

ผลการศึกษสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลสำหรับตะไคร้อบแห้ง

Study performance of solar dryer combined with biomass energy for dried lemongrass

พรประเสริฐ อินทะลาด^{1,*} กิตติกร สาสุจิตต์¹ สุระพล ริยะนา¹ ชูรัตน์ ธารารักษ์¹ มงคล จันทโภาส¹ และ นิกราน หอมดวง¹
Phonpaseuth Inthalath¹ Kittikorn Sasujit¹ Surapon Riyana¹ Churat Tararux¹
Monkol Janthopas and Nigran Homdoun¹

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

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

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

Abstract

This research aims to design, develop and construct a solar dryer combined with biomass energy. Actual operation, the dryer can work in both sunlight and non-sunlight conditions. During non-sunlight, the dryer uses biomass energy as the main heat source for drying. This experiment was simulated drying of lemongrass without sunlight and used biomass energy as the main heat source for drying. The developed dryer must be able to dry agricultural products continuously for 1-20 h and support drying yields of 10-35 kilograms per batch. The dimensions, width, length, and height of the dryer were 1.5 × 2.2 × 1 m. The solar heat collector uses polycarbonate sheets, and the side walls were covered with 1-inch thick fiberglass insulation. A 5 kW biomass stove with a finned heat exchanger were installed underneath the dryer. The product trays are horizontal rotating trays with 16 trays and the initial drying experiment used lemongrass. The experimental results was showed that, the solar dryer combined with biomass energy can dry sliced lemongrass very well. The experiment with biomass in the absence of sunlight can create a maximum temperature in the drying room of 70 °C and during the experiment can create hot air with a temperature between 60-65 °C. During test, the dryer consumed an average of 0.6-1 kg/h of briquetted charcoal. The total drying time of lemongrass was 14 h, the average final moisture content of 10% and less than 1%. The dryer provided a mass loss rate of lemongrass during drying in the range of 0.0007-0.0908 g/h, a specific water evaporation rate in the range of 0.00023-0.00646 kg_{Water}/kWh_{th} and average thermal efficiency of dryer was obtained 6.65%. Overall, this solar dryer combined biomass energy can be used to support small-scale farmers in processing their products very well.

Keyword: drying, dryer, solar energy, biomass energy, lemongrass

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบ พัฒนา สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล การทำงานจริงเครื่องอบแห้งนี้สามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีแสงอาทิตย์และไม่มีแสงอาทิตย์ ในระหว่างไม่มีแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งนี้จะใช้พลังงานชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนหลักในการอบแห้ง การทดสอบนี้ได้จำลองการอบแห้งตะไคร้แบบ ไม่มีแสงอาทิตย์และใช้พลังงานชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนหลักในการอบแห้ง เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นต้องสามารถอบแห้ง ผลผลิตทางการเกษตรได้ตั้งแต่ 1-20 h แบบต่อเนื่องได้และรองรับผลผลิตในการอบแห้งต่อครั้ง 10-35 kg ขนาดความ กว้าง ความยาว และความสูงของเครื่องอบแห้งเท่ากับ $1.5 \times 2.2 \times 1.5$ m แผงรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ใช้ แผ่นโพลีคาร์บอเนต และผนังด้านข้างหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนาประมาณ 1 inch ด้านใต้เครื่องอบแห้งติดตั้งเตาชีวมวล ขนาด 5 kW พร้อมชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีป ถาดวางผลิตภัณฑ์เป็นแบบถาดหมุนในแนวนอน มีจำนวน 16 ถาด การทดลองใช้ตะไคร้ในการทดลองอบแห้งเบื้องต้น ผลการทดลองพบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงาน ชีวมวลสามารถอบแห้งตะไคร้ได้เป็นอย่างดี ในการทดลองสภาวะไม่มีแสงอาทิตย์ สามารถสร้างอุณหภูมิในห้องอบแห้งได้ สูงสุด 70°C ในระหว่างการทดสอบเครื่องอบแห้งมีความสิ้นเปลืองถ่านอัดแท่งเฉลี่ย $0.6\text{--}1\text{ kg/h}$ ระยะเวลาอบแห้งตะไคร้ ใช้เวลาทั้งหมด 14 h มีความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยร้อยละ 10 และต่ำกว่าร้อยละ 1 เครื่องอบแห้งให้อัตราการสูญเสียมวลตะไคร้ ระหว่างอบแห้งอยู่ในช่วง $0.0007\text{--}0.0908\text{ g/h}$ และให้อัตราการระเหยน้ำจำเพาะอยู่ในช่วง $0.00023\text{--}0.00646\text{ kg}_{\text{Water}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ ประสิทธิภาพความร้อนเครื่องอบแห้งเฉลี่ย 6.65% ในภาพรวมเครื่องอบแห้งนี้สามารถนำไปใช้ส่งเสริม เกษตรกรรายย่อยในการแปรรูปผลผลิตได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การอบแห้ง เครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล ตะไคร้

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรที่หลากหลาย ในแต่ละปีจะมีสินค้าทางการเกษตรที่ ล้นตลาดเป็นจำนวนมาก กระบวนการแปรรูปด้วยการอบแห้งจึงมีความสำคัญในการลดความสูญเสียและการเพิ่มมูลค่า ให้กับสินค้าเกษตรของประเทศไทย [1] การอบแห้งในระดับวิสาหกิจชุมชนหรือผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นเลือกใช้ แหล่งพลังงานจากฟอสซิลเป็นหลัก ข้อดีของการใช้พลังงานจากแหล่งนี้คืออุณหภูมิมีความเสถียรและสามารถควบคุม กระบวนการอบแห้งได้ง่าย อย่างไรก็ตามด้วยสภาวะโลกร้อนที่กำลังเป็นปัญหาสำคัญของมวลมนุษยชาติ ความพยายาม และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเป็นแนวทางสำคัญของการลดโลกร้อนได้ [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นและสนใจในการ พัฒนาระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงกลุ่มฟอสซิลเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ บรรยากาศ แต่อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ก็มีข้อจำกัดในด้านของความเข้มแสงที่ไม่สม่ำเสมอและมีช่วง ระยะเวลาการให้แสงที่สั้นไม่สัมพันธ์กับระยะเวลาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร และเพื่อเป็นการตอบโต้การลดการ ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างแท้จริง บทความนี้จะได้นำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในท้องถิ่นเข้ามาเป็นแหล่งพลังงาน ความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มเติม [3] สำหรับเครื่องอบแห้งที่นำมาศึกษาและทดสอบเป็นเครื่อง อบแห้งแบบผสมผสานที่สามารถรองรับแหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์บริเวณด้านบนของเครื่องอบแห้ง ในขณะที่ ด้านใต้ของเครื่องอบแห้งจะมีเตาชีวมวลและชุดแลกเปลี่ยนความร้อนให้ความร้อนบริเวณด้านล่างของเครื่องอบแห้ง ซึ่ง แตกต่างจากเครื่องอบแห้งของชุมชนและวิสาหกิจชุมชนที่มีการใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ที่ใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงแหล่งเดียว [4-5] ขณะเดียวกันถ้าเป็นผู้ประกอบการขนาด

ใหญ่หรือวิสาหกิจชุมชนขนาดใหญ่ส่วนใหญ่ก็จะใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว [6] และบางรายอาจใช้พลังงานความร้อนจากชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนเสริม [7] การดำเนินการในส่วนของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับชุมชนส่วนใหญ่เป็นการออกแบบในเชิงของการศึกษาและการทดลอง การจัดวางชั้นถาดจะเป็นแบบคงที่ [8] ข้อจำกัดของเครื่องแบบนี้คือการกระจายลมร้อนไม่ทั่วถึงทำให้ผลผลิตแห้งไม่สม่ำเสมอ เพื่อแก้ปัญหาและลดข้อจำกัดการอบแห้งผลงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นออกแบบ พัฒนาและทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลแบบถาดหมุนแนวนอน โดยมีการออกแบบพื้นที่ชั้นวางให้ใกล้เคียงกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมทั่วไป ขณะเดียวกันก็มีการออกแบบ พัฒนาอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานจากชีวมวลให้เป็นความร้อนและสามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องตามลักษณะของผลผลิตที่ต้องการอบแห้ง ขณะเดียวกันเพื่อแก้ปัญหาการกระจายลมร้อนภายในตู้อบแห้งก็มีการออกแบบถาดชั้นวางและให้ถาดนั้นหมุนเคลื่อนที่เป็นวงรอบสามารถกวาดลมร้อนและรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลในปริมาณที่เท่ากัน ทั้งหมดเพื่อให้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีที่ตอบโจทย์ให้กับชุมชนเกษตรกร หรือผู้ประกอบการได้อย่างแท้จริง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์แสดงผลของการพัฒนาออกแบบ สร้างและทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล สำหรับการอบแห้งตะไคร้เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับผู้ประกอบการและนักวิจัยที่จะดำเนินการพัฒนาเครื่องอบแห้งจากพลังงานทดแทนรวมถึงการนำเอาเทคโนโลยีนี้ไปใช้ในอนาคต ในส่วนของตะไคร้ที่ใช้อบแห้งหรือให้ความสนใจ เนื่องจากประเทศไทยมีการเพาะปลูกจำนวนมาก ตะไคร้เป็นทั้งพืชสมุนไพรและเป็นพืชที่ใช้ประกอบอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงมาก สามารถแปรรูปเป็นเครื่องปรุงเครื่องแกงได้หลายชนิดและสามารถส่งออกต่างประเทศได้ ในทางกลับกันบางฤดูกาลราคาของตะไคร้ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการใช้วิธีการอบแห้งด้วยพลังงานทดแทนจึงมีความน่าสนใจ ซึ่งถ้าอบแห้งได้ตามสมมุติฐานจะช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศได้ อันนำมาซึ่งเป็นการสนับสนุนการการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรออกสู่ต่างประเทศ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

- แนวคิดการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

แนวคิดของการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแนวคิดของการผสมผสานแหล่งพลังงานความร้อนที่สะอาดได้แก่ ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และแหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล โดยมุ่งเน้นให้เครื่องนี้สามารถดำเนินการอบแห้งให้แล้วเสร็จสิ้นภายใน 1 รอบของการอบแห้งในแต่ละครั้ง คือ ตั้งแต่ 5-15 h หรือมากกว่านั้น ความจุในการป้อนวัสดุเพื่อการอบแห้งอยู่ในช่วง 10-20 kg/ครั้ง ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาแน่นของวัสดุอบแห้ง ในด้านของวัสดุส่วนรับแสงอาทิตย์มุ่งเน้นใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตมาใช้ในการสร้างห้องอบเนื่องจากมีน้ำหนักเบาหาซื้อง่ายและขึ้นรูปโค้งได้ดีกว่ากระจก นอกจากนี้เมื่อนำไปใช้ในอนาคตราคาของเครื่องอบแห้งนี้ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการขนาดเล็กเป็นเจ้าของได้ เหมาะสำหรับการอบแห้งผลผลิตในระดับชุมชนและมีการใช้พลังงานที่สะอาด มีประสิทธิภาพสูงและมีคุณค่า เงื่อนไขในการออกแบบเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1

การวิเคราะห์เงื่อนไขการออกแบบพบว่า การใช้เครื่องอบแห้งแบบชั้นวางมีปัญหาในด้านการอบแห้ง ได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ดังนั้นระหว่างรอบจึงจำเป็นต้องเคลื่อนย้าย สลับที่ หรือการกลับด้านของผลผลิต เพื่อให้ผลผลิตได้รับความร้อนสม่ำเสมอ การดำเนินการประเด็นนี้ทำให้เกิดความล่าช้าและทำให้ต้นทุนเพิ่มสูงขึ้น

การเทียบกับเครื่องอบแห้งถาดหมุนแนวตั้งแบบใช้อินฟราเรดร่วมลมร้อน ระบบนี้เป็นระบบที่ดีมีความเสถียรสูงและเป็นที่นิยมของผู้ประกอบการ แต่ปัญหาของเครื่องชนิดนี้คือการใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลที่นำไปสู่การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ มีราคาที่สูงและต้นทุนการผลิตต่อหน่วยสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานที่สะอาดและมีราคาที่เหมาะสมได้ จึงเป็นที่มาของการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุนในแนวนอน (Horizontal rotating tray dryer) ดังภาพที่ 1 ตามหลักการเครื่องอบแห้งนี้จะใช้ความร้อนจากพลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์และชีวมวลเป็นหลัก การออกแบบอุปกรณ์และระบบมุ่งแก้ไขข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบชั้นวางอยู่กับที่ เครื่องอบแห้งนี้จะติดตั้งถาดอบแห้งกับแขนของแกนหมุนและแขนแกนหมุนจะยึดติดอยู่กับแกนเพลาส่งในแนวนอน เมื่อเพลากลหมุนถาดอบแห้งจะเปลี่ยนตำแหน่งตลอดเวลาและได้รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลไปพร้อมกันทุกถาด การหมุนของถาดอบแห้งจะช่วยสร้างความปั่นป่วนกระแสลมร้อนภายในเครื่องอบแห้ง ทำให้เกิดการกระจายตัวของลมร้อนภายในเครื่องอบแห้งได้อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามการจัดวางถาดในลักษณะนี้ก็มีข้อจำกัดในการออกแบบขนาดของถาดและจำนวนของถาด ดังนั้นก่อนการออกแบบจึงได้ดำเนินการออกแบบพื้นที่และจำนวนของถาดและนำไปทดสอบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Solid work) โดยพบว่า ถ้าจะออกแบบเครื่องอบแห้งที่มีความกว้างไม่เกิน 1.5 m ความยาว 2-2.2 m และ ความสูงไม่เกิน 1.5 m จะสามารถใส่ถาดชั้นวางวัสดุได้สูงสุด 8 ถาดเท่านั้นที่ขนาดความยาวของถาด 1 m และ ความกว้างของถาดไม่เกิน 50 cm ถ้าออกแบบใช้ถาดมีขนาดเกินกว่านี้ เมื่อถาดหมุนเคลื่อนที่จะเกิดการชนกับถาดที่ติดตั้งกับแขนยึดที่อยู่ใกล้กันและทำให้วัสดุร่วงจากถาด การคำนวณหามวลวัสดุที่อยู่บนถาดชั้นวางคำนวณได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$m_{m1} = \sigma \times A_t \times n \quad (1)$$

กำหนดให้ m_{m1} คือมวลวัสดุที่อยู่บนถาดชั้นวาง (kg) σ คืออัตราส่วนมวลตะไคร้สับกับพื้นที่การวาง (kg/m²) A_t คือ ขนาดพื้นที่ของถาด (m²) และ n คือจำนวนของถาด ซึ่งถ้าคำนวณมวลวัสดุที่อยู่บนถาดชั้นวางจะได้มวลเพียง 8 kg เท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการมวลวัสดุในการอบแห้งเริ่มต้นจะต้องออกแบบชุดถาดชั้นวาง จำนวน 2 ชุด รวมถาดชั้นวาง 16 ถาด คิดเป็นมวลวัสดุในการอบแห้งแต่ละครั้ง 16 kg การนำเอาน้ำออกจากวัสดุในการอบแห้งหรือความต้องการใช้ปริมาณความร้อนในการระเหยน้ำในวัสดุคำนวณได้จากสมการนี้ [9]

$$Q_w = \frac{m_w \times h_{fg}}{T_D} \quad (2)$$

กำหนดให้ m_w คือมวลของน้ำในวัสดุ (kg) h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของกลายเป็นไอ (2257.5 kJ/kg) T_D คือ ระยะเวลาของการอบแห้งตะไคร้ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C จะใช้เวลาอยู่ในช่วง 10-15 h เนื่องจากระบบอบแห้งจะมีการใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และมีการออกแบบพื้นที่รับแสงเป็นลักษณะโดมโค้งครึ่งวงกลม การคำนวณหาขนาดพื้นที่รับความเข้มแสงอาทิตย์ดังสมการดังต่อไปนี้

$$A_s = \frac{1}{2} \times \pi \times D \times L \quad (3)$$

เมื่อ A_s คือ ขนาดพื้นที่รับความเข้มแสงอาทิตย์ (m^2) D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโดมรับความเข้มแสงอาทิตย์ (m) L คือ ความยาวเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (m) การคำนวณหาค่าศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะใช้ออบแห้งวัสดุได้วิเคราะห์จาก ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2566 ในพื้นที่อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ พบว่ามีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ($\mathcal{E}$) $17.15 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ดังนั้นสามารถหาพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะใช้ออบแห้งวัสดุได้ดังนี้

$$Q_{SD} = \frac{\mathcal{E}}{A_s \times T_D} \quad (4)$$

ในกระบวนการถ่ายเทพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้กับห้องอบแห้งจำเป็นต้องผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนต ดังนั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานจะลดลงคิดเป็นร้อยละ 50 ขณะเดียวกันระหว่างการอบแห้งจะมีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังของเครื่องอบแห้งและการสูญเสียความร้อนจากการไล่ความชื้นคิดเป็นร้อยละ 60 และสุดท้ายจะมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการลดลงของความเข้มแสงอาทิตย์คิดเป็นร้อยละ 30 ดังนั้นปริมาณความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะใช้ออบแห้งวัสดุได้จริง (Q_{SD-AC}) คำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{SD-AC} = Q_{SD} \times \eta_{PO} \times \eta_{HL} \times \eta_R \quad (5)$$

เมื่อ η_{PO} คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนต (%) η_{HL} คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านผนังและการไล่ความชื้น (%) η_R คือ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการลดลงของความเข้มแสงอาทิตย์ (%) ในบางครั้งการอบแห้งวัสดุจำเป็นต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องในขณะที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ดังนั้นการใช้พลังงานชีวมวลจึงมีความจำเป็น การคำนวณหาปริมาณความร้อนและอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถคำนวณได้ดังนี้ [10]

$$Q_{Bi} = \frac{Q_W}{\eta_{HE} \times \eta_{BS}} \quad (6)$$

$$m_{Bi} = \frac{Q_{Bi}}{LHV_{Bi}} \quad (7)$$

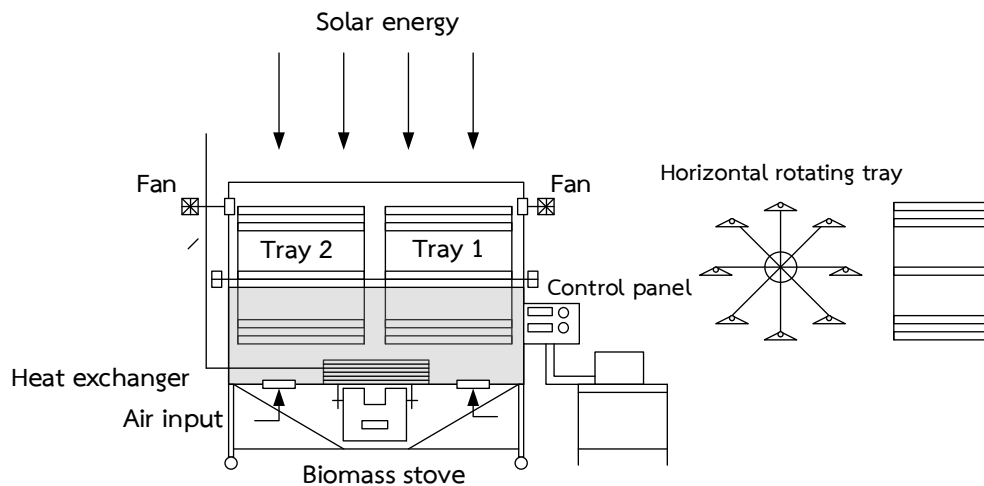
Q_{Bi} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งขณะที่ไม่มีแสงอาทิตย์ (kW) η_{HE} คือ ประสิทธิภาพความร้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชีวมวล (%) กำหนดค่าการออกแบบ 70% η_{BS} คือ ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวล (%) กำหนดค่าการออกแบบไว้ 15% m_{Bi} คือ อัตราความสิ้นเปลืองชีวมวล (kg/s) และ LHV_{Bi} คือ ค่าความร้อนของชีวมวล (kJ/kg)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการออกแบบเครื่องอบแห้งตะไคร้เบื้องต้น

เงื่อนไขการออกแบบ	ค่ากำหนดออกแบบ	หน่วย
น้ำหนักวัสดุหรือพีซีเริ่มต้นการอบแห้ง	10-20	kg
ความชื้นเริ่มต้น	79.2	%
ความชื้นสุดท้าย	10	%
อุณหภูมิห้องอบแห้งที่ออกแบบ	60-70	°C
อัตราส่วนมวลต่อพื้นที่ที่ต้องการ	4	Kg/m ²
ความสามารถในการอบแห้งต่อเนื้อ	4-15	h
การไหลเวียนของอากาศภายในแตกต่างกันไม่เกิน	5	°C
วัสดุรับพลังงานแสงอาทิตย์	แผ่นโพลีคาร์บอเนต	แผ่น
พลังงานความร้อนหลักที่ใช้ออกแบบ	พลังงานแสงอาทิตย์	W/m ²
พลังงานความร้อนสำรอง (เสริม) ที่ใช้ออกแบบ	พลังงานชีวมวล	kJ/kg

- ต้นแบบและข้อมูลทางเทคนิคเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล

ภาพที่ 1 แสดงเครื่องอบแห้งถาดหมุนแนวนอนที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล เครื่องอบแห้งแบ่งอุปกรณ์การทำงานเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนห้องอบแห้ง ส่วนผลิตลมความร้อน และส่วนของการวัดควบคุมการทำงาน เครื่องอบแห้ง ส่วนห้องอบแห้ง ประกอบด้วยชุดถาดหมุนแนวนอนมีจำนวนทั้งหมด 2 ชุด มีถาดวางวัสดุรวมกัน 16 ถาด รองรับมวลตะไคร้สับได้ 16 kg/ถาด ติดตั้งร่วมกับชุดหมุนแกนเพลาดันวางแนวนอนขนาด 37 mm ความยาวเพล่า 2.2 m มีตลับลูกปืนรองรับ 3 จุด ได้แก่ตรงหัว กลางและตรงท้าย การหมุนของเพล่าใช้มอเตอร์เกียร์ทดขนาด 90 W หมุนเพื่อให้เกิดการไหลเวียนอากาศร้อนภายในเครื่องอบและรับความร้อนได้สม่ำเสมอจากพลังงานแสงอาทิตย์ทางด้านบนและพลังงานชีวมวลทางด้านล่าง ความเร็วรอบการหมุนสามารถปรับความเร็วรอบได้ ส่วนผลิตลมความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วน คือ เตาชีวมวลและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เตาชีวมวลที่นำมาใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สามารถผลิตความร้อนได้อยู่ในช่วง 3-7 kW ในกรณีใช้ถ่านชีวมวล เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่รับความร้อนจากเตาชีวมวลและถ่ายเทความร้อนผ่านครีบน้ำร้อนให้กับอากาศในห้องอบแห้งมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน 1 m² ในส่วนของชุดการวัดและควบคุมการทำงานจะมีการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิภายในจำนวน 4 จุด และความชื้น 1 จุด โดยหัววัดอุณหภูมิและความชื้นอย่างละ 1 จุด ทำหน้าที่เป็นตัวรับและส่งสัญญาณควบคุมการทำงานให้กับพัดลมสำหรับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของเครื่องอบแห้ง



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล

- วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. ตะไคร้และการเตรียม

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ ตะไคร้ ที่หาได้ซื้อมาจากตลาดในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ตะไคร้ที่นำมาอบแห้งมีอายุประมาณ 3 เดือน มีขนาดเฉลี่ย 1.5 cm ยาว 30 cm แต่ละหัวมีน้ำหนักเฉลี่ย 20 g เมื่อตัดใบของตะไคร้ออกก่อนการที่จะนำมาอบแห้งดำเนินการเอาเปลือกนอกออกก่อน จากนั้นนำมาหั่นประมาณ 0.5-1.0 cm การจัดเตรียมตะไคร้ที่หั่นแล้วสำหรับการอบแห้งจัดเตรียมไว้ประมาณ 16-17 kg



ภาพที่ 2 ลักษณะของตะไคร้ และตะไคร้ที่หั่นแล้วก่อนการนำไปอบแห้ง

2. เครื่องมือวัดและวิเคราะห์

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ใช้วัดสำหรับชั่งน้ำหนักตะไคร้ ก่อนและหลังอบแห้ง เป็นผลิตภัณฑ์ของ CST รุ่น CDR-30 ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg ค่าความละเอียด 1 g เครื่องวัดอุณหภูมิใช้วัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง มีการวัดทั้งหมด 4 จุด หัวหรือสายวัดอุณหภูมิเป็นแบบ Type K เครื่องบันทึกข้อมูลใช้ผลิตภัณฑ์ Lutron รุ่น TM-947USB วัดอุณหภูมิได้สูงสุดและต่ำสุดได้ 1300 °C และ -100 °C มีค่าความผิดพลาด $\pm 0.5\%$ มีความแม่นยำ $\pm 0.5\%$ เครื่องวัดควบคุมอุณหภูมิใช้สำหรับปรับอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งให้คงที่ตลอด 60 °C ใช้ผลิตภัณฑ์ของ

SHTROL รุ่น: STC-3028 สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุด 70-99 °C และต่ำสุด -20 °C เครื่องวัดนี้จะทำงานร่วมกับพัดลมระบายอากาศ ในกรณีอุณหภูมิสูงเกิน 60 °C พัดลมจะระบายความร้อนในตู้อบแห้งออก ในส่วนของการวัดค่าความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ ได้ใช้ตู้อบแห้งลมร้อนขนาด 100 liter เป็นผลิตภัณฑ์ของ JSR รุ่น JSOF-250 ตู้อบแห้งลมร้อนสร้างอุณหภูมิได้สูงสุด 250 °C ใช้งานร่วมกับเครื่องชั่งดิจิทัลแบบ 4 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ AND รุ่น GH-252 ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 250 g มีความผิดพลาดและค่าความแม่นยำ ± 0.001 g และ ± 0.002 g ตามลำดับ

3. การทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นเป็นการนำเอาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลมาทดสอบการอบแห้งตะไคร้โดยใช้ความร้อนจากพลังงานชีวมวลเพียงแหล่งเดียว การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งได้เริ่มต้นจากการเอาน้ำเอาตะไคร้ที่ได้เตรียมมาหั่นเป็นชิ้น จากนั้นนำมาวางบนตะแกรงถาดละ 1 kg จำนวน 16 ถาด ในแต่ละถาดมีการมีการสุมคัดแยกเพื่อวัดน้ำหนักตะไคร้ทุกๆ ชั่วโมง เป็นระยะเวลาการอบแห้ง 14 h เพื่อให้ความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 10% การให้ความร้อนใช้เตาชีวมวลขนาด 5 kW ให้ความร้อน ใช้ถ่านชีวมวลในการเผาให้ความร้อนเฉลี่ย 1 kg/h ค่าความร้อนถ่านชีวมวล 25-26 MJ/kg การหาความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ได้นำตะไคร้ส่วนหนึ่งมาวัดน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นระยะเวลา 72 h [11] ดำเนินการวัดน้ำหนักสุดท้าย จากนั้นใช้สมการหาความชื้นวัสดุคำนวณความชื้นเริ่มต้น ในส่วนข้อมูลได้วิเคราะห์อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งเมื่อใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล การวิเคราะห์การสูญเสียมวลจากผลิตภัณฑ์และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของเครื่องอบแห้ง

ผลการทดลองและวิจารณ์

- การพัฒนา สร้างและการทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

ภาพที่ 3 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมพลังงานชีวมวล เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นมีปริมาตรห้องอบแห้งรวม 4.95 m³ ด้านบนใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตพับม้วนให้ผิวโค้งเรียบ แผ่นโพลีคาร์บอเนตยอมให้แสงอาทิตย์ผ่านได้ดีในขณะที่รังสีความร้อนผ่านออกได้ต่ำ [12] ครึ่งวงกลม ผัง 4 ด้าน ใช้เหล็กแผ่นบางหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วมีความหนาประมาณ 1 inch ด้านล่างมีเตาชีวมวลให้ความร้อนร่วมกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นแบบครีบทดสอบการทำงานเบื้องต้นมอเตอร์เกียร์สามารถขับเคลื่อนได้ดีและต่อเนื่อง การปรับสมดุลของแต่ละถาดปรับได้ดีถาดไม่พลิกคว่ำ การทดสอบอบแห้งตะไคร้ การป้อนความร้อนจากเตาชีวมวลเพียงพอต่อการสร้างอุณหภูมิตามที่ได้ออกแบบไว้ และสามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง ชุดควบคุมอุณหภูมิทำงานตรงกับค่าอุณหภูมิที่ปรับตั้งไว้ ในการประเมินราคาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมพลังงานชีวมวลทั้งระบบจะมีราคาเฉลี่ยเครื่องละ 35,000 บาท ซึ่งราคานี้รวมในส่วนของวัสดุและค่าจ้างผลิต เมื่อประเมินเทียบกับราคาขายของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจะมีราคาประมาณ 20,000-27,900 บาท/เครื่อง ซึ่งราคาระดับนี้ชุมชน วิสาหกิจชุมชน และผู้ประกอบการรายเล็กสามารถเป็นเจ้าของได้เพราะมีราคาใกล้เคียงราคาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาด

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

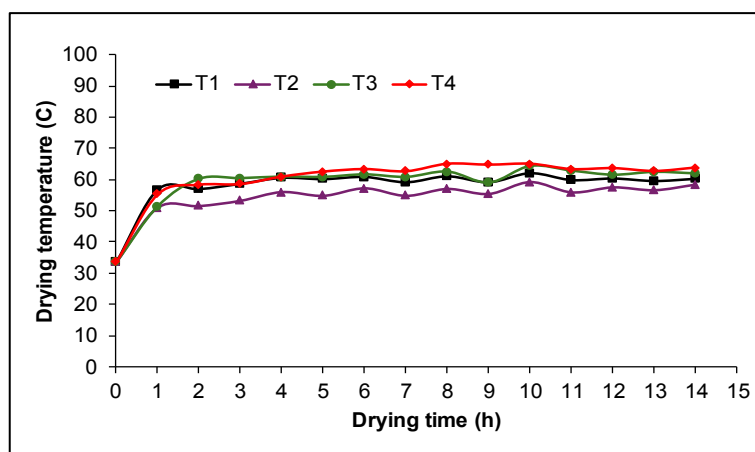
ผลการออกแบบเครื่องอบแห้ง	ค่าการออกแบบ
มิติขนาดเครื่องอบแห้ง (กว้างxยาวxสูง)	1.5x2x1.5 m
ปริมาณการอบแห้งตะไคร้	16 kg
ปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้ออบแห้ง	0.467 kW
พลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ป้อนเข้า	0.502 kW
พลังงานความร้อนจากชีวมวลป้อนเข้า	4.56 kW
ลักษณะอากาศเข้า	Induced Draft Fans
การนำความชื้นออก	พัดลม (220V, 0.14A , 30.8W)
ฉนวนความร้อน	ใยแก้ว
ความสิ้นเปลืองชีวมวลออกแบบ	0.641 kg/h



ภาพที่ 3 ลักษณะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

- การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งด้วยการอบแห้งตะไคร้

ภาพที่ 4 แสดงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งเมื่อใช้ความร้อนจากเตาชีวมวลที่ระยะเวลาการทดสอบ 14 h ผลการทดสอบพบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชีวมวลสามารถสร้างอุณหภูมิได้ตามความต้องการในการอบแห้งตะไคร้ในช่วง 55 ถึง 65 °C การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการคือ 60 °C ใช้ระยะเวลาประมาณ 1 h การเปรียบเทียบตำแหน่งของอุณหภูมิทั้ง 4 จุด มีค่าแตกต่างกันเฉลี่ย 4-6 °C โดยตำแหน่งจุดอุณหภูมิด้านบนหรือใกล้โถมรับแสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านล่างหรือพื้นของเครื่องอบแห้งซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนาแน่นของอากาศเมื่อมีอุณหภูมิสูงจะลอยสะสมอยู่ด้านบนของเครื่องอบแห้ง [13] ขณะเดียวกันถ้าเทียบกับอุณหภูมิของชุดถาดที่ 1 กับชุดถาดที่ 2 อุณหภูมิบริเวณกลุ่มชุดถาดที่ 2 ให้อุณหภูมิสูงกว่าบริเวณถาดที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณนั้นมีปล่องท่อไอเสียที่ความร้อนจากเตาชีวมวลพาผ่านจึงทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิบริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้น



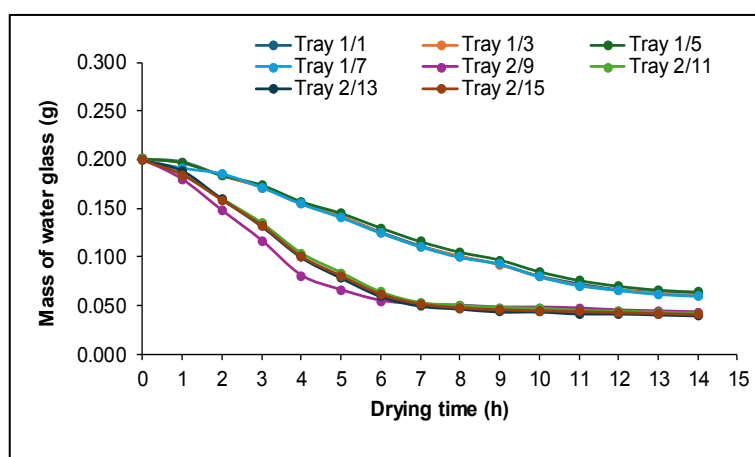
ภาพที่ 4 ลักษณะอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งเมื่อใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล

- การวิเคราะห์การสูญเสียมวลและความชื้นของผลิตภัณฑ์เทียบกับระยะเวลาการอบแห้ง

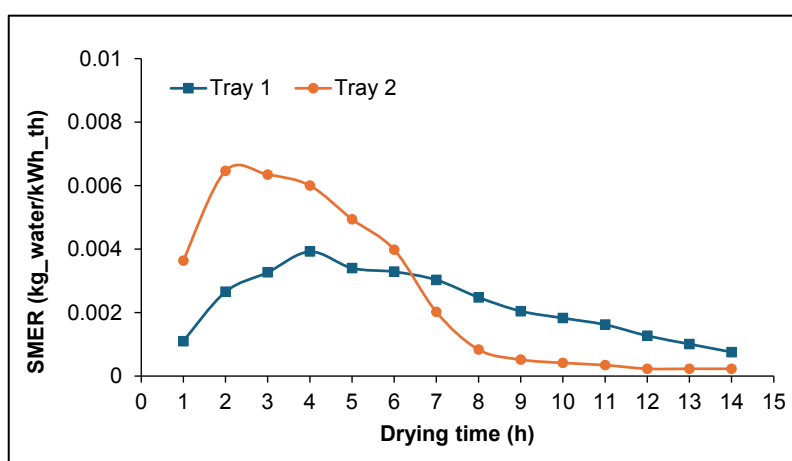
ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียมวลผลิตภัณฑ์ของตะไคร้เทียบกับระยะเวลาการอบแห้งจำนวน 14 h ผลการศึกษาพบว่า ชุตถาดหมุนที่ 2 ให้อัตราการสูญเสียมวลในตะไคร้สูงกว่าชุตถาดหมุนที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากมีท่อไอเสียหรือปล่องความร้อนเตาชีวมวลอยู่ใกล้กับชุตถาดหมุนที่ 2 อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้การสูญเสียมวลของแต่ละถาดเท่ากันจะต้องติดตั้งกล่องหรือท่อความร้อนให้ใกล้กับชุตถาดหมุนที่ 1 การสูญเสียมวลในผลิตภัณฑ์อบแห้งจะแปรผันลดลงตามระยะเวลาที่อบแห้ง [14] การเปรียบเทียบมวลของตะไคร้ในชุตถาดหมุนเดียวกันมีอัตราการสูญเสียมวลไปในทิศทางเดียวกันในการทดลองการสูญเสียมวลของชุตถาดหมุนที่ 1 เท่ากับ 0.0007 g/h และชุตถาดหมุนที่ 2 มีอัตราการสูญเสียมวลเฉลี่ยเท่ากับ 0.0908 g/h การลดลงของมวลผลิตภัณฑ์หมายถึงการสูญเสียน้ำของผลิตภัณฑ์หรือความชื้นจากผลิตภัณฑ์ที่ระเหยออกไป จากผลการทดลองพบว่าความชื้นของตะไคร้ลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการอบแห้ง ความชื้นของตะไคร้เริ่มต้นอบแห้งมีความชื้นเฉลี่ย 79.2% และเมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง 14 h ชุตถาดหมุนที่ 1 ความชื้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายเหลือเฉลี่ย 10.08% อย่างไรก็ตามในส่วนของชุตถาดหมุนที่ 2 ความชื้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายเหลือเฉลี่ยต่ำกว่า 1% ซึ่งพอสรุปได้ว่าชุตถาดหมุนที่ 2 มีอัตราการลดความชื้นสูงกว่าชุตถาดหมุนที่ 1 จากการวิเคราะห์ข้อมูลชุตถาดหมุนที่ 2 ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย 10% จะใช้เวลาการอบแห้ง 6 ถึง 7 h

- การวิเคราะห์อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

ภาพที่ 6 แสดงอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งตะไคร้ที่ระยะเวลา 14 h พบว่าชุตถาดหมุนที่ 2 ให้อัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงกว่าชุตถาดหมุนที่ 1 โดยอัตราการระเหยน้ำจำเพาะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันอัตราการระเหยน้ำจำเพาะที่ระยะเวลาอบแห้ง 2 ถึง 8 h จะให้อัตราการระเหยน้ำสูงทั้งนี้เนื่องจาก อัตราการระเหยน้ำสูงในช่วงแรกเนื่องจากความชื้นในตะไคร้ยังมีมาก ทำให้น้ำระเหยออกมาได้เร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไป หลังจากช่วงเวลา 5-6 h ความชื้นลดลง อัตราการระเหยน้ำจึงลดลงตามลำดับ [15] อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมชีวมวลสำหรับการอบแห้งตะไคร้ อยู่ในช่วง 0.00023-0.00646 $\text{kg}_{\text{Water}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ หรือมีค่าเฉลี่ย 0.00242 $\text{kg}_{\text{Water}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ การประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งให้ประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 6.65% ในขณะที่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมอย่างเดียวมีประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 8.55-25.27% [16]



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบการสูญเสียมวลผลิตภัณฑ์ของชุดถาดหมุนในแนวนอน



ภาพที่ 6 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งตะไคร้

สรุปผลการทดลอง

ผลการออกแบบ คำนวณ และสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล สามารถดำเนินการสร้างได้ดี โดยเครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ในสภาวะมีแสงอาทิตย์และไม่มีแสงอาทิตย์ ห้องอบแห้งที่พัฒนามีปริมาตรรวม 4.95 m³ ชุดถาดเป็นแบบถาดหมุนในแนวนอนมีจำนวน 16 ถาด ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตรับแสงอาทิตย์และใช้เตาชีวมวลขนาด 5 kw ป้อนความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีป เครื่องอบแห้งสามารถสร้างอุณหภูมิทดสอบในสภาวะไม่มีแสงอาทิตย์และใช้ เตาชีวมวลสามารถสร้างอุณหภูมิในห้องอบได้ในช่วง 50-65 °C เมื่ออบแห้งตะไคร้ใช้เวลาในการอบแห้งเฉลี่ย 14 h ความชื้นสุดท้ายเหลือ 10% อัตราการสูญเสียมวล 0.0007-0.0908 g/h อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลสำหรับการอบแห้งตะไคร้ มีค่าเฉลี่ย 0.00242 kg_{Water}/kWh_{th} และเครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ย 6.65% ในภาพรวมเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลนี้สามารถนำไปใช้

ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ ได้ และควรมีการส่งเสริมให้กับกลุ่มเกษตรกรนำไปแปรรูปสินค้าทางการเกษตรของตนเอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้โครงการผลิต และพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในประเทศอาเซียนที่สนับสนุนเงินทุนในด้านการศึกษาและการทำวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการพลังงานสะอาดและเกษตรอัจฉริยะ (Clean Energy & Smart Agricultural Laboratory) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่สนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กมลวรรณ จิตจักร และธวัชชัย อ่องประเสริฐ. (2022). การอบแห้งมะเขือเทศราชินีด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบบังคับร่วมกับความร้อนเสริมจากอินฟราเรด. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 17 (2), 42-54.
- [2] สุธาสนี ผาภา. (2560). พลังงานทดแทนในสถานการณ์ภาวะโลกร้อน. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 11 (2), 49-57.
- [3] K. ELAVARASAN, VINITHA VERMA and B. A. SHAMASUNDAR. (2017). Development of prototype solar-biomass hybrid dryer and its performance evaluation using salted fish (*Cynoglossus spp.*). Indian J. Fish., 64 (Special Issue). 123-129.
- [4] ศิริชัย ศิริชนะ อภินันต์ นามเขต อำไพศักดิ์ ทิบุญมา ประพันธ์พงษ์ สมศิลาและทรงสุภา พุ่มชุมพล. (2565). การเพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 4 (2), 187-205.
- [5] อภิญา สายศรีแก้ว อัษฎา วรรณกายนต์ อภิชัย ไพโรจน์และสุชาติ ดุมนิล. (2565). การพัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการแปรรูปอาหารควบคุม ด้วยระบบ Internet of Things (IoT). วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ 7 (2), 42-52.
- [6] วสันต์ จินดาตาและพรชัย เพชรสงคราม. (2565). ลักษณะรูปทรงของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อการอบแห้งยางพาราแผ่น. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 27 (1), 89-99.
- [7] หทัยชนก เนตรคำและศิรินุช จินดารักษ์. (2560). การพัฒนาเครื่องอบแห้งรมควันขนาดเล็กยางพาราแผ่นโดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์ร่วมกับเตาเผาชีวมวล. Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences 18 (2), 367-377.
- [8] การันย์ หอมชาติ. (2561). การประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา 29 (3), 61-74.
- [9] EL- Amin Omda Mohamed Akoy, Mohamed Ayoub Ismail, El-Fadil Adam Ahmed and W. Luecke. (2015). Design and Construction of a Solar Dryer for Mango Slices. Conference: Trope tag

2006 Prosperity & poverty in a globalized world: Challenges for Agricultural Research. Bonn, Germany, October 11-13, 2006.

- [10] นิกราน หอมดวง, เจนจิรา อุตเรือน, กิตติกร สาสุจิตต์, สุรพล ริยะนา และพันธวัฒน์ ไชยวรรณ. (2565). **การประเมินสมรรถนะเตาซีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการใช้ถ่านอัดแท่งและเศษไม้เป็นเชื้อเพลิง**. วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน 6 (1).
- [11] Cereals & Grains Association. (1999). **Moisture—Air-Oven Methods**. AACC International Method 44-15.02.
- [12] สมจิต หล้าพรหม, ไพโรจน์ เอกอุพาร และ ณัฐพงศ์ ดิษฐเจริญ. (2561). **ตู้อบเนกประสงค์พลังงานแสงอาทิตย์และอินฟราเรด**. การประชุมวิชาการระดับชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 5, 438-452.
- [13] ณฤทธิ วรหาญ. (2565). **การศึกษาการอบแห้งกล้วยภายในพาราโบลาโดม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [14] วิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล. (2024). **การศึกษาเชิงทดลองอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยตู้อบแห้งแบบหลายชั้นพลังงานแสงอาทิตย์**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม 25 (1), 43-51.
- [15] ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, กระวี ตรีอำรรค และเทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2565). **อิทธิพลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม**. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ 8 (2), 131-143.
- [16] Jagrapan Piwsaoad. (2024). **Thermal efficiency of solar dryers for drying longan and heat transfer Modeling**. Progress in Applied Science and Technology 14 (1), 35-41.