



## การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กึ่งฝอยอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

### Mathematical Modelling of Shrimp Drying by Microwave Assisted Hot Air

มงคลชัย คำปากดี<sup>1\*</sup> และ ไมตรี พลสงคราม<sup>2</sup>

Mongkolchai Kampagdee<sup>1\*</sup> and Maitee Phonsongkarm<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>1</sup>Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

<sup>2</sup>Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

Received : 19 August 2021

Revised : 5 October 2021

Accepted : 8 March 2022

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา จลนพลศาสตร์ พลังงานไฟฟ้าจำเพาะและสมการทางคณิตศาสตร์ทำนายผลการอบแห้งกึ่งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่เงื่อนไขการทดลองความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 3, 4.5 และ 6 วัตต์ต่อกรัม และอุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที พบว่าเมื่อความหนาแน่นของไมโครเวฟและอุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะมีค่าลดลง ลดระยะเวลาการอบแห้งส่งผลให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะลดลง สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น พบว่า สมการ page ทำนายผลการอบแห้งได้ถูกต้องที่สุด โดยมีค่า R<sup>2</sup> สูงที่สุดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.970880765 ถึง 0.999938775 และ  $\chi^2$  มีค่าต่ำสุดอยู่ระหว่าง 0.000045511 ถึง 0.021275109

**คำสำคัญ** : อบแห้ง ; การพาความร้อน ; ไมโครเวฟ ; แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



### Abstract

This article aims to study kinetics, Specific electric power and Mathematical equations predict the results of drying the shrimp in a microwave assisted hot air. Experimental conditions for 3 levels of microwave density is 3, 4.5 and 6 W/g and hot air temperature 3 levels is 50, 60 and 70 °C at air velocity of 1 m/s. The results showed that the rate of moisture reduction increased with an increase in drying temperature and microwave power. It can shorten the drying time, resulting in lower specific energy consumption. Furthermore, the mathematical model used to predict changes in moisture ratios, Page mathematical model gave the most appropriate predictions due to the highest coefficient of determination values range from 0.970880765 to 0.999938775 and the lowest chi square range from 0.000045511 to 0.021275109

**Keyword** : drying of shrimp ; convection ; microwave ; mathematical modeling

## บทนำ

กุ้งฝอย (*Macrobrachium lanchesteri*) เป็นกุ้งน้ำจืดขนาดเล็กที่พบได้ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งนิยมนำมาทำอาหารกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและสามารถนำมาประกอบอาหารได้หลายรูปแบบ นอกจากนี้กุ้งฝอยยังนิยมนำมาแปรรูปทำเป็นกุ้งแห้งเพื่อให้สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน โดยที่กุ้งฝอยสามารถรักษารสชาติและสีของกุ้งไว้ได้โดยไม่ทำให้เกิดการเน่าเสีย

การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่ใช้กันมากที่สุดวิธีหนึ่งเนื่องจากสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ (Chen *et al.*, 2021) การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนและมวลสารพร้อมกัน โดยขับเคลื่อนด้วยพลังงานความร้อน ซึ่งวิธีนี้ใช้ระยะเวลาอบแห้งนาน (Shen *et al.*, 2020) สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสามารถในการให้ความร้อนเชิงปริมาตรที่เป็นเอกลักษณ์และความสามารถลดเวลาในการอบแห้งและปรับปรุงคุณภาพอาหารได้อย่างดี (Kumar & Karim, 2019) อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียบางประการคือความร้อนในการอบแห้งจะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (Das & Arora, 2018)

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟและลมร้อน ได้รับความนิยมนานกว่าที่ควร เพราะเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะขับเคลื่อนขึ้นจากภายในของอาหารไปยังพื้นผิวด้านนอกจากนั้นความชื้นจะถูกจัดออกไปโดยลมร้อน วิธีการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนนี้แสดงให้เห็นว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพและช่วยลดเวลาในการอบแห้งอาหารได้เป็นอย่างดี (Song *et al.*, 2016)

ในทางวิศวกรรมการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ถือเป็นความท้าทายในการประเมินพฤติกรรมของการอบแห้ง ดังนั้นเพื่อที่จะทราบและคาดการณ์พฤติกรรมอัตราส่วนความชื้นที่เวลาต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้น ตามของกฎข้อที่สองของ Fick สำหรับรูปทรงต่าง ๆ เพื่อทำนายผลการอบแห้งของอาหาร (Xiao-hui *et al.*, 2014) ซึ่งนิยมใช้ในการศึกษากระบวนการอบแห้งเนื่องจากกระบวนการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ผลการอบแห้งเพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เวลาต่าง ๆ โดยอบแห้งกุ้งฝอยกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

## วิธีการดำเนินการวิจัย

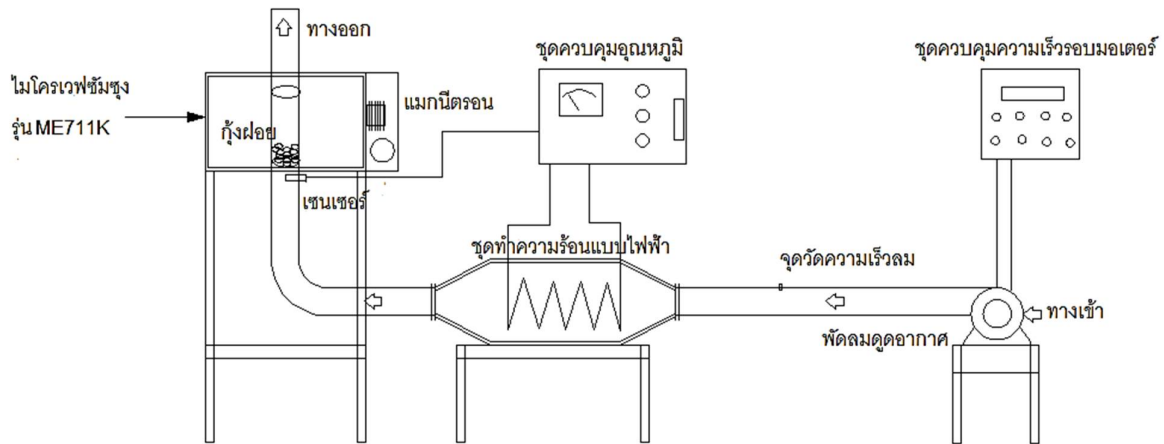
### 1. การเตรียมตัวอย่างกุ้งฝอย

กุ้งฝอยที่ใช้ทดลองได้มาจากการจัดซื้อจากตลาด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา นำมาล้างให้สะอาด แล้วนำมัลกน้ำเดือดประมาณ 3 นาที แล้วนำขึ้นพักตากลมไว้ให้แห้ง 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปอบหาความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของ AOAC (AOAC, 1995)

### 2. เครื่องอบแห้งกุ้งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ภาพที่ 1 แสดงรายละเอียดเครื่องอบแห้งกุ้งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ประกอบด้วยไมโครเวฟ sumsung รุ่น ME711 K ทำการเจาะรูด้านล่างและด้านบนของตู้ไมโครเวฟเพื่อประกอบท่อลมร้อนขนาด 10 cm ด้านข้างประกอบด้วยแมกนีตรอนขนาด 800 วัตต์ และชุดควบคุมไมโครเวฟติดตั้งไว้ภายในตู้เครื่อง

ไมโครเวฟ ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยห้องแลกเปลี่ยนความร้อน ขนาด 15\*30\* 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในติดตั้งตัวทำความร้อนไฟฟ้าแบบแท่งขนาด 1 กิโลวัตต์ จำนวน 2 ตัว มีลักษณะการจัดวางเยื้องกันและต่อเชื่อมกันแบบขนาน โดยสั่งการทำงานควบคุมอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์ PID โดยใช้สายวัดเทอร์โมคัปเปิล type K เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าห้องอบไมโครเวฟ ส่วนที่ 3 ประกอบด้วย พัดลมดูดอากาศแบบ 3 เฟส ขนาด 0.5 แรงม้า ควบคุมความเร็วรอบด้วย อุปกรณ์ควบคุม Inverter วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยใช้มิเตอร์ ยี่ห้อ Uni 200 D และวัดความเร็วลมด้วย testo 450i



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับความร้อน

### 3. การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับความร้อน

การทดลองอบแห้งกุ้งฝอย ทำการทดลองด้วยเงื่อนไขความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ (3, 4.5 และ 6 วัตต์ต่อกรัม) และอุณหภูมิความร้อน 3 ระดับ (50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส) ความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที ทำการเปิดเครื่องอบแห้งเพื่ออุ่นห้องอบแห้งทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างกุ้งฝอยหนัก 10 กรัม โดยมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ใส่ในภาชนะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร นำมาวางในห้องอบแห้งและทำการอบแห้งกุ้งฝอยนาน 4 นาที จากนั้นนำตัวอย่างออกมาจากห้องอบและนำไปอบหาความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงความชื้น จากนั้นทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างกุ้งฝอยอันใหม่โดยเพิ่มเวลาการอบแห้งนานขึ้นครั้งละ 4 นาที และนำตัวอย่างไปอบหาความชื้น ทำการทดลองซ้ำจนกระทั่งกุ้งฝอยมีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

#### 4. สมการอบแห้งชั้นบาง

ในการทดสอบการอบแห้งอาหารได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของอาหารกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของแต่ละสภาวะ ซึ่งมีรูปแบบการหาค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 (Kavak Akpinar, 2008)

$$MR = \frac{M_t - M_o}{M_e - M_o} \quad (1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

$M_t$  คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

$M_i$  คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

$M_e$  คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

ซึ่งนักวิจัยบางคนสามารถเขียนรูปแบบสมการให้ง่ายขึ้นดังสมการที่ 2 (Jalal & Seyed-Hamed, 2018)

$$MR = \frac{M_t}{M_e} \quad (2)$$

การวิเคราะห์การอบแห้งกึ่งฝอยด้วยสมการอบแห้งชั้นบาง โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางในรูปสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Satatica 5.5 ช่วยประเมินผลลัพธ์ของแบบจำลองต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) และของไคสแควร์ (Chi-Square)  $\chi^2$  เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุด (Hayaloglu *et al.*, 2007) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แบบจำลองสมการคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

รูปแบบสมการ	ชื่อสมการ	อ้างอิง
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Bruce, 1985)
Page's model	$MR = \exp(-kt^n)$	(Kumar <i>et al.</i> , 2006)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Doymaz, 2004)
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Midilli <i>et al.</i> , 2002)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang & Singh 1978)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Togrul & Pehlivan, 2002)

ค่า Correlation coefficient ( $R^2$ ) หาได้จากสมการที่ 3 (Hao *et al.*, 2020)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp} - M_{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (M_{exp} - M_{avg})^2} \quad (3)$$

ค่า Chi-Square ( $\chi^2$ ) หาได้จากสมการที่ 4 (Agbede *et al.*, 2020)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-n} \quad (4)$$

- เมื่อ  $M_{exp}$  คือ ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลอง  
 $M_{pre}$  คือ ค่าความชื้นที่ได้จากสมการ  
 $M_{avg}$  คือ ค่าความชื้นเฉลี่ยของแต่ละอุณหภูมิทดลอง  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

#### 5. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง (Specific energy consumption)

คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้อบแห้งเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากอาหาร โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 5 (Hassan *et al.*, 2018)

$$SEC = \frac{E_{microwave} + E_{blower} + E_{heater}}{(M_i - M_f)} \quad (5)$$

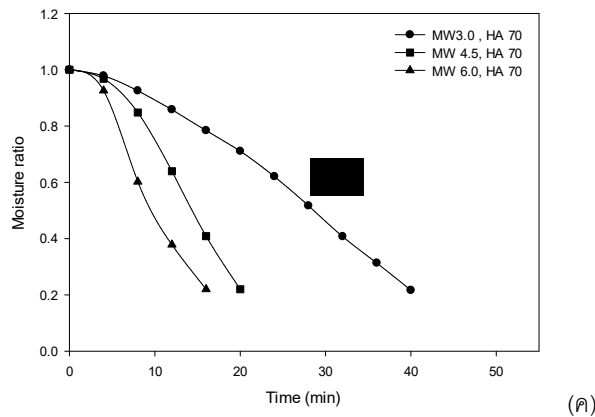
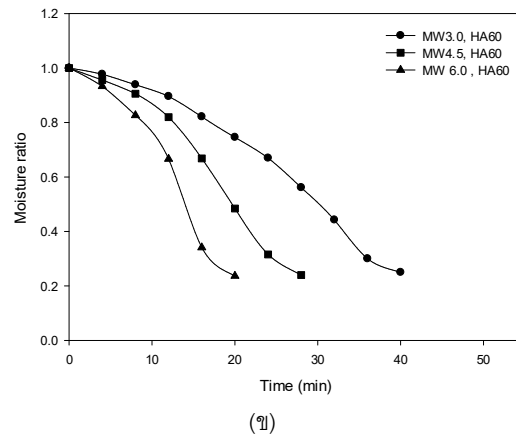
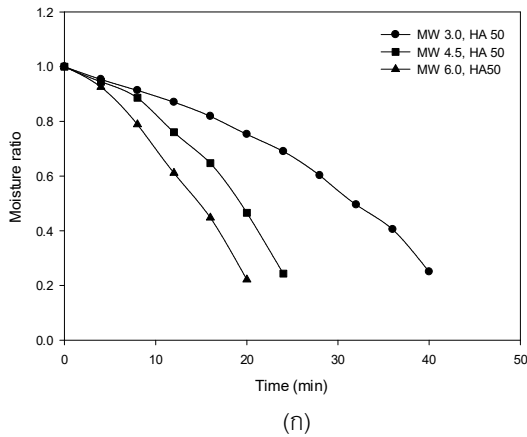
เมื่อ  $E$  คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์)  $M_i$  และ  $M_f$  คือ มวลเริ่มต้นและมวลสุดท้าย (กรัม)

### ผลการวิจัย

#### 1. จลนพลศาสตร์การอบแห้งกึ่งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในช่วงเวลาการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองอบแห้งกึ่งฝอย พบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง โดยการอบแห้งกึ่งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะมีอัตราการอบแห้งสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอบแห้งกระเทียม (Sharman & Prasad, 2001) โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะมีอัตราการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สาเหตุเนื่องจากลมร้อนสามารถระเหยน้ำที่ผิวออกได้ดีแต่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์จะถ่ายเทออกมายังผิวออกได้ช้า ทำให้อัตราการอบแห้งต่ำ ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งอาหารอีกหลาย ๆ งานวิจัย (Tirawanichakul & Tirawanichakul, 2008) สำหรับการอบแห้งด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครเวฟสามารถสร้างความร้อนจากภายในของผลิตภัณฑ์ทำให้ความชื้นถูกถ่ายเทจากภายในอาหารสู่ผิวนอกได้รวดเร็ว ดังนั้นการอบแห้งด้วยความหนาแน่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

จึงแก้ไขและชดเชยข้อเสียของแต่ละวิธีให้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ พบว่า การอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 6 วัตต์ต่อกรัม มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 และ 4.5 วัตต์ต่อกรัม โดยเฉลี่ยประมาณ 53 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นกับเวลาต่าง ๆ การอบแห้งกุ้งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (ก) 50 °C (ข) 60 °C (ค) 70 °C

2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง (SEC)

ตารางที่ 2 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้อบแห้งกุ้งฝอย พิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ พัดลมดูดอากาศ (Blower) ชดลดความร้อน (Heater) และไมโครเวฟ (Microwave) ในการอบแห้ง จากผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นไมโครเวฟช่วยเพิ่มให้ความชื้นออกมาถึงผิวจนกัได้เร็วขึ้น ทำให้ลมร้อนสามารถระเหยน้ำที่ผิวนอกได้มากขึ้นด้วย ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง (Das & Arora, 2018) ส่งผลให้การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 50 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่

ประมาณ 12 และ 19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายใต้กำลังไมโครเวฟที่เท่ากัน เนื่องจากค่าความหนาแน่นไมโครเวฟสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูง ทำให้ระยะเวลาอบแห้งใช้เวลาน้อย ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งที่ความหนาแน่นที่น้อยกว่าซึ่งมีระยะเวลาการอบแห้งที่นานกว่า

**ตารางที่ 2** ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง (SEC)

ไมโครเวฟ (วัตต์ต่อกรัม)	อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส)	น้ำที่ระเหย (กรัม)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ			SEC (กิโลจูลต่อกรัม)
			ฮีตเตอร์ (กิโลจูล)	ไมโครเวฟ (กิโลจูล)	พัดลมเป่าอากาศ (กิโลจูล)	
3	50	110.04	5069	408	327	52.74
	60	114.03	5167	408	326	51.03
	70	101.60	5259	408	326	59.00
4.5	50	103.67	4562	434	294	51.03
	60	114.73	4134	386	261	41.67
	70	97.68	2104	193	131	24.85
6	50	116.05	2534	241	163	25.33
	60	113.44	2584	241	163	26.34
	70	115.16	2104	193	131	21.08

**3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน**

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง  $R^2$  และ  $\chi^2$  พบว่า สมการ page สามารถทำนายการอบแห้งกึ่งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.970880765 ถึง 0.999938775 และ  $\chi^2$  อยู่ระหว่าง 0.000045511 ถึง 0.021275109 โดยได้นำค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม Satatica 5.5 เปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันมากที่สุด ซึ่งค่า  $a, b, c, k$  และ  $n$  คือค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง (Sitesh *et al.*, 2015)

**ตารางที่ 3** แสดงค่าคงที่สำหรับแบบจำลองการอบแห้ง ทั้ง 7 สมการ

สมการ	ไมโครเวฟ	อุณหภูมิ	ค่าตัวแปรคงที่	$R^2$	$\chi^2$
Newton	3	50	$k=0.018169$	0.95026890	0.034769589
		60	$k=0.020065$	0.91408198	0.086340056
		70	$k=0.021903$	0.93844868	0.063385594
	4.5	50	$k=0.031602$	0.94009086	0.042021823
		60	$k=0.025408$	0.85982296	0.093794017
		70	$k=0.047648$	0.88034169	0.128969137
	6	50	$k=0.045214$	0.96032782	0.028905990
		60	$k=0.046265$	0.90424301	0.090284876
		70	$k=0.071142$	0.94270866	0.52400213





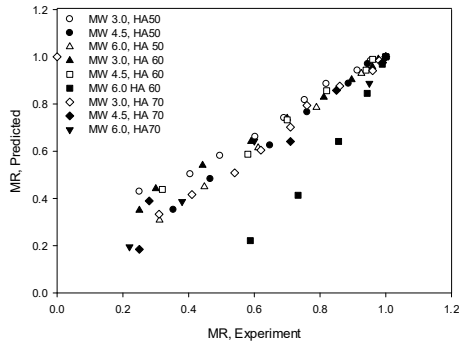
Page	3	50	$k=0.001505$ $n=17.66808$	0.99373976	0.004474413
		60	$k=0.000521$ $n=2.123287$	0.99591469	0.004280886
		70	$k=0.001104$ $n=1.926454$	0.99650580	0.003706096
	4.5	50	$k=0.002001$ $n=1.968487$	0.99763238	0.001709963
		60	$K=0.000387$ $n=2.411992$	0.97088076	0.020647476
		70	$k=0.000664$ $n=2.618019$	0.98126633	0.021275109
	6	50	$k=0.006606$ $n=1.729821$	0.99993877	0.000045511
		60	$k=0.001156$ $n=2.394439$	0.99037226	0.009488126
		70	$k=0.008696$ $n=1.888866$	0.99315619	0.006422080
Henderson and Pabis	3	50	$a=1.057933$ $k=0.02648$	0.96158080	0.027016654
		60	$a=1.104553$ $k=0.024456$	0.93961951	0.061486637
		70	$a=1.097654$ $k=0.026101$	0.95936913	0.042293271
	4.5	50	$a=1.075716$ $k=0.036347$	0.95453172	0.032130020
		60	$a=1.091428$ $k=0.030863$	0.88408513	0.078571733
		70	$a=1.125423$ $n=0.056770$	0.90363785	0.105147025
	6	50	$a=1.070335$ $n=0.050597$	0.97065749	0.021492231
		60	$a=1.106052$ $n=0.054078$	0.92309976	0.073223694
		70	$a=1.088756$ $k=0.79558$	0.95419494	0.042142257
Micilli	3	50	$a=0.985350$ $k=-0.047393$ $n=0.576830$ $b=-$	0.99315213	0.004892972
		60	$a=0.984757$ $k=-0.087588$ $n=0.507702$ $b=-$	0.99316613	0.007151182
		70	$a=0.994181$ $k=-0.065292$ $n=0.541064$ $b=-$	0.99719561	0.002975484
	4.5	50	$a=0.993562$ $k=-0.078943$ $n=0.547360$ $b=-$	0.99586485	0.002983882
		60	$a=0.983289$ $k=-0.128285$ $n=0.479639$ $b=-$	0.96155889	0.027128380
		70	$a=0.997218$ $k=-0.212219$ $n=0.541048$ $b=-$	0.97514247	0.028142487
	6	50	$a=0.998223$ $k=-0.091006$ $n=0.000047$ $b=-$	0.99940137	0.000444862
		60	$a=0.996620$ $k=-0.153738$ $n=0.551903$ $b=-$	0.98418733	0.015534952
		70	$a=1.006594$ $k=-0.146997$ $n=0.000071$ $b=-$	0.98940112	0.009927009
Wang and Singh	3	50	$a=-0.007523$ $b=-0.000249$	0.99892847	0.000767848
		60	$a=-0.003452$ $b=-0.000442$	0.99919286	0.000847170
		70	$a=-0.007879$ $b=-0.000320$	0.99664011	0.993291509
	4.5	50	$a=-0.011080$ $b=-0.000697$	0.99748435	0.994975033
		60	$a=0.004051$ $b=-0.001297$	0.98763901	0.975430829
		70	$a=-0.008598$ $b=-0.001644$	0.96622001	0.933581116
	6	50	$a=-0.023349$ $b=-0.000604$	0.99639748	0.992807943
		60	$a=-0.011790$ $b=-0.001388$	0.97906571	0.958569664
		70	$a=-0.037427$ $b=-0.000837$	0.98001167	0.960422890
		50	$a=40.44080$ $k=0.000404$ $c=-39.3991$	0.98432730	0.968900238

Logarithmic	3	60	$a=62.32183$ $k=0.000313$ $c=-61.2344$	0.97438305	0.949422332
		70	$a=43.09152$ $k=0.000463$ $c=-42.0193$	0.98678456	0.973743778
	4.5	50	$a=67.25167$ $k=0.000417$ $c=-66.1931$	0.98351091	0.967293721
		60	$a=105.5390$ $k=0.000249$ $c=-104.450$	0.92600821	0.857491218
		70	$a=116.1683$ $k=0.000371$ $c=-115.058$	0.95017534	0.902833189
	6	50	$a=49.16364$ $k=0.000742$ $c=-48.1192$	0.99379864	0.987635755
		60	$a=113.6510$ $k=0.000358$ $c=-112.562$	0.96462234	0.930496267
		70	$a=74.70265$ $k=0.000717$ $c=-73.6461$	0.98159945	0.963537482

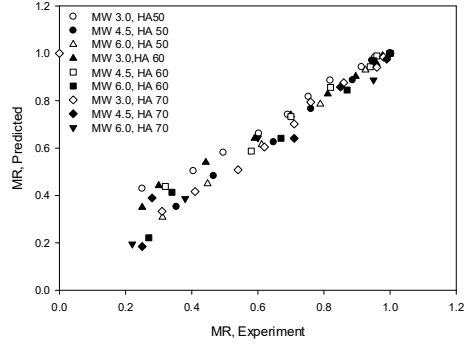
ภาพที่ 3 เปรียบเทียบกับพฤติกรรมการอบแห้งจากการทำนายผลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ของกึ่งฝอย พบว่า ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองอบแห้งจริง จากนั้นเมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้นในช่วงของความชื้นปานกลางผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าผลการทดลอง และในช่วงระยะเวลาสุดท้ายของการอบแห้งผลการทำนายอบแห้งจะมีค่าต่ำกว่าผลการอบแห้งจริง

### วิจารณ์ผลการวิจัย

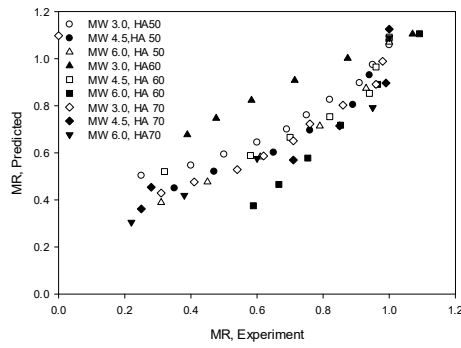
จากการทดลองอบแห้งกึ่งฝอยที่เงื่อนไขการทดลองความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 3, 4.5 และ 6 วัตต์ ต่อกรัม ทำการอบแห้งร่วมกับลมร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการอบแห้งกึ่งฝอยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความหนาแน่นของไมโครเวฟและอุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถชดเชยข้อเสียของแต่ละวิธีที่มีอยู่ โดยช่วยให้การอบแห้งมีระยะเวลาการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะลดลงด้วย โดยการอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 6 วัตต์ต่อกรัม มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 3 และ 4.5 วัตต์ต่อกรัม โดยเฉลี่ยประมาณ 53 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Funebo & Ohlsson, 1998) สำหรับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้ Satatica 5.5 ประมวลผลเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการอบแห้งต่าง ๆ พบว่าสมการ page สามารถอธิบายผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  มากที่สุด และค่า  $\chi^2$  น้อยที่สุด



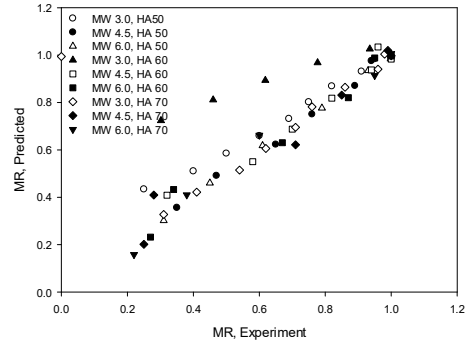
(ก)



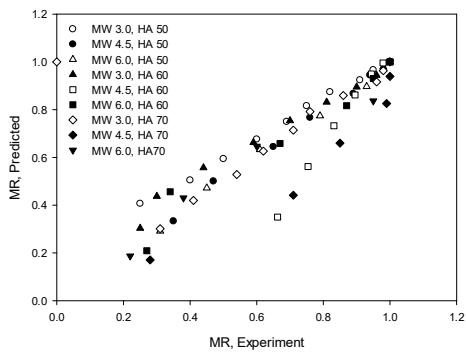
(ข)



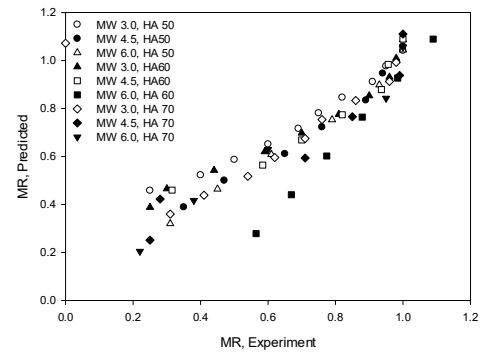
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 3 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นจากสมการคณิตศาสตร์แบบชิ้นบางกับอัตราส่วนความชื้นการทดลอง  
 คณิตศาสตร์ (ก) Newton (ข) Page (ค) Henderson and Pabis (ง) Midilli-Kucuk (จ) Wang and  
 Singh (ฉ) Logarithmic



### สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยศึกษาการอบแห้งกึ่งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่า ความหนาแน่นของไมโครเวฟมีผลต่อการอบแห้งกึ่งฝอย โดยความชื้นภายในส่งออกมายังผิวนอกด้านได้เร็วทำให้ลมร้อนสามารถระเหยน้ำได้ดีมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง

ขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งกึ่งฝอยพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ สมการ page สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นขณะอบแห้งกึ่งฝอยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2 = 0.970880765$  ถึง  $0.999938775$  มากที่สุด และค่า  $\chi^2$  อยู่ระหว่าง  $0.000045511$  ถึง  $0.021275109$  น้อยที่สุด

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนพื้นที่ในการทดลอง และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำให้การวิจัยสำเร็จด้วยดี ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทำให้การทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

AOAC (1995). AOAC Official Methods of Analysis. (16th ed.), Association of official Agricultural Chemists, Washington DC.

Agbede, O.O., Oke, E.O., Akinfenwa, S.I., Wahab, K.T., Ogundipe, S., Aworanti, O.A., Arinkoola, A.O., Agarry, S.E., Ogunleye, O.O., Osuolale, F.N., & Babatunde, K.A. (2020). Thin layer drying of green microalgae (*Chlorella* sp.) paste biomass: Drying characteristics, energy requirement and mathematical modeling. *Journal of Bioresource Technology Reports*, 11, 100467.

Bruce, D.M. (1985). "Exposed-layer barley drying three model fitted to new data up to 150 °C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32, 337-347.

Chen A., EL.Achkar, G., BinLiu, B., & Bennacer, R. (2021). Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process. *Journal of food engineering*, 292, 1-7.

Das, I., & Arora, A. (2018). Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. *Journal of Food Engineering*, 223, 208-219.



- Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.
- Funebo, T., & Ohlsson, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom, *Journal of Food Engineering*, 38(3), 353-367.
- Hao, W., Zhang, H., Liu, S., Mi, B., & Lai, Y. (2020). Mathematical modeling and performance analysis of direct expansion heat pump assisted solar drying system. *Journal of Renewable Energy*, 165(1), 77-87.
- Hassan, J., Davood, K., Mohsen, A. (2018). Energy consumption and qualitative evaluation of a continuous band microwave dryer for rice paddy drying. *Journal of Energy*, 142, 647-654.
- Hayaloglu, A.A., Karabulut, I., Alpaslan, M., & Kelbaliyev, G. (2007). Mathematical modeling of drying characteristics of strained yoghurt in a convective type tray-dryer. *Journal of Food Engineering*, 78, 109-117.
- Jalal, D., & Seyed-Hamed, H. (2018). Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Journal of Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, 132-151.
- Kavak Akpınar E. (2008). Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 1544-1553.
- Kumar, C. &, Karim, M.A. (2019). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (3) , 379-394
- Kumar, P.G.D., Hebbar, H.U., & Ramesh, M.N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared-hot-air-drying of onion slices, *Journal of LWT – Food Science and Technology*, 39, 700-705.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.



- sharma, G.P., & Prasad, S. (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50, 99-105.
- Shen, L.Y., Zhu, Y., Liu, C., Wang, L., Liu, H., Kamruzzaman, M., Liu, C., Zhang, Y., & Zheng, X. (2020). Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying. *Journal Biosystems Engineering*, 195, 64-88.
- Sitesh, K.P., Subodh, D.W., & Richa S. (2015). REVIEW OF MATHEMATICAL MODELLING OF THIN LAYER DRYING PROCESS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CURRENT ENGINEERING AND SCIENTIFIC RESEARCH (IJCESR)*, 2, 96 -107.
- Song, C., Wang, Y., Wang, S., Cui, Z., Xu, Y., & Zhu, H. (2016). Non-uniformity investigation in a combined thermal and microwave drying of silica gel. *Journal of Applied Thermal Engineering*, 98, 872-879.
- Tirawanichakul, Y., & Tirawanichakul, S. (2008). Mathematical model of fixed-bed drying and strategies for crumb rubber producing STR20. *Drying Technology*, 26, 1388-1395.
- Togrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of soar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216.
- Xiao-hui G., Chun-yan, X., Yu-rong, T., Long, C., & Jian, M., (2014). Mathematical Modeling and Effect of Various Hot-Air Drying on Mushroom (*Lentinus edodes*). *Journal of Integrative Agriculture*, 13(1), 207-216.
- Wang, C.Y., & Singh R.P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper.No. 78-3001, St Joseph, Michigan.