



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

แบบจำลองอบแห้งชั้นบางสำหรับยางพาราแผ่น

Thin-layer drying models for para rubber sheet

วสันต์ เจ็นธาดา* พรประสิทธิ์ คงบุญ สิทธิพร บุญญานุวัตร และ เฉลิม ศิริรักษ์

Wasan Jeentada*, Pornprasit Kongboon, Sittiporn Boonyanuwat and Chalerm Sirirak

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา 90000

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkla, Thailand, 90000.

Received March 2013

Accepted August 2013

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งยางพาราแผ่นที่สภาวะอุณหภูมิอากาศ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.5 และ 1 เมตร/วินาที โดยการนำผลการทดลองมาหาค่าอัตราส่วนความชื้นและนำแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 10 แบบที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนความชื้นของยางพาราแผ่นพบว่าที่สภาวะความเร็วการไหลของอากาศเท่ากันแต่อุณหภูมิต่างกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นในยางพาราจะระเหยออกได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำและที่สภาวะอุณหภูมิเท่ากันแต่ความเร็วการไหลของอากาศต่างกันพบว่าเมื่อความเร็วการไหลของอากาศสูงขึ้นความชื้นในยางพาราจะระเหยออกได้เร็วกว่าที่ความเร็วการไหลของอากาศต่ำ จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองอบแห้งชั้นบางพบว่า มีแบบจำลอง 5 แบบที่ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งยางพาราแผ่นได้ดีในทุกสภาวะของการทดลองคือแบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis, Verma et al., Midilli et al., Weibull Distribution และ Page ตามลำดับ มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.984-0.9995, adjusted R^2 0.9817-0.9993, SSE 0.0004162-0.01981 และ RMSE 0.006451-0.03209 ซึ่งแบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Modified Henderson and Pabis ที่สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้ดีที่สุด มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9956-0.9992, adjusted R^2 0.9943-0.9989, SSE 0.0008541-0.005914 และ RMSE 0.007811-0.01786

คำสำคัญ : อบแห้ง แบบจำลอง อัตราส่วนความชื้น ยางพารา

Abstract

The purpose of this project was to study para rubber sheet drying at temperature of 40°, 50°, 60° and 70°, air velocity of 0.5 and 1 meter/second. The obtained experimental results were used to calculate moisture ratio values. Then the results obtained from 10 different types of thin layer drying models were compared with the experimental results. The experimental results of moisture ratio values of para rubber sheets indicated that at the same rate of air flow velocity but with different temperature, the higher the temperature, the faster velocity

*Corresponding author. Tel.:074-317100 to 1915; fax: 074-315185
Email address: wasan.jeen@gmail.com

rate of the moisture evaporation of para rubber sheet. Whereas, with same temperature but at the different velocity rates of air flow, the higher the velocity rate of air flow, the faster the moisture evaporation of para rubber sheet. The comparative results of the 10 different types of thin layer drying models revealed that 5 models could predict the moisture ratio of para rubber sheet drying with a satisfactory level in all experimental conditions. The said 5 models were Modified Henderson and Pabis, Verma et al., Midilli et al., Weibull Distribution; and Page respectively with R^2 ranges of 0.984 to 0.9995, adjusted R^2 range of 0.9817 to 0.9993, SSE range of 0.0004162 to 0.01981 and RMSE range of 0.006451 to 0.03209. The best model that could predict moisture ratio in all experimental conditions was Modified Henderson and Pabis with R^2 range of 0.9956 to 0.9992, adjusted R^2 range of 0.9943 to 0.9989, SSE range of 0.0008541 to 0.005914 and RMSE range of 0.007811 to 0.01786.

Keywords : Drying, Model, Moisture ratio, Para rubber

1. บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจาก น้ำยางของยางพาราจะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ ซึ่งตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2534 ประเทศไทยนั้นเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก [1] โดยที่ภาคใต้จะมีพื้นที่ปลูกยางมากที่สุด รองลงมาเป็นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ การส่งออกยางธรรมชาติของประเทศไทยส่วนใหญ่จะส่งออกในรูปแบบของวัตถุดิบคือ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และน้ำยางข้น ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการผลิตรายพาราในประเทศไทยพบว่า จะผลิตยางแผ่นรมควันมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำยางข้น ยางแท่งเอสทีอาร์และยางแผ่นผึ่งแห้งตามลำดับ [2] การผลิตรายพาราแผ่นด้วยโรงรมควัน ยางพาราแผ่นจะผลิตโดยสหกรณ์กองทุนสวนยางขนาดเล็กจำนวนมากและในประเทศไทยมีโรงรมควันยางพาราแผ่นของสหกรณ์กองทุนสวนยางมากกว่า 700 แห่ง [1] การรมควันยางพาราแผ่นเป็นกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจากไม้ยางพารา ดังนั้นโรงรมควันยางพาราแผ่นจึงต้องถูกออกแบบให้เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการประหยัดพลังงานและได้ผลิตภัณฑ์ยางพาราแผ่นรมควันที่มีคุณภาพ การออกแบบโรงรมควันยางพาราแผ่นจะต้องรู้ถึงลักษณะเฉพาะของกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่น จึงได้นำแบบจำลองอบแห้งชั้นบางมาทำนายกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่นที่สภาวะต่างๆ ด้วยการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยอากาศร้อน โดยใช้พลังงานความร้อน

จากขดลวดความร้อนซึ่งแบบจำลองอบแห้งชั้นบางนี้จะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับสภาวะของกระบวนการอบแห้งและระยะเวลาในการอบแห้ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้นำแบบจำลองอบแห้งชั้นบางมาทำนายกระบวนการอบแห้งของวัสดุและหาแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่ทำนายกระบวนการอบแห้งของวัสดุได้อย่างแม่นยำพบว่าแบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Two term exponential เหมาะสำหรับทำนายการอบแห้งของผลไม้เนื้อ [3] และขนอ้อย [4] แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Page เหมาะสำหรับทำนายการอบแห้งของเส้นจี่ปลอกเปลือก [5] แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Verma et al. เหมาะสำหรับทำนายการอบแห้งของใบผักชีฝรั่ง [6] แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Logarithmic เหมาะสำหรับทำนายการอบแห้งของกากแอปเปิ้ล [7] และใบสะระแหน่ [8] แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Midilli et al. เหมาะสำหรับทำนายการอบแห้งของแอปเปิ้ลโกลเด้น [9] มะเขือยาว [10] และข้าว [11] แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Weibull Distribution เหมาะสำหรับทำนายการอบแห้งของยางพาราแผ่นด้วยอากาศร้อน โดยทดลองที่อุณหภูมิ 45 กับ 55 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของความเร็วอากาศ แบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Modified Henderson and Pabis เหมาะสำหรับทำนายการอบแห้งของยางพาราแผ่นด้วยโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยการตากแดดโดยตรง [12]

การผลิตยางพาราแผ่นรมควันนั้นจะควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องรมควันยางพาราแผ่นอยู่ที่ประมาณ 50 – 60 องศาเซลเซียส [13] ส่วนความเร็วของอากาศจะไม่มีกรควบคุม จากงานวิจัยที่ผ่านมาความเร็วของอากาศในห้องรมควันยางพาราแผ่นจะมีค่าประมาณ 0-0.5 เมตรต่อวินาที [14] ซึ่งความเร็วของอากาศจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการอบแห้ง [15-16] เนื่องจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนโดยความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทด้วยการพาความร้อนสู่ผิวของวัสดุหลังจากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทจากผิวของวัสดุสู่ภายในวัสดุโดยอาศัยการนำความร้อน [16] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.5 และ 1 เมตร/วินาที แล้วนำแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 10 แบบ คือ 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 มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองและหาแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่ทำนายกระบวนการอบแห้งของยางพาราแผ่นด้วยอากาศร้อนได้ดีในทุกสภาวะอุณหภูมิและความเร็วอากาศต่างๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบโรงรมควันยางพาราแผ่น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ยางพาราแผ่นจากกระบวนการรีดแผ่นของสหกรณ์สวนยางพิจิตรจำกัด ตำบลพิจิตร อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยร้อยละ 35 ของความชื้นฐานแห้ง (dry basis)

2.2 อุปกรณ์การทดลอง

การทดลองอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยอากาศร้อนได้ใช้เครื่องอบแห้งแบบควบคุมสภาวะดังแสดงในรูปที่ 1 มีขนาดห้องอบแห้ง 60×60×90 เซนติเมตร (กว้าง×ลึก×สูง) ควบคุมอุณหภูมิสูงสุด 150 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศสูงสุด 2 เมตรต่อวินาที มีเครื่องวัดอุณหภูมิ

ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม โดยแสดงค่าต่างๆ บนหน้าจอและบันทึกลงในหน่วยความจำ สามารถปรับค่าอุณหภูมิและความเร็วลมในเครื่องอบแห้งได้



รูปที่1 เครื่องอบแห้งแบบควบคุมสภาวะ

2.3 วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนักยางพาราแผ่นก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง
- 2) อบแห้งยางพาราแผ่นในเครื่องอบแห้งด้วยการแขวนให้มีระยะห่างระหว่างแผ่น 5 เซนติเมตร ควบคุมสภาวะอากาศที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส บันทึกค่าน้ำหนักของยางพาราแผ่นและอุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง ซึ่งวันแรกบันทึกค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง ส่วนวันถัดไปบันทึกค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักของยางพาราแผ่นที่ทำการอบแห้งไม่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาความชื้นสมดุลของสภาวะที่ทำการอบแห้ง
- 3) อบแห้งยางพาราแผ่นในเครื่องอบแห้งต่อไป โดยควบคุมสภาวะอากาศที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส บันทึกค่าน้ำหนักของยางพาราแผ่นทุกวัน วันละ 1 ครั้งจนกว่าน้ำหนักของยางพาราแผ่นที่ทำการอบแห้งไม่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาน้ำหนักแห้งของยางพาราแผ่น
- 4) หาค่าความชื้นฐานแห้ง (moisture content dry basis, M_{db}) และหาค่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) ของยางพาราแผ่น
- 5) เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองกับแบบจำลองอบแห้งชั้นบาง 10 แบบ
- 6) ทดลองตามขั้นตอนข้อ 1 ถึงข้อ 5 ซ้ำจนครบสภาวะของการทดลองที่กำหนด

2.4 แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่ใช้อธิบายกระบวนการอบแห้งของวัสดุส่วนใหญ่เป็นสมการแบบกึ่งทฤษฎี (semi- theoretical drying equation) และสมการแบบเอมพิริคัล (empirical drying equation) ซึ่งเป็นรูปแบบผลเฉลยอย่างง่ายของสมการการแพร่กระจายของ Fick ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแบบจำลองแต่ละรูปแบบจะมีความชันของอัตราส่วนความชื้นบางช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

2.5 การวิเคราะห์ผล

ค่าความชื้นฐานแห้งของยางพาราแผ่นคำนวณได้จากสมการที่ (1) และค่าอัตราส่วนความชื้นคำนวณได้จากสมการที่ (2)

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

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 [17-18]

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองอบแห้งชั้นบางกับผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 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) ของแบบจำลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกัน โดยสังเกตค่า R^2 กับ Adjusted R^2 มากสุดและ SSE กับ RMSE น้อยสุด

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

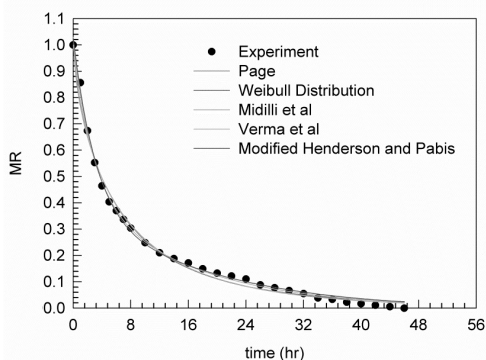
จากผลการหาค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งยางพาราแผ่นที่อุณหภูมิของอากาศ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.5 และ 1 เมตร/วินาที พบว่าที่สภาวะความเร็วการไหลของอากาศเท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นในยางพาราแผ่นจะระเหยออกได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสภาวะการกระตุ้นที่สูงขึ้นของโมเลกุลของน้ำนำไปสู่การลดลงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำส่วนที่สภาวะอุณหภูมิเท่ากันแต่ความเร็วการไหลของอากาศต่างกันเมื่อความเร็วการไหลของอากาศสูงขึ้นความชื้นในยางพาราแผ่นจะระเหยออกได้เร็วกว่าที่ความเร็วการไหลของอากาศต่ำเนื่องจากที่ความเร็วการไหลของอากาศสูงความชื้นที่ผิวยางพาราแผ่นจะถูกพาออกไปได้เร็วกว่าที่ความเร็วการไหลของอากาศต่ำ การเปรียบเทียบแบบจำลองอบแห้งชั้นบางกับผลการทดลองพบว่ามีแบบจำลอง 5 แบบที่ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งยางพาราแผ่นได้ดีในทุกสภาวะของการทดลองตามลำดับความแม่นยำดังนี้ แบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis มี R^2 0.9956-0.9992, adjusted R^2 0.9943-0.9989, SSE 0.0008541-0.005914, RMSE 0.007811-0.01786 แบบจำลองของ Verma et al. มี R^2 0.994-0.999, adjusted R^2 0.9934-0.9988, SSE 0.0008506-0.007469, RMSE 0.008793-0.01933 แบบจำลองของ Midilli et al. มี R^2 0.9845-0.9995, adjusted R^2 0.9821-0.9992, SSE 0.0004352-0.01915, RMSE 0.007308-0.03175 แบบจำลองของ Weibull Distribution มี R^2 0.9842-0.9995, adjusted R^2 0.9817-0.9993, SSE 0.0004162-0.01957, RMSE 0.006451-0.03209 และแบบจำลองของ Page มี R^2 0.984-0.9934, adjusted R^2 0.9832-0.9928, SSE 0.005237-0.01981, RMSE 0.02288-0.03071 ดังแสดงในรูปที่ 2-9 ซึ่งมีค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลองอบแห้งชั้นบางดังแสดงในตารางที่ 2-9 ส่วนแบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Modified Henderson and Pabis ที่ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้ดีที่สุดได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 10-11

ตารางที่ 1 แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง

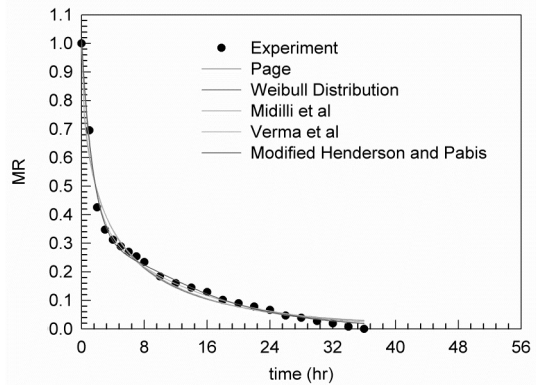
model	equation	reference
1. Newton	$MR = \exp(-kt)$	[5, 6, 9, 10, 11]
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
3. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
4. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	[3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
5. Weibull Distribution	$MR = a - b \exp(-(kt)^n)$	[3, 12]
6. Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[9, 10, 11]
7. Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	[6, 9, 10, 11]
8. Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	[6, 9, 10, 11]
9. Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[5, 9, 10, 12, 19]
10. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[3, 5, 6, 7, 9, 10, 11]

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

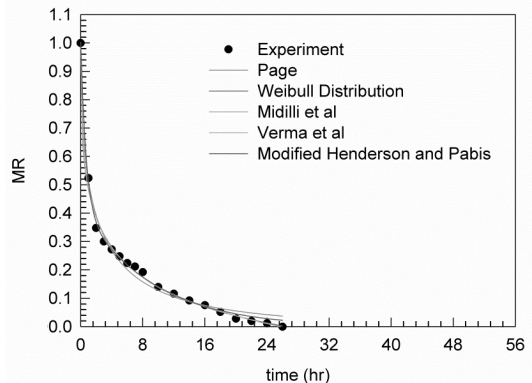
การอบแห้งยางพาราแผ่นเพื่อให้ได้ยางแผ่นคุณภาพดีจะต้องมีเนื้อยางแห้งใส่ สีส้มำเสมอเป็นสีเดียวกันตลอดแผ่น ไม่ต่างดำหรือมีสีคล้ำ จากการทดลองนี้พบว่าผลการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนจากขดลวดความร้อนควรรีใช้ อุณหภูมิอบแห้ง 45-65 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้ยางแผ่นเริ่มละลาย และความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าความเร็วอากาศ 0.5 เมตร/วินาที ก็เพียงพอต่อกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่นให้มีคุณภาพดี จึงไม่จำเป็นต้องมีความเร็วอากาศสูงซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน



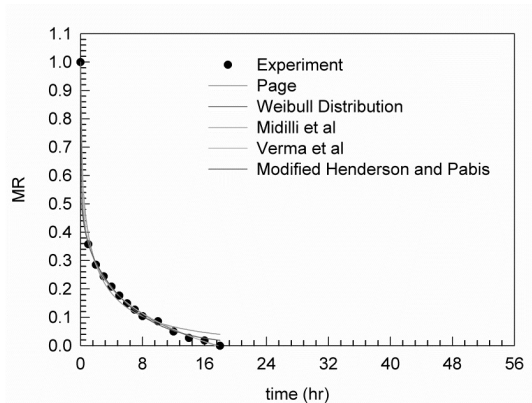
รูปที่ 2 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส)



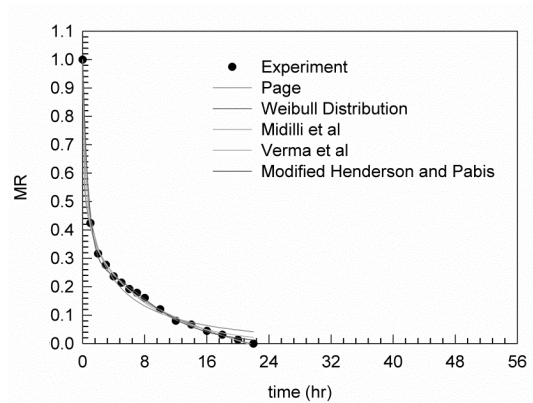
รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)



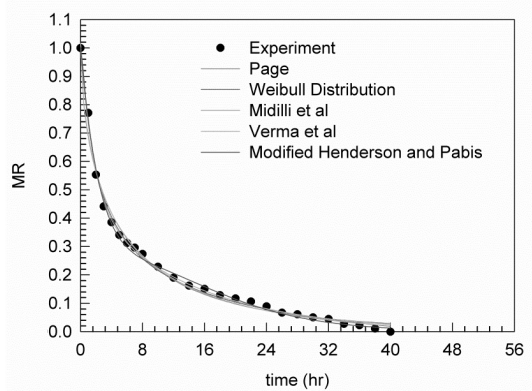
รูปที่ 4 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)



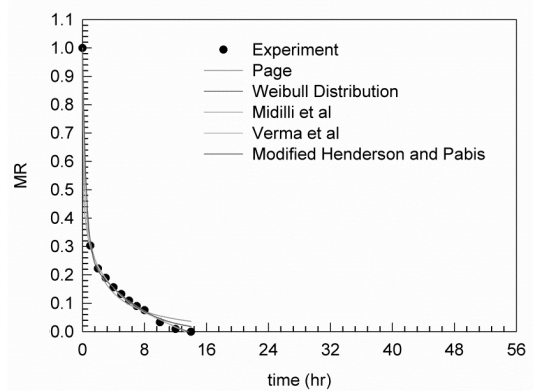
รูปที่ 5 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส)



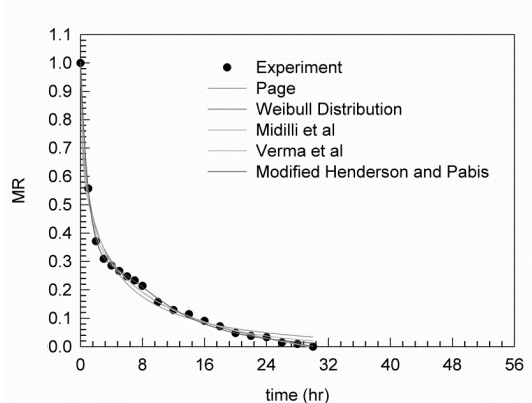
รูปที่ 8 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)



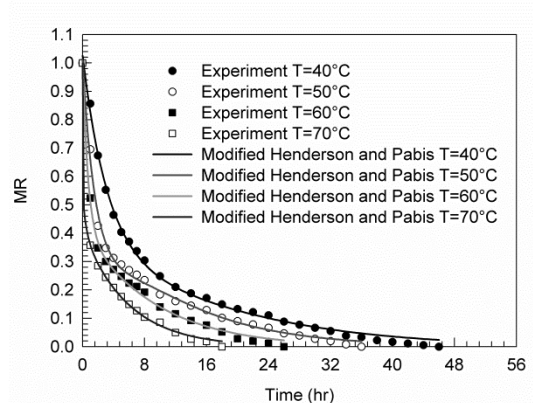
รูปที่ 6 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส)



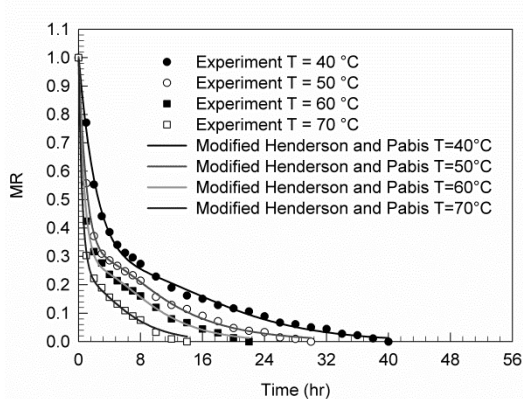
รูปที่ 9 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 7 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง
(ความเร็วอากาศ 0.5 m/s)



รูปที่ 11 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s)

4. สรุป

อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งยางพาราแผ่นที่สภาวะความเร็วการไหลของอากาศเท่ากันแต่อุณหภูมิต่างกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นในยางพาราแผ่นจะระเหยออกได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำและที่สภาวะอุณหภูมิเท่ากันแต่ความเร็วการไหลของอากาศต่างกันเมื่อความเร็วการไหลของอากาศสูงขึ้นความชื้นในยางพาราแผ่นจะระเหยออกได้เร็วกว่าที่ความเร็วการไหลของอากาศต่ำเนื่องจากที่ความเร็วการไหลของอากาศสูงความชื้นที่ผิวยางพาราแผ่นจะถูกพาออกไปได้เร็วกว่าที่ความเร็วการไหล

ของอากาศต่ำ ส่วนการเปรียบเทียบแบบจำลองอบแห้งชั้นบางกับผลการทดลองนั้นมีแบบจำลอง 5 แบบที่ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งยางพาราแผ่นได้ดีในทุกสภาวะของการทดลองคือแบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis, Verma et al., Midilli et al., Weibull Distribution และ Page ตามลำดับ มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.984-0.9995, adjusted R^2 0.9817-0.9993, SSE 0.0004162-0.01981 และ RMSE 0.006451-0.03209 ซึ่งแบบจำลองอบแห้งชั้นบางของ Modified Henderson and Pabis ที่สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้ดีที่สุด มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9956-0.9992, adjusted R^2 0.9943-0.9989, SSE 0.0008541-0.005914 และ RMSE 0.007811-0.01786

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และความอนุเคราะห์จากสหกรณ์สวนยางพิจิตรจำกัด ตำบลพิจิตร อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ตารางที่ 2 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส)

model	R^2	adjusted R^2	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.954	0.954	0.08559	0.0563	-	-	-	-	0.1491	-	-
2	0.9907	0.9903	0.01733	0.02582	-	-	-	0.7055	0.2645	-	-
3	0.9632	0.9618	0.06847	0.05132	0.9028	-	-	-	0.1283	-	-
4	0.9789	0.9772	0.0393	0.03965	0.8984	0.05557	-	-	0.1662	-	-
5	0.9913	0.9902	0.0162	0.02598	0.008133	-1.02	-	0.7021	0.2798	-	-
6	0.9912	0.9901	0.01634	0.02609	1.029	-1.9E-05	-	0.6854	0.2837	-	-
7	0.9966	0.9963	0.006381	0.01598	0.5415	-	-	-	0.3605	0.06591	-
8	0.9804	0.9797	0.03644	0.03744	0.2592	-	-	-	0.4241	-	-
9	0.9968	0.9961	0.005914	0.0164	0.7536	6.931	-6.659	-	0.3009	0.08489	0.08811
10	0.6512	0.6378	0.6491	0.158	-0.06945	0.001128	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)

model	R ²	adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.8794	0.8794	0.1493	0.08239	-	-	-	-	0.2502	-	-
2	0.984	0.9832	0.01981	0.03071	-	-	-	0.5462	0.498	-	-
3	0.9038	0.8993	0.1191	0.07531	0.8433	-	-	-	0.1934	-	-
4	0.9449	0.9393	0.06829	0.05843	0.8496	0.07586	-	-	0.2958	-	-
5	0.9842	0.9817	0.01957	0.03209	-0.01279	-1.023	-	0.5242	0.5056	-	-
6	0.9845	0.9821	0.01915	0.03175	1.011	-0.0005	-	0.5176	0.5188	-	-
7	0.994	0.9934	0.007469	0.01933	0.5996	-	-	-	0.7765	0.07717	-
8	0.9254	0.9219	0.09237	0.06632	0.2489	-	-	-	0.744	-	-
9	0.9956	0.9943	0.005422	0.01786	6.621	-6.176	0.5659	-	0.4471	0.4123	0.09398
10	0.2841	0.25	0.8867	0.2055	-0.0937	0.002005	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

model	R ²	adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.8515	0.8515	0.1449	0.09233	-	-	-	-	0.3397	-	-
2	0.9903	0.9897	0.009501	0.02437	-	-	-	0.4894	0.6667	-	-
3	0.8855	0.8784	0.1117	0.08355	0.8255	-	-	-	0.2565	-	-
4	0.9238	0.9136	0.07436	0.07041	0.8323	0.08052	-	-	0.4183	-	-
5	0.9957	0.9948	0.004196	0.01731	-0.2189	-1.22	-	0.3461	0.5522	-	-
6	0.9961	0.9953	0.003758	0.01638	1.001	-0.003	-	0.3916	0.7176	-	-
7	0.9972	0.9968	0.002764	0.01357	0.5739	-	-	-	1.493	0.1123	-
8	0.9073	0.9015	0.09045	0.07519	0.2398	-	-	-	1.071	-	-
9	0.9975	0.9964	0.00247	0.01435	1.457	0.5882	-1.047	-	0.1298	1.411	0.1403
10	0.2795	0.2345	0.7031	0.2096	-0.1307	0.003859	-	-	-	-	-

ตารางที่ 5 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 0.5 m/s อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส)

model	R ²	adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.858	0.858	0.1177	0.09517	-	-	-	-	0.5392	-	-
2	0.9923	0.9917	0.006372	0.02304	-	-	-	0.4303	0.9283	-	-
3	0.875	0.8646	0.1036	0.09291	0.8754	-	-	-	0.4419	-	-
4	0.9314	0.9189	0.05688	0.07191	0.8727	0.09184	-	-	0.8156	-	-
5	0.9995	0.9993	0.000416	0.006451	-1.135	-2.133	-	0.203	0.3518	-	-
6	0.9993	0.9991	0.000566	0.00752	0.9999	-0.00565	-	0.2979	0.9879	-	-
7	0.999	0.9988	0.000851	0.008793	0.5892	-	-	-	3.769	0.1707	-
8	0.9062	0.8984	0.07776	0.0805	0.2527	-	-	-	1.586	-	-
9	0.999	0.9983	0.000861	0.01037	0.1225	0.409	0.468	-	2.111	0.1701	28.63
10	0.3163	0.2593	0.5667	0.2173	-0.1895	0.008035	-	-	-	-	-

ตารางที่ 6 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส)

model	R ²	adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.9123	0.9123	0.1279	0.073	-	-	-	-	0.1884	-	-
2	0.99	0.9895	0.01464	0.02523	-	-	-	0.6094	0.3743	-	-
3	0.935	0.9322	0.09477	0.06419	0.8516	-	-	-	0.1476	-	-
4	0.9628	0.9594	0.05431	0.04969	0.8526	0.06929	-	-	0.2119	-	-
5	0.9961	0.9956	0.005661	0.01642	1.005	1.2	-	-0.5473	1.48	-	-
6	0.9904	0.989	0.01403	0.02584	1.016	-0.00036	-	0.5819	0.3944	-	-
7	0.9967	0.9964	0.004861	0.01486	0.4574	-	-	-	0.0721	0.5838	-
8	0.9533	0.9512	0.06819	0.05445	0.2442	-	-	-	0.5723	-	-
9	0.9971	0.9964	0.004181	0.01483	2.202	108.1	-109.3	-	0.1272	0.2457	0.2427
10	0.4887	0.4664	0.7459	0.1801	-0.08117	0.001535	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)

model	R ²	adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.8519	0.8519	0.1567	0.09082	-	-	-	-	0.3032	-	-
2	0.9888	0.9882	0.01187	0.02568	-	-	-	0.5013	0.6127	-	-
3	0.8897	0.8836	0.1167	0.08052	0.8135	-	-	-	0.223	-	-
4	0.9223	0.9131	0.08223	0.06955	0.821	0.0723	-	-	0.3443	-	-
5	0.9938	0.9926	0.006602	0.02031	-0.1632	-1.165	-	0.3758	0.5443	-	-
6	0.9942	0.9931	0.006158	0.01962	1.002	-0.00233	-	0.4133	0.661	-	-
7	0.9967	0.9963	0.003467	0.01428	0.5646	-	-	-	1.331	0.1016	-
8	0.9079	0.9028	0.09745	0.07358	0.2368	-	-	-	0.9672	-	-
9	0.9992	0.9989	0.000854	0.007811	4.587	0.6526	-4.239	-	0.6628	0.1304	0.5749
10	0.2482	0.2064	0.7955	0.2102	-0.1137	0.00292	-	-	-	-	-

ตารางที่ 8 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

model	R ²	adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.8335	0.8335	0.1465	0.09882	-	-	-	-	0.4207	-	-
2	0.9904	0.9897	0.008431	0.02454	-	-	-	0.4444	0.8019	-	-
3	0.8651	0.8555	0.1187	0.09207	0.8316	-	-	-	0.3192	-	-
4	0.9155	0.9025	0.07436	0.07563	0.8449	0.09197	-	-	0.595	-	-
5	0.9992	0.999	0.000694	0.007602	-1.117	-2.117	-	0.2193	0.3257	-	-
6	0.9993	0.9991	0.000641	0.007308	1	-0.00491	-	0.3124	0.8687	-	-
7	0.998	0.9977	0.001737	0.01156	0.5797	-	-	-	2.425	0.134	-
8	0.8912	0.8834	0.09577	0.08271	0.242	-	-	-	1.309	-	-
9	0.9972	0.9958	0.002461	0.01569	7.03	0.8642	-6.906	-	0.2361	1.201	0.2538
10	0.2532	0.1998	0.6571	0.2166	-0.1551	0.005406	-	-	-	-	-

ตารางที่ 9 ค่าความแม่นยำและค่าคงที่ของแบบจำลอง (ความเร็วอากาศ 1 m/s อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส)

model	R ²	adjusted R ²	SSE	RMSE	a	b	c	n	k	g	h
1	0.8945	0.8945	0.08399	0.08738	-	-	-	-	0.7802	-	-
2	0.9934	0.9928	0.005237	0.02288	-	-	-	0.4066	1.132	-	-
3	0.8984	0.8882	0.08089	0.08994	0.9403	-	-	-	0.7131	-	-
4	0.9554	0.9455	0.03553	0.06283	0.9038	0.08429	-	-	1.173	-	-
5	0.9993	0.9991	0.000526	0.008108	-5.113	-6.108	-	0.149	0.1204	-	-
6	0.9995	0.9992	0.000435	0.007376	1	-0.00776	-	0.252	1.185	-	-
7	0.9981	0.9977	0.001477	0.01281	0.6503	-	-	-	3.781	0.206	-
8	0.9259	0.9185	0.05899	0.07681	0.2827	-	-	-	1.972	-	-
9	0.9981	0.9964	0.001548	0.01606	3.611	0.7775	-3.393	-	0.2943	2.032	0.3161
10	0.3682	0.305	0.5029	0.2243	-0.2391	0.01284	-	-	-	-	-

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaiprapat S, Sdoodee S. Effects of wastewater recycling from natural rubber smoked sheet production on economic crops in southern Thailand. *Conservation and Recycling*. 2007; Vol. 51: 577-590.
- [2] Rubber research institute of Thailand. Technical information rubber. 2010; (in thai)

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

- [4] Mazutti M A, Zabot G, Boni G, Skovronski A, Oliveira D D, Luccio M D, Oliveira J V, Rodrigues M I, Treichel H, Maugeri F. Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented and non-fermented sugarcane bagasse. biomass and bioenergy. 2010; Vol. 34: 780–786.
- [5] Janjai S, Precoppe M, Lamlert N, Mahayothee B, Bala B K, Nagle M, Muller J. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). Food and Bioproducts Processing. 2011; Vol. 89: 194-201.
- [6] Akpinar E K, Bicer Y, Cetinkaya F. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. Journal of Food Engineering. 2006; Vol. 75: 308–315.
- [7] Wang Z, Sun J, Liao X, Chen F, Zhao G, Wu J, Hu X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. Food Research International. 2007; Vol. 40: 39–46.
- [8] Doymaz I. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. Journal of Food Engineering. 2006; Vol. 74: 370–375.
- [9] Menges H O and Ertekin C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. Journal of Food Engineering. 2006; Vol. 77: 119–125.
- [10] Ertekin C and Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering. 2004; Vol. 63: 349–359.
- [11] Hacıhafızoglu O, Cihan A, Kahveci K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. food and bioproducts processing. 2008; Vol. 86: 268–275.
- [12] Dejchanchaiwong R, Suchonpanit W, Akephom A, Lapo T, Tirawanichakul Y, Tekasakul P, Tirawanichakul S. Artificial neural network approach on equilibrium moisture content for predicting kinetics of air dried sheet rubber. Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference. Songkhla, Thailand. November 10 – 11. 2011; 21: 1-8.
- [13] Rubber research institute of Thailand. Technical information rubber. 2010; (in thai)
- [14] Tekasakul P and Promtong M. Energy efficiency enhancement of natural rubber smoking process by flow improvement using a CFD technique. Applied Energy. 2008; Vol. 85: 878–895.
- [15] Teeboonma U, Suwanakoot T. Comparative Study of Drying using Hot Air and Hot Air-Infrared Radiation. KKKU Engineering Journal. March – April 2007; Vol. 34(2): 189 – 201. (In Thai).
- [16] Teeboonma U, Toomthong P. Drying kinetic of *Tilapia nilotica* drying using hot air. KKKU Engineering Journal. October–December 2010; Vol. 37(4): 307-317. (In Thai).
- [17] Jeentada W, Chankrachang T, Chooklin S, Sirirak C. Comparison of mathematical models equilibrium moisture content for sheet rubber. KKKU Engineering Journal. January-March 2012; 39(1): 11-21. (In Thai).
- [18] Hii C L, Law C L, Cloke M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. Journal of Food Engineering. 2009; Vol. 90: 191–198.
- [19] Togrul I T and Pehlivan D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. Journal of Food Engineering. 2004; Vol. 65: 413–425.