

อิทธิพลของสารตัวเติมและสูตรการผสมที่เหมาะสมภายใต้การดูดซับน้ำของวัสดุ
เชิงประกอบพลาสติกและไม้ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบผสม

**Influence of Filler Content and Optimal Formulation under Water Absorption
of Wood-Plastic Composites Using Mixture Design**

ชัยณรงค์ ศรีระบุตร* ชาตรี หอมเขียว สุรสิทธ์ ระวังวงศ์ และ อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

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

Chainarong Srivabut*, Chatree Homkhiew, Surasit Rawangwong and Apichon Thongmung Kamnerdwam

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Songkhla 90000, E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th*

Received 26 Jan 2022; Revised 10 Mar 2022

Accepted 24 Jun 2022; Available online 29 Jun 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) จากผลกระทบทดลองดูดซับน้ำระยะสั้นที่ระยะเวลา 2 ชม. (2h) และ 24 ชม. (24h) โดยทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ซึ่งมีปัจจัยการทดลอง คือ พอลิเอทิลีนรีไซเคิล ซีลี้อยไม้ ยางพารา และคาร์บอนแบล็ค โดยกำหนดสารควบคุมและสารหล่อลื่นเป็นค่าคงที่ ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และพยากรณ์อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ผลจากการทดลอง พบว่า ปัจจัยการผสมมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อระยะเวลาการดูดซับน้ำระยะสั้น (2h และ 24h) กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของซีลี้อยไม้ ยางพาราส่งผลให้สมบัติการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มขึ้นของพอลิเอทิลีนรีไซเคิลและคาร์บอนแบล็คส่งผลให้การดูดซับน้ำลดลง นอกจากนี้ สมการถดถอย (Regression Model) และกราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงถึงผลกระทบของปัจจัยการผสมและผลการพยากรณ์ของ WPCs ซึ่งผลการพยากรณ์อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของการดูดซับน้ำระยะสั้น คือ 55.0wt% rHDPE, 25.0wt% RWS, 15.0wt% CB, 4.0wt% MAPE, และ 1.0wt% WAX ด้วยค่าความพึงพอใจจากการพยากรณ์ คือ 97.10% และเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของการพยากรณ์ของผลการตอบสนอง อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการพยากรณ์ถูกทำการทดลองจริง (Observed) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการทดลอง

คำหลัก: พอลิเอทิลีนรีไซเคิล ซีลี้อยไม้ยางพารา คาร์บอนแบล็ค การออกแบบการทดลองแบบผสม วิธีพื้นผิวการตอบสนอง

Abstract

The prediction of optimal proportion of wood-plastic composites (WPCs) under water absorption for 2h and 24h was investigated. The experimental design was determined from mixture design. Factors of experiment were recycled high-density polyethylene (rHDPE), rubberwood sawdust (RWS), and carbon black (CB) with constant of coupling agent (MAPE) and lubricant (WAX), respectively. The experimental results were analyzed by analysis of variance (ANOVA) and optimized using response surface methodology (RSM). The results of the experiment showed that the mixture ratios had significantly ($P < 0.05$) affected on short-term water absorption. Increasing of rubberwood sawdust resulted in increased water absorption properties. In contrast, the Increasing of recycled high-density polyethylene and carbon black resulted in decreased water absorption properties. Additionally, the regression model and contour plot were used to analysis the effects of factors mixture ratios. The optimal proportion of WPCs was 55.0wt% rHDPE, 25.0wt% RWS, 15.0wt% CB, 4.0wt% MAPE, and 1.0wt% WAX with desirability score combining their outputs value of 97.10%. To the accuracy of the response prediction, the optimal proportion was observed in the actual value to compare the experimental results and determine the percentage error of the experiment.

Keywords: Recycled High-Density Polyethylene, Rubberwood sawdust, Carbon black, Mixture design, Response surface methodology

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้งานผลิตภัณฑ์จากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood Plastic Composites; WPCs) ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น วัสดุโครงสร้าง วัสดุตกแต่งอาคารสถานที่ ของใช้ครัวเรือน และของเล่นสำหรับเด็ก เป็นต้น [1, 2] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ WPCs เพื่อการใช้งานที่หลากหลายมาจากแนวคิดในการลดการใช้ไม้ในธรรมชาติที่มีปริมาณลดลงเรื่อยๆ จากการใช้ประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจและเชิงพาณิชย์ ลดขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในชีวิตประจำวัน และลดของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ [3] โดยทั่วไปส่วนผสมหลักของ WPCs ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ พลาสติกทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) และเส้นใยธรรมชาติที่อยู่ในรูปแบบของอนุภาคหรือเส้นใยทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) ดังนั้น คุณสมบัติที่เกิดขึ้นของ WPCs จึงมาจากคุณสมบัติเด่นของวัสดุ 2 ชนิดร่วมกัน คือ คุณสมบัติเด่นของพลาสติกและไม้ กล่าวคือ WPCs จะมีความแข็งแรงและความทนทานสูงเมื่อเทียบกับพลาสติกบริสุทธิ์ นอกจากนี้ สามารถป้องกันเชื้อรา ปลวก มด และแมลงได้ดี เมื่อ

เปรียบเทียบกับไม้ในธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและสามารถเปลี่ยนรูปทรงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน [4, 5]

พลาสติก (Plastic) ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ โดยทั่วไปพลาสติกจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset) โดยพลาสติกทั้ง 2 กลุ่ม ถูกนำมาใช้งานที่แตกต่างกัน คือ เทอร์โมพลาสติกมักถูกใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวด แก้ว และแผ่นใส ส่วนเทอร์โมเซตมักถูกใช้ทำเป็นของใช้ต่างๆ เช่น ถ้วย กะละมัง ถัง และเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น โดยเทอร์โมพลาสติกถูกนำมาใช้ในปริมาณมากกว่าเทอร์โมเซต เนื่องจาก เทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและรวดเร็ว มีความยืดหยุ่นได้ดี สีใสไม่มีกลิ่น และสามารถรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [6, 7]

ขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงในเมทริกซ์เป็นวัสดุที่เหลือจากโรงงานแปรรูปไม้จากการทำเฟอร์นิเจอร์ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ หรือชุดรับแขก นอกจากนี้ เกิดจากการผลิตวัสดุโครงสร้างต่างๆ เช่น ประตู เสา คาน และหน้าต่าง เป็นต้น [8, 9] กระบวนการเหล่านี้จะเกิดของเสียที่อยู่ในรูปของขี้เลื่อยหรือผงไม้เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะภาคใต้ของ

ไทยมีอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดรายได้อย่างมาก คือ การแปรรูปไม้ยางพาราเพื่อส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ จึงควรมีการนำของเสียเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในอนาคต นอกจากการนำมาทำเป็นวัสดุเสริมแรงแล้ว โดยทั่วไปขยะไม้ยางพารามีประโยชน์หลายอย่าง เช่น การทำเป็นเชื้อเพลิง การทำไม้อัด และการใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร [10]

สารเติมแต่งใน WPCs มีหน้าที่หลัก คือ เพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และความร้อนให้แก่ WPCs สารเติมแต่งที่ใช้ในการเพิ่มสมบัติเหล่านี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ สารเติมแต่งจากธรรมชาติและสารเคมีที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยทั่วไปแล้วสารเติมแต่งที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ สารเคมีชนิดต่างๆ เนื่องจากสารเติมแต่งเหล่านี้มีความหนาแน่นและมีการทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสารเติมแต่งจากธรรมชาติ ส่งผลให้เมื่อเติมสารประเภทนี้ใน WPCs จะไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนผสมอื่นๆ มีการคงรูปของขนาดและรูปร่างที่ดี และไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของ WPCs [11, 12]

การออกแบบและการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดกระบวนการทดลองเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองหรือข้อสรุปที่มีความถูกต้องและแม่นยำที่สุด จากการศึกษางานวิจัยการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ถูกประยุกต์ใช้เพื่อหาสัดส่วนการผสมของวัสดุผสมต่างๆ ซึ่งข้อดีของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้ คือ สามารถลดจำนวนสภาวะของการทดลองได้ โดยการกำหนดผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 1.0 หรือ 100% ซึ่งมีความแตกต่างจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการอื่นๆ ที่ปัจจัยแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน [13, 14] นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ถูกใช้เพื่อการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของการทดลองเพื่อกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนผสม นอกจากนี้ การหาสูตรการผสมที่เหมาะสมสามารถอธิบายได้โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) [15, 16]

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า การใช้

งานของ WPCs มีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของวัสดุหลากหลายมิติ เช่น ชนิดของวัสดุ อัตราส่วนการผสม การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาอิทธิพลของชนิดของปัจจัยและปริมาณส่วนผสมภายใต้การดูดซับน้ำระยะสั้น (Short-Term Water Absorption) รวมถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของ WPCs โดยการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบ D-Optimal และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวตอบสนอง

2. วัสดุ และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมในงานวิจัยนี้ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (Recycled High-Density Polyethylene; rHDPE)เกรด V1160 ผลิตโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน (สมุทรปราการ ประเทศไทย) ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุเนื้อพื้นในวัสดุผสม ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) จากบริษัท พาเนลพลัส ไม้โอ-เพาเวอร์ จำกัด (สงขลา ประเทศไทย) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ คาร์บอนแบล็ค (Carbon black; CB) เกรด N 330 ขนาด 125 ไมโครเมตร จากบริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด (สมุทรสาคร ประเทศไทย) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงเช่นเดียวกับขี้เลื่อยไม้ยางพารา มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟพอลิเอทิลีน (Maleic Anhydride-Grafted Polyethylene; MAPE) ทำหน้าที่เป็นสารควบคู่ (Coupling Agent) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างพลาสติกและผงไม้ และพาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax; WAX) ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) เพื่อการไหลตัวที่ดีของกระบวนการผสม ก่อนการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนเพื่อคัดแยกขนาดผ่านตะแกรงขนาด 60 Mesh (< 250 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม.

ตารางที่ 1 ช่วงการผสมของปัจจัยการทดลอง

Factors	Mixture Ratios (wt%)
rHDPE (A)	50.0 – 65.0
RWS (B)	25.0 – 35.0
CB (C)	5.0 – 15.0
MAPE (D)	4.0
WAX (E)	1.0

2.2 การออกแบบการทดลอง

ทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบ D-Optimal [13, 14] โดยมีปัจจัยการทดลอง คือ rHDPE (A) RWS (B) CB (C) โดยกำหนดให้ MAPE (D) และ WAX (E) เป็นค่าคงที่ โดยมีช่วงการผสม แสดงดังตารางที่ 1 จากนั้น ทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองด้วย ANOVA และการสร้างสมการถดถอย (Regression model) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยหลักและรวมของอัตราส่วนผสม นอกจากนี้ พยายามอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อสมบัติการดูดซับน้ำระยะสั้นด้วยวิธี RSM โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) โดยมีการออกแบบการทดลองทั้งหมด 16 สูตร แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรการผสมและผลการตอบสนองของการทดลอง

Run	Ratios (wt%)			Water Absorption (%)	
	A	B	C	WA	WA
				(2h)	(24h)
1	61.5	28.5	5.0	0.85	1.34
2	53.7	32.6	8.8	0.90	1.38
3	60.9	25.0	9.1	0.80	1.28
4	55.9	29.9	9.1	0.81	1.30
5	57.2	25.0	12.8	0.66	1.16
6	64.8	25.2	5.0	0.75	1.28
7	57.2	25.0	12.8	0.67	1.16
8	50.0	35.0	10.0	0.95	1.47
9	57.8	31.4	5.8	0.86	1.36

10*	55.9	29.9	9.1	0.84	1.31
11*	64.8	25.2	5.0	0.76	1.23
12*	50.0	35.0	10.0	1.02	1.41
13	51.5	28.5	15.0	0.76	1.28
14*	51.5	28.5	15.0	0.78	1.23
15*	55.0	35.0	5.0	0.99	1.48
16	54.5	28.9	11.6	0.78	1.27

หมายเหตุ: * คือ Lack of Fit ของการทดลอง; D และ E มีค่าเท่ากับ 4.0 และ 1.0 wt% ตามลำดับ

2.3 การทดสอบการดูดซับน้ำระยะสั้น

การทดสอบการดูดซับน้ำระยะสั้น (Short-Term Water Absorption) ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D570-88 โดยชิ้นงานตัวอย่างมีขนาด 30 × 30 × 4.8 มม.³ ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 2 ชม. (2h) และ 24 ชม. (24h) ซึ่งเป็นระยะเวลาการดูดซับน้ำระยะสั้น ตามมาตรฐานการทดลองของ WPCs ก่อนการแช่น้ำ ชิ้นงานตัวอย่างถูกชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นเมื่อชิ้นงานถูกแช่ครบระยะเวลา 2h และ 24h ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ชั่งน้ำหนักด้วยกระดาศชั่งชู และถูกชั่งน้ำหนักทันที ที่ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ ภายใต้ อุณหภูมิห้อง (25 °C) เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นหลังการดูดซับน้ำของ WPCs แสดงดังสมการที่ 1

$$WA_t(\%) = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ WA_t คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ W_0 คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ และ W_t คือ น้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ

3. ผลการดำเนินการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางสถิติ และการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

จากผลการทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำระยะสั้น (2h และ 24h) สามารถนำมาวิเคราะห์ความ

แปรปรวน (ANOVA) เพื่อหารูปแบบการจำลองที่เหมาะสมในการกำหนดปัจจัยและเพื่อยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง โดยทำการพิจารณาจากค่าสถิติ ดังนี้ คือ ค่า Sequential Model Sum of Squares มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ค่า R -Squared (R^2) ควรมีค่ามากกว่า 0.7500 หรือ 75.00% ค่า Adjusted Coefficient of Determination (Adj- R^2) และค่า Predicted Coefficient of Determination (Pred- R^2) มีค่าสูง และค่า Lack-of-Fit ไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) และค่า Coefficients of Variation (C.V.) ควรมีค่าน้อยกว่า 10.00% แสดงดังตารางที่ 3 ตามลำดับ พบว่า การตอบสนองทั้งหมดมีรูปแบบการจำลองที่เหมาะสม คือ แบบเชิงเส้นตรง (Linear Model) จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่า R^2 ของการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h มีค่า 0.9031 และ 0.9120 ซึ่งมีค่าที่สูงและมากกว่า 0.7500 หรือ 75.00% ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้พิจารณาความเพียงพอของข้อมูล แสดงให้เห็นว่า รูปแบบจำลองเหล่านี้มีความสัมพันธ์ที่กระหว่างปัจจัยอิสระและผลการตอบสนอง โดยมีประสิทธิภาพของรูปแบบจำลองสำหรับการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h ประมาณ 90.31% และ 91.20% ตามลำดับ เช่นเดียวกับค่า Adj- R^2 มีค่า 0.8881 (88.81%) และ 0.8985 (89.85%) และค่า Pred- R^2 มีค่า 0.8568 (85.68%) และ 0.8638 (86.38%) สรุปได้ว่า ตัวอย่างและข้อมูลในการทดลองมีความเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองการทดลอง และสามารถการพยากรณ์ผลการตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ค่า C.V. ของการทดลองสามารถบอกได้ถึงความแม่นยำของการสร้างรูปแบบจำลอง กล่าวคือ เมื่อค่า C.V. มีค่าต่ำจะส่งผลให้ความแม่นยำในการพยากรณ์มีค่ามากยิ่งขึ้น จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่า C.V. ของการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h มีค่า 4.18% และ 2.31% สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองทั้งหมดมีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหรือสร้างสมการทดลองได้

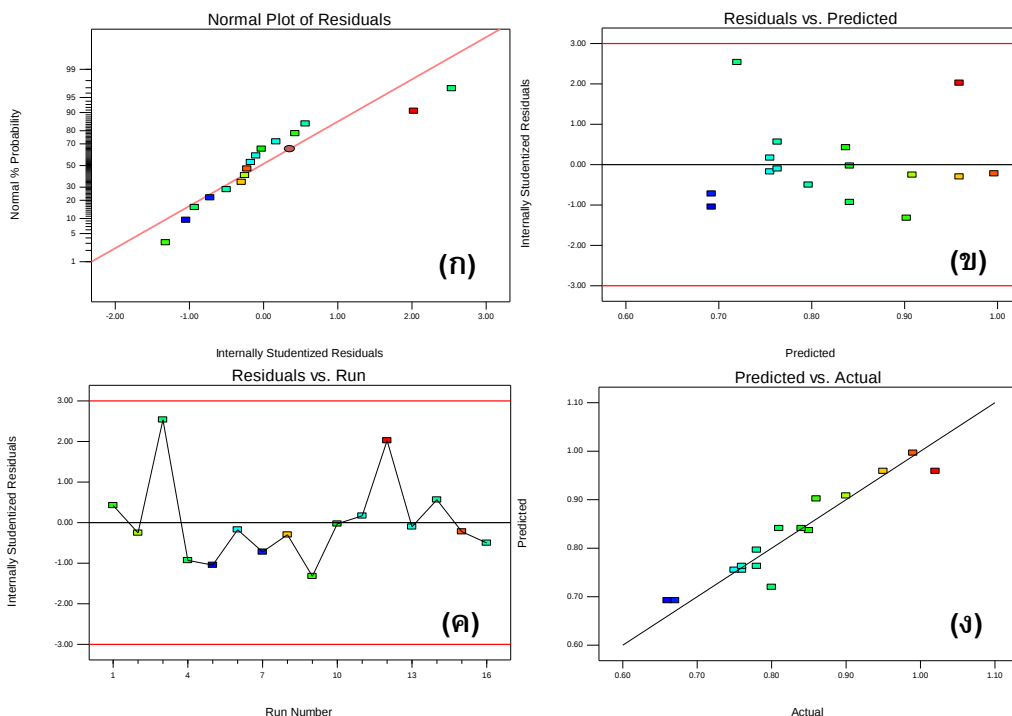
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และรูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง (Linear Model) ของการตอบสนอง

Resource	Water Absorption (%)	
	WA (2h)	WA (24h)
Model	<0.0001*	<0.0001*
Linear mixture	<0.0001*	<0.0001*
Lack-of-fit	0.1771	0.4882
R^2	0.9031	0.9120
Adj- R^2	0.8881	0.8985
Pred- R^2	0.8568	0.8638
C.V.	4.18%	2.31%

นอกจากนี้ การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองจากการออกแบบการทดลอง สามารถอธิบายได้จากการกระจายของข้อมูลบนกราฟต่างๆ ประกอบด้วย 1) กราฟการแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (Normal Plot of Residuals) 2) กราฟความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือต่อค่าที่พยากรณ์ (Residuals vs. Predicted) 3) กราฟความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) และ 4) กราฟความสัมพันธ์ของค่าการพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs. Actual) ตามลำดับ [2, 15] แสดงดังรูปที่ 1 จากการวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลอง โดยยกตัวอย่างการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h อธิบายได้ว่า รูปที่ 1 (ก) แสดงกราฟ Normal probability ของการกระจายข้อมูลพบว่า ไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการตอบสนองมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 1 (ข) แสดงค่าเศษเหลือต่อค่าการพยากรณ์ที่เกิดขึ้นกับการทดลอง พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวเป็นแบบอิสระและมีการกระจายล้อมรอบเส้นตรงกึ่งกลาง (Center Line) ที่เท่าๆ กัน สรุปได้ว่า ค่าเศษเหลือไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน ข้อมูลจากการทดลองมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ รูปที่ 1 (ค) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง พบว่า ไม่มีการกระจายของข้อมูลเป็นแบบแนวโน้มเกิน 5 ข้อมูล และข้อมูลมีการ

กระจายอย่างสม่ำเสมอ สรุปได้ว่า ลำดับการทดลอง ไม่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่เป็นเศษเหลือ และรูปที่ 1 (ง) แสดงค่าเศษเหลือต่อค่าการทดสอบจริงการทดลอง จะเห็นได้ว่า ค่าการพยากรณ์และค่าจริงจากการทดลองมีความสัมพันธ์กัน ข้อมูลมีการกระจาย และแนบชิดเป็นเส้นตรงตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติ

เกิดขึ้นในกราฟ นอกจากนี้ ข้อมูลยังมีการกระจายตัว ที่ไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็น แนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ [2, 13, 15]



รูปที่ 1 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง: (ก) การแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (ข) ค่าเศษเหลือต่อค่าที่พยากรณ์ (ค) ค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง และ (ง) ค่าที่พยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง

3.2 อิทธิพลของปัจจัยและอัตราส่วนการผสมต่อการดูดซับน้ำระส่น (2h และ 24h) สำหรับ WPCs

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมของสมบัติการดูดซับน้ำ (2h และ 24h) คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นตรง (Linear Model) โดยมีค่า $P < 0.0001$ แสดงดังตารางที่ 3 นอกจากนี้ ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h สามารถนำเสนอด้วยสมการถดถอย ดังสมการที่ 2 และ 3:

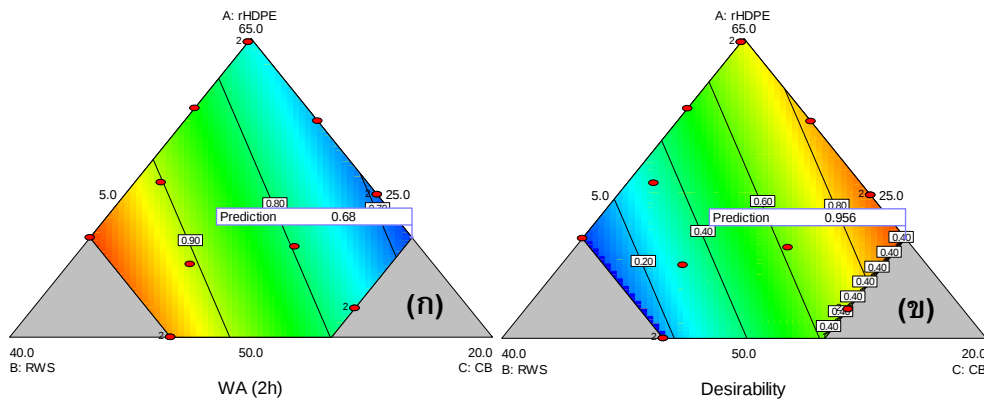
$$WA(2h) = 1.83(rHDPE) + 0.02(RWS) - 5.65(CB) \quad (2)$$

$$WA(24h) = 7.88(rHDPE) + 0.03(RWS) - 9.64(CB) \quad (3)$$

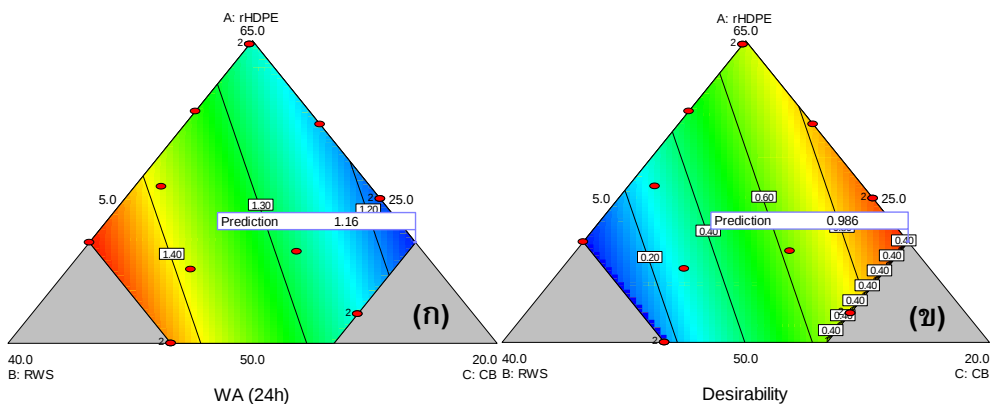
จากสมการถดถอยของผลการตอบสนอง สามารถอธิบายได้ว่า ระยะเวลาการดูดซับน้ำของ WPCs ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) จากสมการที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมากที่สุด คือ คาร์บอนแบล็ค (CB) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 5.65 และ 9.64 ตามลำดับ เนื่องจาก สมบัติพื้นฐานของคาร์บอนแบล็ค คือ มีการคงรูปที่ดี มีความหนาแน่นสูง และทำหน้าที่เสริมแรงเหมือนซี่ล้อโดยไม่ยางพารา ส่งผลให้มีการดูดซับน้ำได้น้อยเมื่อใช้ผลิตเป็น WPCs ซึ่ง

โดยทั่วไปแล้ว ผลกระทบของการดูดซับน้ำจะมีผลมาจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา เนื่องจาก โดยธรรมชาติการชอบน้ำของไม้ยางพารา (Hydrophilic) เมื่อสัมผัสความชื้นสูงหรือน้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างส่วนผสมหรือการพองตัวซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลและกายภาพของ WPCs [9, 10] แต่สำหรับการศึกษานี้ ได้ทำการเติมคาร์บอนแบล็คเพื่อไปแทนที่ขี้เลื่อยไม้ยางพารา เนื่องจากมีหน้าที่เหมือนกัน คือ เพื่อเป็นสารเสริมแรงใน WPCs และมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าขี้เลื่อยไม้ยางพารา ทำให้อนุภาคของคาร์บอนแบล็คสามารถแทรกซึมเข้าสู่ช่องว่างที่เกิดจากการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารา ส่งผลให้การดูดซับน้ำของ

WPCs มีค่าน้อยลง อีกทั้งยังเพิ่มค่าสมบัติเชิงกลและสามารถทนความร้อนได้สูง นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิเอทิลีนรีไซเคิล มีค่าเท่ากับ 1.83 และ 7.88 มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของขี้เลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.02 และ 0.03 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ทำให้การดูดซับน้ำลดลง เนื่องจาก คุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) กล่าวคือ เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำหรือสภาวะที่มีความชื้นสูง ความชื้นจะไม่สามารถซึมผ่านได้ ส่งผลให้ WPCs มีความคงทน มีอายุการใช้งานได้นาน ไม่เสียรูปง่ายจากการสัมผัสความชื้น [3, 6]



รูปที่ 2 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่อการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h



รูปที่ 3 กราฟโครงร่างแสดงผลกระทบของอัตราส่วนการผสมต่อการดูดซับน้ำระยะเวลา 24h

นอกจากนี้ กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงผลการพยากรณ์ของสมการถดถอยสำหรับทั้ง 2 การทดลอง [2, 13] แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) พบว่า อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมของการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h มีค่าเท่ากัน คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (25.0 wt%) และคาร์บอนแบล็ค (15.0 wt%) โดยกำหนดให้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิเอทิลีน (4.0 wt%) และพาราฟินแว็กซ์ (1.0 wt%) เป็นค่าคงที่ แสดงดังตารางที่ 4 ด้วยค่าการพยากรณ์ของแบบจำลองการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h คือ 0.68% ที่ความน่าเชื่อถือ 0.956 หรือ 95.60% แสดงดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) นอกจากนี้ ค่าการพยากรณ์ของแบบจำลองการดูดซับน้ำระยะเวลา 24h คือ 1.16% ที่ความน่าเชื่อถือ 0.986 หรือ 98.60% แสดงดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการผสมของสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h มีค่าเท่ากัน เนื่องจาก ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติดังกล่าวมาจากปัจจัยหลักในส่วนผสมของ WPCs คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล และคาร์บอนแบล็ค และจากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณการดูดซับน้ำและระยะเวลาการแช่น้ำมีความสัมพันธ์กัน โดยผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันของทั้ง 2 ช่วงเวลา

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง และค่าความพึงพอใจจากการพยากรณ์

Response	Ratios (wt%)			Predicted
	A	B	C	
WA (2h)	55.0	25.0	15.0	0.68%
WA (24h)	55.0	25.0	15.0	1.16%

หมายเหตุ: D และ E มีค่าเท่ากับ 4.0 และ 1.0 wt% ตามลำดับ

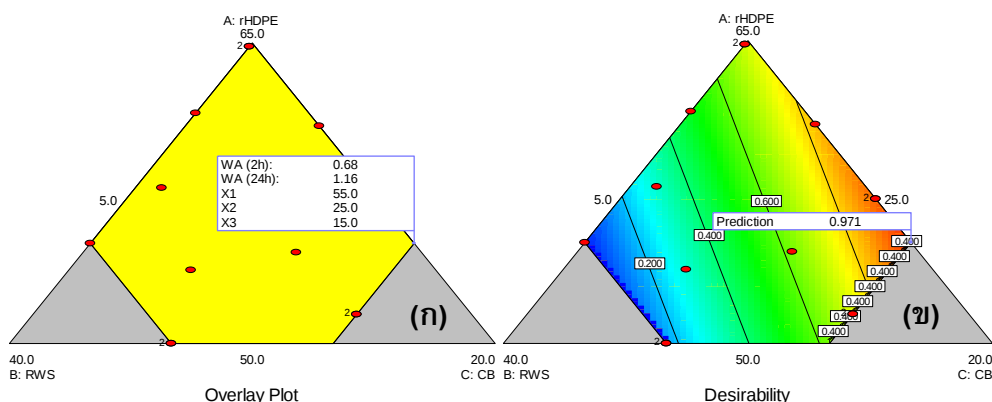
3.3 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของการดูดซับน้ำระยะสั้น (2h และ 24h)

อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h สามารถ

หาได้โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน ของกราฟเส้นโครงร่าง (Overlay Plot) ของผลตอบสนองแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และวิเคราะห์ความพึงพอใจของการทดลองเพื่อป้องกันความน่าเชื่อถือของการพยากรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยมีการกำหนดเงื่อนไขของการทดลองทุกตัวมีค่าต่ำที่สุด (Minimize) กล่าวคือ เป้าหมายของการทดลองนี้ต้องการประสิทธิภาพของ WPCs ที่ดีที่สุด ดังนั้น ค่าการดูดซับน้ำต้องมีค่าที่ต่ำที่สุด โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) พบว่า อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของสมบัติการดูดซับน้ำ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (55.0 wt%) ซีลี้อยไม้ยางพารา (25.0 wt%) และคาร์บอนแบล็ค (15.0 wt%) มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟพอลิเอทิลีน (4.0 wt%) และพาราฟินแว็กซ์ (1.0 wt%) ซึ่งมีค่าความน่าเชื่อถือ (Desirability) คือ 0.971 ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่า ผลกระทบของปัจจัยการผสมและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการทำนายมีความน่าเชื่อถือถึง 97.10% นอกจากนี้ เพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง ค่าผลการตอบสนอง และผลการวิเคราะห์ข้อมูลอัตราส่วนการผสมที่ได้จากการพยากรณ์ถูกทำการทดสอบเพื่อหาค่าการทดลองจริง (Observed) แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยผลการเปรียบเทียบมีความผิดพลาด 3.33% สำหรับการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และมีค่าความผิดพลาด 2.58% สำหรับการดูดซับน้ำระยะเวลา 24h ตามลำดับ จากค่าความผิดพลาดของทั้ง 2 การทดลองมีค่าน้อยกว่า 5% สรุปได้ว่า ข้อมูลจากการพยากรณ์มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ซึ่งเกิดจากการออกแบบการทดลองที่ถูกต้อง การดำเนินงานตามขั้นตอน และการวิเคราะห์ผลการทดลองที่แม่นยำ

ตารางที่ 5 อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติและผลการทดลองจริง

Response	Mixture Ratios (wt%)					Water Absorption (%)	
	A	B	C	D	E	(2h)	(24h)
Predicted	55.0	25.0	15.0	4.0	1.0	0.68	1.16
Observed						0.70	1.19
% Error						3.33	2.58



รูปที่ 4 เทคนิคการทับซ้อนกัน (Overlay Plot) ของกราฟและกราฟความน่าเชื่อถือ (Desirability) ของการพยากรณ์

4. สรุป

งานวิจัยทำการศึกษาศักยภาพการผสมและอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมภายใต้สภาวะการดูดซับน้ำระยะเวลา 2h และ 24h ของ WPCs โดยทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย ANOVA และ RSM จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยการผสมและระยะเวลาการดูดซับน้ำมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อสมบัติการดูดซับน้ำ กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนการผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลและคาร์บอนแบล็คเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับปัจจัยการผสมของซีลี้อยไม้ยางพารา กล่าวคือ เมื่อซีลี้อยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ สมการถดถอย (Regression Model) และกราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงผลการพยากรณ์ของปัจจัยและอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมของแต่ละการตอบสนอง ผลการวิเคราะห์แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์และปริมาณส่วนผสมของปัจจัยต่างๆ ในสภาวะที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานของ WPCs ที่

สัมพันธ์กับความชื้นระยะสั้น นอกจากนี้ การใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างสามารถพยากรณ์อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมของ WPCs โดยผลจากการพยากรณ์มีค่าความพึงพอใจ (Desirability) คือ 0.9710 หรือ 97.10% ซึ่งเป็นค่าที่สูง และเพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบการทดลองและค่าผลตอบสนองที่ได้จากการพยากรณ์ อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมจากการพยากรณ์ (Predicted) ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (Observed) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ratanawilai T, Lekanukit P, Urapantamas S. Effect of rubberwood and palm oil content on the properties of wood–polyvinyl chloride composites. *Journal of Thermoplastic Composites Material*. 2014; 27: 719-730.
- [2] Srivabut C, Ratanawilai T, Hiziroglie S. 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: 1503-1517.
- [3] Ayrlmis N, Buyuksari U, Dundar T. Waste pine cones as a source of reinforcing fillers for thermoplastic composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010; 117: 2324-2330.
- [4] Zolfaghari A, Behraves AH, Shahi P. Comparison of mechanical properties of wood–plastic composites reinforced with continuous and noncontinuous glass fibers. *Journal of Thermoplastic Composites Material*. 2015; 28: 791-805.
- [5] Xu ZH, Kong ZN. Mechanical and thermal properties of short-coir-fiberreinforced natural rubber/polyethylene composites *Mechanics. Composite Materials*. 2014; 50: 353-358.
- [6] Olakanmi EO, Ogunesan EA, Vunain E, Lafia-Araga RA, Doyoyo M, Meijboom R. 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: 2657-2672.
- [7] Ratanawilai T, Taneerat K. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. *Construction and Building Materials*. 2018; 172: 349-357.
- [8] Lamaming J, Hashim R, Sulaiman O, Sugimoto T, Sato M, Hiziroglu S. Measurement of some properties of binderless particleboards made from young and old oil palm trunks. *Measurement*. 2014; 47: 813–819.
- [9] Khamtree S, Ratanawilai T, Ratanawilai S. 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: 599 - 613.
- [10] Essabir H, Boujmal R, Bensalah MO, Rodrigue D, Bouhfid R, Qaiss AE. Mechanical and thermal properties of hybrid composites: Oil-palm fiber/clay reinforced high density polyethylene. *Mechanics of Materials*. 2016; 98: 36-43.
- [11] Huang RZ, Kim BJ, Lee S, Yang Z, Wu QL. Co-extruded wood-plastic composites with talc-filled shells: morphology, mechanical, and thermal expansion performance. *BioResources*. 2013; 8: 2283-2299.
- [12] Kord B, Varshoei A, Chamany V. Influence of chemical foaming agent on the physical, mechanical, and morphological properties of HDPE/wood flour/nanoclay composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011; 30: 1115-1124.
- [13] Srivabut C, Ratanawilai T, Hiziroglie S. 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,

DOI10.1177/0892705719889988.

[14] Homkhiew C, Ratanawilai T, Thongruang W. The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design. *Composites Part B-Engineering*. 2014; 56: 350-357.

[15] Homkhiew C, Ratanawilai T. Optimal Proportions of Composites from Polypropylene and Rubberwood Flour after Water Immersion Using Experimental Design. *KKU Research Journal*. 2014; 19: 780-793. (in Thai)

[16] Khamtree S, Ratanawilaia T, Ratanawilaib S. Determining the optimum conditions for silane treated rubberwood flour recycled polypropylene composites using response surface methodology. *Materials Today Communication*. 2020; 24: 100971.

[17] Kuo PY, Wang SY, Chen JH, Hsueh HC, Tsai MJ. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood-plastic composites manufactured by injection molding. *Material & Design*. 2014; 30: 3489-3496.

[18] Butylina S, Hyvärinen M, Kärki T. A study of surface changes of wood-polypropylene composites as the result of exterior weathering. *Polymer Degradation and Stability*. 2012; 97: 337-345.