

การเปรียบเทียบแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับปลาป่น Comparison of Thin-Layer Drying Models Suitable for Fishmeal

วสันต์ จันทา^{1*}, ทศพร จันทร์กระจ่าง และ เฉลิม ศิริรักษ์

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อทราย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

*ติดต่อ: wasan.jeen@gmail.com, 074-317100 ต่อ 1915, 074-315185

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองอบแห้งชั้นบางกับผลการทดลองอบแห้งปลาป่นที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100 °C ความเร็วอากาศ 0.5, 1 และ 2 เมตร/วินาที โดยใช้แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 10 รูปแบบคือ Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Weibull Distribution, Midilli et al., Verma et al., Two term exponential, Modified Henderson and Pabis และ Wang and Singh จากผลการเปรียบเทียบพบว่า มีแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 3 แบบที่สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาป่นได้ดีคือแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง Weibull Distribution, Midilli et al. และ Page ตามลำดับ มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9977-0.9998, Adjusted R^2 0.9974-0.9997, SSE 0.0002093-0.002719 และ RMSE 0.00647-0.01767 โดยที่แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง Weibull Distribution สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาป่นได้แม่นยำที่สุดมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9985-0.9998, Adjusted R^2 0.9978-0.9997, SSE 0.0002093-0.001733 และ RMSE 0.00647-0.01636

คำหลัก: อบแห้ง; แบบจำลอง; อัตราส่วนความชื้น; ปลาป่น

Abstract

This research is a comparison of thin layer drying model and the experimental results of dried fishmeal for drying temperatures 70, 80, 90 and 100 °C and air velocities at 0.5, 1 and 2 m/s. Ten models of Thin-Layer drying used in this research were Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Weibull Distribution, Midilli et al., Verma et al., Two term exponential, Modified Henderson and Pabis and Wang and Singh. The results indicated that three models of thin layer drying, namely, Weibull Distribution, Midilli et al. and Page, could well predict the moisture ratio values of fishmeal with R^2 values of 0.9977-0.9998, Adjusted R^2 values of 0.9974-0.9997, SSE values of 0.0002093-0.002719 and RMSE values of 0.00647-0.01767. Finally, the best model was Weibull Distribution, the moisture ratio values of fishmeal with R^2 values of 0.9985-0.9998, Adjusted R^2 values of 0.9978-0.9997, SSE values of 0.0002093-0.001733 and RMSE values of 0.00647-0.01636.

Keywords: Drying; Model; Moisture ratio; Fishmeal

1. บทนำ

ปลาป่นเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตอาหารสัตว์ที่ได้จากปลาเบ็ด (ปลาตัวเล็ก) จับได้โดยเรือประมง

ETM-78

ประเภทต่างๆ หรือหวัปลาจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ การผลิตปลาป่นของโลกมีแหล่งผลิตที่สำคัญอยู่ในทวีปอเมริกาใต้รองลงมาเป็นประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรปส่วนประเทศไทยผลิตปลาป่นได้เป็นอันดับ 4 ของโลกซึ่งมีโรงงานผลิตปลาป่นทั้งหมด 100 โรง อยู่ในภาคใต้ตอนบน 40 โรง ภาคใต้ตอนล่าง 29 โรง ภาคกลาง 22 โรง และภาคตะวันออก 9 โรง กระบวนการผลิตปลาป่นนิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบใช้ไอน้ำให้ความร้อนโดยติดตั้งอนุกรมกันประมาณ 6-8 เครื่อง [1] เพื่อลดความชื้นของปลาป่นให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นจึงได้นำแบบจำลองอบแห้งชั้นบางมาทำนายลักษณะการระเหยความชื้นออกจากปลาป่นโดยการวิเคราะห์จากค่าอัตราส่วนความชื้นที่สภาวะต่างๆ ในเครื่องอบแห้งจากงานวิจัยที่ผ่านมามีการอบแห้งปลาป่นควรควบคุมอุณหภูมิไว้ประมาณ 65-70 °C เพื่อให้ปลาป่นมีค่าโปรตีนสูงเนื่องจากการอบแห้งปลาป่นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าโปรตีนในปลาป่นลดลง [2-3] ส่วนแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของวัสดุได้อย่างแม่นยำคือแบบจำลอง Logarithmic สำหรับการอบแห้งกุ้ง ปลา-Chelwa [4] ปลาหมึก [5] กากแอปเปิ้ล [6] และใบสะระแหน่ [7] แบบจำลอง Midilli et al. สำหรับการอบแห้งปลาซาดีน [8] หน่อหนม [9] มะเขือยาว [10] และข้าว [11] แบบจำลอง two term exponential สำหรับการอบแห้งผลมะเดื่อ [12] และชานอ้อย [13] แบบจำลอง Page สำหรับการอบแห้งลิ้นจี่ปลอกเปลือก [14] แบบจำลอง Verma et al. สำหรับการอบแห้งใบผักชีฝรั่ง [15] แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis สำหรับการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ การตากแดดโดยตรง [16] และการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยอากาศร้อน [17] แบบจำลอง Weibull Distribution สำหรับการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยอากาศร้อนแบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศ [16]

งานวิจัยนี้จึงเป็นการหาแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลาป่นเพื่อประโยชน์ต่อ

อุตสาหกรรมปลาป่นที่จะนำไปใช้ทำนายลักษณะของกระบวนการอบแห้งปลาป่น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

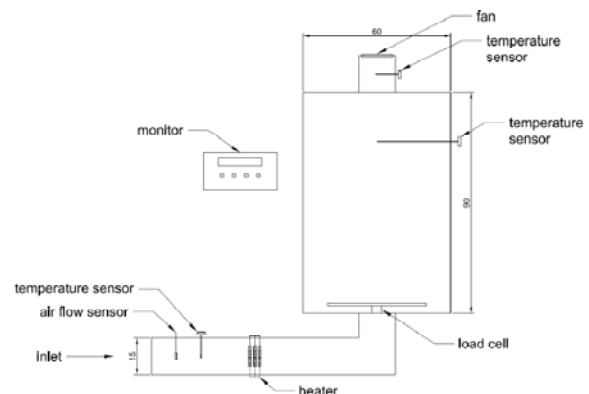
ปลาป่นจากกระบวนการนึ่งให้สุกแล้วก่อนเข้าเครื่องอบแห้งจากบริษัทสงขลามารีนโปรดักส์ จำกัด ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

2.2 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิและความเร็วอากาศมีขนาดห้องอบแห้งกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 และมีแผนภาพส่วนประกอบเครื่องอบแห้งดังรูปที่ 2 โหลดเซลล์ยี่ห้อ GEFRAH ค่าความผิดพลาด ± 0.02 kg เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิยี่ห้อ PM ค่าความผิดพลาด ± 1 °C เซ็นเซอร์วัดความเร็วยี่ห้อ PM ค่าความผิดพลาด ± 0.3 m/s โดยจะบันทึกค่าไว้ในหน่วยความจำและแสดงค่ามายังหน้าจอแสดงผล



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิและความเร็วอากาศ



รูปที่ 2 แผนภาพส่วนประกอบเครื่องอบแห้ง

ETM-78

2.3 วิธีการทดลอง

1. นำปลาป่นมาซึ่งน้ำหนักแล้วใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้งโดยควบคุมความเร็วอากาศที่ 0.5 เมตร/วินาที และอุณหภูมิ 70 °C จากนั้นบันทึกค่าน้ำหนัก

ตารางที่ 1 แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

แบบจำลอง	สมการ	อ้างอิง
1. Newton	$MR = \exp(-kt)$	[10, 11, 14, 15]
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[6, 7, 10, 11, 12, 14]
3. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[6, 7, 10, 11, 12, 13]
4. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	[6, 7, 10, 11, 12, 14]
5. Weibull Distribution	$MR = a - b \exp(-(kt)^n)$	[12, 16]
6. Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[10, 11]
7. Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	[10, 11, 15]
8. Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	[10, 11, 15]
9. Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[10, 14, 16]
10. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[6, 10, 11, 12, 14, 15]

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (no unit)
 a, b, c, n, k, g, h คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (no unit)
 t คือ เวลาในการอบแห้ง (h)

ของปลาป่นในเครื่องอบแห้งทุกๆ 1 ชั่วโมงของวันแรก และทุกๆ 2 ชั่วโมงในวันถัดไป (มวลของวัสดุที่เวลาใดๆ, m_t) จนกว่าน้ำหนักของปลาป่นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อหาความชื้นสมดุลของสภาวะที่ทำการอบแห้ง

2. อบแห้งปลาป่นในเครื่องอบแห้งต่อไป โดยควบคุมความเร็วอากาศที่ 2 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 100 °C และบันทึกค่าน้ำหนักของปลาป่นทุกวันๆ ละ 1 ครั้ง จนกว่าน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อหาน้ำหนักแห้งของปลาป่น (มวลของวัสดุแห้ง, m_d)

3. หาค่าความชื้นฐานแห้ง (moisture content dry basis, M_{db}) และหาค่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) ของปลาป่น จากนั้นเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 10 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1

4. ทำตามขั้นตอนข้อ 1 ถึงข้อ 3 ซ้ำ จนครบสภาวะของการทดลองอบแห้งปลาป่นที่กำหนด

2.4 การวิเคราะห์ผล

ความชื้นฐานแห้งของปลาป่นคำนวณได้จากสมการที่ (1) และค่าอัตราส่วนความชื้นคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$M_{db} = \left(\frac{m_t - m_d}{m_d} \right) \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ M_{db} คือ ความชื้นฐานแห้ง (%d.b.)
 m_t คือ มวลของวัสดุที่เวลาใดๆ (kg)
 m_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

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

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (no unit)
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (%d.b.)
 M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%d.b.)

โดยที่ความชื้นสมดุลคือความชื้นสุดท้ายที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการอบแห้งที่สภาวะอากาศนั้นๆ [18-19]

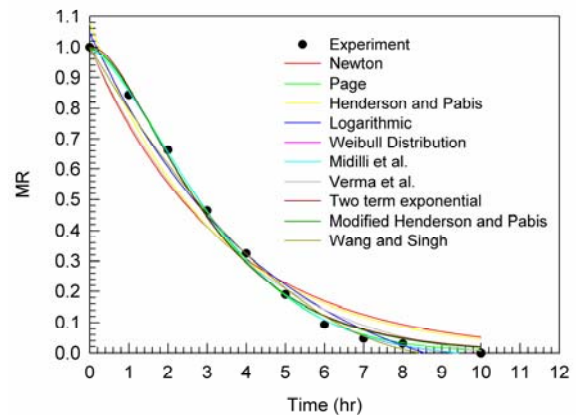
ETM-78

ความแม่นยำของแบบจำลองอบแห้งชั้นบางกับผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองและนำค่า Coefficient of Determination (R^2), Adjusted Coefficient of Determination (Adjusted R^2), Sum of Squared Error (SSE) และ Root Mean Square Error (RMSE) ของแบบจำลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบ โดยสังเกตค่า R^2 กับ Adjusted R^2 มากสุดและ SSE กับ RMSE น้อยสุด

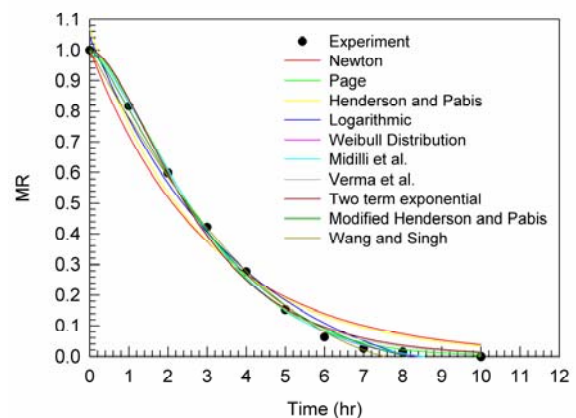
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองอบแห้งชั้นบางกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100 °C ความเร็วอากาศ 0.5, 1 และ 2 เมตร/วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3-14 แสดงกราฟของอัตราส่วนความชื้นจนมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แบบจำลองอบแห้งชั้นบางทั้ง 10 แบบจะมีความแตกต่างกันมากในช่วงเวลา 2 ชั่วโมงแรกและในช่วงเวลาชั่วโมงที่ 5-8 ได้ค่าความแม่นยำและค่าคงที่จากการเปรียบเทียบแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 2-13 พบว่ามีแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 3 แบบที่ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งพลาดได้ก็คือแบบจำลอง Weibull Distribution, Midilli et al. และ Page ตามลำดับ มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9977-0.9998, Adjusted R^2 0.9974-0.9997, SSE 0.0002093-0.002719 และ RMSE 0.00647-0.01767 โดยที่แบบจำลอง Weibull Distribution มี R^2 0.9985-0.9998, Adjusted R^2 0.9978-0.9997, SSE 0.0002093-0.001733, RMSE 0.00647-0.01636 แบบจำลอง Midilli et al. มี R^2 0.9984-0.9998, Adjusted R^2 0.9976-0.9996, SSE 0.0002425-0.001856, RMSE 0.006963-0.01683 และแบบจำลอง Page มี R^2 0.9977-0.9996, Adjusted R^2 0.9974-0.9995, SSE 0.0004627-0.002719, RMSE 0.00813-0.01767 ซึ่งแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง Weibull Distribution สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งพลาดได้แม่นยำกว่าแบบจำลองอื่นๆ ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง

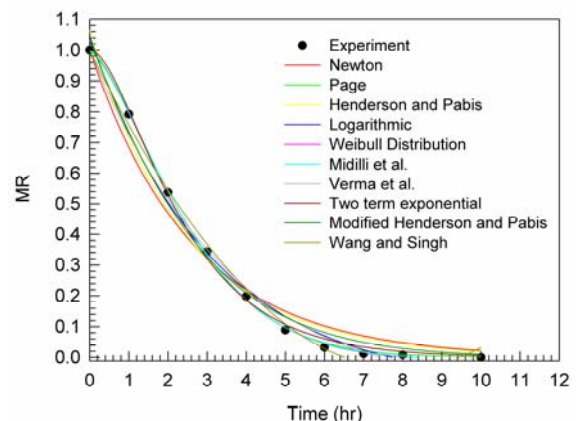
อบแห้งชั้นบาง Weibull Distribution กับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 15-17



รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 70 °C)

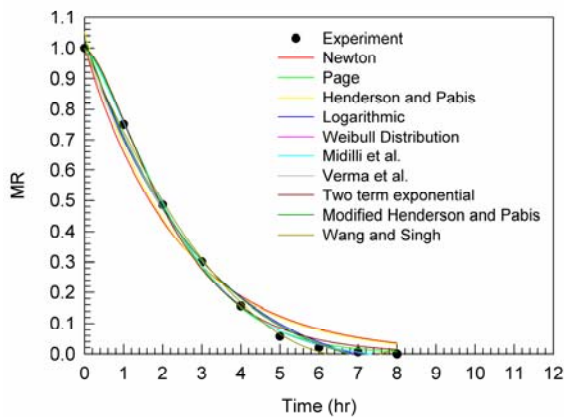


รูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 80 °C)

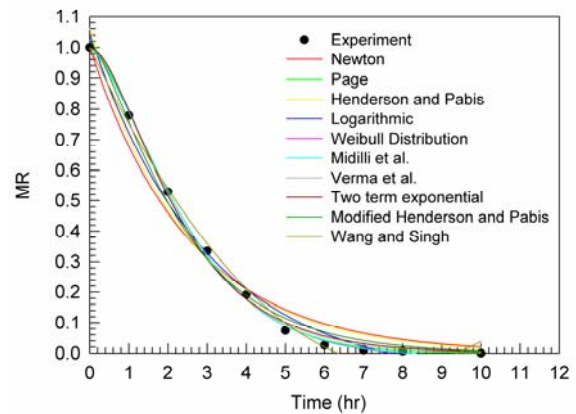


รูปที่ 5 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 90 °C)

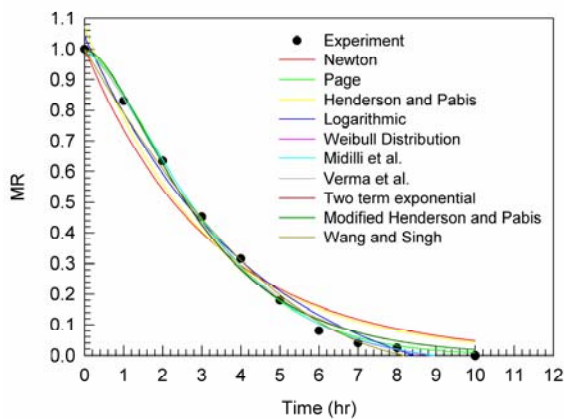
ETM-78



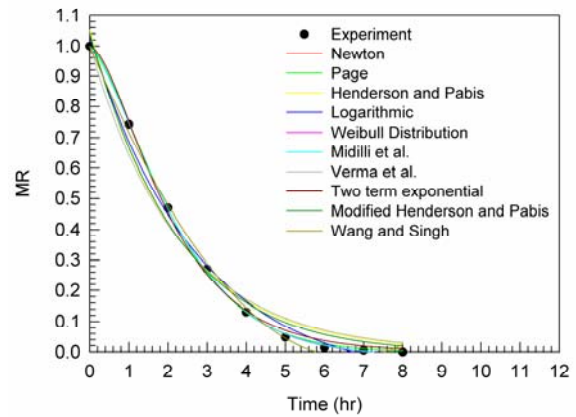
รูปที่ 6 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 100 °C)



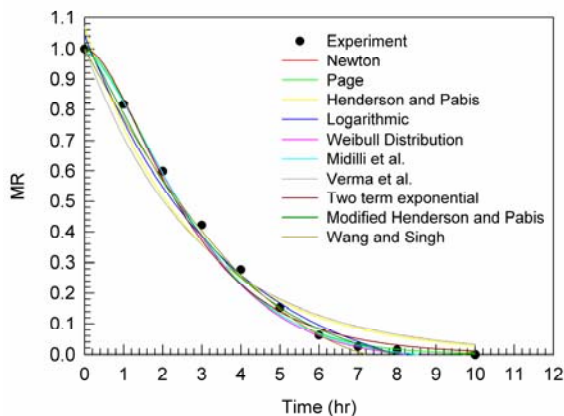
รูปที่ 9 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 90 °C)



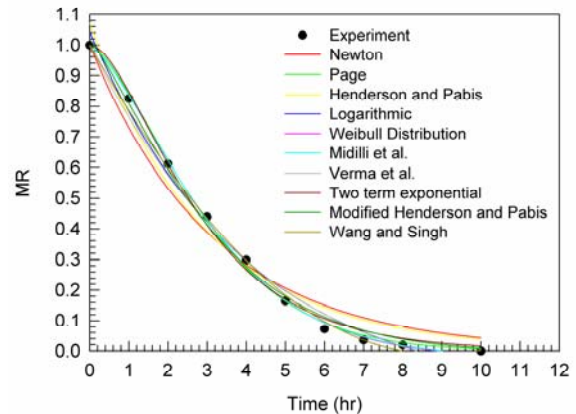
รูปที่ 7 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 70 °C)



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 100 °C)

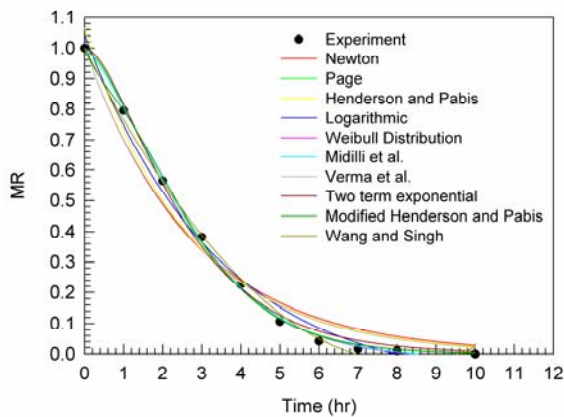


รูปที่ 8 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 80 °C)

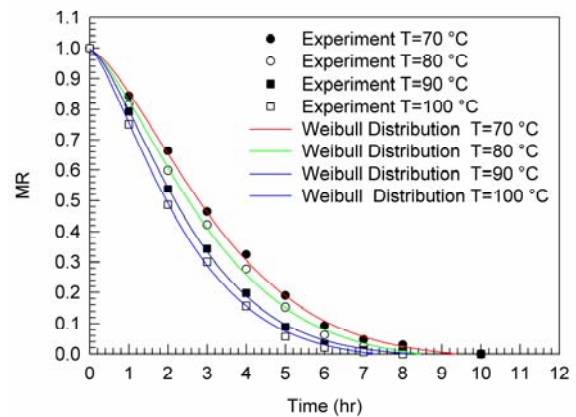


รูปที่ 11 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 70 °C)

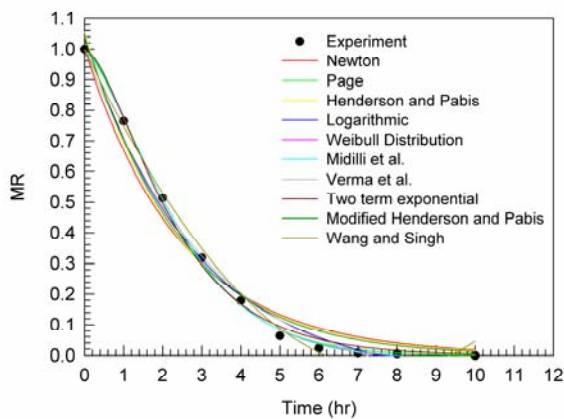
ETM-78



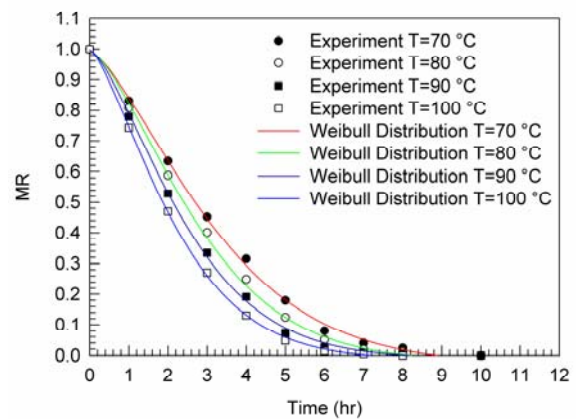
รูปที่ 12 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 80 °C)



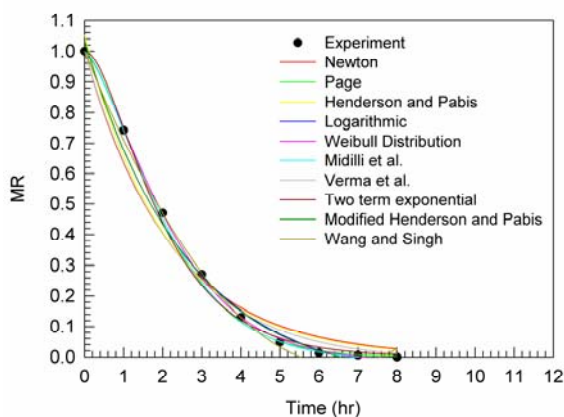
รูปที่ 15 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 0.5 m/s)



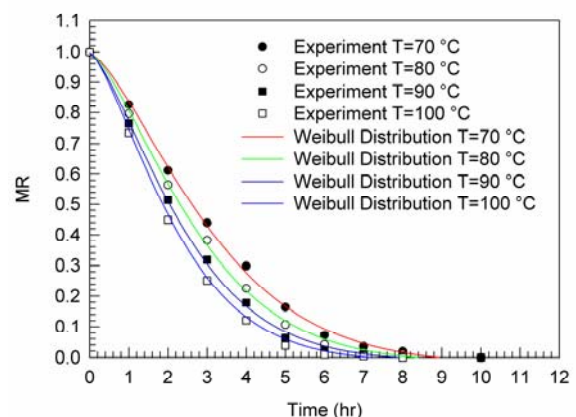
รูปที่ 13 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 90 °C)



รูปที่ 16 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s)



รูปที่ 14 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 100 °C)



รูปที่ 17 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 2 m/s)

ETM-78

4. สรุป

การเปรียบเทียบแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100 °C ความเร็วอากาศ 0.5, 1 และ 2 เมตร/วินาที พบว่ามีแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 3 แบบที่ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาป่นได้ดีคือแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง Weibull Distribution, Midilli et al. และ Page ตามลำดับ มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9977-0.9998 โดยที่แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง Weibull Distribution สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาป่นได้แม่นยำที่สุดมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9985-0.9998, Adjusted R^2 0.9978-0.9997, SSE 0.0002093-0.001733 และ RMSE 0.00647-0.01636 จากผลงานวิจัยนี้แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Weibull Distribution จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ทำนายลักษณะของกระบวนการอบแห้งปลาป่น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยและความอนุเคราะห์จากบริษัทสงขลา มารีนโปรดักส์ จำกัด ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ชุมพล พูลศิริ, ปฤษฎี มาตรบุตร และ เมตตา สมรูป (2550). รายงานการวิจัยเรื่องเศรษฐกิจการผลิต การตลาดผลิตภัณฑ์ปลาป่น ภาคใต้ตอนบน, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, หน้า 1-23.

[2] Zugarramurdi, A., Parin, M. A., Carrizo, G. A., Gadaleta, L. and Lupin, H. M. (2002). Investment and production costs for fishmeal plants in developing and developed countries, International

Journal of Production Economics, Vol. 76, March 2002, pp. 53–59.

[3] Murueta, J. H. C., Toro, M. A. N. and Carreno, F. G. (2007). Concentrates of fish protein from bycatch species produced by various drying processes, Food Chemistry, Vol. 100, October 2007, pp. 705–711.

[4] Jain, D. and Pathare, P. B. (2007). Study the drying kinetics of open sun drying of fish, Food Engineering, Vol. 78, February 2007, pp. 1315–1319.

[5] Galvez, A. V., Miranda M., Claveria R., Quispe I., Vergara J., Uribe E., Paez H. and Scala K. D. (2011). Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*), Food Science and Technology, Vol. 44, June 2011, pp. 16–23.

[6] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. and Hu, X. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace, Food Research International, Vol. 40, July 2007, pp. 39–46.

[7] Doymaz, I. (2006). Thin-layer drying behaviour of mint leaves, Food Engineering, Vol. 74, April 2006, pp. 370–375.

[8] Darvishi H., Azadbakht M., Rezaeiasl A. and Farhang A. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating, the Saudi Society of Agricultural Sciences, Vol. 12, September 2013, pp. 121–127.

[9] Usub T., Lertsatitthakorn C., Poomsa-ada N., Wiset L., Siriamornpunb S. and Soponronnarit S. (2010). Thin layer solar drying characteristics of silkworm pupae, Food and Bioproducts Processing, Vol. 88, April 2010, pp. 149–160.

ETM-78

ตารางที่ 2 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 70 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9631	0.9631	0.04342	0.06946	-	-	-	-	0.2958	-	-
2	0.9988	0.9986	0.001462	0.01352	-	-	-	1.511	0.1481	-	-
3	0.9706	0.9669	0.03465	0.06581	1.077	-	-	-	0.3165	-	-
4	0.9885	0.9852	0.0136	0.04407	1.232	-0.1862	-	-	0.2208	-	-
5	0.9992	0.9987	0.0009966	0.01289	-0.01819	-1.011	-	1.48	0.1464	-	-
6	0.9991	0.9987	0.001041	0.01317	0.9922	-1.63E-03	-	1.494	0.1461	-	-
7	0.9787	0.9726	0.02513	0.05992	-31.68	-	-	-	0.1798	0.1828	-
8	0.9959	0.9954	0.004828	0.02457	2.012	-	-	-	0.4606	-	-
9	0.9968	0.9928	0.003753	0.03063	3.031	-2.534	0.4971	-	0.5113	0.7364	0.6476
10	0.9952	0.9945	0.005707	0.02671	-0.2152	0.01146	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 80 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9672	0.9672	0.03887	0.06572	-	-	-	-	0.3276	-	-
2	0.9979	0.9976	0.002497	0.01767	-	-	-	1.475	0.1777	-	-
3	0.9731	0.9697	0.03191	0.06316	1.07	-	-	-	0.348	-	-
4	0.9891	0.986	0.01289	0.0429	1.192	-0.1489	-	-	0.2554	-	-
5	0.9987	0.998	0.001547	0.01606	-0.02527	-1.019	-	1.424	0.1773	-	-
6	0.9986	0.9979	0.001696	0.01681	0.9933	-2.28E-03	-	1.444	0.1773	-	-
7	0.9963	0.9952	0.004406	0.02509	10.98	-	-	-	0.631	0.6907	-
8	0.9952	0.9945	0.005746	0.0268	1.989	-	-	-	0.5005	-	-
9	0.9971	0.9935	0.00344	0.02932	-0.2351	-8.797	10.04	-	1.129	0.2023	0.2186
10	0.9975	0.9972	0.002988	0.01933	-0.2336	0.01338	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 90 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9731	0.9731	0.03155	0.05921	0.379	-	-	-	0.379	-	-
2	0.9992	0.9991	0.0009176	0.01071	-	-	-	1.458	0.2229	-	-
3	0.9776	0.9749	0.02625	0.05728	1.063	-	-	-	0.3992	-	-
4	0.9884	0.9851	0.01362	0.04412	1.139	-0.09498	-	-	0.3213	-	-
5	0.9994	0.9991	0.0006715	0.01058	-0.01044	-1.007	-	1.434	0.2222	-	-
6	0.9994	0.9991	0.0007298	0.01103	0.9963	-9.69E-04	-	1.446	0.2221	-	-
7	0.9885	0.9852	0.01348	0.04388	-10.79	-	-	-	0.1714	0.1833	-
8	0.9975	0.9972	0.002889	0.019	1.994	-	-	-	0.5781	-	-
9	0.9894	0.9762	0.01244	0.05577	-28.27	30.29	-0.9878	-	0.4314	0.4354	0.6827
10	0.9943	0.9936	0.006671	0.02888	-0.2597	0.0163	-	-	-	-	-

ETM-78

ตารางที่ 5 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 100 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9777	0.9777	0.02356	0.05427	-	-	-	-	0.4167	-	-
2	0.999	0.9988	0.001099	0.01253	-	-	-	1.4	0.2707	-	-
3	0.9809	0.9782	0.02021	0.05374	1.051	-	-	-	0.4346	-	-
4	0.9929	0.9906	0.007467	0.03528	1.143	-0.114	-	-	0.3354	-	-
5	0.9994	0.9991	0.0005844	0.01081	-0.01947	-1.017	-	1.349	0.2709	-	-
6	0.9994	0.999	0.0006457	0.01136	0.9971	-2.19E-03	-	1.363	0.2726	-	-
7	0.9935	0.9914	0.006821	0.03372	26.23	-	-	-	0.2074	0.2017	-
8	0.9975	0.9972	0.002607	0.0193	1.945	-	-	-	0.6196	-	-
9	0.995	0.9867	0.005257	0.04186	20.78	-0.6941	-19.06	-	0.3598	0.1566	0.3679
10	0.9985	0.9983	0.001617	0.0152	-0.2937	0.02135	-	-	-	-	-

ตารางที่ 6 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 70 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9659	0.9659	0.03995	0.06663	-	-	-	-	0.3052	-	-
2	0.9977	0.9974	0.002719	0.01843	-	-	-	1.474	0.1615	-	-
3	0.9722	0.9688	0.0325	0.06374	1.072	-	-	-	0.3248	-	-
4	0.9897	0.9868	0.01202	0.04144	1.217	-0.1759	-	-	0.2293	-	-
5	0.9985	0.9978	0.001733	0.017	-0.0285	-1.021	-	1.421	0.1608	-	-
6	0.9984	0.9976	0.001856	0.01759	0.9921	-2.51E-03	-	1.441	0.1608	-	-
7	0.9956	0.9943	0.005206	0.02727	37.71	-	-	-	0.5779	0.5915	-
8	0.9948	0.9942	0.006086	0.02758	1.981	-	-	-	0.4665	-	-
9	0.9946	0.9879	0.006285	0.03964	-5.862	7.711	-0.8531	-	0.4238	0.4315	0.9872
10	0.997	0.9966	0.003571	0.02113	-0.2204	0.012	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 80 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.968	0.968	0.03799	0.06497	-	-	-	-	0.3425	-	-
2	0.9986	0.9984	0.001706	0.0146	-	-	-	1.487	0.1865	-	-
3	0.9736	0.9703	0.03135	0.0626	1.069	-	-	-	0.3631	-	-
4	0.988	0.9846	0.01427	0.04515	1.174	-0.1299	-	-	0.275	-	-
5	0.999	0.9986	0.001147	0.01383	-0.01689	-1.01	-	1.456	0.1844	-	-
6	0.999	0.9984	0.001245	0.0144	0.9924	-1.54E-03	-	1.472	0.1841	-	-
7	0.968	0.9589	0.03799	0.07366	1.415	-	-	-	0.3415	0.3385	-
8	0.9959	0.9954	0.004866	0.02466	1.998	-	-	-	0.5245	-	-
9	0.9957	0.9904	0.005086	0.03566	-1.821	-0.3227	3.167	-	0.198	0.7965	0.2664
10	0.9967	0.9962	0.003965	0.02226	-0.2421	0.01433	-	-	-	-	-

ETM-78

ตารางที่ 8 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 90 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9737	0.9737	0.03076	0.05846	-	-	-	-	0.3889	-	-
2	0.999	0.9988	0.001202	0.01226	-	-	-	1.456	0.2316	-	-
3	0.9779	0.9751	0.02588	0.05688	1.061	-	-	-	0.4089	-	-
4	0.988	0.9845	0.01408	0.04484	1.131	-0.08864	-	-	0.3328	-	-
5	0.9992	0.9987	0.0009814	0.01279	-0.009229	-1.005	-	0.2297	1.437	-	-
6	0.9991	0.9987	0.001038	0.01315	0.9951	-8.38E-04	-	1.449	0.2295	-	-
7	0.998	0.9974	0.002342	0.01829	-20.01	-	-	-	0.7956	0.7599	-
8	0.9972	0.9969	0.003262	0.02019	1.989	-	-	-	0.591	-	-
9	0.9935	0.9854	0.007576	0.04352	-24.63	-0.2981	25.95	-	0.4106	1.591	0.4139
10	0.993	0.9921	0.008176	0.03197	-0.2641	0.0168	-	-	-	-	-

ตารางที่ 9 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 100 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9777	0.9777	0.02366	0.05439	-	-	-	-	0.4393	-	-
2	0.9993	0.9992	0.000717	0.01012	-	-	-	1.419	0.2856	-	-
3	0.9808	0.978	0.02044	0.05404	1.051	-	-	-	0.4579	-	-
4	0.9915	0.9887	0.009013	0.03876	1.13	-0.09815	-	-	0.3639	-	-
5	0.9996	0.9993	0.0004391	0.009371	-0.0125	-1.01	-	0.285	1.386	-	-
6	0.9995	0.9993	0.0004837	0.009836	0.9971	-1.44E-03	-	1.396	0.286	-	-
7	0.9777	0.9703	0.02366	0.0628	0.5074	-	-	-	0.4384	0.44	-
8	0.998	0.9977	0.002152	0.01753	1.967	-	-	-	0.6595	-	-
9	0.9855	0.9612	0.01545	0.07176	-0.3099	17.71	-16.36	-	0.6799	0.42	0.4143
10	0.9974	0.9971	0.002736	0.01977	-0.3061	0.02302	-	-	-	-	-

ตารางที่ 10 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 70 °C)

Model	R^2	Adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9675	0.9675	0.03814	0.0651	-	-	-	-	0.315	-	-
2	0.9981	0.9979	0.002225	0.01668	-	-	-	1.468	0.1702	-	-
3	0.9737	0.9704	0.03089	0.06214	1.071	-	-	-	0.335	-	-
4	0.9893	0.9863	0.01253	0.0423	1.198	-0.1554	-	-	0.244	-	-
5	0.9986	0.998	0.001597	0.01631	-0.02172	-1.017	-	1.425	0.17	-	-
6	0.9986	0.9978	0.001687	0.01677	0.9942	-1.93E-03	-	1.441	0.17	-	-
7	0.989	0.9859	0.01287	0.04287	-4.142	-	-	-	0.1267	0.1526	-
8	0.9957	0.9951	0.005083	0.02521	1.986	-	-	-	0.4822	-	-
9	0.9951	0.989	0.00572	0.03782	-23.95	25.78	-0.8116	-	0.3262	0.3325	0.7212
10	0.9967	0.9963	0.003908	0.0221	-0.2266	0.01269	-	-	-	-	-

ETM-78

ตารางที่ 11 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 80 °C)

Model	R ²	Adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9721	0.9721	0.03273	0.0603	-	-	-	-	0.3571	-	-
2	0.9987	0.9985	0.001561	0.01397	-	-	-	1.45	0.2069	-	-
3	0.9769	0.974	0.02711	0.05821	1.064	-	-	-	0.3769	-	-
4	0.9891	0.986	0.01278	0.04273	1.153	-0.111	-	-	0.2947	-	-
5	0.999	0.9986	0.001126	0.0137	-0.01513	-1.011	-	1.417	0.206	-	-
6	0.999	0.9984	0.001213	0.01422	0.9948	-1.38E-03	-	1.432	0.2059	-	-
7	0.9746	0.9673	0.02978	0.06523	24.1	-	-	-	0.3026	0.3002	-
8	0.9967	0.9963	0.003884	0.02203	1.979	-	-	-	0.5415	-	-
9	0.9987	0.9972	0.001484	0.01926	-11.36	6.958	5.403	-	1.146	1.357	0.7254
10	0.9964	0.9959	0.004272	0.02311	-0.2493	0.01515	-	-	-	-	-

ตารางที่ 12 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 90 °C)

Model	R ²	Adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9765	0.9765	0.02707	0.05484	-	-	-	-	0.4024	-	-
2	0.9983	0.9981	0.001949	0.01561	-	-	-	1.419	0.2524	-	-
3	0.9799	0.9773	0.02322	0.05387	1.055	-	-	-	0.4208	-	-
4	0.989	0.9859	0.01265	0.04251	1.118	-0.08045	-	-	0.3477	-	-
5	0.9986	0.9979	0.001607	0.01636	-0.01143	-1.006	-	0.2497	1.396	-	-
6	0.9985	0.9978	0.0017	0.01683	0.994	-1.03E-03	-	1.41	0.2497	-	-
7	0.9898	0.9869	0.01172	0.04092	-9.497	-	-	-	0.1905	0.2043	-
8	0.9966	0.9962	0.003906	0.0221	1.953	-	-	-	0.6002	-	-
9	0.9848	0.9658	0.01753	0.0662	4.557	-3.067	-0.4495	-	0.4606	0.4543	0.6898
10	0.9919	0.9909	0.03417	0.03417	-0.2694	0.01739	-	-	-	-	-

ตารางที่ 13 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 2 m/s อุณหภูมิ 100 °C)

Model	R ²	Adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9771	0.9771	0.02458	0.05543	-	-	-	-	0.4543	-	-
2	0.9996	0.9995	0.0004627	0.00813	-	-	-	1.438	0.2938	-	-
3	0.9802	0.9774	0.02124	0.05508	1.052	-	-	-	0.4735	-	-
4	0.9908	0.9877	0.009859	0.04054	1.127	-0.09315	-	-	0.3799	-	-
5	0.9998	0.9997	0.0002093	0.00647	-0.0115	-1.011	-	0.2944	1.404	-	-
6	0.9998	0.9996	0.0002425	0.006963	0.9989	-1.38E-03	-	1.414	0.2953	-	-
7	0.9831	0.9775	0.01806	0.05487	-26.21	-	-	-	0.336	0.3399	-
8	0.9984	0.9982	0.001706	0.01561	1.996	-	-	-	0.6908	-	-
9	0.9919	0.9783	0.008726	0.05393	-0.2415	1.258	0.01632	-	0.09695	0.3503	0.3512

ETM-78

10	0.9964	0.9959	0.003889	0.02357	-0.3132	0.02394	-	-	-	-	-
----	--------	--------	----------	---------	---------	---------	---	---	---	---	---

[10] Ertekin, C. and Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, Food Engineering. Vol. 63, August 2004, pp. 349–359.

[11] Hacıhazfioğlu, O., Cihan, A. and Kahveci, K. (2008). Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice, food and bioproducts processing, Vol. 86, January 2008, pp. 268–275.

[12] Babalis, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N. and Belessiotis, V. G. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), Food Engineering, Vol. 75, 2006, pp. 205–214.

[13] Mazutti, M. A., Zabet, G., Boni, G., Skovronski, A., Oliveira, D. D., Luccio, M. D., Oliveira, J. V., Rodrigues, M. I., Treichel, H. and Mauger, F. (2010). Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented and non-fermented sugarcane bagasse, biomass and bioenergy, Vol. 34, 2010, pp. 780–786.

[14] Janjai, S., Precoppe, M., Lamlert, N., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M. and Muller, J. (2011). Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.), Food and Bioproducts Processing, Vol. 89, May 2011, pp. 194–201.

[15] Akpinar, E. K., Bicer, Y., Cetinkaya, F. (2006). Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun, Food Engineering, Vol. 75, 2006, pp. 308–315.

[16] Dejchanchaiwong, R., Suchonpanit, W., Akephom, A., Lapo, T., Tirawanichakul, Y.,

Tekasakul, P., Tirawanichakul, S. (2011). Artificial neural network approach on equilibrium moisture content for predicting kinetics of air dried sheet rubber, paper presented in Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, Songkhla, Thailand.

[17] วสันต์ จันทดา, พรประสิทธิ์ คงบุญ, สิทธิพร บุญญานุวัตร และ เฉลิม ศิริรักษ์. (2557). แบบจำลองอบแห้งชั้นบางสำหรับยางพาราแผ่น, วิศวกรรมสาร มช., 41, เมษายน-มิถุนายน 2557, หน้า 99-108.

[18] วสันต์ จันทดา, ทศพร จันทร์กระจ่าง, สุเทพ ชูกลิ่น และ เฉลิม ศิริรักษ์. (2555). การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่เหมาะสมสำหรับยางพาราแผ่น, วิศวกรรมสาร มช., 39, มกราคม-มีนาคม 2555, หน้า 11-21.

[19] Hii, C. L., Law, C. L. and Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa, Food Engineering, Vol. 90, 2009, pp. 191–198.