



บทความวิจัย

อิทธิพลของระยะเวลาการดูดซับน้ำต่ออัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมและวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร*

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ชาตรี หอมเขียว และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ธเนศ รัตนวิไล

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 3714 5187 อีเมล: chainarong.s@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.011

รับเมื่อ 11 ตุลาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 13 ธันวาคม 2564 ตอบรับเมื่อ 16 ธันวาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 28 มิถุนายน 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เพื่อใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานที่สัมผัสความชื้นสูง โดยทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ซึ่งมีปัจจัย คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ขี้เลื่อยไม้ยางพารา คาร์บอนแบล็ค สารควบคู่ และสารหล่อลื่น ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทำนายอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ผลจากการทดลองพบว่า ระยะเวลาการดูดซับน้ำมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อสมบัติความแข็งและเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ การเพิ่มขึ้นของสารเสริมแรงคือ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราและคาร์บอนแบล็คส่งผลให้สมบัติความแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ สมการถดถอย (Regression Model) และกราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงถึงอิทธิพลของปัจจัยและผลการทำนายอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติโดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ คือ 55.6wt% rPP, 29.5wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP, และ 1.0wt% WAX ด้วยค่าความพึงพอใจจากการทำนาย คือ 84.70% ตามลำดับ และเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของการทำนายผลการตอบสนอง อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการทำนายถูกขึ้นรูปและทำการทดลองจริง (Observed) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ การออกแบบการทดลองแบบผสม สมบัติความแข็ง สมบัติการดูดซับน้ำ วิธีพื้นผิวตอบสนอง

การอ้างอิงบทความ: ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร, ชาตรี หอมเขียว, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และ ธเนศ รัตนวิไล, “อิทธิพลของระยะเวลาการดูดซับน้ำต่ออัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมและวิธีพื้นผิวตอบสนอง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 1-13, เลขที่บทความ 243-115538, ก.ค.-ก.ย. 2567.



Influence of Water Immersion Time on Optimal Composition of Wood-Plastic Composites Using Mixture Experiment Design and Response Surface Methodology

Chainarong Srivabut*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand

Chatree Homkhiew and Surasit Rawangwong

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

Thanate Ratanawilai

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 3714 5187, E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.011

Received 11 October 2021; Revised 13 December 2021; Accepted 14 December 2021; Published online: 28 June 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this research is to predict the optimal composition of Wood-plastic Composites (WPCs) to use in the design of composite products that are exposed to high moisture content. The experimental design was determined from the mixture design with the components including recycled polypropylene, rubber-wood sawdust, carbon black, coupling agent, and lubricant respectively. The experimental results were analyzed by ANOVA and optimized using Response Surface Methodology (RSM). The results of the experiment showed that the water immersion time had significantly ($P < 0.05$) affected on the hardness properties and percentage of water absorption. Increasing of reinforcing agents, namely rubber wood sawdust and carbon black, resulted in increased hardness properties. Additionally, the regression model and the contour plot were used to analyze the influence of factors on each property and predict the optimal composition of WPCs. Moreover, the optimal composition for overall response was 55.6 wt% rPP, 29.5wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP, and 1.0wt% WAX with desirability score combining their outputs value of 84.70%. For the accuracy of the response prediction, the optimal composition was observed by the actual experiment to determine the percentage difference and the standard deviation.

Keywords: Wood-plastic Composites, Mixture Design, Hardness Properties, Water Absorption, Response Surface Methodology

Please cite this article as: C. Srivabut, C. Homkhiew, S. Rawangwong and T. Ratanawilai, "Influence of Water Immersion Time on Optimal Composition of Wood-Plastic Composites Using Mixture Experiment Design and Response Surface Methodology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 3, pp. 1-13, ID. 243-115538, Jul.-Sep. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและมีอุตสาหกรรมหลายแห่งที่สนใจและทำการผลิตวัสดุชนิดนี้ เช่น ของเล่นเด็ก วัสดุโครงสร้าง และวัสดุตกแต่งอาคารสถานที่ เป็นต้น [1], [2] WPCs มีส่วนผสมหลักคือ พลาสติกและเส้นใยธรรมชาติที่อยู่ในรูปของอนุภาคหรือเส้นใย ดังนั้น คุณสมบัติที่เกิดขึ้นของ WPCs จึงมาจากคุณสมบัติเด่นของวัสดุ 2 ชนิดร่วมกัน คือ เมื่อเทียบกับพลาสติก WPCs จะมีความแข็งแรงและความทนทานสูง นอกจากนี้ สามารถป้องกันเชื้อรา ปลวก มด และแมลง เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ในธรรมชาติ [3] อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายด้วยกระบวนการทางความร้อน

การขึ้นรูป WPCs โดยทั่วไปสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection) และการอัดร้อน (Hot-press) [4], [5] ซึ่งวัสดุชนิดนี้มีการขึ้นรูปที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางความร้อน เนื่องจากส่วนผสมหลักของ WPCs คือ พลาสติก โดยผลิตภัณฑ์ WPCs จะมีส่วนผสมของเทอร์โมพลาสติกเป็นหลัก เช่น พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีน (PE) [6], [7] นอกจากนี้สมบัติของ WPCs ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมอื่นๆ เช่น ปริมาณสารเสริมแรง [8]

สารเสริมแรง (Reinforcement) สำหรับ WPCs มีลักษณะเฉพาะและขนาดของเส้นใยที่แตกต่างกัน เช่น เส้นใยาว เส้นใยสั้น หรืออนุภาค โดยทั่วไปแล้ววัสดุทางธรรมชาติที่มีเส้นใยเป็นส่วนประกอบและใช้เสริมแรงใน WPCs ได้แก่ มะพร้าว ปาล์ม สับปะรด ฝ้าย ไม้ไผ่ และไม้ยางพารา เป็นต้น [9], [10] ซึ่งขนาดของเส้นใยเหล่านี้เมื่อผสมอยู่ใน WPCs จะมีลักษณะเฉพาะ การกระจายตัว และการเชื่อมโยงของเฟสที่แตกต่างกันไป รวมถึงส่งผลต่อสมบัติทางกล กายภาพ และความร้อนที่แตกต่างกัน [2], [6] นอกจากนี้ สมบัติต่าง ๆ ของ WPCs ยังขึ้นอยู่กับส่วนผสมอื่น ๆ เช่น สารเติมแต่ง เป็นต้น

สารเติมแต่ง (Additives) สำหรับ WPCs มีการเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น สมบัติทางกล กายภาพ และความร้อน [1], [11] โดยทั่วไปแล้ว

สารเติมแต่งเหล่านี้จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงกว่าพลาสติกและเส้นใย ดังนั้น เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเข้าไปใน WPCs เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพสารเติมแต่งเหล่านี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นฐานของ WPCs [12] นอกจากนี้ สารเติมแต่งบางประเภท เช่น สารเคมีต่าง ๆ สามารถช่วยในกระบวนการผลิต WPCs ให้มีความเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เช่น สารควบคุม สารป้องกันแสงยูวี และสารหล่อลื่น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการผลิตและสมบัติต่าง ๆ ของ WPCs [4], [13], [14]

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการใช้งาน WPCs ในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดความไม่แน่นอนด้านความเสถียรของวัสดุทำให้มีข้อจำกัดต่อการใช้งานเกิดขึ้น โดยเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อ WPCs คือ อุณหภูมิ ความชื้น และเวลา [15], [16] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของ WPCs ที่มีความเหมาะสม โดยทำการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ในรูปแบบของ D-optimal ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมในออกแบบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการทดลอง โดยการกำหนดผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับ 100% อีกทั้งสามารถลดสถานะในการทดลองได้อีกด้วย [2], [7], [10] โดยมีส่วนผสมหลักคือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซีลีโอไมยางพารา และคาร์บอนแบล็ค นอกจากนี้ ยังใช้สารเติมแต่งที่ช่วยในกระบวนการผสม คือ สารคู่ควบและสารหล่อลื่น จากนั้น ทำการทดสอบความแข็งแรงและการดูดซับน้ำระยะเวลา 6 เดือน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขสำหรับงานที่มีความชื้นสูง อีกทั้งยังเป็นการสนับสนุนการใช้ขยะพลาสติก ซีลีโอไมที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการส่งเสริมการใช้พืชเศรษฐกิจให้เกิดประโยชน์ ทำให้เพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ ลดขยะที่เกิดขึ้นในสังคม และลดการเผาไหม้ที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (Recycled Polypropylene; rPP) ความหนาแน่น 0.83 ก./ลบ.ม. จากบริษัท วิทยา อินเทอร์เน็ต

จำกััด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) จากบริษัท ศรีพุทธรัง พารากรู๊ป จำกัด (ตรัง ประเทศไทย) คาร์บอนแบล็ค (Carbon black; CB) เกรด N 330 ขนาด 125 ไมโครเมตร จากบริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด (สมุทรสาคร ประเทศไทย) เพื่อใช้เสริมแรงใน WPCs สารควบคู่ (Coupling Agent) เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์และสารเสริมแรง คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอพลิโพรพิลีน (Maleic Anhydride Grafted Polypropylene; MAPP) ที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ประมาณ 8–10wt% จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด (Missouri, USA) และสารหล่อลื่น (Lubricant) เพื่อช่วยให้กระบวนการผสมมีการไหลตัวที่ดี โดยใช้พาราฟินส์ แวกซ์ (Paraffin Wax; WAX) จากบริษัท Nippon Seiro จำกัด (Tokyo, Japan) โดยมีช่วงการส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของปัจจัยการทดลอง

ปัจจัย	อัตราส่วนผสม (wt%)
rPP (A)	$40.0 \leq A \leq 60.0$ [2]
RWS (B)	$25.0 \leq B \leq 45.0$ [15], [11]
CB (C)	$5.0 \leq C \leq 10.0$ [1]
MAPP (D)	3.9 [7]
WAX (E)	1.0 [11]

2.2. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบผสมรูปแบบ D-optimal ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมของปัจจัย 5 ชนิด คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (A) ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (B) คาร์บอนแบล็ค (C) สารควบคู่ (D) และสารหล่อลื่น (E) ตามลำดับ โดยมีผลรวมของปัจจัยรวม 100 เปอร์เซนต์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนอง คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ขี้เลื่อยไม้ยางพารา และ คาร์บอนแบล็ค และในส่วนของสารควบคู่และสารหล่อลื่น กำหนดเป็นค่าคงที่ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนอง ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) รวมถึงการสร้างสมการถดถอย (Regression Model) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ของอัตราส่วนผสม นอกจากนี้ ทำนายสูตรการผสมที่

เหมาะสมต่อสมบัติความแข็งแรงและการดูดซับน้ำ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) [2] ด้วยโปรแกรม Design-Expert Software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) โดยมีการออกแบบการทดลองทั้งหมด 16 สูตร แสดงดังตารางที่ 2

2.3 กระบวนการผสมและการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

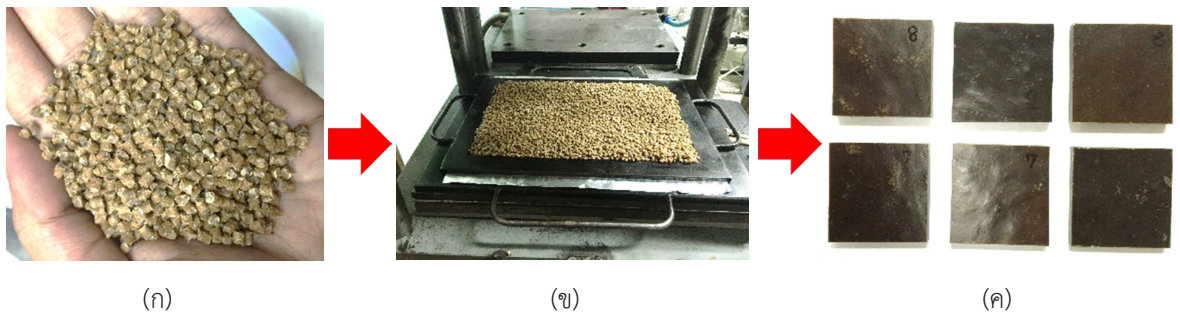
ก่อนการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh (<177 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที [6], [7] และทำการรอบด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชม. เพื่อลดความชื้นในขี้เลื่อยไม้ [1], [6] จากนั้นทำการผสมและขึ้นรูปโดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนการผสมเม็ด WPCs โดยทำการคลุกเคล้าอัตราส่วนผสมที่จัดเตรียมไว้ตามการออกแบบการ จากนั้นทำการเทส่วนผสมลงในเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) รุ่น SHJ-36 จากบริษัท เอ็นแมช จำกัด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลว 7 ช่วง ระหว่าง 180–210 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบของเกลียวทวน คือ 50 รอบ/นาที จากนั้นทำการตัดเม็ด WPCs ให้มีขนาดประมาณ 2 มม. ทำการอบเม็ด WPCs เพื่อลดความชื้นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผสมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม.

2) ขั้นตอนการอัดร้อน WPCs โดยทำการเทเม็ด WPCs ที่เตรียมไว้ลงในแม่พิมพ์ขนาด 15×25 ซม.². จากนั้นทำการอัดร้อน (Hot-press) ด้วยแรงดัน 1000 psi อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ประกอบด้วย การอุ่นแม่พิมพ์ 5 นาที การกดอัด 10 นาที และการหล่อเย็นด้วยน้ำ 5 นาที ตามลำดับ [1], [9] จากนั้นทำการตัดแผ่น WPCs ตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละสมบัติ คือ การทดสอบความแข็งแรงและการดูดซับน้ำ แสดงดังรูปที่ 1

2.4 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงของ WPCs

การทดสอบสมบัติความแข็งแรง (Hardness Properties) ของ WPCs ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D2240-91 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงประเภท Shore D Durometer โมเดล



รูปที่ 1 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างการทดสอบความแข็งแรงและการดูดซับน้ำ

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและผลการตอบสนองของแต่ละสมบัติโดยเฉลี่ยจากการทดสอบ 5 ซ้ำ

ลำดับ	อัตราส่วนผสม (Wt%)			ความแข็งแรง			การดูดซับน้ำ (%)		
	A	B	C	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน
1	40.1	45.0	10.0	67.50	64.50	61.30	7.55	9.96	10.16
2	60.0	25.1	10.0	72.20	68.90	65.60	4.01	6.42	6.98
3	60.0	27.6	7.5	71.50	70.40	67.20	4.11	6.31	6.73
4	45.1	45.0	5.0	71.50	68.80	66.10	6.88	9.28	9.66
5	53.4	33.4	8.3	76.50	73.60	70.40	5.64	8.24	8.28
6*	53.4	33.4	8.3	75.30	74.80	70.50	5.43	7.81	8.19
7	50.1	35.0	10.0	77.30	75.20	72.10	4.23	6.79	7.28
8	55.0	35.1	5.0	75.20	72.90	69.70	5.01	7.15	7.47
9	46.7	38.4	10.0	75.80	73.60	69.50	6.94	9.18	9.48
10*	60.0	27.6	7.5	70.50	68.60	66.20	4.13	6.58	6.99
11	60.0	30.1	5.0	71.70	68.50	66.10	4.69	7.13	7.51
12	53.4	33.4	8.3	75.60	73.50	70.20	4.80	7.02	7.40
13*	60.0	25.1	10.0	72.90	71.00	67.40	4.12	6.67	7.04
14*	40.1	45.0	10.0	68.40	64.40	62.00	7.29	9.59	10.00
15	51.9	36.9	6.3	73.90	71.90	69.20	5.44	7.74	8.20
16	50.1	40.0	5.0	76.10	74.20	71.80	6.10	9.02	9.32

หมายเหตุ: * คือ Replicate เพื่อหาค่า Lack of fit, ค่า D และ E คือ 3.9 และ 1.0 wt% ตามลำดับ

GS-702G จากบริษัท Teclock Corporation (Nagano, Japan) โดยมีขนาดชิ้นงานตัวอย่าง $30 \times 30 \times 4.8$ มม.³. ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 เดือน เมื่อครบกำหนดชิ้นงานตัวอย่างถูกหยิบขึ้นมาชั่งน้ำหนักด้วยกระดาศชั่งชั่ง จากนั้นทำการวัดค่าความแข็งทันที โดยทำการเก็บข้อมูลสมบัติความแข็งแรง

หลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน ตามลำดับ ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ ภายใต้อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส)

2.5 การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำของ WPCs

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water Absorption; WA) ของ WPCs ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D570-88 โดย

ชิ้นงานตัวอย่างมีขนาด $30 \times 30 \times 4.8$ มม.³ ก่อนการทดสอบ ชิ้นงานตัวอย่างถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน ซึ่งเป็นระยะเวลาการอิ่มตัวของ WPCs เช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติความแข็ง ก่อนการแช่น้ำ ชิ้นงานตัวอย่างถูกชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักก่อนการแช่ จากนั้นเมื่อชิ้นงานถูกแช่ครบระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ซับน้ำด้วยกระดาษทิชชู และถูกชั่งน้ำหนักทันที ทำการทดสอบ 5 จ้ำ ภายใต้อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เพื่อกำหนดหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นหลังการดูดซับน้ำของ WPCs

3. ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางสถิติ

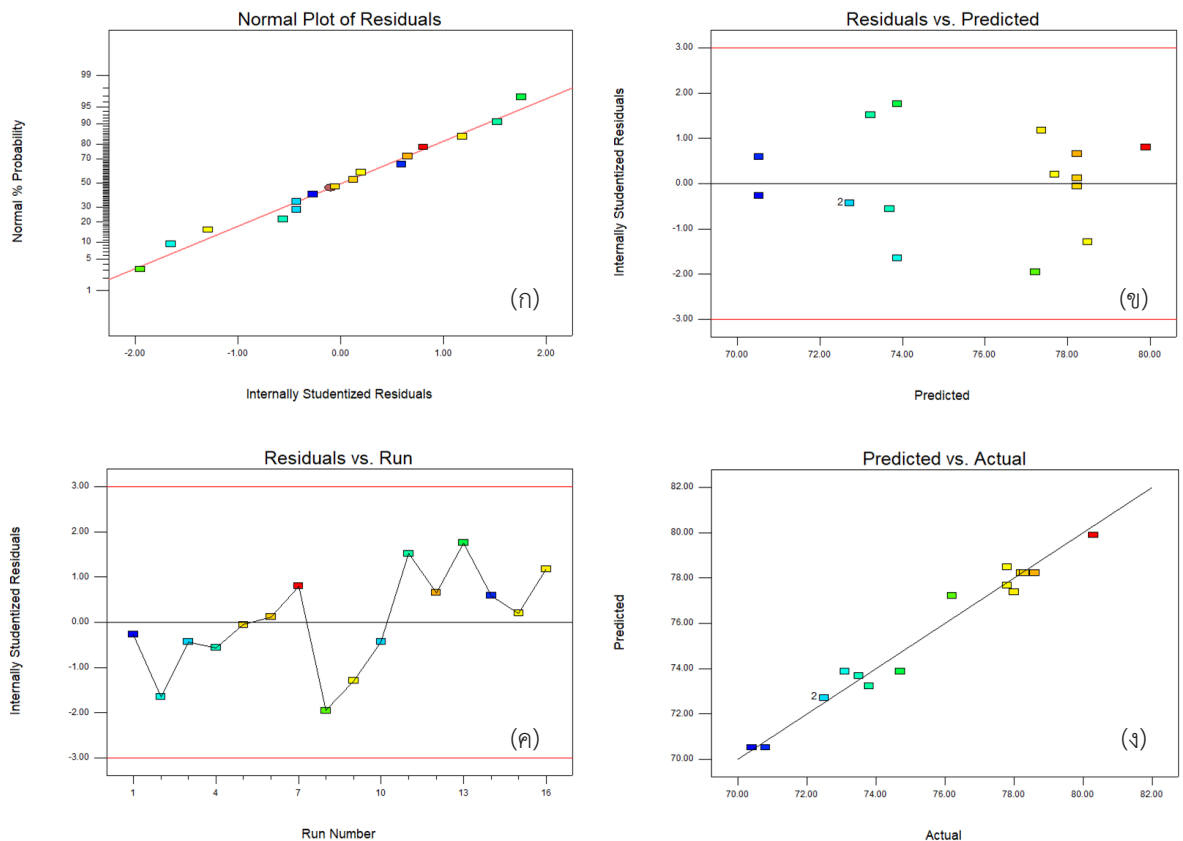
จากผลการตอบสนองสมบัติความแข็งและการดูดซับน้ำ ระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน แสดงดังตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน และค่าสถิติอื่น ๆ เพื่อหารูปแบบการจำลองที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติและเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการทดลอง โดยทำการพิจารณาจากค่าสถิติ ดังนี้ คือ ค่า R^2 มีค่ามากกว่า 75.00% ค่า Adj- R^2 และค่า Pred- R^2 มีค่าสูง และค่า Lack-of-fit ไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 3 ตามลำดับ พบว่า

การตอบสนองทั้งหมดมีรูปแบบการจำลองที่เหมาะสม คือ เชิงเส้นตรง (Linear Model) และเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Model) ตามลำดับ จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่า R^2 ของผลการตอบสนองทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.8414–0.9719 ซึ่งเป็นค่าที่สูงและมากกว่า 0.7500 หรือ 75.00% แสดงให้เห็นว่า รูปแบบจำลองเหล่านี้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่กระหว่างตัวแปรอิสระและผลการตอบสนอง ซึ่งมีความสามารถในการทำนายได้ประมาณ 84.14–97.19% เช่นเดียวกับค่า Adj- R^2 และ Pred- R^2 ของผลการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.8170–0.9579 และ 0.7803–0.9288 สรุปได้ว่า ข้อมูลในการทดลองมีความเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองการถดถอยและการทำนายผลการตอบสนอง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 81.70–95.79% และ 78.03–92.88% ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่า Coefficients of Variation (C.V.) สามารถบอกได้ถึงความแม่นยำของการสร้างรูปแบบจำลอง กล่าวคือ เมื่อมีค่า C.V. ต่ำจะส่งผลให้ความแม่นยำในการทำนายมีมากยิ่งขึ้น จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่า C.V. มีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่า รูปแบบจำลองทั้งหมดมีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหรือสร้างสมการถดถอยได้ [7], [11]

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และรูปแบบจำลองที่เหมาะสมของการตอบสนอง

ข้อมูลการวิเคราะห์	ตัวแบบเชิงเส้นโค้ง			ตัวแบบเชิงเส้นตรง		
	ความแข็ง			การดูดซับน้ำ		
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน
Model	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*
Linear mixture	0.0067*	0.0083*	0.0033*	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*
AB	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*	-	-	-
AC	0.0303*	0.6563	0.6195	-	-	-
BC	0.0084*	0.3204	0.3128	-	-	-
Lack-of-fit	0.3967	0.4907	0.1530	0.0683	0.2474	0.1307
R^2	0.9660	0.9433	0.9420	0.8583	0.8414	0.8628
Adj- R^2	0.9490	0.9149	0.9130	0.8365	0.8170	0.8417
Pred- R^2	0.9288	0.8602	0.8425	0.8071	0.7803	0.8072
CV	0.91	1.40	1.39	9.18	6.79	5.77

หมายเหตุ: * คือ ค่า p -value น้อยกว่า 0.05 (มีนัยสำคัญ)

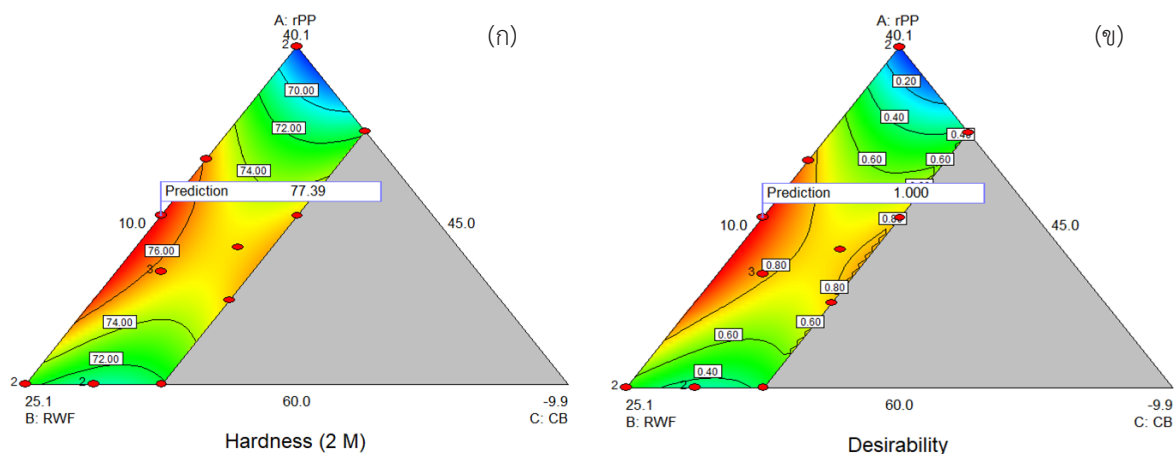


รูปที่ 2 การตรวจสอบความเพียงพอของข้อมูลจากรูปแบบจำลองการถดถอย

3.2 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง กระบวนการผลิต และการวิเคราะห์ผลการทดลอง นอกจากนี้ ยังเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เกิดขึ้น โดยยกตัวอย่างการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองของสมบัติความแข็งหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 เดือน โดยมีการวิเคราะห์รูปแบบของกราฟต่าง ๆ คือ 1) กราฟการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ (Normal % probability) พบว่า การกระจายของข้อมูลมีรูปแบบการจัดเรียงข้อมูลเป็นแนวเส้นตรงล้อมรอบและแนบชิดกับเส้นตรงอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 2 (ก) สรุปได้ว่า ค่าของเศษเหลือจากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Plot of Residuals) 2) กราฟความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted)

พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวโดยมีระยะห่างที่เท่ากัน ๆ จากเส้นตรงอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 2 (ข) อธิบายได้ว่า ค่าเศษเหลือที่เกิดขึ้นกับการทดลองไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ 3) กราฟความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) พบว่า ข้อมูลไม่มีการกระจายตัวเป็นแบบแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ อีกทั้งยังมีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในขีดจำกัดของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2 (ค) สรุปได้ว่า เศษเหลือที่เกิดขึ้นไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลอง และ 4) กราฟความสัมพันธ์ของค่าการทำนายต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs. Actual) พบว่า การกระจายของข้อมูลมีรูปแบบการจัดเรียงข้อมูลล้อมรอบและแนบชิดกับเส้นตรงอ้างอิงเช่นเดียวกันกับค่าการแจกแจง



รูปที่ 3 กราฟโครงสร้างสำหรับสมบัติความแข็งแรงหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน

ข้อมูลแบบปกติ ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองการถดถอยเหล่านี้สามารถทำนายค่าจากการทดลองได้ถูกต้องและอย่างแม่นยำ แสดงดังรูปที่ 2 (ง) โดยมีค่าการตอบสนองที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายต่อค่าการทดลองจริง [1], [7]

3.4 อิทธิพลของปัจจัยส่วนผสมต่อสมบัติความแข็งแรงหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน

จากผลการตอบสนองในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาการดูดซับน้ำมีผลต่อสมบัติความแข็งแรงของ WPCs กล่าวคือเมื่อระยะเวลาการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีค่าลดลง [1] เนื่องจาก ส่วนผสมหลักของ WPCs คือ ไม้ยางพารา โดยทั่วไปแล้วจะมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อสัมผัสกับความชื้นสูงทำให้น้ำมีการแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างได้ง่ายและรวดเร็วส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงมีค่าลดลง [6], [11] นอกจากนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงหลังการดูดซับน้ำ สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการถดถอยของการตอบสนอง แสดงดังสมการที่ (1)–(3) ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยหลัก 3 ชนิด มีผลต่อสมบัติความแข็งแรงมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยร่วมที่เกิดจากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของคาร์บอนแบล็ค มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิพร็อพิลีนซีโรเคิล และไม้ยางพารา ตามลำดับ สรุปได้ว่า การเติมคาร์บอนแบล็คเป็น

ส่วนผสมใน WPCs มีผลโดยตรงต่อสมบัติความแข็งแรงและส่งผลให้ความสมบัติเชิงกลอื่น ๆ เพิ่มขึ้นเช่นกัน [1], [8] นอกจากนี้ ปัจจัยร่วมที่เกิดขึ้นจากอัตราส่วนผสมส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงของ WPCs พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างไม้ยางพาราและคาร์บอนแบล็คให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด เนื่องจาก ไม้ยางพาราและคาร์บอนแบล็คทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงที่ถูกเติมเข้าไปใน WPCs เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและกายภาพ ดังนั้น จึงมีผลโดยตรงต่อสมบัติความแข็งแรงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรง [2], [10], [16]

$$Y(2\text{ M}) = -0.41A - 1.26B + 18.27C + 0.07AB - 0.18AC - 0.22BC \quad (1)$$

$$Y(4\text{ M}) = -0.64A - 1.53B + 8.44C + 0.08AB - 0.05AC - 0.11BC \quad (2)$$

$$Y(6\text{ M}) = -0.54A - 1.37B + 8.11C + 0.07AB - 0.05AC - 0.10BC \quad (3)$$

นอกจากนี้ ตัวอย่างกราฟโครงสร้างของการทำนายอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อสมบัติความแข็งแรงหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 เดือน แสดงดังรูปที่ 3 นอกจากนี้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของสมบัติดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของสมบัติความแข็งแรงหลังการดูดซับ

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และค่าความพึงพอใจ

การตอบสนอง	อัตราส่วนผสม					ค่าการทำนาย	ค่าความพึงพอใจ
	A	B	C	D	E		
Hardness (2 M)	50.1	35.1	10.0	3.9	1.0	77.39	1.000
Hardness (4 M)	51.7	33.4	10.0	3.9	1.0	75.37	1.000
Hardness (6 M)	51.8	33.3	10.0	3.9	1.0	71.59	0.953
WA (%) (2 M)	60.0	25.4	9.7	3.9	1.0	3.95	1.000
WA (%) (4 M)	60.0	25.1	10.0	3.9	1.0	6.31	1.000
WA (%) (6 M)	60.0	25.1	10.0	3.9	1.0	6.73	1.000

น้ำระยะเวลา 2 เดือน คือ 50.1wt% rPP, 35.1wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP, และ 1.0wt% WAX ด้วยค่าการทำนาย คือ 77.39 และค่าความพึงพอใจ คือ 1.000 แสดงดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อสมบัติความแข็งแรงหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 4 เดือน คือ 51.7wt% rPP, 33.4wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP และ 1.0wt% WAX ด้วยค่าการทำนาย คือ 75.37 และค่าความพึงพอใจ คือ 1.000 และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อสมบัติความแข็งแรงหลังการดูดซับน้ำระยะเวลา 6 เดือน คือ 51.8wt% rPP, 33.3wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP, และ 1.0wt% WAX ด้วยค่าการทำนาย คือ 71.59 และค่าความพึงพอใจ คือ 0.953 แสดงดังตารางที่ 4 ตามลำดับ

3.5 อิทธิพลของปัจจัยส่วนผสมต่อสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า สมการถดถอยของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน ของ WPCs มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ เชิงเส้นตรง แสดงดังสมการที่ (4)–(6) ตามลำดับ กล่าวคือ ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำมีเพียงปัจจัยหลักเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากสมการถดถอยของสมบัติความแข็งแรงที่มีปัจจัยร่วมของการทดลองนำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายผลการตอบสนอง ผลจากการทดลอง สรุปได้ว่า ระยะเวลาการดูดซับน้ำมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

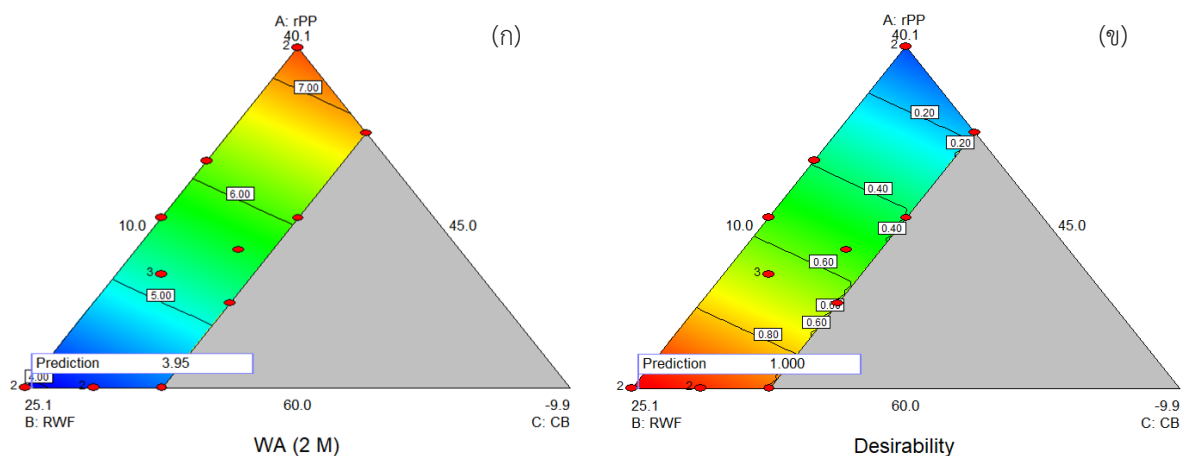
ของ WPCs กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน [11] นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยสามารถอธิบายถึงปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำของ WPCs พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเลื้อยไม่ยาวพารา มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และคาร์บอนแบล็ค ตามลำดับ สรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมของซีเลื้อยไม่ยาวพารามีผลโดยตรงต่อสมบัติการดูดซับน้ำ นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยหลักทั้ง 3 ชนิด มีความใกล้เคียงกัน อธิบายได้ว่า การสร้างสมการถดถอยจากผลการตอบสนองมีความถูกต้องและแม่นยำสามารถนำไปทำนายอัตราส่วนผสมของการทดลองได้

$$Y(2\text{ M}) = -0.01A + 0.16B + 0.07C \quad (4)$$

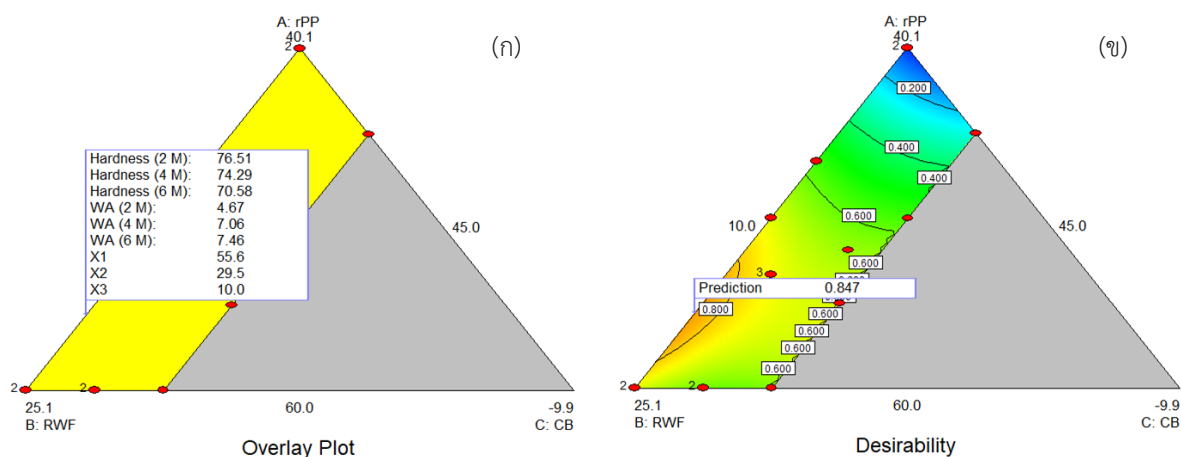
$$Y(4\text{ M}) = 0.01A - 0.18B + 0.08C \quad (5)$$

$$Y(6\text{ M}) = 0.02A - 0.17B + 0.09C \quad (6)$$

นอกจากนี้ตัวอย่างกราฟโครงร่างของสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 เดือน แสดงดังรูปที่ 4 และผลการทำนายอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 เดือน คือ 60.0wt% rPP, 25.4wt% RWS, 9.7wt% CB, 3.9wt% MAPP และ 1.0wt% WAX ซึ่งมีค่าการทำนาย คือ 3.95% และค่า



รูปที่ 4 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) สำหรับสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน



รูปที่ 5 เทคนิคการซ้อนทับของกราฟค่าการทำนายร่วมกันของสมบัติทั้งหมด และค่าความพึงพอใจจากการทำนาย

ความพึงพอใจ คือ 1.000 แสดงดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ นอกจากนี้ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของสมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 4 และ 6 เดือน คือ 60.0wt% rPP, 25.1wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP และ 1.0wt% WAX ซึ่งมีค่าการทำนาย คือ 6.31% และ 6.73% โดยมีค่าความพึงพอใจของทั้ง 2 การทดลอง คือ 1.000 แสดงดังตารางที่ 4 ตามลำดับ จากอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของทั้ง 3 การทดลอง จะเห็นได้ว่า ค่าความพึงพอใจมีค่า 1.000 หรือ 100% สามารถอธิบายได้ว่า ผลจากการทำนายอัตราส่วนผสมของ WPCs มีความถูกต้องและแม่นยำสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์ WPCs เพื่อ

ให้เหมาะสมแก่การใช้งานที่สัมผัสกับความชื้นสูง [1], [13]

3.6 อิทธิพลของปัจจัยส่วนผสมร่วมกันของทุกสมบัติสำหรับ WPCs

จากอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติแสดงดังตารางที่ 4 ประกอบด้วย สมบัติความแข็งแรงก่อนและหลังการดูดซับน้ำ และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำระยะเวลา 2 4 และ 6 เดือน ทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการซ้อนทับกัน (Overlay Plot) ของกราฟเส้นโครงร่างผลตอบสนองเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันและค่าความพึงพอใจของทุกสมบัติ แสดงดังรูปที่ 5 (ก) และ (ข) โดยมีการกำหนด

ตารางที่ 5 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ ผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย และผลการทดลองจริง

การตอบสนอง	อัตราส่วนผสม					ความแข็ง			การดูดซับน้ำ (%)		
	A	B	C	D	E	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน
Predicted	55.6	29.5	10.0	3.9	1.0	76.51	74.29	70.58	4.67	7.06	7.46
Observed						75.33	72.89	71.12	4.06	7.59	8.01
Standard Deviation (SD)						(1.22)	(0.98)	(1.13)	(0.67)	(0.87)	(0.18)

เงื่อนไขของสมบัติความแข็งให้มีความสูงสุด (Maximize) และสมบัติการดูดซับน้ำให้มีความต่ำสุด (Minimize) อธิบายได้ว่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของ WPCs ที่ได้จากการทำนายต้องมีความแข็งแรงสูงและมีความการดูดซับน้ำต่ำ [7] พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติสำหรับ WPCs คือ 55.6wt% rPP, 29.5wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP และ 1.0wt% WAX ด้วยค่าความพึงพอใจจากการทำนาย คือ 0.847 หรือ 84.70% ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5 นอกจากนี้ทำการยืนยันผลจากการทำนายโดยการนำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการทำนาย (Prediction) ไปทำการทดลองจริงอีกครั้ง [7], [11], [15] จากผลการทดลองพบว่า ค่าที่ได้จากการทำนายและค่าการทดลองจริงที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกัน โดยผลการตอบสนองที่มีค่าต่างกันสูงสุด คือ สมบัติการดูดซับน้ำระยะเวลา 4 เดือน ซึ่งมีค่าการตอบสนองจากการทำนายและค่าการทดลองจริง คือ 7.06 และ 7.59 ตามลำดับ โดยมีความต่างกัน 6.98% ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการทดลองจริง คือ 0.87 แสดงดังตารางที่ 5

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากสมบัติความแข็งแรงและการดูดซับน้ำของ WPCs เพื่อใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานในสภาวะที่สัมผัสความชื้นสูงโดยกำหนดปัจจัยในการทดลอง คือ พอลิโพรพิลีน รีไซเคิล ซีลี้อยไม้ยางพารา คาร์บอนแบล็ค สารควบคู่ และสารหล่อลื่น จากนั้นทำการออกแบบการทดลองแบบผสมและทำการวิเคราะห์การทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและทำนายผลการตอบสนองด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อระยะการดูดซับน้ำ

เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงลดลงแต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของสารเสริมแรง คือ ซีลี้อยไม้ยางพาราและคาร์บอนแบล็คส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สมการถดถอย และกราฟโครงร่าง แสดงอิทธิพลของปัจจัยและผลการทำนายที่เหมาะสมของแต่ละสมบัติ ผลการวิเคราะห์แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานของ WPCs นอกจากนี้อัตราส่วนที่เหมาะสมร่วมกันของผลการตอบสนองทั้งหมดสามารถทำนายได้โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมร่วมกันของทุกสมบัติ คือ 55.6wt% rPP, 29.5wt% RWS, 10.0wt% CB, 3.9wt% MAPP, และ 1.0wt% WAX ด้วยค่าความพึงพอใจจากการทำนาย คือ 0.847 หรือ 84.70% ตามลำดับ และเพื่อความถูกต้องของการทดลอง อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการทำนายถูกขึ้นรูปและทำการทดลองจริง อีกครั้งเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง

ข้อเสนอแนะงานวิจัย

การออกแบบผลิตภัณฑ์ควรขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดหรือการอัดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานให้แก่ผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ไม่ควรใช้งานผลิตภัณฑ์ในที่โล่งแจ้งตลอดเวลาเพราะจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และสาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและพื้นที่ในการทำงานวิจัย



เอกสารอ้างอิง

- [1] 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*, no. 162, pp. 450–458, 2018.
- [2] C. Homkhiew, W. Boonchouytan, S. Rawangwong, and T. Ratanawilai "Optimal manufacturing parameters of rubberwood flour/high density polyethylene composites using Box–Behnken design," *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 2, pp. 315–328, 2017 (in Thai).
- [3] N. Ayilimis, 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.
- [4] R. Z. Huang, B. J. Kim, S. Lee, Z. Yang, and 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.
- [5] 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. 2, pp. 8510–8523, 2015.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] N. Jarunjaruphat and S. Acharry, "The particleboard manufacturing from agricultural waste," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 2, pp. 469–476, 2018 (in Thai).
- [9] 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.
- [10] 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 (in Thai).
- [11] C. Srivabut, T. Ratanawilai, 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.
- [12] 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. 13, pp. 72–85, 2015.

- [13] 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*, vol. 98, pp. 36–43, 2016.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] C. Homkhiew, S. Rawangwong, W. Boonchouytan, "Optimizing Condition for manufacturing the binderless particleboard by response surface methodology," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 40–55, 2015 (in Thai).