



แบบจำลองการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Microwave Drying Models of Holy Basil (*Ocimum sanctum* L.) Leaves

ปองพล สุริยะกันธร, ฤทธิชัย อัสวราชันย์*

Pongpol Suriyakanthorn, Rittichai Assavarachan*

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สันทราย, เชียงใหม่, 50290

Faculty of Engineering and Agro-Industry; Maejo University, Sansai, Chiang Mai, Thailand, 50290.

*Corresponding author: Tel: +66-53-875-869, Fax: +66-53-878-113, E-mail: rittichai@mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาหาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางสำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ ที่ระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง 164-752 W อบแห้งใบกะเพราจากความชื้นเริ่มต้น $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ จนเหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ใช้เวลาในการอบแห้งระหว่าง 18.50-2.75 min แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางซึ่งประกอบไปด้วย *Lewis, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh* และ *Logarithmic* เพื่อใช้ในการหารูปแบบการทำนายอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบกะเพราในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานและเวลาอบแห้งต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของ *Page* สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของใบกะเพราได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) สูงที่สุดในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2), ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, *RMSE*) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias error, *MBE*) ต่ำที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (Effective moisture diffusivities) ของใบกะเพราที่ระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ 164-752 W มีค่าระหว่าง 0.3214×10^{-10} - $2.0703 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ และค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสมิค่าเท่ากับ 19.85 W g^{-1}

คำสำคัญ: ใบกะเพรา, การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง

Abstract

This study aimed to determine the drying model of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) leaves undergoing a laboratory-scale microwave drying process at microwave power level of 164-752 W. The times required to reduce the moisture content of holy basil leaves from $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ to $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ were 18.50-2.75 min. Thin layer drying models including the *Lewis, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh* and *Logarithmic* models were evaluated for describing the drying kinetics under various microwave drying conditions. The drying characteristics were best described by the *Page* model due to the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest least chi-square (χ^2), root mean square error (*RMSE*) and mean bias error (*MBE*). The total drying occurred during falling period which signified the influence of moisture diffusion during the drying. Effective moisture diffusivities were between 0.3214×10^{-10} and $2.0703 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. The activation energy for microwave drying of holy basil leaves was 19.85 W g^{-1} which was well explained by an exponential expression based on the Arrhenius models.

Keywords: Holy basil leaves, Microwave drying, Thin layer drying model

1 บทนำ

กะเพรา มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Ocimum sanctum* L. เป็นพืชท้องถิ่นแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ปลูกมากในประเทศไทยและมาเลเซีย กะเพราเป็นพืชผักจำพวกเครื่องเทศที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคโดยใช้ใบสดใบอ่อนในการประกอบอาหารเพื่อช่วยดับกลิ่นคาว และทำให้อาหารมีกลิ่นหอมรวมทั้งยังมีสรรพคุณทางยาช่วยให้ร่างกายได้รับประโยชน์ทำให้เลือดลมดีช่วยในระบบทางเดินอาหาร ใช้เป็นยาตั้งธาตุแก้ปวดท้องขับลมลดอาการท้องอืดท้องเฟ้อ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถสกัดน้ำมันหอมระเหยจากใบกะเพราซึ่งในน้ำมันหอมระเหยจะมีสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) และสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กองการแพทย์ทางเลือก กรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข, 2550)

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน โดยการลดปริมาณน้ำอิสระหรือความชื้น (Water activity) ต่ำจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหาร นอกจากนี้การลดความชื้นและปริมาตรของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายและสะดวกในการเก็บรักษา และการขนส่ง (ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2554) วิธีการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพนั้นมักใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อทำให้แห้ง ซึ่งเป็นวิธีควบคุมการทำงานได้ง่ายและไม่ซับซ้อนแต่มีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ใช้เวลาในการอบแห้งที่นานส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางกายภาพ, การสูญเสียสารอาหาร และสารออกฤทธิ์สำคัญต่างๆ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของอาหารซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เป็นจำนวนมาก หากต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพจะต้องทำการทดลองหลายครั้งเพื่อหาข้อมูลผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายหรือเวลาที่ต้องใช้ในการทดลอง รวมทั้งเกิดความยุ่งยากในการทดลอง (สีกมณ, 2555) ดังนั้นการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการอบแห้ง และแบบจำลองการอบแห้งจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้ง ปัจจุบันแบบจำลองการอบแห้งได้นำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการ ตลอดจนการทดลองและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อกำหนดสภาวะที่

เหมาะสมแทนการทดลองจริง เนื่องจากมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งสามารถสร้างความร้อนภายในอาหารหรือวัสดุชีวภาพได้ดี เนื่องจากไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้ง สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 7-10 เท่า จึงช่วยรักษาคุณภาพ และลดอัตราการสูญเสียสารอาหารได้เป็นอย่างดี (ฤทธิ์ชัย, 2554ก) สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ น้ำฝน และคณะ (2555), Ozkan et al. (2007), Dadal et al. (2007), Assawarachan et al. (2011), Özbek and Dadali (2007) และ Maskan (2001) ซึ่งพบว่าการอบแห้งสาหร่ายเตา (*Spirogyra* sp.), ผักขม (*Spinach*), กระเจี๊ยบเขียว (*Okra*), ข้าวเปลือก (*Paddy rice*), ใบสะระแหน่ (*Mint leaves*) และกีวี่แผ่น (*Kiwifruits*) ด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน และช่วยลดการสูญเสียสารอาหารที่สำคัญ

บทความวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพื่อหาผลกระทบของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบกะเพรา และหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และระดับพลังงานกระตุ้นในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยข้อมูลดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการอบแห้งใบกะเพรา ตลอดจนการออกแบบระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟให้เหมาะสมในระดับอุตสาหกรรม

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุุดิบ

แยกก้านและใบกะเพรา จำนวน 10 kg นำมาล้างด้วยน้ำสะอาดจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (ยี่ห้อ Wasino รุ่น CE03) เพื่อไล่น้ำออกจากใบกะเพรา จากนั้น บรรจุใบกะเพราในถุงพลาสติกปิดสนิท ขนาดถุงละ 2 kg จำนวน 5 ถุง โดยตัวอย่างแต่ละถุงใช้กับการทดลองที่แต่ละระดับพลังงาน จากนั้นนำไปเก็บรักษาในตู้เย็น (ยี่ห้อ Haier รุ่น HP-921F) ที่อุณหภูมิ $4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h เพื่อให้ใบกะเพราเกิดการถ่ายเทความชื้นเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับ

งานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007) และ Dadali et al. (2007)

สามารถปรับระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ 5 ระดับ ได้แก่ 164, 231, 465, 605 และ 752 W (ฤทธิชัย และคณะ, 2555)

2.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของใบกะเพรา

นำใบกะเพราจำนวน 1 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 2.5 oz ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จำนวน 60 ตัวอย่าง (สุ่มตัวอย่างใบกะเพราจำนวน 12 ตัวอย่างต่อถุง) นำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น 500/108I) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2005) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักใบกะเพราด้วยตาชั่งระบบดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP2245) นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักใบกะเพรา ก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาความชื้นของใบกะเพรา โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงใน Eq. 1

$$MC = \frac{W_I - W_F}{W_F} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นของใบกะเพรา ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$), W_I และ W_F คือ น้ำหนักของใบกะเพราสด (น้ำหนักเริ่มต้น) และน้ำหนักสุดท้ายของใบกะเพรา (g) ตามลำดับ

อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟจะวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จาก Eq. 2 โดยรูปแบบสมการดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007); Wang et al. (2007) และ Evin (2012)

$$MR = \frac{M_i - M_e}{M_i - M_e} = \frac{M}{M_i} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_i , M และ M_e คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุลตามลำดับ ซึ่งในการศึกษาการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟค่าความชื้นสมดุลจะสามารถพิจารณาให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (Alibas, 2007; น้ำฝน และคณะ, 2555; Evin, 2012)

2.3 การอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ พัฒนาโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยติดตั้งระบบใบกวนคลื่น (Mode stirring) ที่เตาไมโครเวฟขนาด 800 W (ยี่ห้อ Panasonic รุ่น NN-S235WF) วางบนฐานเหล็กที่ติดตั้งตาชั่งระบบดิจิตอล (ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP3202S) บันทึกปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง (Figure 1) โดย

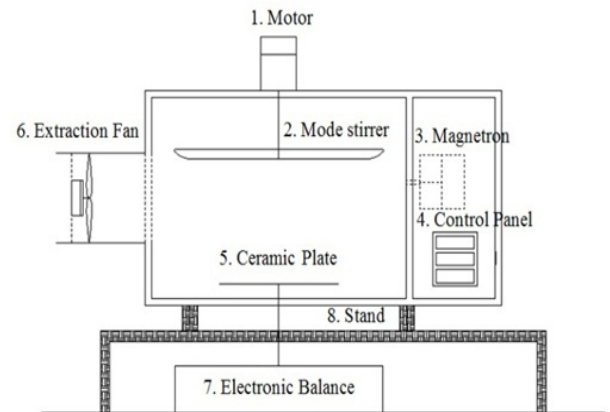


Figure 1 Diagram of microwave drying system.

การอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยนำใบกะเพราจำนวน 30 g วางในถาดเซรามิกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $20 \times 20 \text{ cm}^2$ (ยี่ห้อ Cuizimate) อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ จำนวน 3 ชั่วโมง เหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$

2.4 แบบจำลองการอบแห้ง

รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่าแบบจำลองการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่นิยมใช้ในการศึกษาสำหรับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ มักจะเลือกใช้แบบจำลองการอบแห้งในรูปแบบของสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) และสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) เช่น แบบจำลองของ Lewis, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองการอบแห้งดังแสดงใน Table 1 (Alibas, 2007; Wang et al., 2007 และ Ozkan et al., 2007)

นอกจากแบบจำลองการอบแห้งแบบเอมพิริคัลแล้ว สมการที่นิยมใช้ในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งด้วยสมการกึ่งทฤษฎีจะมีความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ในสภาวะการแพร่ความชื้นที่ไม่คงที่สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงใน Eq. 3 สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (Infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบเช่น ถั่วลิสง และสาหร่ายทะเลแผ่น (สุนทร และฤทธิชัย, 2554)

Table 1 Mathematical drying models given by various authors.

Model name	Model equation	Reference
1. Lewis	$MR = \exp(-kt)$	McMinn (2006)
2. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Dadal et al. (2007)
3. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Pongtong et al. (2011)
4. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wu and Hu (2007)
5. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Evin (2012)

Notes: k and n are drying rate and drying index, respectively. a , b and c are the empirical constants of thin layer drying models.

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

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ($m^2 s^{-1}$), L คือ ความหนาของใบกะเพรา และ t คือเวลาในการอบแห้ง (s) (Wang et al., 2007; Dadali and Ozbek, 2007)

พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (Activation energy for diffusion, E_a) ด้วยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) แสดงใน Eq. 4

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{P}\right) \quad (4)$$

เมื่อ k_0 คือ แฟกเตอร์ความถี่ (min^{-1}), E_a คือ พลังงานกระตุ้น ($W g^{-1}$), m คือ น้ำหนักของใบกะเพรา (g) และ P คือ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (W) (Pongtong, 2011; Özbek and Dadali, 2007; สุเนตร และฤทธิชัย, 2554)

2.5 การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองการอบแห้ง

การทดสอบแบบจำลองการอบแห้งนิยมใช้เพื่อประเมินความเข้ากันได้ของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือความกลมกลืน (Goodness of fit) ของแบบจำลอง พารามิเตอร์ที่นิยมใช้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2), ค่าไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2), ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, $RMSE$) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias error, MBE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Wang et al., 2007; Cui et al., 2004; Ozkan et al., 2007; Maskan, 2001) โดยค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองการอบแห้ง โดยยังมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 , ค่า $RMSE$ และค่า MBE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองการอบแห้ง ดังนั้นแบบจำลองการอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 มากแต่มีค่า χ^2 , ค่า $RMSE$ และค่า MBE น้อย โดยสมการหาพารามิเตอร์ทั้งสี่ค่าแสดงใน Eq. 5–8 (Assawarachan and Noomhorm, 2011; Wang et al., 2007, Cui et al., 2004; Evin, 2012)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n MR_{exp,i} \times MR_{pre,i}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n MR_{exp,i}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n MR_{pre,i}^2\right)}} \right]^2 \quad (5)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (8)$$

เมื่อค่า $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง ตามลำดับ และค่า N และ n_p เป็นจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ และจำนวนตัวแปรในแบบจำลองการอบแห้งตามลำดับ

3 ผลและวิจารณ์

3.1 คุณลักษณะการอบแห้งของใบกะเพรา

ใบกะเพราที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ และระดับพลังงานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 164, 231, 465, 605 และ 752 W ตามลำดับ

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 164, 231, 465, 605 และ 752 W จากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ เท่ากับ 18.50, 14.00, 9.00, 4.00 และ 2.75 min ตามลำดับ Figure 2 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบกะเพราที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เมื่อคลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในใบกะเพราเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็วผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นในของใบกะเพราเกิดเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (ฤทธิ์ชัย, 2554ข) มีอัตราการระเหยน้ำที่สูงและคงที่ (Constant rate period) และมีการอบแห้งใบกะเพราดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนความชื้นของใบกะเพราเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ (Falling rate period)

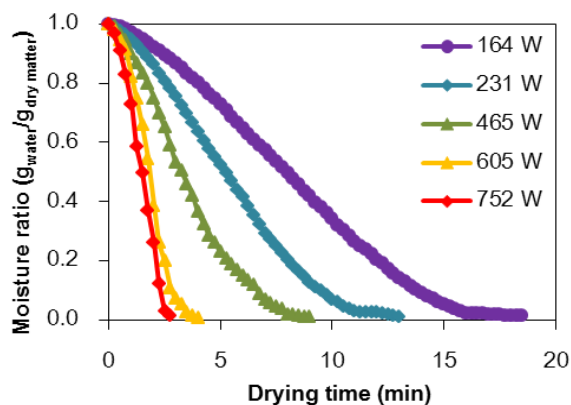


Figure 2 Representative drying curves of holy basil leaves during microwave drying.

3.2 แบบจำลองการอบแห้งใบกะเพรา

Table 2 แสดงค่าพารามิเตอร์และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้ง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น

ของใบกะเพราได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.9980-0.9997 ซึ่งมีความมากกว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบอื่นๆ และค่า χ^2 มีค่าระหว่าง 0.1138-0.1413, ค่า RMSE มีค่าระหว่าง 0.0095-0.0291 และค่า MBE มีค่าระหว่าง 0.0001-0.0008 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองการอบแห้งของ Lewis, Henderson and Pabis, Wang and Singh และ Logarithmic เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Bai-Ngew et al. (2011), Dadal et al. (2007) และ Kingsly and Singh (2007) ซึ่งพบว่าแบบจำลองการอบแห้งของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของทุเรียน, กระจับปี่เขียว และเมล็ดทับทิม

3.3 การทดสอบแบบจำลองการอบแห้ง

ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองการอบแห้งของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ ของการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟมากที่สุด โดยมีสมการทั่วไปสำหรับการคำนวณค่าคงที่การอบแห้ง (k) และค่าดัชนีการอบแห้ง (n) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page ในรูปแบบความสัมพันธ์ของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ (P) โดยมีรูปแบบสมการตามที่แสดงใน Eq. 9 และ 10

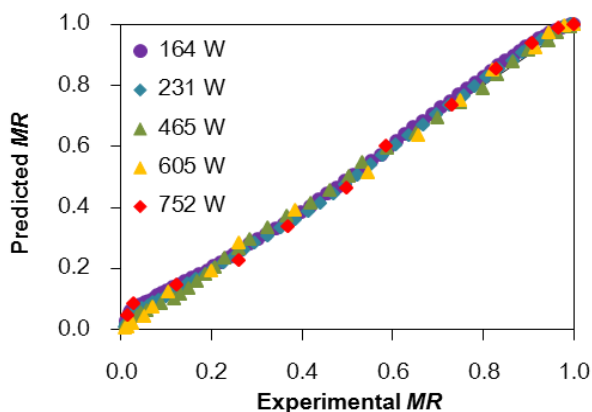
$$k = -0.0803 + 0.0005P \quad (9)$$

$$n = 1.6697 + 0.0009P \quad (10)$$

การทดสอบแบบจำลองการอบแห้งของ Page โดยใช้ Eq. 9 และ 10 คำนวณค่าคงที่การอบแห้ง (k) และค่าดัชนีการอบแห้ง (n) ที่ทุกระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ Page ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ นำค่าที่ได้จากการทำนายเปรียบเทียบกับข้อมูลในการทดลอง ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราที่ได้จากการทำนายด้วยสมการทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำหรือเส้นตรงที่ความชัน 45° ดังแสดงใน Figure 3 สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองการอบแห้ง (Assawarachan and Noomhorm, 2011; Pongtong et al., 2011; Wang et al., 2007; Ozkan et al., 2007)

Table 2 Statistical results of different thin-layer drying models for holy basil leaves.

Drying model	Drying power level	Coefficient and statistical analysis			R^2	χ^2	RMSE	MBE
1. Lewis's	752 W	$k = 0.5720$			0.9612	0.2203	0.1341	0.0180
	605 W	$k = 0.4908$			0.9485	0.2008	0.1466	0.0215
	465 W	$k = 0.2568$			0.9760	0.1801	0.0920	0.0085
	231 W	$k = 0.1683$			0.9692	0.1756	0.1019	0.0104
	164 W	$k = 0.1090$			0.9676	0.1935	0.1111	0.0123
2. Henderson and Pabis	752 W	$k = 0.6722$	$a = 1.1595$		0.9661	0.1687	0.1163	0.0135
	605 W	$k = 0.5864$	$a = 1.2043$		0.9559	0.1378	0.1240	0.0154
	465 W	$k = 0.3001$	$a = 1.1756$		0.9819	0.1375	0.0702	0.0049
	231 W	$k = 0.1986$	$a = 1.1913$		0.9762	0.1312	0.0800	0.0064
	164 W	$k = 0.1305$	$a = 1.1971$		0.9749	0.1428	0.0879	0.0077
3. Page	752 W	$k = 0.3051$	$n = 2.2760$		0.9980	0.1413	0.0291	0.0008
	605 W	$k = 0.1637$	$n = 2.5158$		0.9993	0.1138	0.0163	0.0003
	465 W	$k = 0.0903$	$n = 1.7277$		0.9997	0.1310	0.0095	0.0001
	231 W	$k = 0.0347$	$n = 1.8429$		0.9992	0.1200	0.0148	0.0002
	164 W	$k = 0.0134$	$n = 1.9319$		0.9989	0.1219	0.0209	0.0004
4. Wang and Singh	752 W	$a = -0.2622$	$b = -0.0459$		0.9960	0.1728	0.0419	0.0018
	605 W	$a = -0.2884$	$b = 0.0026$		0.9819	0.1663	0.0849	0.0072
	465 W	$a = -0.1797$	$b = 0.0071$		0.9948	0.1609	0.0453	0.0021
	231 W	$a = -0.1158$	$b = 0.0028$		0.9919	0.1502	0.0520	0.0027
	164 W	$a = -0.0681$	$b = 0.0005$		0.9942	0.1575	0.0465	0.0022
5. Logarithmic	752 W	$k = -0.1138$	$a = -3.0146$	$c = 4.0686$	0.9965	0.1713	0.0376	0.0014
	605 W	$k = 0.1427$	$a = 2.7763$	$c = -1.6638$	0.9846	0.1367	0.0732	0.0054
	465 W	$k = 0.1588$	$a = 1.5077$	$c = -0.4086$	0.9949	0.1376	0.0371	0.0014
	231 W	$k = 0.0981$	$a = 1.5738$	$c = -0.4697$	0.9932	0.1274	0.0428	0.0018
	164 W	$k = 0.0389$	$a = 2.2651$	$c = -1.1779$	0.9957	0.1380	0.0366	0.0013

**Figure 3** Comparison of the experimental moisture ratio (MR) and corresponding values by predicted Page model at different drying conditions.

3.4 สัมประสิทธิ์การแพร่และพลังงานกระตุ้น

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ระดับ 164–752 W สามารถวิเคราะห์หาด้วยวิธีจัดรูปแบบของ Eq. 3 ด้วยฟังก์ชันลอการิทึม ซึ่งรูปแบบสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงใน Eq. 11

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad (11)$$

โดยการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของใบกะเพราสามารถคำนวณจากค่าความชันของกราฟเส้นตรง ของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และ เวลาในการอบแห้ง (t) เมื่อ L มีค่าเท่ากับ 0.16 mm ดังแสดงใน Eq. 12

$$D_{eff} = \text{Slope} \times \left(\frac{4L^2}{\pi^2}\right) \quad (12)$$

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 164-752 W มีค่าเท่ากับ 0.3214×10^{-10} - $2.0703 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ดังแสดงใน Table 3 เมื่อเพิ่มระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไบกะเพรา เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าของไบกะเพราและมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างของไบกะเพราที่มากเติมเต็มที่ผิวหน้าโครงสร้างเซลล์ของไบกะเพรา ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface diffusion) เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007) ซึ่งศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไบสะระแห่นในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180-900 W ในขณะ ที่ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไบสะระแห่น ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศของ Therdthai and Zhou (2009) มีค่า 1.190×10^{-11} - $4.699 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ที่ระดับความชื้นของคลื่นไมโครเวฟ 8.0-11.2 W g⁻¹

Table 3 The estimated effective moisture diffusivity of holy basil leaves during microwave power level between 164-752 W.

Power (W)	Slope	$D_{eff} \times 10^{-10} (\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$	R^2
164	0.0031	0.3214	0.8199
231	0.0045	0.4665	0.8541
465	0.0068	0.7049	0.8740
605	0.0151	1.5654	0.8250
752	0.0200	2.0703	0.7399

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งไบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถคำนวณความสัมพันธ์ในรูปแบบฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส (Eq. 4) โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงใน Eq. 13

$$\ln k = \ln k_0 - \left(\frac{-E_a \cdot m}{P} \right) \quad (13)$$

แฟกเตอร์ความถี่ (k_0) และค่าพลังงานกระตุ้นของไบกะเพรา (E_a) สามารถคำนวณจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(k)$ และ น้ำหนักของไบกะเพราต่อพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) พบว่าค่า k_0 และ E_a ของไบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีค่าเท่ากับ 0.7621 min^{-1} และ

19.85 W g^{-1} ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 4 ในขณะที่ ค่า k_0 และค่า E_a ของการอบแห้งกระเจียวสดด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180-900 W มีค่าเท่ากับ 0.1224 min^{-1} และ 5.54 W g^{-1} (Dadal *et al.*, 2007) ซึ่งมีค่า k_0 น้อยกว่า 6.2 เท่า และค่า E_a น้อยกว่า 3.58 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากกระเจียวสดมีคุณลักษณะทางกายภาพเป็นรูปทรงกระบอกที่มีความหนา มากกว่าไบกะเพรา รวมถึงมีลักษณะโครงสร้างเซลล์ และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ในขณะที่ไบสะระแห่นซึ่งมีคุณลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างเซลล์ที่มีความใกล้เคียงกับไบกะเพรา มีค่า E_a เท่ากับ 11.0492 - 12.2839 W g^{-1} ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 180-900 W (Özbek and Dadali, 2007) ดังนั้น ค่า E_a ของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และชนิดของวัสดุชีวภาพ

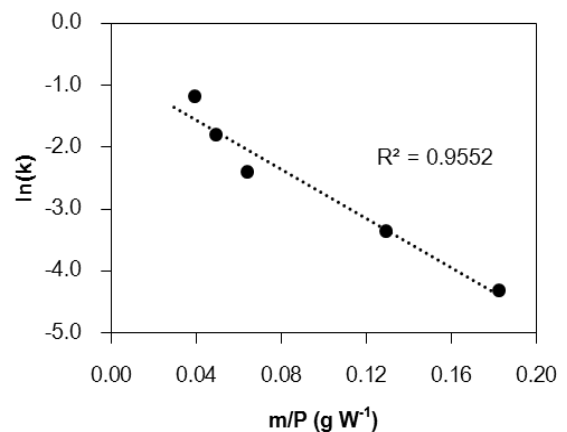


Figure 4 The effect of power level/sample mass on drying constant of holy basil leaves.

4 สรุป

ผลกระทบของระดับพลังงานไมโครเวฟต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 164, 231, 465, 605 และ 752 W จากความชื้นเริ่มต้น $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ จนเหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 18.50, 14.00, 9.00, 4.00 และ 2.75 min ตามลำดับ ผลของระดับพลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงานสูงจะมีอัตราการอบแห้งที่สูง สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยการอบแห้งที่ระดับพลังงานไมโครเวฟ 752 W ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า 6.72 เท่า และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมากกว่า 8.92 เท่า แต่ปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง

มีค่าน้อยกว่า 1.41 เท่า เมื่อเทียบกับระดับพลังงานไมโครเวฟที่ 164 W

การวิเคราะห์หาแบบจำลองการอบแห้งของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าแบบจำลองการอบแห้งของ *Page* มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.9980-0.9997 หรือค่าความกลมกลืนที่มากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ค่า χ^2 มีค่าระหว่าง 0.1138-0.1413, ค่า *RMSE* มีค่าระหว่าง 0.0095-0.0291 และค่า *MBE* มีค่าระหว่าง 0.0001-0.0008 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบอื่นๆ ที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งของ *Page* ได้แก่ ค่าคงที่การอบแห้ง (k) และค่าดัชนีการอบแห้ง (n) สามารถเขียนในรูปแบบสมการทั่วไปที่เป็นฟังก์ชันของระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (P) โดยมีรูปแบบสมการ คือ $k = -0.0803 + 0.0005P$ และ $n = 1.6697 + 0.0009P$ ผลการทวนสอบความแม่นยำของสมการทั่วไปของแบบจำลองของ *Page* พบว่ามีค่าความแม่นยำที่สูง ค่า D_{eff} ของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ 164, 231, 465, 605 และ 752 W มีค่าเท่ากับ 0.3214×10^{-10} , 0.4665×10^{-10} , 0.7049×10^{-10} , 1.5654×10^{-10} และ $2.0703 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ และค่า E_a ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส มีค่าเท่ากับ 19.85 W g^{-1}

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยระดับวิศวกรรมมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ซึ่งได้รับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งและลดความชื้น คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

6 เอกสารอ้างอิง

- กองการแพทย์ทางเลือกกรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข. 2550. ตำราวิชาการสมุนไพรฉบับที่ 1. สำนักกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก. กรุงเทพมหานคร.
- น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนาภรณ์ จันทรทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล และฤทธิชัย อัครราชันย์. 2555. ผลกระทบของระดับพลังงานไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง. การประชุมวิชาการประมง ครั้งที่ 7. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 6-8 ธันวาคม พ.ศ. 2555.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, ฉัตรชนก คงสิทธิ์, โชติพงศ์ กาญจนประโชติ และดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2555. คุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 18, 1-8.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์, ภาณุภณ แสงเจริญรัตน์, สุนทร สืบคำ, เทียรณณ มังมูล และดวงกมล จินใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกหอยทาก. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17, 27-34.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554ก. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต 1, 31-42.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554ข. เทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแปรรูปอาหาร. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17, 41-52.
- สั๊กกมล เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- สุนทร สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพรุณ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17, 59-68.
- Alibas, I. 2007. Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. LWT 40, 1445-1451.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis. 18th Ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC., USA.

- Assawarachan, R. and Noomhorm, A. 2011. Mathematical Models for Vacuum Microwave Concentration Behavior of Pineapple Juice. *Journal of Food Process Engineering* 34, 1485-1505.
- Assawarachan, R., Sripinyowanich, J., Theppadungporn, K. and Noomhorm, A. 2011. Drying paddy by microwave vibro-fluidized drying using single mode applicator. *International Journal of Food, Agriculture & Environment* 9, 50-54.
- Bai-Ngew, S., Therdthai, N. and Dhamvithee, P. 2011. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips. *Journal of Food Engineering* 104, 114-122.
- Cui, Z. W., Xu, S. Y. and Sun, D. W. 2004. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices. *Journal of Food Engineering* 65, 157-164.
- Dadal, G., Apar, D. K. and Özbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology* 25, 917-924.
- Dadali, G., Demirhan, E. and Özbek, B. 2007. Color Change Kinetics of Spinach Undergoing Microwave Drying. *Drying Technology* 25, 1713-1723.
- Evin, D. 2012. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. *Food and Bioproducts Processing* 90, 323-332.
- Kingsly, A. R. P. and Singh, D. B. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering* 79, 741-744.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48, 177-182.
- McMinn, W. A. M. 2006. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave vacuum drying of lactose powder. *Journal of Food Engineering* 72, 113-123.
- Ozkan, I. A., Akbudak, B. and Akbudak, N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering* 78, 577-583.
- Özbek, B. and Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering* 83, 541-549.
- Pongtong, K., Assawarachan, R. and Noomhorm, A. 2011. Mathematical models for vacuum drying characteristics of pomegranate aril. *Journal of Food Science and Engineering* 1, 11-19.
- Therdthai, N. and Zhou, W. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering* 91, 482-489.
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering* 80, 536-544.
- Wu, J. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International* 40, 39-46.