



จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Microwave drying kinetics of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) leavesประพันธ์ จิโน¹, ฤทธิชัย อัสวราชันย์^{1*}Praphun Jino¹, Rittichai Assawarachan^{1*}¹คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290¹Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai, Thailand 50290*Corresponding author: Tel: +66-8-5704-9146, Fax: +66-34-351-896, E-mail: rittichai@mju.ac.th, rittichai.assawarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟและน้ำหนักของตัวอย่างต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาผลกระทบของระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง 164-752 W ในการอบแห้งใบกะเพราน้ำหนัก 30 g และศึกษาผลกระทบของน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นระหว่าง 30-90 g โดยอบแห้งที่ระดับกำลังงานที่ 752 W ทำการอบแห้งใบกะเพราจากความชื้นเริ่มต้น $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ จนเหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของใบกะเพราได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (MBE) ต่ำที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) มีค่าเท่ากับ $4.15 \times 10^{-11} - 2.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และค่าพลังงานกระตุ้นซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสมีค่าเท่ากับ 19.85 W g^{-1}

คำสำคัญ: ใบกะเพรา, จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

This study aimed to determine the effects of power level and sample mass on moisture ratio of holy basil leaves undergoing microwave drying process. Various microwave power levels ranging from 164 to 752 W were used for drying of 30 g of holy basil leaves. To investigate the effect of sample mass on drying, the samples in the range of 30 to 90 g were dried at microwave power level of 752 W. Holy basil leaves were dried to reduce the moisture content from $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ to $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$. Mathematical models including the Newton, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh and Logarithmic models were evaluated for describing the drying kinetics under various microwave drying conditions. Page's model gave a better fit for all drying conditions used as the highest coefficient of determination (R^2), the least chi-square (χ^2), the lowest root mean square error (RMSE) and mean bias error (MBE). The effective diffusivity varied from $4.15 \times 10^{-11} - 2.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and 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 kinetics, mathematical model

1 บทนำ

กะเพรา (*Ocimum sanctum* L.) เป็นพืชผักจำพวกเครื่องเทศที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคเพื่อใช้ในการประกอบอาหารซึ่งจะช่วยดับกลิ่นคาวและทำให้อาหารมีกลิ่นหอม รวมทั้งยังมีสรรพคุณทางยาช่วยให้ร่างกายได้รับประโยชน์ทำให้เลือดลมดีช่วยในระบบทางเดินอาหาร ใช้เป็นยาสมุนไพรแก้ปวดท้อง ขับ

ลม ลดอาการท้องอืดท้องเฟ้อ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถสกัดน้ำมันหอมระเหยจากใบกะเพราซึ่งในน้ำมันหอมระเหยจะมีสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) และสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กองการแพทย์ทางเลือกกรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือกกระทรวงสาธารณสุข, 2550)

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน โดยการลดปริมาณความชื้นหรือน้ำอิสระ (Water activity) ให้ต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหาร นอกจากนั้นการลดความชื้นหรือปริมาณของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายและสะดวกในการเก็บรักษาและการขนส่ง (ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2555) วิธีการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพนั้นมักใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อให้แห้งซึ่งเป็นวิธีควบคุมการทำงานได้ง่ายและไม่ซับซ้อนแต่มีข้อจำกัดที่สำคัญ คือใช้เวลาในการอบแห้งที่นานส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพทางกายภาพ การสูญเสียสารอาหารและสารออกฤทธิ์สำคัญต่างๆ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของอาหารซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เป็นจำนวนมาก หากต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพจะต้องทำการทดลองหลายครั้งเพื่อหาข้อมูลผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องใช้ในการทดลอง รวมทั้งเกิดความยุ่งยากในการทดลอง ดังนั้นการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการอบแห้ง และแบบจำลองการอบแห้งจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้ง ปัจจุบันแบบจำลองการอบแห้งได้นำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการ ตลอดจนการทดลองและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมแทนการทดลองจริง (สักรกม, 2555)

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งสามารถสร้างความร้อนภายในอาหารหรือวัสดุชีวภาพได้ดี เนื่องจากไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ และสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 7-10 เท่า จึงช่วยรักษาคุณภาพ และลดอัตราการสูญเสียสารอาหารได้เป็นอย่างดี (ฤทธิ์ชัย, 2554ก) สอดคล้องกับผลงานวิจัยของน้ำฝน 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 และช่วยลดการสูญเสียสารอาหาร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของระดับกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ และน้ำหนักของตัวอย่างต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน

การทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้ง รวมถึงการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Deff) และค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของมวลและกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) โดยค่าพลังงานกระตุ้นจะเป็นค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดในการบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะของมวลความชื้นจากของเหลวเป็นไอน้ำในระหว่างปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสถานะของมวลความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำใบกะเพราแยกก้านและใบ จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดจำนวน 3 ครั้ง แล้วนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (Wasino Model: CE03) เพื่อไล่น้ำออกจากใบกะเพราบรรจุในถุงพลาสติกและปิด จากนั้นนำไปเก็บรักษาในตู้เย็น (Haier Model: HP-921F) ที่อุณหภูมิ $4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr เพื่อให้ใบกะเพราเกิดการถ่ายเทความชื้นเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007) การวิเคราะห์หาค่าความชื้นเริ่มต้นของใบกะเพรา นำใบกะเพราจำนวน 1 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert Model: 500/108I) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr (AOAC, 2005) จากการทดลองพบว่าใบกะเพรามีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$

2.2 การอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้พัฒนาโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยติดตั้งระบบใบกวนคลื่น (Mode stirring) ที่เตาไมโครเวฟขนาด 800 W (Panasonic Model: NN-S235WF) วางบนฐานเหล็กที่ติดตั้งตาชั่งระบบดิจิทัล (Sartorius Model: CP3202S) บันทึกปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง โดยสามารถปรับระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟได้ 5 ระดับ ได้แก่ 164, 231, 465, 605 และ 752 W (ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2555)

การอบแห้งใบกะเพราเพื่อศึกษาผลกระทบของระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยนำใบกะเพราจำนวน 30 g วางในถาดเซรามิกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $20 \times 20 \text{ cm}$ นำไปอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานที่ 164, 231, 465, 605, 752 W และศึกษาผลกระทบของน้ำหนักของใบกะเพราที่ 30, 50, 70, 90 g ระดับกำลังงานคงที่ 752 W โดยทำการอบแห้งจนเหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ จำนวน 3 ซ้ำ

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟจะวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาจะประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic (Table 1) การหาค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จาก Eq. (1) โดยรูปแบบสมการดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Özbek and Dadali (2007) และ Evin (2012)

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

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_t , M_i , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล ตามลำดับ ซึ่งในการศึกษาการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟค่าความชื้นสมดุลจะสามารถพิจารณาให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (น้ำฝน และคณะ, 2555; Evin, 2012; Assawarachan et al., 2013) แบบจำลองกึ่งทฤษฎี (Semitheoretical model) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงในสมการที่ (2) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ

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

เมื่อ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s), L คือความหนาของใบกะเพรา (m) และ t คือเวลาในการอบแห้ง (s)

การหาค่า D_{eff} ของการอบแห้งใบกะเพราอบแห้งสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีจัดรูปแบบของสมการที่ (3) ในรูปของฟังก์ชันลอการิทึมซึ่งรูปแบบสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (3)

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

สามารถคำนวณค่า D_{eff} ของใบกะเพราจากค่าความชื้นของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ และเวลาในการอบแห้ง (t)

ในขณะที่การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ของมวลความชื้น (E_a) ในใบกะเพรานั้นสามารถหาได้ด้วยการประยุกต์สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ของอัตราการอบแห้ง (k) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของน้ำหนักใบกะเพราส่วนด้วยกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟดังแสดงใน 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 กำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (W) (Özbek and Dadali, 2007) ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดความร้อนของคลื่นไมโครเวฟเกิดจากโมเมนต์ของการเคลื่อนไหวและการเสียดสีกันของโมเลกุลน้ำที่ผิวและในโครงสร้างชั้นในของใบกะเพรา จนเกิดพลังงานความร้อนปริมาณที่มากกว่าค่าความร้อนในการกลายเป็น (Heat of Vaporization) ส่งผลให้โครงสร้างของน้ำที่ผิวและชั้นในของโครงสร้างเซลล์ในใบกะเพราเกิดการเปลี่ยนสถานะจากมวลความชื้นในสถานะของเหลวกลายเป็นมวลความชื้นในสถานะไอและเคลื่อนที่ออกจากโครงสร้างเซลล์ชั้นในออกที่ผิวหน้าใบกะเพราอย่างรวดเร็วในสถานะนั้น ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นของวัสดุทางการเกษตรที่เป็นลักษณะแผ่นเรียบและมีความหนาของโครงสร้างที่บางมากไม่นิยมวิเคราะห์ในเทอมของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เนื่องจากมีผลกระทบต่อกรายการถ่ายเทมวลความชื้นและการเปลี่ยนสถานะของโมเลกุลน้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบของอัตราการอบแห้ง (k) และน้ำหนักของใบกะเพรา (m) ต่อกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (P) ดังนั้นการวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ของมวลความชื้น (E_a) จึงใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (4) สอดคล้องกับงานวิจัยของ น้ำฝน และฤทธิชัย, 2558; Evin, (2012), Assawarachan et al., (2013), Ozkan (2007) และ Özbek and Dadali (2007)

Table 1 Mathematical models given by various authors.

Model name	Model equation	Reference
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Assawarachan et al. (2011)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Dadal et al. (2007)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Pongtong et al. (2011)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	McMinn (2006)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Assawarachan et al. (2013)

k = drying constant (min^{-1}), n = drying index, and a , b and c = model parameters

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, $RMSE$) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias error, MBE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการ

ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Maskan, 2001; Ozkan et al., 2007) โดยค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองการอบแห้ง โดยค่าที่เข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 ค่า $RMSE$ และค่า MBE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองการอบแห้ง ดังนั้นแบบจำลองการอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสมจะมีค่า R^2 ที่มากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น แต่ในขณะที่ความผิดพลาดในการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่า χ^2 , $RMSE$ และ MBE ที่ต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลกระทบของระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟต่อ

จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบกะเพรา

จากการศึกษาผลกระทบของระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้ง พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบกะเพราที่น้ำหนัก 30 g จากความชื้นเริ่มต้น $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ อบแห้งจนเหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ ใช้เวลาเท่ากับ 18.50, 14.00, 9.00, 4.00 และ 2.75 min ที่ระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ที่ระดับ 164, 231, 465, 605 และ 752 W ตามลำดับ (Figure 1) ทั้งนี้เวลาในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับระดับกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ โดยการอบแห้งใบกะเพราที่ระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ 752 W จะใช้เวลาสั้นกว่าการอบแห้งที่ระดับกำลังงาน 164 W ถึง 6.73 เท่า อย่างไรก็ตามที่ระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ที่ 752 และ 605 W เป็นระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่มีการถ่ายเทพลังงานเข้าสู่ระบบมากกว่าพลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอของของระบบ ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่รวดเร็ว โดยมีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 1.86 และ $1.38 \text{ g}_{\text{water}} (\text{g}_{\text{dry matter}} \text{ min})^{-1}$ ส่งผลให้มีเส้นโค้งของความชื้นของอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้ง (Moisture Ratio Curve) ใกล้เคียงกัน ดังที่แสดงใน Figure 1 ดังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังงานคลื่นไมโครเวฟสูงขึ้นจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Maskan (2001) และ Dadal et al. (2007) เนื่องจากกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในใบกะเพราเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นในของใบกะเพราเกิดเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (ฤทธิ์ชัย, 2554ข) มีอัตราการระเหยน้ำที่สูงและคงที่ (Constant rate period) กระบวนการอบแห้งจะดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนความชื้นของใบกะเพราเข้าสู่ความชื้น

วิกฤติกระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ (Falling rate period)

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.9980-0.9995 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่นๆ และมีค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 0.1138-0.1413 ค่า $RMSE$ และค่า MBE อยู่ในช่วง 0.0095-0.0291 และ 0.0001-0.0008 ตามลำดับ (Table 2) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Henderson and Pabis, Wang and Singh และ Logarithmic เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Kingsly and Singh (2007) และ Dadal et al. (2007) ซึ่งพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดทับทิม กระเจี๊ยบเขียว และทุเรียน Table 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ซึ่งได้แก่ค่าคงที่การอบแห้ง (k) และค่าดัชนีการอบแห้ง (n) ทุกระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ นำค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานต่างๆ และนำค่าที่ได้จากการทำนายเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง

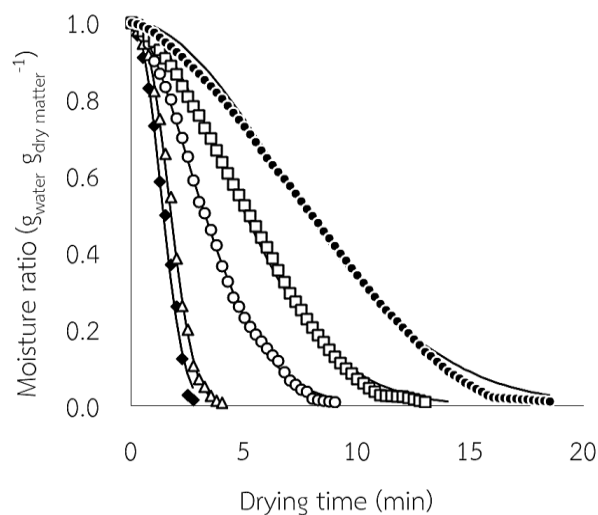


Figure 1 Figure 1 Moisture ratios for holy basil leaves versus time at various microwave power levels for sample mass of 30 g, comparing experimental curve with most predicted semi-empirical Page's equation; ● 164 W, □ 231 W, ○ 465 W, △ 605 W, ◆ 752 W, — kinetic model.

ทั้งนี้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับงานของ Dadal et al. (2007) และ Özbek and Dadali (2007) เมื่อพิจารณาว่า k พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟเพิ่ม

สูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เส้นโค้งการอบแห้งมีความลาดชันขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้ง เช่นเดียวกับค่า n ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีค่าสูงสุดที่ระดับ 752 W และมีค่าต่ำสุดที่ระดับ 164 W

Table 2 Statistical analysis of models at various microwave power levels.

Models	Power (W)	R^2	χ^2	RMSE	MBE
Newton	164	0.9676	0.1935	0.1111	0.0123
	231	0.9692	0.1756	0.1019	0.0104
	465	0.9760	0.1801	0.0920	0.0085
	605	0.9485	0.2008	0.1466	0.0215
	752	0.9612	0.2203	0.1341	0.0180
Henderson and Pabis	164	0.9749	0.1428	0.0879	0.0077
	231	0.9762	0.1312	0.0800	0.0064
	465	0.9819	0.1375	0.0702	0.0049
	605	0.9559	0.1378	0.1240	0.0154
	752	0.9661	0.1687	0.1163	0.0135
Page	164	0.9989	0.1219	0.0209	0.0004
	231	0.9992	0.1200	0.0148	0.0002
	465	0.9995	0.1310	0.0095	0.0001
	605	0.9993	0.1138	0.0163	0.0003
	752	0.9980	0.1413	0.0291	0.0008
Wang and Singh	164	0.9942	0.1575	0.0465	0.0022
	231	0.9919	0.1502	0.0520	0.0027
	465	0.9948	0.1609	0.0453	0.0021
	605	0.9819	0.1663	0.0849	0.0072
	752	0.9960	0.1728	0.0419	0.0018
Logarithmic	164	0.9957	0.1380	0.0366	0.0013
	231	0.9932	0.1274	0.0428	0.0018
	465	0.9949	0.1376	0.0371	0.0014
	605	0.9846	0.1367	0.0732	0.0054
	752	0.9965	0.1713	0.0376	0.0014

Table 3 Coefficients of Page's model estimated at various microwave power levels.

Power (W)	k (min ⁻¹)	n
164	0.0134	1.9319
231	0.0347	1.8429
465	0.0903	1.7277
605	0.1637	2.5158
752	0.3051	2.2760

3.2 ผลกระทบของน้ำหนักตัวอย่างต่อจลนพลศาสตร์การ

อบแห้งใบกะเพรา

การศึกษาผลของน้ำหนักตัวอย่างที่ 30, 50, 70 และ 90 g ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานคงที่ 752 W พบว่าใช้เวลาในการอบแห้ง 2.75, 5.00, 6.00 และ 7.50 min ตามลำดับ (Figure 2) จากความชื้นเริ่มต้น $5.19 \pm 0.13 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ อบแห้งจนเหลือความชื้น $0.06 \pm 0.02 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ โดยการอบแห้งใบกะเพราที่น้ำหนัก 30 g จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่น้ำหนัก 90 g ถึง 2.73 เท่า ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ โดยเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวอย่างจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Dadal et al. (2007) และ Özbek and Dadali (2007)

ผลของน้ำหนักตัวอย่างต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression) โดยใช้ค่า R^2 เป็นดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของแบบจำลอง และ ค่า χ^2 , RMSE, MBE เป็นค่าพารามิเตอร์บอกความผิดพลาดในการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ทางสถิติในการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสม ดังนั้นการวิเคราะห์แบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่า R^2 ที่มากและมีค่า χ^2 , RMSE, MBE ที่ต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ (Maskan, 2001; Dadal et al., 2007; Özbek and Dadali, 2007; Assawarachan et al., 2011) Table 4 แสดงค่าพารามิเตอร์และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่า R^2 ที่มากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9990-0.9995 นอกจากนี้ค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 0.1311-0.1412 ค่า RMSE และค่า MBE อยู่ในช่วง 0.0068-0.0291 และ 0.0001-0.0008 ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาของ Dadal et al., 2007 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเจียบเขียวในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเช่นกัน Table 5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ซึ่งได้แก่ค่าคงที่การอบแห้ง (k) ค่าดัชนีการอบแห้ง (n) และ Figure

2 แสดงค่าที่ได้จากการทำนายอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานคงที่ 752 W ในการอบแห้งใบกะเพราน้ำหนัก 30, 50, 70 และ 90 g เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง ทั้งนี้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของใบกะเพราที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง เมื่อพิจารณาค่า k พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการอบแห้งลดลง เช่นเดียวกับค่า n มีค่าสูงสุดและมีค่าต่ำสุดที่น้ำหนักตัวอย่าง 30g และ 90g

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff})

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานที่ 164, 231, 465, 605, 752 W และน้ำหนักเริ่มต้นของใบกะเพราที่ 30, 50, 70, 90 g ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนของมวลและกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) เท่ากับ 0.039, 0.046, 0.051, 0.062, 0.067, 0.093, 0.119, 0.182 และ 0.130 g W^{-1} ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) มีค่าเท่ากับ 4.15×10^{-11} , 5.92×10^{-11} , 6.64×10^{-11} , 7.02×10^{-11} , 8.71×10^{-11} , 1.07×10^{-10} , 1.34×10^{-10} , 2.05×10^{-10} และ $2.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของใบกะเพราให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็วและการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในโครงสร้างเซลล์ในชั้นในส่งผลให้มวลความชื้นในโครงสร้างเซลล์ชั้นในเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นไอน้ำและแพร่ออกจากผิวหน้าใบกะเพราอย่างรวดเร็ว โดยมีความมากกว่าอัตราการเคลื่อนของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเติมเต็มบริเวณผิวหน้า พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface diffusion) ทั้งสถานะของเหลวและไอน้ำ ดังนั้นค่า D_{eff} จึงมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานกระตุ้นด้วยการประยุกต์สมการอาร์เรเนียส น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของอัตราส่วนของมวลและคลื่นกำลังงานไมโครเวฟ (m/P) ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรจึงถูกศึกษาในรูปของอัตราการอบแห้ง (k) และอัตราส่วนของมวลและคลื่นกำลังงานไมโครเวฟ (m/P) สอดคล้องกับงานวิจัยของปองพลและฤทธิชัย (2557) และ Özbek and Dadali (2007) ซึ่งศึกษาหาค่า D_{eff} ของวัสดุทางการเกษตรที่มีรูปทรงแผ่นเรียบบางในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่อัตราส่วนของมวลและคลื่นกำลังงานไมโครเวฟ (m/P)

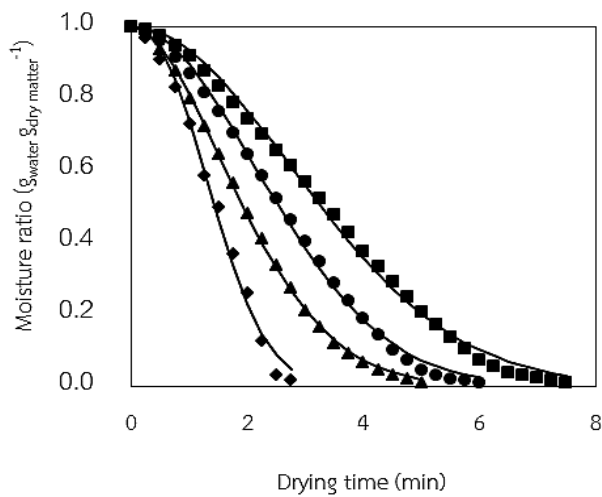


Figure 2 Moisture ratios for holy basil leaves versus time at various sample mass for microwave power level of 752 W, comparing experimental curve with most predicted semi-empirical Page's equation; ◆ 30 g, ▲ 50 g, ● 70 g, ■ 90 g, — kinetic model.

Table 4 Statistical analysis of models at various samples mass.

Models	Weight (g)	R^2	χ^2	RMSE	MBE
Newton	30	0.9612	0.2203	0.1341	0.0180
	50	0.9727	0.1866	0.1004	0.0101
	70	0.9675	0.1960	0.1129	0.0127
	90	0.9680	0.1995	0.1133	0.0128
Henderson and Pabis	30	0.9661	0.1687	0.1163	0.0135
	50	0.9781	0.1434	0.0803	0.0065
	70	0.9738	0.1461	0.0915	0.0084
	90	0.9745	0.1478	0.0911	0.0083
Page	30	0.9980	0.1412	0.0291	0.0008
	50	0.9999	0.1342	0.0068	0.0000
	70	0.9992	0.1311	0.0172	0.0003
	90	0.9990	0.1326	0.0193	0.0004
Wang and Singh	30	0.9960	0.1728	0.0419	0.0018
	50	0.9191	0.1693	0.1545	0.0239
	70	0.9939	0.1647	0.0491	0.0024
	90	0.9947	0.1645	0.0460	0.0021
Logarithmic	30	0.9965	0.1715	0.0376	0.0014
	50	0.9942	0.1458	0.0413	0.0017
	70	0.9952	0.1449	0.0392	0.0015
	90	0.9960	0.1455	0.0359	0.0013

Table 5 Coefficients of Page's model estimated at various sample mass.

Sample (g)	k (min ⁻¹)	n
30	0.3051	2.2760
50	0.2092	1.8295
70	0.1119	1.9610
90	0.0682	1.9621

3.4 ค่าพลังงานกระตุ้น

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถคำนวณความสัมพันธ์ในรูปฟังก์ชันลอการิทึมของสมการอาร์เรเนียส (Eq. (4)) โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงใน Eq. (5)

$$\ln k = \ln k_0 - \left(\frac{E_a \cdot m}{P} \right) \quad (5)$$

แฟกเตอร์ความถี่ (k_0) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถคำนวณจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง $\ln(k)$ และน้ำหนักของใบกะเพราต่อกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (m/P) พบว่าค่า k_0 และ E_a มีค่าเท่ากับ 0.5773 min^{-1} และ 19.85 W g^{-1} ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 3 ทั้งนี้ค่า E_a ของการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และชนิดของอาหารหรือวัสดุชีวภาพ

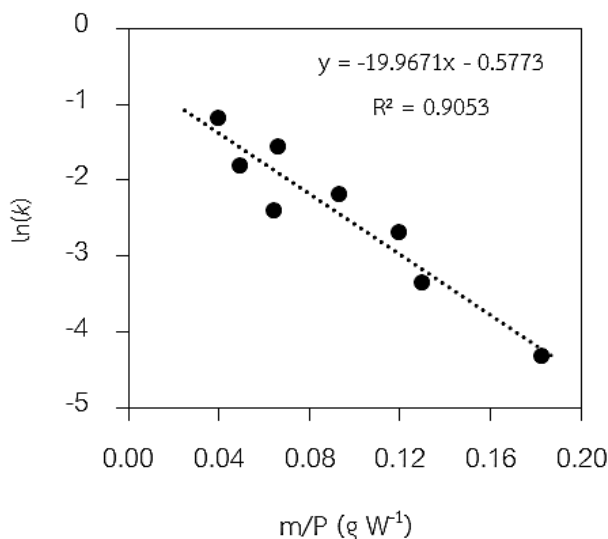


Figure 3 The effect of power level/sample mass on drying constant of holy basil leaves.

4 สรุป

ผลการศึกษา พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของใบกะเพราได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าความคลาดเคลื่อนเอนเอียงเฉลี่ย (MBE) ต่ำที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) มีค่าเท่ากับ 4.15×10^{-11} ถึง $2.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อัตราส่วนของมวลและคลื่นกำลังงานไมโครเวฟ (m/P) เท่ากับ 0.039, 0.046,

0.051, 0.062, 0.067, 0.093, 0.119, 0.182 และ 0.130 g W^{-1} ตามลำดับ

5 เอกสารอ้างอิง

- กองการแพทย์ทางเลือกกรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข. 2550. ตำราวิชาการสูคนบำบัด. กรุงเทพมหานคร: สำนักกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
- น้ำฝน ไชยลังกา, รัตนาภรณ์ จันทร์ทิพย์, ดวงพร อมรเลิศพิศาล, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2555. ผลกระทบของระดับกำลังงานของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสาหร่ายเตาอบแห้ง. รายงานการประชุมวิชาการประมง ครั้งที่ 7 ประจำปี 2555. เชียงใหม่: คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรน้ำมหาวิทยาลัยแม่โจ้. 6-8 ธันวาคม 2555, สันทราย, เชียงใหม่.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์, ฉัตรชนก คงสิทธิ์, โชติพงศ์ กาญจนประโชติ, ดวงพร อมรเลิศพิศาล. 2555. คุณลักษณะการอบแห้งของสาหร่ายเตาด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 18, 1-8.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2554ก. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต 1, 31-42.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2554ข. เทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแปรรูปอาหาร. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17, 41-52.
- ลักกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: ท้อป.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis. (18th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.: USA.
- Assawarachan, R., Sripinyowanich, J., Theppa-dungporn, K., Noomhorm, A. 2011. Drying paddy by microwave vibro-fluidized drying using single mode applicator. Journal of Food, Agriculture & Environment 9, 50-54.
- Assawarachan, R., Nookong, M., Chailungka, N., Amornlerdpison, D. 2013. Effect of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of spirogyra sp. Journal of Food, Agriculture & Environment 11, 15-18.
- Dadal, G., Apar, D.K., Özbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. Drying Technology 25, 917-924.
- Evin, D. 2012. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. Food and Bioproducts Processing 90, 323-332.
- Kingsly, A.R.P., Singh, D.B. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. Journal of Food Engineering 79, 741-744.

- Maskan, M. 2001. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44, 71-78.
- McMinn, W.A.M. 2006. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwaveconvective and microwave vacuum drying of lactose powder. *Journal of Food Engineering* 72, 113-123.
- Özbek, B., Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering* 83, 541-549.
- Ozkan, I.A., Akbudak, B., Akbudak, N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering* 78, 577-583.
- Pongtong, K., Assawarachan, R., Noomhorm, A. 2011. Mathematical models for vacuum drying characteristics of pomegranate aril. *Journal of Food Science and Engineering* 1, 11-19.