

การอบแห้งขมิ้นชันแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานจากขดลวดความร้อนที่ควบคุม สภาวะอากาศอบแห้ง

Drying of turmeric using a hybrid solar energy system integrated with controlled air conditioning and thermal energy from heating coils

สุทธิพงษ์ เรืองจิตร¹ นิกราน หอมดวง¹ ชูรัตน์ ธารารักษ์¹ สุระพล รียะนา¹ และ กิตติกร สาสุจิตต์^{1*}
Suttipong Ruanjit¹, Nigran Homdoun¹, Churat Tararax¹, Surapon Riyana¹ and Kittikorn Sasujit^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

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

Corresponding author: Tel.: (+66) 89-9988203. E-mail address: k.sasujit@yahoo.com

Abstract

Turmeric is an herb that can be used as a food seasoning and has medicinal properties. For this reason, it is a high-demand product in the consumer and medicinal markets. However, in our study, we found that it has a highly serious post-harvest problem that must be considered dust, animal dropping, and pollutants. To address these problems, a turmeric solar dryer is proposed in this work. It is based on both heat sources which are the heat from sunlight and the heat from a 2-kW heater. In addition, the heat from sunlight is the major heat source for drying turmeric. The dimensions of the proposed dryer are 1.7 x 2.5 x 2.1 m. It is constructed from polycarbonate sheets and aluminum angles. The proposed dryer aims are controlling the temperature to be at most 60°C. To evaluate the proposed dryer, an experiment was set up. For the experimental results, it was found that the moisture content of the fresh turmeric could be reduced from 563.57 %db to a final moisture content of 1.49 %db within 36 h. For standard drying according to TISI 676/2547 that can be the drying time was only 22 h. During testing, the average solar radiation intensity was between 598.60-640.81 W/m², the dryer efficiency of 22.44%, with specific energy consumption of 4.10 MJ/kg_{water evap.} and a specific moisture extraction rate of 3.91 kg_{water evap.}/kWh. The dried turmeric retained color quality, with red and yellow shades closely matching those of fresh turmeric. The drying system required an initial investment of 30,000 Baht and incurred variable costs of 92,895 Baht/year, generating an annual revenue of 112,320 Baht/year. This resulted in a net annual return of 19,425 Baht/year, with a payback period of 0.65 year. The study found a fresh-to-dried turmeric ratio of 6.4:1, suggesting that this drying system could be beneficial for small-scale herbal processing enterprises and could help add value to Thai herbal products.

Keywords: Hybrid solar dryer, turmeric, heating coil, controlled air conditioning

บทคัดย่อ

หมื่นชั้นเป็นสมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยาสูงและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการบริโภคและผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในธุรกิจสปา อย่างไรก็ตามยังคงพบปัญหาหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตในเรื่องของสัตว์ แมลง ผุ่น และมลพิษอื่น ๆ ในการแปรรูปด้วยการอบแห้งแบบธรรมชาติ จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบอบแห้งหมื่นชั้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับขดลวดความร้อนที่ควบคุมสภาวะการอบแห้งแบบอัจฉริยะโดยใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด $1.7 \times 2.5 \times 2.1$ m คลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต พร้อมขดลวดแหล่งความร้อนเสริมขนาดกำลัง 2 kW โดยควบคุมอุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 60°C พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิและการระบายความชื้น โดยหมื่นชั้นสดถูกหั่นให้มีความหนา 2-5 mm และทดลองน้ำหนักรวม 20 kg จากผลการศึกษาพบว่าหมื่นชั้นสามารถลดความชื้นจาก 563.57 %db เหลือเพียง 1.49 %db ในเวลาอบแห้ง 36 h สำหรับการอบแห้งตามมาตรฐาน มพข. 676/2547 ที่กำหนดความชื้นสุดท้าย 11.11 %db สามารถใช้เวลาอบแห้งเพียง 22 h ซึ่งในระหว่างการทดลองพบว่าค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยในช่วง 598.6 - 640.81 W/m^2 ประสิทธิภาพการอบแห้งเฉลี่ย 22.44% และมีการใช้พลังงานจำเพาะ 4.1 $\text{MJ/kg}_{\text{water evap.}}$ และอัตราการใช้พลังงานในการระเหยน้ำจำเพาะ 3.91 $\text{kg}_{\text{water evap.}} / \text{kWh}$ ผลการตรวจวัดคุณภาพสีหมื่นชั้นอบแห้งพบว่าสีแดงและสีเหลืองใกล้เคียงกับหมื่นชั้นสด อย่างไรก็ตามระบบอบแห้งนี้มีค่าใช้จ่ายลงทุนเริ่มต้น 30,000 บาท และมีต้นทุนแปรผัน 92,895 บาทต่อปี โดยให้ผลตอบแทนจากการขายหมื่นชั้นอบแห้งอยู่ที่ 112,320 บาทต่อปี คิดเป็นผลตอบแทนสุทธิ 19,425 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 0.65 ปี โดยให้อัตราส่วนหมื่นชั้นสดต่อหมื่นชั้นอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 6.4:1 ดังนั้นผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการแปรรูปสมุนไพรในระดับวิสาหกิจชุมชน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์สมุนไพรของไทยได้อีกด้วย

คำสำคัญ: โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน, หมื่นชั้น, ขดลวดความร้อน, ระบบการควบคุม

บทนำ

จากสถานการณ์ปัจจุบันได้ให้ความสำคัญในเรื่องสุขภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้สมุนไพรไทยที่มีคุณสมบัติทางอาหารและยา รวมไปถึงมีการนำไปใช้ในรูปแบบของเครื่องสำอาง ยารักษาโรค อาหารเสริมสุขภาพ ซึ่งถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากไม่เป็นสารเคมีที่อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจึงทำให้ผู้บริโภคได้รับความปลอดภัยมากขึ้น ประเทศไทยถือว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่เป็นพืชไร่ พืชสวน ซึ่งจะมีการเพาะปลูกพืชสมุนไพรหลากหลายชนิดแตกต่างกัน และกระจายพื้นที่เพาะปลูกทั่วทุกภาคของประเทศไทย นอกจากนั้นยังมีพืชสมุนไพรไทยท้องถิ่นที่หลากหลายด้วยกัน จากแผนแม่บทแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2566-2570 มีการส่งเสริมการใช้สมุนไพรเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับส่งออกต่างประเทศ รวมไปถึงการส่งเสริมให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องพัฒนาพืชสมุนไพรไทยให้เป็นที่ยอมรับในระดับสากล และสร้างมูลค่าเพิ่มแก่ผลิตภัณฑ์ผ่านกระบวนการแปรรูปสมุนไพร [1] ต่อมาได้มีการปรับปรุงแผนปฏิบัติการด้านสมุนไพรแห่งชาติ ฉบับที่ 2 พ.ศ.2566-2570 โดยมีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการยกร่างแผนนี้ประกอบไปด้วยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงอุดมศึกษาวิจัย และนวัตกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงพาณิชย์ และกระทรวงสาธารณสุข จากข้อมูลพบว่าในช่วงปี พ.ศ.2559-2563 มีมูลค่าการส่งออกวัตถุดิบสมุนไพรและผลิตภัณฑ์เฉลี่ยประมาณ 2,237 ล้านบาทต่อปี [2] โดยสินค้าหลักที่ส่งออกต่างประเทศประกอบด้วยผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร พรรณไม้ และน้ำมันหอมระเหย โดยกลุ่มประเทศหลักที่บริโภคสมุนไพร ประกอบไปด้วยสาธารณรัฐประชาชนจีน ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ เป็นต้น สำหรับกระบวนการแปรรูปสมุนไพรที่ง่ายและเหมาะสมก็คือการอบแห้งหรือการลดความชื้นโดยอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งจะมีระยะเวลาประมาณ 5 ชั่วโมงต่อวัน หรือชั่วโมงที่แสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยต่อวัน และนิยมตากแบบธรรมชาติ ซึ่งส่งผลทำให้ได้รับผลกระทบในเรื่องของการปนเปื้อนสิ่งสกปรก สัตว์ และ

แมลงรวมไปถึงอาจเกิดเชื้อราขึ้น ในช่วงที่ปริมาณค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝนหรือฤดูหนาวทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความเสียหาย ด้วยเหตุนี้ทางเลือกในการแก้ไขปัญหาคือการใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งในช่วงช่วงที่มีแสงอาทิตย์ ในส่วนช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ก็จะใช้แหล่งความร้อนเสริมเพื่อให้สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งให้เหมาะสมผ่านระบบควบคุมระยะไกลก็จะสามารถทำให้การอบแห้งพืชสมุนไพร และเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่งเช่นกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดความร้อน และทำการพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งในห้องอบแห้งแบบระยะไกล โดยใช้หมั่นชั้นเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งทำการควบคุมอุณหภูมิในช่วงไม่เกิน 60°C เพื่อรักษาปริมาณสารระเหยในผลิตภัณฑ์ไว้ โดยจะทำการศึกษาประเมินประสิทธิภาพการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความชื้นสุดท้ายหมั่นชั้นอบแห้ง และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้า

วิธีการวิจัย

การอบแห้งหมั่นชั้นโดยใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุมสภาวะอบแห้ง มีรายละเอียดของขั้นตอนและวิธีการวิจัย ดังนี้

การเตรียมหมั่นชั้น

หมั่นชั้น (Turmeric) ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ได้มาจากแหล่งเพาะปลูกจังหวัดเชียงใหม่ โดยจะนำมาล้างทำความสะอาดและผึ่งให้แห้ง จากนั้นนำมาหั่นด้วยเครื่องหั่นสไลด์ให้มีความหนาในช่วง 2 - 5 mm โดยในการทดลองจะใช้หมั่นชั้นสดจำนวน 20 kg โดยมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 610.73 %db ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 หมั่นชั้นสดที่มีความหนา 2-5 mm

การออกแบบโรงอบแห้งพร้อมระบบควบคุมสภาวะอากาศอบแห้ง

โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้า โดยมีขนาดโรงอบแห้งเท่ากับ $1.7 \times 2.5 \times 2.1$ m คลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตความหนา 5 mm ติดตั้งบนพื้นคอนกรีตพร้อมชั้นวางผลิตภัณฑ์จำนวน 3 ชั้น สามารถอบแห้งหมั่นชั้นได้ 20 กิโลกรัมต่อครั้ง ใช้เหล็กกล้าปิวไนซ์ (Galvanized steel pipe) ขนาด 25.4×25.4 mm และความหนา 1.5 mm เป็นโครงสร้างของโรงอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2 ในส่วนของการพัฒนาระบบควบคุมสภาวะอากาศในการอบแห้งในโรงอบแห้งใช้เซนเซอร์ THS01 Temperature & humidity Sensor เชื่อมต่อผ่าน RJ9 4P4C ที่ช่วงอุณหภูมิตรวจวัด -40°C ถึง 85°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0-100%RH พร้อมด้วยระบบควบคุมและสั่งการของ Sunoff TH Elite TH16 พร้อมแอปพลิเคชันสั่งการและควบคุมการทำงาน อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวนี้จะไปสั่งการการทำงานของพัดลมระบายความชื้นขนาด 7 นิ้ว ที่กำลังไฟฟ้าขนาด 25 W และแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้า 2 kW ดังแสดงในภาพที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการอบแห้งขมิ้นชันสดจำนวน 20 กิโลกรัมต่อครั้ง ทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้น พร้อมหาค่าความชื้นเริ่มต้นของการทดลอง โดยจะมีเงื่อนไขการควบคุมการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งไม่เกิน 60°C โดยทำการเซตค่าช่วงอุณหภูมิไว้ในช่วง $50-55^{\circ}\text{C}$ ผ่านเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศในห้องอบแห้ง ซึ่งเริ่มต้นการทำงานเมื่อทำการอบแห้งในช่วงแรกจะทำการอบแห้งในช่วงตอนมีแสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ระบบจะสั่งให้ขดลวดความร้อนเสริมทำงานจนทำให้อากาศในห้องอบแห้งมีอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ระบบก็จะสั่งให้ขดลวดความร้อนเสริมหยุดทำงาน ขณะเดียวกันในกรณีที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ รวมไปถึงค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศในห้องอบแห้งมากเกินไปหรือสูงเกิน $70\%\text{RH}$ ระบบก็จะสั่งให้พัดลมระบายความชื้นออกจากห้องอบแห้งจนได้สภาวะอากาศขึ้นในห้องอบแห้งตามที่ตั้งไว้ก็จะหยุดทำงาน ดังนั้นระบบการทำงานของเครื่องนี้จะทำการตามค่าที่เซตค่าไว้ทำให้สภาวะอากาศอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง อย่างไรก็ตามพลังงานหลักที่ใช้ในการอบแห้งจะใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลักส่วนแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้าจะทำการเพื่อรักษาอุณหภูมิอบแห้งในช่วงเวลาการอบแห้งต่อเนื่องหลังจากไม่มีแสงอาทิตย์ ในส่วนของตัวอย่างขมิ้นชันจะนำมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 3 h และนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้นของขมิ้นชันตามช่วงเวลา สอดคล้องกับวิธีการตามมาตรฐาน AOAC 2000 ที่ใช้ตู้อบลมร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ $103-105^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 72 h และคำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) ตามสมการที่ 1 [3-5]

$$M_d = \left(\frac{w - d}{d} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db), w คือมวลวัตถุเริ่มต้น (kg) และ d คือมวลของวัตถุแห้ง (kg)

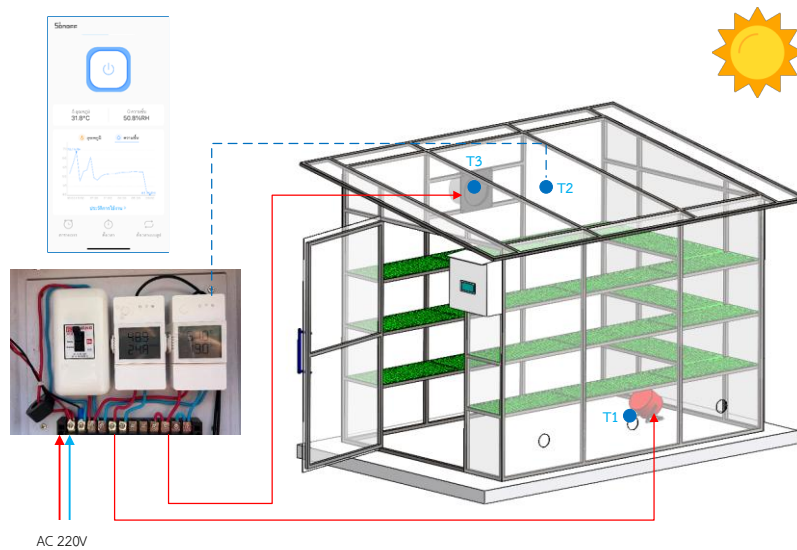
ประสิทธิภาพการอบแห้ง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 [6]

$$\eta_{dy} = \left(\frac{m_w h_g}{A_t + E_{sec}} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ η_{dy} คือประสิทธิภาพการอบแห้ง (%), m_w คืออัตราการระเหยน้ำ (kg/day), h_g คือความร้อนแฝงของการระเหยน้ำกลายเป็นไอน้ำมีค่าเท่ากับ 2.2572 MJ/kg , I คือค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$) และ A_t คือพื้นที่ของตัวรับรังสีอาทิตย์ (m^2)



ภาพที่ 2 โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

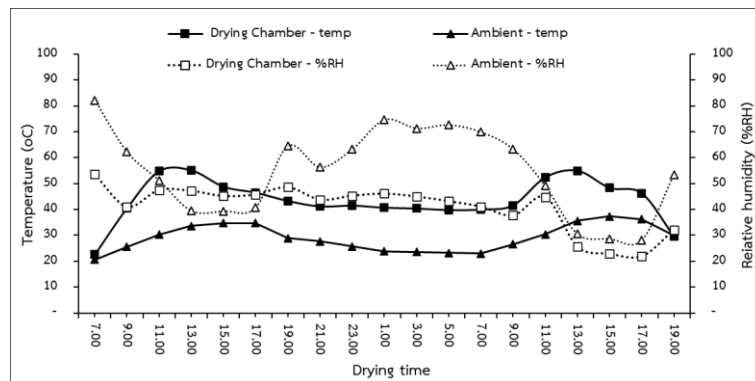


ภาพที่ 3 โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบควบคุมสภาวะอบแห้งในโรงอบแห้งงานวิจัยนี้

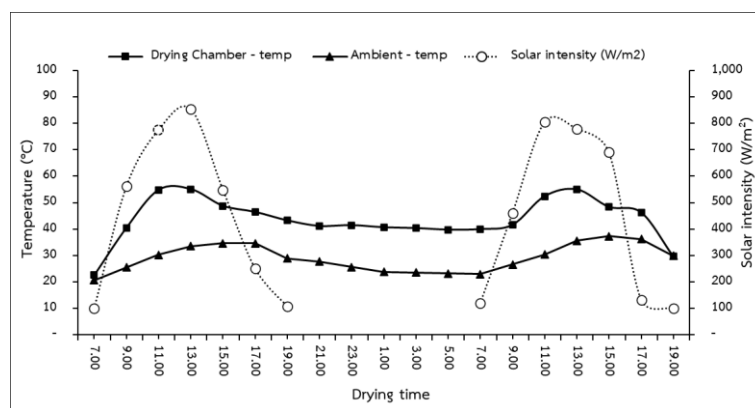
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการกระจายอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

ผลการกระจายอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศตามช่วงเวลารอบแห้ง พบว่าอุณหภูมิของอากาศจะแปรผกผันกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณไอน้ำในอากาศลดลง และทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มที่ลดลง เช่นเดียวกันกับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิในห้องอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจากการตรวจวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าในช่วง $24.80-45.35^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมมีค่าในช่วง $28.75-82.70\%\text{RH}$ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะสอดคล้องกับค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่ช่วงเวลา 13.00 น. โดยให้ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุด 838 W/m^2 ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งจากผลการทดลองของระบบควบคุมสภาวะอากาศอบแห้งในห้องอบแห้งพบว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ไม่เกิน 60°C เนื่องจากหากอุณหภูมิอบแห้งสูงเกินค่าดังกล่าวจะส่งผลทำให้ปริมาณสารเคอร์คิวมินอยด์มีค่าแนวโน้มลดลง [7]



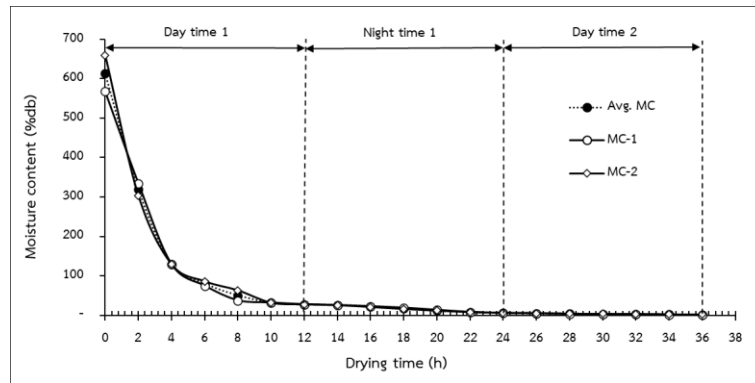
ภาพที่ 4 ผลการกระจายอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศของห้องอบแห้งตามระยะเวลาอบแห้ง



ภาพที่ 5 ผลการกระจายอุณหภูมิอบแห้งและความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตามช่วงระยะเวลาการอบแห้ง

ผลของอัตราส่วนความชื้นไขมันชั้นต่อช่วงระยะเวลาการอบแห้ง

ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของไขมันชั้นตามช่วงระยะเวลาการอบแห้ง พบว่าค่าความชื้นของไขมันชั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามช่วงระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนที่สะสมภายในโรงอบแห้งซึ่งได้รับแหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และความร้อนเสริมจากขดลวดความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถลดความชื้นไขมันชั้นสดจาก 610.73 %db จนเหลือความชื้นสุดท้ายตามมาตรฐาน มผช.676/2547 กำหนดไว้ไม่เกินกว่า 11.11 %db [8] ภายในระยะเวลา 22 h โดยเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบตากแดดธรรมชาติที่ต้องใช้เวลาการอบแห้งถึง 32 h ซึ่งตากเฉพาะในช่วงตอนกลางวันโดยเวลาดังกล่าวไม่นับรวมชั่วโมงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโรงอบแห้งในงานวิจัยนี้สามารถอบแห้งได้ต่อเนื่องและใช้ระยะเวลาการอบแห้งไขมันชั้นได้รวดเร็วกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติ ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการอบแห้งทั้ง 2 ครั้งมีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน โดยมีระยะเวลาสิ้นสุดการทดลองที่ 22 h ที่ค่าความชื้นสุดท้ายของไขมันชั้นตามมาตรฐาน มผช.676/2547 ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลของค่าความชื้นขม้นชั้นอบแห้งที่ช่วงระยะเวลาการอบแห้ง

ผลการประเมินประสิทธิภาพการอบแห้ง

ผลการประเมินประสิทธิภาพการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งธรรมชาติจะใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 32 h และการใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานจะใช้เวลาอบแห้ง 22 h ที่เงื่อนไขค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 11.11%db โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 4.10 MJ/kg_{water evap.} และอัตราการใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำเท่ากับ 3.91 kg_{water evap.}/kWh และประสิทธิภาพการอบแห้งเท่ากับ 3.33% ดังสรุปไว้ในตารางที่ 1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ พัทธราภรณ์ และคณะ (2021) [6] พบว่ามีประสิทธิภาพการอบแห้ง 7.96% อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ 4.25 MJ/kg_{water evap.} แต่ใช้วัตถุดิบขม้นชั้นสดเริ่มต้นเพียง 700 g เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งขม้นชั้นด้วยปั๊มความร้อนจากงานวิจัยของ นัฐราช และคณะ (2012) [9] พบว่าใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 19.7 kWh ต่อครั้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 17.6 kWh ต่อครั้ง ซึ่งการใช้ปั๊มความร้อนจะให้ประสิทธิภาพการอบแห้งเท่า 0.75%

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของการอบแห้งขม้นชั้นโดยใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานกับแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้า

ตัวแปร	การอบแห้งแบบธรรมชาติ	โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้า
ระยะเวลาการอบแห้ง (h)	32	22
ความชื้นเริ่มต้น (%db)	583.99	610.73
ความชื้นสุดท้าย (%db)	11.11	11.11
ผลผลิตขม้นชั้น สด:แห้ง	6.78 : 1	6.40 : 1
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน (MJ/kg _{water evap.})	4.32	4.10
อัตราการใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (kg _{water evap.} /kWh)	-	3.91
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh ต่อครั้ง)	-	17.60
ประสิทธิภาพการอบแห้ง (%)	2.47	3.33

ผลคุณภาพสีของขม้นชั้นอบแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงผลการตรวจวัดค่าสีของขม้นชั้น โดยใช้มาตรฐาน Commission International de l'Eclairage เพื่อตรวจวัดค่าสี L*, a*, b* พบว่าขม้นชั้นอบแห้งงานวิจัยนี้ให้ค่าสีใกล้เคียงกับขม้นชั้นสดโดยให้ค่าสีแดงและสีเหลืองสูง

ทำให้ไขมันชั้นอบแห้งยังคงให้ลักษณะทางกายภาพด้านสีคล้ายกับไขมันชั้นสด สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปาริชาติ และคณะ (2021) [7] ที่ทำการอบแห้งไขมันชั้นด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50°C โดยให้ค่าสี $L^*=47.43\pm2.56$ ค่าสี $a^*=26.34\pm1.54$ และค่าสี $b^*=49.73\pm2.92$ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Komonsing et al. (2022) [10] ที่ทำการทดลองการอบแห้งไขมันชั้นโดยใช้ตู้อบแห้งแบบคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตและได้ผลค่าสี $L^*=54.09\pm1.91$ ค่าสี $a^*=27.99\pm0.08$ และ $b^*=34.41\pm3.32$ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของสีไขมันชั้น

เงื่อนไขการอบแห้ง	ค่าสี		
	Brightness L^*	Redness a^*	Yellowness b^*
ไขมันชั้นสด	49.00±1.68	36.05±1.36	52.82±2.49
ไขมันชั้นอบแห้งแบบธรรมชาติ	54.55±2.58	17.09±1.37	29.00±1.84
ไขมันชั้นอบแห้งจากโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้า	48.72±1.43	22.15±1.36	36.08±1.31

ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งไขมันชั้นโดยใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้าโดยผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าจะสามารถอบแห้งไขมันชั้นสดได้ 20 kg ระยะเวลา 22 h โดยประเมินการอบแห้ง 144 ครั้งต่อปี ที่อัตราส่วนไขมันสดต่อแห้งเท่ากับ 6.4:1 (ณ ความชื้นสุดท้ายตาม มผช. 676/2547 เท่ากับ 11.11%db) โดยที่ราคาไขมันชั้นอบแห้งแบบชื้นเท่ากับ 250 บาทต่อกิโลกรัม จากผลการประเมินพบว่าเงินลงทุนเริ่มต้นประกอบไปด้วยค่าโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบควบคุมและแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดความร้อนเท่ากับ 30,000 บาท มีต้นทุนแปรผันรวมทั้งหมดประมาณ 92,895 บาทต่อปี ให้ผลตอบแทนจากการขายไขมันชั้นอบแห้งเท่ากับ 112,320 บาทต่อปี ผลตอบแทนสุทธิเท่ากับ 19,425 บาทต่อปี และให้ระยะเวลาคืนทุนของโรงอบแห้งภายใน 0.65 ปี ทั้งนี้หากไม่คิดค่าแรงงานโดยสามารถจัดการเองภายในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเช่นเดียวกับกลุ่มมีการเพาะปลูกไขมันชั้นสดอยู่แล้วก็จะทำให้ระยะเวลาคืนทุนของโรงอบแห้งในงานวิจัยนี้ลดลง

ตารางที่ 3 ผลการประเมินเศรษฐศาสตร์ของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานแหล่งความร้อนเสริม

ตัวแปร	ค่าใช้จ่าย	หน่วย
1. ต้นทุนคงที่		
1.1 โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	20,000	บาท
1.2 ระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง	10,000	บาท
รวมค่าใช้จ่ายต้นทุนคงที่	30,000	บาท
2. ต้นทุนแปรผัน		
2.1 ค่าไขมันชั้นสด (20 กิโลกรัมต่อครั้ง x 10 บาทต่อกิโลกรัม x อบแห้ง 144 ครั้งต่อปี)	28,800	บาทต่อปี
2.2 ค่าแรงงานควบคุมระบบ (350 บาทต่อครั้ง)	50,400	บาทต่อปี
2.3 ค่าบำรุงรักษาระบบ (คิดที่ 10% ของราคาเครื่อง)	3,000	บาทต่อปี
2.4 ค่าไฟฟ้าต่อปี (อัตราการใช้ไฟฟ้า 17.6 kWh ต่อครั้ง หรือ 2,535 kWh ต่อปี ราคาไฟฟ้า 4.22 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า)	10,695	บาทต่อปี
รวมค่าใช้จ่ายต้นทุนแปรผัน	92,895	บาทต่อปี

3. ผลตอบแทนจากการขายไขมันชั้น (ราคา 250 บาทต่อกิโลกรัม) (ไขมันชั้นสด 20 กิโลกรัม ได้ไขมันชั้นแห้ง 3.12 กิโลกรัม หรือ 449.28 กิโลกรัมต่อปี)	112,320	บาทต่อปี
4. ผลตอบแทนสุทธิรายปี	19,425	บาทต่อปี
5. ระยะเวลาคืนทุน	0.65	ปี

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษางานวิจัยนี้ทำการอบแห้งไขมันชั้นหนา 2-5 mm น้ำหนัก 20 kg โดยใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนเสริมจากขดลวดไฟฟ้ากำลัง 2 kW ควบคุมอุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 60°C ผ่านระบบควบคุมเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ พบว่าสามารถลดความชื้นไขมันชั้นจาก 563.57 %db จนเหลือความชื้นสุดท้าย 11.11%db ตามมาตรฐาน มพข.676/2547 ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 22 h ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งเท่ากับ 3.33% ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 4.10 MJ/kg_{water evap} และอัตราการใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำเท่ากับ 3.91 kg_{water evap} / kWh เงินลงทุนเริ่มต้นโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบควบคุมเท่ากับ 30,000 บาท ให้ผลตอบแทนจากการขายไขมันชั้นอบแห้งเท่ากับ 112,320 บาทต่อปี ผลตอบแทนสุทธิเท่ากับ 19,425 บาทต่อปี และให้ระยะเวลาคืนทุนของโรงอบแห้งภายใน 0.65 ปี ซึ่งผลการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการนำไปใช้ประโยชน์ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรวมถึงข้อมูลผลการวิจัยที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านการอบแห้งหรือแปรรูปผลิตภัณฑ์สมุนไพรไทยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้โครงการการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในประเทศอาเซียน ประจำปีงบประมาณ 2565 และห้องปฏิบัติการพลังงานสะอาดและเกษตรอัจฉริยะ (Clean Energy & Smart Agricultural Laboratory)

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงสาธารณสุข (2559). แผนแม่บทแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย ฉบับที่ 1 พ.ศ.2560-2564. สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข กรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก, กระทรวงสาธารณสุข.
- [2] คณะกรรมการนโยบายสมุนไพรแห่งชาติ. (2566). แผนปฏิบัติการด้านสมุนไพรแห่งชาติฉบับที่ 2 พ.ศ. 2566 – 2570. กองสมุนไพรเพื่อเศรษฐกิจ กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก, กระทรวงสาธารณสุข.
- [3] ญัฐพล กระจำ และ ณรงค์ อึ้งกิม้วน. (2559). จลนพลศาสตร์และแบบจำลองการอบแห้งไขมันชั้นด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 21 (3), 239-248.
- [4] คณินนิตย์ จัปใจเหมาะ ญัฐพล ภูมิสะอาด และละมุล วิเศษ. (2556). ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งจึงด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับเครื่องทำความร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 32 (4), 404-409.

- [5] อนุสร นาดี ยุทธนา ฐิระวณิชกุล และสุภวรรณ ฐิระวณิชกุล. (2555). จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและลมร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17 (2), 130-138.
- [6] พชรภรณ์ อินริราย ธวัชรัตน์ สัมฤทธิ์ วรลักษณ์ สุริวงษ์ และสุรินทร์พร ชังไชย. (2564). การศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. วารสารเกษตรพระวรุณ. 18 (2), 87-96.
- [7] ปาริชาติ ราชมณี สุธิดา พิทักษ์วินัย วาณิช นิพนธ์ และ วุฒิไกร บัวแก้ว. (2564) จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 17 (2), 32-45.
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ขมิ้นผง ๖๗๖/๒๕๔๗. สืบค้นเมื่อ 13 กันยายน 2567, จาก https://fic.nfi.or.th/law/upload/file1/TH_1336.pdf
- [9] นัฐราช แสนมีมา ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ละมุล วิเศษ. (2012). การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งแบบปมความร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัย มหาสารคาม, 32 (5), 631-635.
- [10] Komonsing, N., Reyer, S., Khuwijitjaru, P., Mahayothee, B., and Muller, J. (2022). **Drying behavior and curcuminoids changes in turmeric slices during drying under simulated solar radiation as influenced by different transparent cover materials.** Foods, 11 (5), 2-17.