

อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อความหยาบผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ โดยใช้ วิธีการออกแบบส่วนผสมและพื้นผิวตอบสนอง

Optimal Composition on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites Using Mixture Design and Response Surface Methodology

ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร^{1,*}, ชาตรี หอมเขียว^{1,2} และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อयाง เมือง สงขลา 90000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อयाง
เมือง สงขลา 90000

Chainarong Srivabut ^{1,*}, Chatree Homkhiew ^{1,2} and Surasit Rawangwong ^{1,2}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

² Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

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

Received: Sep 24, 2021; Revised: Dec 02, 2021; Accepted: Dec 08, 2021

บทคัดย่อ

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM) ถูกนำมาใช้เพื่อการออกแบบและการทำนายสูตรการผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ จากผลการทดลอง พบว่าสัดส่วนการผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและขี้เลื่อยไม้ยางพารา มีผลต่อสมบัติทั้งหมดของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour plot) และเทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟ (Overlay plot) แสดงผลการทำนายที่เหมาะสมของสมการถดถอยของการตอบสนองทั้งหมด พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) และทัลคัม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคู่ เท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือเท่ากับ 93.60% และเพื่อยืนยันความถูกต้องของการทดลองและค่าการตอบสนอง ผลการทดลองมีการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทำนายและการทดลองจริง ผลการทดลอง พบว่า มีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองจริงของผลการตอบสนอง โดยการทำนายมีความผิดพลาด 1.25% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด คือ 1.24 จากการทดสอบการบวมนี้ ตามลำดับ

คำสำคัญ: การออกแบบส่วนผสม, ขี้เลื่อยไม้ยางพารา, ทัลคัม, ความหยาบผิว, การดูดซับน้ำ

Abstract

Mixture design and response surface methodology (RSM) were used to design and predict the optimal formulation of wood-plastic composites. The results show that the recycled high density polyethylene (rHDPE) and rubberwood sawdust (RWS) significantly affected on all of the properties for composite materials. Additionally, the contour plot and

overlay plot showed the optimal prediction of regression model for all of the responses. The optimal formulation was 55.0 wt% rHDPE, 35.0 wt% RWS, and 6.0 wt% TC, and the constant of MAPE and WAX were 3.0 wt% and 1.0 wt% with desirability of 93.60%. To confirm the validity of the experimental and the response values, the comparison of the responses from the prediction and the actual experiment was investigated. The experimental results were found to be in a good agreement between the predicted and observed results from RSM within a 1.25% error with highest standard deviation of 1.24 from thickness swelling testing, respectively.

Keywords: Mixture design, Rubberwood sawdust, Talcum, Surface roughness, Water absorption

1 บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิชาการและอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมและกำลังเติบโตในอุตสาหกรรมของเล่น เฟอร์นิเจอร์ และการก่อสร้าง [1] WPCs สามารถผลิตได้โดยการนำพลาสติก เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) ผสมกับเส้นใยธรรมชาติ เรียกว่า วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นอกจากนี้ สามารถใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ใน WPCs เพื่อช่วยในการผสม เพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และความร้อน ให้ดียิ่งขึ้น [2],[3]

กระบวนการขึ้นรูป WPCs สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การอัดรีด (Extrusion) การอัดร้อน (Hot press) และการฉีด (Injection) เป็นต้น [4] WPCs สามารถใช้งานได้หลากหลายลักษณะงาน เช่น งานด้านโครงสร้าง และงานตกแต่งอาคารสถานที่ ดังนั้น WPCs จึงต้องมีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อแรงเสียดทาน ทนต่อการสึกหรอ และทนต่อสภาพแวดล้อม [5] ความต้องการของ WPCs ในปัจจุบันมีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ มีความทนทาน ด้านทานเชื้อราสูง ดูดซับน้ำน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ [6],[7] WPCs จัดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีความสนใจใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้โดยใช้เส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ทั่วไปเป็นส่วนผสม และสามารถใช่วัสดุหรือวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต อาทิเช่น ขี้เลื่อยไม้ เพื่อใช้ในการเสริมแรงใน WPCs [8]

พลาสติก (Plastics) เป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างหนึ่งที่สามารถมีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่ม

มากขึ้น [9] โดยทั่วไปพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermoset) ซึ่งพลาสติกที่ได้รับความสนใจและมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรม คือ พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ ทนความร้อนสูง สามารถนำไปขึ้นรูปและใช้งานในลักษณะต่างๆ ได้ดี เช่น บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ พลาสติกเหล่านี้ยังมีคุณสมบัติเชิงกลเหนียว ทนต่อแรงดึง และทนต่อแรงกระแทกได้ดี และสามารถรีไซเคิลได้ (Recycled) [10],[11] ดังนั้นพลาสติกรีไซเคิลจึงมีความเหมาะสมในการนำมาวิจัยและประยุกต์ใช้งานเพื่อทดแทนหรือลดการใช้พลาสติกบริสุทธิ์ สามารถลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ ลดภาระการกำจัดขยะ (Landfills) ของชุมชนและเทศบาล และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่พลาสติกรีไซเคิล [12]

วัสดุเสริมแรงที่นำมาใช้ในการผสมกับพลาสติก คือ ขี้เลื่อยไม้ ซึ่งไม้ในธรรมชาติจะมีปริมาณลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากความต้องการทางสังคม เศรษฐกิจ และอุตสาหกรรม ส่งผลทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตนั้นมีจำนวนเพิ่มขึ้นเช่นกัน [13],[14] โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ที่ใหญ่ที่สุดในโลก และในพื้นที่ภาคใต้ของไทยไม้ยางพาราเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเฟอร์นิเจอร์ ไม้อัด และไม้ปาร์ติเคิล ซึ่งในกระบวนการผลิตดังกล่าวจะมีของเสียที่อยู่ในรูปของขี้เลื่อยไม้หรือผงไม้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูป ทำให้ในปัจจุบันมีการนำมาใช้ประโยชน์โดยการนำไปผลิตเป็นไม้แผ่นชนิดต่างๆ เช่น แผ่นใยไม้อัดแข็ง (Hardboard) และแผ่นเอ็มดีเอฟ (Medium Density Fiber Board; MDF) เป็นต้น [15]

สารเติมแต่งที่ถูกเติมเข้าไปใน WPCs ด้วยปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณพลาสติกและไม้ เพื่อเป็นการปรับเปลี่ยนสมบัติให้เหมาะสมในการผลิตและการใช้งานของ WPCs โดยปกติสารเติมแต่งนี้จะเข้าไปกระจายอยู่ในเนื้อของวัสดุ โดยทางกายภาพแล้วจะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญของ WPCs [16] ซึ่งสารเติมแต่งจะมีลักษณะเฉพาะที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของ WPCs ทำให้วัสดุมีการไหลตัวที่ดี มีการยึดเกาะที่ดี มีการต้านทานความร้อนและมีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ สารเติมแต่งบางประเภทที่เมื่อเติมเข้าไปใน WPCs แล้วทำให้มีผลต่อสมบัติเชิงกล กายภาพ และการดูดซับน้ำ เพิ่มมากขึ้น เช่น ทัลคัม (Talcum) เป็นต้น [14],[17]

เนื่องจาก WPCs มีส่วนประกอบหลัก คือ พลาสติกและไม้ ดังนั้น เมื่อมีการใช้งานในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดความไม่แน่นอนในการนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขสถานที่โล่งแจ้งหรือบริเวณที่มีความชื้นสูง ทำให้มีข้อจำกัดต่อการใช้งาน และเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อ WPCs คือ อุณหภูมิ ความชื้น และเวลา ส่งผลให้ WPCs มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุ [18],[19] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของ WPCs ที่มีความเหมาะสม ซึ่งวัสดุผสมมีส่วนผสมหลัก คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ไม้ยางพารา ทัลคัม และสารเติมแต่งเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และช่วยในการผสม คือ สารคู่ควบ และสารหล่อลื่น โดยทำการออกแบบการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบของ D-Optimal ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมในออกแบบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการทดลอง โดยการกำหนดผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 100% อีกทั้งสามารถลดสภาวะในการทดลองได้อีกด้วย [11],[20] จากนั้น ทำการทดสอบความหยาบผิว (R_a และ R_z) การดูดซับน้ำ และการบวมน้ำ หลังการอิมมersion การดูดซับน้ำระยะเวลา 3 เดือน เนื่องจาก ปัจจัยของส่วนผสมและระยะเวลาในการแช่น้ำส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมสภาพบริเวณพื้นผิวของ WPCs ดังนั้น การวัดความหยาบผิวจึงเป็นวิธีการสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของ WPCs ที่มีส่วนผสมและสภาวะที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่มีความชื้นสูงได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังเป็นการสนับสนุนการใช้วัสดุรีไซเคิลและวัสดุที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้งานจากวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต เพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ ลดขยะที่เกิดขึ้นในสังคม และลดการเผาไหม้ที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม

2 วัสดุและวิธีการดำเนินงาน

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อหาสูตรการผสมที่เหมาะสมของ WPCs คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (Recycled high density polyethylene; rHDPE) ไม้ยางพารา (Rubberwood sawdust; RWS) และ ทัลคัม (Talcum; TC) โดยกำหนดสารคู่ควบ (Polyethylene grafted maleic anhydride; MAPE) และสารหล่อลื่น (Paraffin wax; WAX) เป็นค่าคงที่ [11],[20] ซึ่งมีช่วงอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1 ก่อนการผสมไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh (< 180 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการอบด้วยอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [11],[14] เพื่อลดความชื้นในไม้ยางพารา จากนั้น ทำการซีลเก็บไว้เพื่อรอการผสมในขั้นตอนต่อไป

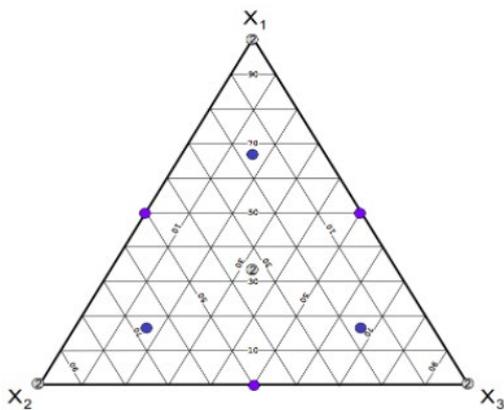
ตารางที่ 1 ช่วงของอัตราส่วนผสมในการทดลอง

Compositions	Ratios (wt%)
rHDPE (X_1)	$45.0 \leq X_1 \leq 55.0$ [5],[13]
RWS (X_2)	$35.0 \leq X_2 \leq 45.0$ [10],[14]
TC (X_3)	$5.0 \leq X_3 \leq 10.0$ [14]
MAPE (X_4)	3.0 [10],[11],[20]
WAX (X_5)	1.0 [10],[11],[20]

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบของ D-Optimal ซึ่งเป็นกรออกแบบโดยการกำหนดช่วงอัตราส่วนผสมของการ

ทดลองและรวมอัตราส่วนทั้งหมด 100% โดยน้ำหนัก (wt%) [10],[11] ซึ่งมุมทั้ง 3 ของสามเหลี่ยม ประกอบด้วย พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) ซีลี้อยไม้ยางพารา (X_2) และทัลคัม (X_3) แสดงดังรูปที่ 1 โดยกำหนด สารควบคู่ (X_4) และสารหล่อลื่น (X_5) เป็นค่าคงที่ [11],[20] ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA), Distributed by John Wiley & Sons, Inc. มีการออกแบบการทดลองทั้งหมด 16 ชุด (Run) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ซีลี้อยไม้ยางพาราและทัลคัม ในส่วนของสารควบคู่และสารหล่อลื่นถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) เพื่อวิเคราะห์ค่าปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เพื่อทำนายผลการทดลองและหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของ WPCs



รูปที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และตำแหน่งของอัตราส่วนผสม ปรับปรุงภาพจาก [21]

2.3 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

การขึ้นรูปตัวอย่างการทดสอบ WPCs แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 คือ การขึ้นรูปเม็ด WPCs โดยการนำส่วนผสมทั้งหมดลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น SHJ-36 จากบริษัท เอ็นแมช จำกัด (นนทบุรี ประเทศไทย) มีการควบคุมอุณหภูมิ

หลอมเหลว 7 ช่วง ระหว่าง 170–200°C ความเร็วรอบของเกลียวหนอนคู่ คือ 50 รอบ/นาที จากนั้น ทำการตัดเม็ด WPCs ให้มีขนาด 2–3 มม. เพื่อเตรียมการกดอัด

ขั้นตอนที่ 2 คือ การผลิตแผ่น WPCs โดยการนำเม็ด WPCs เลงๆ ไปในเครื่องอัดร้อน (Compression molding machine) ซึ่งมีขนาดแม่พิมพ์ คือ 15 ซม. × 25 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2 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 หลังจากนั้น ทำการตัดแผ่น WPCs ตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละประเภท



รูปที่ 2 การเตรียมเม็ด WPCs ในแม่พิมพ์ก่อนการกดอัด

2.4 การทดสอบความหยาบผิว

การวัดความหยาบผิวเป็นการทดลองตามมาตรฐาน โดยทำการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Average roughness; Ra) และความหยาบขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness ten-point mean; Rz) ด้วยเครื่องทดสอบความหยาบผิว (Surface Roughness Tester) รุ่น SRT-6200 จากบริษัท นิโอเน็กซ์ จำกัด ประเทศไทย โดยมีค่า Cut-off length ในการวัดความหยาบผิว คือ 0.8 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยทำการทดสอบก่อนและหลังการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 3 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน–30 มิถุนายน 2564 ซึ่งเป็นเวลาการอิมตัวของ WPCs ที่ได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้ [14],[20] โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบ คือ 30 มม. × 30 มม. × 4.8 มม. ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกอบเพื่อลดความชื้นด้วยอุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชม.ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าผลการทดลองเพื่อการสรุปผล

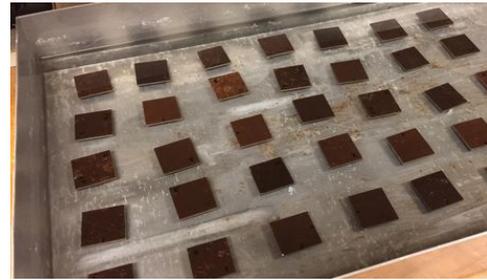


รูปที่ 3 ชิ้นงานตัวอย่างและการทดสอบความหนาผิว

ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 3 เดือน ก่อนการแช่น้ำมีการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทันทีด้วยเครื่องชั่งและวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล หลังจากชิ้นงานถูกแช่ครระยะเวลา 3 เดือน ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ชั่งน้ำหนักด้วยกระดาษทิชชู และถูกชั่งน้ำหนักและวัดความหนาทันที เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักและความหนาหลังจากการดูดซับน้ำ

2.5 การทดสอบการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption; WA) และการบวมน้ำ (Thickness swelling; TS) เป็นการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 570-88 ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างมีขนาด 30 มม. × 30 มม. × 4.8 มม. แสดงดังรูปที่ 4 ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อลดความชื้นในชิ้นงาน จากนั้น ทำการแช่ชิ้นงาน



รูปที่ 4 ชิ้นงานตัวอย่างและการทดสอบการดูดซับน้ำ

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) และค่าผลการตอบสนอง

Run	Mixture Components fractions (wt%)					Before WA		After WA		WA (%)	TS (%)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)		
1	50.9	35.1	10.0	3.0	1.0	1.14	3.41	2.52	7.16	5.10	2.22
2	53.1	37.9	5.0	3.0	1.0	1.06	3.20	2.39	7.36	4.96	2.19
3	49.8	39.5	6.7	3.0	1.0	1.36	4.08	3.16	9.87	6.43	3.59
4	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	0.99	2.98	2.10	6.36	4.78	1.89
5*	50.9	35.1	10.0	3.0	1.0	1.10	3.29	2.42	7.55	5.12	2.30
6	50.3	37.9	7.8	3.0	1.0	1.11	3.35	2.49	7.78	5.34	2.37
7	45.0	45.0	6.0	3.0	1.0	1.42	4.29	3.12	11.75	8.71	5.85
8*	45.0	45.0	6.0	3.0	1.0	1.41	4.22	3.10	10.68	8.69	5.80
9*	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	0.98	2.84	2.12	5.61	4.87	2.02
10*	49.8	39.5	6.7	3.0	1.0	1.18	3.52	2.70	8.42	5.56	2.71
11	47.8	43.2	5.0	3.0	1.0	1.28	3.84	2.98	9.34	7.01	4.19
12	45.0	41.0	10.0	3.0	1.0	1.33	4.03	2.84	9.02	6.89	4.03
13*	45.0	41.0	10.0	3.0	1.0	1.32	4.01	3.00	9.36	6.88	4.06
14	47.6	38.4	10.0	3.0	1.0	1.27	3.85	2.79	8.52	5.33	2.40
15	52.9	35.0	8.1	3.0	1.0	1.07	3.24	2.35	7.34	4.95	2.06
16	50.3	40.7	5.0	3.0	1.0	1.13	3.45	2.70	8.57	6.67	3.81

หมายเหตุ: * คือ Lack-of-fit ของการทดลอง

3 ผลการทดลองและอภิปรายผล

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ซึ่งมีตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบ ประกอบด้วย พอลิเอสเตอร์ที่มีความหนาแน่นสูง ขี้เลื่อยไม้ยางพารา และทัลคัม สามารถออกแบบสูตรในการทดลองได้ 16 สูตร (Run) เช่นเดียวกันกับค่าผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าความหยาบผิว (Ra และ Rz) ก่อนและหลังการดูดซับน้ำ และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (WA) และการบวมน้ำ (TS) ในระยะเวลา 3 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 2

3.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของรูปแบบจำลอง

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับทุกค่าการตอบสนอง ซึ่งแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมที่สุดจะพิจารณาจากค่าทางสถิติ ประกอบด้วย ค่า Sequential model sum of squares มีนัยสำคัญ ค่า Adjusted coefficient of determination ($Adj-R^2$) และ ค่า Predicted coefficient of determination ($Pred-R^2$) มีค่าสูง และค่า Lack-of-fit ไม่มีนัยสำคัญ ตามลำดับ [10],[11],[20] จากการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า สมบัติความหยาบผิว (Ra และ Rz) ก่อนและหลังการดูดซับน้ำมีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองแบบเชิงเส้นตรง (Linear Model) แต่สมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำของวัสดุมีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Model) โดยจากการเปรียบเทียบผลทาง

สถิติ พบว่า รูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า $Adj-R^2$ และค่า $Pred-R^2$ สูงกว่ารูปแบบจำลองอื่นๆ ที่เปรียบเทียบกันในแต่ละค่าการตอบสนอง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) พบว่า รูปแบบจำลองที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า $P-value$ ของ Lack-of-fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ซึ่งกล่าวได้ว่า รูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล [22]

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 3 เห็นได้ว่า ค่า R^2 ของทุกการตอบสนอง อยู่ในช่วง 0.8305–0.9552 หรือ 83.05%–95.52% กล่าวคือ แบบจำลองการถดถอยนี้สามารถอธิบายความสามารถในการทำนายได้ประมาณ 83.05%–95.52% ซึ่งมากกว่า 75.00% นั้นหมายความว่า แบบจำลองการถดถอยมีความสัมพันธ์ที่กระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง เช่นเดียวกันกับค่า $Adj-R^2$ อยู่ในช่วง 0.8045–0.9328 หรือ 80.45%–93.28% ของแต่ละรูปแบบจำลองมีค่าที่สูงใกล้เคียงกันกับค่า R^2 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับการทดลอง ในส่วนของค่า $Pred-R^2$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.7825–0.8987 หรือ 78.25%–89.87% แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบจำลองการถดถอยนั้นสามารถทำนายค่าตอบสนองของข้อมูลใหม่ได้ดี นอกจากนี้พบว่า ค่า Coefficients of Variation (C.V.) ของการตอบสนองทั้งหมดมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าการทดสอบสมบัติต่างๆ ของ WPCs มีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหรือสร้างรูปแบบจำลองได้ [20],[21]

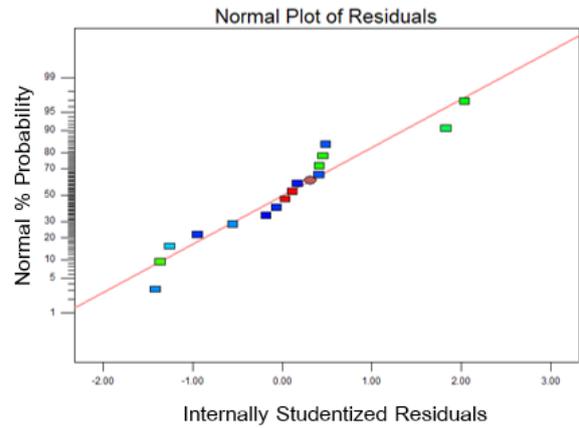
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของแต่ละการตอบสนอง

Response	Fitted model	Sequential P-value	Lack-of-fit P-value	R^2	$Adj-R^2$	$Pred-R^2$	C.V. (%)
Ra Before WA	Linear	<0.0001*	0.6385	0.8778	0.8590	0.8476	4.56
Rz Before WA	Linear	<0.0001*	0.7763	0.8897	0.8727	0.8618	4.46
Ra After WA	Linear	<0.0001*	0.5659	0.8305	0.8045	0.7825	5.74
Rz After WA	Linear	<0.0001*	0.5822	0.8694	0.8493	0.8059	3.30
WA	Quadratic	0.0319*	0.2388	0.9552	0.9328	0.8987	5.54
TS	Quadratic	0.0424*	0.2307	0.9526	0.9290	0.8946	3.79

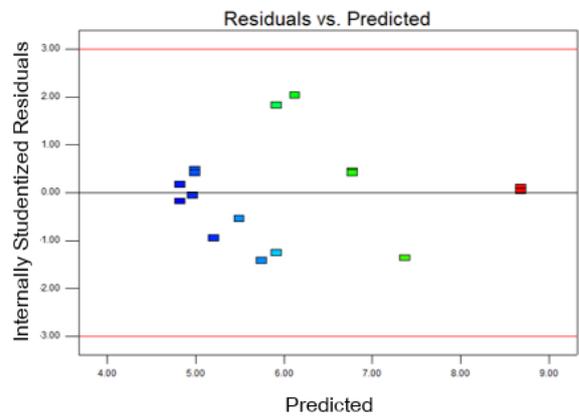
หมายเหตุ: * ค่า $P-value$ น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

3.2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง

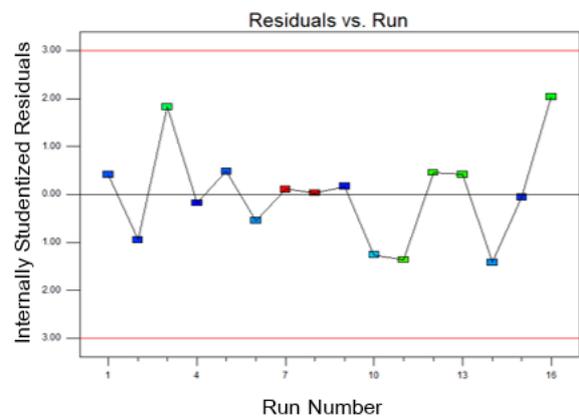
การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืนยันรูปแบบจำลองที่เหมาะสมของผลตอบสนอง [10],[11] แสดงดังรูปที่ 5 ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการทดลองที่ได้รับจากการทดลองพิจารณาจากค่าการแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (Normal Plot of Residuals) ค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted) และค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) ตามลำดับ ตัวอย่างการวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า จากรูปที่ 5(ก) การแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (Normal Plot of Residuals) ของ Ra ก่อนการดูดซับน้ำ พบว่า ไม่มีค่าที่ผิดปกติของเศษเหลือเกิดขึ้นในกราฟ ตลอดจนข้อมูลมีการแบบซัดและล้อมรอบเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ [20] สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าการทำนายของผลการตอบสนองได้นอกจากนี้ จากรูปที่ 5(ข) กราฟอธิบายถึงค่าเศษเหลือต่อค่าการทำนายที่เกิดขึ้นกับการทดลอง (Residuals vs. Predicted) พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวเป็นแบบอิสระ มีการกระจายล้อมรอบเส้นตรงกึ่งกลางที่เท่าๆ กันของกราฟ และไม่มีข้อมูลออกจากเส้นควบคุมของค่าสูงสุดและต่ำสุด สรุปได้ว่า ค่าเศษเหลือไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน ข้อมูลจากการทดลองมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ [10] ในส่วนของ รูปที่ 5(ค) กราฟแสดงถึงค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) จะเห็นได้ว่า ค่าเศษเหลืออยู่ภายใต้การควบคุม ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ นอกจากนี้ ยังมีการกระจายตัวที่ไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มเกิน 5 จุดติดต่อกัน หรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ [11] จากการพิจารณาความเพียงพอของรูปแบบจำลองการทดลองทั้ง 3 กราฟ สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลจากผลการทดลองมีความเพียงพอและมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวใช้ในการทำนายรูปแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง: (ก) การแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (ข) ค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ค) ค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง

3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อความหยาบผิว (Ra และ Rz) ก่อนการดูดซับน้ำ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 พบว่า สมบัติ Ra และ Rz ก่อนการดูดซับ

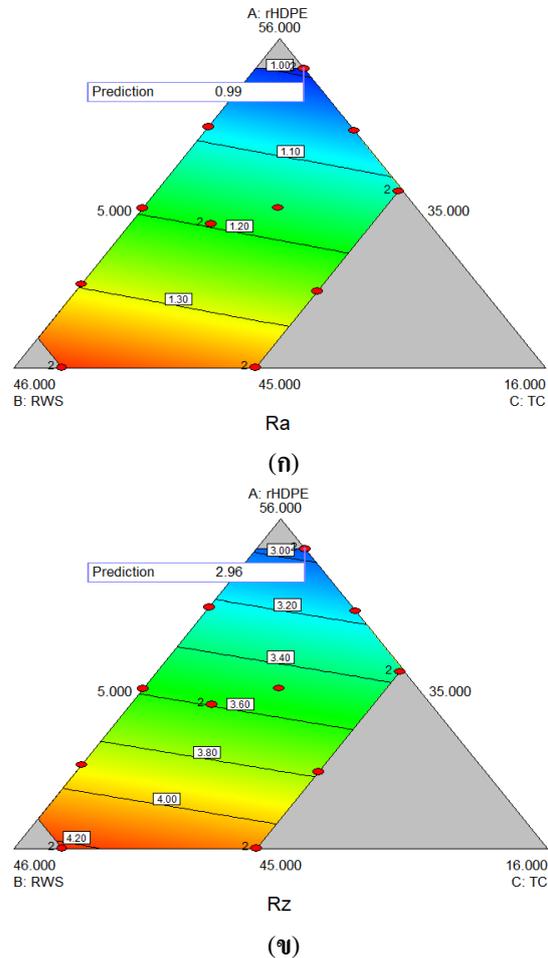
น้ำมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ แบบเชิงเส้นตรง ซึ่งแบบจำลองทั้ง 2 นั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองเหล่านั้นมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ Ra และ Rz และตัวแปรต่างๆ ของการทดลองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ (1) และ (2):

$$Ra \text{ Before WA } (Y) = -0.06X_1 + 0.03X_2 + 0.02X_3 \quad (1)$$

$$Rz \text{ Before WA } (Y) = -0.12X_1 + 0.11X_2 + 0.08X_3 \quad (2)$$

สมการถดถอยนี้ แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของซีลีออยไม้อย่างพารา (X_2) และทัลคัม (X_3) สรุปได้ว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลมีผลต่อการลดลงของสมบัติ Ra และ Rz นอกจากนี้ สมการถดถอยของสมบัติทั้ง 2 การทดลองสามารถสร้างกราฟโครงข่าย (Contour plot) และหาสูตรผสมที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติโดยวิธีการ RSM ซึ่งกราฟโครงข่ายของสมบัติ Ra และ Rz แสดงดังรูปที่ 6 (ก)–(ข) ตามลำดับ จากกราฟทั้ง 2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนการผสมมีผลต่อสมบัติ Ra และ Rz อย่างชัดเจน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของ WPCs คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ซีลีออยไม้อย่างพารา และทัลคัม ซึ่งเป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากอัตราส่วนผสมของวัสดุดังกล่าวมีผลต่อปัจจัยในการผลิต WPCs [3, 10, 20] นอกจากนี้ สูตรการผสมที่เหมาะสมของสมบัติ Ra ก่อนการดูดซับน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลีออยไม้อย่างพารา (35.0 wt%) และทัลคัม (6.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง Ra คือ $0.99 \mu\text{m}$ ที่ความน่าเชื่อถือ 0.974 สำหรับสูตรการผสมที่ดีที่สุดของสมบัติ Rz ก่อนการดูดซับน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลีออยไม้อย่างพารา (35.0 wt%) และทัลคัม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคู่ เท่ากับ 3.0 wt% และ สารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% เช่นเดียวกับกับสมบัติ Ra ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง Rz คือ $2.96 \mu\text{m}$ ที่ความน่าเชื่อถือ 0.920 แสดงดังตารางที่ 6 ตามลำดับ ดังเกิดได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของทั้ง 2 การทดลองมีค่าเท่ากัน ผลการวิจัยนี้อธิบายถึงความ

ถูกต้องและแม่นยำในการทดลอง และการสร้างแบบจำลองการถดถอยเพื่อทำนายอัตราส่วนผสม [14]



รูปที่ 6 กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่อสมบัติความหยาบผิวก่อนการดูดซับน้ำ: (ก) Ra และ (ข) Rz

3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อความหยาบผิว (Ra และ Rz) หลังการดูดซับน้ำ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า สมบัติ Ra และ Rz หลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 3 เดือน มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง เช่นเดียวกับกับค่าความหยาบผิวก่อนการดูดซับน้ำ ซึ่งรูปแบบจำลองทั้ง 2 นั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองเหล่านี้มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ Ra และ Rz และตัวแปรต่างๆ ของการทดลอง

เพื่อทำนายอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ (3) และ (4):

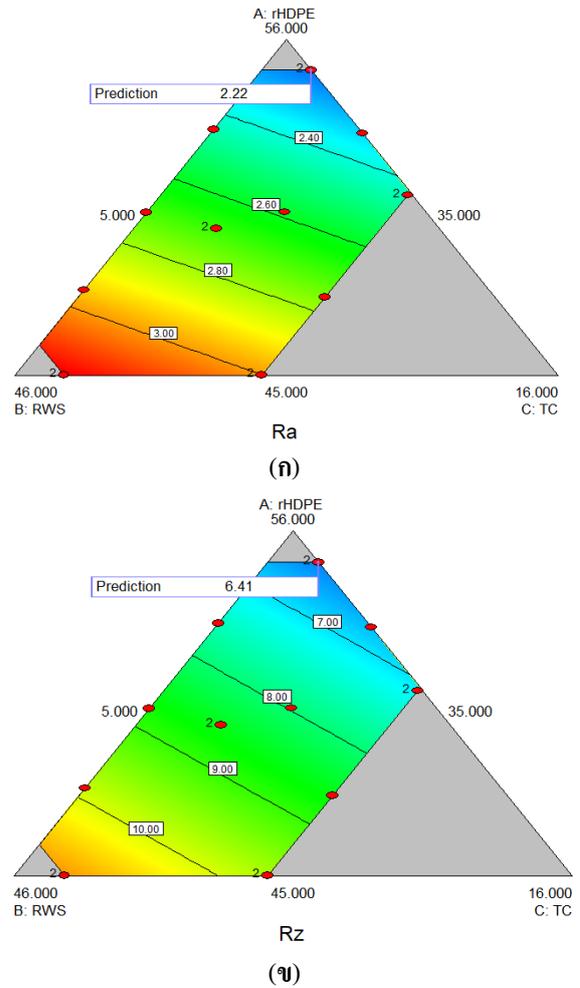
$$\text{Ra After WA (Y)} = -0.02X_1 + 0.08X_2 + 0.04X_3 \quad (3)$$

$$\text{Rz After WA (Y)} = -0.11X_1 + 0.34X_2 + 0.06X_3 \quad (4)$$

จากสมการถดถอยนี้แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของชีเลื่อยไม้ยางพารา (X_2) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) และทลคัม (X_3) สรุปได้ว่า ชีเลื่อยไม้ยางพารามีผลต่อสมบัติ Ra และ Rz เมื่อผ่านการดูดซับน้ำเป็นระยะเวลา 3 เดือน เหตุผลเนื่องมาจาก ธรรมชาติการชอบน้ำของไม้ (Hydrophilic) เมื่อสัมผัสความชื้นสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการพองตัวซึ่งมีผลกระทบต่อสมบัติความหยาบผิวของ WPCs [1],[6],[13] นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour plot) แสดงการทำนายผลตอบสนองที่เหมาะสมของสมการถดถอย แสดงดังรูปที่ 7 โดยมุมทั้ง 3 ของกราฟประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ชีเลื่อยไม้ยางพารา และทลคัม ตามลำดับ จากการวิเคราะห์กราฟโครงข่ายของสมบัติ Ra รูปที่ 7(ก)-(ข) พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนการผสมมีผลต่อสมบัติของ Ra และ Rz หลังการดูดซับน้ำอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนชีเลื่อยไม้ยางพารา จาก 35.0–45.0 wt% ใน WPCs นอกจากการมีผลกระทบต่อสมบัติความหยาบผิวแล้ว โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มขึ้นของชีเลื่อยไม้ยางพารายังช่วยในการเพิ่มสมบัติเชิงกลและทางความร้อนให้แก่ WPCs อีกด้วย [2],[8]

นอกจากนี้ สูตรผสมที่เหมาะสมของความหยาบผิวหลังการดูดซับน้ำที่เหมาะสมของสมบัติ Ra คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.4 wt%) ชีเลื่อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) และทลคัม (6.6 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลองของสมบัติ Ra คือ 2.22 μm ที่ความน่าเชื่อถือ 0.889 สำหรับสูตรการผสมที่เหมาะสมของสมบัติ Rz คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ชีเลื่อยไม้ยางพารา (35.6 wt%) และทลคัม (5.4 wt%) เมื่อสารควบคู่ เท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt%

ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง Rz คือ 6.41 μm ที่ความน่าเชื่อถือ 0.871 แสดงดังตารางที่ 6 ตามลำดับ สังเกตได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของทั้ง 2 การทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการวิจัยนี้อธิบายถึงสภาวะที่ต่างกันของการทดลอง รวมถึงอัตราส่วนการผสมที่ต่างกันของแต่ละปัจจัย [11],[20]



รูปที่ 7 กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่อสมบัติความหยาบผิวหลังการดูดซับน้ำ:

(ก) Ra และ (ข) Rz

3.5 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซับน้ำ (WA) และการบวมน้ำ (TS)

จากผลการทดลองทำการวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำจากการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งเป็นระยะการอ้อมตัวของ WPCs [14] แสดงดังตารางที่ 4 และทำการ

ลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model) เพื่อตัดปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลต่อการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า สมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้ง ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าความหยাবผิวที่มีรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองการตอบสนองการดูดซับน้ำและการบวมน้ำมีการวิเคราะห์แบบจำลอง (Model) และรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง โดยมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) ซึ่งสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองทั้ง 2 มีนัยสำคัญ [23] นอกจากนี้ รูปแบบจำลองยังอธิบายถึงการมีปัจจัยร่วมของอัตราส่วนผสมในการทดลองพบว่า ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ คือ ปัจจัยร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและจีลีโอไม้อย่างพารา (X_1, X_2) เท่านั้น เนื่องจาก อัตราส่วนผสมของทั้ง 2 ปัจจัยเป็นส่วนผสมหลักของ WPCs นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ทำให้การดูดซับน้ำและการบวมน้ำลดลง เนื่องจากโดยทั่วไปพลาสติกมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้ WPCs มีความคงทน มีอายุการใช้งานได้นาน ไม่เสียรูปง่ายจากการสัมผัสความชื้นเหมาะสมกับงานประเภทโครงสร้างที่มีการสัมผัสความชื้นสูง [9]

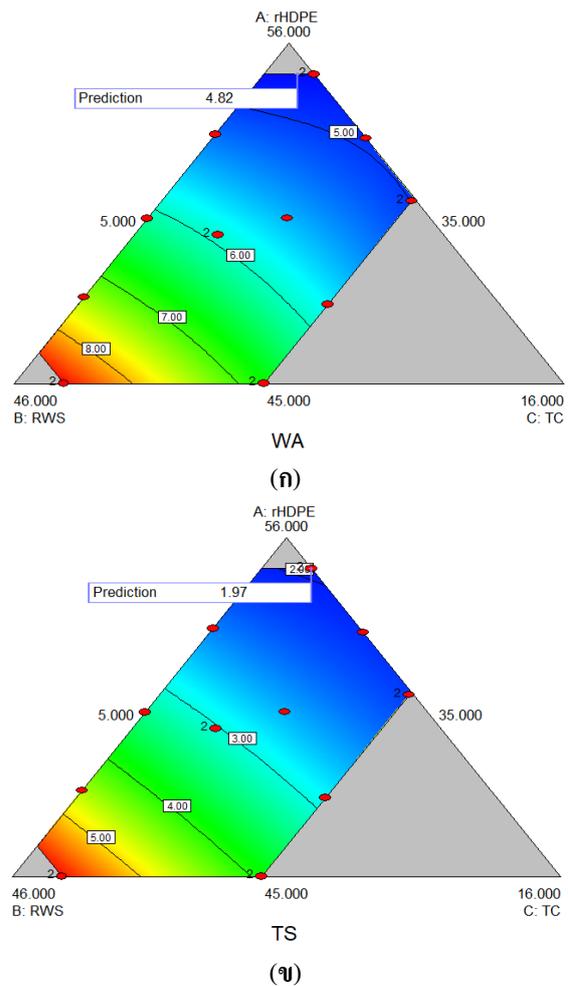
จากรูปแบบจำลองสามารถสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ และตัวแปรต่างๆ ของการตอบสนองเพื่อทำนายอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ (5) และ (6) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของจีลีโอไม้อย่างพารา (X_2) มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (X_1) และทัลคัม (X_3) สรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมของจีลีโอไม้อย่างพารามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ [8],[12]

$$WA (Y) = -0.52X_1 + 1.22X_2 - 1.05X_3 - 0.04X_1X_2 \quad (5)$$

$$TS (Y) = 0.41X_1 + 1.20X_2 - 0.28X_3 - 0.04X_1X_2 \quad (6)$$

นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour plot) แสดงผลการทำนายที่ดีที่สุดของสมการถดถอยสำหรับทั้ง 2 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 8(ก)-(ข) สูตรการผสมที่เหมาะสมของการดูดซับน้ำและการบวมน้ำสามารถทำนายได้จากวิธี RMS แสดงดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมของการดูด

ซับน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) จีลีโอไม้อย่างพารา (36.0 wt%) และทัลคัม (5.0 wt%) ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 4.82% ที่ความน่าเชื่อถือ 0.989 หรือ 98.90% สำหรับสูตรการผสมที่เหมาะสมของการบวมน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) จีลีโอไม้อย่างพารา (35.0 wt%) และทัลคัม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคุมเท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% ด้วยค่าการทำนายของแบบจำลอง คือ 1.97% ที่ความน่าเชื่อถือ 0.979 หรือ 97.90% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า สูตรการผสมของทั้ง 2 มีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติดังกล่าวมาจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล คือ 55.0 wt% เท่ากัน และส่วนผสมของจีลีโอไม้อย่างพารา คือ 36.0 wt% และ 35.0 wt% ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน สำหรับสมบัติการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ ตามลำดับ [14]



รูปที่ 8 กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบอัตราส่วนการผสมต่อการดูดซับน้ำและการบวมน้ำ: (ก) WA และ (ข) TS

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของรูปแบบจำลองของแต่ละการตอบสนอง

Source	P-value					
	Ra Before	Rz Before	Ra After	Rz After	WA	TS
	WA	WA	WA	WA		
Model	<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*
$X_1 X_2$	-	-	-	-	0.0100*	0.0115*
$X_1 X_3$	-	-	-	-	0.6910	0.9065
$X_2 X_3$	-	-	-	-	0.8632	0.6870

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model) ของแต่ละการตอบสนอง

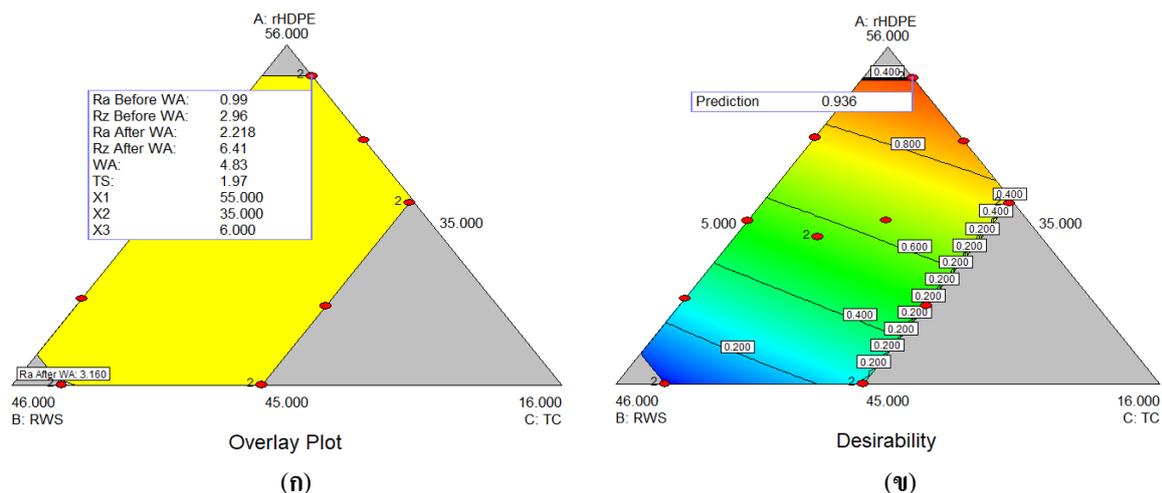
Source	P-value					
	Ra Before	Rz Before	Ra After	Rz After	WA	TS
	WA	WA	WA	WA		
Model	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
Linear Mixture	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
$X_1 X_2$	-	-	-	-	0.0042*	0.0057*

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

3.6 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ

สูตรการผสมที่เหมาะสมของการตอบสนองโดยมีการวิเคราะห์ร่วมกันของทุกสมบัติ ประกอบด้วย ความหยาบผิวก่อนและหลังการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำและการบวม น้ำ สามารถหาได้โดยการใส่เทคนิคการซ้อนทับกัน (Overlay plot) ของกราฟเส้น โคร่งข่ายผลตอบสนองแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 9(ก) โดยมีการกำหนดเงื่อนไขของการทดลองทุกตัวมีค่าที่ต่ำที่สุด (Minimize) กล่าวคือ เป้าหมายของการตอบสนองนี้ต้องการประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของ WPCs ดังนั้น ควรมีค่าความหยาบผิวและการดูดซับน้ำและการบวมน้ำที่ต่ำที่สุด โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ คือ

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลีอียไม้อย่างพารา (35.0 wt%) ทัลคัม (6.0 wt%) เมื่อสารควบคู่เท่ากับ 3.0 wt% และสารหล่อลื่น เท่ากับ 1.0 wt% ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือ (Desirability) คือ 0.936 หรือ 93.60% ดังแสดงในรูปที่ 9(ข) นอกจากนี้ เพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง รูปแบบจำลอง ค่าผลการตอบสนอง และผลการวิเคราะห์ข้อมูล สูตรการผสมที่ได้จากการทำนายถูกขึ้นรูปและทดสอบอีกครั้งเพื่อหาค่าการทดลองจริง (Observed) แสดงดังตารางที่ 7 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยการทำนายมีความผิดพลาด 1.25% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด คือ 1.24 จากการทดสอบการบวมน้ำ ตามลำดับ



รูปที่ 9 กราฟโครงข่ายแสดงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ: (ก) เทคนิคการทับซ้อนกัน (Overlay plot) และ (ข) กราฟความน่าเชื่อถือ (Desirability) ของการทำนาย

ตารางที่ 6 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และค่าความน่าเชื่อถือ

Properties	Mixture components fractions (wt%)					Predicted responses	Desirability
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		
Ra Before WA (μm)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	0.99	0.974
Rz Before WA (μm)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	2.96	0.920
Ra After WA (μm)	54.4	35.0	6.6	3.0	1.0	2.22	0.889
Rz After WA (μm)	55.0	35.6	5.4	3.0	1.0	6.41	0.871
WA (%)	55.0	36.0	5.0	3.0	1.0	4.82	0.989
TS (%)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	1.97	0.979

ตารางที่ 7 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และการทดลองจริง

Properties	Mixture components fractions (wt%)					Predicted responses	Observed
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		
Ra Before WA (μm)						0.99	1.01 (0.34)*
Rz Before WA (μm)						2.96	2.94 (0.08)
Ra After WA (μm)	55.0	35.0	6.0	3.0	1.0	2.22	2.24 (0.61)
Rz After WA (μm)						6.41	6.40 (0.26)
WA (%)						4.82	4.87 (0.75)
TS (%)						1.97	1.95 (1.24)

หมายเหตุ: * ค่าในวงเล็บ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง

4 สรุป

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ถูกวิเคราะห์และประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมและเพื่อหาสูตรการผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของ WPCs ในสถานะของงานที่มีการสัมผัสความชื้นสูง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า สัดส่วนการผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและซีลี้อยไม้ยางพารามีผลต่อสมบัติทั้งหมดของ WPCs อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยสัดส่วนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลมีผลต่อความหยาบผิวก่อนและหลังการดูดซับน้ำ และสัดส่วนของซีลี้อยไม้ยางพารามีผลต่อการดูดซับน้ำและการบวมตัวของ WPCs นอกจากนี้ กราฟโครงข่าย (Contour Plot) แสดงผลการทำนายที่เหมาะสมของสมการถดถอยของแต่ละการตอบสนอง ผลการวิเคราะห์แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์และปริมาณส่วนผสมของปัจจัยต่างๆ ในสถานะที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานของแต่ละสมบัติ นอกจากนี้ การใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงข่ายของผลตอบสนองแต่ละตัว ซึ่งกำหนดเงื่อนไขของการทดลองทุกตัวมีค่าที่ต่ำที่สุด (Minimize) พบว่า สูตรการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของการตอบสนอง คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (35.0 wt%) ทัดคัม (6.0 wt%) สารควบคู่ (3.0 wt%) และ สารหล่อลื่น (1.0 wt%) ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือ (Desirability) คือ 0.936 หรือ 93.60% และเพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบการทดลองและค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย สูตรการผสมที่เหมาะสมจากการทำนาย (Predicted) มีการขึ้นรูปและทดสอบเพื่อหาค่าการทดลองจริง (Observed) พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายมีความผิดพลาด 1.25% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด คือ 1.24 จากการทดสอบการบวมตัว ตามลำดับ

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ratanawilai, P. Lekanukit and S. Urupantamas, "Effect of Rubberwood and Palm Oil Content on the Properties of Wood Polyvinyl Chloride Composites," *Journal of Thermoplastic Composites Material*, vol. 27, no. 6, pp. 719–730, 2014, doi: 10.1177/0892705712454863.
- [2] A. Zolfaghari, A. H. Behravesht and P. Shahi, "Comparison of Mechanical Properties of Wood–Plastic Composites Reinforced with Continuous and Noncontinuous Glass Fibers," *Journal of Thermoplastic Composites Material*, vol. 28, no. 6, pp. 791–805, 2015, doi: 10.1177/0892705713503676.
- [3] N. Ayrlimis, U. Buyuksari and T. Dundar, "Waste Pine Cones as a Source of Reinforcing Fillers for Thermoplastic Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 117, no. 4, pp. 2324–2330, 2010, doi: 10.1002/app.32076.
- [4] G. Sui, M. A. Fuqua, C. A. Ulven and W. H. Zhong, "A Plant Fiber Reinforced Polymer Composite Prepared by a Twin-Screw Extruder," *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 3, pp. 1246–1251, 2009, doi: . 10.1016/j.biortech.2008.03.065
- [5] D. Akesson, T. Fuchs, M. Stoss, A. Root, E. Stanvall, M. Skrifvars, "Recycling of Wood Fiber-Reinforced HDPE by Multiple Reprocessing," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, no. 35, pp: 1–8, 2016, . doi: 10.1002/app.43877.
- [6] 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*, vol. 37, no.9, pp. 2657–2672, 2016, doi: 10.1002/pc.23460.

- [7] K. Chaochanchaikul, V. Rosarpitak and N. Sombatsompop, "Photodegradation Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering," *Express Polymer Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 146–160, 2013, doi: 10.3144/expresspolymlett.2013.14.
- [8] B. Kord, A. Varshoei and V. Chamany, "Influence of Chemical Foaming Agent on the Physical, Mechanical, and Morphological Properties of HDPE/Wood Flour/Nanoclay Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 30, no. 13, pp. 1115–1124, 2011, doi: 10.1177/0731684411417200.
- [9] I. Michalska Pozoga, R. Tomkowski, T. Rydzkowski and V. K. Thakur, "Towards the Usage of Image Analysis Technique to Measure Particles Size and Composition in Wood-Polymer Composites," *Industrial Crops and Products*, vol. 92, pp. 149–156, 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.08.005.
- [10] 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, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.041.
- [11] 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*, vol. 23, pp. 1503–1517, 2021, doi: 10.1007/s10163-021-01230-7.
- [12] 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*, vol. 33, no. 5, pp. 599–613, 2020, doi: 10.1177/0892705718808556.
- [13] 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*, vol. 172, pp. 349–357, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266.
- [14] 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*, vol. 162, pp. 450–458, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.048.
- [15] L. Soccalingame, A. Bourmaud, D. Perrin, J. C. Benezet and A. Bergeret, "Reprocessing of Wood Flour Reinforced Polypropylene Composites: Impact of Particle Size and Coupling Agent on Composite and Particle Properties," *Polymer Degradation Stability*, vol. 113, pp. 72–85, 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.020.
- [16] 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*, vol. 8, no.12, 8510–8523, 2015, doi: 10.3390/ma8125473.
- [17] R. Z. Huang, B. J. Kim, S. Lee, Z. Yang, Q. L. Wu, "Co-Extruded Wood-Plastic Composites with Talc-Filled Shells: Morphology, Mechanical, and Thermal Expansion Performance," *BioResources*, vol. 8, no. 2: pp. 2283–2299, 2013.
- [18] H. Essabir, R. Boujmal, M. O. Bensalah, D. Rodrigue, R. Bouhfid and A. E. Quaiss, "Mechanical and Thermal Properties of Hybrid Composites: Oil-Palm Fiber/Clay Reinforced High Density Polyethylene," *Mechanics of Materials*, vol. 98, pp. 36–43, 2016, doi: 10.1016/j.mechmat.2016.04.008.

- [19] C. Homkhiewa, T. Ratanawilaia and W. Thongruangb, "Effects of Natural Weathering on the Properties of Recycled Polypropylene Composites Reinforced with Rubberwood Flour," *Industrial Crops and Products*, vol. 56, pp. 52–59, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.02.034
- [20] 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*, 2019, doi: 10.1177/0892705719889988.
- [21] Mixture Design, Design-Expert v11, 2012. [Online]. Available: <https://www.statease.com/docs/v11/tutorials/mixture-designs/>
- [22] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, "Optimal Proportions of Composites from Polypropylene and Rubberwood Flour after Water Immersion Using Experimental Design," *KKU Research Journal*, vol. 19, pp. 780–793, 2014.
- [23] N. Ayrilmis, S. Korkut, E. Tanritanir, J. E. Winandy and S. Hiziroglu, "Effect of Various Fire Retardants on Surface Roughness of Plywood," *Building and Environment*, vol. 41, no 7. pp. 887–892, 2006, doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.011.