



สูตรการผสมที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองต่อสมบัติแรงดัดของ วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สำหรับวัสดุโครงสร้างที่สัมผัสความชื้นสูง ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร^{1*} อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹ ชาตรี หอมเขียว^{1,2} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2} และ ธเนศ รัตนวิไล³

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 กันยายน 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 1 ธันวาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 13 ธันวาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 กุมภาพันธ์ 2565

บทคัดย่อ: การออกแบบการทดลองแบบผสมถูกใช้ในการกำหนดเพื่อหาสูตรการผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) โดยมีปัจจัยในการออกแบบการทดลอง คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล, ซีลี้อยไม้ยางพารา, นาโนเคลย์, สารควบคู่ และสารหล่อลื่น ตามลำดับ ตัวอย่างการทดลองถูกเตรียมด้วยกระบวนการอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Extrusion) และการอัดร้อน (Hot-Press) ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และหาค่าสูตรผสมที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) จากผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยทั้งหมดในการออกแบบมีผลกระทบต่อสมบัติแรงดัดและการดูดซับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กล่าวคือ สมบัติแรงดัดจะมีค่าลดลงเมื่อชั้นงานตัวอย่างผ่านการแช่น้ำระยะเวลา 1 และ 3 เดือน นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของนาโนเคลย์ส่งผลให้สมบัติแรงดัดเพิ่มขึ้น แต่สมบัติการดูดซับน้ำลดลง ตามลำดับ ซึ่งสูตรการผสมที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (50.7 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (36.1 wt%) นาโนเคลย์ (9.2 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และสารหล่อลื่น (1.0 wt%) ที่ความพึงพอใจ 0.936 แสดงว่า ตัวแบบการทดลองสามารถทำนายการตอบสนองได้ในระดับความพึงพอใจถึง 93.60% ซึ่งมีค่าที่สูง ตามลำดับ

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลองแบบผสม; พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล; ซีลี้อยไม้ยางพารา; สมบัติแรงดัด; พื้นผิวตอบสนอง

Response Surface Optimization on Flexural Properties of Wood-Plastic Composites for Structure Materials Exposed to High Moisture Content

Chainarong Srivabut^{1*}, Apichon Thongmung Kamnerdwam¹, Chatree Homkhiew^{1,2},
Surasit Rawangwong^{1,2} and Thanate Ratanawilai³

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

³ Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

* Corresponding author, E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

Received: 25 September 2021; Revised: 1 December 2021; Accepted: 13 December 2021

Online Published: 9 February 2022

Abstract: Mixture design was used to determine the optimal formulation of wood-plastic composites (WPCs). Factors were recycled polypropylene (rPP), rubberwood sawdust (RWS), nanoclay (NC), maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP), and lubricant (WAX). The specimens were prepared from an extrusion and compression molding machine. The experimental results were evaluated using analysis of variance (ANOVA) and optimized using response surface methodology (RSM). The results showed that all of the factors significantly ($p < 0.05$) affected the flexural and water absorption properties of WPCs. The flexural properties (MOR and MOE) decreased after immersion in water for periods of 1 and 3 months. The increase of the NC content increased the flexural properties but decreased the water absorption. The optimal formulation for overall properties had consisted of 50.7 wt% rPP, 36.1 wt% RWS, 9.2 wt% NC, 3.0 wt% MAPP, and 1.0 wt% WAX. The desirability of the overall properties was 0.936, suggesting that the model was able to predict the response to an adequate extent of 93.60%.

Keywords: Mixture design, Recycled polypropylene, Rubberwood sawdust, Flexural properties, Response surface methodology



1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites: WPCs) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากจากนักวิจัย ผู้บริโภค และอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไป WPCs ประกอบด้วยวัสดุหลัก 2 ชนิด ได้แก่ พลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และไม้ ซึ่งเป็นวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักเหล่านั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) [1, 2] นอกจากนี้ กระบวนการผลิต WPCs สามารถใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในการผลิต WPCs เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และความร้อนให้ดียิ่งขึ้น อาทิเช่น โลหะ เซรามิก และวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น [3]

เมทริกซ์ (Matrix) ในผลิตภัณฑ์ WPCs คือ พลาสติก โดยทั่วไปพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ เทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) พอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นส่วนที่ห่อหุ้มและยึดส่วนของวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน ดังนั้น พอลิเมอร์เมทริกซ์มักมีความเหนียวสูง มีความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง มีหน้าที่หลักคือ รักษาความเสถียรในรูปร่างและขนาดของวัสดุผสมพอลิเมอร์ ช่วยทำให้วัสดุเสริมแรงกระจายตัวสามารถกระจายถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังวัสดุเสริมแรงได้ และช่วยให้วัสดุมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ [4] ซึ่งพลาสติกที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานในอุตสาหกรรมคือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride: PVC) พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) และพอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) ซึ่งพลาสติกเหล่านี้มี

สมบัติเด่นคือ ทนความร้อนสูง มีความหนาแน่นต่ำ และสามารถนำไปขึ้นรูปและใช้งานในลักษณะต่างๆ ได้ เช่น บรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ และชิ้นส่วนรถยนต์ [5] นอกจากนี้ PP ยังมีสมบัติเชิงกลเหนียว ทนต่อแรงดึง และทนต่อแรงกระแทกได้ดี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมากในสภาวะที่อุณหภูมิสูง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) [6] ดังนั้น พลาสติกรีไซเคิลจึงมีความเหมาะสมในการนำมาวิจัยและประยุกต์ใช้งานเพื่อทดแทนหรือลดการใช้พลาสติกบริสุทธิ์ สามารถลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ ลดภาระการกำจัดขยะในพื้นที่กำจัดขยะ (Landfills) และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่พลาสติกรีไซเคิล [7]

วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ที่นำมาใช้ในการผสมกับพลาสติกคือ ไม้เลื่อยหรือผงไม้ ซึ่งไม้ในธรรมชาติจะมีปริมาณลดลงเป็นอย่างมากเนื่องจากความต้องการทางสังคม เศรษฐกิจ และทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การทำเฟอร์นิเจอร์ โครงสร้าง และการใช้งานด้านอื่นๆ ส่งผลทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตนั้นมีจำนวนเพิ่มขึ้นเช่นกัน [8, 9] สำหรับการทำให้เฟอร์นิเจอร์และไม้ปาร์ติเคิล โดยที่ต้นไม้ 1 ต้น จะประกอบไปด้วยลำต้นที่นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพียง 10% อีก 90% จะประกอบด้วย พวงกิ่งก้านเล็กๆ 54% ผงไม้จากโรงเลื่อย 32% และจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ 4% [10] และในลักษณะของผงไม้ที่ได้จากของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม ทำให้ในปัจจุบันมีการนำมาใช้ประโยชน์โดยการนำไปผลิตเป็นไม้แผ่นชนิดต่างๆ เช่น ไม้อัดเนื้ออ่อน (Plywood) แผ่นใยไม้อัดแข็ง (Hardboard) และแผ่นเอ็มดีเอฟ (Medium Density Fiberboard: MDF) [11, 12]

กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ WPCs สามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การอัดร้อน (Hot Press) การอัดรีด (Extrusion) และการฉีด (Injection) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีกรรมวิธีใหม่ๆ ที่สามารถขึ้นรูป WPCs ให้มีความหลากหลายในการใช้งานมากยิ่งขึ้น [13, 14] WPCs สามารถใช้งานได้หลายลักษณะงาน เช่น โครงสร้างอาคาร การทำของเล่นเด็กและผู้สูงอายุ และงานตกแต่งอาคารสถานที่ ดังนั้น WPCs จึงต้องมีสมบัติเชิงกลและกายภาพที่ดี มีความแข็งแรงเหนียว ทนต่อการสึกหรอ ทนต่อแรงเสียดทาน และทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรง [15] ในปัจจุบันความต้องการของผลิตภัณฑ์ WPCs มีจำนวนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ มีความทนทาน ต้านทานเชื้อราสูง ดูดซับน้ำน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [15-17] นอกจากนี้ สมบัติเด่นของ WPCs คือ ปราศจากมอดและแมลงต่างๆ มีอายุการใช้งานนาน สามารถใช้งานกลางแจ้งและในร่มได้ดี มีความยืดหยุ่น และโค้งงอได้ดีเมื่อเทียบกับพลาสติกและไม่ในธรรมชาติ [18]

เนื่องจากเป้าหมายของงานวิจัยนี้เป็นการสร้างวัสดุที่ใช้งานทางด้านโครงสร้าง ดังนั้น เมื่อมีการใช้งานในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดความไม่แน่นอนด้านความเสถียรของ WPCs ในการนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขสถานที่โล่งแจ้ง และสัมผัสกับความชื้นสูง ทำให้มีข้อจำกัดต่อการใช้งาน และเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อ WPCs คือ อุณหภูมิ ความชื้น และเวลาการใช้งาน ส่งผลให้ WPCs มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลชีวภาพ และเคมี [13, 19] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษามบัตินแรงดัดของ WPCs ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญที่สุดในการกระทำของแรงภายนอกและ

ภายในสำหรับวัสดุโครงสร้าง โดยทำการศึกษามบัตินแรงดัดและการดูดซับน้ำของ WPCs ที่ผ่านการสัมผัสความชื้นเป็นระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งเป็นเวลาที่ WPCs อิ่มตัวหลังสัมผัสความชื้น เพื่อใช้ในการออกแบบพัฒนา และสร้างผลิตภัณฑ์ WPCs โดยทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบ D-Optimal ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปเพื่อหาอัตราส่วนผสมของสารหรือวัสดุ โดยยึดหลักว่าผลรวมปริมาณของปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 100% นอกจากนี้ ข้อดีของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการนี้ คือ ลดจำนวนสถานะในการทดลอง [1, 6] จากนั้น ทำการวิเคราะห์ปัจจัยส่วนผสมด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) ซึ่งวิธีการนี้เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ [5, 16] เพื่อการออกแบบสูตรการผสมสำหรับการนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างการทดสอบ WPCs ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (Recycled Polypropylene: rPP) ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) ขี้เลื่อยหรือผงไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust: RWS) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้กับพลาสติก



(Reinforcement) นาโนเคลย์ (Nanoclay: NC) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงเช่นเดียวกับซีลี้อยู่ไม่ยั้ง พารา สารควบคู่ (Maleic Anhydride-Grafted Polypropylene: MAPP) เพื่อช่วยการเพิ่มการยึดเกาะของสารผสมสำหรับการผลิตเม็ดวัสดุผสม และสารหล่อลื่น (Paraffin Wax: WAX) เพื่อช่วยให้วัสดุที่ทำการผสมมีการไหลตัวที่ดีในขั้นตอนการผสม โดยมีช่วงอัตราส่วนการผสม ดังแสดงในตารางที่ 1 ก่อนการผสมซีลี้อยู่ไม่ยั้งพาราถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh (<180 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม.

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการผสมในการผลิต WPCs

Compositions	Low	High
rPP (x_1)	45.0	55.0
RWS (x_2)	35.0	45.0
NC (x_3)	5.0	10.0
MAPP (x_4)	3.0	3.0
WAX (x_5)	1.0	1.0

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของ WPCs สำหรับวัสดุโครงสร้างที่สัมผัสความชื้นสูง โดยทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Experiment Design) ในรูปแบบของ D-Optimal [1, 5, 6] ซึ่งเป็นการออกแบบโดยการกำหนดช่วงอัตราส่วนผสมของการทดลอง และรวมอัตราส่วนทั้งหมดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (x_1) ซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา (x_2) นาโนเคลย์ (x_3) สารควบคู่ (x_4) และ

สารหล่อลื่น (x_5) ตามลำดับ มีการออกแบบการทดลองทั้งหมด 16 สูตร (Run) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมบัติแรงดัดก่อนและหลังการดูดซับน้ำ รวมถึงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเป็นระยะเวลา 3 เดือน คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ($45.0 \leq x_1 \leq 55.0$) wt% ซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา ($35.0 \leq x_2 \leq 45.0$) wt% และนาโนเคลย์ ($5.0 \leq x_3 \leq 10.0$) wt% โดยสารควบคู่และสารหล่อลื่นถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ เนื่องจากสารควบคู่ (x_4) และสารหล่อลื่น (x_5) มีหน้าที่หลัก คือ ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา และช่วยให้วัสดุที่ทำการผสมมีการไหลตัวที่ดีในขั้นตอนการผสม นอกจากนี้ ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยมีสมการทั่วไปของรูปแบบจำลองดังนี้

1. Linear Model

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i \quad (1)$$

2. Quadratic Model

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

เมื่อ E(Y) คือ ผลการทำนายของการทดลอง; ค่า β_i และ β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม; ค่า x_i คือ ปัจจัยหลัก; ค่า x_i, x_j คือ ปัจจัยร่วม



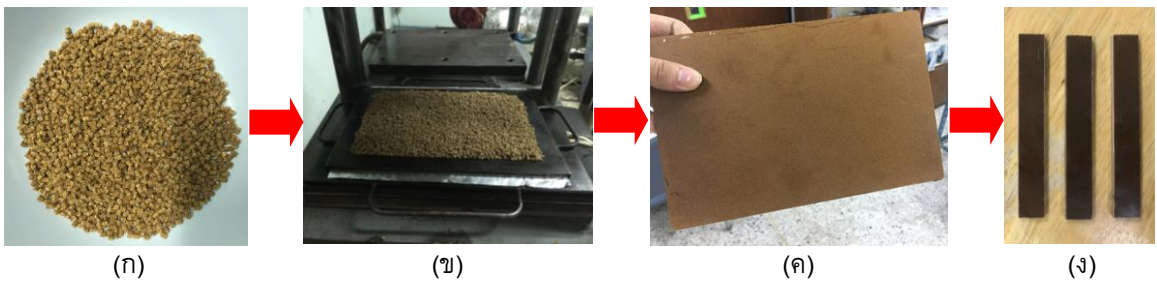
2.3 การขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ

การขึ้นรูปเม็ด WPCs โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวทวนคู่ (Twin Screw Extruder) รุ่น SHJ-36 จากบริษัท เอ็นแมช จำกัด ประเทศไทย มีการควบคุมอุณหภูมิหลอมเหลว 7 ช่วง คือ 170 175 180 185 185 190 และ 200 °C ตามลำดับ ความเร็วรอบของเกลียวทวน คือ 40 รอบ/นาที จากนั้นทำการตัดเม็ด WPCs ให้มีขนาด 2-3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) เพื่อเตรียมการกดอัดด้วยเครื่องอัดร้อน (Hot Press)

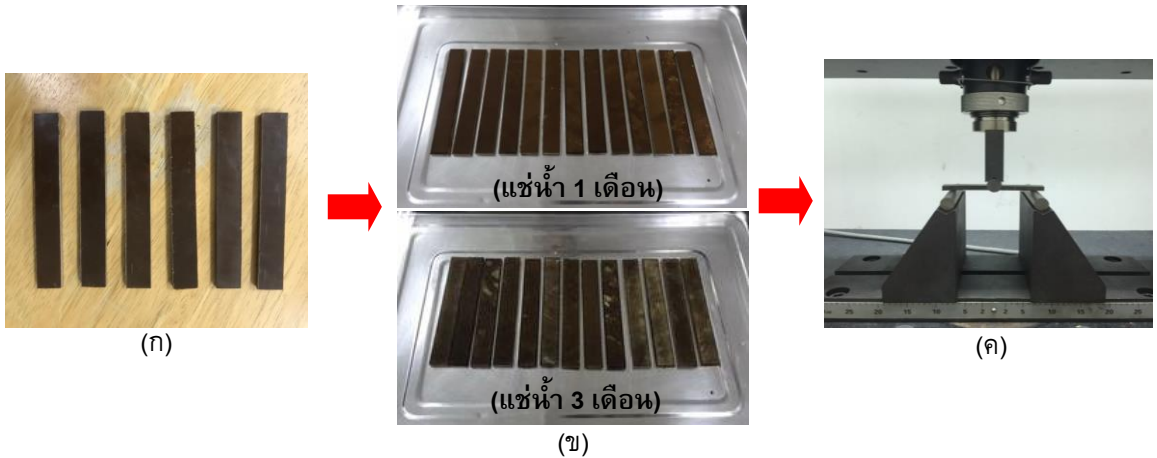
การขึ้นรูปแผ่น WPCs โดยการนำเม็ด WPCs ที่เตรียมไว้จากการผสมเทลงไปในเครื่องอัดร้อน (Compression Molding Machine) ซึ่งมีขนาดแม่พิมพ์ คือ 16 ซม. x 28 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) มีการควบคุมอุณหภูมิหลอมเหลว 190 °C เป็นเวลา 20 นาที ประกอบด้วย การอุ่นแม่พิมพ์ (Pre-Heading) เป็นเวลา 5 นาที กดอัด (Compress) เป็นเวลา 10 นาที และหล่อเย็นด้วยอากาศ (Air Cooling) เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ จะได้แผ่น WPCs ดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) หลังจากนั้นทำการตัดแผ่น WPCs ตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละประเภทดังแสดงในรูปที่ 1 (ง)

2.4 การทดสอบแรงดัด

การทดสอบแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) และ (Modulus of Elasticity; MOE) เป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D 790-92 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น NRI-TS500-50 จาก บริษัท นรินทร์ อินสตรูमेंท์ จำกัด ประเทศไทย โดยเป็นการทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 13 มม. x 100 มม. x 4.8 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ขนาดบารองรับชิ้นงาน (Span Distance) มีระยะห่าง 80 มม. และความเร็วที่ใช้ทดสอบแรงดัด คือ 2 มม./นาที โดยทำซ้ำ 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 และ 3 เดือน ซึ่งเป็นระยะการอิมมัวสำหรับพฤติกรรมการดูดซับน้ำของ WPCs และเป็นปัจจัยที่กำหนดเพื่อการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ชับน้ำด้วยกระดาษทิชชู และทำการวัดค่าแรงดัดหลังจากตัวอย่างถูกแช่ในน้ำครบ 1 เดือน และ 3 เดือนตามลำดับ หลังจากนั้นชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ชับน้ำด้วยกระดาษทิชชู และทำการวัดค่าแรงดัดทันที ดังแสดงในรูปที่ 2 (ค)



รูปที่ 1 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ: (ก) การเตรียมเม็ด WPCs (ข) กระบวนการอัดร้อน (ค) แผ่นไม้อัดจาก WPCs และ (ง) ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2 กระบวนการทดสอบแรงดัดหลังการดูดซับน้ำ: (ก) การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (ข) นำชิ้นงานทดสอบการแช่น้ำ ระยะเวลา 1 และ 3 เดือน และ (ค) การทดสอบสมบัติแรงดัด

2.5 การทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water Absorption; WA) เป็นการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 570-88 ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างของการทดสอบมีขนาด 30 มม. × 30 มม. × 4.8 มม. ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อลดความชื้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นทำการแช่ชิ้นงานตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 3 เดือน ก่อนการแช่น้ำมีการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทันทีด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม เพื่อหาน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง และเพื่อเป็นข้อมูลในการหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ หลักจากชิ้นงานถูกแช่ครบเวลา 3 เดือน ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ชั่งน้ำหนักด้วยกระดาษชั่ง และถูกชั่งน้ำหนักทันที โดยการทำซ้ำ 5 ครั้ง และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) โดยใช้วิธี D-Optimal ซึ่งสามารถออกแบบสูตรในการทดลองได้ 16 สูตร (Run) โดยมี 5 ปัจจัย คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ชีลล์อิมัลชันพารา นาโนเคลย์ สารควบคู่ และสารหล่อลื่น เช่นเดียวกันกับค่าผลตอบแทนที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าสมบัติแรงดัด (MOR และ MOE) ก่อนและหลังการดูดซับน้ำ เป็นระยะเวลา 1 และ 3 เดือน และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (WA) ดังแสดงในตารางที่ 2

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมด้วยสถิติ

จากผลการตอบสนองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งแบบจำลองถดถอยที่เหมาะสมจะพิจารณาจาก



ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) รูปแบบ D-Optimal และผลการทดลอง

No	Compositions			Before WA (MPa)		After WA (MPa)				WA (%)
						1 Month		3 Month		
						x_1	x_2	x_3	MOR	
1	53.0	38.0	5.0	41.44	1.36	38.85	1.31	34.95	1.09	5.83
2	47.7	38.3	10.0	38.90	1.18	36.33	1.10	32.36	0.88	6.02
3	47.7	40.8	7.5	37.22	1.02	35.62	0.96	31.60	0.75	7.21
4	45.0	45.0	6.0	27.93	0.89	25.31	0.83	21.33	0.61	9.61
5	45.0	41.0	10.0	35.54	1.06	32.95	1.00	27.94	0.79	8.55
6*	45.0	41.0	10.0	37.79	1.09	35.09	1.03	31.11	0.81	8.09
7	50.4	40.6	5.0	37.77	1.24	35.10	1.17	31.13	0.92	7.54
8	50.5	37.8	7.7	43.07	1.35	40.45	1.29	35.45	1.08	5.58
9	55.0	35.0	6.0	35.88	1.47	33.27	1.42	29.27	1.19	5.48
10	47.9	43.1	5.0	32.77	1.02	30.17	0.95	26.57	0.74	7.88
11	51.0	35.0	10.0	42.55	1.33	39.90	1.28	35.90	1.04	5.86
12*	51.0	35.0	10.0	40.56	1.43	37.98	1.34	33.98	1.12	5.85
13	49.8	39.5	6.7	39.98	1.01	37.39	0.96	34.39	0.74	7.34
14*	55.0	35.0	6.0	36.22	1.46	33.92	1.39	30.01	1.18	5.53
15*	45.0	45.0	6.0	27.94	0.79	25.40	0.72	21.45	0.62	9.57
16*	49.8	39.5	6.7	41.28	1.06	38.67	1.02	34.57	0.81	7.39

หมายเหตุ: * คือ ค่า Lack-of-fit ของการทดลอง; x_4 และ x_5 เท่ากับ 3.0 และ 1.0 wt% ตามลำดับ

ค่าทางสถิติ ประกอบด้วย Sequential Model Sum of Squares มีนัยสำคัญ Adjusted Coefficient of Determination (Adj-R²) และ Predicted Coefficient of Determination (Pred-R²) มีค่าสูง และค่า Lack-of-fit ไม่มีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ค่า MOR ก่อนและหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 1 และ 3 เดือน มีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Model) ขณะที่ค่า MOE ก่อนและหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 1 และ 3 เดือน และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองเชิงเส้นตรง (Linear Model) ตามลำดับ โดยจากการเปรียบเทียบผลทางสถิติ พบว่า รูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า Adj-R² และ Pred-R² สูงกว่ารูปแบบจำลองอื่นๆ

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) พบว่า รูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า *P-value* ของ Lack-of-Fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ซึ่งกล่าวได้ว่า รูปแบบจำลองการถดถอยของแบบจำลองมีความสมบูรณ์กับข้อมูล และสามารถนำข้อมูลไปทำนายต่อได้ [4]

ตารางที่ 3 แสดงค่าการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของแต่ละการตอบสนอง สามารถสรุปได้ว่า ค่า R² ของทุกการทดลองมีค่าสูงและอยู่ในช่วง 87.44% - 93.23% ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบบจำลองการถดถอยควรมี R² มากกว่า 75.00% [6] นั้นหมายความว่าแบบจำลองนี้สามารถอธิบายความสามารถในการทำนายได้ดีและแบบจำลองมีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง นอกจากนี้



ตารางที่ 3 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง

Properties	Fitted Model	Sequential P-value	Lack-of-Fit P-value	R ² (%)	Adj-R ² (%)	Pred-R ² (%)	C.V. (%)
MOR Before WA	Quadratic	0.0003*	0.0952	92.22	88.33	80.44	4.21
MOE Before WA	Linear	<0.0001*	0.0783	87.44	85.50	83.31	6.84
MOR (1 Month)	Quadratic	0.0002*	0.1143	93.14	89.71	82.36	4.23
MOE (1 Month)	Linear	<0.0001*	0.0795	88.72	86.98	84.79	6.81
MOR (3 Month)	Quadratic	0.0002*	0.2420	93.23	89.85	81.49	4.72
MOE (3 Month)	Linear	<0.0001*	0.2298	88.46	86.69	85.25	7.88
WA	Linear	<0.0001*	0.2235	88.68	86.94	83.51	7.18

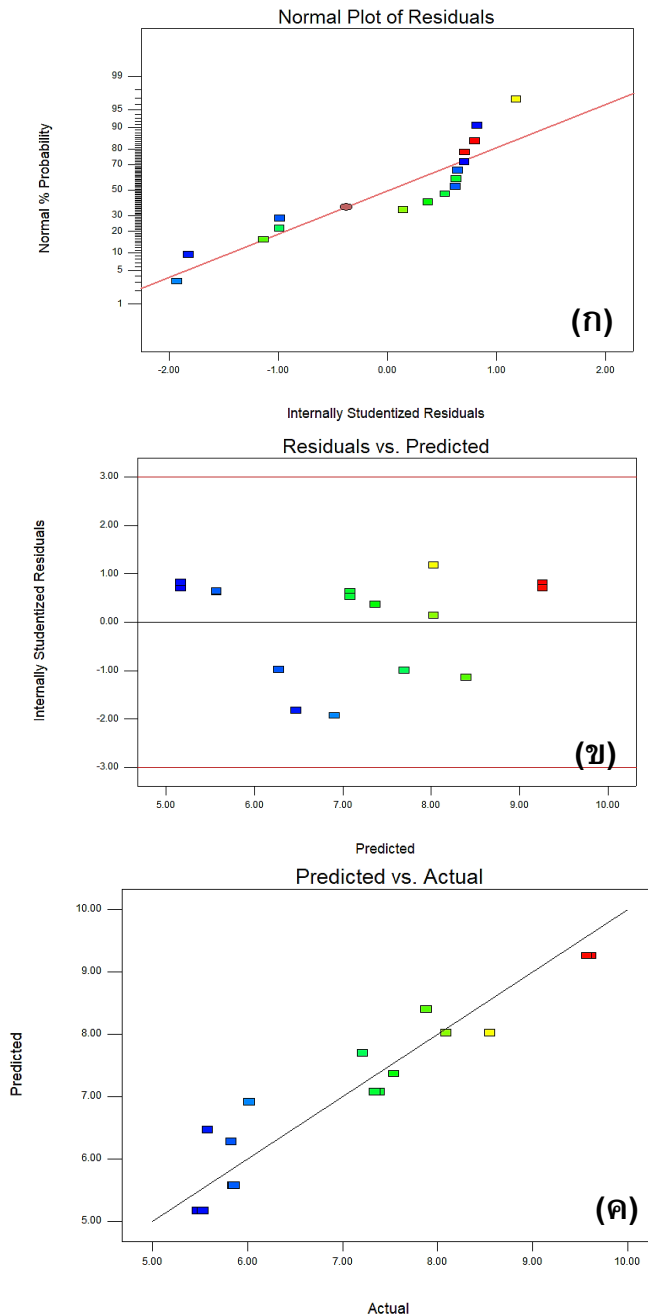
หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

ค่า Adj-R² มีค่าอยู่ในช่วง 85.50% - 89.85% ของแต่ละรูปแบบจำลองมีค่าที่สูงใกล้เคียงกันกับค่า R² ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมของการทดลอง และในส่วนของ Pred-R² ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 80.44% - 85.25% แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบจำลองการถดถอยนั้นสามารถทำนายค่าตอบสนองของข้อมูลใหม่ได้ดี นอกจากนี้พบว่า การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยค่า Coefficients of Variation (C.V.) ทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าระหว่าง 4.21%-7.88% สรุปได้ว่า การทดสอบสมบัติต่างๆ ของการทดลองมีความแม่นยำที่ดี และสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหรือสร้างรูปแบบจำลองได้ [4, 7]

3.2 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง

การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืนยันการทำนายของรูปแบบจำลองที่เหมาะสม [8] แสดงดังรูปที่ 3 ความพอเพียงของแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการตอบสนองพิจารณาจากค่าต่างๆ ประกอบด้วย การแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (Normal Plot of Residuals) ค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted) และค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs.

Actual) ตามลำดับ จากรูปที่ 3 (ก) เป็นการแสดงกราฟ Normal Probability ของ MOR ก่อนการดูดซับน้ำพบว่า ไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการตอบสนองมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ [10] นอกจากนี้ รูปที่ 3 (ข) จากกราฟอธิบายถึงค่าเศษเหลือต่อค่าการทำนายที่เกิดขึ้นกับการวิเคราะห์การทดลอง พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวเป็นแบบอิสระและมีการกระจายล้อมรอบเส้นตรงกึ่งกลาง (Center Line) ที่เท่าๆ กันของกราฟสรุปได้ว่า ค่าเศษเหลือไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน ข้อมูลจากการทดลองมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ ในส่วนของกราฟแสดงถึงค่าเศษเหลือต่อค่าการทดลองจริงการทดลอง รูปที่ 3 (ค) จะเห็นได้ว่า ค่าการทำนายและค่าจริงจากการทดลองมีความสัมพันธ์ ข้อมูลมีการกระจายและแนบชิดเป็นเส้นตรง ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ นอกจากนี้ ข้อมูลยังมีการกระจายตัวที่ไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ



รูปที่ 3 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง: (ก) การแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ
 (ข) ค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ค) ค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง



ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของรูปแบบจำลองของแต่ละการตอบสนอง

Source	P-value						
	Before WA		After WA (1 Month)		After WA (3 Month)		WA
	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	
Model	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
Linear Mixture	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
$X_1 X_2$	<0.0001*	-	<0.0001*	-	<0.0001*	-	-
$X_1 X_3$	0.2851	-	0.1650	-	0.1739	-	-
$X_2 X_3$	0.2139	-	0.1142	-	0.1466	-	-

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อค่าแรงตัด (MOR และ MOE) ก่อนการดูดซับน้ำ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า MOR และ MOE ก่อนการดูดซับน้ำมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ เชิงเส้นโค้งและเชิงเส้นตรง ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบจำลองทั้งสองนั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองทั้ง 2 นี้มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MOR และ MOE และตัวแปรต่างๆ ของการทดลองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสม แสดงดังสมการที่ 3 และ 4

$$\text{MOR} = -4.89x_1 - 9.01x_2 - 9.67x_3 + 0.30x_1x_2 + 0.19x_1x_3 + 0.22x_2x_3 \quad (3)$$

$$\text{MOE} = 0.04x_1 - 0.02x_2 + 0.02x_3 \quad (4)$$

จากสมการถดถอยข้างต้น สำหรับค่า MOR แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของซีลี้อยไม้ยางพารา (x_2) และนาโนเคลย์ (x_3) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (x_1) สรุปได้ว่า ปริมาณส่วนผสมของซีลี้อยไม้ยางพาราและนาโนเคลย์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MOR นอกจากนี้ สมการถดถอยสำหรับค่า MOE พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพิลีน

รีไซเคิล (x_1) มีค่ามากที่สุดและสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของซีลี้อยไม้ยางพารา (x_2) และนาโนเคลย์ (x_3) สรุปได้ว่า ปริมาณส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MOE โดยสมการถดถอยของการทดลองทั้ง 2 สามารถสร้างกราฟโครงร่าง (Contour Plot) และหาสูตรผสมที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติโดยวิธี RSM [16] โดยกราฟโครงร่างของค่า MOR และ MOE แสดงดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยมุมทั้ง 3 ของกราฟ ประกอบด้วยปัจจัย 3 ชนิด คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซีลี้อยไม้ยางพารา และนาโนเคลย์ จากกราฟทั้ง 2 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนการผสมมีผลต่อค่า MOR และ MOE อย่างชัดเจน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติแรงตัดของ WPCs คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซีลี้อยไม้ยางพารา และนาโนเคลย์ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของ WPCs นอกจากนี้ สูตรการผสมที่เหมาะสมของค่า MOR คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (49.7 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (36.9 wt%) นาโนเคลย์ (9.4 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และสารหล่อลื่น (1.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 41.89 MPa ที่ระดับความพึงพอใจ 0.922 หรือ 92.20% สำหรับสูตรการผสมที่เหมาะสมของค่า MOE คือ



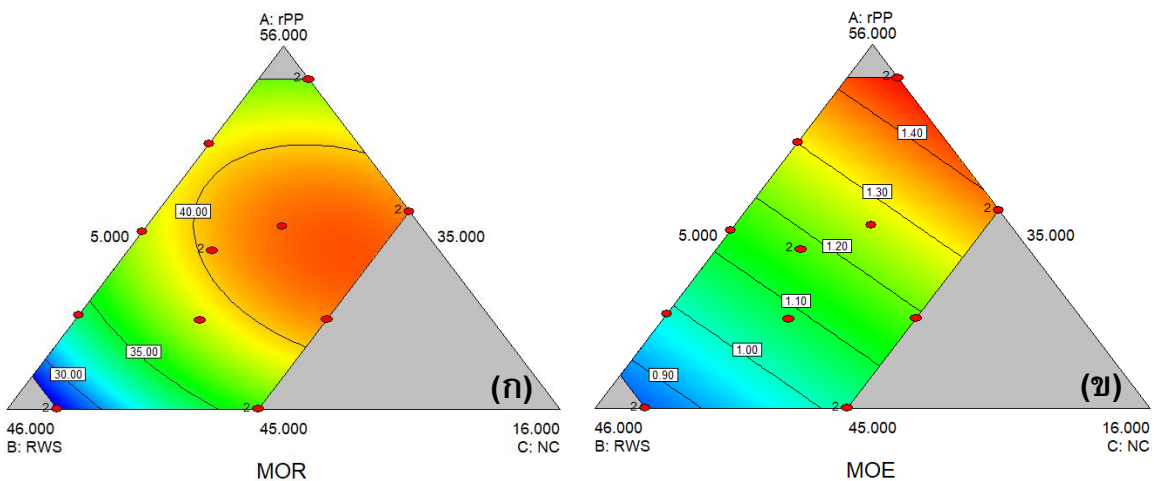
พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) นาโนเคลย์ (6.0 wt%) สารควมคุม (3.0 wt%) และ สารหล่อลื่น (1.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 1.46 GPa ที่ความพึงพอใจ 0.990 หรือ 99.00% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 5 จากผลการทำนายสูตรการผสม สังเกตได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของทั้ง 2 การทดลองมีค่าต่างกัน โดยการเพิ่มขึ้นของค่า MOR และ MOE ซึ่งมาจากปัจจัยหลักต่างชนิดกัน โดยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลซึ่งเป็นเมทริกซ์ทำหน้าที่เป็นส่วนที่ห่อหุ้มและยึดส่วนของวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันโดยมีสารควมคุมและสารหล่อลื่นช่วยในขั้นตอนการผสม นอกจากนี้ ซีลี้อยไม้ยางพาราและนาโนเคลย์ซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น [6, 16]

3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อค่าแรงดัด (MOR และ MOE) หลังการดูดซับน้ำ 1 เดือน

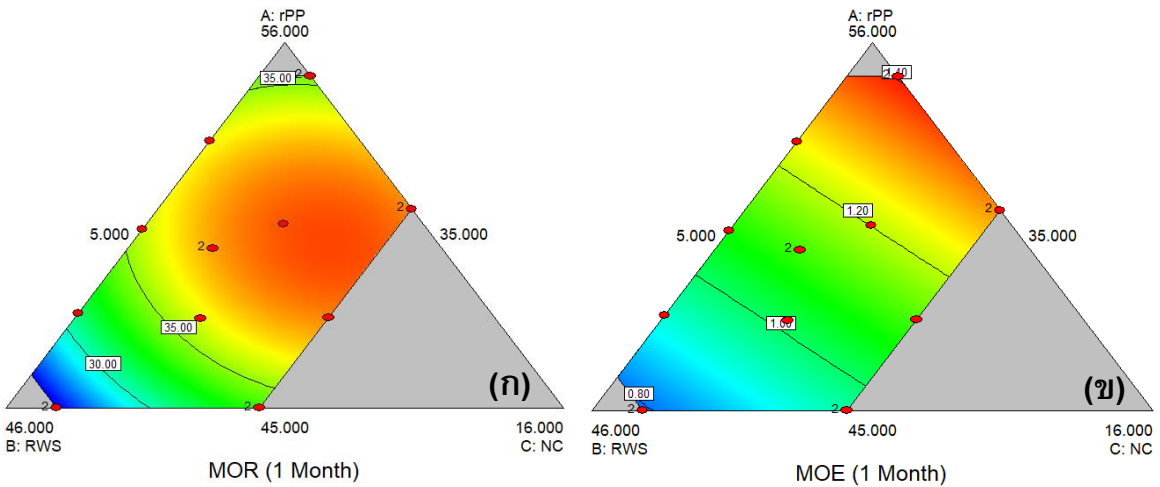
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า MOR และ MOE หลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 1 เดือน มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสมของการตอบสนอง คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งและเชิงเส้นตรง เช่นเดียวกับกับสมบัติแรงดัดก่อนการดูดซับน้ำ ซึ่งรูปแบบจำลองทั้ง 2 นั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองทั้ง 2 นี้มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MOR และ MOE หลังการดูดซับน้ำ และตัวแปรต่างๆ ของการตอบสนองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ 5 และ 6

$$\begin{aligned} \text{MOR (1 Month)} = & -4.98x_1 - 9.13x_2 - 13.50x_3 \quad (5) \\ & + 0.30x_1x_2 + 0.23x_1x_3 \\ & + 0.27x_2x_3 \end{aligned}$$

$$\text{MOE (1 Month)} = 0.03x_1 - 0.02x_2 + 0.02x_3 \quad (6)$$



รูปที่ 4 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมก่อนการดูดซับน้ำ: (ก) ค่า MOR และ (ข) ค่า MOE



รูปที่ 5 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 1 เดือน:
(ก) ค่า MOR และ (ข) ค่า MOE

จากสมการถดถอยสำหรับค่า MOR แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของซีลื้อยไม้ยางพารา (x_2) และนาโนเคลย์ (x_3) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (x_1) สรุปได้ว่า ปริมาณส่วนผสมของซีลื้อยไม้ยางพาราและนาโนเคลย์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MOR เนื่องจากปัจจัยทั้ง 2 ทำหน้าที่ในการเสริมแรงใน WPCs ส่งผลให้ค่า MOR มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ สมการถดถอยสำหรับค่า MOE แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (x_1) มีค่ามากที่สุดและสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของซีลื้อยไม้ยางพารา (x_2) และนาโนเคลย์ (x_3) สรุปได้ว่า ปริมาณส่วนผสมของพอลิโพรพีลีนรีไซเคิลมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MOE เช่นเดียวกับผลการศึกษาของสมบัติแรงดัดก่อนการดูดซับน้ำ นอกจากนี้ สมบัติแรงดัดหลังการดูดซับน้ำที่ระยะเวลา 1 เดือน ของการทดลองมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2 เหตุผลเนื่องมาจาก

ธรรมชาติการชอบน้ำของไม้ (Hydrophilic) เมื่อสัมผัสความชื้นสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการพองตัว ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติแรงดัดของ WPCs [2, 3, 20]

นอกจากนี้ กราฟโครงร่างของผลการตอบสนอง (Contour plot) แสดงผลการทำนายที่เหมาะสมของสมการถดถอยของทั้ง 2 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 5 (ก) และ (ข) โดยรูปที่ 5 (ก) แสดงกราฟโครงร่างของค่า MOE และ รูปที่ 5 (ข) แสดงกราฟโครงร่างของค่า MOR ตามลำดับ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนการผสมมีผลต่อสมบัติแรงดัดอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนซีลื้อยไม้ยางพารา ในช่วง 35 - 45 wt% ในวัสดุ WPCs ซึ่งตรงการข้ามกับการเพิ่มขึ้นพอลิโพรพีลีนรีไซเคิล ในช่วง 45 - 55 wt% ใน WPCs ส่งผลให้แรงดัดมีค่าลดลง นอกจากนี้ ระยะเวลาในการแช่น้ำมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติ



แรงดัดเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการแช่น้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติแรงดัดมีค่าลดลง [9, 19]

นอกจากนี้ สูตรผสมที่เหมาะสมของค่า MOR และ MOE หลังการดูดซับน้ำเป็นระยะเวลา 1 เดือน สามารถทำนายผลการตอบสนองได้จากวิธี RSM โดยสูตรการผสมที่เหมาะสมที่สุดของค่า MOR หลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 1 เดือน คือ พอลิโพรพีลีน (50.0 wt%) ซีลียไม้อย่างพารา (37.0wt%) นาโนเคลย์ (8.9 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt %) และสารหล่อลื่น (1.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 39.44 MPa ที่ระดับความพึงพอใจ 0.933 หรือ 93.30% และสำหรับสูตรการผสมที่เหมาะสมของค่า MOE หลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 1 เดือน คือ พอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลียไม้อย่างพารา (35.0 wt%) นาโนเคลย์ (6.0 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และ สารหล่อลื่น (1.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 1.41 GPa ที่ความพึงพอใจ 0.979 หรือ 97.90% ตามลำดับสังเกตได้ว่า สมบัติแรงดัดมีค่าลดลงเมื่อ WPCs ผ่านการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่า ค่า MOR มีค่าลดลงประมาณ 5.85% และค่า MOE มีค่าลดลงประมาณ 3.24% เมื่อเทียบกับค่าการทดสอบแรงดัดก่อนการแช่น้ำ

3.5 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อค่าแรงดัด (MOR และ MOE) หลังการดูดซับน้ำ 3 เดือน

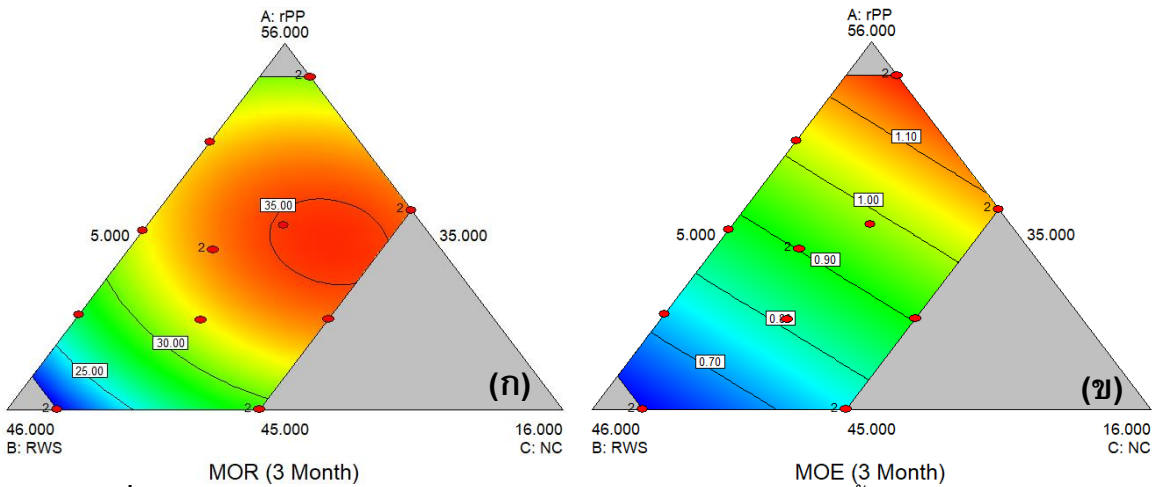
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า MOR และ MOE หลังการดูดซับน้ำเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งและเชิงเส้นตรง ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบจำลองทั้ง 2 นั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า รูป

แบบจำลองทั้ง 2 นี้มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า MOR และ MOE และตัวแปรต่างๆ ของการทดลองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสม แสดงดังสมการที่ 7 และ 8

$$\begin{aligned} \text{MOR (3 Month)} = & - 5.13x_1 - 9.20x_2 - 12.16x_3 \quad (7) \\ & + 0.30x_1x_2 + 0.23x_1x_3 \\ & + 0.24x_2x_3 \end{aligned}$$

$$\text{MOE (3 Month)} = 0.03x_1 - 0.02x_2 + 0.01x_3 \quad (8)$$

จากสมการถดถอยข้างต้น สำหรับค่า MOR มีค่าสัมประสิทธิ์ของซีลียไม้อย่างพารา (x_2) และนาโนเคลย์ (x_3) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (x_1) สรุปได้ว่า ปริมาณส่วนผสมของซีลียไม้อย่างพาราและนาโนเคลย์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MOR นอกจากนี้ สมการถดถอยสำหรับค่า MOE แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (x_1) มีค่ามากที่สุดและสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของซีลียไม้อย่างพารา (x_2) และนาโนเคลย์ (x_3) สรุปได้ว่า ปริมาณส่วนผสมของพอลิโพรพีลีนรีไซเคิลมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MOE นอกจากนี้ กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงการทำนายสูตรการผสมที่เหมาะสมของสมการถดถอยทั้ง 2 การตอบสนองแสดงดังรูปที่ 6 (ก) และ (ข) โดยรูปที่ 6 (ก) แสดงกราฟโครงร่างของค่า MOE และ รูปที่ 6 (ข) แสดงกราฟโครงร่างของค่า MOR ตามลำดับ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนการผสมมีผลต่อสมบัติแรงดัดหลังการดูดซับน้ำอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเติมสารนาโนเคลย์ซึ่งเป็นสารเติมแต่งใน WPCs จาก 5.0 - 10.0 wt% ในวัสดุ WPCs ช่วยในการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก่ WPCs อีกด้วย [4, 13, 14]



รูปที่ 6 กราฟโครงสร้างแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 3 เดือน:

(ก) ค่า MOR และ (ข) ค่า MOE

นอกจากนี้ สูตรผสมที่เหมาะสมของสมบัติแรงดัด หลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 3 เดือน สามารถทำนาย ได้จากวิธี RSM โดยสูตรการผสมที่เหมาะสมของค่า MOR คือ พอลิโพรพีลีน (50.0wt%) ซีลี้อยไม้ ยางพารา (37.1wt%) นาโนเคลย์ (8.9wt%) สารควคู้ (3.0wt%) และสารหล่อลื่น (1.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 35.33 MPa ที่ระดับ

ความพึงพอใจ 96.10% และสำหรับสูตรการผสมที่ เหมาะสมของค่า MOE คือ พอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) นาโนเคลย์ (6.0 wt%) สารควคู้ (3.0 wt%) และ สารหล่อลื่น (1.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 1.17 GPa ที่ความพึงพอใจ 97.00% แสดง ดังตารางที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติ ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และค่าความพึงพอใจ

Properties	Compositions (wt%)			Predicted Responses	Desirability
	x_1	x_2	x_3		
MOR Before WA (MPa)	49.7	36.9	9.4	41.89	0.922
MOE Before WA (GPa)	55.0	35.0	6.0	1.46	0.990
MOR 1 Month (MPa)	50.0	37.1	8.9	39.44	0.933
MOE 1 Month (GPa)	55.0	35.0	6.0	1.41	0.979
MOR 3 Month (MPa)	50.0	37.1	8.9	35.33	0.961
MOE 3 Month (GPa)	55.0	35.0	6.0	1.17	0.970
WA (%)	52.4	35.0	8.6	5.43	1.000

หมายเหตุ: x_4 และ x_5 เท่ากับ 3.0 และ 1.0 wt% ตามลำดับ

3.6 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซับน้ำ (WA)

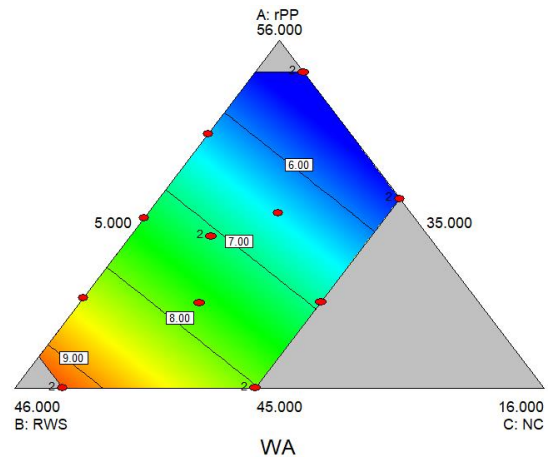
จากผลการทดลองทำการวิเคราะห์เชิงสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสมบัติการดูดซับน้ำเป็นระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งเป็นระยะการอิมตัวของ WPCs [10, 11, 13] แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า สมบัติการดูดซับน้ำมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสมคือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองนั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า ปัจจัยของอัตราส่วนผสมมีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีผลมาจากอัตราส่วนผสมของทั้ง 2 ปัจจัยซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของ WPCs โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณพลาสติกซึ่งทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) ทำให้การดูดซับน้ำลดลง เนื่องจาก พลาสติกมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้ WPCs คงทนและไม่เสียรูปง่ายจากการสัมผัสความชื้นเหมาะสมกับงานประเภทโครงสร้างที่มีการสัมผัสความชื้นสูง [7, 17]

นอกจากนี้ รูปแบบจำลองสามารถสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับน้ำและตัวแปรต่างๆ ของการทดลองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสม แสดงดังสมการที่ 9

$$WA = -0.10x_1 + 0.31x_2 - 7.55x_3 \quad (9)$$

จากสมการถดถอย พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของซีลี้อยไม้ยางพารา (x_2) มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (x_1) และนาโนเคลย์ (x_3) สรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมของซีลี้อยไม้ยางพารามีผลกระทบ

ต่อสมบัติการดูดซับน้ำอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อปริมาณซีลี้อยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงขึ้นด้วย เนื่องจากส่วนประกอบของไม้มีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยเฉพาะเซลลูโลส ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นสารที่ชอบดูดซับน้ำ เพราะหมู่ไฮดรอกซิล (Free OH Groups) ในเซลลูโลสจะทำปฏิกิริยากับขั้วโมเลกุลของน้ำ ทำให้แผ่นใยไม้อัดมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น [5, 16] การยืนยันสามารถเห็นได้จากกราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงการทำนายสูตรการผสมที่ดีที่สุดของสมการถดถอยของการตอบสนองแสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของสมบัติการดูดซับน้ำ คือ พอลิโพรพีลีนรีไซเคิล (52.4 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) นาโนเคลย์ (8.6 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และ สารหล่อลื่น (1.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 5.43% ที่ความพึงพอใจ 100% แสดงดังตารางที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 7 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่อค่าการดูดซับน้ำ

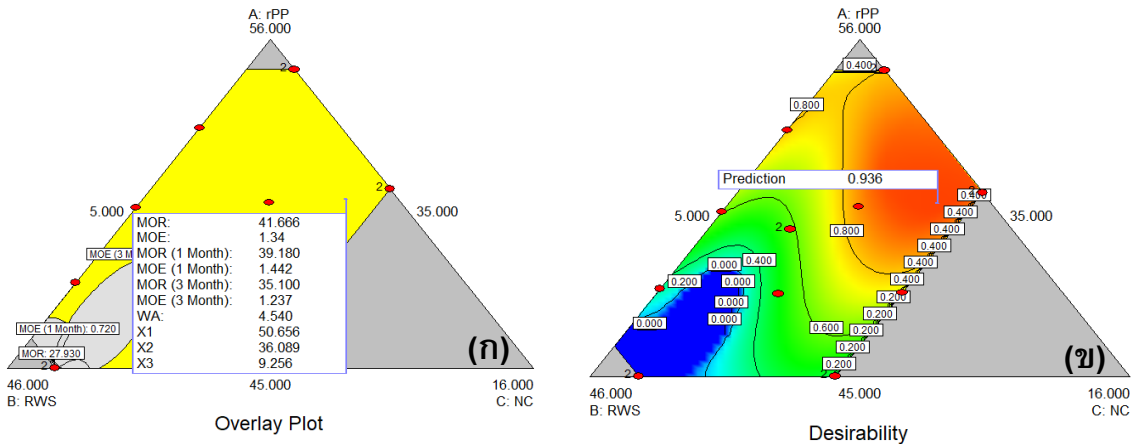


3.7 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของทุกสมบัติรวมกัน

การวิเคราะห์การตอบสนองด้วย RSM ถูกใช้ในการทำนายอัตราส่วนที่ดีที่สุดของ WPCs ซึ่งมีการตอบสนอง ประกอบด้วย สมบัติแรงดัดก่อนและหลังการดูดซับน้ำ 1 และ 3 เดือน และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ สามารถทำนายได้โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน (Overlay plot) ของกราฟเส้นโครงร่างสำหรับผลตอบสนองแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) โดยมีการกำหนดเงื่อนไขให้สมบัติแรงดัดมีค่าสูงที่สุด (Maximize) แต่การดูดซับน้ำมีค่าต่ำที่สุด (Minimize) จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกการตอบสนองคือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (50.7wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (36.1 wt%) นาโนเคลย์ (9.2 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และ สารหล่อลื่น (1.0 wt%) ที่ความพึงพอใจ 0.936 หรือ 93.60% ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) นอกจากนี้ เพื่อยืนยันความถูกต้องและแม่นยำของการออกแบบการทดลอง และค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย สูตรที่เหมาะสมของการผสมทำการขึ้นรูปและทดสอบอีกครั้งเพื่อหาค่าการทดลองจริง (Observed) แสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงกัน โดยค่าที่มีความแตกต่างกันสูงสุด คือ ค่า MOR ที่ผ่านการดูดซับน้ำในระยะเวลา 1 เดือน ซึ่งต่างกัน 4.51% โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.96 ตามลำดับ

4. บทสรุป

การทดลองแบบผสมและวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ถูกใช้เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราส่วนผสมของ WPCs และเพื่อให้ได้สูตรการผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของ WPCs ในสถานะของงานที่มีการสัมผัสความชื้นสูง จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่า สัดส่วนการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซีลี้อยไม้ยางพารา และนาโนเคลย์ มีผลต่อสมบัติทั้งหมดของ WPCs อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยสัดส่วนพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและซีลี้อยไม้ยางพารามีผลต่อสมบัติแรงดัดก่อนและหลังการดูดซับน้ำ และสัดส่วนของซีลี้อยไม้ยางพาราและนาโนเคลย์มีผลต่อการดูดซับน้ำของ WPCs โดยกราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงผลการทำนายสมการถดถอยของแต่ละการตอบสนอง ผลการวิเคราะห์แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม รวมถึงปริมาณส่วนผสมของปัจจัยต่างๆ ในสถานะที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานของแต่ละสมบัติ เพื่อทำนายสูตรในการผสมที่เหมาะสม พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (50.7 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (36.1 wt%) นาโนเคลย์ (9.2 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และสารหล่อลื่น (1.0 wt%) ที่ความพึงพอใจ 0.936 หรือ 93.60% และเพื่อยืนยันความถูกต้องและแม่นยำของผลการทดลองโดยทำการเปรียบเทียบผลระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับผลการทดสอบที่ได้จากการทดลองจริง (Observed)



รูปที่ 8 ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย: (ก) เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟ (Overlay plot) และ (ข) ค่าความพึงพอใจ (Desirability)

ตารางที่ 6 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมรวมกันของทุกการทดลอง ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และการทดลองจริง

Properties	Compositions (wt%)					Predicted Responses	Observed
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
MOR Before WA (MPa)						41.89	42.01 (1.02)*
MOE Before WA (GPa)						1.46	1.48 (0.65)
MOR 1 Month (MPa)						39.44	37.66 (0.96)
MOE 1 Month (GPa)	50.7	36.1	9.2	3.0	1.0	1.41	1.38 (0.45)
MOR 3 Month (MPa)						35.33	35.77 (0.89)
MOE 3 Month (GPa)						1.17	1.19 (1.02)
WA (%)						5.43	5.44 (1.12)

หมายเหตุ: * ค่าในวงเล็บ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำซ้ำ 5 ครั้ง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Srivabut, T. Ratanawilai, and S. Hiziroglie, Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood-plastic composites with calcium carbonate filler, Journal of Material Cycles and Waste Management, 2021, 23(4), 1503-1517.



- [2] 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 Composites Material*, 2014, 27(6), 719-730.
- [3] S. Khamtree, T. Ratanawilai, and S. Ratanawilai, The effect of alkaline-silane treatment of rubberwood flour for water absorption and mechanical properties of plastic composites, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, 2020, 33(5), 599-613.
- [4] Z. H. Xu and Z. N. Kong, Mechanical and thermal properties of short-coir-fiberreinforced natural rubber/polyethylene composites, *Mechanics of Composite Materials*, 2014, 50(3), 353-358.
- [5] 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*, 2014, 56, 350-357.
- [6] C. Srivabut, T. Ratanawilai, and S. Hiziroglie, Response surface optimization and statistical analysis of composites made from calcium carbonate filler-added recycled polypropylene and rubberwood fiber, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, Article in press, 22 November 2019.
- [7] R.Z. Huang, C.T. Mei, X.W. Xu, T. Karki, S. Lee, and Q.L. Wu, Effect of hybrid talc-basalt fillers in the shell layer on thermal and mechanical performance of co-Extruded wood plastic composites. *Materials*, 2015, 8, 8510-8523.
- [8] H. Anuar and A. Zuraida, Improvement in mechanical properties of reinforced thermoplastic elastomer composite with kenaf bast fibre, *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(3), 462-465.
- [9] A. Ashori and S. Sheshmani, Hybrid composites made from recycled materials: Moisture absorption and thickness swelling behavior, *Bioresource Technology*, 2010, 101(12), 4717-4720.
- [10] C. Homkhiew, T. Ratanawilai and W. Thongruang, Effects of natural weathering on the properties of recycled polypropylene composites reinforced with rubberwood flour, *Industrial Crops and Products*, 2014, 56, 52–59.
- [11] A. Zolfaghari, A.H. Behraves and P. Shahi, Comparison of mechanical properties of wood–plastic composites reinforced with continuous and noncontinuous glass fibers, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, 2015, 28(6), 791-805.



- [12] D. Akesson, T. Fuchs, M. Stoss, A. Root, E. Stanvall, and M. Skrifvars, Recycling of wood fiber-reinforced HDPE by multiple reprocessing, *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(35), 43877.
- [13] C. Srivabut, T. Ratanawilai, and S. Hiziroglie, Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber, *Construction and Building Materials*, 2018, 162, 450-458.
- [14] S. Tamrakar and R.A. Lopez-Anido, Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 2011, 25(10), 3977-3988.
- [15] H. Essabir, R. Boujmal, M.O. Bensalah, D. Rodrigue, R. Bouhfid, and A.E. Qaiss, Mechanical and thermal properties of hybrid composites: oil-palm fiber/clay reinforced high density polyethylene, *Mechanics of Materials*, 2016, 98, 36-43.
- [16] C. Homkhiew, and T. Ratanawilai, Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design, *KKU Research Journal*, 2014, 19, 780-793. (in Thai)
- [17] E.O. Olakanmi, E.A. Ogunesan, E. Vunain, R.A. Lafia-Araga, M. Doyoyo, and R. Meijboom, Mechanism of fiber/matrix bond and properties of wood polymer composites produced from alkaline-treated daniella oliveri wood flour, *Journal of Polymer Composites*, 2016, 37(9), 2657-2672.
- [18] P. Y. Kuo, S. Y. Wang, J. H. Chen, H. C. Hsueh, and M. J. Tsai, Effects of material compositions on the mechanical properties of wood-plastic composites manufactured by injection molding, *Material & Design*, 2009, 30(9), 3489-3496.
- [19] T. Ratanawilai, and K. Taneerat, Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering, *Construction and Building Materials*, 2018, 172, 349-357.