



พารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และผงไม้ยางพาราโดยใช้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ชาติรี หอมเขียว* วรพงศ์ บุญช่วยแทน และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ธนศ รัตนวิไล
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ที่มวิจัยเทคโนโลยีไม้ยางพาราและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-7431-7100 ต่อ 3110 อีเมล: chatree.h@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.009
รับเมื่อ 29 มีนาคม 2559 ตอบรับเมื่อ 22 กันยายน 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 31 มีนาคม 2560
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การออกแบบการทดลองเป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างพารามิเตอร์ของการทดลองและค่าตอบสนอง ซึ่งนำไปสู่การค้นพบพารามิเตอร์การทดลองที่เหมาะสมที่สุด การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนและวิธีพื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอัดร้อน ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่นต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารา และเพื่อหาพารามิเตอร์การขึ้นรูปอัดร้อนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ ผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงดัด โมดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึง และการดูดซับน้ำ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เวลาการอัด และความหนาแน่น ส่งผลให้สมบัติการดัดและการดึงเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับน้ำลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเกิน 195°C ความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และโมดูลัสการดึงลดลงอย่างช้าๆ และเมื่อเวลาอัดเกิน 11 min โมดูลัสการดัดและการดึงลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ สมการถดถอยของความแข็งแรงดัด โมดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึง และการดูดซับน้ำ มีการนำมาใช้หาพารามิเตอร์การขึ้นรูปอัดร้อนที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งพบว่าการขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 197°C ระยะเวลาการอัด 13 min และความหนาแน่น 1.0 g/cm³ เป็นพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสม และพบด้วยว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ มีสมบัติแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายไม่เกิน 3.78%

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, ผงไม้ยางพารา, วิธีพื้นผิวตอบสนอง, การอัดร้อน

การอ้างอิงบทความ: ชาติรี หอมเขียว วรพงศ์ บุญช่วยแทน สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และ ธนศ รัตนวิไล, “พารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, หน้า 315–328 เม.ย.-มิ.ย. 2560.



Optimal Manufacturing Parameters of Rubberwood Flour/High Density Polyethylene Composites Using Box–Behnken Design

Chatree Homkhiew*, Worapong Boonchouytan and Surasit Rawangwong

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand
Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand

Thanate Ratanawilai

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand
Rubberwood Technology and Management, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-7431-7100 Ext. 3110, E-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.009

Received 29 March 2016; Accepted 22 September 2016; Published online: 31 March 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Experimental design is the revealing of statistical relationship between parameters of experiment and responses, which leads to finding the optimal parameters of experiment. Box–Behnken experimental design and response surface methodology were applied to investigate the effects of temperature, pressing time and density on properties of rubberwood flour/high density polyethylene composites as well as to optimize manufacturing parameters of the composites. From the experiment, it was found that temperature, pressing time and density significantly affected modulus of rupture, modulus of elasticity, tensile strength, tensile modulus and water absorption. With increasing the temperature, pressing time and density resulted in increasing of flexural and tensile properties but decreasing of water absorption, whereas when the temperature is over 195°C, modulus of rupture, tensile strength and tensile modulus slowly reduced. And, when the pressing time is over 11 min, modulus of elasticity and tensile modulus also decreased clearly. Furthermore, regression models fitted of the modulus of rupture, modulus of elasticity, tensile strength, tensile modulus and water absorption were used to optimize the manufacturing parameters of the composites. The optimal parameters found were the temperature 197°C, pressing time 13 min and density 1.0 g/cm³. Likewise, the composites manufactured by these parameters having the different property from the model prediction is not over 3.78%.

Keywords: Wood–Plastic Composites, Rubberwood Flour, Response Surface Methodology, Hot Compression

Please cite this article in press as: C. Homkhiew, W. Boonchouytan, S. Rawangwong, and T. Ratanawilai, "Optimal manufacturing parameters of rubberwood flour/high density polyethylene composites using Box–Behnken design," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 27, no. 2, pp. 315–328, Apr.–Jun. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

การใช้เส้นใยธรรมชาติเสริมแรงในพลาสติกเพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites: WPCs) กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบันเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อดีที่เส้นใยสังเคราะห์หลายประการคือ ราคาถูก ไม่กัดกร่อนเครื่องจักร (ไม่ส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการสึกหรอ) สามารถใช้ซ้ำได้ (Recycle) และใช้พลังงานการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่ำ [1], [2] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของ WPCs กับไม้ธรรมชาติพบว่า WPCs มีข้อได้เปรียบมากกว่า เช่น ความทนทานและต้านทานเชื้อราสูง ต้นทุนในการบำรุงรักษาต่ำ ดูดซับน้ำน้อย มีความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [2], [3]

สายพันธุ์ของเส้นใยธรรมชาติถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ และมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เนื่องจากสายพันธุ์ของเส้นใยแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้าง ผิวน และรูพรุนภายในที่แตกต่างกัน [2] Nourbakhsh และ Kouhpayehzadeh [4] พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยมีการดูดซับน้ำสูงกว่าที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต้นปืช และ Slaughter [5] พบว่าความแข็งแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตจากไม้เมเปิลมีค่าสูงกว่าที่ผลิตจากไม้สน นอกจากนี้การประยุกต์ใช้งานเส้นใยธรรมชาติโดยส่วนใหญ่จะประยุกต์ใช้เส้นใยของพืชท้องถิ่นในประเทศนั้นๆ และประเทศไทยซึ่งเลี้ยงไม้ยางพารามีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับพลาสติก เพราะต้นยางพาราถือเป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย และเมื่อต้นยางพาราให้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่าต่อการปลูกหรือมีอายุประมาณ 25 ปี ต้นยางพาราจะถูกตัด [6], [7] และจากการตัดจะเกิดของเสียในรูปของชี้เลี้ยง ผงไม้ และเศษไม้ประมาณ 34% [8] ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สูงมาก [7]

จากการสำรวจงานวิจัยในอดีต พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีจำนวนน้อย ยกตัวอย่างเช่น Rimdusit และคณะ [6] ศึกษาผล

กระทบของขนาดผงไม้ยางพาราต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพีลีน และพบว่าขนาดอนุภาคผงไม้ยางพาราที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบมีขนาด 200–300 μm Homkiew และคณะ [9] กล่าวว่า การเติมผงไม้ยางพารามากกว่า 25% ในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพีลีนสามารถเพิ่มความแข็งแรงและค่ามอดุลัสอย่างเป็นเส้นตรงตามปริมาณผงไม้ยางพาราที่เติมเป็นส่วนผสม Ratanawilai และคณะ [10] กล่าวว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา มีสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน และผงกะลาปาล์มน้ำมัน และ Prachayawarakorn และคณะ [11] ศึกษาผลกระทบของสารคู่ควบ (Coupling Agent) ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา ซึ่งพบว่าการเติมสารคู่ควบสามารถปรับปรุงสมบัติการดึงและการกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ

การออกแบบการทดลองและวิธีพื้นผิวตอบสนองคือ เครื่องมือทางสถิติที่มีประสิทธิภาพสำหรับหาผลกระทบและการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ของตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง และรูปแบบจำลองที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้หาสภาวะหรือสูตรที่เหมาะสมที่สุดของการทดลอง นอกจากนี้การออกแบบการทดลองยังช่วยให้การดำเนินงานวิจัยมีระเบียบแบบแผนมากขึ้น ตลอดจนเพิ่มข้อมูลทางเทคนิคและทางวิทยาศาสตร์ในผลกระทบต่างๆ ของตัวแปรการทดลองมากขึ้น อย่างไรก็ตามการประยุกต์เครื่องมือทางสถิติเหล่านี้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ยังมีจำนวนน้อย เช่น Homkiew และคณะ [12] ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมและวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพีลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารา Matuana และ Mengelolu [13] ประยุกต์ Central Composite Design และวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อศึกษาความสามารถการเป็นฟองของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์และผงไม้ Stark และ Matuana [14] ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียลเพื่อศึกษาผลกระทบของสารต้านทานรังสียูวี สี และสารดูดซับรังสียูวี และสำรวจการเกิดอันตรกิริยาของสารเคมี



เหล่านี้ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ ซึ่งยังไม่พบการประยุกต์การออกแบบการทดลองและวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์และหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์วิธีพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design: BBD) เนื่องจากเป็นการทดลองที่ไม่ต่อเนื่อง (Non-sequential Experiments) และการทดลอง BBD เป็นการทดลองที่ไม่ต้องการให้มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ทุกตัวไว้ที่ระดับต่ำสุดหรือระดับสูงสุด เนื่องจากการทำการทดลองจะได้คำตอบที่ไม่ต้องการหรือเกิดความเสียหายขึ้น สุดท้าย BBD มีข้อดีกว่า Central Composite Design (CCD) คือต้องการชุดการทดลองที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีจำนวนปัจจัย (Factor) เท่ากัน [15] โดยศึกษาผลกระทบและการเกิดอันตรกิริยาของพารามิเตอร์การขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิการอัดร้อน ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่นต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และเป้าหมายสูงสุดของงานวิจัยนี้คือเพื่อหาพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงต่อสมบัติการดัด การดึง และการดูดซับน้ำ ซึ่งข้อมูลใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะประโยชน์อย่างมากต่อนักวิจัย นักพัฒนา และผู้ผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุ

ผงไม้จากต้นยางพารานำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์พลาสติก ซึ่งผงไม้เหล่านี้ได้รับมาจากโรงงานเพอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา (ประเทศไทย) ก่อนนำไปใช้งานผงไม้เหล่านี้ต้องร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 เมช (<212 μm) และอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 h เพื่อลดความชื้นในผงไม้ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลเกรด WT114 มีการนำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งจัดซื้อจากบริษัทวิทยานเตอร์เทรต

จำกัด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) และสารคู่ควบที่ใช้เพิ่มความสามารถการยึดเกาะระหว่างผงไม้และเมทริกซ์พลาสติก คือ Maleic Anhydride-Grafted Polyethylene: MAPE ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด (Missouri, USA)

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน การวิเคราะห์ผลทางสถิติ และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) เพื่อวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่มีต่อสมรรถนะของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ การออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้แสดงความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างพารามิเตอร์ของการทดลองและค่าตอบสนอง (ผลการทดลอง) ซึ่งนำไปสู่การค้นพบพารามิเตอร์การทดลองที่เหมาะสมที่สุด [16] ดังนั้นปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุณหภูมิ (x_1) ระยะเวลาการอัด (x_2) และความหนาแน่นของแผ่นขึ้นงาน (x_3) โดยมีสมมุติฐานที่ว่า ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเหล่านี้มีผลกระทบต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ซึ่งระดับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 1 ขอบเขตของระดับพารามิเตอร์การทดลองเหล่านี้ได้มาจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตและจากการทดลองเบื้องต้น ดังนั้นจากการออกแบบการทดลองได้สภาวะที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 15 สภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบการทดลอง

Factors	ID	Parameter Levels		
		Low (-)	Medium (0)	High (+)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	x_1	180	190	200
Pressing Time (min)	x_2	5	10	15
Density (g/cm^3)	x_3	0.8	0.9	1.0



ตารางที่ 2 สภาวะการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และผลการทดลอง

Run No.	Variable Factors			Flexural Properties		Tensile Properties		WA (%)
	Temperature	Pressing Time	Density	MOR (MPa)	MOE (GPa)	TS (MPa)	TM (MPa)	
1	190	10	0.9	29.8	1.56	17.3	148.4	1.46
2	190	5	0.8	27.4	1.40	17.5	136.5	1.56
3	200	10	1.0	31.3	1.69	18.7	150.2	1.36
4	190	10	0.9	30.0	1.61	17.3	143.7	1.48
5	200	10	0.8	28.4	1.59	16.3	139.3	1.53
6	190	15	0.8	28.3	1.48	18.7	138.5	1.49
7	190	5	1.0	30.9	1.49	18.6	141.2	1.45
8	200	15	0.9	30.3	1.54	18.1	148.9	1.44
9	180	15	0.9	26.5	1.41	15.8	133.4	1.54
10	180	5	0.9	24.7	1.35	14.4	131.6	1.62
11	200	5	0.9	27.9	1.42	17.6	137.4	1.52
12	180	10	0.8	23.1	1.49	13.8	132.5	1.66
13	190	15	1.0	32.6	1.61	19.5	146.7	1.41
14	190	10	0.9	30.6	1.60	17.8	146.3	1.49
15	180	10	1.0	27.6	1.56	15.6	138.9	1.48

หมายเหตุ: MOR คือ Modulus of Rupture (ความแข็งแรงดัด) MOE คือ Modulus of Elasticity (มอดุลัสการดัด) TS คือ Tensile Strength (ความแข็งแรงดึง) TM คือ Tensile Modulus (มอดุลัสการดึง) WA คือ Water Absorption (การดูดซับน้ำ)

2.3 การผลิตชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

การผลิตชิ้นงานตัวอย่างประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ 1) เพื่อผสมส่วนผสมต่างๆ เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ โดยนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ปริมาณ 51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ผงไม้ยางพารา ปริมาณ 45 wt% และ MAPE ปริมาณ 4 wt% ใส่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รุ่น SHJ-36 จากบริษัท เอ็นแมช จำกัด นครบุรี ประเทศไทย) ที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 110–150°C และความเร็วของเกลียวที่หมุน 70 rpm. จากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการอัดรีดระบายความร้อนในอากาศและตัดให้เป็นเม็ด (Pellet) และ 2) เพื่อผลิตแผ่นชิ้นงานตัวอย่างภายใต้พารามิเตอร์การขึ้นรูปอัดร้อนที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2 ก่อนการผลิต อุ่นแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปเป็นเวลา 5 min ต่อจากนั้นนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบใส่ในแม่พิมพ์และหลอมเม็ดวัสดุเชิงประกอบในแม่พิมพ์ด้วยอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปเป็นเวลา 5 min ด้วยแรงดันอัด 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi)

หลังจากนั้นอัดชิ้นงานตัวอย่างด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาการอัดตามแผนการออกแบบการทดลอง และใช้แรงดันอัดคงที่ 1000 psi สุดท้ายนำแม่พิมพ์ออกมาระบายความร้อนด้วยระบบหล่อเย็นเป็นระยะเวลา 10 min แล้วจึงถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

2.4 วิธีการทดสอบ

2.4.1 การทดสอบสมบัติการดัด

ก่อนการทดสอบสมบัติการดัด นำชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 h เพื่อลดความชื้นในชิ้นงานทดสอบ การทดสอบสมบัติการดัดเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด (Three-point Flexural Test) ซึ่งปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D790-92 โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ชิ้นงานทดสอบดัดมีขนาด 4.8 × 13 × 100 mm³ และระยะห่างระหว่างปรองรับชิ้นงาน (Span Distance) มีระยะ 80 mm ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดัดคือ 2 mm/min และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25°C ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดัด



และค่ามอดูลัสการดัดเปลี่ยนของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.4.2 การทดสอบสมบัติการดึง

การทดสอบสมบัติการดึงเป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D638-99 โดยใช้เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ การทดสอบดึงเป็นการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานทดสอบประเภทที่ 4 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด $115 \times 19 \times 4 \text{ mm}^3$ ความเร็วที่ใช้ทดสอบดึง คือ 5 mm/min และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25°C ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดัดเปลี่ยนของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.4.3 การทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ (Water Absorption) เป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D570-88 ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีขนาด $4 \times 10 \times 20 \text{ mm}^3$ ก่อนการทดสอบนำชิ้นงานตัวอย่าง 5 ชิ้น ของแต่ละเงื่อนไขการทดลองอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 h จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างทันที โดยเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.01 g นำชิ้นงานตัวอย่างแช่ในน้ำอุณหภูมิห้อง 25°C เป็นเวลา 24 h เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนด้วย 3 ปัจจัยการขึ้นรูป ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ (x_1) ระยะเวลาการอัด (x_2) และความหนาแน่น (x_3) สามารถกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดลองได้ทั้งหมด 15 สภาวะ และผลการทดสอบของความแข็งแรงดัด (MOR) มอดูลัสการดัด (MOE) ความแข็งแรงดึง (TS) มอดูลัสการดึง (TM) และการดูดซับน้ำ (WA) ในแต่ละสภาวะแสดงในตารางที่ 2

3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบจำลองการถดถอย

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแต่ละรูปแบบจำลองการถดถอย ปัจจัย อันตรกิริยา และความสมรูป (Lack of Fit) ในสมบัติความแข็งแรงดัด มอดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง และการดูดซับน้ำ แสดงในตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์พบว่า ความแข็งแรงดัด

มอดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสการดึง มีรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมคือรูปแบบเชิงเส้นโค้ง แต่การดูดซับน้ำมีรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมคือรูปแบบเชิงเส้นตรง ซึ่งรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมเหล่านี้มีนัยสำคัญ ($P < .05$) เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละปัจจัยในรูปแบบจำลองการถดถอยพบว่า อุณหภูมิ (x_1) ระยะเวลาการอัด (x_2) และความหนาแน่น (x_3) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงดัด มอดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง และการดูดซับน้ำ ($P < .05$) และเมื่อวิเคราะห์การเกิดอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่างๆ พบว่าไม่มีนัยสำคัญ ($P > .05$) ซึ่งหมายความว่า การเกิดอันตรกิริยามีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติทางกล ทำให้ต้องมีการลดรูปของรูปแบบจำลองการถดถอย และวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละรูปแบบจำลองอีกครั้ง ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4 นอกจากนี้รูปแบบที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า P-value ของ Lack of Fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P > .05$) ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูลการทดลอง

ค่า Coefficient of Determination (R^2) ค่า Adjusted Coefficient of Determination ($\text{Adj-}R^2$) และค่า Predicted Coefficient of Determination ($\text{Pred-}R^2$) ที่แสดงในตารางที่ 4 ใช้เพื่อวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมเช่นกันจากข้อมูลพบว่าค่า R^2 ของทั้ง 5 รูปแบบ มีค่าอยู่ในช่วง 85.50% ถึง 97.39% นั้นหมายความว่า ความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบจำลองการถดถอย 14.50% และ 2.61% ตามลำดับ และค่า $\text{Adj-}R^2$ ของแต่ละรูปแบบจำลองมีค่าที่สูงใกล้เคียงกับค่า R^2 ซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม และเมื่อวิเคราะห์ $\text{Pred-}R^2$ พบว่าสมบัติความแข็งแรงดัดแสดงค่าสูงที่สุด คือ 93.85% นั้นหมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้นี้ สามารถประมาณการหรืออธิบายความผันแปรในข้อมูลใหม่ได้ 93.85% จากข้อมูล R^2 , $\text{Adj-}R^2$ และ $\text{Pred-}R^2$ ของแต่ละรูปแบบมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม [17], [18]



ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับรูปแบบจำลองการถดถอยต่างๆ ก่อนการลดรูปในแต่ละสมบัติ

Source	MOR		MOE		TS		TM		WA	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
Model	42.42	0.0003*	37.61	0.0005*	24.65	0.0013*	15.09	0.0040*	21.62	<0.0001*
x_1	134.83	<0.0001*	61.63	0.0005*	92.32	0.0002*	51.09	0.0008*	23.17	0.0005*
x_2	24.35	0.0043*	48.13	0.0010*	11.99	0.0180*	14.24	0.0130*	8.34	0.0148*
x_3	121.69	0.0001*	50.70	0.0008*	27.88	0.0032*	30.01	0.0028*	33.36	0.0001*
x_1x_2	0.38	0.5650	2.40	0.1820	1.21	0.3208	6.19	0.0553	–	–
x_1x_3	2.70	0.1615	0.60	0.4736	0.54	0.4956	1.33	0.3005	–	–
x_2x_3	0.67	0.4490	1.07	0.3490	0.13	0.7285	0.81	0.4104	–	–
x_1^2	96.59	0.0002*	12.94	0.0156*	66.49	0.0005*	18.86	0.0074*	–	–
x_2^2	1.32	0.3020	150.78	<0.0001*	12.17	0.0175*	14.82	0.0120*	–	–
x_3^2	0.02	0.8759	8.14	0.0357*	2.98	0.1451	2.20	0.1982	–	–
Lack of Fit	1.62	0.4044	0.23	0.8725	2.67	0.2842	0.48	0.7315	5.50	0.1632
R^2 (%)	98.71		98.54		97.80		96.45		85.50	
Adj- R^2 (%)	96.38		95.92		93.83		90.05		81.55	
Pred- R^2 (%)	84.51		91.65		70.80		71.68		71.36	

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า .05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

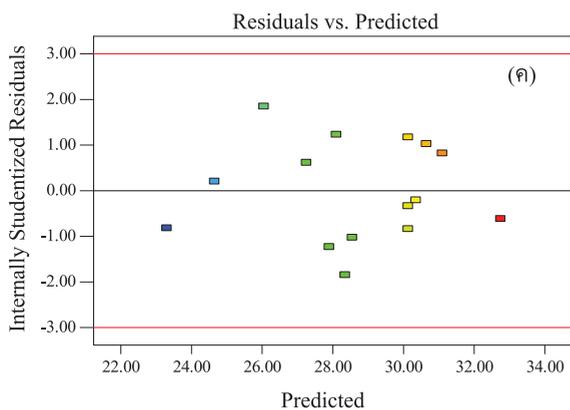
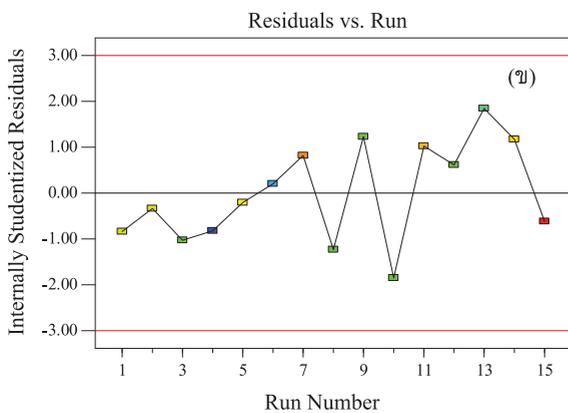
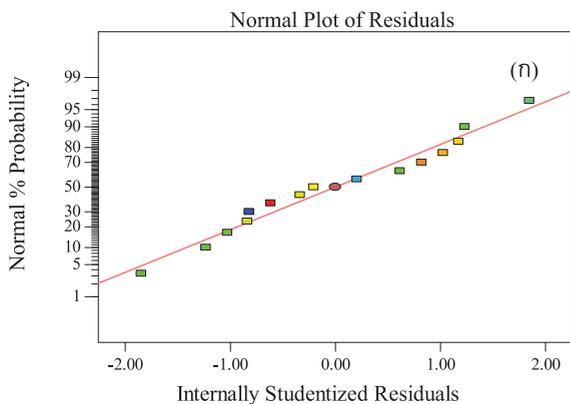
ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับรูปแบบจำลองการถดถอยต่างๆ หลังการลดรูปในแต่ละสมบัติ

Source	MOR		MOE		TS		TM		WA	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
Model	93.43	<0.0001*	49.18	<0.0001*	39.61	<0.0001*	14.51	0.0004*	21.62	<0.0001*
x_1	133.77	<0.0001*	54.38	<0.0001*	84.23	<0.0001*	29.60	0.0004*	23.17	0.0005*
x_2	24.16	0.0006*	42.47	0.0002*	10.94	0.0091*	8.25	0.0184*	8.34	0.0148*
x_3	120.73	<0.0001*	44.74	0.0002*	25.44	0.0007*	17.39	0.0024*	33.36	0.0001*
x_1^2	95.05	<0.0001*	11.42	0.0097*	63.04	<0.0001*	10.42	0.0104*	–	–
x_2^2	–	–	133.05	<0.0001*	10.34	0.0106*	8.13	0.0190*	–	–
x_3^2	–	–	7.18	0.0279*	–	–	–	–	–	–
Lack of Fit	1.48	0.4654	0.48	0.7965	2.54	0.3119	1.23	0.5174	5.50	0.1632
R^2 (%)	97.39		97.36		95.65		88.97		85.50	
Adj- R^2 (%)	96.35		95.38		93.24		82.84		81.55	
Pred- R^2 (%)	93.85		91.34		87.31		68.42		71.36	

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า .05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้การวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลองได้แสดงในรูปที่ 1(ก) กราฟ Normal Probability ของสมบัติความแข็งแรงตัด แสดงข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรง และไม่มีค่าผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ [7], [19] รูปที่ 1(ข) แสดงกราฟค่าส่วนตกร่างต่อลำดับการทดลอง ซึ่งพบว่าค่าส่วนตกร่างไม่มีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ [7], [19] และรูปที่ 1(ค) แสดงกราฟค่าส่วนตกร่างต่อค่า

ที่ทำนาย พบว่าค่าส่วนตกร่างมีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ และค่าส่วนตกร่างมีการกระจายรอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระและความเสถียรภาพของความแปรปรวน [7], [19] นอกจากนี้การวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลองในสมบัติมอดูลัสการตัด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง และการดูดซับน้ำ มีการวิเคราะห์เช่นกัน และพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ข้อมูลมีความ



รูปที่ 1 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง การถดถอยของสมบัติความแข็งแรงดัด (ก) กราฟ Normal Probability (ข) กราฟค่าส่วนตกค้าง ต่อลำดับการทดลอง และ (ค) กราฟค่าส่วนตกค้าง ต่อค่าที่ทำนาย

เสถียรภาพของความแปรปรวน และคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ เหมือนดังเช่นสมบัติความแข็งแรงดัดที่ได้อธิบายเป็นตัวอย่าง

3.2 ผลกระทบของพารามิเตอร์การขึ้นรูปต่อสมบัติการดัด

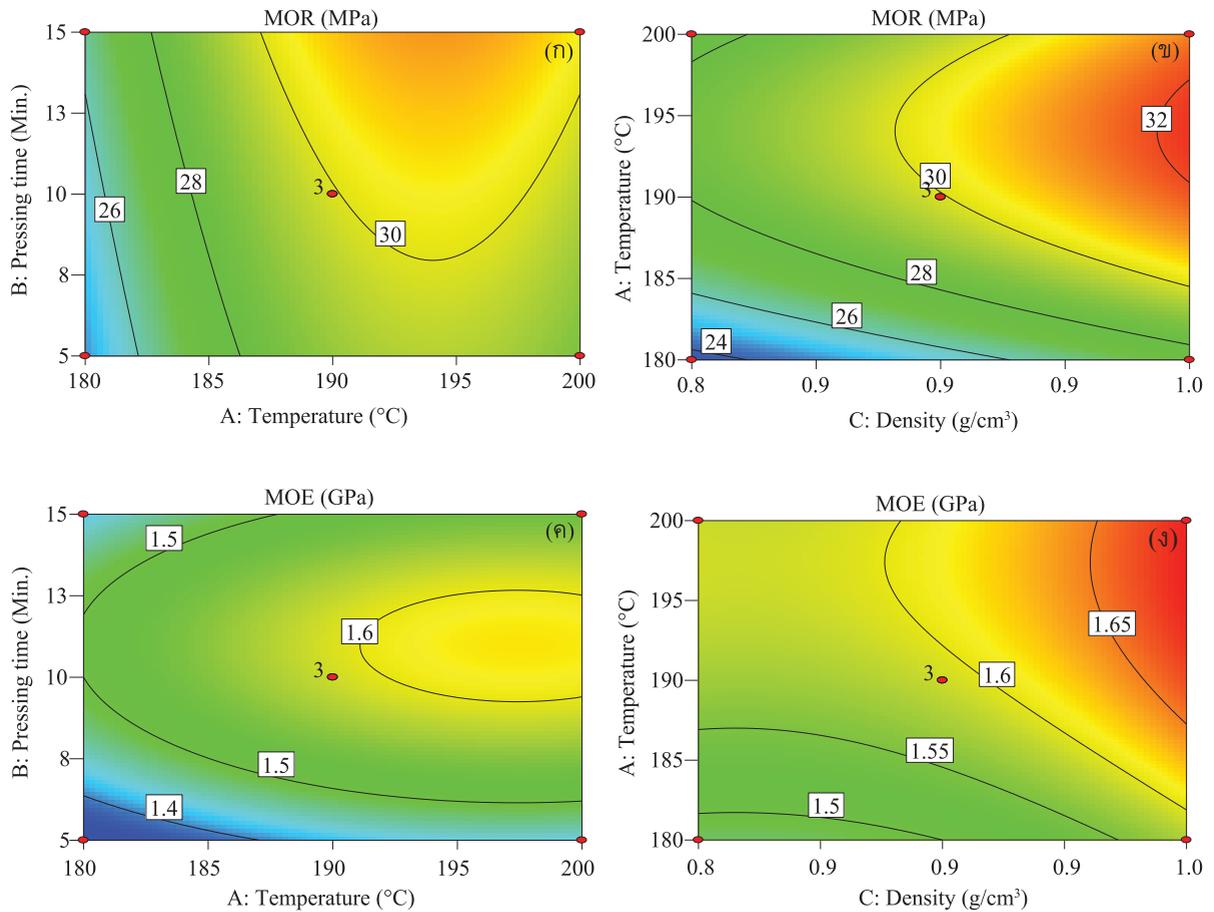
สมการถดถอยของรูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งสำหรับความแข็งแรงดัด (MOR) และมอดูลัสการดัด (MOE) คือ

$$\text{MOR} = 29.94 + 2.0x_1 + 0.85x_2 + 1.90x_3 - 2.47x_1^2 \quad (1)$$

$$\text{MOE} = 1.59 + 0.054x_1 + 0.047x_2 + 0.049x_3 - 0.036x_1^2 - 0.12x_2^2 + 0.029x_3^2 \quad (2)$$

สมการถดถอยของความแข็งแรงดัดและมอดูลัสการดัดแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (x_1) ระยะเวลาการอัด (x_2) และความหนาแน่น (x_3) มีค่าเป็นบวก ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะปัจจัยหลักเหล่านี้ สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารามีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยหลักพบว่าอุณหภูมิมีค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงที่สุด รองลงมาคือความหนาแน่น และระยะเวลาการอัดมีค่าต่ำที่สุด นั่นหมายความว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อสมบัติการดัดของวัสดุเชิงประกอบสูงที่สุด

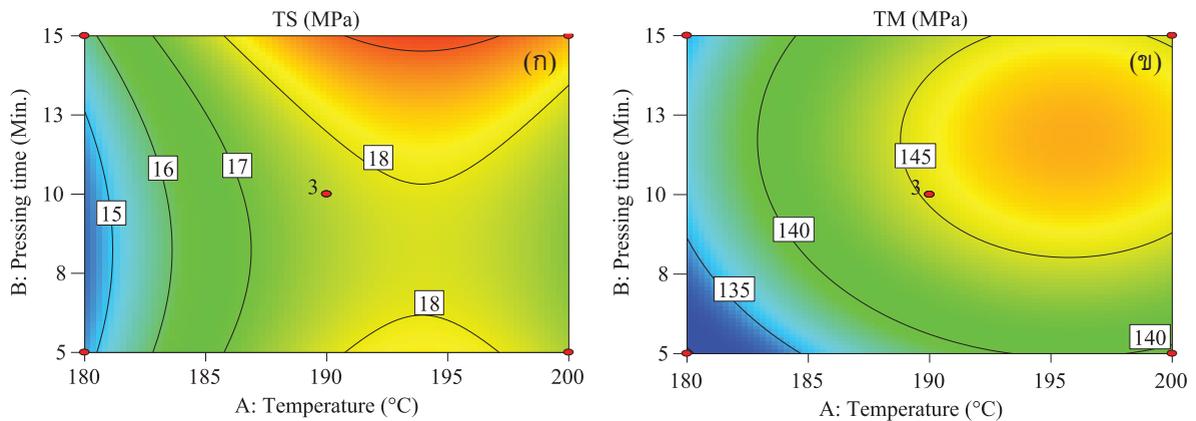
จากสมการถดถอยของความแข็งแรงดัดและมอดูลัสการดัด สามารถนำมาสร้างกราฟโครงร่าง (Contour Plot) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2(ก)–(ง) ตามลำดับ จากกราฟโครงร่างพบว่าค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในความเป็นจริงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การหลอมเหลวของพลาสติกจะเพิ่มสูงขึ้นตาม ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลเมทริกซ์พลาสติกสมบูรณและแข็งแรงมากขึ้น ทำให้การถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นสมบัติการดัดจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอุณหภูมิ ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่นต่อ (ก) (ข) ความแข็งแรงดัด และ (ค) (ง) มอดูลัสการดัด

ตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 195°C พบว่า ความแข็งแรงดัดลดลงอย่างช้าๆ ตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นไปได้ว่าเกิดจากการเสื่อมสภาพของเมทริกซ์พลาสติก เพราะทางทฤษฎีอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนประมาณ 105–130°C [20] ซึ่งการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปสำหรับขึ้นรูปพลาสติกชนิดนี้ จะส่งผลให้สมบัติของพลาสติกลดลง [21] และจากกราฟโครงร่างพบว่า การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการอัด ส่งผลให้ความแข็งแรงดัดและมอดูลัสการดัดเพิ่มสูงขึ้น แต่มอดูลัสการดัดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้เวลาอัดเกิน 11 min เป็นไปได้ว่า เมื่อใช้เวลาการอัดมากเกินไป

ทำให้อนุภาคผงไม่เชื่อมสภาพ (ผงไม้เริ่มไหม้) ส่งผลให้ความแข็งแรง (Stiffness) ของไม้ลดลง สำหรับผลกระทบของความหนาแน่น กราฟโครงร่างแสดงอย่างชัดเจนว่า เมื่อความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ทั้งค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น เนื่องจากเมื่อวัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบมีการยึดเกาะที่แน่นหนาและช่องว่างภายในหรือรูพรุนมีขนาดที่เล็กลง หรือลดลง ทำให้การถ่ายทอดแรงจากเมทริกซ์พลาสติกสู่ผงไม้ที่เป็นตัวเสริมแรงมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาการอัดต่อ (ก) ความแข็งแรงดึง และ (ข) มอดุลัสการดึง

3.3 ผลกระทบของพารามิเตอร์การขึ้นรูปต่อสมบัติการดึง

สมการถดถอยของรูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งสำหรับความแข็งแรงดึง (TS) และมอดุลัสการดึง (TM) คือ

$$TS = 17.69 + 1.39x_1 + 0.50x_2 + 0.76x_3 - 1.76x_1^2 + 0.71x_2^2 \quad (3)$$

$$TM = 145.21 + 4.92x_1 + 2.60x_2 + 3.77x_3 - 4.29x_1^2 - 3.79x_2^2 \quad (4)$$

สมการถดถอยของความแข็งแรงดึงและมอดุลัสการดึงแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (x_1) ระยะเวลาการอัด (x_2) และความหนาแน่น (x_3) มีค่าเป็นบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสการดึงเพิ่มขึ้น และเมื่อนำสมการถดถอยของความแข็งแรงดึงและมอดุลัสการดึงมาสร้างกราฟโครงร่างดังแสดงในรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสการดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองที่คล้ายคลึงกับสมบัติการดึงคือ เมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 195°C พบว่าทั้งค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสการดึงลดลงอย่างช้าๆ ตาม

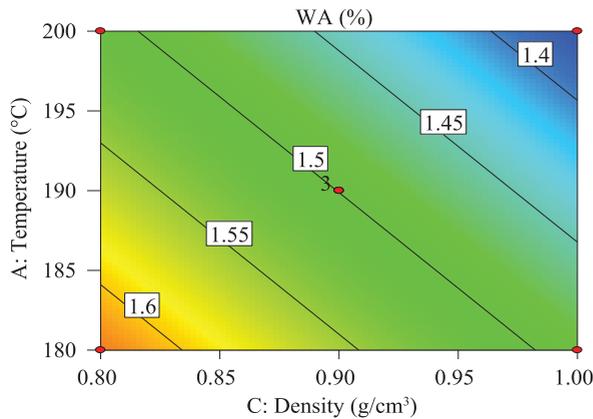
อุณหภูมิที่สูงขึ้น เหตุผลของพฤติกรรมเหล่านี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับสมบัติการดึงว่า เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของเมทริกซ์พลาสติก สำหรับผลกระทบของระยะเวลาการอัด พบว่าทั้งค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสการดึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาการอัดเกินกว่า 11 min พบว่าค่ามอดุลัสการดึงลดลงอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาการอัดที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้กราฟโครงร่างยังพบด้วยว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น ส่งผลให้ทั้งความแข็งแรงดึงและมอดุลัสการดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น

3.4 ผลกระทบของพารามิเตอร์การขึ้นรูปต่อสมบัติการดูดซับน้ำ

สมการถดถอยของรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรงสำหรับสมบัติการดูดซับน้ำ (WA) คือ

$$WA = 1.50 - 0.056x_1 - 0.034x_2 - 0.068x_3 \quad (5)$$

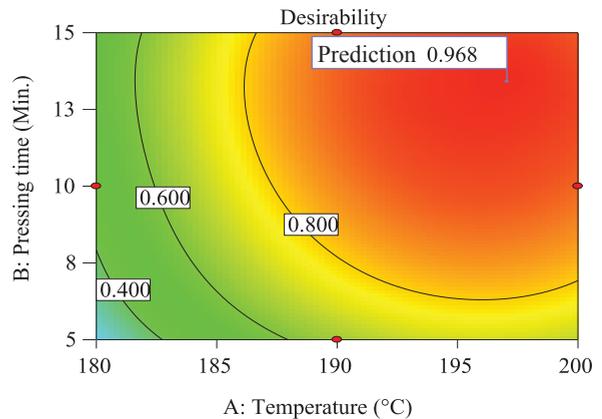
สมการถดถอยของสมบัติการดูดซับน้ำแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (x_1) ระยะเวลาการอัด (x_2) และความหนาแน่น (x_3) มีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้อย่างพาราไมการดูดซับน้ำลดลง และเมื่อพิจารณาค่า



รูปที่ 4 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอุณหภูมิและความหนาแน่นต่อสมบัติการดูดซับน้ำ

สัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยพบว่า ค่าความหนาแน่นมีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด นั่นหมายความว่า ความหนาแน่นมีผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราสูงที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ และระยะเวลาการอัดมีผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับน้ำที่น้อยที่สุด

นอกจากนี้สมการถดถอยของสมบัติการดูดซับน้ำสามารถนำมาสร้างกราฟโครงร่างเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความหนาแน่นส่งผลให้การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบลดลงอย่างเป็นเส้นตรงตามอุณหภูมิและความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้การหลอมเหลวของเมทริกซ์พลาสติกภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลและอนุภาคภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ดีขึ้น ตลอดจนลดช่องว่างหรือรูพรุนในโครงสร้างซึ่งเปรียบเสมือนการลุดที่อยู่อาศัยให้กับน้ำ ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงดูดซับน้ำลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับเหตุผลของความหนาแน่นเกิดขึ้นจากเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบมีการประสานที่แน่นหนาเพิ่มขึ้น ทำให้การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างเป็นไปได้ยากขึ้น ตลอดจนที่อยู่อาศัยของน้ำลดลงเช่นกัน ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้



รูปที่ 5 กราฟโครงร่างของค่าความพึงพอใจในพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันของทุกสมบัติ

จึงดูดซับน้ำลดลงตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และจากกราฟแสดงด้วยว่าความชันการลดลงของการดูดซับน้ำเกิดขึ้นจากผลกระทบของความหนาแน่นมากกว่าอุณหภูมิ สิ่งนี้เป็นไปได้ว่าด้วยระยะเวลาการแช่ 24 h ความหนาแน่นภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบมีอิทธิพลต่อการดูดซับน้ำมากกว่าความสามารถการยึดเกาะในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

3.5 พารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด

การหาพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารา โดยให้ค่าความแข็งแรงดัด มอดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ มีค่าที่เหมาะสมที่สุดร่วมกัน สามารถทำได้ด้วยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน (Overlay Plot) ของกราฟพื้นผิวตอบสนองแต่ละตัว ซึ่งกำหนดให้ค่าเป้าหมายของค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสการดึง มีค่าสูงที่สุด แต่การดูดซับน้ำมีค่าต่ำที่สุด จากการวิเคราะห์พบว่าพารามิเตอร์การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ มีค่าความพึงพอใจ (Desirability Score) 0.968 ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยมีพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 197°C ระยะเวลาการอัด 13 min และความหนาแน่น 1.0 g/cm³



ตารางที่ 5 สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันของทุกสมบัติ และผลตอบสนองจากการทำนายและการทดลองจริง

	Variable Factors			Response				
	Temperature (°C)	Pressing time (min)	Density (g/cm ³)	MOR (MPa)	MOE (GPa)	TS (MPa)	TM (MPa)	WA (%)
Predicted	197	13	1.0	32.6	1.67	19.2	150.3	1.37
Observed				33.1	1.70	18.5	153.2	1.34
Standard Deviation				(2.07)	(0.22)	(3.11)	(0.167)	(0.45)

* ค่าในวงเล็บ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง

ดังแสดงในตารางที่ 5 อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพว่าตรงตามการวิเคราะห์จริงหรือไม่ ดังนั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

จากการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้พารามิเตอร์การขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีความแตกต่างสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทดลองจริง 3.78% ซึ่งเกิดขึ้นในสมบัติความแข็งแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยเป็นค่าที่น้อยมากไม่เกิน 5%

4. สรุป

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และวิธีพื้นผิวตอบสนองมีการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอัดร้อน ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น และเพื่อหาพารามิเตอร์การขึ้นรูปการอัดร้อนที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารา จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าอุณหภูมิการอัดร้อน ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึง ความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึง และสมบัติการดูดซับน้ำ และพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอัดร้อน ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น ส่งผลให้สมบัติการดึงและการดึงเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับน้ำลดลงอย่างชัดเจน เมื่ออุณหภูมิขึ้นรูปสูงขึ้น การหลอมเหลวของพลาสติกเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ทำให้การประสานหรือการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลเมทริกซ์พลาสติกสมบูรณ์

และแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตลอดจนวัสดุเชิงประกอบดูดซับน้ำลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิเกิน 195°C ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดึง และโมดูลัสการดึงลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่เมื่อเวลาการอัดเกิน 11 min โมดูลัสการดึงและโมดูลัสการดึงลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้เมื่อนำเทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟพื้นผิวตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน ซึ่งกำหนดให้ค่าเป้าหมายของความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึง ความแข็งแรงดึง และโมดูลัสการดึงมีค่าสูงที่สุด แต่การดูดซับน้ำมีค่าต่ำที่สุด พบว่าพารามิเตอร์การขึ้นรูปอัดร้อนที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราประกอบด้วย อุณหภูมิการอัดร้อน 197°C ระยะเวลาอัด 13 min และความหนาแน่น 1.0 g/cm³ โดยมีค่าความพึงพอใจ 0.968 และพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้มีสมบัติแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายไม่เกิน 3.78%

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนบทความนี้ และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ตลอดการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Xie, C. A. S. Hill, Z. Xiao, H. Militz, and C. Mai, "Silane coupling agents used for natural fiber/



- polymer composites: A review,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 7, pp. 806–819, 2010.
- [2] C. Homkhiew, “Development and applications of natural fiber/thermoplastic composites for industrial,” *Journal of Industrial Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 97–110, 2014 (in Thai).
- [3] J. M. Pilarski and L. M. Matuana, “Durability of wood flour–plastic composites exposed to accelerated freeze–thaw cycling. Part I. Rigid PVC matrix,” *Journal of Vinyl and Additive Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2005.
- [4] A. Nourbakhsh and M. Kouhpayehzadeh, “Mechanical properties and water absorption of fiber–reinforced polypropylene composites prepared by bagasse and beech fiber,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 114, no. 1, pp. 653–657, 2009.
- [5] A. E. Slaughter, “Design and fatigue of a structural wood–plastic composite,” M.S. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, WA, 2004.
- [6] S. Rimdusit, W. Smittakorn, S. Jittarom, and S. Tiptipakorn, “Highly filled polypropylene rubber wood flour composites,” *Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 17–30, 2011.
- [7] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, “Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design,” *Khon Kaen University Research Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 780–793, 2014 (in Thai).
- [8] S. Prasertsan and P. Vanaprak, “Rubber plantations: An overlooked dendropower option,” in *Options for Dendro Power in Asia: Report on the Expert Consultation*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Manila, 1998.
- [9] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang, “Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: Effects of composition on mechanical properties,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 28, no. 2, pp. 179–194, 2015.
- [10] T. Ratanawilai, P. Lekanukit, and S. Urapantamas, “Effect of rubberwood and palm oil content on the properties of wood–polyvinyl chloride composites,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, no. 6, pp. 719–730, 2014.
- [11] J. Prachayawarakorn, S. Khunsumled, C. Thongpin, A. Kositchaiyong, and N. Sombatsompop, “Effects of silane and MAPE coupling agents on the properties and interfacial adhesion of wood–filled PVC/LDPE blend,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 108, no. 6, pp. 3523–3530, 2008.
- [12] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang, “The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, pp. 350–357, 2014.
- [13] L. M. Matuana and F. Mengelöglu, “Manufacture of rigid PVC/wood–flour composite foams using moisture contained in wood as foaming agent,” *Journal of Vinyl and Additive Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 264–270, 2002.
- [14] N. M. Stark and L. M. Matuana, “Ultraviolet weathering of photostabilized wood–flour filled high–density polyethylene composites,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 90, no. 10, pp. 2609–2617, 2003.
- [15] N. Mahae, D. Awapak, and D. Pichairat, “Optimization of high protein content protein hydrolysate extraction from hard clam (meretrix



- casta) using response surface methodology,” *Khon Kaen University Science Journal*, vol. 43, no. 3, pp. 425–438, 2015.
- [16] Z. Jun, W. Xiang–Ming, C. Jian–min, and Z. Kai, “Optimization of processing variables in wood–rubber composite panel manufacturing technology,” *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 7, pp. 2384–2391, 2008.
- [17] C. Saikaew, S. Wiengwiset, and A. Sriboonruang, “Improving the properties of sand molds in the iron casting industry using mixture experiments,” *Khon Kaen University Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 169–178, 2011 (in Thai).
- [18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 7 ed., John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [19] C. Homkhiew, S. Rawangwong, and W Boonchouytan, “Optimizing condition for manufacturing the binderless particleboard by response surface methodology,” *Journal of Industrial Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 40–55, 2015 (in Thai).
- [20] C. A. Harper and E. M. Petrie, *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [21] A. K. Vegt, *From Polymers to Plastics*, Delft University Press., 2002.