

การพัฒนาเตาอบไม้สักและการวิเคราะห์ความ

เหมาะสมของสภาพการอบแห้งผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Development of Teak Wood Dryer and Optimization of Drying Condition by
Mathematical Modelingดุษฎี บุญธรรม^{1*} และ ธนกิจ ถาหมี²¹สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์²สำนักงานหม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติเขต 1 จังหวัดแพร่ กรมหม่อนไหมDussadee Buntam^{1*}, and Tanakij Thamee²¹Department of Logistics Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University²Queen Sirikit Sericulture Office 1, The Queen Sirikit Department of Sericulture

*Corresponding author Email: dussadeebuntam@gmail.com

(Received: March 21, 2024; Revise: June 27, 2024; Accepted: June 29, 2024)

บทคัดย่อ

การพัฒนาเตาอบไม้สักและการวิเคราะห์ความเหมาะสมของสภาพการอบแห้งผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างและพัฒนาเตาอบไม้สักที่สามารถลดปัญหาด้านคุณภาพของการอบไม้สัก ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยได้ดำเนินการออกแบบและสร้างเตาอบไม้สักแบบผสมผสาน โดยมีระบบการทำงานที่สำคัญ 3 ส่วนคือ 1) โครงสร้างของเตาอบไม้สัก ออกแบบเพื่อให้สามารถรับแสงได้ตลอดทั้งวันโดยมีลักษณะเป็นอุโมงค์ มีพัดลมดูดอากาศทำงานเพื่อลดอุณหภูมิในห้องอบลง 2) การให้พลังงานความร้อนจากฮอตแอร์ จะให้พลังงานความร้อนมายังเตาอบ เมื่อเตาอบไม่ได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือมีอุณหภูมิไม่ได้ตามที่กำหนด และ 3) ในการควบคุมระบบเตาอบไม้สัก ภายในเตาอบไม้สักจะควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เพื่อใช้ในการตัดต่อระบบการให้ความร้อนของทั้ง 2 ระบบ จากการการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าที่สุด พบว่าแบบจำลองการประมาณการแปรมีความเหมาะสมที่สามารถใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นของไม้สักระหว่างการอบแห้งได้ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งด้วยเตาอบแห้งพลังงานความร้อนร่วม โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.9853 ค่าการลดลงไคกำลังสอง และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เท่ากับ 0.0001 และ 0.0112 มีค่าต่ำที่สุด

คำสำคัญ: ไม้สัก เตาอบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

Abstract

The objective of research of development of teak wood dryer and optimization of drying condition by mathematical modeling has create and development teak wood dryer. It was for reducing various problems regarding the quality of teak wood does not affect the environment by designing and creating a combined teak

wood oven. There are 3 parts to the working system: 1) Structure of the teak oven was designed to receive light throughout the day with a tunnel shape. There is an exhaust fan working to reduce the temperature in the oven. 2) Providing heat energy from hot air. It will provide heat energy to the oven. When the oven does not receive heat from the sun or the temperature is not as specified and 3) the controlling the teak wood oven system Inside the teak wood oven the temperature and humidity are controlled. It is used in editing the heating systems of both systems. The mathematical modeling using non-linear regression analysis of a combined oven for drying teak wood by using the value of the decision coefficient (R^2), the chi-squared (χ^2), and the lowest square root of the mean square error (RMSE). It was found that the Diffusion approximation model is suitable to predict the moisture ratio of teak during drying for drying using a combined drying oven. The decision coefficient is equal to 0.9853, the chi-squared reduction value, And the square root of the mean square error is 0.0001 and 0.0112, having the lowest values.

Keywords: Teak wood, Oven, Mathematical model, Non-linear regression equations

1. บทนำ

อุตสาหกรรมไม้ในประเทศไทยมีการนำไม้ประเภทไม้แปรรูปและไม้ท่อน มาแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ มากมายในปี 2560-2564 พบว่า จำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้ารวมเป็นมูลค่าถึง 23,029 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 52.7 ของมูลค่าการส่งออก อย่างไรก็ตามไม้ที่นำเข้าเพื่อการบริโภคในประเทศทั้งหมดรวมกับการพึ่งพาไม้วัตถุดิบในประเทศ อันได้แก่ ไม้ยางพาราและไม้จากสวนป่าอื่นๆ แล้วยังสามารถ สร้างมูลค่าเพิ่มเป็นผลิตภัณฑ์ไม้และเฟอร์นิเจอร์ไม้เพื่อการส่งออกคิดเป็นมูลค่าถึง 19,585 ล้านบาท [1] ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มูลค่าการนำเข้า ส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้ (ล้านบาท)

ปี	ไม้แปรรูป		ไม้ท่อน		เฟอร์นิเจอร์ไม้	
	นำเข้า	ส่งออก	นำเข้า	ส่งออก	นำเข้า	ส่งออก
2560	2,963	49,830	138	2.6	3,080	9,181
2561	7,940	39,280	178	80	5,156	12,037
2562	6,990	29,666	63	116	4,734	12,116
2563	5,271	29,007	93	208	4,215	16,194
2564	3,234	33,437	138	332	5,844	19,585

ที่มา: สถิติการป่าไม้, ส่วนศูนย์ข้อมูลกลาง สำนักสารนิเทศ กรมป่าไม้ [1]

ไม้สักเป็นไม้เศรษฐกิจที่มีความสำคัญของจังหวัดแพร่ เป็นไม้ที่มีความแข็งแรง มีลวดลายที่สวยงาม และมีความทนทานตามธรรมชาติ [2] ในอดีตไม้สักสามารถสร้างรายได้ให้กับชาวบ้านในพื้นที่เป็นอย่างมาก จึงทำให้ชาวบ้านในจังหวัดแพร่ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพหลักเป็นช่างไม้ โดยเฉพาะในตำบลน้ำคำ อำเภอสูงเม่น จังหวัดแพร่ ที่ยังประกอบธุรกิจด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ไม้สัก จากการลงพื้นที่พบปัญหาไม้สักที่ผ่านการอบ มีตำหนิ ไม้หักแตก และโค้งงอ ซึ่งเกิดจากการอบไม้สัก และการอบไม้แต่ละครั้งยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ในกระบวนการอบไม้สักโดยทั่วไป พบว่าเกิดความเสียหายของไม้สักมีการ

แตกหัก บิดงอ เนื่องจากการการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นในเตาอบไม้สักมีความแปรปรวนที่มาก รวมถึงไม่สามารถคาดการณ์เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบไม้สักได้บางครั้งใช้เวลาในการอบไม้สักมากเกินไป หรือน้อยเกินไปซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถใช้เตาอบไม้สักได้เต็มประสิทธิภาพ [3–5] ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาการอบแห้งไม้โดยการใช้อุณหภูมิ [6–7] แต่มีการใช้เทคโนโลยีการออกแบบขั้นสูงและมีต้นทุนการผลิตสูง ยังไม่เหมาะสมกับการผลิตของผู้ประกอบการรายย่อย โดยแนวทางหนึ่งในการช่วยพัฒนาการอบไม้ของกลุ่มผู้ประกอบการขนาดเล็ก คือการสร้างเตาอบไม้สักแบบผสมผสานระหว่างความร้อนร่วมจากพลังงานแสงอาทิตย์กับลมร้อนมาใช้ในการออกแบบเพื่อสร้างเตาอบไม้สัก โดยช่วงกลางวันที่มีแสงจะใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในการให้พลังงานความร้อนในการอบไม้ แต่เมื่ออุณหภูมิในเตาอบลดลง (ช่วงไม่มีแสงอาทิตย์) ลมร้อนจะทำหน้าที่ให้พลังงานความร้อนแทนพลังงานแสงอาทิตย์ การใช้พลังงานความร้อนร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับลมร้อน มาสร้างเตาอบไม้สักที่มีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเตาอบไม้สักที่มีการใช้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และลมร้อน เพื่อใช้ในการอบแห้งไม้สักสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก เพื่อใช้มีประสิทธิภาพในการอบไม้เพิ่มขึ้น และนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายกับลักษณะงานที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับการอบแห้งไม้สัก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งไม้สัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบในการทำนายการลดปริมาณความชื้นของไม้สักเพื่อปรับรูปแบบการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และความร้อนร่วมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานโดยเน้นกระบวนการวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างเทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ใช้เทคโนโลยีเป็นหลักการสำคัญในการดำเนินงาน ทำการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและมาตรฐานการอบไม้สัก แล้วทำการออกแบบพัฒนาเตาอบไม้สัก ศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งไม้สักที่เหมาะสมจากเตาอบไม้สักที่พัฒนาได้ และวัดประสิทธิภาพเตาอบไม้สักที่พัฒนาได้ โดยใช้ไม้สักจากกลุ่มผู้ประกอบการไม้สักในจังหวัดแพร่ในทดสอบและศึกษาวิจัย มีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

2.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและมาตรฐานของการอบไม้สัก

ในการอบไม้สักให้ได้คุณภาพผู้วิจัยได้ยึดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 497–2526) แบ่งตามข้อกำหนดความชื้นและลักษณะการใช้งานออกเป็น 3 ประเภท

ประเภทที่ 1 ความชื้นร้อยละ 8 – 12 ที่ใช้เป็นไม้เสา เช่น ไม้ประตูลูกไม้แผ่นเรียบ

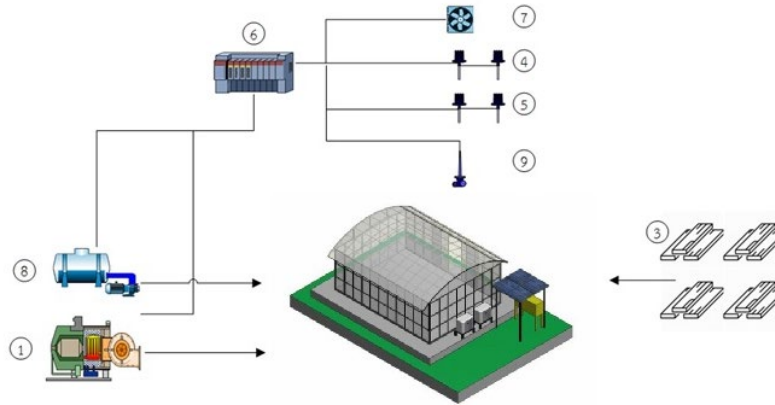
ประเภทที่ 2 ความชื้นร้อยละ 12 – 16 ที่ใช้เป็นไม้พื้น และไม้กายอื่นๆ

ประเภทที่ 3 ความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 โดยทั่วไปใช้เป็นไม้ทำลึงใส่ของ

2.2 การพัฒนาเตาอบไม้สัก

เป็นพัฒนาระบบการอบไม้สักให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยนำวิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติ และการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมมาใช้ เพื่อหาเงื่อนไขในการอบไม้สักที่เหมาะสม

1) การออกแบบและพัฒนาเตาอบไม้สักกำหนดแนวทางการปรับปรุงกระบวนการอบไม้สัก ผู้วิจัยและผู้ประกอบการแนวคิดในการสร้างเตาอบไม้สักและหารูปแบบการทำนายเวลาการอบไม้สักที่เหมาะสมตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 การออกแบบและพัฒนาเตาอบไม้สัก

หลักการทำงานเบื้องต้นเครื่องกำเนิดลมร้อน (1) ทำหน้าที่ปล่อยความร้อนเข้าไปในโรงอบไม้ (2) โดยขนาดของเตาอบไม้ มีความจุ 6 ลบ.ม. (2 ม. x 2 ม. x 1.5 ม.) โครงสร้างหลักที่มีวัสดุเป็นเหล็ก วัสดุโปร่งใส่ที่ใช้เป็นผนังและหลังคาใช้โพลีคาร์บอเนต และพื้นโรงอบเป็นคอนกรีตเพื่อดูดซับความร้อนและป้องกัน ความชื้นจากพื้นดิน ในการอบไม้ซึ่งต้องพิจารณาปริมาตรของไม้ที่ นำเข้าสู่โรงอบไม้ (3) เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่กำหนด โดยภายในเตาอบไม้ และภายนอกโรงอบไม้จะมีเซ็นเซอร์ ตรวจวัดอุณหภูมิ (4) และเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้น (5) ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์จะถูกส่งไปประมวลผลด้วยระบบควบคุม IOT (6) เมื่ออุณหภูมิในการอบสูงเกินไปพัดลมจะระบายอากาศ (7) และเมื่อความชื้นในโรงอบต่ำจะสั่งให้ปั๊มน้ำ (8) ทำงานโดยจะทำการ เพิ่มความชื้นโดยพ่นสเปรย์หมอก (9) มาในโรงอบไม้ให้มีความชื้นตามที่กำหนดไว้

2) การหาขนาดของเครื่องกำเนิดลมร้อน ทำการกำหนดความต้องการการใช้งานคือ อุณหภูมิในการอบ 50–60 องศาเซลเซียส ปริมาตรห้องอบ 6 ลบ.ม. โดยทำการเลือกใช้ Hot Air Generator Model: HA-205 ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติ Hot Air Generator Model: HA-205

คุณสมบัติ	รายละเอียด
แหล่งจ่ายไฟ	3 Phase 380 V
กำลังไฟฟ้าโดยรวม/ กำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์	5 Kw
ปริมาตรอากาศสูงสุด	3.6–4.4 m ³ /min
แรงดันอากาศสูงสุด	0.6–0.8 kPa
อุณหภูมิสูงสุดสำหรับการใช้อากาศหมุนเวียน	≥ 220 องศาเซลเซียส
การควบคุมปริมาณอากาศ	Manual Da
ความดังของเสียง	≥ 75 dB
ขนาดสายไฟที่ใช้กับเครื่อง	VCT 4 เส้น x 3.5 มม. ² x 3 ม.
น้ำหนัก	28 kg

หมายเหตุ: อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการใช้งาน

3) เก็บข้อมูลการอบไม้สัก เพื่อหาเงื่อนไขการอบไม้สักที่เหมาะสม ผู้วิจัยทำการเก็บข้อมูลการอบไม้สักโดยมีรายละเอียด เงื่อนไขในการอบไม้สัก ดังตารางที่ 2 โดยข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 2 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการอบไม้สัก

หัวข้อ	รายละเอียด
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบไม้	1. อุณหภูมิภายในเตาอบไม่ให้ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส 2. ความเร็วลมในการดูดอากาศ 3. ความชื้นภายในเตาอบ ไม่เกิน 30 %
เงื่อนไขการอบไม้	o ความจุของเตาอบไม้สัก 6 ลบ.ม. (2 ม. x 2 ม. x 1.5 ม.) o ไม้ไม่มีตำหนิมีความชื้นและขนาดตามที่กำหนด

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งไม้สักที่เหมาะสม

เป็นการออกแบบโมเดลแบบจำลองในการพยากรณ์ประสิทธิภาพ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาพฤติกรรมการอบแห้งของไม้สัก หรือหาค่าจลนพลศาสตร์การอบแห้งไม้สัก โดยนำตัวอย่างไม้สัก ที่ไม่มีตำหนิ เช่น ไม้มีปม ไม้แตก และมีรา เป็นต้น โดยวัตถุดิบมาจากโรงงานเลื่อยไม้สักในพื้นที่จังหวัดแพร่ โดยทำการอบไม้ครั้งละ 65 ชิ้น (เต็มโรงอบ) ทำการกำหนดและควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งไว้ที่ 45 องศาเซลเซียส ให้มีความชื้นในห้องอบแห้งไม่ต่ำกว่า 30% ทำการเก็บข้อมูลวัดความชื้นวันละ 3 ครั้ง เช้า (9.00 น.) เที่ยง (12.00 น.) และเย็น (17.00 น.) ทำการอบแห้งจนความชื้นในไม้ต่ำกว่าร้อยละ 10 นำข้อมูลมาสร้างกราฟการลดความชื้น อัตราการอบแห้ง และคำนวณสัดส่วนของปริมาณความชื้น (Moisture ratio; MR) [8–9] แล้วสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณความชื้นในระหว่างการอบแห้ง จากนั้นทำการทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้น โดยทำการวิเคราะห์รูปแบบทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Empirical Model) ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งที่เหมาะสม ด้วยการพล็อตข้อมูลของกราฟในการอบด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงสถิติ ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton [10], Page [11], Henderson and Pabis [12], Logarithmic [13], Wang and Sing [14], Two Term [15], Two Term exponential [16] และ Diffusion Approximation [17] หาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยงานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการอบแห้งเอมพิริคัล ดังแสดงในตารางที่ 3 เพื่อใช้ช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของจลนพลศาสตร์การอบแห้งกับระยะเวลาในการอบแห้งโดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-Linear Regression)

ตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้ง

Model name	Model expression
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Wang and Sing	$MR = 1 + at + bt^2$
Two Term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$
Two Term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
Diffusion Approximation	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$

หมายเหตุ: เมื่อ a b c k_1 k_2 n คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุและ k คือ สัมประสิทธิ์การอบแห้ง (ชั่วโมง⁻¹)

จากนั้นหาวัดความสามารถของสมการจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) ค่าไคสแควร์ (Chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error; RMSE) ตามสมการที่ (1) (2) และ (3)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - E)^2} \quad (3)$$

โดยที่

Q_i	คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบจริงลำดับที่ i
Q	คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบจริง
E_i	คือ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ลำดับที่ i
E	คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการพยากรณ์

2.4 การวัดประสิทธิภาพเตาอบไม้สัก

ในการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของเตาอบไม้สักจากเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยจะทำการประเมินผลทางด้านต่างๆ อัตราการอบแห้งไม้สัก อัตราการบิดงอของไม้สัก ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ประเมินจากได้จากอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ มีสูตรการคำนวณ ตามสมการ (4) (5) (6) และ (7) ตามลำดับ

○ อัตราการอบแห้งไม้สัก

$$\text{Drying Rate} = \frac{M_i - M_f}{t} \quad (4)$$

โดยที่

M_i	= น้ำหนักของไม้เริ่มต้น (กิโลกรัม)
M_f	= น้ำหนักของไม้สุดท้าย (กิโลกรัม)
t	= เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

- อัตราการบดของไม้สีก

$$\text{อัตราการบดของไม้สีก} = \frac{\text{จำนวนไม้ที่บดอหลังการอบ}}{\text{จำนวนไม้ทั้งหมด}} \times 100 \quad (5)$$

- อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER)

$$SMER = \frac{\text{ปริมาณของน้ำที่ระเหยจากวัสดุ (kg)}}{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kW-h)}} \quad (6)$$

- การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ Specific Energy Consumption (SEC)

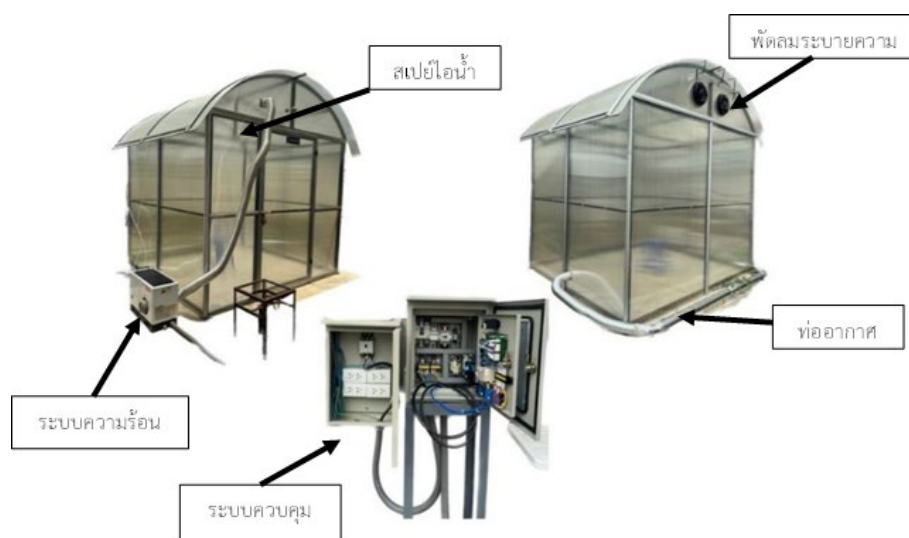
$$SEC = \frac{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kW-h)}}{\text{ปริมาณของน้ำที่ระเหยจากวัสดุ (kg)}} \quad (7)$$

3. ผลการทดลอง

การดำเนินงานโครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเตาอบแห้งไม้สีกขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองอัจฉริยะในการควบคุมอุณหภูมิ เป็นการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาเพื่อให้มีเตาอบไม้สีกที่เหมาะสมกับการใช้งาน มีผลดำเนินการงานวิจัยได้ ดังนี้

3.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่อง

ในการออกแบบและพัฒนาเตาอบไม้สีกได้ศึกษาแนวทางการทำงานของเตาอบไม้แบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและยึดหลักเกณฑ์ในการปรับปรุงดังต่อไปนี้ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นไม่สูง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ มีกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อนใช้งานง่าย มีความแข็งแรงของโครงสร้าง และการบำรุงรักษาง่าย โดยหลักการทำงานของเตาอบไม้สีกในช่วงที่มีแสงอาทิตย์จะส่องมาที่เตาอบไม้จะใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง และเมื่อไม่มีความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์หรืออุณหภูมิไม่เป็นไปตามที่กำหนดระบบลมร้อนจะเริ่มทำงาน แล้วทำการปรับอุณหภูมิในห้องให้มีความร้อนตามที่กำหนดไว้ โดยแบ่งหลักการทำงานเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบเตาอบไม้สีกแบบผสมผสาน

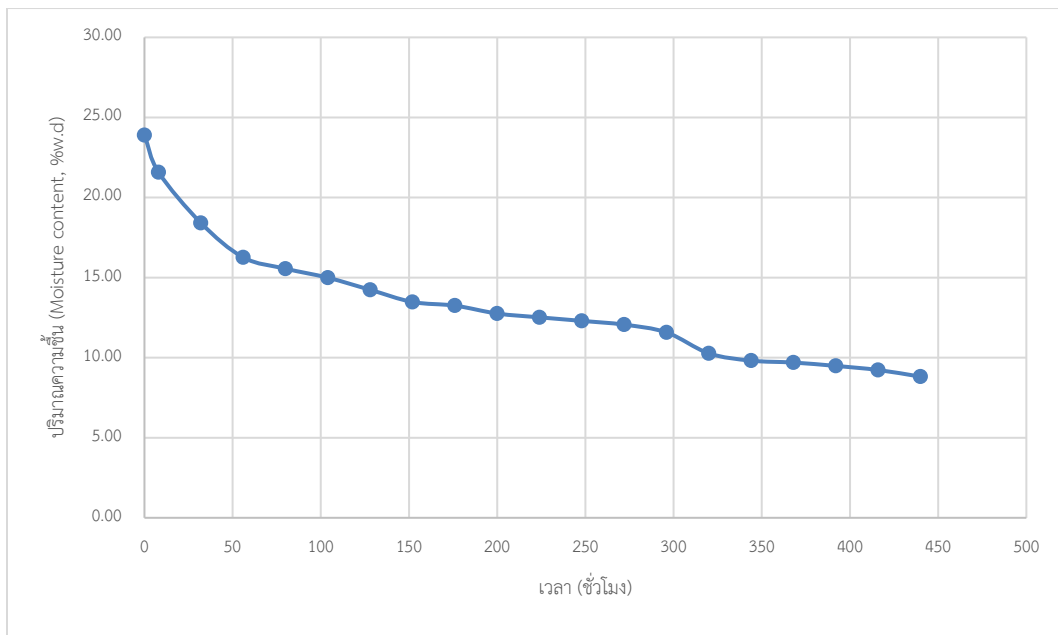
ส่วนที่ 1 การให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โครงสร้างของเตาอบไม้สัก (1) จะถูกออกแบบเพื่อให้สามารถรับแสงได้ตลอดทั้งวันโดยมีลักษณะเป็นอุโมงค์ เมื่อเตาอบได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จะทำให้อุณหภูมิในเตาอบสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเตาอบสูงเกินตามที่กำหนด พัดลมดูดอากาศ (2) ก็จะทำงานเพื่อลดอุณหภูมิในห้องลง พัดลมดูดอากาศจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ (4) ในการทำงาน

ส่วนที่ 2 การให้พลังงานความร้อนจากฮอตแอร์ (5) จะให้พลังงานความร้อนมายังเตาอบ เมื่อเตาอบไม่ได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (ช่วงไม่มีแสงแดด)

ส่วนที่ 3 ในการควบคุมระบบเตาอบไม้สัก ภายในเตาอบไม้สักจะควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เพื่อใช้ในการตัดต่อระบบการให้ความร้อนของทั้ง 2 ระบบ การควบคุมระบบเตาอบจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์อีกทางหนึ่ง

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งไม้สักที่เหมาะสม

จากการนำไม้สักเข้าไปทดสอบการอบแห้งโดยใช้เตาอบพลังงานความร้อนร่วมจำนวน 3 ครั้ง ทำการวัดและเก็บข้อมูลความชื้นวันละ 1 ครั้งในเวลา 17.00 น. ทุกวันเป็นเวลา 20 วัน พบว่าในการอบแห้งไม้สักมีอุณหภูมิในห้องเตาอบเฉลี่ยอยู่ที่ 48.62 องศา ต่ำสุดอยู่ที่ 37.8 สูงสุดอยู่ที่ 76.4 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 39.76% ต่ำสุด 29.44 สูงสุด 62.5 อุณหภูมิภายนอกเตา ต่ำสุด 27.4 สูงสุด 50.7 ความชื้นสัมพัทธ์ 63.57 ต่ำสุด 30.5 สูงสุด 91.1 โดยความชื้นของไม้เริ่มต้นที่ร้อยละ 23.8973 (ฐานแห้ง) และความชื้นสุดท้ายของการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 8.81 (ฐานแห้ง) เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาสัดส่วนของปริมาณความชื้น (MR) แล้วสร้างกราฟของสัดส่วนของปริมาณความชื้นต่อเวลาในระหว่างการอบแห้งตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้ง

จากรูปที่ 3 พบว่า ในช่วงแรก (1-100 ชั่วโมง) ไม้สักมีความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นในช่วงชั่วโมงที่ 100 - 300 จะมีอัตราการลดความชื้นเริ่มคงที่ แล้วมีการลดลงเพิ่มขึ้นในช่วงชั่วโมงที่ 400 อัตราการลดความชื้นลดลงและคงที่มากขึ้น และสัดส่วนของปริมาณความชื้น จะลดลงตามระยะเวลาในการอบที่นานขึ้น เมื่ออธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณความชื้นระหว่างการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล 8 แบบจำลอง ได้แก่ Newton, Page, Henderson and Pabis,

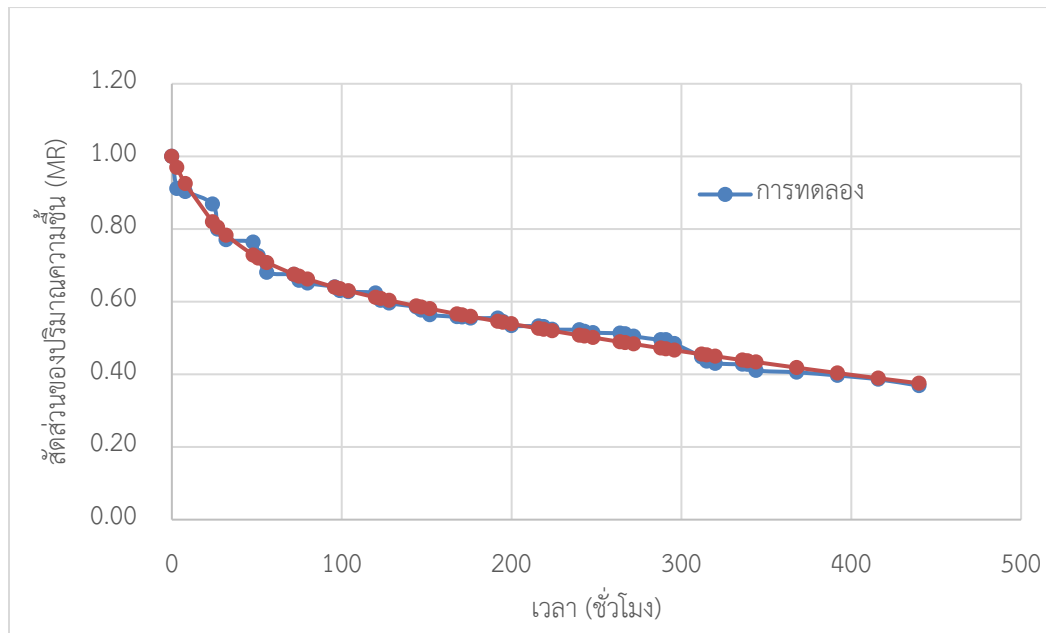
Wang and Sing, Logarithmic, Two-term, Two-term exponential และ Diffusion approximation ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) โดยมีค่าอยู่ที่ 0.5241 ถึง 0.9853 ค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) โดยมีค่าอยู่ที่ 0.0001 ถึง 0.1439 และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ($RMSE$) มีค่าอยู่ที่ 0.0112 ถึง 0.3793 ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองของ Diffusion approximation มีความเหมาะสมที่สามารถใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นของไม้สักระหว่างการอบแห้งได้ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งด้วยเตาอบแห้งพลังงานความร้อนร่วม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.9853 ซึ่งมีความมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ และมีการลดลงไคกำลังสอง และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย $RMSE$ เท่ากับ 0.0001 และ 0.0112 มีค่าต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [18] ที่ทำการศึกษาโมเดลการอบแห้งและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดคาโนลาโดยใช้

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์เชิงสถิติของแบบจำลองการอบไม้สักด้วยเตาอบพลังงานความร้อนร่วม

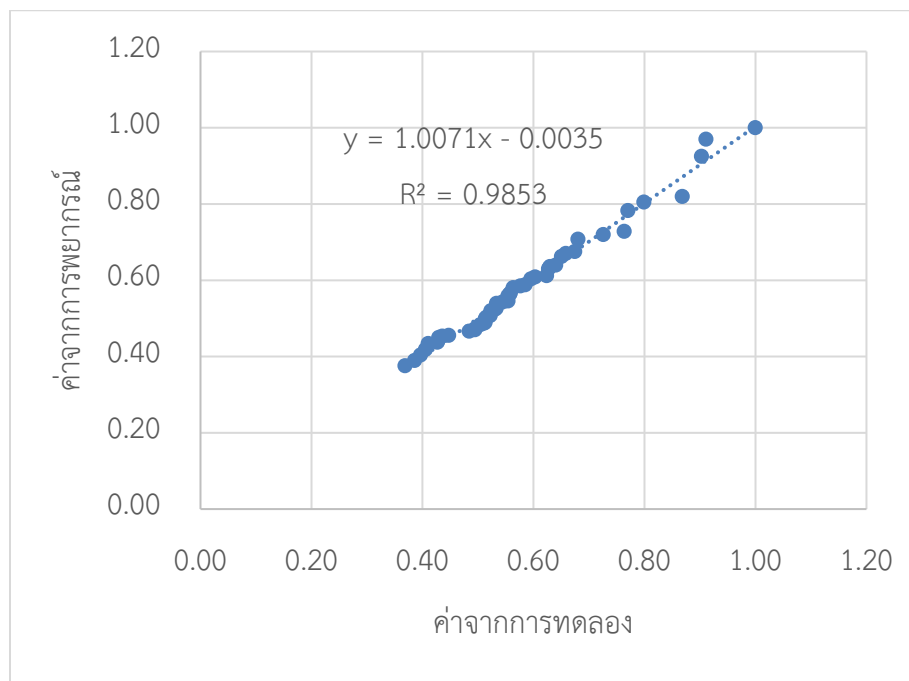
Model	Model constants	R^2	χ^2	$RMSE$
Newton	k=0.003	0.9279	0.0020	0.0451
Page	k=0.042 n=0.510	0.8393	0.1439	0.3793
Henderson and Pabis	k=0.002 a=0.837	0.9103	0.0003	0.0178
Wang and Sing	a=0.003 b=0.0005	0.8517	0.0925	0.3041
Logarithmic	k=0.007 a=0.513 c=0.401	0.5241	0.0071	0.0845
Two-term	a=0.251 k0=0.031 b=0.724 k1=0.001	0.9839	0.0028	0.0531
Two-term exponential	k=0.019 a=0.129	0.9562	0.0012	0.0347
Diffusion approximation	k=0.035 a=0.272 b=0.043	0.9853	0.0001	0.0112

ผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Diffusion approximation เทียบกับผลการทดลองในการอบไม้สักด้วยเตาอบความร้อนร่วม แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าผลของการใช้แบบจำลองมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับผลการทดลองสำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แบบจำลองนี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นขณะอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมได้ และในรูปที่ 5 พบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นจากการวัดมีความแตกต่างจากค่า

อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองไม่มากนักจึงมีความสอดคล้องกันของข้อมูลค่อนข้างดีซึ่งดูได้จากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากแบบจำลองและการวัดเก็บเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณความชื้น (MR) กับเวลาระหว่างผลการทดลองกับการพยากรณ์ด้วยแบบจำลอง Diffusion approximation



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและจากการพยากรณ์จากแบบจำลอง Diffusion approximation สำหรับการอบในเตาอบพลังงานความร้อนร่วม

3.3 การวัดประสิทธิภาพเตาอบไม้สัก

การวัดประสิทธิภาพการใช้เตาอบพลังงานความร้อนร่วมในการอบไม้สัก โดยทำการประเมินและคำนวณประสิทธิภาพการทำงานใน 3 ด้าน ได้แก่ อัตราการอบแห้งไม้สัก อัตราการบดของไม้สัก และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ Specific Energy Consumption (SEC) ซึ่งได้ผลสรุปตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การประเมินประสิทธิภาพของเตาอบพลังงานความร้อนร่วม

การวัดค่า	ผล
น้ำหนักไม้เริ่มต้น (kg)	299.400
น้ำหนักไม้หลังอบ (kg)	250.200
น้ำหนักที่ระเหยไป (kg)	49.200
ความชื้นไม้เริ่มต้น (% w.b.)	30.115
ความชื้นไม้สุดท้าย (% w.b.)	9.782
ไฟที่ใช้ (kwh)	6,978.000
เวลาอบแห้ง (hr.)	440.000
อัตราการทำแห้ง (kg water evap./hr.)	0.1118
อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (kg water evap./kW-h)	0.0070
การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg water evap.)	510.580
อัตราการบดของไม้สัก (%)	9.23

จากตารางที่ 5 ผลการประเมินประสิทธิภาพของเตาอบพลังงานความร้อนร่วม โดยทำการอบไม้สักในเตาอบพลังงานความร้อน โดยใช้ไม้สักจำนวน 65 เล่ม มีน้ำหนักก่อนเข้าอบรวม 299.4 กิโลกรัม หลังจากทำการอบแห้งเป็นเวลา 440 ชั่วโมง มีน้ำหนักหลังอบแล้วอยู่ที่ 250.2 กิโลกรัม ทำการวัดความชื้นเริ่มร้อยละ 30.115 (น้ำหนักฐานเปียก) และความชื้นหลังอบแล้วที่ 9.78 (น้ำหนักฐานเปียก) ในการอบแห้งใช้พลังงานแสงอาทิตย์และไฟฟ้าร่วมด้วย โดยใช้ไฟในการอบจำนวน 6978 หน่วย (kwh) ทำการประเมินอัตราการทำแห้ง (DR) เท่ากับ 0.1118 มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะเท่ากับ 0.007 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 510.58 กิโลจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และมีอัตราการบดของไม้สักจำนวน 6 เล่ม คิดเป็น 9.23% เนื่องจากการอบแห้งไม้สักที่อุณหภูมิต่ำทำให้น้ำที่ระเหยออกจากไม้มีปริมาณน้อย จึงทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงได้ช้า [19]

4. สรุปและอภิปรายผล

ในการพัฒนาเตาอบแห้งไม้สักขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองอัจฉริยะในการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อออกแบบและพัฒนาเตาอบไม้สักต้นแบบโดยควบคุมอุณหภูมิแบบอัจฉริยะ หาโมเดลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบไม้สักด้วยเตาอบพลังงานความร้อนร่วม และหาประสิทธิภาพของเตาอบพลังงานความร้อนร่วมในการอบไม้สักและออกแบบโมเดลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบไม้สัก จากผลการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัยที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการมาทั้งหมดสามารถที่จะสรุปผลการวิจัยตามประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

การออกแบบและสร้างเตาไม้สัก โดยมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นไม่สูง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ มีกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อนใช้งานง่าย มีความแข็งแรงของโครงสร้าง และการบำรุงรักษาง่าย โดยมีการพัฒนาระบบการทำงานออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โครงสร้างของเตาอบไม้สัก ออกแบบเพื่อให้สามารถรับแสงได้ตลอดทั้งวันโดยมีลักษณะเป็นอุโมงค์ มีพัดลมดูดอากาศทำงานเพื่อลดอุณหภูมิในห้องอบ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์ในการทำงาน ส่วนที่ 2 การให้พลังงานความร้อนจากฮอตแอร์ จะให้พลังงานความร้อนมายังเตาอบ เมื่อเตาอบไม่ได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือมีอุณหภูมิไม่ได้ตามที่กำหนด ส่วนที่ 3 ในการควบคุมระบบเตาอบไม้สัก ภายในเตาอบไม้สักจะควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เพื่อใช้ในการตัดต่อระบบการให้ความร้อนของทั้ง 2 ระบบ การควบคุมระบบเตาอบจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์อีกทางหนึ่ง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบไม้สักด้วยเตาอบพลังงานความร้อนร่วม โดยทำการอบไม้สักจำนวน 65 เล่ม ในเตาอบให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 ฐานเปียก แล้วทำการเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไม้สักระหว่างการอบแห้ง แล้วนำข้อมูลมาคำนวณหาสัดส่วนของปริมาณความชื้น (MR) แล้วสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณความชื้นในระหว่างการอบแห้ง โดยทำการวิเคราะห์รูปแบบทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Empirical Model) ในการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งที่เหมาะสมด้วยการพล็อตข้อมูลของกราฟในการอบด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) สูงสุด และค่าการลดลงไคกำลังสอง (Reduce chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error; RMSE) ต่ำที่สุด พบว่าแบบจำลองของ Diffusion approximation มีความเหมาะสมที่สามารถใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นของไม้สักระหว่างการอบแห้งได้ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งด้วยเตาอบแห้งพลังงานความร้อนร่วม โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.9853 ค่าการลดลงไคกำลังสอง และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย RMSE เท่ากับ 0.0001 และ 0.0112 มีค่าต่ำที่สุด

การวัดประสิทธิภาพของเตาอบพลังงานความร้อนร่วมในการอบไม้สัก ทำการประเมินค่าอัตราการอบแห้งไม้สัก เท่ากับ 0.11 กิโลกรัม/ชั่วโมง มีอัตราการบดงของไม้สัก 9.23% มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture extraction rate) เท่ากับ 0.0070 kg water evap./kW- h และมีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) 510.580 MJ/kg water evap.

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Royal Forest Department, *Forest Department Statistics Data for 2021*. Bangkok, Thailand: Information Office of the Royal Forest Department, 2021. (in Thai)
- [2] Royal Forest Department, *Thai Teak Knowledge*. Bangkok, Thailand: Royal Forest Department, Ministry of Natural Resources and Environment, 2013. (in Thai)
- [3] A. Chondamrongkul, S. Phiphitwittaya, and W. Rattanaporncharoen, "Germination Rates of Teak Pollen from Different Directions of The Canopy," in *Proceeding of The 2000 Annual Forest Research Report, Forest Research Section Office of Forestry Studies, Royal Forest Department*, pp. 199–207, 2000. (in Thai)

- [4] A. Kovanich, “The Past, Present, and Future of Teak in Thailand,” *Faculty of Forestry, Kasetsart University, Seminar 50 years of Huai Tak teak plantation Celebrating the 60th Birthday Anniversary of Her Majesty the Queen from 5–8 August 1992 at the Wiang Thong Hotel, Lampang Province*, pp. 1–14, Aug. 1992. (in Thai)
- [5] A. Khaosaard, S. Chanpaisaeng, and T. Ruengsirikul, “Teak (*Tectona grandis* Linn.f.),” *Forestry academic publications, Forestry Research Division, Maintenance Division, Royal Forest Department*, pp. 1–24, 1992. (in Thai)
- [6] S. Khatri, K. Puangsuwan, R. Kaewmai, and N. Khao, “Drying Kinetics of Rubber Wood Using Microwaves,” *Journal of Engineering and Innovation*, vol. 15, no. 4, pp. 192–202, 2019. (in Thai)
- [7] P. Rattanadecho, “Research and Development of a Commercial Multi-Purpose Drying System Using Microwaves with Co-Vacuum System: A Case Study, High Quality Products, Complete Research Report,” *Thailand Science Research and Innovation (TSRI)*, 2009. (in Thai)
- [8] U. E. Inyang, I. O. Oboh, and B. R. Etuk, “Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials,” *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 8, no. 2, pp. 27–48, 2018. doi:10.4236/aces.2018.82003
- [9] K. O. Falade, J. C. Igbeke, and F. A. Ayanwuyi, “Kinetics of Mass Transfer, and Colour Changes During Osmotic Dehydration of Watermelon,” *Journal of Food Engineering*, vol. 80, no. 3, pp. 979–985, Jun. 2007. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.06.033
- [10] P. W. Westerman, G. M. White, and I. J. Ross, “Relative Humidity Effect on The High-Temperature Drying of Shelled Corn,” *Transactions of the ASAE*, vol. 16, no. 6, pp. 1136–1139, 1973. doi:10.13031/2013.37715
- [11] A. A. Faruq, M. Zhang, and D. Fan, “Modeling the Dehydration and Analysis of Dielectric Properties of Ultrasound and Microwave Combined Vacuum Frying Apple Slices,” *Drying Technology*, vol. 37, no. 3, pp. 409–423, May 2018. doi:10.1080/07373937.2018.1465433
- [12] S. Pabis, and S. Henderson, “Grain Drying Theory: II. A Critical Analysis of The Drying Curve of Shelled Maize,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 6, no. 4, 272–277, 1961.
- [13] E. Horuz, H. Bozkurt, H. Karataş, and M. Maskan, “Simultaneous Application of Microwave Energy and Hot Air to Whole Drying Process of Apple Slices: Drying Kinetics, Modeling, Temperature Profile and Energy Aspect,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 2, pp. 425–436, Sep. 2017. doi:10.1007/s00231-017-2152-y
- [14] M. Özdemir and Y. Onur Devres, “The Thin Layer Drying Characteristics of Hazelnuts During Roasting,” *Journal of Food Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 225–233, Dec. 1999. doi:10.1016/s0260-8774(99)00126-0

- [15] M. S. Rahman, C. O. Perera, and C. Thebaud, “Desorption Isotherm and Heat Pump Drying Kinetics of Peas,” *Food Research International*, vol. 30, no. 7, pp. 485–491, Aug. 1997. doi:10.1016/s0963-9969(98)00009-x
- [16] P. K. Chandra, and R. P. Singh, *Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers*, 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994.
- [17] N. Kumar, B. C. Sarkar, and H. K. Sharma, “Mathematical Modelling of Thin Layer Hot Air Drying of Carrot Pomace,” *Journal of Food Science and Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 33–41, Feb. 2011. doi:10.1007/s13197-011-0266-7
- [18] N. Malekjani, S. M. Jafari, M. H. Rahmati, E. E. Zadeh, and H. Mirzaee, “Evaluation of Thin-Layer Drying Models and Artificial Neural Networks for Describing Drying Kinetics of Canola Seed in A Heat Pump Assisted Fluidized Bed Dryer,” *ijfe*, vol. 9, no. 4, pp. 375–384, Nov. 2013. doi:10.1515/ijfe-2012-0136
- [19] K. Pituphromphan, N. Phumisa-at, and L. Wiset, “Drying of Paddy Seed Flour by Heat Pump Dryer,” *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 32, no. 5, pp. 622–625, 2013. (in Thai)