



ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราหลังการแช่น้ำโดยใช้การออกแบบการทดลอง

Optimal Proportions of Composites from Polypropylene and Rubberwood Flour after Water Immersion using Experimental Design

ชาตรี หอมเขียว^{1*} และธนศ รัตนวิไล²

Chatree Homkhiew^{1*} and Thanate Ratanawilai²

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

¹หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ (Materials Processing Technology Research Unit)

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*Correspondent author: chatree.h@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองถูกนำมาใช้หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราหลังจากถูกแช่น้ำ การผลิตชิ้นงานตัวอย่างขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่ จากการทดลองพบว่าส่วนผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ผงไม้ยางพารา สารคู่ควบ และสารต้านทานรังสียูวีมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติการดูดซับน้ำ ความแข็งแรงดัด และมอดูลัสการดัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกหลังจากถูกแช่น้ำ เช่นเดียวกันพบว่าการเติมผงไม้ยางพาราเป็นส่วนผสมในวัสดุผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไม้ที่เติม เช่นเดียวกันพบว่าความแข็งแรงดัดของวัสดุผสมเมื่อถูกแช่น้ำ 2 สัปดาห์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แต่เมื่อถูกแช่น้ำ 4 สัปดาห์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น สำหรับมอดูลัสการดัดของวัสดุผสมทั้งหลังจากแช่น้ำ 2 และ 4 สัปดาห์พบว่ามีค่าลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสมในวัสดุผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สมการถดถอยของสมบัติการดูดซับน้ำ ความแข็งแรงดัด และมอดูลัสการดัดหลังจากแช่น้ำสามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมต่อสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำ ซึ่งสูตรประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล 68.9 wt% ผงไม้ยางพารา 25.0 wt% สารคู่ควบ 4.9 wt% สารต้านทานรังสียูวี 0.2 wt% และสารหล่อลื่น 1.0 wt%

Abstract

Mixture experimental design and response surface methodology were used to optimize the formulation of rubberwood flour-polypropylene composites after water immersion. The mixed materials were formed into panels using a twin-screw extruder. The overall composition, including recycled polypropylene (rPP), rubberwood flour (RWF), coupling agent, and ultraviolet (UV) stabilizer, significantly affected on water absorption, flexural strength (MOR) and flexural modulus (MOE). The increasing addition of RWF in the rPP composites increased the water absorption. MOR slightly increased with an increase of RWF after 2 weeks of water immersion but it significantly decreased after 4 weeks. Likewise, MOE of the composites decreased with an increase of RWF after 2 and 4 weeks of water immersion. Furthermore, regression models fitted of water absorption, MOR, and MOE were used to optimize the proportions of rPP/RWF composites after water immersion, and optimal proportion found was 68.9 wt% rPP, 25.0 wt% RWF, 4.9 wt% coupling agent, 0.2 wt% UV stabilizer, and 1.0 wt% lubricant.

คำสำคัญ: วัสดุผสมไม้พลาสติก ผงไม้ยางพารา การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม การดูดซับน้ำ

Keywords: Wood-plastic composites, Rubberwood flour, Mixture experimental design, Water absorption

1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้เส้นใยธรรมชาติแทนเส้นใยสังเคราะห์เพื่อผลิตวัสดุผสมกำลังได้รับการตอบรับเป็นอย่างดี เนื่องจากเป็นประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมที่นำวัสดุเหลือใช้ (Waste) มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ตลอดจนเส้นใยธรรมชาติมีข้อดีคือ ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ ความสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ และไม่กีดกร่อนเครื่องจักร (1-2) เส้นใยธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้ผลิตเป็นวัสดุผสมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผงไม้ (Flour) ขี้เลื่อย (Sawdust) และชิ้นไม้ (Chip) และเส้นใยธรรมชาติที่มักนำมาใช้ผสมกับพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุผสมไม้พลาสติก (Wood-plastic composites; WPCs) คือเส้นใยจากไม้สน ไม้เมเปิ้ล ไม้ไผ่ ไม้โอ๊ค ปอกระเจา ปอแก้ว ใบสับปะรด และไม้ยางพาราที่มีการนำมาประยุกต์ใช้เพียงเล็กน้อย

ต้นยางพารามีการปลูกกันอย่างกว้างขวางในทางภาคใต้และตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย และถือได้ว่าเป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเพราะน้ำยางที่ได้จากต้นยางพาราคือวัตถุดิบที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเมื่อต้นยางพาราให้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่าต่อการปลูกหรือมีอายุ

ประมาณ 25 ปี ต้นยางพาราเหล่านี้จะถูกตัด (3) และจากการตัดจะเกิดของเสียในรูปของขี้เลื่อย ผงไม้ และเศษไม้ ประมาณ 34% (4-5) ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนที่สูงมาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำของเสียเหล่านี้มาใช้ประโยชน์โดยใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไม้กระดานอัด แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ และแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง เป็นต้น เช่นเดียวกันการนำของเสียจากการตัดและแปรรูปไม้ยางพารามาผสมกับพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุผสมไม้พลาสติกจึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียเช่น ขี้เลื่อยและผงไม้ยางพารา อย่างไรก็ตามเนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่ไวต่อการดูดซับน้ำ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุผสมจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ (6-7) และจำกัดความสามารถประยุกต์ใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติก (8) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุผสม ดังนั้นผลกระทบของการดูดซับน้ำต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพจึงเป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องศึกษาเมื่อมีการพัฒนาวัสดุผสมขึ้นมาใหม่ เช่นเดียวกันอัตราและปริมาณการดูดซับน้ำของวัสดุผสมมีการผันแปรตามสายพันธุ์ของไม้เนื่องจากไม้แต่ละชนิดจะมีโครงสร้างภายในและองค์ประกอบทาง

เคมีที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ในปัจจุบันการทดลองที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมไม้พลาสติกส่วนใหญ่จะไม่นิยมนำการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ซึ่งจะเป็นการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของส่วนผสมอย่างอิสระ อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยเพียงเล็กน้อยที่นำการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้เช่น Matuana และคณะ ในปี ค.ศ. 2002 (9) ใช้ Four-factor central composite design เพื่อศึกษา Foamability ของวัสดุผสมพอลิไวนิลคลอไรด์แข็งและผงไม้ และ Stark และคณะ ในปี ค.ศ. 2003 (10) ประยุกต์ 2^4 Factorial design เพื่อศึกษาผลกระทบของสารต้านทานรังสียูวี การเปลี่ยนสี และการดูดซับรังสียูวีของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal เพื่อศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราหลังจากถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 6 สัปดาห์ เช่นเดียวกันเป้าหมายสูงสุดของงานวิจัยนี้คือเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราบนสมบัติการดูดซับน้ำ ความแข็งแรงดัด และมอดูลัสการดัด ซึ่งข้อมูลใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้ผลิตวัสดุผสมไม้พลาสติก

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเกรด WT170 มีค่าดัชนีการไหล 11 กรัมต่อ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสถูกนำมาใช้ศึกษาวิจัย ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท วิทยาอินเตอร์เทรด จำกัด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) และผงไม้จากต้นยางพาราถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติกเมทริกซ์ ซึ่งผงไม้เหล่านี้ได้รับมาจากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา (ประเทศไทย) นอกจากนี้เพื่อปรับปรุงความสามารถการยึดเกาะระหว่างผงไม้และพลาสติกเมทริกซ์ Maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) ถูกนำมาใช้เป็นส่วน

ผสม ซึ่งได้รับมาจากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด (Missouri, USA) เช่นเดียวกันสารต้านทานรังสียูวีที่เลือกใช้คือ Hindered amine light stabilizer (HALS) มีชื่อการค้า MEUV008 ซึ่งได้รับมาจากบริษัท ทีเอช คัลเลอร์ จำกัด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) และสารหล่อลื่นที่ใช้เพิ่มความสามารถในกระบวนการผลิตคือ พาราฟินแว็กซ์ ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท Nippon Seiro จำกัด (Yamaguchi, Japan)

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองแบบมีข้อจำกัดคือ ในแต่ละส่วนผสมไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมได้อย่างอิสระ เมื่อส่วนผสมใดหรือส่วนผสมหนึ่งเพิ่มอีกหนึ่งส่วนผสมจะต้องลดอัตราส่วนผสมเพื่อให้อัตราของส่วนผสมรวมกันเป็น 100% การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและการวิเคราะห์ทางสถิติถูกกระทำโดยใช้โปรแกรม Design-Expert software (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) ซึ่งส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (x_1) ผงไม้ยางพารา (x_2) สารเคลือบ (x_3) สารต้านทานรังสียูวี (x_4) และสารหล่อลื่น (x_5) และขอบเขตของอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบการทดลองถูกแสดงในตารางที่ 1 ขอบเขตของส่วนผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราได้มาจากการทดลองเบื้องต้น ซึ่งพบว่าช่วงของส่วนผสมนี้สามารถขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกันขอบเขตของส่วนผสมสารเคลือบ สารต้านทานรังสียูวี และสารหล่อลื่นได้มาจากการสำรวจงานวิจัยในอดีตซึ่งพบว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด และจากการออกแบบการทดลองได้สูตรที่ใช้ในการทดลอง 15 สูตรที่มีความแตกต่างกัน และอีก 5 สูตรเป็นสูตรที่ทดลองซ้ำเพื่อทดสอบ Lack of fit ดังนั้นสูตรที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดมี 20 สูตรดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมและขอบเขตของส่วนผสมที่นำไปใช้ออกแบบการทดลอง

Component	Proportion restriction (wt%)
rPP (x_1)	$50 \leq x_1 \leq 70$
RWF (x_2)	$25 \leq x_2 \leq 45$
MAPP (x_3)	$3 \leq x_3 \leq 5$
UV stabilizer (x_4)	$0 \leq x_4 \leq 1$
Lub (x_5)	$= 1$

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจากการออกแบบการทดลองแบบผสมและข้อมูลจากการทดลอง

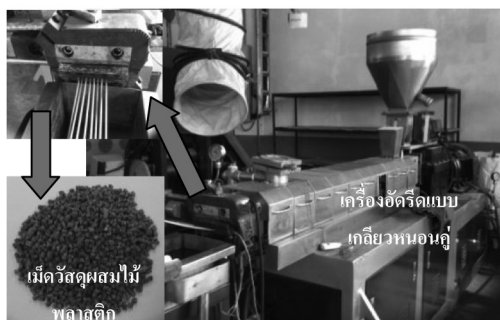
Run No.	Mixture fraction (wt%)					Water absorption (%)			MOR (MPa)		MOE (GPa)	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	2 W	4 W	6 W	2 W	4 W	2 W	4 W
1	63.9	29.9	4.5	0.7	1.0	1.68	2.55	3.28	38.8	38.6	1646	1669
2	70.0	25.0	3.0	1.0	1.0	1.23	1.97	2.53	36.8	36.4	1638	1667
3	50.0	43.0	5.0	1.0	1.0	4.79	7.28	8.60	37.4	30.0	1661	1528
4	54.9	38.9	4.5	0.7	1.0	3.40	5.38	6.73	39.4	33.4	1762	1622
5	59.5	34.5	5.0	0.0	1.0	2.58	4.09	5.20	40.4	34.5	1799	1652
6	55.4	39.9	3.5	0.2	1.0	3.15	5.10	6.31	39.0	34.2	1622	1525
7	59.5	34.5	4.0	1.0	1.0	3.89	3.96	5.12	34.8	33.6	1535	1518
8*	59.5	34.5	5.0	0.0	1.0	2.98	4.51	5.67	39.0	34.6	1656	1567
9	50.0	44.3	4.3	0.5	1.0	4.15	6.34	7.87	39.9	33.5	1622	1605
10	68.0	25.0	5.0	1.0	1.0	1.00	1.60	2.13	37.6	36.2	1709	1695
11	50.0	45.0	3.0	1.0	1.0	5.71	8.63	9.80	35.5	32.8	1428	1406
12*	50.0	43.0	5.0	1.0	1.0	4.15	6.49	7.95	36.2	29.2	1688	1603
13	60.3	35.3	3.0	0.5	1.0	2.44	3.98	5.00	36.6	34.7	1754	1657
14	64.9	30.4	3.5	0.2	1.0	1.87	2.92	3.68	40.5	38.0	1659	1599
15*	70.0	25.0	3.0	1.0	1.0	1.06	1.76	2.28	35.8	35.6	1647	1669
16	51.0	45.0	3.0	0.0	1.0	4.62	7.21	8.79	42.5	34.8	1530	1448
17*	51.0	45.0	3.0	0.0	1.0	4.35	6.76	8.44	40.9	33.2	1636	1594
18*	50.0	45.0	3.0	1.0	1.0	5.33	7.94	9.65	35.6	32.2	1463	1429
19	70.0	25.0	4.0	0.0	1.0	0.97	1.49	1.96	38.6	38.6	1567	1508
20	69.0	25.0	5.0	0.0	1.0	0.99	1.42	1.86	42.2	39.4	1666	1615

หมายเหตุ: *เป็นส่วนผสมที่ทำซ้ำเพื่อทดสอบหาค่า Lack of fit

2.3 การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมไม้พลาสติก

ก่อนนำผงไม้ยางพาราไปใช้เป็นส่วนผสมผงไม้เหล่านี้ถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 180 μm และถูกอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้นในผงไม้ในการผลิตชิ้นงานตัวอย่างประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ 1. เพื่อผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราเป็นเม็ดวัสดุผสมไม้พลาสติก (Wood-plastic composite pellets) ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) นำพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราใส่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder โมเดล SHJ-36 จากบริษัท เอ็นเมช จำกัด ถนนพหลโยธิน ประเทศไทย) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 130-170 องศาเซลเซียสและความเร็วของเกลียวหนอนที่หมุน 70 รอบต่อนาที จากนั้นวัสดุผสมที่ผ่านการอัดรีดถูกระบายความร้อนในน้ำและถูกตัดให้เป็นเม็ดวัสดุผสมไม้พลาสติก 2. เพื่อผลิตแผ่นวัสดุผสมไม้

พลาสติก (Wood-plastic composite panels) เป็นชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ก่อนการผลิตทำการอบเม็ดวัสดุผสมที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงอีกครั้ง จากนั้นนำเม็ดวัสดุผสมไม้พลาสติกผสมกับสารคู่ควบ สารต้านทานรังสียูวี และสารหล่อลื่นตามอัตราส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 2 และนำส่วนผสมเหล่านี้ใส่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 130-190 องศาเซลเซียส ความเร็วของเกลียวหนอนที่หมุน 50 รอบต่อนาที แรงดันที่หัวขึ้นรูป 0.10-0.20 MPa ขึ้นอยู่กับปริมาณผงไม้และแรงดูดความเป็นสุญญากาศ 0.022 MPa จากนั้นวัสดุผสมถูกอัดผ่านหัวขึ้นรูปขนาด 9 มิลลิเมตร $\times$ 22 มิลลิเมตร และระบายความร้อนในอากาศ ต่อจากนั้นชิ้นงานตัวอย่างถูกกดแปดผิวให้เป็นชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบแต่ละประเภทตามมาตรฐาน American society for testing and materials (ASTM)



(ก)



(ข)

รูปที่ 1. กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก (ก) กระบวนการผลิตเม็ดวัสดุผสมไม้พลาสติก (ข) กระบวนการผลิตแผ่นวัสดุผสมไม้พลาสติก

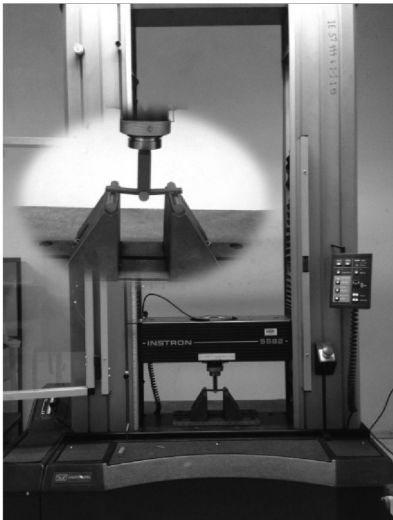
2.4 การทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำเป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D570-88 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 4.8 มิลลิเมตร $\times$ 13 มิลลิเมตร $\times$ 26 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นในชิ้นงานและทำการชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบทันทีด้วยเครื่อง

ชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม จากนั้นชิ้นงานทดสอบถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส หลังจากรบเวลา 2, 4 และ 6 สัปดาห์ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นมาชั่งน้ำหนักและถูกซับน้ำด้วยกระดาษทิชชู จากนั้นนำชิ้นงานชั่งน้ำหนักทันทีเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักชิ้นงานทดสอบ และในแต่ละสัปดาห์มีการทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง

2.5 การทดสอบสมบัติการดัด

การทดสอบดัดเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด (Three-point bending test) ซึ่งปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D790-92 โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์อินสตรอน (โมเดล 5582 จาก Instron corporation, Massachusetts, USA) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 4.8 มิลลิเมตร $\times$ 13 มิลลิเมตร $\times$ 100 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างปารองรับชิ้นงาน (Span) มีระยะ 80 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดัดคือ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ก่อนการแช่น้ำชิ้นงานตัวอย่างถูกอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบดัดเพื่อวัดค่าความแข็งแรงดัด (Modulus of rupture; MOR) และค่ามอดูลัสการดัด (Modulus of elastic; MOE) ของชิ้นงานทดสอบหลังจากถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลา 2 และ 4 สัปดาห์ เนื่องจากเมื่อชิ้นงานถูกแช่นานกว่า 4 สัปดาห์การลดลงของค่า MOR และ MOE ไม่นับสำคัญ และในแต่ละเงื่อนไขการทดลองและสูตรมีการทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง



รูปที่ 2. การทดสอบดัดแบบ 3 จุด (Three-point bending test)

2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยา

การศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุผสมไม้พลาสติกกระทำโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron micro-

copy; SEM, โมเดล Quanta 400, FEI company, Oregon, USA) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของผงไม้และการยึดเกาะระหว่างพลาสติกและผงไม้ อย่างไรก็ตามก่อนการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชิ้นงานทั้งหมดถูกอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และถูกเคลือบด้วยทองคำบริเวณผิวหน้าที่แตกหัก การส่อง SEM กระทำที่กำลังขยาย 1000 $\times$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal มีส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ผงไม้ยางพารา สารตัวควบ สารต้านทานรังสียูวี และสารหล่อลื่น และสามารถออกแบบสูตรที่ใช้ในการทดลองได้ 20 สูตร เช่นเดียวกันค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองคือ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำหลังจากแช่น้ำ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ ค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดหลังจากแช่น้ำ 2 และ 4 สัปดาห์ถูกสรุปในตารางที่ 2

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม

ผลการทดลองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสมบัติ จากการวิเคราะห์พบว่าสมบัติการดูดซับน้ำที่ 4 และ 6 สัปดาห์ ความแข็งแรงดัดที่ 2 สัปดาห์มีความเหมาะสมในรูปแบบเชิงเส้นตรง (Linear model) นอกจากนี้สมบัติการดูดซับน้ำ มอดูลัสการดัดที่ 2 สัปดาห์ ความแข็งแรงดัดและมอดูลัสการดัดที่ 4 สัปดาห์มีรูปแบบที่เหมาะสมคือ รูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic model) ดังแสดงในตารางที่ 3 เพราะจากการเปรียบเทียบผลทางสถิติพบว่า รูปแบบที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า Adjusted coefficient of determination (Adj-R^2) และค่า Predicted coefficient of determination (Pred-R^2) สูงกว่ารูปแบบอื่นๆ ที่เปรียบเทียบกันในแต่ละสมบัติ เช่นเดียวกันจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) พบว่ารูปแบบที่เหมาะสมเหล่านี้มีค่า P-value ของ Lack of fit ที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมบูรณ์

กับข้อมูล นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ค่า P-value ของ Linear mixture ในแต่ละรูปแบบพบว่า Linear mixture มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) นั้นหมายความว่าส่วนผสมพอลิโพรพี ลินรีไซเคิล พงไม้ยางพารา สารก่อกวน และสารต้านทาน รังสียูวีมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติการดูดซับ น้ำ ความแข็งแรงดัด และมอดูลัสการดัด

ตารางที่ 3. สมการถดถอยและผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติสำหรับแต่ละสมบัติ

Property	Model	Lack of fit	Linear mixture	R ²	Adj-R ²	Pred-R ²	Regression equation
WA 2W	Quadratic	0.7044	<0.0001*	0.9860	0.9733	0.9445	$0.45x_1 + 4.55x_2 - 145.97x_3 + 1501.07x_4 + 1.47x_1x_2 + 167.23x_1x_3 - 1560.03x_1x_4 + 160.86x_2x_3 - 1549.23x_2x_4 - 1518.25x_3x_4$
WA 4W	Linear	0.2670	<0.0001*	0.9641	0.9574	0.9457	$1.30x_1 + 7.34x_2 - 0.16x_3 + 11.83x_4$
WA 6W	Linear	0.1106	<0.0001*	0.9771	0.9728	0.9661	$1.83x_1 + 8.96x_2 + 0.66x_3 + 11.53x_4$
MOR 2W	Linear	0.1046	0.0002*	0.7062	0.6511	0.5445	$40.07x_1 + 40.45x_2 + 48.63x_3 - 48.29x_4$
MOR 4W	Quadratic	0.1294	<0.0001*	0.9434	0.8924	0.7223	$37.31x_1 + 33.68x_2 - 302.23x_3 - 2623.53x_4 - 3.81x_1x_2 + 397.66x_1x_3 + 2763.30x_1x_4 + 345.29x_2x_3 + 2761.94x_2x_4 + 2953.75x_3x_4$
MOE 2W	Quadratic	0.7162	0.0078*	0.8408	0.6975	0.5119	$1690.93x_1 + 1567.71x_2 + 49980.5x_3 - 1.924E+005x_4 + 187.03x_1x_2 - 53702.83x_1x_3 + 2.027E+005x_1x_4 - 51715.95x_2x_3 + 2.011E+005x_2x_4 + 1.672E+005x_3x_4$
MOE 4W	Quadratic	0.9887	0.0025*	0.8620	0.7377	0.5134	$1578.83x_1 + 1513.24x_2 + 32842.03x_3 - 1.965E+005x_4 - 49.16x_1x_2 - 34249.03x_1x_3 + 2.099E+005x_1x_4 - 33169.84x_2x_3 + 2.059E+005x_2x_4 + 1.772E+005x_3x_4$

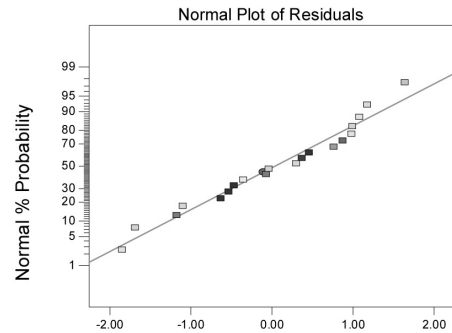
หมายเหตุ: *ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึงความมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ค่า Coefficient of determination (R^2), Adj- R^2 และ Pred- R^2 ที่แสดงในตารางที่ 3 ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม สมเช่นกัน จากข้อมูลเห็นได้ว่าค่า R^2 ของทั้ง 7 รูปแบบมีค่าอยู่ในช่วง 0.7062 ถึง 0.9860 ซึ่งเป็นค่า R^2 ของสมบัติความแข็งแรงดัด (0.7062) และการดูดซับน้ำ (0.9860)

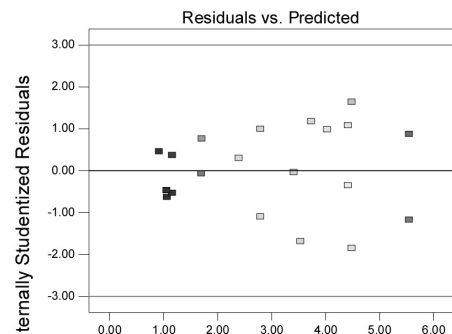
หลังจากขั้นที่ 2 สัปดาห์ นั้นหมายความว่าความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบจำลองการถดถอย 29.38% และ 1.40% ตามลำดับ เช่นเดียวกันค่า $Adj-R^2$ และ $Pred-R^2$ ของแต่ละรูปแบบมีค่าที่สูงใกล้เคียงกับค่า R^2 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม

3.2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอย

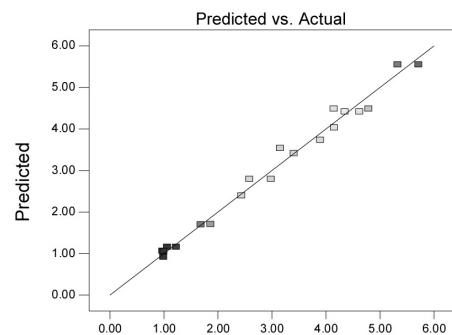
การตรวจสอบรูปแบบจำลองการถดถอยในสมบัติการดูดซับน้ำหลังจากขั้นที่ 2 สัปดาห์ ถูกวิเคราะห์เพื่อยืนยันความพอเพียงและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลอง รูปที่ 3(ก) แสดงการพล็อตของ Normal probability เพื่อวิเคราะห์การกระจายที่เป็นปกติของข้อมูล และพบว่าข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือแสดงเป็นเส้นตรง เช่นเดียวกันไม่พบค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในการพล็อต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 3(ข) แสดงการพล็อตของค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย เพื่อวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของข้อมูล และพบว่าค่าเศษเหลือมีแนวโน้มการกระจายที่ไม่มีลักษณะหรือรูปแบบ (Pattern) ที่แน่นอน ซึ่งถ้าค่าเศษเหลือมีโครงสร้างหรือแนวโน้มที่แน่ชัดแสดงว่าข้อมูลไม่มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ (11) เช่นเดียวกันค่าเศษเหลือมีการกระจายรอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระ และรูปที่ 3(ค) การพล็อตของค่าที่ทำนายต่อค่าทดลองจริง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทำนายโดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง และพบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างดี ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีความผันแปรไปจากข้อมูลการทดลองจริงน้อยกว่า 5% ดังนั้นจากการวิเคราะห์กราฟทั้ง 3 นี้สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองการถดถอยมีความพอเพียงและมีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยในสมบัติอื่นๆ มีการวิเคราะห์เช่นกัน และพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่เป็นปกติ ข้อมูลมีความเสถียรภาพ และค่าที่ได้จากการทำนายต่อค่าการทดลองจริงมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างดีเช่นกัน



(ก)



(ข)



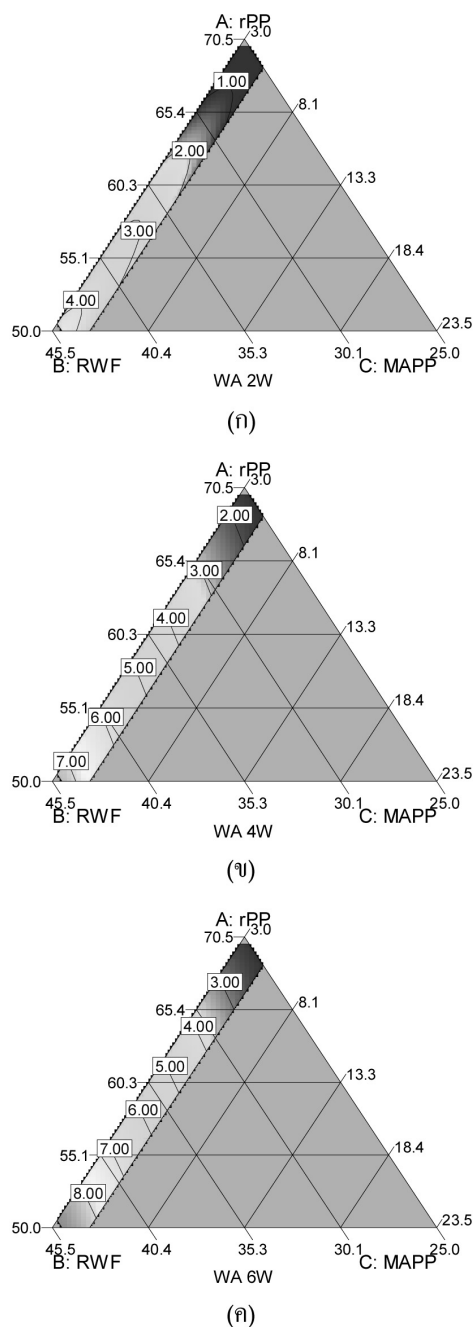
(ค)

รูปที่ 3. การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของสมบัติการดูดซับน้ำหลังจากขั้นที่ 2 สัปดาห์: (ก) การพล็อตของ Normal probability (ข) การพล็อตของค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ(ค) การพล็อตของค่าที่ทำนายต่อค่าทดลองจริง

3.3 ผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติการดูดซับน้ำและสูตรที่เหมาะสม

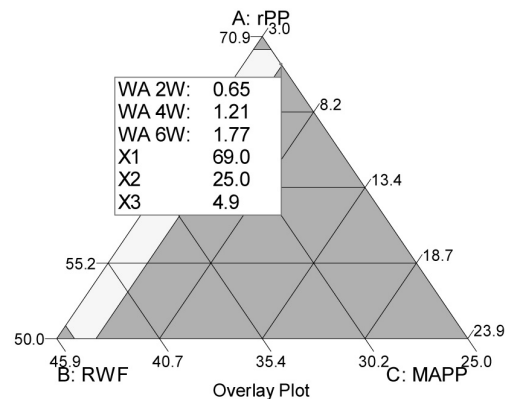
สมการถดถอยในสมบัติการดูดซับน้ำหลังจากแช่น้ำ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ถูกแสดงในตารางที่ 3 และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (x_1) มีค่าต่ำกว่าผงไม้ยางพารา (x_2) ซึ่งหมายความว่า การเติมผงไม้ไม่มีผลกระทบต่อการดูดซับน้ำมากกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เช่นเดียวกันพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสารคู่ควบ (x_3) มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งหมายความว่า การเติมสารคู่ควบทำให้วัสดุผสมดูดซับน้ำน้อยลง เพราะสารคู่ควบปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผงไม้และพลาสติกเมทริกซ์ (12) และลดช่องว่างและรูพรุนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของวัสดุผสมไม้พลาสติก นอกจากนี้พบด้วยว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสารต้านทานรังสียูวี (x_4) มีค่าเป็นบวกและมีค่าสูงที่สุด ซึ่งหมายความว่า การเติมสารต้านทานรังสียูวีมีผลกระทบต่อการดูดซับน้ำของวัสดุผสมเป็นอย่างมาก Wechsler และ Hiziroglu ในปี ค.ศ. 2007 (13) กล่าวว่า การเติมสารต้านทานรังสียูวีส่งผลให้การกระจายตัวของวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ ผงไม้ และสารต้านทานรังสียูวีไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-homogeneous) ทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุผสมเกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุน ดังนั้นความสามารถการดูดซับน้ำของวัสดุผสมจึงเพิ่มขึ้น

จากสมการถดถอยของสมบัติการดูดซับน้ำหลังจากแช่น้ำ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ในตารางที่ 3 สามารถนำมาสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4(ก), 4(ข) และ 4(ค) ตามลำดับจากกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของวัสดุผสมหลังจากแช่น้ำ 2, 4 และ 6 สัปดาห์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณผงไม้ยางพาราที่เติมเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มขึ้นของ Free OH groups ในเซลลูโลสของไม้ ซึ่งตัวของ Free OH groups เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับตัวของโมเลกุลน้ำ ทำให้วัสดุผสมมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น (6) เช่นเดียวกันพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุผสมถูกแช่นานขึ้น โดยทั่วไปการดูดซับน้ำของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งผงไม้ดูดซับน้ำจนอิ่มตัว



รูปที่ 4. เส้นโครงร่างสำหรับผลกระทบของส่วนผสมที่มีต่อสมบัติการดูดซับน้ำ: (ก) 2 สัปดาห์ (ข) 4 สัปดาห์ และ (ค) 6 สัปดาห์

นอกจากนี้สมการถดถอยทั้ง 3 สมการ สามารถนำมาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ผลตอบสนองของเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำหลังจากแช่น้ำ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ มีค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดร่วมกันโดยใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (Overlay plot) (14) ดังแสดงในรูปที่ 5 จากการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติการดูดซับน้ำประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล 69.0 wt% พงไม้ยางพารา 25.0 wt% สารตัวเชื่อม 4.9 wt% สารต้านทานรังสียูวี 0.1 wt% และสารหล่อลื่น 1.0 wt% เช่นเดียวกัน สูตรนี้มีการตอบสนองของเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ได้จากการทำนายอยู่ที่ 0.65, 1.21 และ 1.77% สำหรับการแช่น้ำ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ตามลำดับ ดังสรุปในตารางที่ 4



รูปที่ 5. สูตรที่เหมาะสมสำหรับสมบัติการดูดซับน้ำ

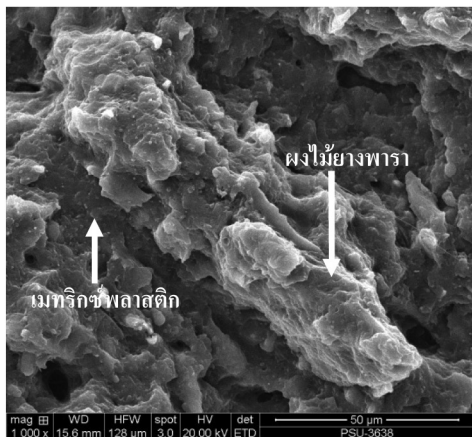
ตารางที่ 4. สูตรที่เหมาะสมและค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทำนายสำหรับแต่ละสมบัติ

Property	Mixture fraction (wt%)					Predicted response			Desirability
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	2W	4W	6W	
WA (%)	69.0	25.0	4.9	0.1	1.0	0.65	1.21	1.77	1.00
MOR (MPa)	68.9	25.0	5.0	0.1	1.0	40.5	39.6	-	0.859
MOE (MPa)	68.4	25.0	5.0	0.6	1.0	1787	1775	-	0.984

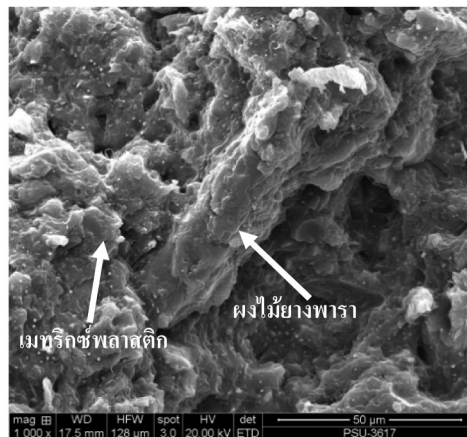
3.4 ผลกระทบของส่วนผสมต่อความแข็งแรงดัดและสูตรที่เหมาะสม

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยในสมบัติความแข็งแรงดัดหลังจากแช่น้ำ 2 และ 4 สัปดาห์ที่แสดงในตารางที่ 3 มีค่าลดลงเมื่อวัสดุผสมถูกแช่นานขึ้น และพบว่าที่สภาวะการแช่น้ำ 2 สัปดาห์ ค่าสัมประสิทธิ์ของพงไม้ยางพารา (x_2) มีค่าสูงกว่าของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (x_1) แต่เมื่อถูกแช่น้ำ 4 สัปดาห์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมีค่าสูงกว่าพงไม้ยางพารา พฤติกรรมเหล่านี้เป็นเพราะวัสดุผสมที่ไม่ถูกแช่น้ำ (ในสภาวะปกติ) และที่เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำๆ การเสริมแรงของพงไม้ในวัสดุผสมสามารถเสริมแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากเหตุผลนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยการวิเคราะห์โครงสร้างฐานวิทยา (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) สำหรับวัสดุผสมที่เติมพงไม้ 25 wt% และ 6(ข)

สำหรับวัสดุผสมที่เติมพงไม้ 45 wt% จากรูปจะเห็นได้ว่าการยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับพงไม้มีการยึดเกาะกันอย่างแนบชิดที่มีความสมบูรณ์เท่าๆ กันของรูปทั้งสอง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้วัสดุผสมที่เติมพงไม้มากกว่ามีสมบัติทางกลที่สูงกว่า และพบว่ารูปที่ 6(ข) มีการกระจายตัวของพงไม้ในโครงสร้างวัสดุผสมที่มากกว่ารูปที่ 6(ก) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการดูดซับน้ำมาากๆ โครงสร้างภายในของวัสดุผสมเกิดการแตกร้าวทำให้ความสามารถการรับแรงที่ส่งผ่านจากพลาสติกเมทริกซ์ลดน้อยลงเช่นเดียวกัน พบด้วยว่าสัมประสิทธิ์ของสารต้านทานรังสียูวี (x_5) มีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเติมสารต้านทานรังสียูวีส่งผลให้ความแข็งแรงดัดลดลงเพราะการกระจายตัวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-homogeneous) ของพอลิเมอร์ พงไม้ และสารต้านทานรังสียูวี (13) ทำให้ความสามารถการถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างวัสดุผสมลดลง



(ก)

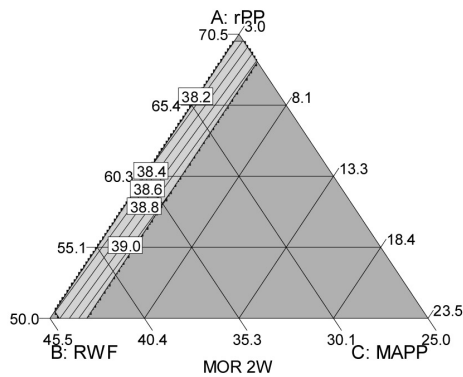


(ข)

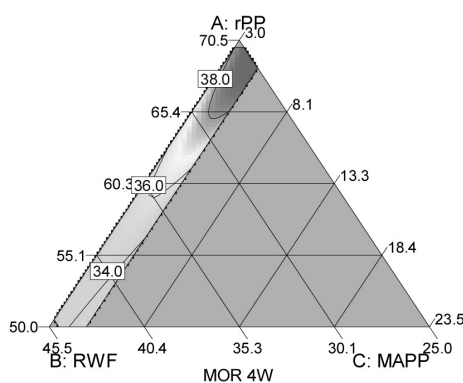
รูปที่ 6. ผลการส่องโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมที่เติมผงไม้อย่างพารา (ก) 25 wt% และ (ข) 45 wt% โดย SEM ที่กำลังขยาย 1000× (15)

นอกจากนี้สมการถดถอยของสมบัติความแข็งแรงดัดหลังจากแช่น้ำ 2 และ 4 สัปดาห์ในตารางที่ 3 ถูกนำมาสร้างกราฟเส้นโครงสร้างพื้นผิวผลตอบสนองเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 7(ก) และ 7(ข) ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุผสมที่ระดับปริมาณผงไม้สูงๆ (ผงไม้ประมาณ 40 wt%) ลดลงรวดเร็วกว่าที่ระดับปริมาณผงไม้ต่ำ (ผงไม้ประมาณ 30 wt%) เมื่อวัสดุผสมถูกแช่นานขึ้น เป็นเพราะโมเลกุลน้ำลดความสามารถยึดเกาะผิวหน้าระหว่างพลาสติกเมทริกซ์และผงไม้ (8) และทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุผสมเกิดการแตกร้าว ซึ่งเมื่อผงไม้ดูดซับน้ำส่งผลให้ผงไม้เกิดการบวมแต่พลาสติกเมทริกซ์ไม่ได้บวมตามผงไม้ ทำให้พลาสติกเมทริกซ์เกิดการแตกร้าวและการยึดเกาะผิวหน้าระหว่างพลาสติกเม

ทริกซ์และผงไม้เกิดความไม่แข็งแรง ดังนั้นเมื่อวัสดุผสมมีส่วนผสมของปริมาณผงไม้มากกว่าส่งผลให้การบวมของผงไม้ภายในโครงสร้างเกิดขึ้นมากกว่าที่ปริมาณผงไม้ต่ำ และเช่นเดียวกันผลของกราฟเส้นโครงสร้างพื้นผิวผลตอบสนองสอดคล้องกับผลของค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุผสมเมื่อถูกแช่น้ำ 2 สัปดาห์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อวัสดุผสมถูกแช่น้ำ 4 สัปดาห์ พบว่าค่าความแข็งแรงดัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลจากการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมต่อสมบัติความแข็งแรงดัดในสภาวะการต้านทานการดูดซับน้ำตลอดจนค่าผลตอบสนองที่ทำนายถูกแสดงเช่นเดียวกันในตารางที่ 4



(ก)



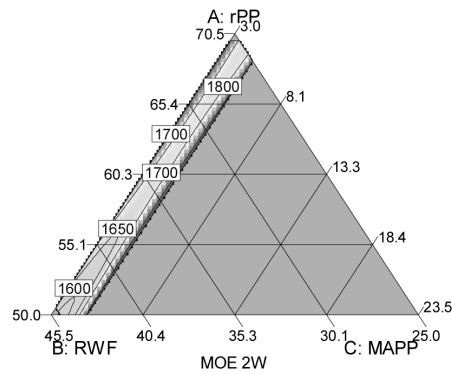
(ข)

รูปที่ 7. เส้นโครงร่างสำหรับผลกระทบของส่วนผสมที่มีต่อความแข็งแรงดัด: (ก) 2 สัปดาห์ และ (ข) 4 สัปดาห์

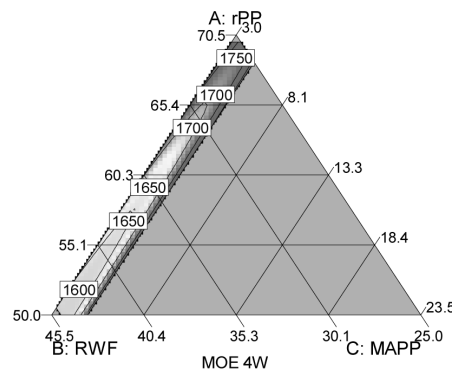
3.5 ผลกระทบของส่วนผสมต่อมอดูลัสการดัดและสูตรที่เหมาะสม

สมการถดถอยในสมบัติมอดูลัสการดัดหลังจากแช่น้ำ 2 และ 4 สัปดาห์ถูกแสดงในตารางที่ 3 และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (x_1) พงไม้ยางพารา (x_2) สารกักควบ (x_3) และสารต้านทานรังสียูวี (x_4) มีค่าลดลงเมื่อวัสดุผสมถูกแช่น้ำนานขึ้น เช่นเดียวกันเส้นโครงร่างดังแสดงในรูปที่ 8(ก) และ 8(ข) พบว่าค่ามอดูลัสการดัดมีค่าลดลงเมื่อวัสดุผสมถูกแช่น้ำนานขึ้น สิ่งนี้เป็นเพราะพงไม้ที่เป็นวัสดุเสริมแรงเกิดการอ่อนตัวเพิ่มขึ้นเมื่อดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง (16) นอกจากนี้พบว่าค่ามอดูลัสการดัดของวัสดุผสมทั้งหลังจากแช่น้ำ 2 และ 4 สัปดาห์มีค่าลด

ลงอย่างช้าๆ เมื่อเติมพงไม้เป็นส่วนผสมในวัสดุผสมเพิ่มขึ้น พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นจากการดูดซับน้ำและการอ่อนตัวของพงไม้ ซึ่งเมื่อปริมาณพงไม้ถูกเติมเป็นส่วนผสมมากขึ้นความสามารถการดูดซับน้ำของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นการอ่อนตัวของวัสดุผสมก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ผลจากการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมต่อสมบัติมอดูลัสการดัดในสภาวะการต้านทานการดูดซับน้ำตลอดจนค่าผลตอบแทนที่ทำนายถูกแสดงเช่นเดียวกันในตารางที่ 4



(ก)



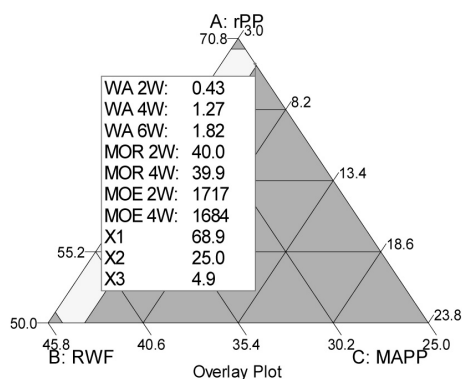
(ข)

รูปที่ 8. เส้นโครงร่างสำหรับผลกระทบของส่วนผสมที่มีต่อมอดูลัสการดัด: (ก) 2 สัปดาห์ และ (ข) 4 สัปดาห์

3.6 สูตรที่เหมาะสมของวัสดุผสมต่อสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำ

การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ผลตอบแทนของเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ความแข็งแรงดัด และมอดูลัสการดัดมีค่าผลตอบแทนที่เหมาะสม

ที่สุดร่วมกันโดยใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (Overlay plot) โดยกำหนดเงื่อนไขของเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต้องมีค่าต่ำที่สุด ค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดูลัสการดัดต้องมีค่าสูงที่สุด การหาสูตรที่เหมาะสมถูกกระทำโดยใช้โปรแกรม Design-Expert software จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมต่อสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล 68.9 wt% พงไม้ยางพารา 25.0 wt% สารคู่ควบ 4.9 wt% สารต้านทานรังสียูวี 0.2 wt% และสารหล่อลื่น 1.0 wt% ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9. โครงสร้างพื้นผิวผลตอบสนองวางซ้อนทับกันของสูตรที่เหมาะสมของวัสดุผสมต่อสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำ

4. สรุป

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal และวิธีพื้นผิวผลตอบสนองถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล และหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพงไม้ยางพาราหลังจากถูกแช่น้ำ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าส่วนผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล พงไม้ยางพารา สารคู่ควบ และสารต้านทานรังสียูวีมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติการดูดซับน้ำ ความแข็งแรงดัด และมอดูลัสการดัด เช่น

เดียวกันพบว่าการเติมพงไม้ยางพาราเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นและวัสดุผสมถูกแช่น้ำนานขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณพงไม้ที่เติมและเวลาของการแช่น้ำ สำหรับค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุผสมเมื่อถูกแช่น้ำ 2 สัปดาห์ พบว่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเติมพงไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นแต่เมื่อวัสดุผสมถูกแช่น้ำ 4 สัปดาห์ พบว่าค่าความแข็งแรงดัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเติมพงไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น เพราะโมเลกุลน้ำทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุผสมเกิดการแตกร้าว และในส่วนของการมอดูลัสการดัดของวัสดุผสมทั้งหลังจากแช่น้ำ 2 และ 4 สัปดาห์พบว่ามีค่าลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเติมพงไม้เป็นส่วนผสมในวัสดุผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซับน้ำส่งผลให้พงไม้ที่เสริมแรงเกิดการอ่อนตัว นอกจากนี้จากการใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกันโดยกำหนดเงื่อนไขของเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต้องมีค่าต่ำที่สุด ค่าความแข็งแรงดัด และมอดูลัสการดัดต้องมีค่าสูงที่สุดพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมต่อสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล 68.9 wt% พงไม้ยางพารา 25.0 wt% สารคู่ควบ 4.9 wt% สารต้านทานรังสียูวี 0.2 wt% และสารหล่อลื่น 1.0 wt%

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Mirzaei B, Tajvidi M, Falk RH, Felton C. Stress-relaxation behavior of lignocellulosic high-density polyethylene composites. J Rein Plas Compos. 2011;30(10): 875-81.

- (2) Kaymakci A, Ayrimis N, Ozdemir F, Gulec T. Utilization of sunflower stalk in manufacture of thermoplastic composite. *J Polym Environ*. Epub ahead of print 18 December 2012. DOI: 2010.1007/s10924-10012-10564-10929.
- (3) Rimdusit S, Smittakorn W, Jittarom S, Tiptipakorn S. Highly filled polypropylene rubber wood flour composites. *Eng J*. 2011;15(2): 17-30.
- (4) Prasertsan S, Vanapruck P. Rubber plantations: An overlooked dendropower option, Food and agriculture organization of the united nations, Manila, 1998.
- (5) Petchpradab P, Yoshida T, Charinpanitkul T, Matsumura Y. Hydrothermal pretreatment of rubber wood for the saccharification process. *Ind Eng Chem Res*. 2009;48(9): 4587-91.
- (6) Adhikary KB, Pang S, Staiger MP. Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with pinus radiata sawdust. *Chem Eng J*. 2008;142(2): 190-8.
- (7) Stokke DD, Gardner DJ. Fundamental aspects of wood as a component of thermoplastic composites. *J Vinyl Addi Technol*. 2003;9(2): 96-104.
- (8) Law TT, Ishak ZAM. Water absorption and dimensional stability of short kenaf fiber-filled polypropylene composites treated with maleated polypropylene. *J Appl Polym Sci*. 2011;120(1): 563-72.
- (9) Matuana LM, Mengeloglu F. Manufacture of rigid PVC/wood-flour composite foams using moisture contained in wood as foaming agent. *J Vinyl Addi Technol*. 2002;8(4): 264-70.
- (10) Stark NM, Matuana LM. Ultraviolet weathering of photostabilized wood-flour-filled high-density polyethylene composites. *J Appl Polym Sci*. 2003;90: 2609-17.
- (11) Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- (12) Yang HS, Kim HJ, Park HJ, Lee BJ, Hwang TS. Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler-polyolefin bio-composites. *Compos Struc*. 2006;72(4): 429-37.
- (13) Wechsler A, Hiziroglu S. Some of the properties of wood-plastic composites. *Build Environ*. 2007;42(7): 2637-44.
- (14) Saikaew C, Wiengwiset S, Sriboonruang A. Improving the properties of sand molds in the iron casting industry using mixture experiments. *KKU Res J*. 2011;16(2): 169-78. Thai.
- (15) Homkhiew C, Ratanawilai T, Thongruang W. Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: effects of composition on mechanical properties. *J Thermoplast Compos Mater*. Epub ahead of print 14 February 2013. DOI: 10.1177/0892705712475019.
- (16) Tamrakar S, Lopez-Anido RA. Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties. *Construc Build Mater*. 2011;25(10): 3977-88.