



บทความวิจัย

## จลนพลศาสตร์การอบแห้งของไม้ยางพาราผ่านคลื่นไมโครเวฟ

### Drying kinetics of rubberwood drying by microwave

สันติ ขำตรี<sup>1</sup> กฤษณา พวงสุวรรณ<sup>2\*</sup> รอยหทัย แก้วใหม่<sup>1</sup> ณรงค์ศักดิ์ สีขาว<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาการจัดการนวัตกรรมอุตสาหกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ต.ท่าจิว อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช 80280

<sup>2</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ต.มะขามเตี้ย อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี 84000

Santi Khamtree<sup>1</sup> Kritsada Puangsuwan<sup>2\*</sup> Roihatai Kaewmai<sup>1</sup> Narongsak Seekao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Innovation Management for Environment, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Tha Ngio Sub-District, Mueang District, Nakhon Si Thammarat, 80280

<sup>2</sup> Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Ma-kham-tia Sub-District, Muang District, Suratthani, 84000

\* Corresponding author.

E-mail: kritsada.pu@psu.ac.th; Telephone: 0890007013

วันที่รับบทความ 16 มีนาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 1 เมษายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ 24 พฤษภาคม 2565

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น และอัตราการอบแห้งของไม้ยางพาราในแต่ละเงื่อนไขด้วยคลื่นไมโครเวฟ ไม้ยางพาราเป็นวัสดุที่เป็นความต้องการในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ซึ่งเป็นสินค้าส่งออกสำคัญของประเทศซึ่งภาคใต้ถือเป็นแหล่งผลิตวัตถุดิบหลัก สำหรับการทดลองใช้ไม้ยางพาราขนาดเดียวกันกับโรงงานและถูกอบเพื่อลดปริมาณความชื้นภายใต้เงื่อนไขของตารางการอบซึ่งมี 2 รูปแบบ ได้แก่การอบที่มีการปรับกำลังคลื่นไมโครเวฟสูงจากสูงไปต่ำเป็นเวลา 90 นาทีและเวลา 150 นาที มีการควบคุมความเร็วลมในการกำจัดความชื้นอยู่ที่ระดับ 1.5 และ 3 เมตรต่อวินาที โดยกำลังคลื่นไมโครเวฟอยู่ในช่วงระหว่าง 0.85 ถึง 2.6 กิโลวัตต์ มีอุณหภูมิอบสูงสุดอยู่ที่ 81.5 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าอัตราการความชื้นในการอบจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเนื่องจากการใช้ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟที่สูง แบบจำลองของคณิตศาสตร์ลอการิทึมจากตารางการอบแบบที่ 1 และความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที มีความแม่นยำในการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบด้วยคลื่นไมโครเวฟมากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าการทดลองและมีค่า  $R^2$  สูงสุดคือ 0.9999 และค่าสมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง  $1.518 \times 10^{-9}$  และ  $1.572 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที ของการทดลองแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ การอบด้วยคลื่นไมโครเวฟจะช่วยลดปริมาณความชื้นภายในไม้ให้แห้งอย่างสม่ำเสมอและมีความเค้นตึงค่างที่น้อยซึ่งเป็นทางเลือกในการอบไม้แบบเร่งด่วนต่อไป

#### คำสำคัญ

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ จลนพลศาสตร์การอบแห้ง สมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ไม้ยางพารา

#### Abstract

There is a large demand to export rubberwood in the furniture industries of Thailand, which has major rubberwood resources in its southern areas. This research studied two different methods for drying rubberwood and specifically drying kinetics, modeling, effective moisture diffusivity, and wood drying rate in a microwave oven. In the experiments, the same size of a piece of rubberwood as typically used in a factory, and two different approaches were applied to dry the pieces of rubberwood to reduce their moisture content. Drying control was regulated by microwave power, which adjusted the

microwave power from high to low within 90 min and 150 min. The airflow was either 1.5 m/s or 3.0 m/s, and microwave power ranged between 0.85 and 2.6 kW. The highest temperature was 81.5 °C. The results indicated that moisture was removed very quickly in the first period due to the high power of the microwave drying method. The logarithmic model of schedule 1 was the most accurate representation of the drying kinetics of the microwave as compared to the experimental data, and this model had an  $R^2$  coefficient of 0.9999 to describe the drying process. The effective diffusivity of the moisture ranged from  $1.518 \times 10^{-9}$  และ  $1.572 \times 10^{-9}$   $m^2/\text{mins}$ , respectively. Microwave drying of rubberwood removed the moisture content inside the wood and reduced the internal stress of the wood, both of which accelerated wood drying.

## Keywords

microwave drying; drying kinetics; effective moisture diffusivity; rubberwood

## 1. คำนำ

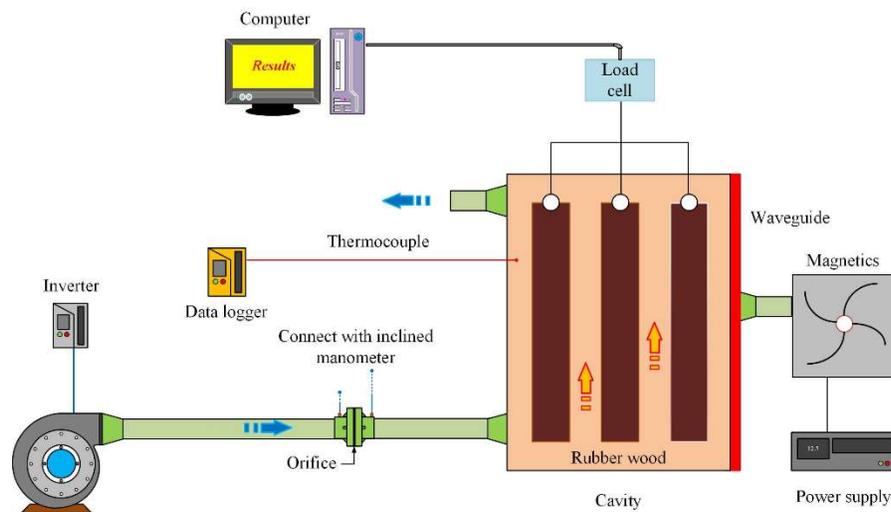
ในปัจจุบันไม้ยางพาราแปรรูปเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตเฟอร์นิเจอร์และประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกยางพาราใหญ่เป็นอันดับสองของโลก [1] มีมูลค่าส่งออกไปยังต่างประเทศไม่น้อยกว่า 40,000 ล้านบาทต่อปี [2] โดยพลังงานเป็นหัวใจสำคัญต่อกระบวนการให้ความร้อนแก่ไม้ยางพาราเพื่อไล่ปริมาณความชื้น ส่วนใหญ่ใช้กระบวนการอบแบบดั้งเดิมคือ เตาอบ โดยอาศัยการพัดพาความร้อนเป็นเทคนิคที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงเกินไป อย่างไรก็ตาม วิธีการอบแบบนี้การกระจายความร้อนไม่ทั่วถึงทั้งวัสดุ ยังมีความชื้นหลงเหลืออยู่ในวัสดุบางส่วน ผลผลิตหลังผ่านการอบด้วยวิธีการนี้แล้วก็ยังคงเกิดเชื้อรา นอกจากนี้วิธีการอบนี้ใช้เวลานาน สิ้นเปลืองพลังงาน และก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งพบว่ามีการวิจัยจำนวนน้อยที่นำพลังงานการอบชนิดอื่นมาใช้ในการอบอย่างเช่นคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอบไม้ ซึ่งหากพิจารณาการสิ้นเปลืองพลังงานในมิติเชิงเศรษฐศาสตร์ในเรื่องต้นทุนเพียงด้านเดียวอาจมีต้นทุนสูงกว่าการอบแบบดั้งเดิม แต่อาจจะนำมาใช้ร่วมกับการอบไม้วิธีแบบดั้งเดิม [3] ซึ่งมีความเป็นไปได้มากที่จะกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอและอบรวดเร็วขึ้นกว่าวิธีอบแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังคงรักษาคุณภาพของไม้ยางพาราหลังผ่านการอบไว้เหมือนเดิม มีการศึกษาการอบไม้ยางพาราและวัสดุชนิดอื่นด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนอันได้แก่ Le และคณะ พัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายการอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งไม้ปาร์ติเกิลโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองสำหรับหาสภาวะความชื้นที่แพร่กระจายเหมาะสมของการอบที่ใช้ไม้ปาร์ติเกิลเป็นวัสดุ [4] Chanpet และคณะ ได้ศึกษาพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การอบ

ไม้ยางพารา พบว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลและช่วยให้ความชื้นสมดุลภายในไม้ได้สูง [5] Fernando และคณะ อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบเศษไม้ พบว่าความเร็วลมในการอบมีผลต่อขนาดชื้นไม้ อย่างมีนัยสำคัญ [6] Li และคณะ ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำซึบและน้ำอิสระภายในไม้ป๊อปลาร์ที่อบด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR) เป็นเครื่องมือช่วยตรวจสอบ พบว่าการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีอัตราการอบแห้งรวดเร็วและมีความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาอบ นอกจากนี้ การเพิ่มกำลังไฟฟ้าช่วยให้ความชื้นภายในไม้สามารถดูดซับพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิและอัตราการระเหยสูงตามไปด้วย [7] Kadem และคณะ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 มิติ เป็นแนวทางในการออกแบบเตาอบ แต่ยังไม่ปราศจากแนวทางสู่การปฏิบัติจริง และผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีความสำคัญต่อการอบไม้ยางพาราและการเตรียมไม้ยางพารา อีกทั้งข้อจำกัดในการอบไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟ เช่น ปัญหาการเกิดจุดไหม้ภายในเนื้อไม้ หากใช้เวลาอบเป็นระยะเวลานาน รวมถึงการปรับปรุงคุณภาพการอบที่ควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อลดการใช้พลังงานและเวลาอบให้สั้นลง [8] [9]

จากปัญหาดังกล่าวจึงจะศึกษาจลนพลศาสตร์การอบไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟในแต่ละเงื่อนไขผ่านแบบจำลองคณิตศาสตร์ อัตราการอบ สมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของไม้ยางพาราอาศัยกฎข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's) และสมการอาร์เรเนียสในการคำนวณและความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะไม้ยางพาราตามลำดับ

ตารางที่ 1 การทดลองตัวอย่างไม้ยางพาราผ่านกระบวนการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ตารางเงื่อนไขการอบ (SC)	ระดับกำลังไมโครเวฟ (kW)	ความเร็วลม (m/s)	เวลาในการอบ (min)	เวลาอบรวม (min)
1	2.6	1.5	50	90
	1.8		30	
	1		10	
	2.6	3	50	
	1.8		30	
	1		10	
2	2.4	1.5	30	150
	1.6		50	
	0.85		70	
	2.4	3	30	
	1.6		50	
	0.85		70	



รูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบอบแห้งไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟ

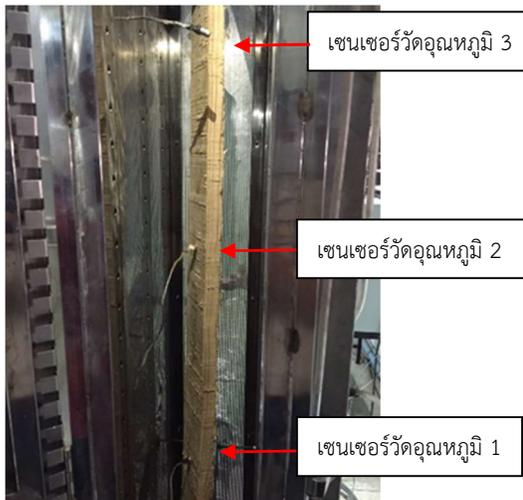
## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การเตรียมวัสดุในการทดลอง

ตัวอย่างทดสอบใช้ไม้ยางพาราต้องปราศจากตำหนิอัน ได้แก่ ไม้มีปม ไม้แตก และมีรา เป็นต้น โดยวัตถุดิบมาจาก โรงงานผลิตไม้ยางพาราในพื้นที่จังหวัดสงขลากำหนดให้ใช้ 9 ชั้นต่อ 1 การทดลองตามขนาดของเครื่องอบไม้ยางพาราและ ใช้ตารางเงื่อนไขการอบ (SC) 2 แบบดังตารางที่ 1 ตัวอย่าง ขนาดไม้ยางพาราขนาดคล้ายคลึงเหมือนกับในโรงงานผลิตไม้

ยางพาราทุกประการประมาณ  $7.62 \times 2.54 \times 117$  ลูกบาศก์ เซนติเมตร [10] มาผ่านกระบวนการอัดน้ำยาเพื่อป้องกันมอด และเชื้อรา หลังจากนั้น นำตัวอย่างไม้ยางพารามาผ่าน กระบวนการให้ความร้อนด้วยต้นแบบระบบอบคลื่นไมโครเวฟ ขนาด  $600 \times 200 \times 1,500$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีการติดตั้งหลอด แมกนีตรอนด้านล่างของควิตี้จำนวน 2 หลอด แต่ละหลอดมี กำลังไฟฟ้า 1.5 กิโลวัตต์ ณ ความถี่ 2.45 GHz ดังรูปที่ 1 มี เงื่อนไขในการทดลองทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อนำเทคนิคการอบด้วย พลังงานคลื่นไมโครเวฟช่วยเสริมการอบแบบดั้งเดิม ที่พิจารณา

จากการเสียรูปของไม้ยางพารา ในขั้นตอนการปรับสภาพไม้ (Pre-treated) ของระบบอบไม้ยางพาราในเรื่องของเวลา และพลังงาน โดยตัวอย่างชิ้นไม้ยางพาราทำการเจาะรูแบ่งระยะ เท่ากันจำนวน 3 ตำแหน่ง และติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K เข้าไปในเนื้อไม้ยางพาราดังรูปที่ 2 ในส่วนการตรวจวัดปริมาณน้ำหนักตัวอย่างไม้ยางพาราที่แปรเปลี่ยนตามระยะเวลาอบผ่านเซนเซอร์น้ำหนัก (Load cell) ที่มีความแม่นยำ 0.001 kg จากตารางที่ 1 การทดลองอบชิ้นไม้ยางพาราครั้งนี้มีการควบคุมปริมาณความชื้นของชิ้นไม้ยางพาราด้วยกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง [11] โดยไม้ยางพารามีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 46 %d.b และทำการอบจนเหลือความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 30 %d.b [12]



รูปที่ 2 การจัดวางตัวอย่างชิ้นไม้ยางพาราในระบบอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ

## 2.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะทดสอบหาความแตกต่างของการอบไม้ยางพารา 2 แบบ ดังตารางที่ 1 [13] มีการปรับระดับกำลังไฟฟ้าของหลอดแมกนีตรอนและระยะเวลาอบเพื่อป้องกันการเกิดจุดเผาไหม้ (Hot spot) ภายในเนื้อไม้ยางพารา [14] และสามารถปรับระดับความเร็วลม 2 ระดับคือ 1.5 m/s และ 3.0 m/s ผ่านพัดลมที่ติดตั้งบริเวณด้านข้างของระบบอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและทดลองอบซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อลดค่าความผิดพลาด ทำการทดลองตามระดับของปัจจัยที่ได้ออกแบบไว้มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1) นำตัวอย่างชิ้นไม้ยางพารามาเก็บภายในตู้ควบคุมความชื้นระหว่าง 65 ถึง 70% จำนวน 2 ล็อตตามการทดลองดังตารางที่ 1

2) นำตัวอย่างชิ้นไม้ยางพารามาเจาะรูเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับตรวจวัดค่าอุณหภูมิในเนื้อไม้ในต้นแบบระบบอบด้วยคลื่นไมโครเวฟแสดงดังรูปที่ 2

3) ขณะอบตัวอย่างชิ้นไม้ยางพาราจะบันทึกน้ำหนักที่แปรเปลี่ยนเพื่อคำนวณหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบที่ปรากฏบนจอมิเตอร์

4) หลังผ่านการอบจะนำตัวอย่างชิ้นไม้ยางพารามาทดสอบค่าความเค้นตักด้วยวิธีแบบซี่ส้อม (Prong test) [15]

## 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการอบแห้งไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยกฎข้อที่ 2 ของฟิกส์ (Fick's) [16] งานวิจัยนี้กำหนดชิ้นไม้ยางพารามีรูปร่างสี่เหลี่ยม (Infinite slab) โดยเทียบเคียงระหว่างข้อมูลการอบแห้งแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กับข้อมูลการทดลองผ่านรูปแบบสมการดังตารางที่ 2 ในการศึกษาจลศาสตร์ความชื้นของชิ้นไม้ยางพาราในแบบมาตรฐานแห้ง (Dry basis) เพื่อคำนวณอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) เป็นการแปรเปลี่ยนปริมาณความชื้นขณะอบกับเวลาอบดังสมการที่ (1) [17]

$$MR = \frac{m - m_e}{m_o - m_e} \quad (1)$$

เมื่อ  $m$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (%d.b)

$m_o$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (%d.b)

$m_e$  คือ ความชื้นสมดุล (%d.b)

## 2.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากกฎข้อที่ 2 ของฟิกส์เกี่ยวกับการแพร่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับเวลาในการอบที่นานจะพิจารณาเฉพาะเทอมแรกในสมการที่ (2) เนื่องด้วยการควบคุมการแพร่ปริมาณความชื้นภายในและอัตราการอบแห้งของชิ้นไม้ยางพารา [18]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2}\right) \quad (2)$$

การคำนวณค่า  $MR$  ของชิ้นไม้ยางพาราในสมการที่ (2) สำหรับในเทอมอนันต์สามารถละทิ้ง [19] เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมหลัก

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2}\right] \quad (3)$$

ประยุกต์ใช้ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithms) ทั้งสองด้านในสมการที่ (3) เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(MR)$  กับเวลาอบ ( $t$ ) จะได้ความชันของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลดังสมการที่ (4)

$$D_{eff} = -\left(\frac{4L_0^2}{\pi^2}\right) \text{Slop} \quad (4)$$

เมื่อ  $D_{eff}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ( $m^2/s$ ) และ  $L_0$  คือครึ่งหนึ่งความหนาของวัสดุ ( $m$ )

## 2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์รูปแบบทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Empirical Model) ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งที่เหมาะสมด้วยการพล็อตข้อมูลของกราฟในการอบด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงสถิติ Sigma plot ส่วนการประเมินความน่าเชื่อถือความสัมพันธ์ผลจากแบบจำลองและผลการทดลองของ  $MR$  อ้างด้วยค่าสหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ค่าการลดลงของไคสแควร์ (Chi square,  $\chi^2$ ) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error,  $RMSE$ ) ดังสมการที่ (5-7) เพื่อบ่งชี้ถึงความถูกต้องของพารามิเตอร์และแบบจำลอง  $MR$  ของชิ้นไม้ยางพารา แบบจำลองจะน่าเชื่อถือเมื่อ  $R^2$  มีค่าสูง  $RMSE$  มีค่าต่ำ และ  $\chi^2$  มีค่าต่ำ [20, 21]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (MR_{pre,n} - MR_{exp,n})^2}{\sum_{n=1}^N (MR_{pre,n} - MR_{exp,n})^2} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (MR_{pre,n} - MR_{exp,n})^2}{N - z} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (MR_{pre,n} - MR_{exp,n})^2 \right] \quad (7)$$

เมื่อ  $MR_{exp,n}$  คืออัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง  $MR_{pre,n}$  คืออัตราส่วนความชื้นจากการทำนาย  $N$  คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการสังเกต และ  $z$  คือจำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

## 2.6 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ระเหยจากชิ้นไม้ยางพารา (Water loss,  $W_{loss}$ ) และเวลาอบ ( $t$ ) มีหน่วยเป็น kg/hr ดังสมการที่ (8) [22]

$$DR = \frac{W_{loss}}{t} \quad (8)$$

## 2.7 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Specific Energy Consumption ( $SEC$ ) คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ มีหน่วยเป็น MJ/kg [23, 24] ดังสมการที่ (9)

$$SEC = \frac{3.6 E_p}{W_{loss}} \quad (9)$$

เมื่อ  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้ง

Model name	Model equation	Reference
Page	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq})] = \exp(-k.t^n)$	[25]
Henderson and Pabis	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq})] = a \cdot \exp(-k.t)$	[26]
Logarithmic	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq})] = a \cdot \exp(-k.t) + c$	[27]
Two-term Exponential	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq})] = a \cdot \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k.a.t)$	[28]
Diffusion Approximation	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq})] = a \cdot \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k.b.t)$	[29]

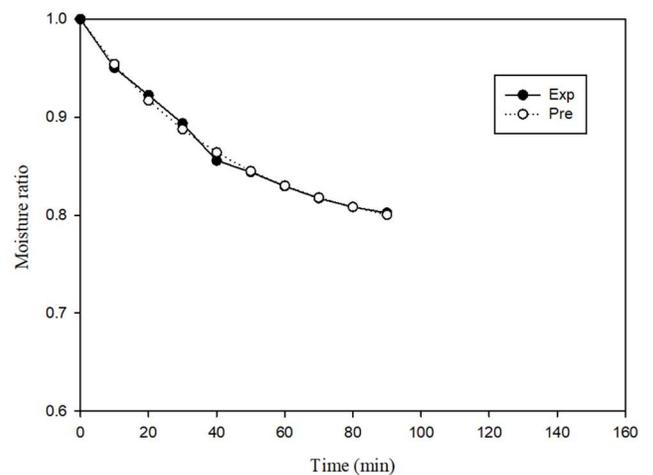
ตารางที่ 3 ผลลัพธ์เชิงสถิติของแบบจำลองการอบแห้งอย่างพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Model name	SC	Coefficiency	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
Page	1	$k=0.0137, n=0.6305$	0.9837	0.0000	0.0000
Henderson & Pabis	1	$k = 0.0025, a=0.9725$	0.9359	0.0003	0.0001
Logarithmic	1	$k = 0.0224, a = 0.2304, c = 0.7698$	0.9999	0.0000	0.0000
Two-term Exponential	1	$k = 0.0029, n = 0.9898$	0.9958	0.0922	0.0358
Diffusion Approximation	1	$k = 0.00278, a = 0.9598, b=0.0573$	0.9919	0.0926	0.0360
Page	2	$k = 0.0170, a = 0.6333$	0.9756	0.0004	0.0001
Henderson & Pabis	2	$k = 0.0025, a = 0.9441$	0.9592	0.0007	0.0002
Logarithmic	2	$k = 0.0005, a = 0.5299, c = 0.4244$	0.9624	0.0007	0.0002
Two-term Exponential	2	$k = 0.0032, a = 0.9998$	0.9213	0.0024	0.0009
Diffusion Approximation	2	$k = 0.0031, a = 0.9898, b=0.0015$	0.9222	0.0024	0.05732

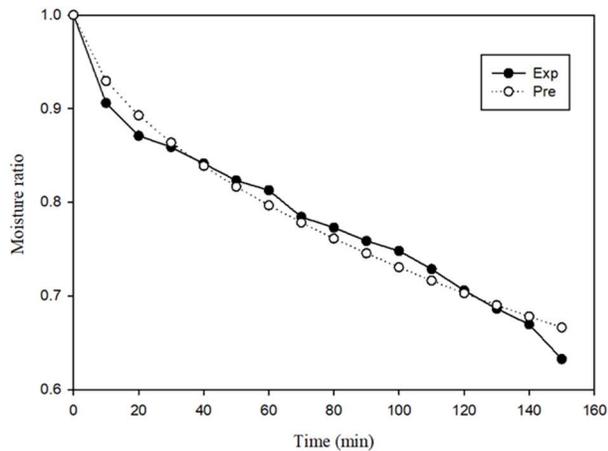
### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

#### 3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมการทางคณิตศาสตร์ของชิ้นไม้ยางพารา

การอบแห้งอย่างพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟ ณ การควบคุมเงื่อนไขที่แตกต่างกันคือ ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟ อุณหภูมิ และระยะเวลาอบแห้งตารางที่ 1 นำมาวิเคราะห์ความแม่นยำของค่าเฉลี่ย  $MR$  ของชิ้นไม้ยางพาราผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล 5 วิธี เพื่อพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งผ่านการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงสถิติ ค่า  $R^2$   $\chi^2$  และ  $RMSE$  ของแบบจำลองดังตารางที่ 2 ในการทำนายแบบจำลอง  $MR$  ที่แม่นยำจะต้องมีค่า  $R^2$  ที่สูง และค่า  $RMSE$  ระดับต่ำที่สุด ผลการเทียบเคียงของแต่ละแบบจำลอง  $MR$  ของชิ้นไม้ยางพาราแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบผ่านแบบจำลองคณิตศาสตร์ลอการิทึม

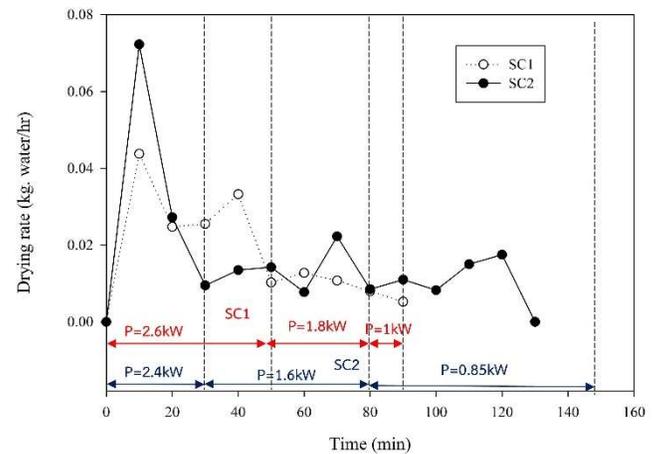


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบผ่านแบบจำลอง Page

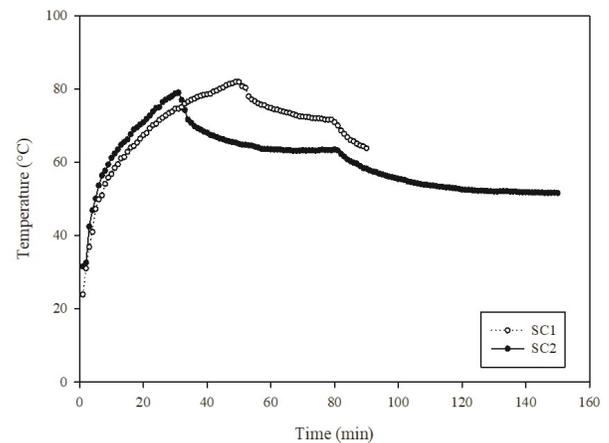
จากรูปที่ 3 ในเงื่อนไขการอบ SC 1 พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ลอการิทึม (Logarithmic) และ Two-term Exponential มีค่า  $R^2$  สูงสุดคือ 0.9999 และ 0.9958 ตามลำดับ และค่า  $\chi^2$  และค่า RMSE น้อยคือ 0.0000, 0.0000 และ 0.0922, 0.0358 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ในส่วนผลของตารางการอบเงื่อนไข SC 2 และรูปที่ 4 แบบจำลองของเพจ (Page) มีค่า  $R^2$  สูงสุดคือ 0.9756 และมีค่า  $\chi^2$  และค่า RMSE น้อยคือ 0.0004 และ 0.0001 ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ลอการิทึมสามารถทำนายค่า  $MR$  ของชิ้นไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟได้แม่นยำและมีความเหมาะสมที่สุด

### 3.2 อัตราการอบแห้ง

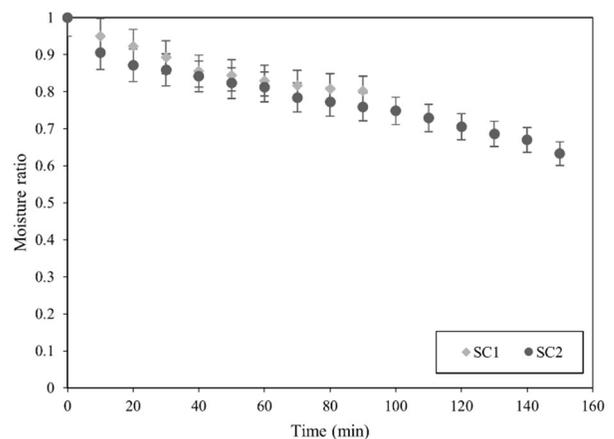
เมื่อทดลองอบชิ้นไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟตามเงื่อนไขที่ควบคุม ผลลัพธ์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นไม้ยางพาราและค่า  $MR$  มีการลดลงตามระยะเวลาอบ โดยในช่วงแรกอัตราการอบของ SC 2 จะมีค่าสูงกว่า SC 1 อันเนื่องมาจากอุณหภูมิภายในไม้ที่สูงขึ้นในช่วงแรกและการระเหยของน้ำอิสระ (Free water) ที่มีปริมาณมากอยู่ในชิ้นไม้ยางพาราและลดต่ำลงในช่วงกลาง ก่อนจะปรับตัวสูงขึ้นในช่วงท้ายเพียงเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 5-6 ซึ่งเวลาอบที่ลดลงจะสอดคล้องกับกำลังคลื่นไมโครเวฟ ในขณะที่ค่า  $MR$  จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อกำลังคลื่นไมโครเวฟ 0.85 kW และระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่ 2.6 kW จะลดลงมากขึ้นดังรูปที่ 7



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลาอบ



รูปที่ 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิในการอบชิ้นไม้ยางพาราแต่ละเงื่อนไขทดลอง

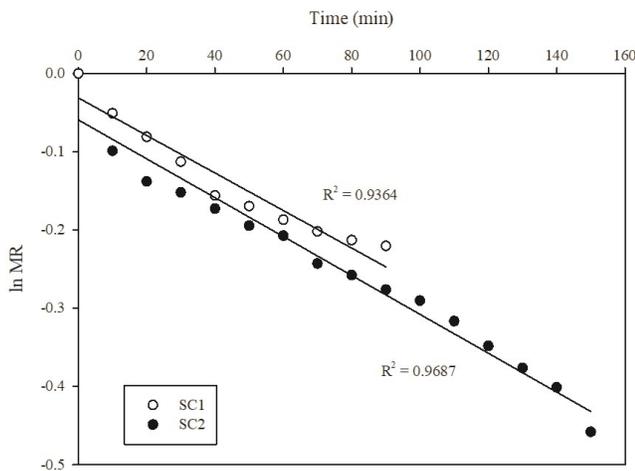


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบ

### 3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นขึ้นประสิทธิผล

ในการอบชิ้นไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีการควบคุมเงื่อนไขทดลอง  $D_{eff}$  เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการ

อธิบายการแพร่กระจายของโมเลกุลของของเหลวภายในชิ้นไม้ ยางพาราจากบริเวณความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณความเข้มข้นต่ำดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln MR กับเวลาของการอบแห้ง ไม้ยางพาราในแต่ละเงื่อนไขการอบ

ในงานวิจัยนี้  $D_{eff}$  ของชิ้นไม้ยางพาราคำนวณจากค่า MR ของชิ้นไม้ยางพาราที่ได้จากการทดลองนั้นมีความสัมพันธ์ต่อ พารามิเตอร์ความเร็วลม อุณหภูมิ และระดับกำลังคลื่น ไมโครเวฟสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3) ซึ่งหาค่า  $D_{eff}$  ได้จากความชันของกราฟจากการทดลองในสมการที่ (4) ดังรูป ที่ 8 หากกำลังคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้นทำให้ค่า  $D_{eff}$  เพิ่มขึ้น ตามสมการที่ (3) เนื่องด้วยกำลังคลื่นไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นย่อม ทำให้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ผลดังกล่าวทำให้ความชื้นเคลื่อน

ออกจากชิ้นไม้ยางพาราอย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์ของค่า  $D_{eff}$  ของ ชิ้นไม้ยางพาราของตารางการอบเงื่อนไข SC 1 และเงื่อนไข SC 2 เท่ากับ  $1.518 \times 10^{-9}$  และ  $1.572 \times 10^{-9}$   $m^2/mins$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแบบลมร้อน [30]

### 3.4 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ในช่วงการทดลองการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสำหรับการระเหยของน้ำ 1 กรัมของไม้ยางพาราจากกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟคำนวณค่าได้จากสมการที่ (9) และแสดงผลในตารางที่ 4 เป็นผลอัตราการอบแห้งด้วยคลื่น ไมโครเวฟที่ระดับกำลังไมโครเวฟต่างๆ ผลการเพิ่มของค่า SEC นั้นมีความสัมพันธ์กับการลดของกำลังคลื่นไมโครเวฟในการอบ แต่ละเงื่อนไขดังตารางที่ 1 ที่ใช้ในการอบ SC 1 และ 2 การลด การสิ้นเปลืองพลังงานเกิดขึ้นจากปริมาณการกระจายความร้อนด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟนั้นพิจารณาถึงเวลาอบที่ลด การลดความเร็วลมไม่มีนัยสำคัญกับค่า SEC โดยมีค่า SEC สูงสุด (22.599 MJ/kg) จาก SC 2 ความเร็วลม 3 m/s อุณหภูมิสูงสุด 81.5 °C ใช้ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟสูงสุด เท่ากับ 2.4 kW ต่ำสุดเท่ากับ 850 W ในทางกลับกันจาก SC 2 มีค่า SEC ต่ำสุด (13.216 MJ/kg) ที่ความเร็วลม 1.5 m/s อุณหภูมิสูงสุด 74.6 °C เป็นข้อบ่งชี้ว่าการลดลงของความเร็ว ลมและการเพิ่มขึ้นของเวลาอบแปรผกผันกับค่า SEC เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวเป็นผลมาจากการลดของ เวลาอบและค่าสิ้นเปลืองพลังงานและการเพิ่มขึ้นของกำลัง คลื่นไมโครเวฟส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิอบเพิ่มขึ้น ตามลำดับ [31]

ตารางที่ 4 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

No.	SC	ความเร็วลม (m/s)	SEC (MJ/kg)
1	2	1.5	13.216
2	2	3	22.599
3	1	1.5	14.625
4	1	3	15.538
5	1	1.5	17.391
6	1	3	14.504
7	2	1.5	15.021
8	2	3	21.978

### 3.5 ลักษณะไม้ยางพาราหลังการอบ

ทั่วไปเมื่อขึ้นไม้ยางพาราผ่านกระบวนการอบเสร็จสิ้นแล้ว จะมีการทดสอบปริมาณความชื้นภายในขึ้นไม้ยางพาราด้วย เครื่องมือวัดปริมาณความชื้นหรือการนำชิ้นส่วนมาทดสอบหา ความเค้นในไม้ด้วยวิธี Prong test ดังรูปที่ 9 และ 10 ผลจากการทดสอบไม้มีองศาการเปื่อยเบนของไม้ในแต่ละตารางการอบอยู่ที่ SC1 เฉลี่ย 1.36 และ SC2 เฉลี่ย 0.79 องศา ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



รูปที่ 9 ลักษณะไม้หลังจากผ่านการอบ



รูปที่ 10 การทดสอบไม้ด้วยวิธี Prong test

### 4. สรุปผลการศึกษา

จลนพลศาสตร์การอบแห้งของขึ้นไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟ ณ ความเร็วลมร้อน 1.5 m/s และ 3 m/s ดังตารางในการอบ 2 ตาราง มีกำลังคลื่นไมโครเวฟสูงสุดคือ 2.6 kW ต่ำสุด 0.85 kW ใช้เวลาอบระหว่าง 90 ถึง 150 นาที ในช่วงระยะแรกของการอบจะใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟที่สูงส่งผลให้

การกระจายอุณหภูมิอบปรับตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆ ลดลงตามลำดับ ในการทำนายการอบขึ้นไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟ จากตารางการอบแบบที่ 1 ความเร็วลม 3 m/s พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ลอการิทึม และ Two-term Exponential มีความแม่นยำที่สุดเนื่องด้วยค่า MR ของการทดลองและการทำนายมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูง ค่าการลดลงของโคสแควร์ต่ำ และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความถูกต้องของพารามิเตอร์ ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถยอมรับว่าเป็นแบบเอมพิริคัลที่อธิบายพฤติกรรมของการอบขึ้นไม้ยางพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในส่วนค่า  $D_{eff}$  อยู่ระหว่าง  $1.518 \times 10^{-9}$  และ  $1.572 \times 10^{-9}$   $m^2/mins$  เทคนิคที่ใช้ในการอบครั้งนี้จะช่วยลดปัญหาการเกิดจุดไหม้ (Hot spot) ในเนื้อไม้ยางพารา เนื่องด้วยใช้ระยะเวลาและความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบน้อย นอกจากนี้ปริมาณความชื้นภายในขึ้นไม้ยางพารามีค่าที่เหมาะสมสามารถลดการเสีรूपของขึ้นไม้ได้ งานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดหรือเป็นทางเลือกในการอบเพื่อลดความชื้นในกรณีเร่งรีบก่อนนำไปอบต่อในเครื่องอบแบบลมร้อนหรือเครื่องอบด้วยไอน้ำต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ รัตนวิไล และหน่วยวิจัย เทคโนโลยีไม้ยางพาราและการจัดการ (Rubberwood Technology and Management Research) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการทดลอง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ทวิช กล้าแท้, นภดล ศรีภักดี, ชยณัฐ บัวทอง เกื้อ และนฤพล ดีตาช. การใช้ประโยชน์จากเถ้าไม้ยางพาราในผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*. 2563;12(1): 36-48
- [2] พรชัย เพชรสงคราม, ปัญญารักษ์ งามศรีตระกูล. สมการอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ยางพาราความหนา 25.4 มิลลิเมตร. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. 2561;41(3): 323-346.
- [3] Ratanawilai T, Nuntadusit C, Promtong, N. Drying characteristics of rubberwood by impinging hot-

- air and microwave heating. *Wood Research*. 2015;60(1):59–70.
- [4] Le KH, Tran TTH, Tsotsas E, Kharaghani A. Superheated steam drying of single wood particles: modeling and comparative study with hot air drying. *Chemical Engineering and Technology*. 2021; 44(1), 114–123.
- [5] Chanpet M, Rakmak N, Matan N, Siripatana C. Effect of air velocity, temperature, and relative humidity on drying kinetics of rubberwood. *Heliyon*, 2020; 6(10).
- [6] Fernando N, Narayana M, Wickramaarachchi WAMKP. The effects of air velocity, temperature and particle size on low-temperature bed drying of wood chips. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2018; 8(1), 211–223.
- [7] Li X, Gao Y, Zhang M, Wang X, Wei X. Water migration in poplar wood during microwave drying studied by time domain nuclear magnetic resonance (TD-NMR). *Holzforchung*, 2017;71(11): 881–887.
- [8] Dedic ADJ, Svrzic SV, Janevski JN, Stojanovic, B, Milenkovic MDJ. Three-dimensional model for heat and mass transfer during convective drying of wood with microwave heating. *Journal of Porous Media*, 2018; 21(10): 877–886.
- [9] Kadem S, Younsi R, Lachemet A. Computational analysis of heat and mass transfer during microwave drying. *Thermal Science*. 2016; 20(5):1447–1455.
- [10] Khamtree S, Ratanawilai T, Nuntadusit C. An approach for indirect monitoring of moisture content in rubberwood (*Hevea brasiliensis*) during hot air drying. *Drying Technology*. 2019;37(16): 2116–2125.
- [11] Khamtree S, Ratanawilai T, Nuntadusit C, Marzbani H. Experimental study and numerical modeling of heat and mass transfer in rubberwood during kiln drying. *Heat and Mass Transfer*. 2021;57(3): 453–464.
- [12] Vongpradubchai S, Rattanadecho P. Microwave and hot air drying of wood using a rectangular waveguide. *Drying Technology*. 2011;29(4): 451–460.
- [13] สุวิทย์ แพงกันยา, อติศักดิ์ นาถรณ์กุล, สมชาติ โสภณ รณฤทธิ์. การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ. *วารสารวิจัย มช*. 2559;16(3):102-111.
- [14] Farag S, Sobhy A, Akyel C, Douceta J, Chaouki J. Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45GHz. *Applied Thermal Engineering*. 2012; 36: 360–369.
- [15] Chen ZJ, Lamb FM. A vacuum drying system for green hardwood parts. *Drying Technology*. 2004;22(3): 577–595.
- [16] Onwude DI, Hashim N, Abdan K, Janius R, Chen G. Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption. *Heat and Mass Transfer*. 2018;54(10): 2917–2933.
- [17] บัณฑิต กฤตาคม, ปณิธิ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ, อัมไพศักดิ์ ทิบุญญา, โสภณ ลินสร้าง. แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ*. 2556;6(1): 1-8.
- [18] Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford; 1975.
- [19] Puangsuwan K, Chongcheawchamnan M, Tongura C. Effective moisture diffusivity, activation energy and dielectric model for palm fruit using a microwave heating. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2015;49(2): 100–111.
- [20] Caglar A, Togrul IT, Togrul H. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying. *Food and Bioproducts Processing*. 2009;87(4): 292-300.
- [21] ภราดร หนูทอง, ไพรัชต์ ดิฐคณาภิรักษ์กุล, รัชตวรรษณ เอ็มโอช, อนุชา พรหมสิทธิ. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน.

- วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2557;7(2):73-81.
- [22] Róger M, Urueña E, Salas C, Muñoz F, Espinoza, O. Kiln drying behavior of lumber from ten fast-growth plantation species in costa rica. *Wood Material Science and Engineering*. 2013;8(1): 37–45.
- [23] กิตติศักดิ์ วิจิณันท์กิตต์, ณรงค์ อั้งกิมบัวน, สิทธิชัย รุ่งสว่าง. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2562;14(3):1-13.
- [24] ธนกร หอมจำปา, ทรงสุภา พุ่มชุมพล, อำไพศักดิ์ ทีปัญญา. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอบแห้งปลานิลโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับ. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ*. 2564;4(2):1-9.
- [25] Faruq AA, Zhang M, Fan D. Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices. *Drying Technology*. 2019; 37(3): 409–423.
- [26] Pabis S, Henderson SM. Grain drying theory: II. A critical analysis of the drying curve of shelled maize. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1961;6: 272–277.
- [27] Horuz E, Bozkurt H, Karata SH, Maskan M. 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*. 2018;54(2): 425–436.
- [28] Chandra, Prabir K, Singh RP. *Applied numerical methods for food and agricultural engineers*. CRC Press, London; 1993.
- [29] Kumar N, Sarkar BC, Sharma HK. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of Food Science and Technology*. 2012;49(1): 33–41.
- [30] จุฑารัตน์ ทะสระระ, สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล, ยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล. แนวทางการพัฒนาปลาข้าวสารกรอบด้วยการอบแห้งลมร้อนและรังสีอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 2557;19(1): 1-10.
- [31] Ouertani S, Koubaa A, Azzouz S, Bahar R, Hassini L, Belghith A. Microwave drying kinetics of jack pine wood: determination of phytosanitary efficacy, energy consumption, and mechanical properties. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018;76(4): 1101–1111.