

สมการอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ยางพาราความหนา 25.4 มิลลิเมตร

พรชัย เพชรสงคราม^{1*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต.บ่อทราย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

และ ปัญญารักษ์ งามศรีตระกูล²

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของน้ำจากเนื้อไม้ยางพาราความหนา 25.4 mm กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตารางการอบแห้งไม้ยางพาราโดยทดลองอบแห้งไม้ยางพาราที่ผ่านการอัดน้ำยาและมีความชื้นเริ่มต้น 70 – 80% ขนาดกว้าง 7.62 cm หนา 2.54 cm ยาว 34 cm ที่อุณหภูมิอากาศ 50, 60, 75, 90 และ 100°C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 13, 30, 55, 80 และ 97% และความเร็วอากาศ 2.3, 3, 4, 5 และ 5.7 m/s จำนวน 17 การทดลอง ซึ่งได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี central composite design (CCD) จากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง ในขณะที่ความเร็วอากาศไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจนและสมการอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ยางพาราที่ได้ทั้ง 7 สมการตามช่วงความชื้นของไม้ คือ 70% – 55%, 55% – 40%, 40% – 30%, 30% – 20%, 20% – 15% และ 15% – 10% สามารถทำนายได้แม่นยำมากกว่า 97% ($R^2 > 0.97$) ยกเว้นที่ 10% – 5% สามารถทำนายได้แม่นยำ 81.7% ($R^2 = 0.817$)

คำสำคัญ : ไม้ยางพารา / กระบวนการอบไม้ / อัตราการระเหย / เวลาการอบ / การออกแบบการทดลอง

* Corresponding Author : pornchai.p@rmutsv.ac.th

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

Empirical Correlation of Water Evaporation Rate from 25.4-mm Thick Rubberwood Lumber

Pornchai Phetsongkram^{1*}

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Bo Yang, Muang, Songkhla 90000

and Panyarak Ngamsritragul²

Prince of Songkla University, Kho Hong, Hatyai, Songkhla 90110

Abstract

The objective of this work was to formulate the empirical correlations relating the evaporation rate of water from 25.4-mm thick rubberwood lumbers and the temperature, relative humidity and air drying velocity via the use of the response surface methodology; the correlations are aimed for the design of the rubberwood drying schedules. Seventeen experimental runs were designed by the central composite design method. The utilized rubberwood samples were those prepared by a typical impregnation method and had an initial moisture content of 70-80%, with the width of 7.62 cm, thickness of 2.54 cm, and length of 34 cm. Drying conditions consisted of the air temperatures of 50, 60, 75, 90 and 100 °C, air relative humidity of 13, 30, 55, 80 and 97%, and air velocities of 2.3, 3, 4, 5 and 5.7 m/s. Air temperature and air relative humidity strongly affected the drying time, while the air velocity exhibited less influence. Seven empirical correlations based on the 7 intervals of wood moisture content (70% – 55%, 55% – 40%, 40% – 30%, 30% – 20%, 20% – 15%, 15% – 10% and 10%-5%) were established, having the accuracy of prediction over 97% ($R^2 > 0.97$) except for that belonging to the interval of 10% – 5%, which has the accuracy of prediction of only 81.7% ($R^2 = 0.817$).

Keywords : Rubberwood / Drying Process / Drying Rate / Drying Time / Design of Experiment

* Corresponding Author : pornchai.p@rmutsv.ac.th

¹ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

² Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

1. บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งประโยชน์ที่ได้จากต้นยางพารา คือ น้ำยางและไม้ยางพารา โดยในปี 2559 ประเทศไทยส่งออกไม้ยางพาราแปรรูป จำนวน 21,043,146 ลูกบาศก์เมตร มูลค่า 40,022 ล้านบาท [1] อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำไม้ยางพาราไปใช้งานนั้นจะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปเสียก่อนโดยกระบวนการหลักๆของการแปรรูปไม้ยางพาราในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราประกอบด้วยกระบวนการเลื่อยไม้ กระบวนการอัดน้ำยา และกระบวนการอบแห้ง ซึ่งกระบวนการอบแห้งจะอบแบบชุดโดยใช้การถ่ายเทความร้อนจากท่อไอน้ำไปสู่กองไม้และอบที่อุณหภูมิ 62 - 85°C ใช้เวลาในการอบประมาณ 8-12 วัน ขึ้นอยู่กับขนาดหน้าไม้และปริมาณไม้ในหีบอบ [2-5] และใช้พลังงานในการอบแห้งประมาณ 70% ของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต [2, 6] โดยปกติพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งไม้อยู่ในช่วง 4.7-7.0 MJ/kg ของน้ำแต่การอบแห้งไม้ยางพาราใช้พลังงานสูงถึง 13.5 MJ/kg ของน้ำ [7] ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานที่สูงมากเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆของกระบวนการแปรรูปไม้ และมีการใช้พลังงานในการอบแห้งสูงกว่าปกติสำหรับการอบแห้งไม้ยางพาราซึ่งอบโดยอาศัยความเชี่ยวชาญจากประสบการณ์เท่านั้น [8] การที่จะลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลงนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการด้วยกันเช่น การติดตั้งระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ การอบแห้งด้วยกระบวนการลดความชื้นการตากไม้ก่อนการอบ การเลือกความเร็วอากาศให้เหมาะสมและการเลือกตารางการอบแห้งให้เหมาะสมด้วยวิธีการต่างๆที่ใช้ในการลดการใช้พลังงานในเตาอบข้างต้นการเลือกความเร็ว

อากาศและเลือกตารางการอบแห้งให้เหมาะสมนั้นเป็นวิธีที่สามารถทำได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการลงทุนปรับปรุงเตาอบแห้งแต่จำเป็นที่จะต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้กับอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศและความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบตารางการอบแห้งไม้ยางพารา

2. วิธีวิจัย

2.1 วัสดุ และวิธีการทดลอง

ไม้ยางพาราที่ใช้ในการทดลองทั้ง 17 การทดลองถูกนำมาจาก บริษัท วัสดุเวิร์คแอดวานซ์ จำกัด ต.เขามิเกียรติ อ.เสเดา จ.สงขลา ขนาด กว้าง 7.62 cm หนา 2.54 cm ยาว 110 cm และผ่านการอัดน้ำยาเรียบร้อยแล้วโดยมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 70 - 80% ในการทดลองแต่ละครั้งใช้ไม้จำนวน 15 ท่อน นำมาเลื่อยแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1 และจะถูกชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อหาน้ำหนักเปียกของไม้ (wet weight) จากนั้นนำไม้ส่วนปลายทั้งสองด้าน (E1 และ E2) และส่วนกึ่งกลางของไม้ยางพารา (M) ไปอบด้วยเตาอบแห้งยี่ห้อ Binder รุ่น FD240 ที่อุณหภูมิ 103 ± 2°C จนน้ำหนักไม้ไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นน้ำหนักแห้งของไม้ (dry weight) และไม้ส่วนที่ 1 และ 2 ถูกนำไปอบด้วยชุดทดลองอบแห้งไม้ยางพารา โดยในระหว่างการอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นของอากาศก่อนเข้ากองไม้ และน้ำหนักไม้จะถูกบันทึกทุกๆ 1 นาที จนไม้มีความชื้นต่ำกว่า 10% หรือน้ำหนักไม้ไม่เปลี่ยนแปลงจึงหยุดการทดลอง



รูปที่ 1 การตัดชิ้นไม้ทดสอบ

2.2 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ทางสถิติ

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยตัวของน้ำในเนื้อไม้ (evaporation rate) กับอุณหภูมิอากาศ

(T) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (ϕ) และความเร็วของอากาศผ่านหน้าไม้ (v) ที่ใช้ในการอบแห้ง ได้ใช้วิธี response surface methodology (RSM) ในการหารูปแบบของสมการความสัมพันธ์ โดยสมการความสัมพันธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปสมการ

โพลีโนเมียลลำดับสอง ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้กับตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร (T, ϕ, v) สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (1)

$$ER = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 \phi + \beta_3 v + \beta_4 T^2 + \beta_5 \phi^2 + \beta_6 v^2 + \beta_7 T\phi + \beta_8 Tv + \beta_9 \phi v \quad (1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ β_i ทั้งหมดในสมการที่ (1) สามารถหาได้โดยการใช้วิธี multiple regression ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตัดทอนที่ไม่มีนัยสำคัญต่อสมการความสัมพันธ์ออก ($P > 0.05$) ซึ่งขนาดของสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจะบ่งบอกถึงความสำคัญของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ การยอมรับโมเดลหรือสมการ response surface ที่สร้างขึ้นมาสามารถตรวจสอบได้จากการทดสอบทางสถิติโดยวิธี F-lack of fit (F-LOF) test โมเดลที่มีนัยสำคัญและสามารถยอมรับได้ถ้า F_0 มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ (F_{crit}) ในการแจกแจงทางสถิติแบบเอฟ (F-distribution) ที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนดและที่ค่าองศาอิสระ i และ $n - i$ หรือพิจารณาจากเงื่อนไขที่ว่าถ้าค่า F Signif มีค่าน้อยกว่า 0.05 – level of confidence

ตารางที่ 1 Code ของตัวแปรอิสระและค่าของตัวแปร

ตัวแปรอิสระ	Code				
	-1.68	-1	0	+1	+1.68
อุณหภูมิอากาศ T (°C)	50	60	75	90	100
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ϕ (%)	13	30	55	80	97
ความเร็วอากาศ v (m/s)	2.3	3	4	5	5.7

CCD ที่สมบูรณ์จะรวมกับการทดลองซ้ำของจุดศูนย์กลาง 2 จุด (code = 0) ดังนั้นการทดลองทั้งหมดจะประกอบด้วย 18 การทดลอง โดยมี 8 จุด factorial, 6 จุดตามแนว axial และ 2 จุดศูนย์กลาง ($2^k + 2k + 2$ center point) และการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางอีก 2 การทดลอง แต่เนื่องจากในแต่ละการทดลองต้องใช้เวลาจนถึงได้ลดการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางเหลือเพียง 1 การทดลอง ทำให้เหลือการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง

โมเดลของ response surface ที่ทำได้จะมีนัยสำคัญ และยอมรับได้ [9]

สำหรับการออกแบบการทดลองได้ใช้วิธี central composite design (CCD) ที่ประกอบด้วย factorial point จำนวน 2^k จุด axial point หรือจุดในแนว axial จำนวน $2k$ จุด และ center point หรือจุดศูนย์กลาง จำนวน 2 จุด โดยที่ k คือจำนวนตัวแปรอิสระ คุณลักษณะที่สำคัญ 2 ประการของการออกแบบด้วยวิธี CCD คือต้อง orthogonal และ rotatable โดยค่าอัลฟา (correct spacing for the axial parametric) ที่ทำให้การทดลองที่ออกแบบสามารถ rotate ได้คือ

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (2)$$

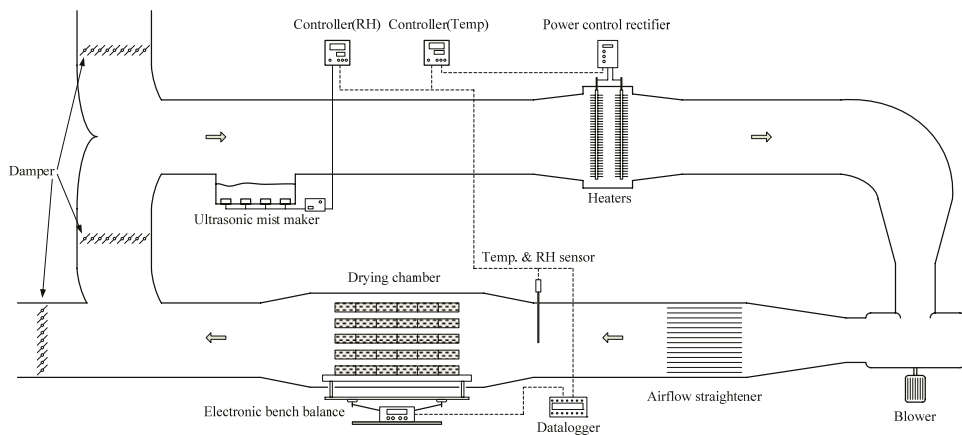
โดยที่ 2^k คือ จำนวนของ factorial points ในกรณีของตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ค่า α ที่เหมาะสมคือ 1.68 (เพื่อให้ CCD rotatable) การทดลองที่ออกแบบได้แบ่งออกเป็น 5 ระดับ ซึ่งเขียน code ได้เป็น -1.68, -1, 0, +1 และ +1.68 code ของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับศึกษาอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้แสดงไว้ในตารางที่ 1

2.3 ชุดทดลองการอบแห้งไม้ยางพารา

ชุดทดลองอบแห้งไม้ยางพารา ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 มีขนาดบรรจุ 73.5 L สามารถบรรจุไม้สดที่มีความยาว 34 cm ได้ประมาณ 25 – 35 kg การจัดเรียงไม้จะเรียงในลักษณะที่ความหนาของไม้ปะทะกับทิศทางการไหลของอากาศ โดยความกว้างของการเรียงไม้ประมาณ 50 – 60 cm เรียงไม้ขนาดความหนา 2.5 cm ได้สูง 5 ชั้น โดยมีไม้ท่อนขนาด 2.5x2.5x50 cm เป็นไม้รองระหว่างชั้น แหล่งให้ความร้อนกับ

ตู้อบคือ ฮีทเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5.4 kW เป็นฮีทเตอร์แบบครีบลี สี่เหลี่ยมผืนผ้า ควบคุมอุณหภูมิโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ซึ่งให้สัญญาณควบคุมผ่านเครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (power regulator) เพื่อปรับกระแสที่จ่ายให้กับฮีทเตอร์ ความชื้นสัมพัทธ์ในชุดทดลองควบคุมโดยใช้ตัวควบคุม (controller) ซึ่งให้สัญญาณ output เพื่อปรับความชื้นของอากาศโดยการเปิด-ปิด เครื่องทำหมอก (ultrasonic mist maker) ให้กับระบบ ความเร็วอากาศสามารถปรับเปลี่ยนได้

ตั้งแต่ 1.1 – 8.8 m/s โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องเป่าลม (blower) ด้วยอินเวอร์เตอร์ (inverter) ค่าเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่วัดได้จากการทดลองได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในชุดทดลอง และน้ำหนักของไม้ที่อบถูกวัดโดยใช้เครื่องมือต่างๆ ได้แก่ temperature/humidity sensor, electronic bench balance โดยเครื่องมือวัดเหล่านี้จะส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) เพื่อบันทึกข้อมูลในระหว่างการทดลอง



รูปที่ 2 Schematic diagram ของชุดทดลองอบแห้งไม้ยางพารา



รูปที่ 3 ชุดทดลองอบแห้งไม้ยางพารา

2.4 ทฤษฎีในการวิเคราะห์ผล

2.4.1 ค่าความชื้น

ปริมาณความชื้นในไม้เรียกว่า ค่าความชื้น (moisture content) โดยทั่วไปแล้วจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเรียกว่าค่าความชื้นฐานแห้ง (dry basis) สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Moisture content} = \frac{(W_i - W_o)}{W_o} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อค่า W_i และ W_o คือ น้ำหนักไม้ที่เวลาใดๆ และน้ำหนักไม้แห้งตามลำดับ

2.4.2 อัตราการระเหย

อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ (evaporation rate) หรือการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของไม้ต่อหน่วยเวลาในช่วงเวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$ER = \frac{MC_i - MC_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \quad (4)$$

เมื่อค่า MC_i และ MC_{i+1} คือ ความชื้นไม้ที่เวลาใดๆ และความชื้นไม้ที่เวลาถัดไป ค่า t_i และ t_{i+1} คือเวลาใดๆ และเวลาถัดไปตามลำดับ

เนื่องจากการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ กับอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้วิธี RSM นั้นผลตอบสนอง (response) ซึ่งในที่นี้หมายถึงอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด จะต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศเท่านั้น แต่เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความชื้นไม้เทียบกับเวลามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลทำให้อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้เปลี่ยนแปลงตามความชื้นของไม้ด้วย ดังนั้น

จึงต้องแบ่งช่วงของความชื้นไม้ออกเป็นหลายๆ ช่วง โดยที่ในแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นไม้เทียบกับเวลาของการทดลองทั้งหมดจะต้องมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรงมากที่สุดเพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้จากความชื้นของเส้นตรงที่ได้ โดยแบ่งความชื้นไม้ออกเป็นช่วงละ 3, 5, 10, 15 และ 20% จากนั้นเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของแต่ละช่วงความชื้นของการทดลองทั้งหมดโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : r) ซึ่งสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และความชันของเส้นกราฟสามารถหาได้จากสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{avg})(MC_i - MC_{avg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{avg})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (MC_i - MC_{avg})^2}} \quad (5)$$

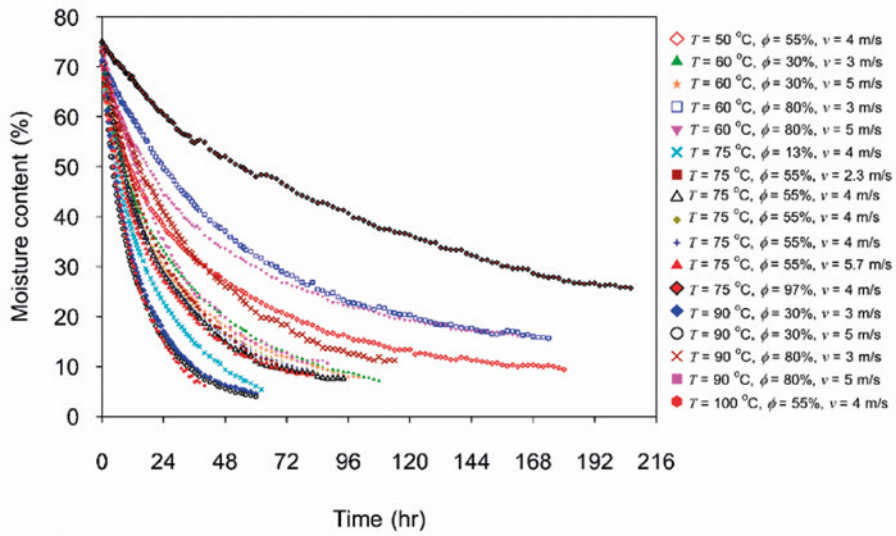
$$\text{Slope} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{avg})(MC_i - MC_{avg})}{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{avg})^2} \quad (6)$$

เมื่อค่า MC_i และ MC_{avg} คือ ความชื้นไม้ที่เวลาใดๆ และความชื้นไม้เฉลี่ย ค่า t_i และ t_{avg} คือเวลาใดๆ และเวลาเฉลี่ย และค่า N คือ จำนวนข้อมูล

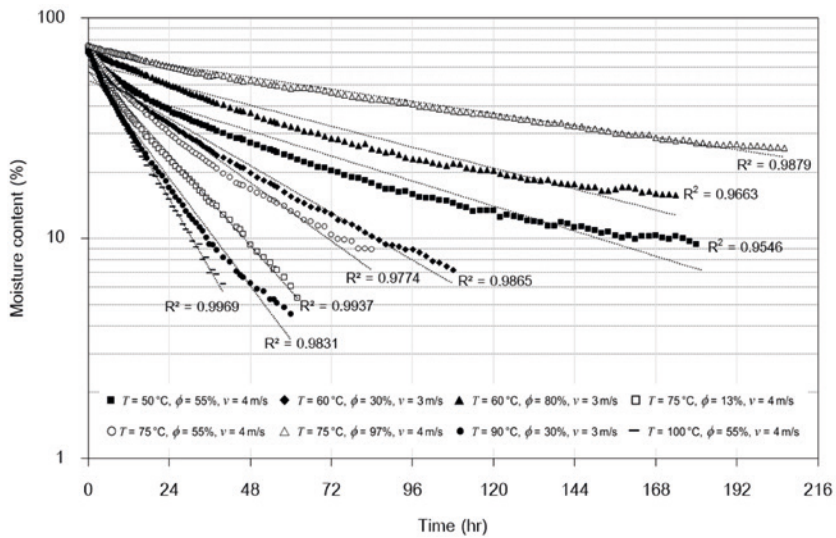
3. ผลการวิจัย และอภิปรายผล

3.1 คุณลักษณะของการอบแห้งไม้อย่างพารา

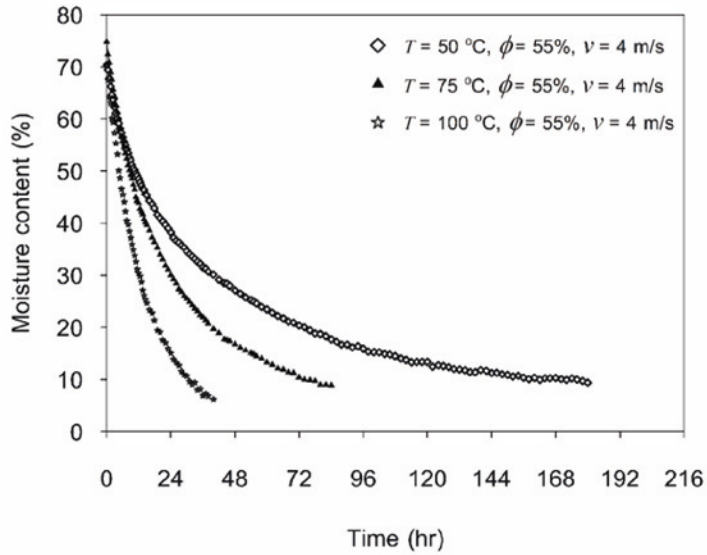
การอบแห้งไม้อย่างพาราจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 70 – 80% จนความชื้นไม้ไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีค่าต่ำกว่า 10% ของทั้ง 17 การทดลอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความชื้นของไม้มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นโดยจะเห็นได้จากการลดลงของความชื้นมีลักษณะเข้าใกล้เส้นตรงเมื่อนำผลการทดลองมาทำการพล็อตกราฟเซมิล็อก (semi log) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 4 กราฟการอบแห้งไม้ยางพาราที่สภาวะอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศ ทั้ง 17 การทดลอง



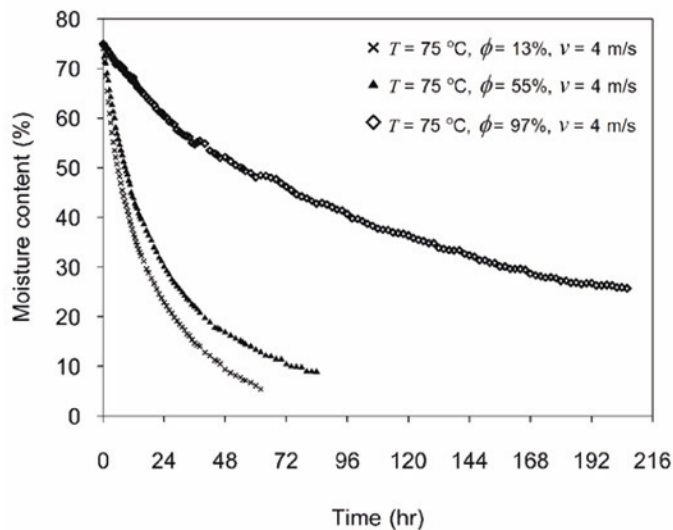
รูปที่ 5 กราฟเซมิล็อกแสดงการลดลงของความชื้นไม้เทียบกับเวลาของการทดลองที่ 1 2 4 6 9 12 13 และ 17



รูปที่ 6 กราฟการอบแห้งไม้ยางพาราที่อุณหภูมิอากาศ 50°C, 75°C และ 100°C ความชื้นอากาศ 55% และความเร็วอากาศ 4 m/s

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จะเห็นว่าอุณหภูมิมอบแห้งสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งไม่นานกว่าที่อุณหภูมิมอบแห้งต่ำโดยอุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 50, 75 และ 100°C ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 162, 74 และ 31 ชั่วโมง ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srivaro และคณะ [10] ซึ่งอบแห้งไม้ยางพาราที่อุณหภูมิอากาศ 60, 75 และ 90°C โดยควบคุมค่าความชื้น

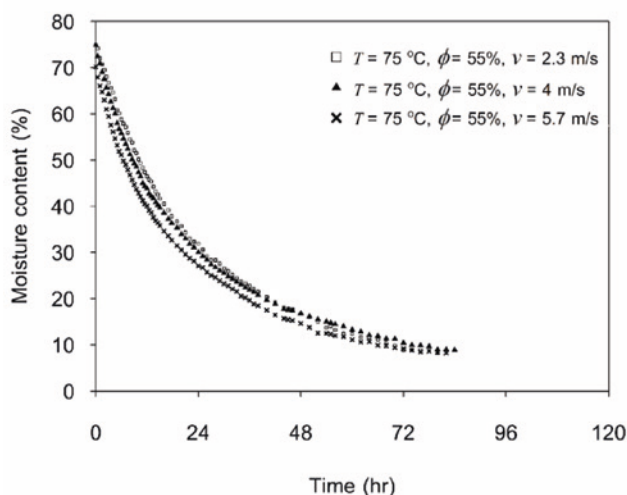
สมดุล (EMC) ระหว่างอากาศกับเนื้อไม้ไว้ที่ 4% พบว่าการอบแห้งไม้ที่อุณหภูมิเท่ากับ 90°C สามารถลดเวลาในการอบแห้งลงได้ประมาณ 50% เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งไม้ที่อุณหภูมิ 60°C และ Kaewploy และ Boonseng [11] ได้หาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งไม้ยางพาราพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความชื้นไม้ยางพารา คืออุณหภูมิในการอบแห้ง



รูปที่ 7 กราฟการอบแห้งไม้ยางพาราที่อุณหภูมิอากาศ 75°C ความชื้นอากาศ 13%, 55% และ 97% และความเร็วอากาศ 4 m/s

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในการอบแห้งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าความชื้นอากาศต่ำ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งไม่น้อยกว่าการอบแห้งด้วยความชื้นอากาศสูงโดยการอบแห้งที่ความชื้นอากาศเท่ากับ 13% และ 55% ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 48 ชั่วโมง และ 74 ชั่วโมง

ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งที่ความชื้นอากาศเท่ากับ 97% จะไม่สามารถลดความชื้นไม้ได้ถึง 10% โดยความชื้นไม้จะมีค่าคงที่ประมาณ 25% ทั้งนี้เพราะความชื้นไม้จะเข้าสู่สภาวะสมดุลกับสภาวะอากาศที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Theppaya และ Prasertsan [7] มีค่าเท่ากับ 21%



รูปที่ 8 กราฟการอบแห้งไม้ยางพาราที่อุณหภูมิอากาศ 75°C ความชื้นอากาศ 55% และความเร็วอากาศ 2.3 m/s, 4 m/s และ 5.7 m/s

รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศต่อเวลาในการอบแห้งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2.3, 4 และ 5.7 m/s เวลาที่ใช้ในการอบแห้งไม่ให้ความชื้นเท่ากับ 10% มีค่าเท่ากับ 76, 74 และ 66 ชั่วโมงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าความเร็วอากาศไม่ได้ส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งอย่างชัดเจน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kollman และ Cote [12] อ้างโดย Ratanawilai และคณะ [8] ซึ่งได้ทำการทดลองอบแห้งโดยใช้อัตราความเร็วอากาศตั้งแต่ 1.2 – 11 m/s พบว่าความเร็วของอากาศจะมีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ (evaporation rate) ในระยะแรกที่น้ำระเหยออกจากไม้เท่านั้น หลังจากนั้นอิทธิพลของความเร็วของอากาศจะน้อยลง

3.2 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นไม้ และเวลาที่ช่วงความชื้นไม้ 3, 5, 10, 15 และ

20% ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 1 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 การตัดสินใจเลือกช่วงความชื้นของไม้เพื่อนำไปใช้หาค่าอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้สำหรับสร้างสมการพิจารณาโดยเลือกช่วงที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเข้าใกล้ -1 มากที่สุดจากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นไม้กับเวลา ของทุกช่วงความชื้นไม่มีความสัมพันธ์กันในระดับที่สูงมาก ($-0.9 < r < -1$) ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของความชื้นไม้เมื่อเทียบกับเวลาจะสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นได้ดี และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยจะเห็นว่าที่ช่วงความชื้นไม้เท่ากับ 15% ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเข้าใกล้ -1 มากที่สุดดังนั้นจึงพิจารณาเลือกช่วงความชื้นไม้เท่ากับ 15% ($70\% \leq MC \leq 55\%$) เป็นช่วงที่ 1 ส่วนในช่วงต่อไปจะใช้หลักเกณฑ์เดียวกันในการพิจารณา ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ช่วงความชื้นไม้เท่ากับ 15, 10, 10, 5 และ 5% จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเข้าใกล้ -1 มากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 2 – 8

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 1

Test no.	Experiment conditions			Correlation coefficient in each interval of wood moisture content (1 st interval)				
	T (°C)	ϕ (%)	v (m/s)	3% (70% - 67%)	5% (70% - 65%)	10% (70% - 60%)	15% (70% - 55%)	20% (70% - 50%)
1	50	55	4	-0.9952	-0.9986	-0.9960	-0.9926	-0.9899
2	60	30	3	-0.9984	-0.9992	-0.9956	-0.9951	-0.9909
3	60	30	5	-0.9918	-0.9953	-0.9946	-0.9893	-0.9837
4	60	80	3	-0.9891	-0.9959	-0.9970	-0.9979	-0.9987
5	60	80	5	-0.9314	-0.9790	-0.9962	-0.9978	-0.9953
6	75	13	4	-0.9989	-0.9989	-0.9971	-0.9966	-0.9942
7	75	55	2.3	-0.9920	-0.9963	-0.9964	-0.9966	-0.9980
8	75	55	4	-0.9973	-0.9977	-0.9982	-0.9970	-0.9966
9	75	55	4	-0.9931	-0.9956	-0.9988	-0.9987	-0.9965
10	75	55	4	-0.9975	-0.9982	-0.9990	-0.9981	-0.9966
11	75	55	5.7	-0.9964	-0.9980	-0.9977	-0.9990	-0.9974
12	75	97	4	-0.9682	-0.9862	-0.9950	-0.9963	-0.9867
13	90	30	3	-0.9926	-0.9970	-0.9983	-0.9980	-0.9969
14	90	30	5	-0.9957	-0.9970	-0.9992	-0.9990	-0.9974
15	90	80	3	-0.9665	-0.9300	-0.9860	-0.9932	-0.9955
16	90	80	5	-0.8981	-0.9789	-0.9925	-0.9942	-0.9970
17	100	55	4	-0.9628	-0.9673	-0.9909	-0.9916	-0.9950
	Average			-0.9803	-0.9888	-0.9958	-0.9959	-0.9945

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 2

Test no.	Experiment conditions			Correlation coefficient in each interval of wood moisture content (2 nd interval)				
	T (°C)	ϕ (%)	v (m/s)	3% (55% - 52%)	5% (55% - 50%)	10% (55% - 45%)	15% (55% - 40%)	20% (55% - 35%)
1	50	55	4	-0.9983	-0.9970	-0.9975	-0.9953	-0.9911
2	60	30	3	-0.9973	-0.9976	-0.9991	-0.9972	-0.9916
3	60	30	5	-0.9955	-0.9982	-0.9980	-0.9963	-0.9935
4	60	80	3	-0.9744	-0.9915	-0.9973	-0.9975	-0.9942
5	60	80	5	-0.9751	-0.9939	-0.9969	-0.9952	-0.9898
6	75	13	4	-0.9985	-0.9992	-0.9995	-0.9976	-0.9957
7	75	55	2.3	-0.9584	-0.9888	-0.9949	-0.9959	-0.9944
8	75	55	4	-0.9976	-0.9987	-0.9987	-0.9964	-0.9936
9	75	55	4	-0.9946	-0.9981	-0.9989	-0.9958	-0.9915
10	75	55	4	-0.9963	-0.9983	-0.9974	-0.9962	-0.9942
11	75	55	5.7	-0.9933	-0.9940	-0.9980	-0.9975	-0.9943
12	75	97	4	-0.9206	-0.9792	-0.9869	-0.9945	-0.9954
13	90	30	3	-0.9991	-0.9990	-0.9974	-0.9977	-0.9957
14	90	30	5	-0.9965	-0.9971	-0.9971	-0.9965	-0.9945
15	90	80	3	-0.9628	-0.9852	-0.9874	-0.9936	-0.9956
16	90	80	5	-0.9673	-0.9863	-0.9957	-0.9978	-0.9968
17	100	55	4	-0.9158	-0.9764	-0.9842	-0.9916	-0.9925
	Average			-0.9789	-0.9929	-0.9956	-0.9960	-0.9938

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 3

Test no.	Experiment conditions			Correlation coefficient in each interval of wood moisture content (3 rd interval)				
	T (°C)	ϕ (%)	v (m/s)	3% (40% - 37%)	5% (40% - 35%)	10% (40% - 30%)	15% (40% - 25%)	20% (40% - 20%)
1	50	55	4	-0.9932	-0.9892	-0.9965	-0.9924	-0.9890
2	60	30	3	-0.9923	-0.9975	-0.9992	-0.9977	-0.9930
3	60	30	5	-0.9948	-0.9970	-0.9983	-0.9922	-0.9896
4	60	80	3	-0.9841	-0.9938	-0.9944	-0.9943	-0.9793
5	60	80	5	-0.9679	-0.9907	-0.9937	-0.9931	-0.9835
6	75	13	4	-0.9991	-0.9989	-0.9973	-0.9959	-0.9922
7	75	55	2.3	-0.9770	-0.9915	-0.9936	-0.9929	-0.9910
8	75	55	4	-0.9968	-0.9945	-0.9990	-0.9938	-0.9891
9	75	55	4	-0.9949	-0.9964	-0.9987	-0.9959	-0.9913
10	75	55	4	-0.9981	-0.9979	-0.9985	-0.9937	-0.9899
11	75	55	5.7	-0.9854	-0.9928	-0.9966	-0.9943	-0.9911
12	75	97	4	-0.9671	-0.9863	-0.9972	-0.9892	-0.9892
13	90	30	3	-0.9956	-0.9986	-0.9982	-0.9962	-0.9911
14	90	30	5	-0.9969	-0.9989	-0.9981	-0.9944	-0.9907
15	90	80	3	-0.9766	-0.9929	-0.9942	-0.9891	-0.9927
16	90	80	5	-0.9542	-0.9811	-0.9947	-0.9953	-0.9841
17	100	55	4	-0.9259	-0.9765	-0.9953	-0.9969	-0.9903
	Average			-0.9823	-0.9926	-0.9967	-0.9940	-0.9892

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 4

Test no.	Experiment conditions			Correlation coefficient in each interval of wood moisture content (4 th interval)				
	T (°C)	ϕ (%)	v (m/s)	3% (30% - 27%)	5% (30% - 25%)	10% (30% - 20%)	15% (30% - 15%)	20% (30% - 10%)
1	50	55	4	-0.9896	-0.9970	-0.9962	-0.9922	-0.9521
2	60	30	3	-0.9979	-0.9989	-0.9948	-0.9933	-0.9843
3	60	30	5	-0.9956	-0.9951	-0.9983	-0.9924	-0.9798
4	60	80	3	-0.9719	-0.9898	-0.9823	-0.9710	-0.9710
5	60	80	5	-0.9904	-0.9878	-0.9912	-0.9735	-0.9735
6	75	13	4	-0.9933	-0.9973	-0.9968	-0.9945	-0.9885
7	75	55	2.3	-0.9356	-0.9839	-0.9971	-0.9936	-0.9850
8	75	55	4	-0.9903	-0.9967	-0.9980	-0.9970	-0.9861
9	75	55	4	-0.9948	-0.9952	-0.9974	-0.9872	-0.9774
10	75	55	4	-0.9953	-0.9980	-0.9983	-0.9923	-0.9768
11	75	55	5.7	-0.9864	-0.9954	-0.9970	-0.9949	-0.9784
12	75	97	4	-0.9746	-0.9679	-0.9679	-0.9679	-0.9679
13	90	30	3	-0.9948	-0.9979	-0.9962	-0.9949	-0.9886
14	90	30	5	-0.9941	-0.9971	-0.9981	-0.9963	-0.9849
15	90	80	3	-0.9194	-0.9802	-0.9963	-0.9885	-0.9691
16	90	80	5	-0.9142	-0.9732	-0.9845	-0.9938	-0.9613
17	100	55	4	-0.9410	-0.9743	-0.9855	-0.9892	-0.9871
	Average			-0.9752	-0.9897	-0.9927	-0.9890	-0.9772

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 5

Test no.	Experiment conditions			Correlation coefficient in each interval of wood moisture content (5 th interval)				
	T (°C)	ϕ (%)	v (m/s)	3% (20% - 17%)	5% (20% - 15%)	10% (20% - 10%)	15% (20% - 5%)	20% (20% - 0%)
1	50	55	4	-0.9875	-0.9857	-0.9672	-0.9648	-
2	60	30	3	-0.9960	-0.9982	-0.9927	-0.9820	-
3	60	30	5	-0.9889	-0.9907	-0.9884	-0.9848	-
4	60	80	3	-0.96820	-0.9665	-0.9665	-0.9665	-
5	60	80	5	-0.9835	-0.9775	-0.9775	-0.9775	-
6	75	13	4	-0.9953	-0.9981	-0.9945	-0.9888	-
7	75	55	2.3	-0.9899	-0.9959	-0.9874	-0.9812	-
8	75	55	4	-0.9946	-0.9958	-0.9890	-0.9459	-
9	75	55	4	-0.9872	-0.9938	-0.9927	-0.9896	-
10	75	55	4	-0.9946	-0.9960	-0.9873	-0.9796	-
11	75	55	5.7	-0.9901	-0.9870	-0.9840	-0.9687	-
12	75	97	4	-	-	-	-	-
13	90	30	3	-0.9946	-0.9970	-0.9922	-0.9563	-
14	90	30	5	-0.9720	-0.9854	-0.9879	-0.9733	-
15	90	80	3	-0.9370	-0.9796	-0.9659	-0.9659	-
16	90	80	5	-0.9376	-0.9566	-0.9625	-0.9625	-
17	100	55	4	-0.9450	-0.9815	-0.9923	-0.9813	-
	Average			-0.9789	-0.9866	-0.9830	-0.9730	-

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 6

Test no.	Experiment conditions			Correlation coefficient in each interval of wood moisture content (6 th interval)				
	T (°C)	ϕ (%)	v (m/s)	3% (15% - 12%)	5% (15% - 10%)	10% (15% - 5%)	15% (15% - 0%)	20% -
1	50	55	4	-0.9702	-0.9710	-0.9708	-	-
2	60	30	3	-0.9908	-0.9972	-0.9885	-	-
3	60	30	5	-0.9727	-0.9882	-0.9921	-	-
4	60	80	3	-	-	-	-	-
5	60	80	5	-	-	-	-	-
6	75	13	4	-0.9896	-0.9957	-0.9910	-	-
7	75	55	2.3	-0.9518	-0.9766	-0.9820	-	-
8	75	55	4	-0.9814	-0.9928	-0.9585	-	-
9	75	55	4	-0.9825	-0.9776	-0.9846	-	-
10	75	55	4	-0.9888	-0.9849	-0.9788	-	-
11	75	55	5.7	-0.9618	-0.9767	-0.9764	-	-
12	75	97	4	-	-	-	-	-
13	90	30	3	-0.9910	-0.9961	-0.9649	-	-
14	90	30	5	-0.9931	-0.9960	-0.9837	-	-
15	90	80	3	-0.9732	-0.9638	-0.9638	-	-
16	90	80	5	-0.9153	-0.9528	-0.9528	-	-
17	100	55	4	-0.9613	-0.9866	-0.9822	-	-
	Average			-0.9731	-0.9826	-0.9764	-	-

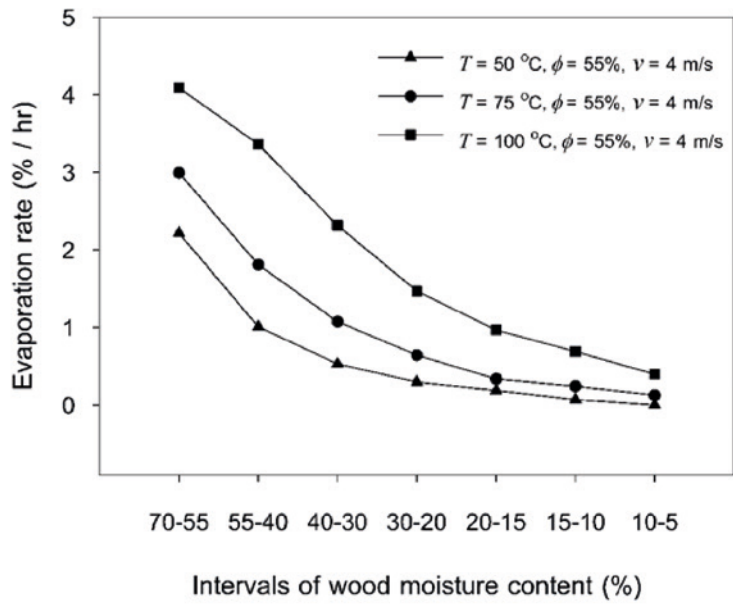
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของช่วงความชื้นไม้ช่วงที่ 7

Test no.	Experiment conditions			Correlation coefficient in each interval of wood moisture content (7 th interval)				
	T (°C)	ϕ (%)	v (m/s)	3% (10% - 7%)	5% (10% - 5%)	10%	15%	20%
1	50	55	4	-0.8806	-0.8806	-	-	-
2	60	30	3	-0.9906	-0.9906	-	-	-
3	60	30	5	-0.9780	-0.9780	-	-	-
4	60	80	3	-	-	-	-	-
5	60	80	5	-	-	-	-	-
6	75	13	4	-0.9940	-0.9974	-	-	-
7	75	55	2.3	-0.8753	-0.8753	-	-	-
8	75	55	4	-0.9728	-0.9728	-	-	-
9	75	55	4	-0.9326	-0.9326	-	-	-
10	75	55	4	-0.7907	-0.7907	-	-	-
11	75	55	5.7	-0.9641	-0.9641	-	-	-
12	75	97	4	-	-	-	-	-
13	90	30	3	-0.9866	-0.9831	-	-	-
14	90	30	5	-0.9900	-0.9891	-	-	-
15	90	80	3	-	-	-	-	-
16	90	80	5	-	-	-	-	-
17	100	55	4	-0.9518	-0.9518	-	-	-
	Average			-0.9423	-0.9422	-	-	-

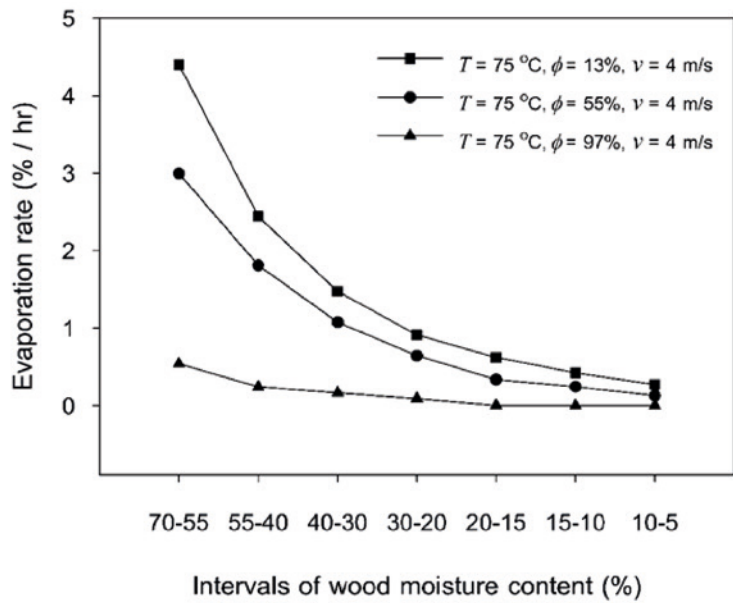
3.3 อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้

โดยปกติในเนื้อไม้จะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความชื้นสูงสู่บริเวณที่มีความชื้นต่ำด้วยแรงหลายชนิด เช่น capillary action แรงนี้ทำให้น้ำนอกผนังเซลล์ (free water) เคลื่อนที่ผ่านช่องเซลล์ (cell cavities) และช่องผนังเซลล์ (pits) ความ

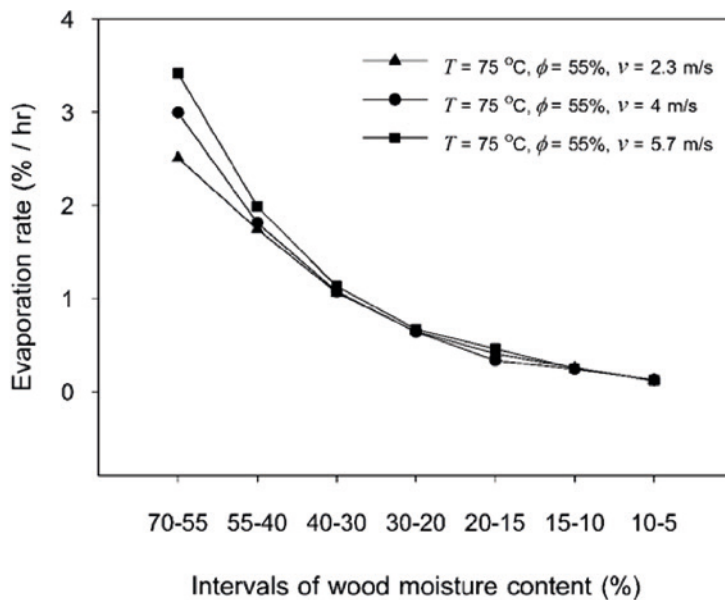
แตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์ภายในเนื้อไม้ทำให้น้ำระเหยผ่านช่องเซลล์ (cell cavities) โดยการแพร่ (diffusion) และความแตกต่างของความชื้นภายในเนื้อไม้ (moisture gradient) ทำให้น้ำในผนังเซลล์ (bound water) เคลื่อนที่ผ่านผนังเซลล์โดยการแพร่ [13]



รูปที่ 9 อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ของการอบแห้งไม้ยางพาราที่อุณหภูมิอากาศ 50°C, 75°C และ 100°C ความชื้นอากาศ 55% และความเร็วอากาศ 4 m/s



รูปที่ 10 อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ของการอบแห้งไม้ยางพาราที่ความชื้นอากาศ 13%, 55% และ 97% อุณหภูมิอากาศ 75°C และความเร็วอากาศ 4 m/s



รูปที่ 11 อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ของการอบแห้งไม้ยางพาราที่ความเร็วอากาศ 2.3 m/s, 4 m/s และ 5.7 m/s อุณหภูมิอากาศ 75°C และความชื้นอากาศ 55%

รูปที่ 9 - 11 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งต่ออัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ พบว่าอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้จะลดลงตามความชื้นไม้ที่ลดลงเนื่องจากไม้ที่มีความชื้นสูงกว่าจุดหมาดน้ำในเนื้อไม้จะเคลื่อนที่ด้วย capillary action และ diffusion ในขณะที่ไม้มีความชื้นต่ำกว่าจุดหมาดน้ำจะเคลื่อนที่ด้วยกระบวนการแพร่เป็นหลัก [10] จากรูปที่ 9 พบว่าอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้สูงขึ้นในทุกช่วงความชื้นไม้เนื่องจากที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะสามารถรับไอน้ำได้มากกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและจะเพิ่มขึ้นในลักษณะก้าวหน้า ซึ่งสังเกตได้จากความแตกต่างของอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ในช่วงอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 50 - 75°C ($\Delta T = 25^\circ\text{C}$) จะมีค่าน้อยกว่าในช่วงอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 75 - 100°C ($\Delta T = 25^\circ\text{C}$)

จากรูปที่ 10 พบว่าหากอบแห้งไม้ด้วยอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้สูงกว่าการอบแห้งไม้ด้วยอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าเนื่องจากที่อุณหภูมิของอากาศเดียวกันอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า

จะมีปริมาณไอน้ำในอากาศน้อยกว่าอากาศที่มีความชื้นสูงกว่า ทำให้สามารถรับไอน้ำจากเนื้อไม้ได้มากกว่า แต่จะเพิ่มขึ้นในลักษณะถดถอย สังเกตได้จากความแตกต่างของอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศเท่ากับ 13 - 55% ($\Delta\phi = 42\%$) จะมีค่ามากกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศเท่ากับ 55 - 97% ($\Delta\phi = 42\%$)

จากรูปที่ 11 พบว่าอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ที่อบแห้งด้วยอากาศที่มีความเร็วสูงจะมีค่าสูงกว่าอากาศที่มีความเร็วต่ำเนื่องจากน้ำในเนื้อไม้จะระเหยสู่อากาศด้วยความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างอากาศใกล้ผิวไม้กับอากาศโดยรอบขณะนั้น ขณะที่ไอน้ำระเหยจากผิวไม้จะส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณนั้นมีค่าสูงขึ้น และจะถูกแทนที่ด้วยอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของอากาศอย่างไรก็ตามความเร็วอากาศจะส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ในช่วงความชื้นไม้เท่ากับ 55 - 70% เท่านั้น หลังจากนั้นอิทธิพลของความเร็วอากาศจะส่งผลน้อยลง แต่จะมีผลจากอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นหลัก

จากตารางที่ 9 พบว่าอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ของการทดลองที่ 14 ($T = 90^{\circ}\text{C}$, $\phi = 30\%$, $v = 5 \text{ m/s}$) มีค่าสูงสุดในขณะที่การทดลองที่ 12 ($T = 75^{\circ}\text{C}$, $\phi = 97\%$, $v = 4 \text{ m/s}$) จะมีค่าต่ำสุดในทุกช่วงความชื้นไม้เนื่องจาก

อุณหภูมิที่สูง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต่ำจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่สูงเป็นเหตุให้อัตราการระเหยของน้ำสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดลองอบแห้งไม้ยางพาราที่เงื่อนไขการอบต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Test no.	Experiment conditions			Evaporation rate in each interval of wood moisture content (% / hr)						
	T ($^{\circ}\text{C}$)	ϕ (%)	v (m/s)	70% - 55%	55% - 40%	40% - 30%	30% - 20%	20% - 15%	15% - 10%	10% - 5%
1	50	55	4	2.218	1.010	0.529	0.294	0.186	0.070	0.000
2	60	30	3	2.825	1.438	0.793	0.511	0.345	0.215	0.119
3	60	30	5	3.834	1.589	0.923	0.517	0.310	0.186	0.124
4	60	80	3	0.874	0.638	0.376	0.180	0.069	0.000	0.000
5	60	80	5	1.199	0.768	0.357	0.181	0.072	0.000	0.000
6	75	13	4	4.402	2.441	1.473	0.911	0.619	0.422	0.272
7	75	55	2.3	2.509	1.745	1.065	0.646	0.409	0.255	0.118
8	75	55	4	3.051	1.935	1.183	0.655	0.504	0.287	0.094
9	75	55	4	2.995	1.811	1.076	0.643	0.335	0.241	0.127
10	75	55	4	3.007	1.786	1.107	0.627	0.384	0.218	0.058
11	75	55	5.7	3.418	1.986	1.133	0.671	0.459	0.250	0.122
12	75	97	4	0.538	0.242	0.163	0.088	0.000	0.000	0.000
13	90	30	3	5.596	3.169	2.057	1.229	0.908	0.566	0.213
14	90	30	5	6.415	3.570	2.202	1.280	0.951	0.539	0.282
15	90	80	3	1.469	0.996	0.710	0.455	0.290	0.117	0.000
16	90	80	5	1.848	1.541	0.976	0.521	0.503	0.177	0.000
17	100	55	4	4.090	3.362	2.317	1.468	0.967	0.690	0.397

3.4 พื้นผิวตอบสนอง และการวิเคราะห์ทางสถิติ

Response surface โมเดลที่สร้างจากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 9 สมการที่ (1) ถูกปรับปรุงให้พิตกับข้อมูลการทดลองได้ดีขึ้นโดยการกำจัดบางเทอมที่ให้ผลตอบสนองต่อโมเดลน้อยออกไป ใน Excel Essential Regression ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (1) สามารถเลือกที่จะเพิ่มหรือลดเทอมต่างๆ ในสมการได้เพื่อสร้างสมการ

Quadratic โดยใช้วิธี Multiple linear regression ที่ทำให้ทุกเทอมในสมการมีค่านัยสำคัญไม่เกินค่านัยสำคัญวิกฤต (critical significance) โดยการใช้เครื่องมือในการทำ regression จะได้ว่าสมการโพลีโนเมียลลำดับสามที่มีการแปลงรูปแบบของตัวแปรตอบสนอง (เช่นจาก ER ไปเป็น $\ln(ER)$) สามารถพิตข้อมูลการทดลองได้ดีกว่าสมการโพลีโนเมียลลำดับสองที่ไม่ได้มีการแปลงรูปแบบของตัวแปรตอบสนอง [9] โมเดลของตัวแปร

ตอบสนองทั้งเจ็ดที่ได้แสดงดังสมการที่ (7)-(13) ค่าสัมประสิทธิ์ (β) ในสมการดังกล่าว ค่า coefficient of multiple determination (R^2) และค่า adjusted coefficient of multiple determination ($R^2_{adjusted}$) แสดงไว้ในตารางที่ 10

Response Model 1 ($70\% \leq MC \leq 55\%$)

$$\ln(ER) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 \phi + \beta_3 v + \beta_4 \phi^2 \quad (7)$$

Response Model 2 ($55\% < MC \leq 40\%$)

$$\sqrt{ER} = \beta_0 + \beta_1 \phi + \beta_2 T^2 + \beta_3 T \phi + \beta_4 T v + \beta_5 \phi^2 \quad (8)$$

Response Model 3 ($40\% < MC \leq 30\%$)

$$\sqrt{ER} = \beta_0 + \beta_1 \phi + \beta_2 T^2 + \beta_3 T \phi + \beta_4 T v + \beta_5 \phi^2 \quad (9)$$

Response Model 4 ($30\% < MC \leq 20\%$)

$$\sqrt{ER} = \beta_0 + \beta_1 \phi + \beta_2 T^2 + \beta_3 T \phi + \beta_4 \phi^2 \quad (10)$$

Response Model 5 ($20\% < MC \leq 15\%$)

$$ER = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 \phi + \beta_3 v + \beta_4 T^2 + \beta_5 T \phi + \beta_6 T v + \beta_7 \phi^2 + \beta_8 \phi v \quad (11)$$

Response Model 6 ($15\% < MC \leq 10\%$)

$$\sqrt{ER} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T \phi + \beta_3 \phi^2 \quad (12)$$

Response Model 7 ($10\% < MC \leq 5\%$)

$$\sqrt{ER} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T \phi \quad (13)$$

ตารางที่ 10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ใช้ในโมเดลพื้นผิวตอบสนอง

Coefficients	Coefficient value of response model in each interval of wood moisture content						
	70% - 55% (Eq.7)	55% - 40% (Eq.8)	40% - 30% (Eq.9)	30% - 20% (Eq.10)	20% - 15% (Eq.11)	15% - 10% (Eq.12)	10% - 5% (Eq.13)
β_0	-0.2745269	0.3370876	0.2232715	0.2521852	0.9864634	-0.0055989	-0.2350971
β_1	0.0155908	0.0237173	0.0169424	0.0106606	-0.0213298	0.0078215	0.0121266
β_2	0.0163249	0.0001589	0.0001414	0.0001114	0.0088802	0.0000632	-0.0001002
β_3	0.1097312	-0.0002013	-0.0001410	-0.0000834	-0.2149684	-0.0001154	-
β_4	-0.0003736	0.0006620	0.0003231	-0.0001076	0.0002493	-	-
β_5	-	-0.0001853	-0.0001402	-	-0.0001841	-	-
β_6	-	-	-	-	0.0023998	-	-
β_7	-	-	-	-	-0.0000629	-	-
β_8	-	-	-	-	0.0010420	-	-
β_9	-	-	-	-	-	-	-
R^2	0.993	0.989	0.990	0.991	0.986	0.979	0.817
$R^2_{adjusted}$	0.991	0.984	0.986	0.988	0.972	0.974	0.790
Standard error	0.06331	0.04733	0.03718	0.02747	0.04930	0.04067	0.100

คุณภาพของโมเดลที่สร้างขึ้นสามารถตรวจสอบได้จากค่า coefficient of multiple determination (R^2) และ adjusted coefficient of multiple determination (R^2_{adjusted}) ซึ่งหากค่า R^2 ของโมเดลมีค่าเข้าใกล้ 1 บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับการทำนายจากโมเดลอยู่ในระดับสูงมาก [9] และจากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ของช่วงความชื้นไม้ 70% – 55%, 55% – 40%, 40% – 30%, 30% – 20%, 20% – 15% และ 15% – 10% สามารถทำนายด้วยโมเดลได้แม่นยำมากกว่า 97% ($R^2 > 0.97$) ในขณะที่ช่วงความชื้นไม้ 10% – 5% สามารถทำนายด้วย

โมเดลได้แม่นยำ 81.7% ($R^2 = 0.817$) และจากการเปรียบเทียบค่า R^2 กับค่า R^2_{adjusted} ของทุกโมเดลพบว่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าโมเดลที่ได้เป็นโมเดลที่ไม่ over fitted และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (analysis of variance) เพื่อการตัดสินใจยอมรับโมเดลดังแสดงในตารางที่ 11 จะให้เห็นว่าทั้ง 7 โมเดลมีค่า F_0 มากกว่าค่า F_{crit} และค่า F Signif ของ regression มีค่าน้อยกว่า 0.05 มากๆ หมายความว่าทั้ง 7 โมเดลมีนัยสำคัญมากที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

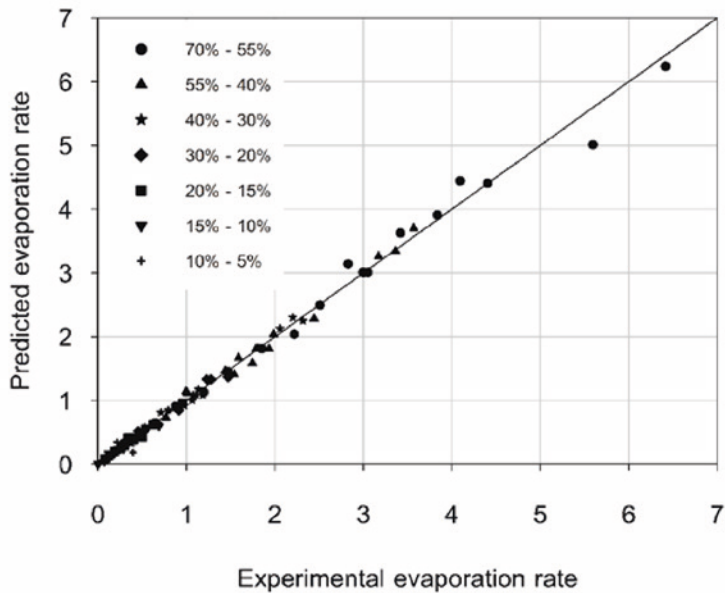
ตารางที่ 11 แสดง ANOVA ของโมเดลพหุคูณคำตอบ

ANOVA						
Model	Source	SS	MS	F_0	F Signif	Df
Response 1, Evaporation rate (70% < MC ≤ 55%)	Regression	6.849	1.712	427.22	7.99981×10^{-13}	4
	Residual	0.04809	0.00401			12
	LOF error	0.04791	0.00479	50.9291	0.01941	10
	Pure error	0.000188	9.40637×10^{-5}			2
	Total	6.897				16
Response 2, Evaporation rate (55% < MC ≤ 40%)	Regression	2.200	0.440	196.47	2.27556×10^{-10}	5
	Residual	0.02464	0.00224			11
	LOF error	0.02293	0.00255	2.9913	0.276	9
	Pure error	0.00170	0.000852			2
	Total	2.225				16
Response 3, Evaporation rate (40% < MC ≤ 30%)	Regression	1.522	0.304	220.20	1.22513×10^{-10}	5
	Residual	0.01521	0.00138			11
	LOF error	0.01387	0.00154	2.3085	0.339	9
	Pure error	0.00134	0.000668			2
	Total	1.538				16
Response 4, Evaporation rate (30% < MC ≤ 20%)	Regression	1.003	0.251	332.43	3.5551×10^{-12}	4
	Residual	0.00905	0.000755			12
	LOF error	0.00725	0.00181	8.0305	0.00664	4
	Pure error	0.00181	0.000226			8
	Total	1.012				16
Response 5, Evaporation rate (20% < MC ≤ 15%)	Regression	1.373	0.172	70.61	1.28678×10^{-6}	8
	Residual	0.01944	0.00243			8
	LOF error	0.00435	0.000726	0.0962	0.989	6
	Pure error	0.01509	0.00755			2
	Total	1.392				16

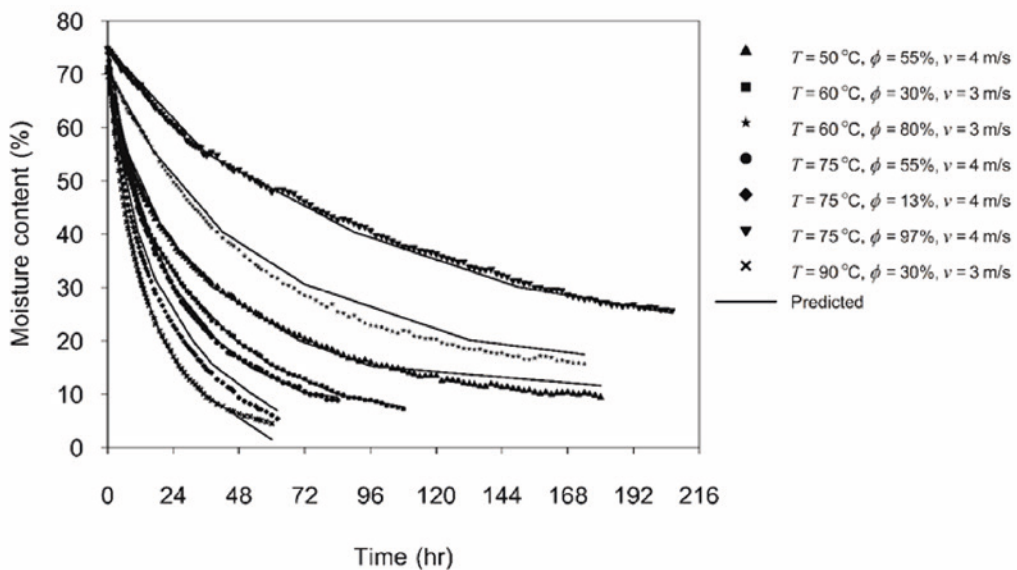
ตารางที่ 11 แสดง ANOVA ของโมเดลพื้นผิวตอบสนอง (ต่อ)

ANOVA						
Model	Source	SS	MS	F ₀	F Signif	Df
Response 6, Evaporation rate (15% < MC ≤ 10%)	Regression	1.001	0.334	201.72	3.77731x10 ⁻¹¹	3
	Residual	0.02150	0.00165			13
	LOF error	0.01525	0.00305	3.9011	0.04346	5
	Pure error	0.00625	0.000782			8
	Total	1.023				16
Response 7, Evaporation rate (10% < MC ≤ 5%)	Regression	0.627	0.313	31.18	6.96415x10 ⁻⁶	2
	Residual	0.141	0.01005			14
	LOF error	0.129	0.02148	14.5871	0.000643	6
	Pure error	0.01178	0.00147			8
	Total	0.767				16

$F_{crit,Resp_1} = F_{0.05,4,12} = 3.2592$, $F_{crit,Resp_2} = F_{0.05,5,11} = 3.2039$, $F_{crit,Resp_3} = F_{0.05,5,11} = 3.2039$, $F_{crit,Resp_4} = F_{0.05,4,12} = 3.2592$, $F_{crit,Resp_5} = F_{0.05,8,8} = 3.4381$, $F_{crit,Resp_6} = F_{0.05,3,13} = 3.4105$, $F_{crit,Resp_7} = F_{0.05,2,14} = 3.7389$



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายจากโมเดล



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นไม้ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ทำนายจากโมเดลของการทดลองที่ 1 2 4 6 9 12 และ 13

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ที่ได้จากการทดลองกับการทำนายจากสมการที่ (7) – (13) จากกราฟจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของผลที่ได้จากการทำนายด้วยโมเดลที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองหมายความว่าโมเดลที่สร้างขึ้นสามารถทำนายอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ ได้แม่นยำเพียงพอและเมื่อนำค่าอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ที่คำนวณได้จากสมการที่ (7) – (13) มาใช้ในการคำนวณค่าความชื้นไม้ที่เวลาถัดไป (MC_{i+1}) จากสมการที่ (4) และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 13 จากกราฟจะเห็นได้ว่าลักษณะการลดลงของความชื้นไม้ที่ได้จากการคำนวณจากสมการมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ยกเว้นในบางสภาวะการอบแห้งที่สมการทำนายได้ต่างจากผลการทดลองเล็กน้อย

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งไม้ยางพารา รวมถึงการหาสมการอัตราการระเหย

ของน้ำในเนื้อไม้ยางพาราโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองพบว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง ในขณะที่ความเร็วอากาศไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจนและสมการอัตราการระเหยของน้ำในเนื้อไม้ยางพาราที่ได้ทั้ง 7 สมการตามช่วงความชื้นของไม้ คือ 70% – 55%, 55% – 40%, 40% – 30%, 30% – 20%, 20% – 15% และ 15% – 10% สามารถทำนายได้แม่นยำมากกว่า 97% ($R^2 > 0.97$) ยกเว้นที่ 10% – 5% สามารถทำนายได้แม่นยำ 81.7% ($R^2 = 0.817$) ซึ่งสมการที่ได้สามารถใช้ในการทำนายในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วอากาศเท่ากับ 50 - 100°C, 13 - 97% และ 2.3 - 5.7 m/s ตามลำดับนอกจากนี้ปริมาณของไม้ยางพาราที่ใช้ในการอบแห้งควรอยู่ในช่วง 25 – 35 kg

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ชุดทดลองอบแห้งไม้ยางพาราสำหรับการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

1. The Customs Department, 2016, Trade Statistics [Online], Available : http://www.customs.go.th/statistic_report.php?ini_content=statistics_report. [12 December 2017]
2. Theppaya, T., 1999, Identification of Good Practice in Sawn Rubber Wood-Drying Process Report, Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla. (In Thai)
3. Kingkaew, C., 2005, Development of Production Processes Management System for Dried Parawood, Master of Engineering Thesis, Department of Industrial Engineering, Prince of Songkla University. (In Thai)
4. Boonseng, K., 2006, A Study on the Influence of Rubberwood Drying Parameters, Master of Engineering Thesis, Department of Industrial Engineering, Prince of Songkla University. (In Thai)
5. Yamsaengsung, R. and Sattho, T., 2008, "Superheat Steam Vacuum Drying of Rubberwood," *Drying Technology*, 26 (6), pp. 798-805.
6. Elustondo, D.M. and Oliveira, L., 2009, "Model to Assess Energy Consumption in Industrial Lumber Kilns," *Maderas: Ciencia y tecnologia*, 11 (1), pp. 33-46.
7. Theppaya, T. and Prasertsan, S., 2002, "Parameters Influencing Drying Behavior of Rubber Wood (*Hevea Brasilliensis*) as Determined from Desorption Experiment," *Drying Technology*, 20 (2), pp. 507-525.
8. Ratanawilai, T., Boonseng, K. and Chuchom, S., 2012, "Drying Time Reduction of Rubberwood," *KKU Research Journal*, 17 (4), pp. 505-514. (In Thai)
9. Theppaya, T. and Prasertsan, S., 2004, "Optimization of Rubber Wood Drying by Response Surface Method and Multiple Contour Plots," *Drying Technology*, 22 (7), pp. 1637-1660.
10. Srivaro, S., Wongprot, T., Matan, N. and Kyokong, B., 2008, "Accelerated Conventional Temperature Drying of 30mm Thick Rubberwood Lumber," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 30 (4), pp. 475-483.
11. Kaewploy, S. and Boonseng, K., 2014, "Design of Experiment for Evaluating The Optimal Condition in Drying Process of Rubberwood," *KKU Research Journal*, 19 (2), pp. 284-292. (In Thai)
12. Kollman, F.F.P. and Cote, W.A. 1968, Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood, Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 420-474.
13. Simpson, W.T., 1991, Properties of Wood Related to Drying, In Dry Kiln Operation's Manual, United States Department of Agriculture. Madison, Wisconsin, pp. 1-41.