

สถานะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

ชาติรี หอมเขียว^{1,2*} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2} และ วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2}

บทคัดย่อ

การออกแบบการทดลองแบบ Central composite design และวิธีพื้นผิวตอบสนองถูกประยุกต์เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูป และเพื่อหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน การขึ้นรูปขึ้นงานตัวอย่างกระทำโดยใช้เครื่องอัดร้อน จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิมีผลกระทบต่อความมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำ และการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิส่งผลให้การดูดซับน้ำลดลงอย่างชัดเจน แต่ความแข็งแรงดึงและดัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิสูงมากๆ พบว่าความแข็งแรงดึงและดัดมีค่าลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้สมการถดถอยของความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำสามารถหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของแผ่นใยไม้อัดหนา 6 มิลลิเมตร ได้ดังนี้ การขึ้นรูปโดยใช้ระยะเวลาการอัดร้อน 25 นาที และอุณหภูมิ 207 °C เช่นเดียวกันพบว่าแผ่นใยไม้อัดที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนี้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนาย

คำสำคัญ : แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน, ผนังยางพารา, การออกแบบการทดลอง, พื้นผิวตอบสนอง, การอัดร้อน

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: chatree.h@rmutsv.ac.th รับเมื่อ 11 พฤษภาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 13 กรกฎาคม 2558

Optimizing Condition for Manufacturing the Binderless Particleboard by Response Surface Methodology

Chatree Homkhiew^{1,2*} Surasit Rawangwong^{1,2} and Worapong Boonchouytan^{1,2}

Abstract

Central composite design and response surface methodology were applied to study effect of conditions in forming and to optimize a condition for manufacturing the binderless particleboard. The sample panels were produced using a hot pressing machine. From the experiment, it was found that pressing time and temperature significantly affected the internal bond strength, modulus of rupture and water absorption. With increasing the pressing time and temperature clearly decreased the water absorption but increased the internal bond strength, modulus of rupture. However, at very high pressing time and temperature it was also found that the internal bond strength and modulus of rupture gradually reduced. In addition, regression models fitted of the internal bond strength, modulus of rupture and water absorption were used to optimize the condition for manufacturing the binderless particleboard with thickness 6 mm. The optimal condition found was the pressing time 25 minutes and temperature 207 °C. Likewise, the binderless particleboard made with this condition had good mechanical and physical properties that closely matched the model predictions.

Keywords : Binderless particleboard, Rubberwood flour, Experimental design, Response surface, Hot press

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya.

² Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya.

* Corresponding author, E-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th Received 11 May 2015, Accepted 13 July 2015

1. บทนำ

แผ่นใยไม้อัด (Fiberboard) เป็นวัสดุที่ถูกผลิตขึ้นมาทดแทนไม้ธรรมชาติ เนื่องจากไม้มีปริมาณลดน้อยลงและมีราคาสูงขึ้น โดยเฉพาะแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiberboard; MDF) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความแข็งแรงและมีราคาที่ไม่สูงจนเกินไป อย่างไรก็ตามแผ่นใยไม้อัดที่จำหน่ายในท้องตลาดจะใช้กาวเป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของผงไม้หรือเส้นใย ซึ่งกาวเหล่านี้จะมีส่วนผสมของสารฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของคน [1] ดังนั้นแนวโน้มของการวิจัย การผลิต และการตลาดในอนาคตจะเป็นการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ปราศจากสารฟอร์มัลดีไฮด์ [2] หรือปลอดสารพิษ ยกตัวอย่าง แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน (Binderless Particleboard; BP) ซึ่งเป็นวัสดุที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ 100% โดยปราศจากตัวประสานต่างๆ ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าเป็นวัสดุที่ปลอดภัยเหมือนไม้ธรรมชาติ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันองค์ความรู้เกี่ยวกับแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานนี้ยังมีอยู่เพียงเล็กน้อย โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปของเส้นใยธรรมชาติสายพันธุ์ต่างๆ

Lamaming และคณะ [3] ศึกษาสมบัติทางกลของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ปาล์มน้ำมันต้นอ่อนและปาล์มน้ำมันต้นแก่ คณะผู้วิจัยพบว่าแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากปาล์มน้ำมันต้นอ่อนมีสมบัติทางกลดีกว่าที่ผลิตจากปาล์มน้ำมันต้นแก่ Boon และคณะ [4] ประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์การขึ้นรูปต่อสมบัติทางกลของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ผลิตจากขี้เลื่อยของลำต้นปาล์มน้ำมัน และพบว่าการ

เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอัดรีดระยะเวลาการอัดรีดและแรงดันการอัดส่งผลให้ความแข็งแรงดัด และความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้ามีค่าเพิ่มขึ้น Nonaka และคณะ [5] ศึกษาสมบัติทางกลของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ผลิตจากขานอ้อยภายใต้อุณหภูมิการอัดที่สูง คณะผู้วิจัยพบว่า สมบัติทางกลของแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากขานอ้อยสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิการอัดรีด และแผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากขานอ้อยมีสมรรถนะดีกว่าที่ผลิตจากเศษไม้ Hidayata และคณะ [6] ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เมล็ดสับดูดำหลังการบีบน้ำมันมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน และพบว่าสมบัติของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานนี้สามารถเทียบเท่าได้กับแผ่นใยไม้อัดที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไม่พบการศึกษาความสามารถและผลกระทบของสภาวะในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่ใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าไม้แต่ละสายพันธุ์มีความสามารถและมีสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมแตกต่างกัน เนื่องจากไม้แต่ละสายพันธุ์มีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างภายในที่แตกต่างกัน [7] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม เมื่อต้องการนำขี้เลื่อยไม้ยางพาราไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน

ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในกระบวนการต่างๆ หลังการตัดต้นยางพารา ซึ่งเมื่อต้นยางพาราให้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่าต่อการปลูกหรือมีอายุประมาณ 25 ปี ต้นยางพาราซึ่งเป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยจะถูกตัด [8] และจากการตัดจะเกิดของเสียในรูปของขี้เลื่อย ฝงไม้

และเศษ ไม้ประมาณ 34% [9-11] ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงมาก ดังนั้นขี้เลื่อยไม้ยางพาราจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานในประเทศไทย

นอกจากนี้ในปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานยังไม่พบการนำการออกแบบการทดลองทางสถิติมาประยุกต์ใช้ ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้มีประโยชน์คือ ช่วยให้การดำเนินงานวิจัยมีระเบียบแบบแผนมากขึ้น และช่วยลดจำนวนของการทดลองแต่เพิ่มข้อมูลทางเทคนิคและทางวิทยาศาสตร์ในผลกระทบต่างๆ ของปัจจัยการทดลอง [12] ตลอดจนช่วยหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองและรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการเปิดเผยการประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบ Central composite design เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะในการขึ้นรูป เช่น ระยะเวลาการอัดร้อน และอุณหภูมิต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน เช่นเดียวกันเป้าหมายสูงสุดของงานวิจัยนี้คือ เพื่อหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานบนสมบัติความแข็งแรง ดึงตั้งจากกับผิวหน้า ความแข็งแรงคัด และการดูดซับน้ำ ซึ่งข้อมูลใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อนักวิจัย นักพัฒนา และผู้ผลิตแผ่นใยไม้อัดที่สนใจจะศึกษาการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

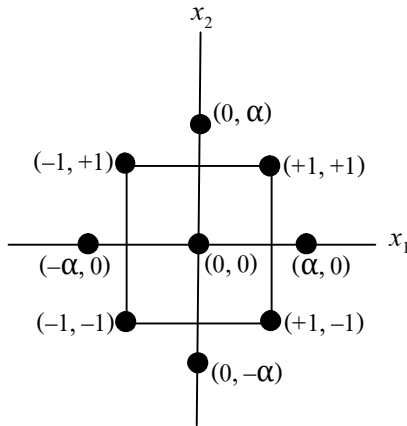
2.1 วัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้ผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานคือ ขี้เลื่อยจากต้นยางพาราที่มีองค์ประกอบทางเคมี คือ

เซลลูโลส 39 % เฮมิเซลลูโลส 29 % ลิกนิน 28 % และเถ้า 4 % [11] ซึ่งได้รับมาจากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา (ประเทศไทย) ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นใยไม้อัด ขี้เลื่อยเหล่านี้ถูกนำไปร่อนให้ผ่านตะแกรงขนาด 70 เมช (<210 ไมโครเมตร) จากนั้นนำผงไม้ยางพาราเหล่านี้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เพื่อลดความชื้นในผงไม้ให้เหลือประมาณ 5-8 %

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ซึ่งเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลาง (Center) ของการออกแบบเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 1 และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$) นอกจากนี้การออกแบบการทดลองแบบ CCD การวิเคราะห์ผลทางสถิติ และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ถูกกระทำโดยใช้โปรแกรม Design-Expert software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วยระยะเวลาการอัด (x_1) และอุณหภูมิ (x_2) ตลอดจนระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองถูกแสดงในตารางที่ 1 ขอบเขตของระดับปัจจัยการทดลองนี้ได้มาจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต [3] และจากการทดลองเบื้องต้น ซึ่งพบว่าช่วงของระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองนี้สามารถขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการออกแบบการทดลองได้สภาวะที่ใช้ในการทดลอง 9 สภาวะ ที่มีความแตกต่างกัน และอีก 4 สภาวะเป็นสภาวะที่ทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง ดังนั้นสภาวะที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 13 สภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 Central composite design แบบ 2 ปัจจัย [13]

2.3 การขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน

นำผงไม้ยางพาราปริมาณ 300 กรัม ที่ผ่านการอบ ดังรูป 2(ก) ซึ่งปราศจากตัวประสานต่าง ๆ เทใส่ใน กรอบไม้ (Frame) และแม่พิมพ์ขนาดกว้าง 200 มม. × ยาว 250 มม. ×หนา 6 มม. ดังรูป 2(ข) ต่อจากนั้นอัดขึ้น รูปโดยใช้เครื่องอัดร้อนดังรูป 2(ค) ด้วยระยะเวลาการ อัด และอุณหภูมิตามสภาวะการออกแบบการทดลองดัง แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งอัดด้วยแรงดันคงที่ 1,750 psi เพื่อให้ได้แผ่นขึ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 1.0 g/cm³ ดังรูป 2(ง) ในแต่ละสภาวะการทดลองขึ้นรูป แผ่นขึ้นงานแบบสุ่มสมบูรณ์ 5 แผ่นตัวอย่าง จากนั้นนำ ขึ้นงานตัวอย่างไปตัดเป็นขึ้นงานทดสอบ เพื่อทดสอบ แรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด และการดูด ชั้บน้ำ

2.4 การทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

แรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond Strength; IBS) เป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standard (JIS) A 5905 ซึ่งขึ้นงานทดสอบมีขนาด 40 มม. × 40 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ ดึงคือ 2 มม.ต่อนาที และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 °C

ตารางที่ 1 ช่วงของตัวแปรอิสระและระดับที่สอดคล้องกัน

Factors	Coded-variables levels				
	-1.41	-1	0	+1	+1.41
	(-α)				(+α)
x_1 ; Pressing time (Min.)	6	10	20	30	34
x_2 ; Temperature (°C)	186	190	200	210	214

2.5 การทดสอบความแข็งแรงดัด

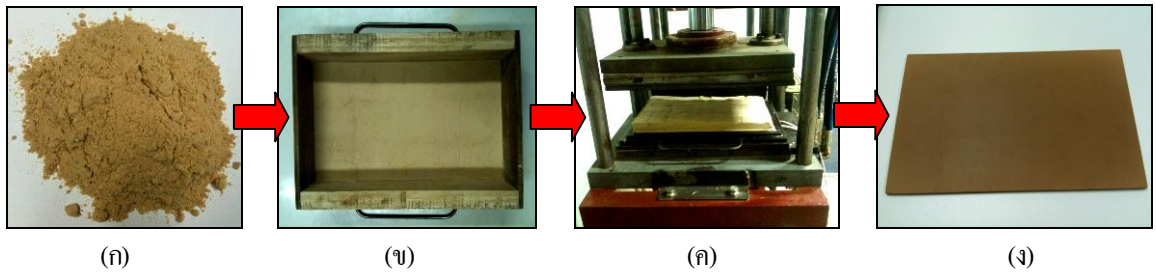
การทดสอบความแข็งแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) เป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด (Three-point flexure test) และปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS A 5905 ซึ่งขึ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มม. × ยาว 200 มม. ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับขึ้นงาน (Span) มีระยะ 150 มม. ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดัดคือ 10 มม.ต่อ นาที และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 °C

2.6 การทดสอบการดูดชั้บน้ำ

การทดสอบการดูดชั้บน้ำ (Water Absorption; WA) เป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS A 5905 ซึ่งขึ้นงาน ทดสอบมีขนาด 30 มม. × 30 มม. ก่อนการทดสอบ ขึ้นงานตัวอย่างถูกลอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา

24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นในชิ้นงาน จากนั้น ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบทันทีด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม จากนั้นชิ้นงานทดสอบถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง 25 °C หลังจากครบเวลา 24 ชั่วโมง

ชิ้นงานถูกหีบขึ้นจากน้ำ ถูกซับน้ำด้วยกระดาษทิชชู และถูกชั่งน้ำหนักทันที เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก

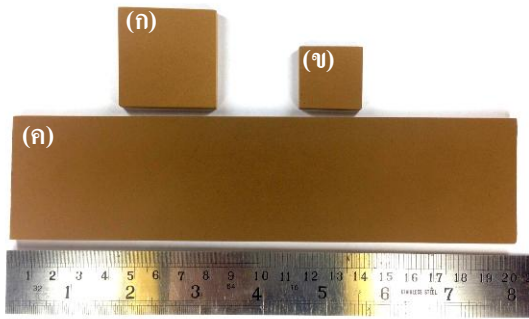


รูปที่ 2 กรรมวิธีการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานจากผงไม้อย่างพารา

ตารางที่ 2 ระดับตัวแปรที่เป็นค่าจริงและรหัสจากการออกแบบการทดลองแบบ CCD และข้อมูลจากการทดลอง

Run No.	Uncoded variables		Coded variables		IBS (MPa)		MOR (MPa)		WA (%)	
	Pres. tim.	Tem.	x_1	x_2	Actual	Predicted	Actual	Predicted	Actual	Predicted
1	30	190	1	-1	0.89	0.91	15.4	15.0	61.2	56.7
2	20	200	0	0	1.30	1.30	17.9	17.2	49.7	54.0
3	20	214	0	1.41	1.22	1.28	15.2	14.3	41.0	41.0
4	10	210	-1	1	1.14	1.09	13.4	13.9	49.3	51.4
5	20	200	0	0	1.38	1.30	16.8	17.2	53.7	54.1
6	34	200	1.41	0	1.18	1.19	15.2	15.0	44.3	44.8
7	30	210	1	1	1.42	1.37	13.3	14.1	41.2	38.3
8	20	200	0	0	1.25	1.30	17.5	17.2	54.2	54.1
9	6	200	-1.41	0	0.96	0.98	11.1	11.3	69.4	63.4
10	20	200	0	0	1.30	1.30	17.3	17.2	53.6	54.1
11	20	200	0	0	1.27	1.30	16.7	17.2	50.9	54.1
12	10	190	-1	-1	0.87	0.89	10.7	9.8	70.2	69.9
13	20	186	0	-1.41	0.85	0.81	11.4	12.2	64.3	67.1

หมายเหตุ: CCD คือ Central composite design, Pres. tim. คือ Pressing time, Tem. คือ Temperature, IBS คือ Internal bond strength, MOR คือ Modulus of rupture, WA คือ Water absorption



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบ (ก) แรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (ข) การดูดซับน้ำ และ (ค) ความแข็งแรงดัด

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การออกแบบการทดลองแบบ CCD มีตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย ระยะเวลาการอัด และอุณหภูมิ ซึ่งสามารถออกแบบสภาวะการขึ้นรูปที่ใช้ในการทดลองได้ 13 สภาวะ เช่นเดียวกันค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองคือ ค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ค่าความแข็งแรงดัด และค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม

ผลการทดลองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสมบัติได้ ซึ่งในการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมนี้จะพิจารณารูปแบบจำลองที่ Sequential model sum of squares มีนัยสำคัญ Adjusted Coefficient of Determination (Adj-R²) และ Predicted Coefficient of Determination (Pred-R²) มีค่าสูง ตลอดจน Lack of fit ไม่มีนัยสำคัญ จากการ

วิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และความแข็งแรงดัดมีความเหมาะสมกับรูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้ง (Quadratic model) แต่สมบัติการดูดซับน้ำมีความเหมาะสมกับรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง (Linear model) เพราะจากการเปรียบเทียบผลทางสถิติพบว่า รูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า Adj-R² และค่า Pred-R² สูงกว่ารูปแบบจำลองอื่นๆ ที่เปรียบเทียบกับในแต่ละสมบัติ เช่นเดียวกันจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) พบว่ารูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า P-value ของ Lack of fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ (P>0.05) ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมบูรณ์กับข้อมูล [10]

นอกจากนี้ค่า Coefficient of Determination (R²), Adj-R² และ Pred-R² ที่แสดงในตารางที่ 3 ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมเช่นกัน จากข้อมูลเห็นได้ว่าค่า R² ของทั้ง 3 รูปแบบจำลองมีค่าอยู่ในช่วง 90.54% ถึง 95.57% ซึ่งเป็นค่า R² ของสมบัติการดูดซับน้ำ และความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ตามลำดับ นั่นหมายความว่าความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบจำลองการถดถอย 9.46% และ 4.43% ตามลำดับ ซึ่งมีความผันแปรจำนวนน้อยมากที่ไม่สามารถอธิบายได้ เช่นเดียวกันค่า Adj-R² ของแต่ละรูปแบบจำลองมีค่าที่สูงใกล้เคียงกับค่า R² ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม ในส่วนของค่า Pred-R² พบว่าสมบัติการดูดซับน้ำแสดงค่าสูงที่สุด คือ 81.83% นั่นหมายความว่ารูปแบบจำลองที่ได้สามารถประมาณการหรืออธิบายความผันแปรในข้อมูลใหม่ได้ 81.83% นอกจากนี้พบ

ด้วยว่า ค่า Coefficients of Variation (C.V.) ของความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำ คือ 4.74%, 5.13% และ 6.06% ตามลำดับ ซึ่ง

เป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยปกติค่า C.V. ต่ำ หมายถึงการตรวจวัดสมบัติของวัสดุมีความแม่นยำที่ดี และสามารถใช้เป็นข้อมูลในการสร้างรูปแบบจำลองได้ [10, 13]

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสมบัติ

Response	Model	Sequential P-value	Lack of fit P-value	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	C.V.
IBS	Quadratic	0.0004*	0.3407	95.57%	92.42%	80.06%	4.74%
MOR	Quadratic	0.0001*	0.1042	94.82%	91.13%	70.27%	5.13%
WA	Linear	<0.0001*	0.1072	90.54%	88.65%	81.83%	6.06%

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

3.2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง

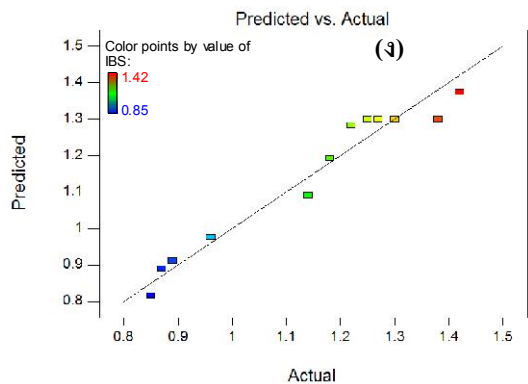
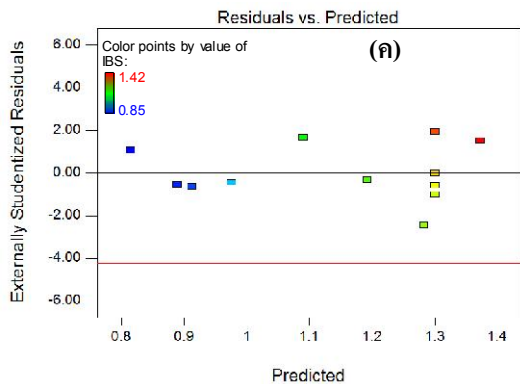
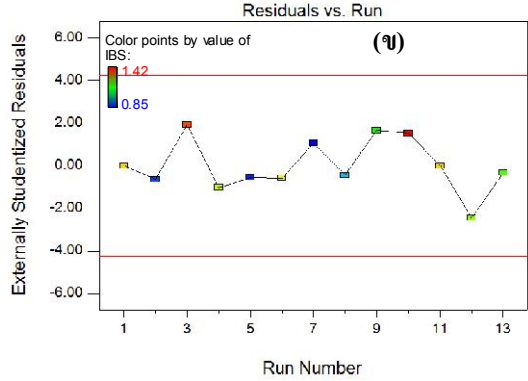
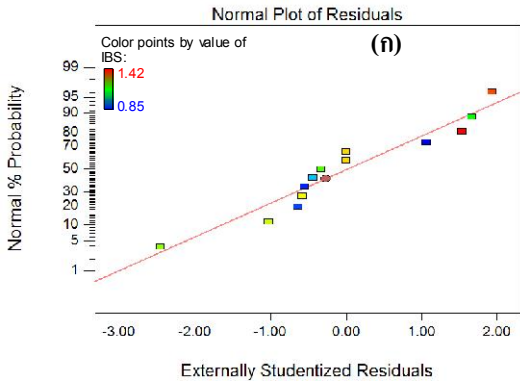
การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับรูปแบบจำลองที่เหมาะสม [14] เพื่อยืนยันความพอเพียงและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลอง รูปที่ 4(ก) แสดงกราฟ Normal probability ของสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และพบว่าไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือแสดงเป็นเส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ [10] รูปที่ 4(ข) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง พบว่าค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้ม หรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ รูปที่ 4(ค) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และพบว่าค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวที่ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน เช่นเดียวกับค่าเศษเหลือมีการกระจายรอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความ

เป็นอิสระ [10] และรูปที่ 4(ง) แสดงกราฟค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทำนายโดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง [10] พบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยเหล่านี้สามารถทำนายค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายในตารางที่ 2 พบว่าสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำมีความแตกต่างกันสูงสุดของข้อมูลในแต่ละสมบัติ 6.15% (Run 5), 5.92% (Run 3) และ 8.64% (Run 9) ตามลำดับ ดังนั้นจากการวิเคราะห์กราฟทั้ง 4 และข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง

นอกจากนี้การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองในสมบัติความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำมีการวิเคราะห์เช่นกัน และพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ ไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้าน

ความเป็นอิสระ ตลอดจนค่าที่ได้จากการทดลองจริงต่อค่าจากการทำนายมีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นเส้นตรง

เช่นกัน เหมือนดังเช่นสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าที่ได้แสดงเป็นตัวอย่าง



รูปที่ 4 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า: (ก) กราฟ Normal probability (ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ง) กราฟค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง

3.3 ผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของรูปแบบจำลองการถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (IBS) มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสมคือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้ง

ซึ่งรูปแบบจำลองนี้มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) และพบด้วยว่าค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวของรูปแบบจำลองนี้มีนัยสำคัญเช่นกัน อย่างไรก็ตามพบว่า อุณหภูมิ (x_2) มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้ามากกว่าระยะเวลาการอัด (x_1) เพราะอุณหภูมิ ($P < 0.0001$) มีนัยสำคัญมากกว่าระยะเวลาการอัด ($P = 0.0055$)

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบจำลองต่างๆ

Source	IBS	MOR	WA
	P-value	P-value	P-value
Model	0.0001*	0.0002*	<0.0001*
x_1	0.0055*	0.0019*	0.0002*
x_2	<0.0001*	0.0270*	<0.0001*
x_1x_2	0.0489*	0.0158*	-
x_1^2	0.0012*	0.0002*	-
x_2^2	0.0005*	0.0002*	-

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

จากการประยุกต์วิธีพื้นผิวตอบสนองและความมีนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ที่ทุกตัวสามารถสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าและตัวแปรต่างๆ ที่ทดลองได้ดังนี้:

$$IBS = 1.30 + 0.076x_1 + 0.17x_2 + 0.065x_1x_2 - 0.11x_1^2 - 0.13x_2^2 \quad (1)$$

สมการถดถอยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเวลาการอัด (x_1) มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิ (x_2) ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้ามากกว่าระยะเวลาการอัด ซึ่งสอดคล้องกับความมีนัยสำคัญที่อธิบายก่อนหน้านี้

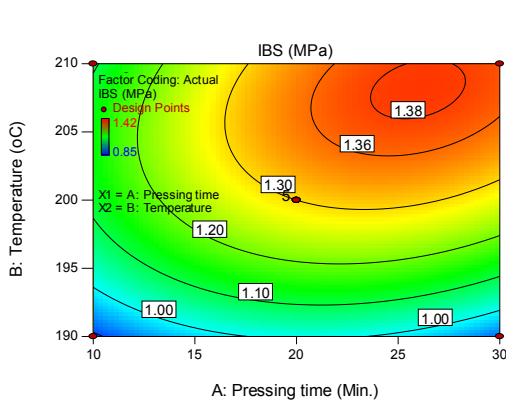
จากสมการถดถอยของความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสามารถนำมาสร้างกราฟโครงร่าง (Contour plot) และกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot) ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ จากกราฟทั้งสองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการอัดจาก 10 ถึง 25 นาที และอุณหภูมิจาก 190 ถึง 205 °C

ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในความเป็นจริงการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของผงไม้เกิดขึ้นจากการเชื่อมโยงของลิกนิน (Cross-linking of lignin) ภายในโครงสร้างแผ่นใยไม้อัด และความแข็งแรงของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถการเชื่อมโยงของลิกนินเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลิกนินเกิดการหลอมเหลวและเกิดการเชื่อมโยงเปรียบเทียบเป็นเมทริกซ์หรือกาวที่ประสานอนุภาคผงไม้ให้ยึดเกาะกันในกระบวนการผลิตแผ่นใยไม้อัด [15] อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลาการอัดเกินประมาณ 25 นาที และอุณหภูมิเกินประมาณ 205 °C ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าลดลงอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สิ่งนี้เกิดจากกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อนของผงไม้อย่างพาราภายในชั้นแกนกลาง (Core layer) ของแผ่นใยไม้อัด [5] ส่งผลให้ความแข็งแรงของอนุภาคผงไม้และความสามารถในการเชื่อมโยงของลิกนินระหว่างอนุภาคผงไม้ลดลง

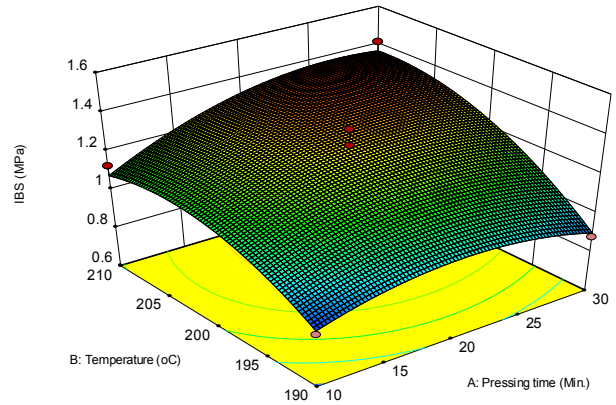
3.4 ผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปต่อความแข็งแรงตัด

ผลของ ANOVA ในตารางที่ 4 พบด้วยว่า ความแข็งแรงตัด (MOR) มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสมคือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้ง ซึ่งรูปแบบจำลองนี้มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เช่นเดียวกันพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวของรูปแบบจำลองนี้มีนัยสำคัญ ดังนั้นสามารถสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงตัดและตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้:

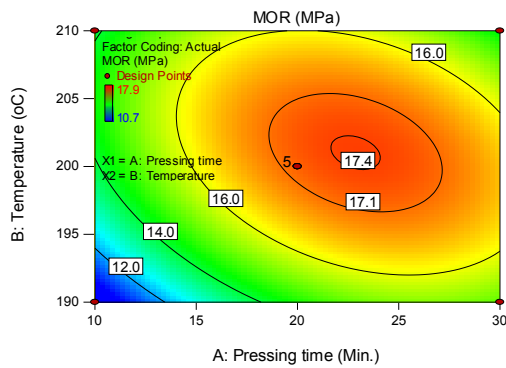
$$MOR = 17.24 + 1.30x_1 + 0.75x_2 - 1.2x_1x_2 - 2.05x_1^2 - 1.98x_2^2 \quad (2)$$



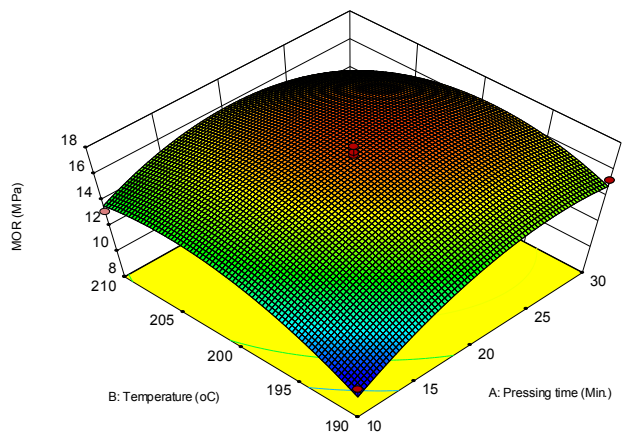
(ก)



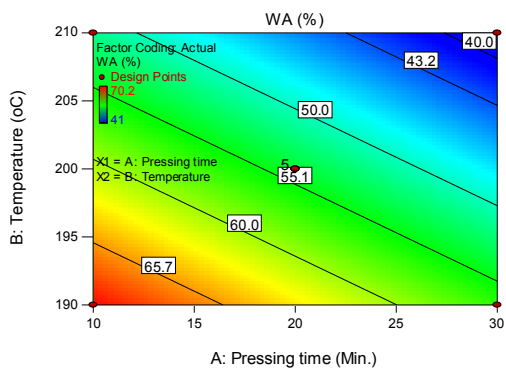
(ข)



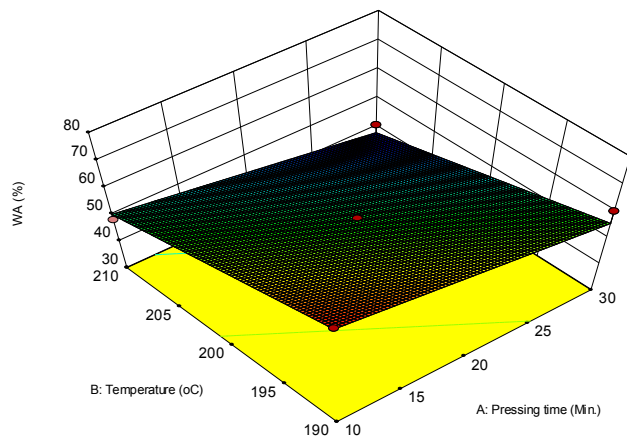
(ค)



(ด)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5 กราฟโครงร่าง (ซ้าย) และกราฟพื้นผิวตอบสนอง (ขวา) แสดงผลกระทบของระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิต่อ (ก) (ข) ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (ค) (ง) ความแข็งแรงดัด และ (จ) (ฉ) การดูดซับน้ำ

สมการถดถอยนี้แสดง ค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเวลาการอัด (x_1) และอุณหภูมิ (x_2) มีค่าเป็นบวกทั้งคู่ ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิ ส่งผลให้ความแข็งแรงดัดของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเชื่อมโยงของลิกนินระหว่างอนุภาคผงไม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้โครงสร้างภายในของแผ่นใยไม้อัดแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสามารถรับภาระ (Load) ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างตัวแปรอิสระทั้งสองคือ ระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิ ส่งผลในทางลบต่อความแข็งแรงดัด นอกจากนี้ตัวแปรของส่วนที่เป็นสมการกำลังสองมีผลกระทบทางลบต่อความแข็งแรงดัดเช่นกัน

รูปที่ 5(ค) และ 5(ง) แสดงกราฟโครงร่างและกราฟพื้นผิวตอบสนอง ตามลำดับ ในความแข็งแรงดัดของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน จากกราฟทั้งสองนี้แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 192 °C และใช้ระยะเวลาการอัด 25 นาที แผ่นใยไม้อัดจะมีค่าความแข็งแรงดัด 16 MPa แต่ที่อุณหภูมิ 205 °C ใช้เวลาเพียง 14 นาที จะได้แผ่นใยไม้อัดที่มีความแข็งแรงดัดเท่ากัน จากผลนี้สามารถสรุปได้ว่า ผู้ผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานสามารถเลือกได้ว่าต้องการเพิ่มอุณหภูมิการอัดให้สูงขึ้นหรือเพิ่มระยะเวลาการอัดทดแทน เพื่อให้ได้แผ่นใยไม้อัดที่มีความแข็งแรงดัดเท่ากัน

นอกจากนี้พบว่าค่าความแข็งแรงดัดของแผ่นใยไม้อัดมีค่าสูงสุดประมาณ 17.5 MPa ที่สภาวะการขึ้นรูปของอุณหภูมิประมาณ 202 °C และระยะเวลาการอัดประมาณ 23 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่อุณหภูมิและระยะเวลาการอัดต่ำกว่า ที่พบในสมบัติความแข็งแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าคือ อุณหภูมิประมาณ 208 °C และระยะเวลาการอัดประมาณ 26 นาที และค่าความแข็งแรง

ดัดประมาณ 1.40 MPa สิ่งนี้เป็นไปได้ว่าการเสื่อมสภาพทางความร้อนเริ่มต้นเกิดขึ้นที่ชั้นผิวหน้า (Surface layer) ของแผ่นใยไม้อัด [5] และในความเป็นจริงการรับภาระสูงสุดของสมบัติการดัดเกิดขึ้นที่ผิวของแผ่นใยไม้อัดแต่สมบัติการดัดเกิดขึ้นที่ชั้นแกนกลาง ดังรูปที่ 6 ที่แสดงการเสียหายของชิ้นงานทดสอบหลังการทดสอบ ดังนั้นความแข็งแรงดัดสูงสุดของแผ่นใยไม้อัดจึงเกิดขึ้นที่ระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิต่ำกว่าความแข็งแรงดัดหรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ที่สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของความแข็งแรงดัด บริเวณชั้นผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดเกิดการเสื่อมสภาพสูงมาก ทำให้ความแข็งแรงดัดมีค่าลดลง



รูปที่ 6 การเสียหายของชิ้นงานทดสอบหลังการทดสอบ (ก) ความแข็งแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า และ (ข) ความแข็งแรงดัด

3.5 ผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปต่อการดูดซับน้ำ

การดูดซับน้ำเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จำเป็นต้องศึกษา เมื่อมีการพัฒนาแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานขึ้นมาใหม่ เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีส่วนผสมของผงไม้ 100% และเป็นที่น่าทึ่งกันว่าไม้เป็นวัสดุที่ชอบดูดซับน้ำ และจากการทดสอบผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปต่อการดูดซับน้ำ พบว่าสมบัติการดูดซับน้ำมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสมคือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง (Linear model) ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งเป็น

รูปแบบจำลองที่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เช่นเดียวกันพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยทุกตัวมีนัยสำคัญ ดังนั้นสามารถสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับน้ำและตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้:

$$WA = 54.08 - 6.57x_1 - 9.23x_2 \quad (3)$$

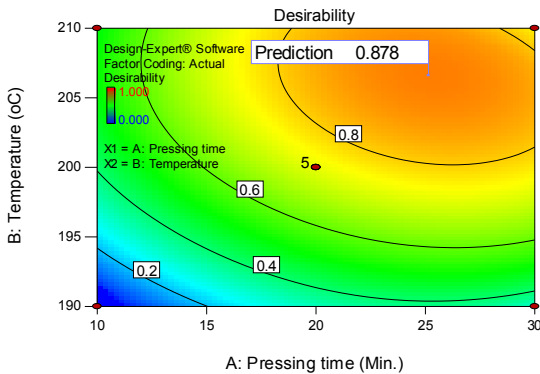
สมการถดถอยนี้แสดง ค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเวลาการอัด (x_1) และ อุณหภูมิ (x_2) มีค่าเป็นลบทั้งคู่ ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิ ส่งผลให้การดูดซับน้ำของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานลดลง และพบด้วยว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเวลาการอัดมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิ ซึ่งหมายความว่า ระยะเวลาการอัดมีผลกระทบต่อการลดลงของการดูดซับน้ำน้อยกว่าอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับค่า P-value ในตารางที่ 4 ที่พบว่าระยะเวลาการอัด ($P = 0.0002$) มีนัยสำคัญน้อยกว่าอุณหภูมิ ($P < 0.0001$)

นอกจากนี้รูปที่ 5(จ) และ 5(ฉ) แสดงกราฟโครงร่างและกราฟพื้นผิวตอบสนอง ตามลำดับ อย่างชัดเจนว่า การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิ ส่งผลให้การดูดซับน้ำของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานลดลงตามระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า ที่ระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น นอกจากการปรับปรุงการเชื่อมโยงของลิกนินภายในโครงสร้างแผ่นใยไม้อัดเกิดขึ้นแล้ว แต่ทว่ายังเกิดการเปลี่ยนแปลงตัวเองขององค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น เซลลูโลส และเอมิเซลลูโลสอีกด้วย โดยเฉพาะ เซลลูโลส ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็น สารที่ชอบดูดซับน้ำ เพราะหมู่ไฮดรอกซิล (Free OH groups) ในเซลลูโลสจะทำปฏิกิริยากับขั้วโมเลกุลของน้ำ ทำให้แผ่นใยไม้อัดมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น [10, 16] อย่างไรก็ดีตามเป็นไปได้อีกว่าที่

ระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิสูงมาก การเสื่อมสภาพทางความร้อนของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสเกิดขึ้น ทำให้ความสามารถการดูดซับน้ำของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานลดลง นอกจากนี้พบด้วยว่าการดูดซับน้ำของแผ่นใยไม้อัดมีค่าต่ำสุดประมาณ 39% ที่สภาวะการขึ้นรูปของระยะเวลาการอัดประมาณ 30 นาที และอุณหภูมิประมาณ 210 °C ซึ่งเป็นสภาวะที่สูงที่สุดของการทดลองนี้

3.6 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการขึ้นรูป

สภาวะการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันของทุกสมบัติสามารถหาได้โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน (Overlay plot) ของกราฟเส้นโครงร่างผลตอบสนองแต่ละตัว ซึ่งกำหนดเงื่อนไขให้ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าและความแข็งแรงดัดมีค่าสูงที่สุด แต่การดูดซับน้ำมีค่าต่ำที่สุด จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert software พบว่าสภาวะการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพคือ การขึ้นรูปโดยใช้เวลาการอัดร้อน 25 นาที และอุณหภูมิ 207 °C ซึ่งมีค่าความพึงพอใจ (Desirability score) 0.878 ดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้เพื่อยืนยันความถูกต้องของสภาวะการขึ้นรูปที่ได้และค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย แผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานถูกขึ้นรูปโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมนี้ และทดสอบความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 จากผลการทดลองนี้พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีความแตกต่างสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทำนาย 4.21% เกิดขึ้นในสมบัติความแข็งแรงดัด ซึ่งเป็นค่านี้น้อยมากไม่เกิน 5%



รูปที่ 7 กราฟโครงร่างของค่าความพึงพอใจในสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันของทุกสมบัติ

ตารางที่ 5 สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันของทุกสมบัติ และผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายและการทดลองจริง

	Factors		Response		
	Pres. tim. (Min.)	Tem. (°C)	IBS (MPa)	MOR (MPa)	WA (%)
Predicted	25	207	1.39	16.6	44.6
Observed			1.44	15.9	44.1
			(0.13)*	(2.85)	(3.23)

* ค่าในวงเล็บคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง

4. สรุปผล

การออกแบบการทดลองแบบ Central composite design และวิธีพื้นผิวตอบสนองถูกประยุกต์เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูป และเพื่อให้ได้รับสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

ความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำ เช่นเดียวกันพบว่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความแข็งแรงดัด และการดูดซับน้ำสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิในขณะที่ขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัด เนื่องจากการเชื่อมโยงของลิกนินระหว่างอนุภาคผงไม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้โครงสร้างภายในของแผ่นใยไม้อัดแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาการอัดและอุณหภูมิสูงมากๆ พบว่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และความแข็งแรงดัดมีค่าลดลงอย่างช้าๆ สิ่งนี้เกิดจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของผงไม้ยางพารา นอกจากนี้จากการใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้น โครงร่างผลตอบสนองแต่ละตัว ซึ่งกำหนดเงื่อนไขให้ความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และความแข็งแรงดัดมีค่าสูงที่สุด แต่การดูดซับน้ำมีค่าต่ำที่สุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสานหนา 6 มิลลิเมตร ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพคือ การขึ้นรูปโดยใช้ระยะเวลาการอัดร้อน 25 นาที และอุณหภูมิ 207 °C เช่นเดียวกันเมื่อทดลองขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดและทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีความแตกต่างสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทำนาย 4.21%

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนบทความนี้ และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Hashim, N. Said, J. Lamaming, M. Baskaran, O. Sulaiman, M. Sato, *et al.*, "Influence of Press Temperature on the Properties of Binderless Particleboard Made from Oil Palm Trunk", *Materials and Design* 32, 2011, pp. 2520–2525.
- [2] R. Hashim, S. Hamid, O. Sulaiman, N. Ismail, M. Ibrahim, H. Jais, "Extractable Formaldehyde from Waste Medium Density Fibreboard", *Journal of Tropical Forest Science* 21, 2009, pp. 25–33.
- [3] J. Lamaming, R. Hashim, O. Sulaiman, T. Sugimoto, M. Sato, S. Hiziroglu, "Measurement of Some Properties of Binderless Particleboards Made from Young and Old Oil Palm Trunks", *Measurement* 47, 2014, pp. 813–819.
- [4] J.G. Boon, R. Hashim, O. Sulaiman, S. Hiziroglu, T. Sugimoto, M. Sato, "Influence of Processing Parameters on Some Properties of Oil Palm Trunk Binderless Particleboard", *European Journal of Wood and Wood Products* 71, 2013, pp. 583–589.
- [5] S. Nonaka, K. Umemura, S. Kawai, "Characterization of Bagasse Binderless Particleboard Manufactured in High-Temperature Range", *Journal of Wood Science* 59, 2013, pp. 50–56.
- [6] H. Hidayat, E.R.P. Keijsers, U. Prijanto, J.E.G. Dam, H.J. Heeres, "Preparation and Properties of Binderless Boards from *Jatropha Curcas* L. Seed Cake", *Industrial Crops and Products* 52, 2014, pp. 245–254.
- [7] C. Homkhiew, "Development and Applications of Natural Fiber/Thermoplastic Composites for Industrial", *The Journal of Industrial Technology* 10, 2014, pp. 97–110.
- [8] S. Rimdusit, W. Smittakorn, S. Jittarom, S. Tiptipakorn, "Highly Filled Polypropylene Rubber Wood Flour Composites", *Engineering Journal* 15, 2011, pp. 17–30.
- [9] S. Prasertsan, P. Vanapruk, "Rubber Plantations: An Overlooked Dendropower Option", *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Manila*, 1998.
- [10] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, "Optimal Proportions of Composites from Polypropylene and Rubberwood Flour after Water Immersion Using Experimental Design", *KKU Research Journal* 19, 2014, pp. 780–793.
- [11] P. Petchpradab, T. Yoshida, T. Charinpanitkul, Y. Matsumura, "Hydrothermal Pretreatment of Rubber Wood for the Saccharification Process", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 48, 2009, pp. 4587–4591.
- [12] R.C.S. John, "Experiments with Mixtures, III- Conditioning, and Ridge Regression", *Journal of Quality Technology* 16, 1984, pp. 81–96.
- [13] D.C. Montgomery, "*Design and Analysis of Experiments* (7th ed)", John Wiley & Sons, Inc., 2009.

- [14] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, "*Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (3rd ed)", John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [15] N. Saadaoui, A. Rouilly, K. Fares, L. Rigal, "Characterization of Date Palm Lignocellulosic by-Products and Self-Bonded Composite Materials Obtained Thereof", *Materials and Design* 50, 2013, pp. 302–308.
- [16] K.B. Adhikary, S. Pang, M.P. Staiger, "Long-Term Moisture Absorption and Thickness Swelling Behaviour of Recycled Thermoplastics Reinforced with Pinus Radiata Sawdust", *Chemical Engineering Journal* 142, 2008, pp. 190–198.