



ผลกระทบของอุณหภูมิและชั้นความหนาต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว

Effects of Temperature and Layer Thicknesses on Drying Kinetics of Coconut Residue

ฤทธิชัย อัสวาราชันย์^{1*}

Rittichai Assawarachan^{1*}

¹คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290

¹Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Sansai, Chiang Mai, 50290, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-8-5704-9146, Fax: +66-34-351-896, E-mail: rittichai.assawarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของความหนาของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้งที่ระดับชั้นความหนาที่ 7.5, 10, 12.5 mm ในช่วงอุณหภูมิที่ 55, 65, 75°C ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิและชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวต่อคุณลักษณะการอบแห้งของกากเนื้อมะพร้าว การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นวิธีที่ใช้หาความเหมาะสมของแบบจำลองเอมพิริคัล 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Henderson and Pabis และ Page ผลการศึกษาพบว่าแบบของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด การหารูปแบบสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การอบแห้งของแบบจำลองของ Page ด้วยเทคนิคการหาพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติเพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง (k) และดัชนีการอบแห้ง (n) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (T) และชั้นความหนา (L) ซึ่งจะเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมและสามารถทำนายได้แม่นยำ การวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทมวลความชื้นในระหว่างการอบแห้งเป็นไปตามรูปแบบความสัมพันธ์ตามแบบจำลองของฟิค (Fick's diffusion model) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) เท่ากับ $0.99-4.17 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$ และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ 12.04 ถึง 44.22 kJ/mol

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยลมร้อน, แบบจำลองเอมพิริคัล, สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล, พลังงานกระตุ้น

Abstract

In this study, coconut residue were dried as single layers with thickness of 7.5, 10, and 12.5 mm in drying air temperatures of 55, 65 and 75°C in a laboratory scale tray dryer. The effect of drying air temperature and thickness on the drying characteristics was determined. A non-linear regression procedure was used to fit experimental moisture loss data using three empirical models, namely, Newton, Henderson and Pabis, and Page. The Page model showed an excellent fit to predict drying behavior of the coconut residue because this model gave the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest chi-square (χ^2) and root mean square error (RMSE). The 3-D response surface plot and the contour plot derived from the mathematical models were applied to determine drying parameter prediction equations. The Response surface analysis (3-D) showing the effect of temperature (°C) and layer thickness (L) on the response in the change in drying rate (k) and drying index (n) of Page model during hot air drying, was found to be in close agreement with the value predicted by the model. Moisture transfer from coconut residue was described by applying the Fick's diffusion model, and the effective diffusivity (D_{eff}) changes between $0.99-4.17 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$ and the activation energy of moisture diffusion during drying was found to be 12.04 to 44.22 kJ mol⁻¹

Keywords: hot air drying, empirical model, effective diffusivity, activation energy

1 บทนำ

มะพร้าว เป็นพืชยืนต้นชนิดคุณลักษณะหนึ่งอยู่ในตระกูลปาล์ม สามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายเช่น น้ำและเนื้อมะพร้าวอ่อนใช้รับประทาน เนื้อในผลแก่นำไปขูดและสกัดน้ำกะทิ จึงเป็นพืชที่สัมพันธ์กับเศรษฐกิจและสังคมไทยชนิดหนึ่ง นอกจากจะสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกแล้วยังก่อให้เกิดอุตสาหกรรมแปรรูปต่อเนื่องเป็นสินค้าส่งออกสร้างรายได้ให้แก่ประเทศได้ โดยประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตมะพร้าวได้เป็นอันดับ 6 ของโลกและมีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 128 ล้านบาทต่อปี ปัจจุบันอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำกะทิกระบวนการสเตอริไลซ์ (Sterilization) ส่งผลให้เกิดกากของเนื้อมะพร้าวเป็นจำนวนมาก และกากเนื้อมะพร้าวส่วนใหญ่ถูกนำไปทำอาหารสัตว์ และนำกากเนื้อมะพร้าวอบแห้งเพื่อนำไปสกัดน้ำมันมะพร้าวเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์และความสามารถในการแข่งขันเชิงธุรกิจ (Assawarachan, 2013) กากเนื้อมะพร้าวที่ผ่านการอบแห้งมีความชื้นประมาณ $0.1364-0.1765 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ ซึ่งเป็นความชื้นที่กำหนดในการซื้อขายกากมะพร้าวตากแห้ง โดยราคาขายประมาณ 2.0 บาทต่อโลกรัม ปัจจุบันมีผู้ประกอบการได้นำกากมะพร้าวสดที่เหลือจะกระบวนการผลิตกะทิจากโรงงานผลิตกะทิมาอบแห้งแล้วนำไปสกัดน้ำมันมะพร้าวซึ่งมีราคาขายในท้องตลาดประมาณ 750-800 บาทต่อลิตรน้ำมันมะพร้าว (Sripinyowanich et al., 2012; Assawarachan, 2013)

การทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ (สัคมณ, 2555) ปัจจุบันการจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (Polynomial model) เพื่อใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง (ฤทธิชัย, 2556) รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งวัสดุทางการเกษตร จินตนาพร และคณะ (2555) ศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากมะพร้าวในระหว่างการอบแห้งด้วย

ลมร้อนที่อุณหภูมิ ที่ 40, 60 และ 80°C ที่ขึ้นความหนาของกากมะพร้าวคงที่ที่ 2 mm สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฤทธิชัย และคณะ (2554) ซึ่งวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของเปลือกทับทิม ที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80°C โดยหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด และค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม การศึกษาหาการศึกษหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิเท่านั้น สอดคล้องกับการศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าวด้วยการอบแห้งแบบพลูไดซ์เซชัน (Niamnuyand Devahastin, 2005) และการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ (Assawarachan, 2013) ผลงานวิจัยของปองพล และฤทธิชัย (2557) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความหนาของชั้นวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของดอกคาโมมาลัยระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน ในขณะที่งานวิจัยของ อรพรรณ และคณะ (2554) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิมอบแห้ง ที่ 50, 60, 70 และ 80°C และความหนาของชั้นกากเนื้อมะพร้าวที่ 5, 10 และ 15 mm ตามลำดับ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านปริมาณน้ำมันและความขาวของกากมะพร้าวหลังการอบแห้ง จากผลการสืบค้นข้อมูลพบว่า ปัจจุบันรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ และชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว รวมทั้งการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และค่าพลังงานกระตุ้นยังขาดแคลนข้อมูล ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ จึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิที่ 55, 65, 75°C และชั้นความหนาที่ 7.5, 10, 12.5 mm ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งกากมะพร้าวด้วยลมร้อน เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม และนำค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมมาวิเคราะห์หาแบบสมการทั่วไป ที่ใช้ในการทำนายค่าพารามิเตอร์การอบแห้งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตลอดจนการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการอบแห้ง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุ

กากเนื้อมะพร้าวสดซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำกะทิได้รับจากบริษัท อ่าพลฟู้ดส์ โพรเซสซิง จำกัด จากนั้นนำตัวอย่างกากมะพร้าวสดมาแบ่งบรรจุลงในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีซิปล็อคเก็บไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 0°C กากมะพร้าวสดมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ $1.72 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$

2.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้ง

2.2.1 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้น

วิเคราะห์หาค่าความชื้นเริ่มต้นของกากเนื้อมะพร้าว ด้วยวิธีมาตรฐานใช้กากมะพร้าว จำนวน 5.0 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 oz ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จำนวน 50 ตัวอย่าง และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อน (500/108l, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิตอล (CP2245, Sartorius Analytical, Switzerland) ความชื้นของกากเนื้อมะพร้าว (MC , $\text{g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$) ถูกคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_f} \quad (1)$$

เมื่อ W_i และ W_f คือน้ำหนักเริ่มต้นของกากเนื้อมะพร้าว (g) และน้ำหนักสุดท้ายของกากเนื้อมะพร้าว (g) ตามลำดับ และอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

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

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_t , M_i , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุลตามลำดับ

2.2.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุล

การวิเคราะห์หาค่าความชื้นสมดุลของกากเนื้อมะพร้าว (equilibrium moisture content, EMC) ด้วยวิธีเชิงสถิติโดยนำกากเนื้อมะพร้าววางไว้ในตะแกรงที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวจำนวน 5 ชนิด (Table 1) ใส่ในขวดโหลแบบมีฝาปิดชนิดมีแผ่น

ยางซิลิโคน โดยไม่ให้ตะแกรงสัมผัสกับสารละลายเกลืออิ่มตัว จากนั้นปิดฝาขวดโหลให้สนิท และนำขวดโหลใส่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Figure 1) ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 35°C จากนั้นนำตัวอย่างกากมะพร้าวมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 วันจนน้ำหนักของตัวอย่างกากเนื้อมะพร้าวไม่เปลี่ยนแปลง นำตัวอย่างกากมะพร้าวไปหาค่าความชื้นสมดุล (Sripinyowanich et al., 2012)

Table 1 Five selected saturated salt solutions with their corresponding RH and approximately composition at 35°C .

Salt	RH (%)	Salt (g)	Water(ml)
LiCl	11.25	177	100
MgCl ₂	32.05	800	100
Mg(NO ₃) ₂	49.91	667	100
NaCl	74.87	334	100
KNO ₃	90.79	250	100

Source: Bell and Labuza (2000)

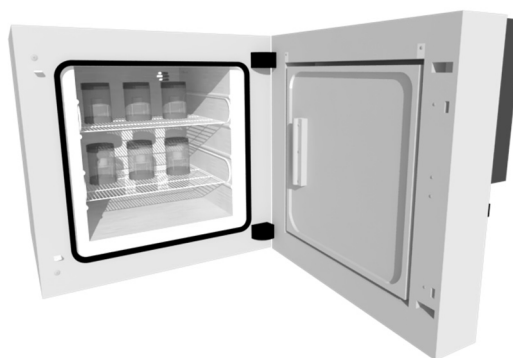


Figure 1 Diagram of equilibrium moisture content (Me) determination

2.2.3 การหาอัตราการอบแห้ง

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระดับชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น (MR) ของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75°C และชั้นความหนาที่ 7.5, 10, 12.5 mm ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Figure 2) ถูกออกแบบและสร้างโดย สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสร้างลมร้อนซึ่งประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.1 kW จำนวน 3 ขดและพัดลมซึ่งถูก ควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็ว (DVUS-940W1, Panasonic Corp., Japan) ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID (TTM J4/J5, Toho, Japan)

ภาคสำหรับวางตัวอย่างติดตั้งตาช้าง (CDR-3, CST, China) สำหรับวัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างกากมะพร้าว และบันทึกค่าผ่านจากช่องสัญญาณ RS-485 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกค่าประกอบด้วยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งถูกบันทึกทุกๆ 5 min นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณในรูปแบบของค่าความชื้น และอัตราส่วนความชื้นในตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบถดถอย (ฤทธิ์ชัย และคณะ 2556)

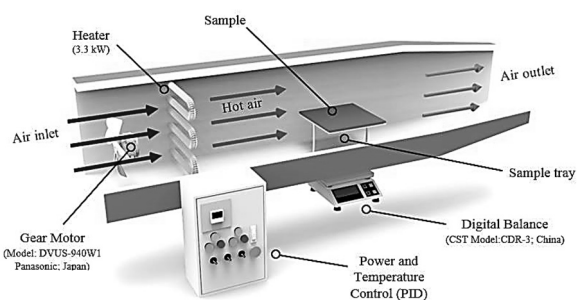


Figure 2 Diagram of the tray drying system.

กากเนื้อมะพร้าวสดมีน้ำหนักเริ่มต้น 100 g อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Figure 1) จากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ $0.071 \pm 0.003 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

แบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (empirical equation) เช่น แบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis และ Page ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดัง Table 1 (Doymaz, 2008; ปองพล และฤทธิ์ชัย, 2557; จินตนาพร และคณะ 2555; ฤทธิ์ชัย และคณะ, 2554) การวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear regression) ด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง (Wankhade et al., 2013; Assawarachan, 2013)

Table 2 Mathematical models given by various authors

Model name	Model equation
1. Newton	$MR = \exp(-k t)$ (3)
2. Page	$MR = \exp(-k t^n)$ (4)
3. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-k t)$ (5)

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2), ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป (Dimensionless) ดังแสดงใน Eq. (6) และ (7)

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

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

เมื่อค่า $MR_{\text{exp},i}$ และ $MR_{\text{pre},i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง N คือจำนวนข้อมูลในการทดลอง และ n_p คือจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

2.4 การวิเคราะห์หาสมการทั่วไปในการทำนายค่าพารามิเตอร์การอบแห้ง

การศึกษามลกระทบของอุณหภูมิ (T) และระดับชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าว (L) เพื่อหารูปแบบสมการความสัมพันธ์ทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร (ฤทธิ์ชัย และคณะ 2556) และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองนี้ แสดงใน Eq. (8)

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (8)$$

ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว (y) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรของระดับอุณหภูมิ (x_1) และระดับชั้นความหนา (x_2) โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2)$ โดยที่ $E(y)$ คือค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อตัวแปร x_1 และ x_2 สามารถคำนวณพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) การแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟฟิคโดยที่จะถูกพล็อตระหว่างระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้

มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อใช้หาสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรซึ่งไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ขั้นตอนแรกก็ต้องหาตัวแปรที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง ตาม Eq. (9)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \varepsilon \quad (9)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_x$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ x_i คือตัวแปรอิสระ ส่วนค่า ε คือค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง

2.5 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

สมการกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นดังแสดงใน Eq. (10) สำหรับวัสดุที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม (sphere)

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}) \quad (10)$$

เมื่อ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ($m^2 s^{-1}$), r_0 คือ รัศมีของกากเนื้อมะพร้าว (m) และ t คือเวลาในการอบแห้ง (s)

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่กากมะพร้าวดูดซับพลังงาน มีความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy for diffusion, E_a) ซึ่งบ่งบอกค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของมวลความชื้นในกากเนื้อมะพร้าว (latent heat of vaporization) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยมีรูปแบบสมการดังแสดงใน Eq. (11) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของฤทธิชัย และคณะ (2554) และวิกันดา และคณะ (2556)

$$D_{eff} = D_0 \exp(-\frac{E_a}{RT}) \quad (11)$$

เมื่อ D_0 คือ ปัจจัยก่อนเลขชี้กำลัง ($m^2 s^{-1}$), E_a คือ พลังงานกระตุ้น ($kJ mol^{-1}$), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.008314 kJ mol^{-1}$ และ T คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 คุณสมบัติของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้ง

จากการศึกษาพบว่า ค่าความชื้นเริ่มต้นของกากเนื้อมะพร้าวมีค่าเท่ากับ $1.72 \pm 0.03 g_{water} g_{dry matter}^{-1}$ และมีค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ $0.0554 \pm 0.003 g_{water} g_{dry matter}^{-1}$ อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าวเริ่มต้นที่น้ำหนัก 100 g จากความชื้นเริ่มต้นอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.071 \pm 0.003 g_{water} g_{dry matter}^{-1}$ ใช้เวลาเท่ากับ 130 ถึง 1,000 min ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75°C และชั้นความหนาของ 7.5, 10.0, 12.5 mm ตามลำดับ Figure 3 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 55°C (adiabatic drying process) พบว่ามีอัตราการอบแห้ง เท่ากับ $0.0048, 0.0029, 0.0017 g_{water} g_{dry matter}^{-1} min$ ชั้นความหนาของ 7.5, 10.0, 12.5 mm ตามลำดับ เมื่อชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้งจะลดลง ดังนั้นเมื่อชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.5 mm พบว่าอัตราการอบแห้งลดลง 39.58% เมื่อเพิ่มชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวเพิ่มขึ้นจาก 10.0 เป็น 12.5 mm และอัตราการอบแห้งลดลงเท่ากับ 41.37% เมื่อชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวเพิ่มขึ้นจาก 7.5 เป็น 10.0 mm ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 65°C (Figure 4) พบว่าเมื่อระดับชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวลดลง 2.5 mm ส่งผลอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 66.94% และ 43.89% และการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 75°C (Figure 5) เมื่อระดับชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวลดลง 2.5 mm ส่งผลอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเท่ากับ 31.26% และ 32.10% ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นระดับชั้นความหนาที่เหมาะสมในอบแห้งกากเนื้อมะพร้าว เท่ากับความหนาที่ 10.0 mm ในขณะการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้ง ที่ระดับความหนาของ 10.0 mm มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.0029, 0.0038 และ $0.0089 g_{water} g_{dry matter}^{-1} min$ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75°C ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น 10°C พบว่ามีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเท่ากับ 32.14% และ 134.21% เมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิจาก 55°C เพิ่มขึ้นเป็น 65°C และเพิ่มอุณหภูมิจาก 65°C เพิ่มขึ้นเป็น 75°C ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ให้ในกากเนื้อมะพร้าวสำหรับการอบแห้งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าวได้แก่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 75°C และชั้นความหนา 10.0 mm มีความเหมาะสมมากที่สุดในการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากพลังงานที่ให้สู่ระบบในกระบวนการอบแห้งโดยผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศร้อนถูกกากมะพร้าวดูดซับพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิจนเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อน พลังงานที่เหลือถูกถ่ายเทเข้าเนื้อกากเนื้อมะพร้าวอย่างต่อเนื่อง และจนถึงอุณหภูมิที่มวลความชื้นในกากมะพร้าวระเหยเปลี่ยนสถานะจากมวลความชื้นเป็นไอน้ำในโครงสร้างเซลล์แพร่ออกมาที่ผิวในสถานะที่เป็นไอน้ำของมวลความชื้น และแพร่ออกจากโครงสร้างเซลล์ของกากเนื้อมะพร้าวซึ่งอยู่ด้านล่างสุดของชั้นความหนาเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของกากมะพร้าวจะเกิดการแพร่ผ่านกากเนื้อมะพร้าวที่เป็นวัสดุพรุนออกมาที่ผิวหน้าของเนื้อมะพร้าวและถูกถ่ายเทไอน้ำความชื้นไปกับตัวกลางของอากาศร้อน ดังนั้นสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 75°C และชั้นความหนา 10.0 mm จึงมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานในการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าวได้เหมาะสมที่สุด สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงานของเทอร์โมไดนามิกส์และผลการวิเคราะห์ของ Doymaz (2011) และ Agarry and Aworanti (2012)

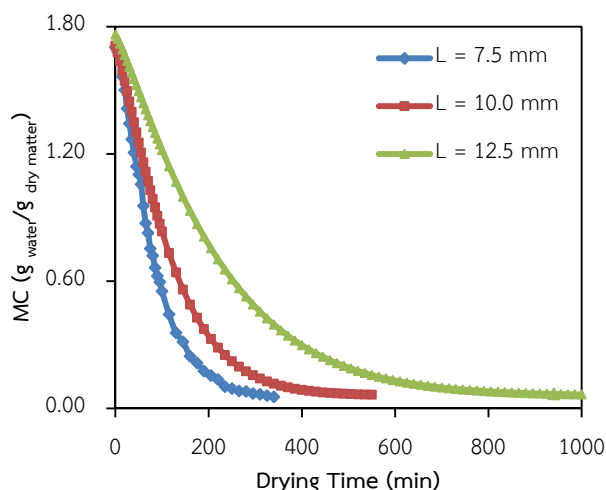


Figure 3 Effects of layer thicknesses on the MC of coconut residue change (constant temperature at 55°C).

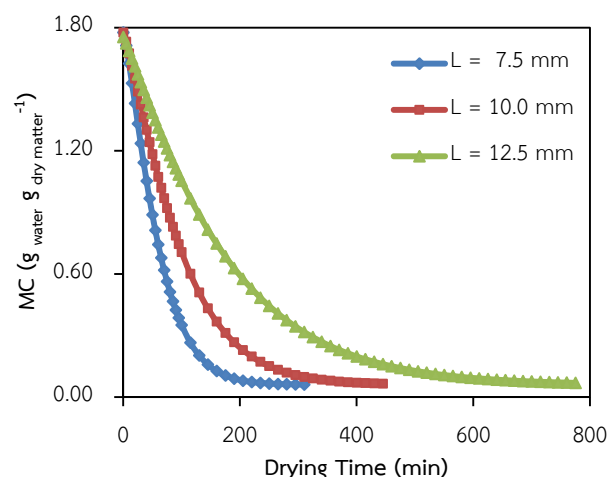


Figure 4 Effects of layer thicknesses on the MC of coconut residue change (constant temperature at 65°C).

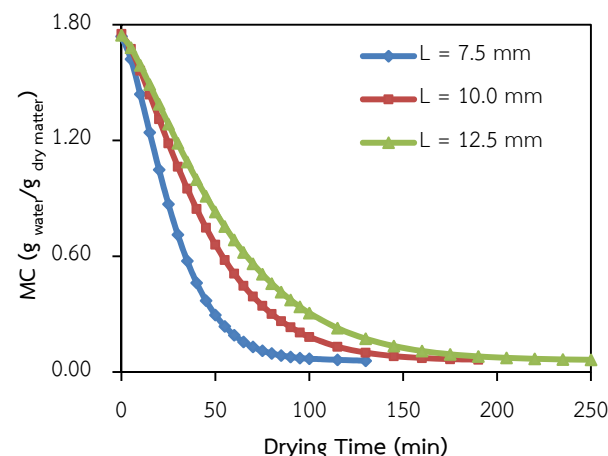


Figure 5 Effects of layer thicknesses on the MC of coconut residue change (constant temperature at 75°C).

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือแบบจำลองเอมพิริคัลของการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าวซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis และ Page ซึ่งเป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model) ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองเอมพิริคัลของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 ในช่วง 0.9816-0.9979 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองเอมพิริคัลแบบอื่นๆ มีค่า χ^2 อยู่ระหว่าง 0.01×10^{-3} - 6.24×10^{-3} และค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0032-0.0789 (Table 3)

เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลของ Newton และ Henderson and Pabis พบว่าแบบจำลองเอมพิริคัลของ Page สามารถใช้ในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

ความชื้นกากเนื้อมะพร้าวได้เหมาะสมมากที่สุดเมื่อใช้วิธีวิเคราะห์ทางสถิติ สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Orikasa et al., 2014; Assawarachan, 2013; Doymaz, 2008; ปองพล และฤทธิชัย 2557; จินตนาพร และคณะ 2555; ฤทธิชัย และคณะ 2554 ดังนั้นผลการศึกษานี้จึงเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบบจำลองเอมพิริคัลของ Page มีความเหมาะสมมากที่สุดในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากเนื้อมะพร้าว และค่าพารามิเตอร์การอบแห้งของแบบจำลองเอมพิริคัลของ Page มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวต่อค่าพารามิเตอร์ในการอบแห้งของแบบจำลองของ Page พบว่าค่า k (Drying rate) หรืออัตราการอบแห้งซึ่งมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์เป็นสมการพหุนาม (polynomial model)

ซึ่งในขณะนั้น ค่า n (Drying Index) คือค่าดัชนีการอบแห้งของพารามิเตอร์การอบแห้งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ

Page ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (T) และชั้นความหนา (L) สามารถคำนวณได้จากสมการทั่วไปตามรูปแบบความสัมพันธ์ของกราฟพื้นผิวผลตอบแบบสามมิติตามที่แสดงใน Figure 6 และ Figure 7 และมีรูปแบบสมการเป็นแบบจำลองเชิงเส้นมีรูปแบบความสัมพันธ์ตาม Eq. (12) และ (13)

$$(k \times 10^{-4}) = 145.01 - 3.43T - 5.2 - 0.005(T)(L) + 0.041T^2 + 0.26L^2 \quad (12)$$

$$(R^2 = 0.9887)$$

$$n = 1.079 + 0.006T - 0.0018L \quad (13)$$

$$(R^2 = 0.9963)$$

Table 3 Statistical analysis of models at various drying temperature and layer thicknesses levels.

Drying Model	Temperature (°C)	Layer thicknesses (mm)	Empirical Drying Model Constants	R^2	$\chi^2 \times 10^{-3}$	RMSE
Newton	55	7.5	$k = 0.0155$	0.9495	10.82	0.1011
		10.0	$k = 0.0101$	0.9807	5.21	0.0708
		12.5	$k = 0.0053$	0.9846	2.34	0.0474
	65	7.5	$k = 0.0184$	0.9532	3.22	0.0568
		10.0	$k = 0.0121$	0.9663	4.32	0.0657
		12.5	$k = 0.0065$	0.9865	0.31	0.0015
	75	7.5	$k = 0.0468$	0.9217	9.45	0.0837
		10.0	$k = 0.0277$	0.9333	7.76	0.0881
		12.5	$k = 0.0219$	0.9365	7.28	0.0853
Page	55	7.5	$k = 0.0028 ; n = 1.3909$	0.9932	0.63	0.0771
		10.0	$k = 0.0025 ; n = 1.2211$	0.9887	1.61	0.0393
		12.5	$k = 0.0017 ; n = 1.1742$	0.9979	0.01	0.0032
	65	7.5	$k = 0.0048 ; n = 1.2814$	0.9945	0.04	0.0026
		10.0	$k = 0.0039 ; n = 1.2022$	0.9906	0.13	0.0037
		12.5	$k = 0.0026 ; n = 1.2114$	0.9875	0.25	0.0012
	75	7.5	$k = 0.0069 ; n = 1.2061$	0.9816	5.32	0.0729
		10.0	$k = 0.0054 ; n = 1.3417$	0.9834	6.24	0.0789
		12.5	$k = 0.0049 ; n = 1.2949$	0.9902	0.43	0.0207
		7.5	$k = 0.0115 ; a = 1.4906$	0.8432	47.8	0.2126

Drying Model	Temperature (°C)	Layer thicknesses (mm)	Empirical Drying Model Constants	R^2	$\chi^2 \times 10^{-3}$	RMSE
Henderson And Pabis	55	10.0	$k = 0.0101$; $a = 1.2635$	0.9561	4.73	0.0675
		12.5	$k = 0.0053$; $a = 1.1959$	0.9522	7.92	0.0282
	65	7.5	$k = 0.0123$; $a = 1.1901$	0.9142	19.6	0.1403
		10.0	$k = 0.0118$; $a = 1.2456$	0.9524	4.45	0.0663
		12.5	$k = 0.0066$; $a = 1.0612$	0.9318	10.36	0.3211
	75	7.5	$k = 0.0537$; $a = 1.6536$	0.8782	25.11	0.1364
		10.0	$k = 0.0314$; $a = 1.5011$	0.9135	15.53	0.1246
		12.5	$k = 0.0243$; $a = 1.4227$	0.9368	11.42	0.1069

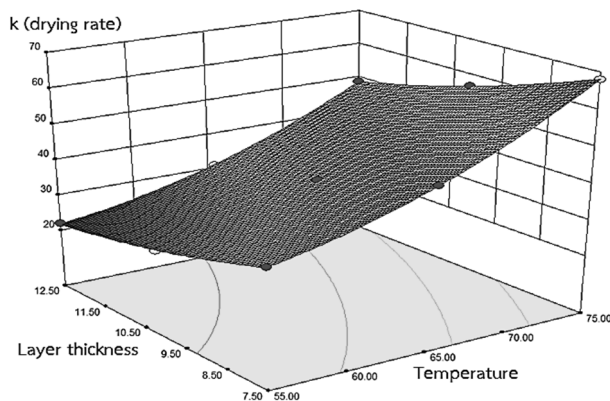


Figure 6 Drying rate parameter (k) of Page model on various drying temperature and layer thicknesses levels.

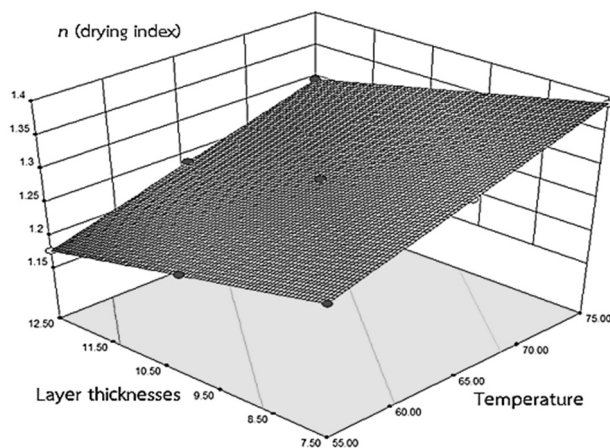


Figure 7 Drying index parameter (n) of Page model on various drying temperature and layer thicknesses levels.

3.3 การทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทวนสอบความแม่นยำของแบบสมการทั่วไปในการทำนายผลของค่าพารามิเตอร์การอบแห้ง ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ด้วยการทวนสอบด้วยข้อมูลการอบแห้ง

กากเนื้อมะพร้าวที่อุณหภูมิ 60°C และระดับชั้นความหนา 8.75 mm และที่อุณหภูมิ 70°C และระดับชั้นความหนา 11.25 mm โดยใช้ Eq. (12) และ (13) ทำนายค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page เพื่อวิเคราะห์หาค่า k และค่า n เท่ากับ 0.0059, 1.2815 และ 0.0076, 1.2965 ตามลำดับ นำค่าที่ได้จากการทำนายมาเปรียบเทียบกับข้อมูลในการทดลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวอบแห้งที่ได้จากการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 60°C และระดับชั้นความหนา 8.75 mm และที่อุณหภูมิ 70°C และระดับชั้นความหนา 11.25 mm

ความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นทวนสอบความแม่นยำหรือเส้นตรงที่ความชันเท่ากับ 45° และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9075-0.9463 ค่า χ^2 และ RMSE มีค่าเท่ากับ 5.68×10^{-3} - 8.32×10^{-3} และค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.0075-0.0912 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ให้สมการทั่วไปในการทำนายผลของค่าพารามิเตอร์การอบแห้ง ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการอบแห้งกากเนื้อมะพร้าวในช่วงอุณหภูมิ 55, 65, 75°C และชั้นความหนาที่ 7.5, 10, 12.5 mm ได้อย่างความแม่นยำ (Figure 8) สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองการอบแห้ง (ปองพล และ ฤทธิชัย, 2557; ฤทธิชัย และคณะ 2554; Pongtong et al., 2011; Agarry and Aworanit, 2012; Singh and Pandey 2012; Assawarachan, 2013)

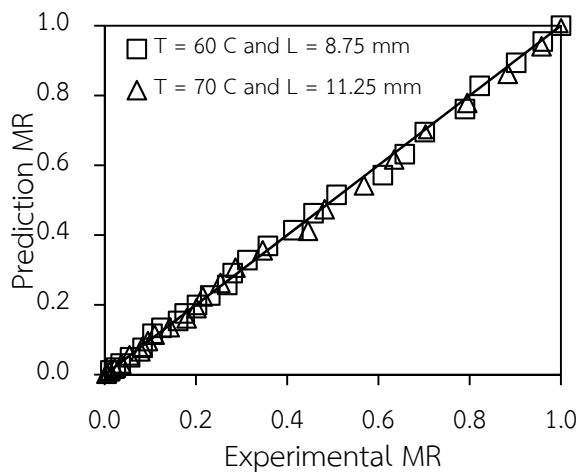


Figure 8 Comparison of the experimental moisture ratio (MR) and corresponding values by predicted Page model at different drying conditions.

3.4 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

การจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นในกากเนื้อมะพร้าวจะเกิดขึ้นอย่างเป็นระบบ ปริมาณน้ำที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคกากเนื้อมะพร้าวจะเกิดการระเหยจากผิวอนุภาคไปสู่สิ่งแวดล้อม และมวลความชื้นภายในโครงสร้างกากเนื้อมะพร้าวจะเกิดการแพร่มวลความชื้นเคลื่อนที่ไปยังผิวของอนุภาค ระเหย

ออกจากกากมะพร้าว และน้ำที่ระเหยออกมาจะเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคของกากเนื้อมะพร้าวไปยังผิวหน้าของกากเนื้อมะพร้าว ด้านบนที่สัมผัสกับอากาศร้อนซึ่งมีกลไกการถ่ายเทมวลภายใต้ความต้านทานในการถ่ายเทมวลความชื้นจากผิววัสดุ และความต้านทานการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นภายใต้ความต้านทานของอนุภาคกากเนื้อมะพร้าวที่เป็นวัสดุพูนการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ที่เกิดขึ้นสามารถวิเคราะห์ในกรณีความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารภายในโครงสร้างเซลล์ไปยังผิวอนุภาคกากเนื้อมะพร้าว อนุภาคกากเนื้อมะพร้าวมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 850 μm หรือมีรัศมีของอนุภาค (r_0) เท่ากับ 4.25×10^{-4} m วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลความชื้นตามความสัมพันธ์ของกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) แสดงใน Table 4 พบว่าค่า D_{eff} เท่ากับ $(0.99 \pm 0.03) \times 10^{-10}$ ถึง $(4.17 \pm 0.05) \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75°C และชั้นความหนาที่ 7.5, 10, 12.5 mm ตามลำดับ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่า D_{eff} ของวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์ ค่า D_{eff} ของเนื้อเซอรือบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนในช่วง 60-75°C มีค่าเท่ากับ 15.4 ถึง $5.68 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Doymaz and Ismail, 2011)

Table 4 Impacts of drying temperature and layer thicknesses levels of D_{eff} and E_a of coconut residue

Layer thicknesses	Temperature	$(D_{eff}) \times 10^{10}$ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	E_a (kJ mol^{-1})	R^2
7.5 mm	55°C	$3.21 \pm 0.06^{A,a}$	12.04 kJ mol^{-1}	0.7907
	65°C	$3.96 \pm 0.12^{B,b}$		
	75°C	$4.17 \pm 0.09^{C,b}$		
10.0 mm	55°C	$1.96 \pm 0.05^{A,a}$	25.65 kJ mol^{-1}	0.9564
	65°C	$2.37 \pm 0.04^{B,b}$		
	75°C	$3.37 \pm 0.06^{C,c}$		
12.5 mm	55°C	$0.99 \pm 0.03^{A,a}$	44.22 kJ mol^{-1}	0.8653
	65°C	$1.25 \pm 0.05^{B,b}$		
	75°C	$2.63 \pm 0.06^{C,c}$		

^{A,B,C}Effect of drying temperature and ^{a,b,c}effect of layer thicknesses indicate a significant difference at $p < 0.05$.

การวิเคราะห์ ค่า D_{eff} ของเนื้อมะพร้าวแผ่นมีค่า 5.74 ถึง 7.88×10^{-10} และมันเทศแผ่นมีค่า 9.32 ถึง $1.75 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Agarry and Aworanti, 2012 และ Doymaz, 2011) และกลีบกระเทียม ที่ช่วงการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 30-50°C

และ 50-70°C ตามลำดับ ตามรายงานของ Doymaz, (2011); Agarry and Aworanti (2012) และ Doymaz, (2008) ตามลำดับ ค่า D_{eff} เป็นค่าพารามิเตอร์การอบแห้งที่เป็นสมบัติเฉพาะของขนาดรูปร่าง ของวัสดุชีวภาพชนิดนั้นๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่า D_{eff}

ควรจะมีค่าเท่ากันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การศึกษาพบว่าผลของอุณหภูมิและชั้นความหนาของกากเนื้อมะพร้าวมีผลกระทบต่อค่า D_{eff} อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นแบบ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ของมวลความชื้นในโครงสร้างเซลล์ของกากเนื้อมะพร้าวซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมออกจากผิวเซลล์ จากนั้นมวลความชื้นเปลี่ยนสถานะเป็นไอและเกิดแพร่ผ่านระหว่างอนุภาคกากเนื้อมะพร้าวระหว่างชั้นความหนาอีกครั้ง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เดียวกับการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุพูน ดังนั้นเมื่อชั้นของกากเนื้อมะพร้าวมีความหนามากขึ้นส่งผลต่อความเร็วในการเคลื่อนของไอความชื้นที่แพร่ออกจากอนุภาคกากเนื้อมะพร้าวยังมีผิวหน้าชั้นบนสุดของกากเนื้อมะพร้าวและถ่ายเทมวลความชื้นกับสิ่งแวดล้อมต่อไป ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเข้าสู่ระบบสำหรับการเร่งอัตราการแพร่ในโครงสร้างโมเลกุลกากเนื้อมะพร้าวและการเคลื่อนที่ของไอความชื้นที่เคลื่อนที่ผ่านระหว่างอนุภาคกากเนื้อมะพร้าว ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (two way ANOVA) ของอุณหภูมิและค่าความหนาของชั้นกากเนื้อมะพร้าวพบว่า ที่ความหนา 7.5 mm พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่อุณหภูมิ 65 และ 75°C ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่สภาวะอื่นจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอย่างชัดเจน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มระดับชั้นความหนามากขึ้นค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อชั้นความหนาเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อแรงเสียดสีระหว่างอนุภาคของกากเนื้อมะพร้าวและมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปยังผิวหน้าซึ่งส่งผลต่อระบบต้องการพลังงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะของมวลชื้นในกากเนื้อมะพร้าวมามากขึ้น เนื่องจากต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการเร่งการเคลื่อนที่ของมวลความชื้นที่เปลี่ยนสถานะเป็นไอเคลื่อนที่ผ่านระหว่างชั้นความหนาของอนุภาคกากเนื้อมะพร้าวสู่ผิวหน้าชั้นบนสุดก่อนถูกถ่ายเทสู่ตัวกลางอากาศร้อน ค่า E_a สามารถบ่งบอกค่าพลังงานความร้อนแฝงในการเปลี่ยนแปลงสถานะ (Latent heat of vaporization) ของมวลความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวทั้งหมดได้ และจากข้อมูลในการวิเคราะห์คุณลักษณะกากเนื้อมะพร้าวพบที่ระดับชั้นความหนาที่ 10 mm มีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 25.65 kJ mol⁻¹ และที่ระดับชั้นความหนาที่ 12.5 mm มีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 44.22 kJ mol⁻¹ ตามลำดับ

4 สรุป

ผลของอุณหภูมิและระดับชั้นความหนาของกากมะพร้าวอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนความชื้นของกากมะพร้าวอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75°C และชั้นความหนาที่ 7.5, 10, 12.5 mm จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $1.72 \pm 0.03 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $0.071 \pm 0.003 \text{ g}_{\text{water}} \text{ g}_{\text{dry matter}}^{-1}$ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนความชื้นของกากมะพร้าวอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคกกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำสุด สมการในการทำนายค่าพารามิเตอร์การอบแห้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page โดยค่า k (Drying rate) มีความสัมพันธ์ในรูปแบบของ quadratic equation มีรูปแบบความสัมพันธ์เท่ากับ $(k \times 10^{-4}) = 145.01 - 3.43T - 5.2L - 0.005TL + 0.041T^2 + 0.26L^2$ ในขณะที่ค่า n (Drying Index) มีความสัมพันธ์ในรูปแบบของ Linear equation มีรูปแบบความสัมพันธ์เท่ากับ $n = 1.079 + 0.006 T - 0.018 L$ และผลการทวนสอบความแม่นยำของสมการทั่วไปพบว่า R^2 เท่ากับ 0.9075-0.9463 ตามลำดับ และมีค่า χ^2 และ RMSE เท่ากับ 5.68×10^{-3} - 8.32×10^{-3} และ 0.0075-0.0912 การศึกษาสมการกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นของกากเนื้อมะพร้าวที่มีรูปทรงเป็นอนุภาคทรงกลม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) เท่ากับ 0.99 ± 0.03 - $4.17 \pm 0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสมีค่าเท่ากับ 12.04 - 44.22 kJ mol⁻¹ ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75°C และชั้นความหนาที่ 7.5, 10, 12.5 mm ตามลำดับ

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

6 เอกสารอ้างอิง

จินตนาพร ปันพรม, จุฑามาศ บุญเลา, โชติพงศ์ กาญจนประโชติ, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2555. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกาก

- มะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 43 ฉบับที่ 3 (พิเศษ) กันยายน – ธันวาคม 2555, 228-231
- ปองพล สุริยะกันธร, ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2557. อิทธิพลของอุณหภูมิและความหนาของชั้นวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของดอกคาโมมาลอบแห้งวารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 45 ฉบับที่ 3/1 (พิเศษ) กันยายน – ธันวาคม 2557, 228-231.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์, ภาณุภ, เจริญรัตน์, สุนทรสืบท, เทียรณณิมังมุล, ดวงมกล จนใจ. 2554. จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนของเปลือกทับทิม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17, 27-34.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์. 2556. จลนพลศาสตร์การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. วารสารวิชาการ Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences 14, 13-22.
- ฤทธิชัย อัครวราชันย์, น้ำฝน ไชยลังกา, ปองพล สุริยะกันธร 2556. การพัฒนาและปัจจัยที่มีผลต่อการละลายเนื้อไก่แช่เยือกแข็งด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 20, 16-25.
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: ทอปป
- อรรณณ โสภณรัฐยานนท์, จิราพร ศรีภิญโญณิษฐ์, ฤทธิชัย อัครวราชันย์, อรรถพล นุ่มหอม. 2554. อิทธิพลของอุณหภูมิและความหนาของชั้นวัสดุต่อคุณภาพกากมะพร้าวโดยวิธีการอบแห้งแบบถาด. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 ประจำปี 2554 โรงแรมชลจันทร์พัทยารีสอร์ท. 1 เมษายน 2554, บางละมุง, ชลบุรี.
- Agarry, S.E, Aworanit, O.A. 2012. Modelling the drying characteristics of osmosisted coconut strips at constant air temperature. Journal of Food Process Technology 3, 1-6.
- AOAC. 2010. Official Methods of Analysis. (18th ed.), Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.: USA.
- Assawarachan, R. 2013. Drying Kinetics of coconut residue in fluidized bed. International Journal of Agriculture Innovations and Research 2, 263-266.
- Bell, L., Labuza, T. 2000. Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use. (pp. 33-36) St. Paul: American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Doymaz, İ. 2008. Influence of blanching and slice thickness on drying characteristics of leek slices. Chemical Engineering and Processing 47, 41-47.
- Doymaz, İ. 2011. Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modeling. Heat Mass Transfer 47, 277-285.
- Doymaz, İ. İsmail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. Food and Bioprocessing 89, 31-38.
- Niamnuy, C. and Devahastin, S. 2005. Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. Journal of Food Engineering, 66, 267-271.
- Orikasa, T. Koide, S. Okamoto, S. Imaizumi, T. Muramatsu, Y. Takeda, J. Shiina, T and Tagawa, A. 2014. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. Journal of Food Engineering 125, 51-58.
- 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.
- Singh. N.J and Pandey R.K. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). food and bioproducts processing 90, 317-322.
- Sripinyowanich, J., Sopanattayanon, O., Assawarachan, R., Theppadungporn, K. and Noomhorm, A. 2012. Effects of moisture content of dried coconut residue on its EMC, shelf life and quality. International Congress on Food Engineering and Technology. 28 – 30 March 2012. IMPACT Convention Center, Bangkok, Thailand.