32-CAM

Yuthapong Tarapin, Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit, Surapon Riyana*

School of Renewable Energy, Maejo University, Nongharn, Sansai, Chiangmai, 50290

* Corresponding author: Tel.: 0933036346. E-mail address: surapon_r@mju.ac.th

ABSTRACT

This work proposes a solar-powered mower for row crop cultivation. It is controlled via a 2.4 GHz radio frequency remote and an ESP32-CAM. Its drive system is a differential-steering setup. It has dimensions of 1.30 m x 1.50 m x 0.75 m. The frame of the proposed mower is constructed from 3.81 cm steel square tubes. The primary electrical source of the proposed mower is 200 W solar panels, coupled with 12 VDC, 40 Ah batteries. In addition, aside from the solar panels, the batteries can be recharged by using the Provincial Electricity Authority (PEA) when the solar panels are inactive or insufficient. The blade for cutting or destroying weeds is driven by a motor at 12,000 rpm, with a blade length of 15 cm. The drive motor of the proposed mower has a torque of 50 kg·cm. The experimental results show that the battery voltage decreases from 12.6 VDC to 12.45 VDC after the proposed mower has run continuously for 1 hour, i.e., the battery voltage decreases by 0.025 VDC every 10 minutes. The battery capacity decreases from 40 Ah to 38.46 Ah, i.e., it decreases by 0.26 Ah every 10 minutes. With a controlled range of at most 70 m, the success rate is at least 97.05% without signal obstructions and 91.14% with obstructions. Moreover, the experimental results show that the proposed mover can be practically applied in agriculture, achieving a weed-destroying percentage of 90%. However, the proposed mower's performance will depend partly on the operator's ability to use its remote control.

Keywords: Mower, Weed removal machine, Solar energy, Differential steering, ESP32-CAM, Remote control

INTRODUCTION

Thailand is recognized as an agricultural country [1], as most of its population engages in farming as a primary occupation for livelihood and income generation. Findings from the study indicate that most Thai farmers engage in traditional agricultural practices [2]. One of the major challenges farmers face throughout the cultivation process—from planting to pre-harvest—is the presence of weeds in agricultural areas. Without proper weed control, crop growth and yield quality may be compromised by competition for essential resources, such as nutrients, sunlight, and water. Moreover, weeds are known to be a source of plant diseases and pests, serving as reservoirs for pathogens and habitats for harmful insects. The most basic method of weed control in agricultural fields is manual removal by humans [3, 4]. This approach is simple and environmentally friendly. However, it is often ineffective against mature weeds with strong root systems, high density, or large coverage areas. To address these limitations, the farmers have adopted agricultural machinery such as tractors and rotary tillers. Although agricultural machinery is more efficient than manual methods, it has high investment costs and maintenance expenses. Moreover, we found that

the shortage of skilled labor, spare parts, and adequate knowledge of proper and efficient machine operation are also problems in agricultural machinery. Typically, agricultural machinery is powered by either fuel or battery-based electricity. Fuel-powered machines offer convenience and generally higher performance than electric-powered machines [5]. However, fuel combustion contributes significantly to environmental pollution by emitting carbon dioxide (CO₂) [6], a major driver of climate change and global warming [6]. Consequently, there is growing advocacy for the adoption of electric power in agriculture. It is a cleaner energy [7]. It is also noted that agricultural machinery is primarily effective for weed control during the pre-planting stage. Therefore, chemical herbicides remain a common alternative among farmers because they can efficiently control weeds across large areas at relatively low cost. Nonetheless, the use of agricultural chemicals poses serious risks that must be carefully considered. Improper or excessive use, selection of inappropriate chemical types, and lack of caution can lead to health issues for both farmers and consumers, including irritation, allergic reactions, chronic illnesses, or even fatal toxicity. Additionally, chemical residues can persist in soil, water, and air, causing pollution and ecological disruption. Furthermore, we found that in many agricultural regions of Thailand, crops are commonly planted in straight rows [8], as this method facilitates effective crop management practices such as irrigation, fertilization, weed control, and harvesting.

The Internet of Things (IoT) [9] is a key technology that plays a vital role in advancing the agricultural sector in the modern era, particularly in enhancing farm management and precision crop production. IoT enables farmers to monitor and control environmental conditions—such as temperature, humidity, light, and soil quality—through sensor systems and real-time online platforms. This capability enables informed decision-making, reduces risk, increases yields, and lowers operational costs. Moreover, IoT promotes efficient use of resources such as water, fertilizers, and energy, aligning with the principles of sustainable agricultural development. Therefore, the adoption of IoT in agriculture is considered a strategic approach to strengthening national and global competitiveness and food security.

In response to the challenges and limitations of weed control in agricultural areas, as previously discussed, this work proposes a remote-controlled, solar-powered mower designed for weed removal in row-crop farming systems. The proposed solution is environmentally friendly, reduces long-term energy costs associated with mechanical weed control [10], and enhances operational convenience and safety for farmers. Solar energy is set to be the primary electrical source, and communication occurs via a 2.4 GHz radio link between the control system and the mower unit. This enables remote operation functions such as forward movement, reverse, left and right turns, mowing, and stopping. To ensure maneuverability in confined spaces, the mower employs a differential steering system. Additionally, to provide real-time visual feedback of the environment ahead of the mower, an ESP32-CAM module is integrated, allowing users to monitor the surroundings through a web browser on a mobile device or computer.

This work presents a distinctive approach compared to conventional IoT systems in agriculture. Unlike typical IoT applications that focus primarily on monitoring and data collection, this system integrates real-time remote control, autonomous mobility, and visual feedback to actively perform field operations—specifically, weed management in row-crop environments. Utilizing solar energy as the primary power source promotes environmental sustainability, while the differential steering mechanism ensures maneuverability in confined agricultural spaces. The inclusion of a 2.4 GHz RF communication system and ESP32-CAM enables precise control and live visual monitoring via web interfaces, enhancing both user convenience and operational safety. This fusion of clean energy, smart power, and real-time imaging sets the system apart as a practical and eco-friendly innovation tailored for modern precision agriculture.

MATERIALS AND METHODS

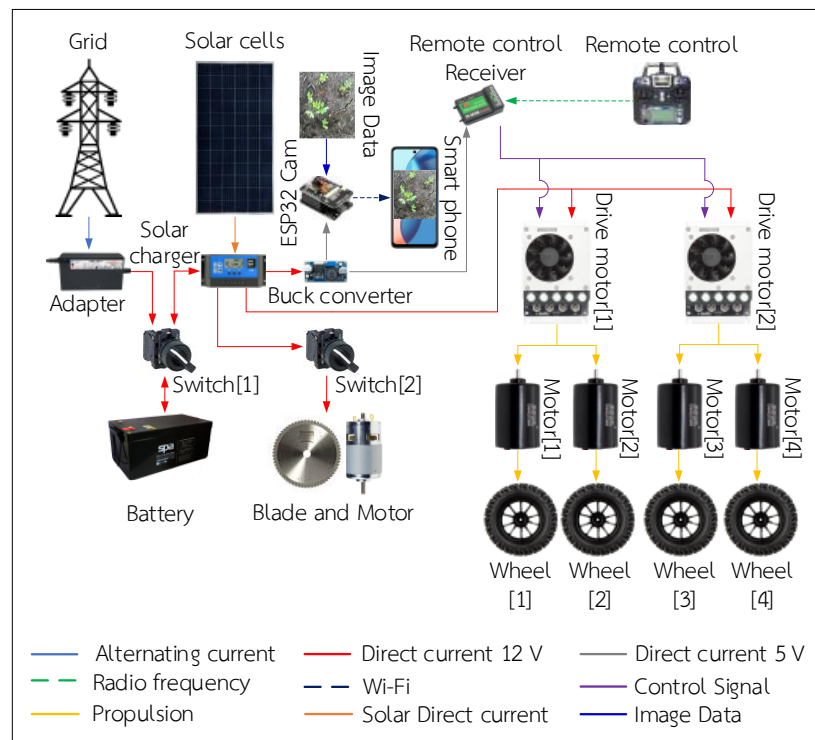


Figure 1. The components of the proposed solar-powered mower

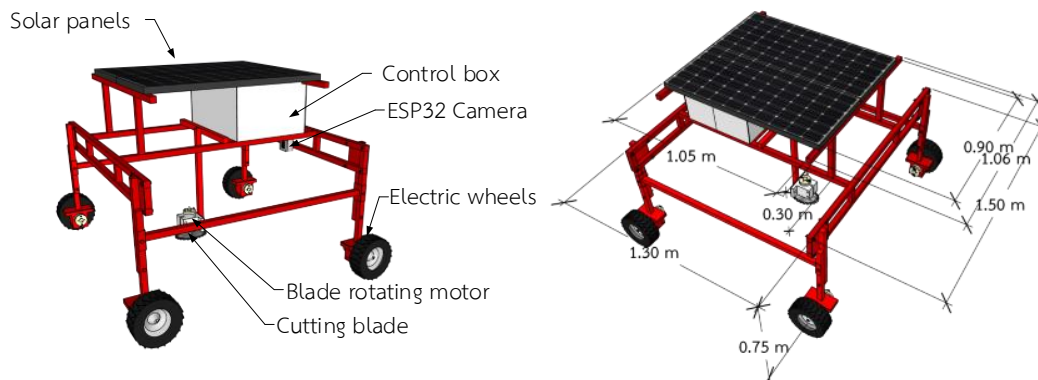


Figure 2. The design perspective and dimension of the proposed solar-powered mower

In this work, we propose a solar-powered mower designed for row-crop cultivation. It is based on a differential steering system combined with an ESP32-CAM module. The components of the proposed mower are illustrated in Figure 1. The design perspective and dimensions of the proposed mower are shown in Figure 2. That is, the proposed mower has dimensions of 1.30 m × 1.50 m × 0.75 m. Figure 3 is the actual proposed mower.



Figure 3. The proposed solar-powered mower

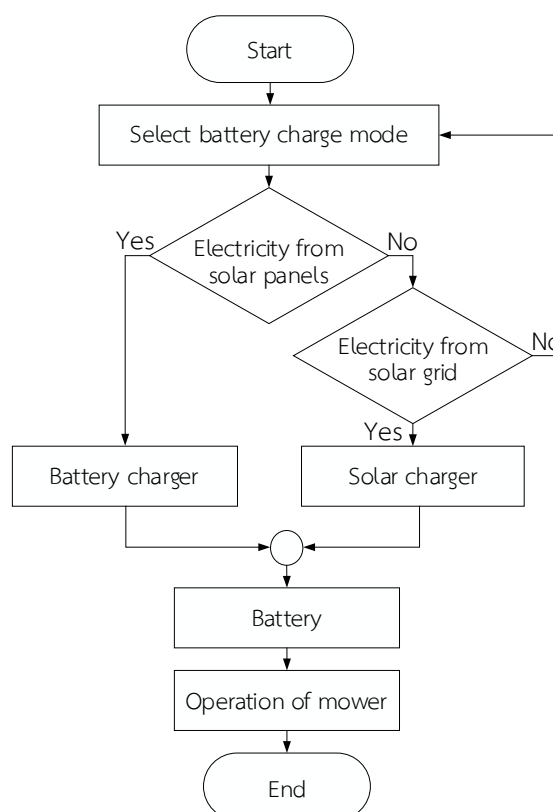


Figure 4. The flowchart of the proposed solar-powered mower electric system

The main structure of the proposed mower is constructed from 3.81 cm square steel tubing. Both 100 W solar panels are mounted in series on top of the frame, providing a total power output of 200 W for charging both 12 VDC 20 Ah batteries. Moreover, they are recharged by a solar charger that prevents overcharging and over-discharging and regulates voltage to suit the battery. For mobility, the mower employs independent drive motors on the left and right sides, enabling differential steering. Each motor

delivers a maximum torque of 50 kg-cm. The mower is operated via a 2.4 GHz radio frequency remote control. The grass-cutting mechanism consists of a motor with a rotational speed of 12,000 RPM, paired with a 15 cm long fixed blade mounted on a permanent shaft. The ESP32-CAM's data transmission is via an access point, allowing websites to stream live video. The primary power source for the proposed mower is solar panels. It can be calculated by Equation 1. Moreover, the mower can draw electricity from the Provincial Electricity Authority (PEA). It is utilized when farmers wish to recharge the batteries manually or when the solar panels are inactive or insufficient. The operational principle of this electrical system is shown in Figure 4.

$$P = GA\eta \quad (1)$$

Where,

- P is the electrical power generated by the solar panel (W).
- A is the cross-sectional area of the panel (m^2).
- G is solar irradiance (W/m^2).
- η is the efficiency of the solar panel.

The generated energy of the solar panels is directed to the charge controller system, which regulates the voltage and current to ensure they are suitable for the battery. The amount of energy delivered to the battery can be calculated using Equation 2.

$$E = Pt \quad (2)$$

Where,

- E is the electrical energy supplied to the battery (Wh).
- P is the generated electrical power by the panel (W)
- t is the charging duration (h)

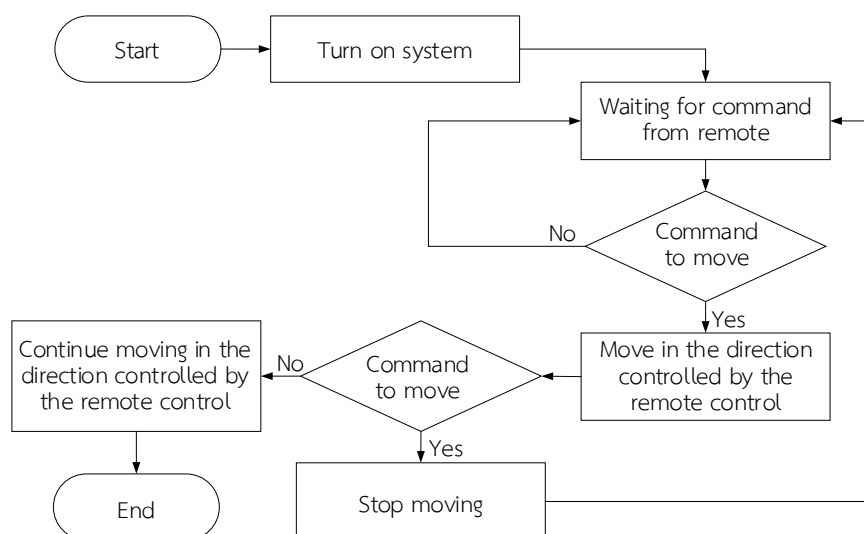


Figure 5. The flowchart of the proposed solar-powered mower control system

Figure 5 illustrates the operational workflow of the mower system. The process begins when the farmer activates the mower. Once powered on, the mower enters standby mode, awaiting commands from the remote control connected to it. Upon receiving a command, the mower executes corresponding actions such as moving forward, turning left or right, reversing, or stopping. The control system continuously loops through this process until the farmer manually shuts down the mower.

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we conduct extensive experiments to evaluate the efficiencies of the proposed mower, i.e., the electrical energy consumption, the control system, and the grass-cutting mechanism.

Electrical energy consumption

Table 1. The consumption of electrical energy per hour

Time (min)	Consumed electric current (Ah)	Remaining battery capacity (Ah)	Battery percentage (%)	Measured voltage (V)
0	0	40	100	12.60
10	0.26	39.74	99.35	12.58
20	0.51	39.49	98.73	12.55
30	0.77	39.23	98.08	12.53
40	1.02	38.98	97.45	12.50
50	1.28	38.72	96.80	12.48
60	1.54	38.46	96.15	12.45

In the first experiment, we propose to evaluate the electrical energy usage of the proposed mower, operated continuously for 1 hour, with battery voltage measurements taken every 10 minutes. From the experimental results shown in Table 1, we can see that the battery voltage shows a consistent downward trend throughout the testing period. The battery starts at 12.6 V and drops to 12.45 V after 1 hour of operation, indicating an average voltage decrease of approximately 0.025 V every 10 minutes. The values for current, remaining battery capacity, and battery capacity percentage shown in the table are theoretically calculated assuming a constant load of 1.5 A, comprising a drive motor, a grass-cutting blade motor, a remote control system, and an ESP32-CAM camera, drawn from a 12 V, 40 Ah battery system. After 1 hour of operation, the remaining battery capacity decreases from 40 Ah to 38.46 Ah, which corresponds to an average reduction of about 0.26 Ah every 10 minutes. Therefore, after 1 hour of operation, the lithium iron phosphate battery retains approximately 96% of its full capacity (State of Charge: SoC), which aligns with the quasi-linear discharge characteristic of lithium iron phosphate batteries.

The performance of the mower control system

Table 2. The performance of the proposed mower control system in an unobstructed environment

Distance (m)	The control results from 10 times with the unobstructed environments			
	Forward	Backward	Turn left	Turn right
0	10	10	10	10
10	10	10	10	10
20	10	10	10	10
30	10	10	10	10
40	10	10	10	10
50	10	10	10	10
60	10	10	10	10
70	10	10	10	10
80	10	10	10	10
90	9	9	8	9
100	8	8	8	8

Table 3. The performance of the mower control system in an obstructed environment

Distance (m)	The control results from 10 times with the obstructed environments			
	Forward	Backward	Turn left	Turn right
0	10	10	10	10
10	10	10	10	10
20	10	10	10	10
30	10	10	10	10
40	10	10	10	10
50	10	10	10	10
60	10	10	10	10
70	9	9	10	9
80	9	8	8	8
90	7	7	8	6
100	5	6	6	6

In the second experiment, we evaluated the performance of the mower control system over a total distance of 100 meters, under both obstructed and unobstructed environmental conditions. The test involves performing forward and backward 1-meter movements, repeated 10 times, along with 10 turns left and 10 turns right at 90° angles. The obstructed environment includes 10.16 cm-thick lightweight concrete walls, while the unobstructed environment has no physical barriers. Measurements are taken at 10-meter intervals throughout the test. The results of this experiment are presented in Tables 2 and 3. They are conducted at intervals from 0 to 100 meters in 10-meter increments. Under unobstructed conditions, the mower successfully responded to directional commands via radio remote control, achieving a success rate of 97.05%, equivalent to 427 out of 440 commands. However, between 90 and 100 meters, command

execution became intermittent or unresponsive. Under obstructed conditions—where barriers were present—the success rate dropped to 91.14%, or 401 out of 440 commands. In this scenario, the mower showed inconsistent responsiveness between 70 and 100 meters. The leading cause of intermittent or unresponsive control over long distances is reduced radio signal strength as distance increases, along with interference from surrounding environmental factors, such as electromagnetic waves from other devices or radio wave reflections from various surfaces. These issues can prevent specific commands from being fully transmitted to the receiver. Additionally, the unresponsiveness to some commands occurs randomly, not consistently across the same commands, indicating that the problem stems from signal quality at that particular moment.

The efficiency of the grass-cutting system

In the final experiment, we propose to evaluate the mowing efficiency of the proposed mower. Grass-cutting trials are conducted on ten agricultural plots, each measuring 0.5 m × 2 m × 0.1 m. Each plot contains coriander plants arranged in two rows, with five plants per row and a 20 cm spacing between rows. Coriander is chosen for its color, stem structure, and height, which closely resemble those of common weeds such as goosegrass and nutgrass. This setup allows assessment of the ESP32-CAM's ability to distinguish between target weeds and main crops, ensuring effective mowing without damaging the cultivated plants. The results of this experiment are presented in Table 4. Based on the results shown in Table 4, the proposed mower demonstrated effective grass-cutting performance with minimal impact on the main crops. On average, 7 coriander plants remained intact per round, with the highest count of 9 in rounds 2 and 7, and the lowest of 5 in round 6. Partially cut plants averaged 1.5 per round, peaking at 3 in rounds 6 and 8, and dropping to 0 in rounds 2 and 7. Completely cut plants averaged 1.2 per round, with a maximum of 2 in rounds 3, 4, 6, 9, and 10, and none in round 5. These findings highlight the mower's ability to distinguish between weeds and crops, ensuring precise cutting while preserving the cultivated plants.

Table 4. The effectiveness of the proposed mower.

n th time experiments	The results of preventing 10 specified plants		
	Success	Error	
		Partially destroyed	Destroyed
1	8	1	1
2	9	0	1
3	6	2	2
4	6	2	2
5	8	2	0
6	5	3	2
7	9	0	1
8	6	3	1
9	6	2	2
10	6	2	2

CONCLUSION

The development of a solar-powered, radio-controlled mower designed for row-crop cultivation—featuring a differential steering system, radio-frequency, and an ESP32-CAM—was evaluated across three key aspects: electrical energy consumption, remote-control performance, and mowing capability in row-planted areas. In terms of electrical energy consumption, testing under a constant load of 1.5 A showed a steady voltage drop from 12.6 V to 12.45 V over 1 hour, averaging 0.025 V every 10 minutes. Battery capacity decreased from 40 Ah to 38.46 Ah, or about 0.26 Ah per 10 minutes, aligning with theoretical discharge rates. For remote control, the mower achieved a 97.05% success rate in unobstructed environments and 91.14% in obstructed ones, especially between 90 and 100 meters without obstacles and between 70 and 100 meters with obstacles. The causes of intermittent control and irresponsiveness to specific commands include reduced radio signal strength with increasing distance and interference from surrounding environmental factors. Finally, mowing tests in row-planted plots revealed that the mower could avoid crops to some extent, with an average of 7 intact plants per round out of 10, 1.5 partially cut, and 1.2 completely cut. Despite occasional errors, the system successfully cleared weeds from 90% of the total area. However, real-world performance still depends on the operator's skill, experience, and visual judgment—particularly when relying on camera feeds or operating from a distance, which may affect decision-making during maneuvering. Furthermore, experimental results showing that the control range decreases when obstacles are present motivate the proposed improvements to the communication system. These include upgrading to more efficient antennas, using directional antennas to improve signal range and stability, and considering a switch to wireless communication systems that are more resistant to obstructions, such as Wi-Fi or LoRa. These systems would work in conjunction with onboard processing to enable semi-autonomous operation without constant remote commands. Additional measures include signal encryption and noise filtering to prevent data loss during command transmission. For practical use, researchers recommend that farmers operate this mower model in open areas with straight crop rows and minimal obstructions to ensure optimal remote-control performance. Caution should be exercised in densely obstructed environments, such as areas with large trees or buildings that may block signals. It is also advised to check the battery and mowing system before each use. Moreover, operators should practice using the remote control and monitoring the camera feed until they are proficient in avoiding operational errors, especially when navigating near crops or obstacles.

REFERENCES

- [1] Andreas Walderich. (2025). Agriculture in Thailand - statistics & facts. <https://www.statista.com/topics/5730/agriculture-in-thailand/#topicOverview>.
- [2] Sylvia, S., Chidchanok, A., Malay, P., Takuji, W., Tsusaka & Kevin, L. (2021). Agricultural Productivity, Aging Farming Workforce, Sustainable Agriculture, and Well-Being: Household Survey Data From Central Thailand. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. doi: 10.3389/fsufs.2021.728120.
- [3] Zhu, C. W., et al. (2023). Development of a skid-steer autonomous robot with nonlinear controllers for agricultural terrain. *Robotics/Automation journal (conference/journal article)*.
- [4] Tech, M. & Akola. (2024). Performance Evaluation and Comprehensive Review of Weeders: Advancing Agricultural Efficiency. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN TECHNOLOGY*. 11(7). 2874-2889.

- [5] Ali, D., de Castro, R., Ehsani, R., Vougioukas, S., & Wei, P. (2024). Unlocking the Potential of Electric and Hybrid Tractors via Sensitivity and Techno-Economic Analysis. *Applied Energy*, 377, 123410.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- [7] Ritchie, H. (2020). What are the safest and cleanest sources of energy. *Our World in Data*. https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy?utm_source.
- [8] Smith, J. (2023). Thailand's smart agriculture and its impacts on Thai farmers. *Asian Policy and Sustainability Review*, 12(3), 45–62.
- [9] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Digital technologies in agriculture and rural areas: Briefing paper*. FAO.
- [10] International Renewable Energy Agency. (2024). *Off-grid renewable energy statistics 2024*. IRENA.

Development of Remote-Control Solar Weed Removal Machine Using the Internet of Things in Conjunction with ESP-NOW and YOLOv11

Yuthapong Tarapin, Nigran Homdoun, Kittikorn Sasujit, Surapon Riyana*

School of Renewable Energy, Maejo University, Nongharn, Sansai, Chiangmai, 50290

* Corresponding author: Tel.: 0933036346. E-mail address: surapon_r@mju.ac.th

ABSTRACT

This work presents a remote-controlled, solar-powered weeding machine for row crops that integrates IoT, ESP-NOW communication, and AI-based plant classification using a Jetson Nano and YOLOv11. The dimensions of the proposed machine are 1.3 m × 1.5 m × 0.75 m, with a 3.81 cm steel frame, powered by two 200 W solar panels and a 12 V 40 Ah battery, which can also be recharged via the Provincial Electricity Authority. It features a 4WD system with four 50 kg·cm torque motors, differential steering, and a 15 cm blade rotating at 12,000 rpm. The height is adjustable (60–90 cm), and complete directional control is supported. Driver-assistance technologies include four distance sensors and indicator lights for movement and leveling. ESP-NOW enables remote control of movement, blade positioning, and height adjustment. Tested on 45 plants (three crop types), the system achieved 81% classification accuracy and 90% weeding accuracy. It maintained 100% control success within 60 m at a latency of 5–8 ms. After 1 hour of operation, the battery voltage dropped from 12.8 V to 12.4 V, indicating a 0.35 Ah discharge. The results highlight its potential as an efficient, intelligent solution for autonomous weed management.

Keywords: Weed removal machine, Solar energy, Differential steering, ESP-NOW, ESP32-CAM, Jetson Nano, YOLOv11, Artificial Intelligence (AI).

Clean Electricity Generation of Rice Husk and Wood Residues Power Plants in Thailand in LCOE Strategies and Pathways to Net Zero Emissions

Prachuab Peerapong¹, Kedsara Palachai¹, Sonthaya Khamdech¹, Patchara Wongtong²
Terapong Boonraksa³ and Promphak Boonraksa^{4*}

¹ Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, Bangkok, Thailand 10170

² Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, Bangkok, Thailand 10170

³ Electrical Engineering, Faculty of Engineering, 4School of Electrical Engineering, Rajamangala
University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom, Thailand 73170

⁴ Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Suvarnabhumi, Nonthaburi, Thailand 11000

¹Corresponding author: Tel.:0953611555. E-mail address: promphak.b@rmutsb.ac.th

Abstract

One rice husk power plant and a wood residues power plant in Thailand were the subject of this technical and financial study. A Rankine cycle power plant is the combustion configuration used in a proposed rice husk power plant to generate electricity. The System Advisor Model (SAM) is used in this study's simulation to examine the financial analysis and plant performance. Technical plant data and financial variable assumptions are used as inputs in this study. Based on the findings of this study, the levelized cost of electricity (LCOE) of the electricity produced in the wood residue power plant is 3.18 ¢/kWh, and the electricity cost in the rice husk power plant is 3.48 ¢/kWh. These findings can be a helpful tool for creating strategic plans for Thailand's biomass power plants in Net Zero emissions scenarios.

Keywords: Biomass power plant, Rice husk, Wood residues fuel, Levelized cost of electricity, Net Zero emissions

Introduction

An essential fuel for resources and power generation processes is biomass waste fuel, such as bagasse in the sugarcane industry and rice husk in the rice milling industry. As a by-product of rice production, rice husk is often considered a waste product. Additional waste from forestry and agriculture, including wood waste from sawmills and logging operations, and crop residues like corn stover and wheat straw (e.g., wood chips, bark, and sawdust).

The most common and established method for producing electricity from biomass in Thailand is direct combustion, sometimes referred to as incineration. However, for more effective and smaller-scale applications, additional thermochemical and biochemical conversion techniques are also used.

1. Direct Combustion

Direct combustion, sometimes referred to as incineration, is a well-established and widely used technology in Thailand for producing electricity from biomass. Other thermochemical and biochemical conversion techniques are used, though, particularly for more effective and smaller-scale applications.

Process: High-temperature, high-pressure steam is created by burning the biomass fuel in a boiler. To generate electricity, this steam then powers a generator that is attached to a turbine. Once the steam has gone through the turbine and condensed back into water, it is recycled.

2. Gasification

Through a process called biomass gasification, solid biomass is transformed into producer gas or syngas, which is a flammable gas. It is thought that this technology is more effective and appropriate for distributed power generation at smaller scales.

The process involves heating biomass in a regulated, oxygen-limited setting. Through this process, the biomass is broken down into a gaseous mixture that primarily consists of methane, carbon monoxide, hydrogen, and other gases. Electricity can then be produced by using the syngas to power a gas turbine or engine.

Biomass Resources in Thailand

- Sugarcane: Sugar mills have long used bagasse (waste product in the sugar mills industry) as a fuel for cogeneration, but excess bagasse could also be used to generate electricity for the grid.
- Rice: Thailand has an abundance of rice husks and rice straw due to its status as a major producer of rice worldwide. A major feedstock for specialized biomass power plants, rice husks are already widely used as fuel in rice mills.
- Palm Oil: Empty fruit bunches (EFB), palm fiber, and palm shells are notable byproducts of the palm oil industry in southern Thailand. These are abundant in energy and present a substantial opportunity for the production of electricity, frequently via cogeneration.
- Forest and agricultural residues: Thailand's forests and farming industries offer a steady supply of biomass. Wood chips, sawdust, and leftovers from furniture factories and wood processing facilities are important sources of wood residues, as is rubber wood from plantations (rubber trees are usually felled at age 25 when their latex yield starts to decrease).

Methodology

The input data used in this study to perform the economic analysis includes the costs of initial capital and investment, operations and maintenance, and fuels (wood residues, rice husk fuel), as well as transportation and storage costs.

a) Economic Analysis

The SAM energy model is used to estimate LCOE and determine economic feasibility [1]. The estimated cost of electricity for rice husk power plants, or LCOE, is calculated over a 25-year power plant installation period. LCOE is computed using the following definition.

The cost of producing energy (often electricity) for a specific system is known as the LCOE. It is an economic evaluation of the energy-generating system's cost that accounts for all of the expenses incurred during its lifetime, including the initial investment, ongoing operations and maintenance, fuel costs, and capital costs. After calculating and solving the net present value, the project's net present value is zero [2].

LCOE is calculated by dividing the amount of energy produced during the project's lifetime by the net present value of the renewable energy project's total lifetime costs. LCOE can be calculated in equation (1);

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Present value of (Capital investment+O\&M cost+Fuel cost)}}{\text{present worth of electricity consumed}} \quad (1)$$

The relation of the nominal term and the real term discount rate [2] can be calculated in equation (2);

$$r_{\text{nominal}} = [(1 + \text{inflation rate}) \times (1 + r_{\text{real}})] - 1 \quad (2)$$

b) Emissions Reduction

The national grid emission value can be used to calculate the potential for CO₂ reduction; in this study, grid emissions from power generation in Thailand are 0.412 kg/kWh [3], based on data from Thailand's grid emission factor in 2022, so that CO₂ emissions can be calculated in equation (3).

$$\text{CO}_2 \text{ reduction} = \text{Total electricity generation} \times \text{grid emission} \quad (3)$$

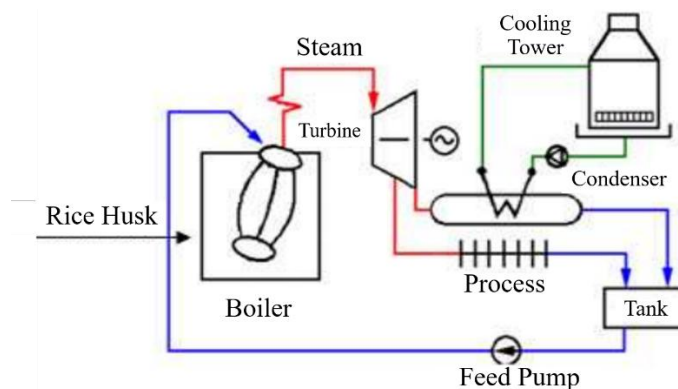


Fig.1 Rice husk power plant with cogeneration configuration [4].

Literature reviews

Many studies examine the Levelized Cost of Electricity (LCOE) for biomass power generation. Biomass resources encompass agricultural waste, forestry crops and residues, municipal solid waste, industrial waste, sewage waste, and manure. Bioenergy refers to the energy obtained from the conversion of biomass, which can be used directly as fuel or converted into liquids and gases [5]. The LCOE serves as a metric to evaluate the competitiveness of biomass gasification technology. The economic viability of a proposed power plant can be assessed by estimating the LCOE derived from rice straw using the SAM financial model. The LCOE is projected over a 20-year period, which reflects the anticipated operational lifespan of the power plant. The Levelized Cost of Electricity (LCOE) is a valuable metric for comparing fossil-fuel power plants with renewable energy facilities. For instance, the LCOE for fossil fuels is 0.085 USD/kWh, whereas solar photovoltaic (PV) systems have an LCOE of 0.083 USD/kWh, wind energy stands at 0.055 USD/kWh, and biomass resources are at 0.0677 USD/kWh [6]. In a research study focused on the conversion of rice straw fuel sources into electricity generation, with installed capacities of 5, 8, 10, 15, and 20 MW in Thailand, the

findings indicated that the cost of electricity generated was 0.0899, 0.0789, 0.0768, 0.0725, and 0.0676 USD/kWh, respectively [7]. Furthermore, the levelized cost of electricity for gas and coal plants in Thailand in 2025 is compared with that of new renewable power plants in Figure 2. Meanwhile, Figure 3 shows Thailand's anticipated electricity generation mix for 2024, along with the base-case and Net Zero scenarios for the years 2030 to 2050 [8]. Thailand has established national objectives to achieve carbon neutrality by 2050 and to attain net-zero greenhouse gas emissions by 2065.

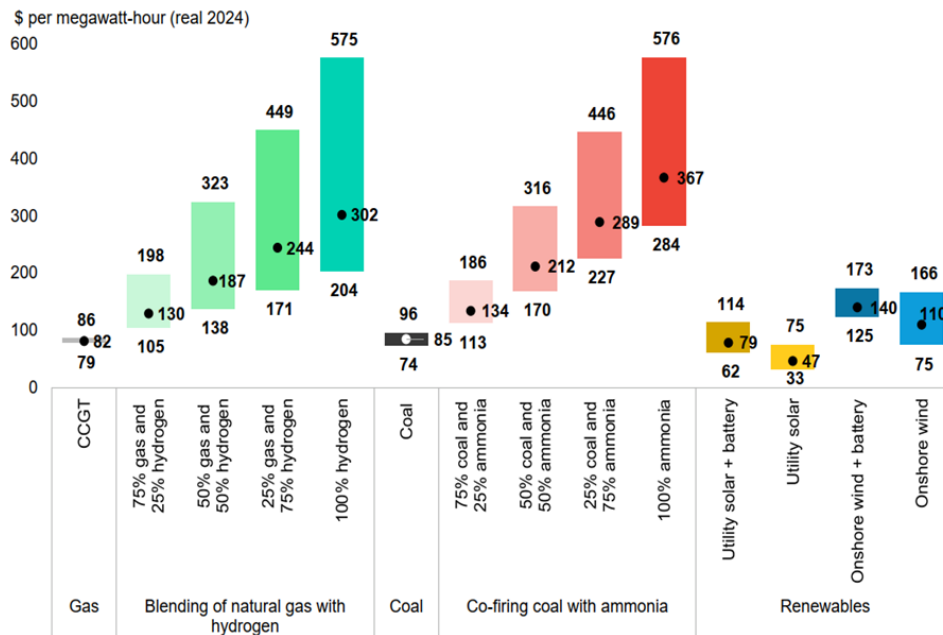


Fig. 2 Levelized electricity costs for gas and coal-fired power plants in Thailand in 2025, in comparison to new renewable power plants [8].

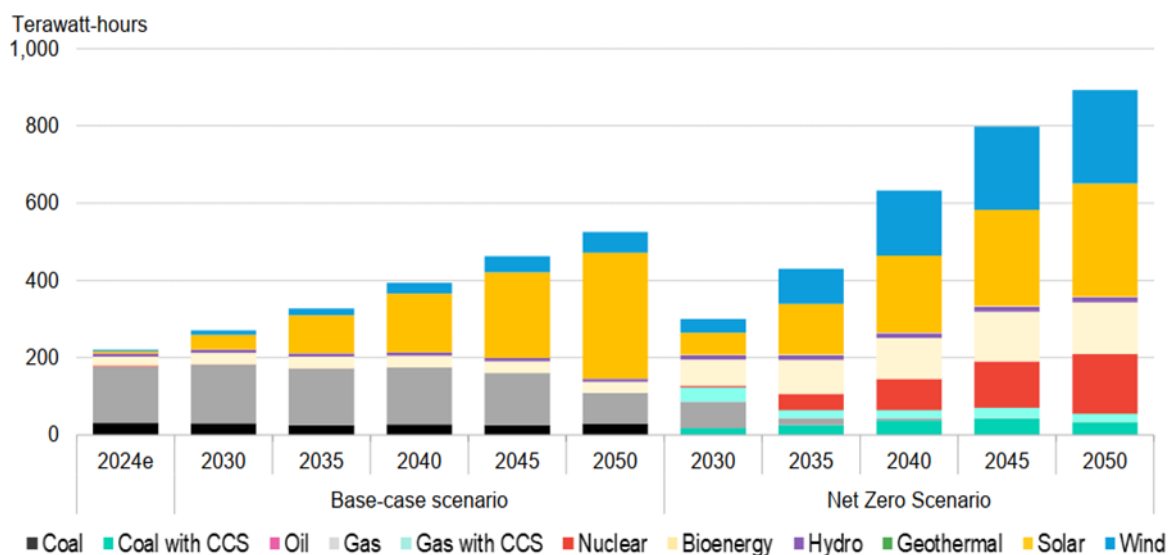


Fig.3 Thailand's base-case scenario, 2024 electricity generation mix, and 2030–2050 Net Zero scenario [8].

Results and discussions

A rice husk power plant and a wood residue power plant have had their annual energy generation and LCOE for the 25-year project life evaluated based on plant performance and financial data inputs (Table 2). The output results are shown in Table 2, and the economic input assumptions are shown in Table 3.

Table 2: Economic model input assumptions

Parameters	Data in rice husk plant (Plant A)	Data in the wood residues plant (Plant B)
Lifetime	25 years	25 years
Fuel cost	35 USD/ton	33 USD/ton
Inflation rate	6.08%	6.08%
Real discount rate	9.0%	9.0%
Logistics cost		
Distance-fixed delivery cost	4 USD/ton	3.8 USD/ton
Distance-variable delivery cost	0.06 USD/ton -mi	0.06 USD/ton -mi
Direct capital cost		
Boiler(s)	500 USD/kW	520 USD/kW
Turbine generator	300 USD/kW	320 USD/kW
Fuel storage cost	180 USD/kW	185 USD/kW
Other equipment cost	185 USD/kW	200 USD/kW
Engineering and construction cost	15% of the direct cost	15% of the direct cost
Land cost	5% of the direct cost	5% of the direct cost
Total installation per capacity cost	1,474 USD/kW	1,767 USD/kW
Operation and maintenance cost		
Fixed cost	28 USD/kW	30 USD/kW
Variable cost	3.5 USD/MWh	3.2 USD/MWh

Table 3: Overall outputs, plant performance, and financial outputs

		Plant A (rice husk)	Plant B (wood residues)
Performance	Annual biomass (tons/year)	70,000	65,000
	Annual Energy producing (GWh)	70.220	67.453
	Plant Capacity (MW)	9.862	10.148
	Annual Capacity Factor (%)	81.3	75.6
	Heat rate (GJ/MWh)	13.55	9.99
	Average boiler efficiency (%)	85.0	85.0
	Thermal efficiency (%)	28.4	28.9
Financial data	LCOE nominal (¢/kWh)	10.74	9.70
	LCOE real (¢/kWh)	6.91	6.18
	Total cost (million \$)	14.536	18.008
	Fuel cost (\$/ton)	35.0	33.0
	Average fuel price (¢/kWh)	3.48	3.18

The greenhouse gas emissions (GHG emissions) from various technologies used in the production of electricity are related to the literature review [16]. High levels of greenhouse gas emissions (CO₂, SO₂,

and NO_x) can be released by electricity produced using fossil fuels like coal and natural gas (CCGT). On the other hand, when comparing renewable resources like wind, solar PV, biomass, large hydro, small hydro, and other renewable energy sources for electricity generation. One of the intriguing options for producing electricity in Thailand's sustainable energy development is biomass power plant technology. Plant A (rice husk power plant) has the potential to reduce CO₂ emissions by 28,930 tons per year, while Plant B (wood residues power plant) has the potential to reduce CO₂ emissions by 27,790 tons per year.

Biomass for electricity generation and net zero emissions in Thailand

Plans to raise the proportion of renewable energy in the mix of energy sources used to generate electricity make the power sector a key player in achieving these objectives. Through programs such as feed-in tariffs (FiTs), the government's Alternative Energy Development Plan (AEDP) encourages private-sector investment in renewable energy, making it a major policy driver of this development.

- 1) Wood chips, rice husks, empty palm fruit bunches, fibers, shells, and bagasse (sugarcane residues from sugarcane plants) are examples of biomass resources.
- 2) Waste Management: An alternative to open-minded burning, a prevalent practice that seriously pollutes the air and poses health risks, is the use of forestry and agricultural residues for energy production. This aids in addressing environmental and energy-related issues concurrently.
- 3) Decentralized Energy Production: Many biomass power plants, also known as Very Small Power Producers (VSPPs) or Small Power Producers (SPPs), can be found in agricultural areas. The need for extensive grid infrastructure is lessened, a more distributed energy structure is encouraged, and local economies may benefit.
- 4) The biomass industry has one of the highest direct employment rates.

Investment Opportunities in Renewable Energy

Investors who hope to take advantage of these opportunities must understand the legal benefits and incentives provided by the Thai government. Still, it's also critical to be aware of the risks and difficulties involved.

Supporting Policy for Electricity Generation from Renewables [3,9-11]

The Thai Board of Investment (BOI) encourages investment in the renewable energy sector by providing significant tax exemptions and breaks. Both tax and non-tax benefits are included in the BOI's incentives. Eligible projects may be granted import duty exemptions on machinery as well as corporate income tax exemptions for a period of five to eight years. Non-tax incentives also include the ability to send money overseas from Thailand and hire foreign expatriates. The purpose of these incentives is to lower the financial barriers to entry, increasing the appeal of funding renewable energy projects in Thailand to both foreign and domestic investors.

1) Feed-in Tariffs (FiTs) for Renewable Energy

The FiT scheme provides investors with long-term financial security by guaranteeing fixed prices for energy produced from renewable sources. By reducing the financial risk, this policy makes renewable energy projects more appealing to potential investors.

2) Public-Private Partnerships (PPPs)

Thailand offers a cooperative approach to infrastructure development by promoting PPPs in renewable energy projects. Through private-sector efficiency and government support, these collaborations can generate mutually beneficial synergies and aid the industry's expansion.

3) Low-Interest Loans

For some renewable energy projects, financial institutions in Thailand have been known to provide soft loans, or loans with interest rates below the market rate, in accordance with government regulations.

4) Emerging Technologies and Innovation

In Thailand, investments in cutting-edge projects and new renewable energy technologies are increasing. These investments put investors at the forefront of the industry's technological advancements while also meeting the growing demand for sustainable energy.

Thailand is a desirable location for renewable energy investments due to several advantageous government policies, such as the BOI's incentives, low project finance interest rates, and the potential for advancements in renewable energy technologies. However, the secret to successful endeavors in this industry will be a well-rounded strategy that considers both opportunities and risks.

Conclusions

In conclusion, there is a lot of potential for Thailand to use rice husks and wood residues for electricity generation, which could have favorable social, economic, and environmental factors. If technology advances further and regulations are supportive, rice husks and wood residues, which serve as fuel resources, have the potential to be a significant source of renewable energy for electricity generation in Thailand. Technical and financial data for two Thai rice husk power plants were used in this investigation. Financial and performance analyses of the plant are conducted using the SAM software. The wood residue power plants' levelized cost of electricity (LCOE) is 3.18 ¢/kWh, and the rice husk power plants' levelized cost of electricity (LCOE) is 3.48 ¢/kWh, in this study. And biomass is a vital renewable resource for the Net Zero Emissions pathway in Thailand because its LCOE is lower than that of other electricity-generating renewables. It also has significant potential for installation at power plants.

Acknowledgement

The authors wish to express gratitude to Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi, and Bangkokthonburi University for their financial support in conducting this study.

References

[1] NREL, *System Advisor Model*, 2018. Accessed on 21 August 2024, from <http://sam.nrel.gov/>.

- [2] Abdelhady, S., Borello, D., Shaban, A. (2018). Techno-economic assessment of biomass power plant fed with rice straw: Sensitivity and parametric analysis of the performance and the LCOE. **Renewable Energy**. 115,1026-1034.
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, DEDE. (2023). The Thailand Energy situation. Ministry of Energy, Bangkok, Thailand.
- [4] Oliveira, M. O., Neto, J. M., Inocencio, M. C., Junior, O. H. A., Bretas, A. S., & Perrone, O. E. (2012). Viability study for the use of rice husk in electricity generation by biomass. In *RE&PQJ, Vol 1, No.10, April 2012*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12).
- [5] International Energy Agency. (2012). *Technology roadmap: Bioenergy for heat and power*. IEA. <https://doi.org/10.1787/9789264123236-en>
- [6] Abdelhady, S., Shalaby, M. A., and Shaban, A. (2021). Techno-economic analysis for the optimal design of a national network of agro-energy biomass power plants in Egypt. *Energies*, 14(11), Article 3063. <https://doi.org/10.3390/en14113063>
- [7] Delivand, M. K., Barz, M., Gheewala, S. H., and Sajjakulnukit, B. (2011). Economic feasibility assessment of rice straw utilization for electricity generation through combustion in Thailand. *Applied Energy*, 88(11), 3651–3658. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.001>
<https://doi.org/10.24084/repqj10.792>
- [8] BloombergNEF. (2025, May 19). Thailand: Turning point for a net-zero power grid. Bloomberg Finance L.P.
- [9] Uddin, W., Ayesha, K., Zeb. Haider, A., Khan, B., ul Islam, S., Ishfaq, M., Khan, I., Adil, M., and Jee Kim., H. (2019). Current and future prospects of small hydropower in Pakistan: A survey. *Energy Strategy Reviews*. 24, 166-177.
- [10] Komrit, S., Zabihiyan, F. (2023). Comparative analyses of solar photovoltaic, wind turbine, and solar photovoltaic and wind turbine hybrid systems: Case study of Thailand. *Energy Conversion and Management*. 293, 1-7.
- [11] Silva, L. A., dos Santos, I. F. S., Machado, G. de O., Filho, G. L. T., and Barros, R. M. (2021). Rice husk energy production in Brazil: An economic and energy extensive analysis. *Journal of Cleaner Production*, 290, Article 125188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125188>



Sponsored by



CHAROENCHAI TRANSFORMER CO., LTD.



Organized by: **SUT** | อพ.สร. - มทส.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี