

สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา

Mechanical and Physical Properties of Thermoplastic Natural Rubber Composites Reinforced with Rubberwood Sawdust

ชาตรี หอมเขียว^{1,2*} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2} วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2} วิริยะ ทองเรือง³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ต.บ่อ่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต.บ่อ่าง

อ.เมือง จ.สงขลา 90000

³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

¹Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang District, Songkhla 90000

²Materials Processing Technology Research Unit, Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang District

Songkhla 90000

³Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

*Corresponding author: Email: chatree.h@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่มีผลกระทบมาจากชนิดพลาสติก ปริมาณขี้เลื่อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบ ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบดำเนินการโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่เพื่อผสมส่วนผสมต่างๆ และใช้เครื่องอัดรีดเพื่อขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเป็นแผ่นขึ้นงานตัวอย่าง ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณขี้เลื่อยไม้และปริมาณสารคู่ควบพบว่า ปริมาณขี้เลื่อยไม้และสารคู่ควบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็ง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว โดยการเติมขี้เลื่อยไม้เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเครียดการดึง และค่าความแข็งแรงดัดลดลง แต่ค่ามอดูลัสการดึง ค่ามอดูลัสการดัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็ง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันพบว่า การเติมสารคู่ควบทั้งชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอลิเอทิลีน และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอลิโพรพิลีนในวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับปรุงให้สมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบในปริมาณมากเกินไปกลับส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าลดลง และปริมาณสารคู่ควบที่เหมาะสมคือ 4 wt% สำหรับค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงอัด ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและ

ซีลียไม่มีสมบัติการดึง การตัด การอัด และความแข็งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและซีลียไม่อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ยางธรรมชาติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ABSTRACT

This research aimed to investigate mechanical and physical properties of thermoplastic natural rubber composites reinforced with rubberwood sawdust, affecting from plastic types, wood sawdust contents and coupling agent contents. In manufacturing the composites, a twin-screw extruder was applied to blend mixture components. The composite pellets were then molded in a compression molding machine as composite panels. From results of experiment, two-way analysis of variance (ANOVA) indicated that the wood sawdust contents and coupling agent contents significantly (P -value < 0.05) affected tensile strength, modulus of rupture, modulus of elasticity, compressive strength and modulus, hardness, water absorption and thickness swelling. Increasing additions of wood sawdust from 30 wt% to 50 wt% into the composites resulting in the tensile strength, tensile strain and modulus of rupture decreased, but tensile modulus, modulus of elasticity, compressive modulus, hardness, water absorption and thickness swelling increased. Likewise, additions of coupling agent both maleic anhydride-grafted polyethylene and maleic anhydride-grafted polypropylene positively improved the mechanical and physical properties of the composites. However, the addition of too much coupling agent reduced the mechanical properties. The optimal coupling agent found was 4 wt% for the tensile strength, compressive strength, water absorption and thickness swelling. Furthermore, the composites with polypropylene and wood sawdust showed clearly higher tensile, flexural, compressive and hardness properties than the composites with high-density polyethylene and wood sawdust, when compared to the same composition rate.

Keyword: Composites, thermoplastic elastomer, natural rubber, analysis of variance.

1. บทนำ

ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกคือ วัสดุที่มีการผสมกันระหว่างยางธรรมชาติและพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก [1, 2] เช่น พอลิสไตรีน เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ พอลิเมทิลเมทาไครเลต พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิโพรพิลีน ซึ่งเหตุผลหลักของการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์คือ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ดั้งเดิม เพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการผลิต และเพื่อลดต้นทุนของวัสดุ [2, 3] นอกจากนี้ยางธรรมชาติเทอร์โม

พลาสติกมีสมบัติพิเศษคือ ที่อุณหภูมิห้องมีสมบัติยืดหยุ่นอ่อนนุ่มคล้ายยาง และที่อุณหภูมิสูงสามารถอ่อนตัวและหลอมไหลได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก [4, 5] ทำให้วัสดุชนิดนี้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยใช้กระบวนการที่เหมือนกับการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกต่างๆ ไป เช่น กระบวนการอัดรีด กระบวนการอัดร้อน และกระบวนการฉีดเข้าแก้ว เป็นต้น และที่สำคัญวัสดุชนิดนี้สามารถนำมหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ หลังจากผ่านการแปรรูปมาแล้ว [5]

ลักษณะเด่นของวัสดุยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก คือ มีความสามารถยืดหยุ่นสูง ส่งผลให้สมบัติความแข็งและความแข็งเกร็งลดลง [6] และเพื่อปรับปรุงสมบัติด้อยเหล่านี้ จึงได้มีการนำสารตัวเติมหรือวัสดุเสริมแรงมาใช้เป็นส่วนผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ยกตัวอย่างการนำผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ส่งผลให้ค่ามอดูลัสการดึงและค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงแคลเซียมที่เติมเป็นส่วนผสม [2] การใช้เส้นใยปอแก้วและเส้นใยแก้วผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสการดึงและค่าความแข็งแรงของการกระทำได้เกือบ 100% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [7] เช่นเดียวกันเมื่อเติมเส้นใยปอแก้วและสารมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอพลิโพรพิลีนลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สามารถเพิ่มความแข็งแรงดึงขึ้น 55% เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [8] ในขณะที่การเติมเส้นใยมะพร้าวในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัสและความแข็งแรงดึงได้เช่นกัน [9] และการผสมเส้นใยกระจุกในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง และความแข็งแรงของการกระทำ โดยค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 10.7% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [10] ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าการนำวัสดุเสริมแรงที่มีความแข็งและแข็งแรงมากกว่ามาผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก จะสามารถปรับปรุงให้สมบัติทางกลบางสมบัติดีขึ้น และสามารถลดต้นทุนให้แก่วัสดุชนิดนี้ [6] ตลอดจนลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

วัสดุเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติถือได้ว่า เป็นวัสดุที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับการนำมาเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าเส้นใยสังเคราะห์ในด้านการกัดกร่อนเครื่องจักรต่ำ สามารถรีไซเคิลได้ อันตรายต่อสุขภาพน้อย น้ำหนักเบา และราคาถูก [11] ซึ่งสำหรับประเทศไทย ชีลีโอไมล์ยางพาราถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในยางธรรมชาติเทอร์โม

พลาสติก เนื่องจากเป็นที่ทราบกันว่าประเทศไทยเป็นผู้นำของการปลูกและแปรรูปไม้ยางพารา ซึ่งจากกระบวนการแปรรูปของขั้นตอนต่างๆ ชีลีโอไมล์ยางพาราจะถูกผลิตขึ้นเป็นจำนวนมาก ถึงแม้ในปัจจุบันได้มีการนำชีลีโอไมล์ยางพาราไปใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น นำไปใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ผลิตเป็นแผ่นใยไม้อัด และผลิตเป็นของเล่นเด็ก เป็นต้น แต่ก็ยังคงมีเหลือในปริมาณมากสำหรับการนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ อย่างไรก็ตามการนำชีลีโอไมล์ยางพารามาใช้เป็นส่วนผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก จำเป็นที่ต้องทราบผลกระทบและปริมาณที่เหมาะสม เพื่อประสิทธิภาพในการถ่ายทอดแรงระหว่างชีลีโอไมล์และเมทริกซ์พอลิเมอร์ [11]

การเติมเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์มีข้อด้อยหนึ่งคือ การยึดเกาะที่ไม่ดีกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบลดลง ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบมีค่าต่ำ [12, 13] ดังนั้นการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พอลิเมอร์มักใช้สารคู่ควบปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ อย่างไรก็ตามเพื่อประสิทธิภาพสูงสุดของการใช้สารคู่ควบ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจผลกระทบของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและชีลีโอไมล์ยางพารา

การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและชีลีโอไมล์ยางพารา จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจในผลกระทบของส่วนผสมต่างๆ ที่เติมเข้าไปเป็นส่วนผสม เพื่อให้วัสดุชนิดใหม่ที่ได้มีความสามารถต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้ประโยชน์สูงสุด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและชีลีโอไมล์ยางพารา ที่มีผลกระทบมาจากชนิดของพลาสติก ปริมาณชีลีโอไมล์ยางพารา และปริมาณสารคู่ควบทั้งชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอพลิเอทิลีน และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอพลิโพรพิลีน ซึ่งผลจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อวงการ

วิชาการวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ และอุตสาหกรรมผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เกรด V1160 ที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่จุดคราก 29 MPa และพลาสติกพอลิโพรพิลีน เกรด 1100NK ที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่จุดคราก 36 MPa ผลิตโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ยางพาราแท่ง เกรด STR 5L จัดซื้อมาจากองค์การสวนยาง อ.ช้างกลาง จ.นครศรีธรรมราช และซีลี้อยไม้ยางพาราได้รับมาจากโรงเลื่อยไม้ยางพาราใน อ.เสเดา จ.สงขลา นอกจากนี้สารคู่ควบ (Coupling agent) ที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยไม้และเมทริกซ์พอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ 1) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิเอทิลีน (Maleic Anhydride-Grafted Polyethylene; MAPE) ที่มีส่วนผสมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ประมาณ 0.5 wt% และ 2) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิโพรพิลีน (Maleic Anhydride-Grafted Polypropylene; MAPP) ที่มีส่วนผสมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ประมาณ 8–10 wt% ซึ่งจัดซื้อมาจากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด (Missouri, USA)

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีอัตราส่วน 30 : 70 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก (wt%) ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (R30H70) และระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน (R30P70) กระทำโดยการนำวัสดุดังกล่าวผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รุ่น CTE-D25L40 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิการผสมอยู่ในช่วง 155-185 °C สำหรับวัสดุที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หรือในช่วง 160-190 °C สำหรับวัสดุที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน และความเร็วหมุนของ

เกลียวในการผสม 60 rpm จากนั้นนำเส้นวัสดุยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่อัดรีดออกจากเครื่องไประบายความร้อนในน้ำ และนำไปตัดให้เป็นเม็ดวัสดุยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

นอกจากนี้ในการผลิตแผ่นชิ้นงานตัวอย่างจากเม็ดวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพารา กระทำโดยนำซีลี้อยไม้ที่ได้รับจากโรงเลื่อยไม้ยางพารามาตัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 เมช จากนั้นนำซีลี้อยไม้ที่ผ่านตะแกรงไปอบ เพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมกับซีลี้อยไม้ยางพารา และสาร MAPE หรือสาร MAPP ตามสูตรที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และควบคุมอุณหภูมิกับความเร็วหมุนของเกลียวในสภาวะเดียวกับการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ต่อจากนั้นนำเส้นวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพาราที่อัดรีดออกจากเครื่องไประบายความร้อนในอากาศและตัดให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

ในขั้นตอนต่อไปทำการอุ่นแม่พิมพ์จนมีอุณหภูมิ 180 °C สำหรับผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และอุณหภูมิ 190 °C สำหรับผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน จากนั้นนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ใส่ในแม่พิมพ์ และอัดร้อนด้วยแรงดัน 1.379 MPa (200 psi) เป็นเวลา 3 นาที เมื่อครบเวลาอัดซ้ำด้วยแรงดัน 6.894 MPa (1000 psi) เป็นเวลา 10 นาที และเมื่อครบเวลาที่กำหนด นำแม่พิมพ์และแผ่นชิ้นงานตัวอย่างใส่ในเครื่องอัดเย็นที่มีน้ำหมุนเวียน และอัดด้วยแรงดัน 6.894 MPa เช่นกัน เป็นเวลา 8 นาที เพื่อระบายความร้อนออกจากแผ่นชิ้นงานตัวอย่าง หลังจากนั้นถอดแผ่นชิ้นงานตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์และตัดเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบต่าง ๆ

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม้อย่างพารา

Sample code	Thermoplastic natural rubber		Rubberwood	MAPE (wt%)	MAPP (wt%)
	R30H70 (wt%)	R30P70 (wt%)	sawdust (wt%)		
R30H70W30	70	-	30	-	-
R30H70W30M2	68	-	30	2	-
R30H70W30M4	66	-	30	4	-
R30H70W30M6	64	-	30	6	-
R30H70W50	50	-	50	-	-
R30H70W50M2	48	-	50	2	-
R30H70W50M4	46	-	50	4	-
R30H70W50M6	44	-	50	6	-
R30P70W30	-	70	30	-	-
R30P70W30M2	-	68	30	-	2
R30P70W30M4	-	66	30	-	4
R30P70W30M6	-	64	30	-	6
R30P70W50	-	50	50	-	-
R30P70W50M2	-	48	50	-	2
R30P70W50M4	-	46	50	-	4
R30P70W50M6	-	44	50	-	6

2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM, รุ่น Quanta 400, FEI company, Oregon, USA) ได้นำมาใช้ถ่ายภาพโครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม้อย่างพารา เพื่อวิเคราะห์การยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่ไม้อย่างพาราและเมทริกซ์พอลิเมอร์ และรูพรุนภายในโครงสร้าง อย่างไรก็ตามก่อนการส่องด้วย SEM บริเวณผิวหน้าที่แตกหักต้องเคลือบด้วยทองคำ

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบ ปริมาณซีลี้อยู่ไม้อย่างพารา และการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างสารคู่ควบกับซีลี้อยู่ไม้อย่างพาราต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม้อย่างพารา ดำเนินการโดยใช้การ

ทดสอบความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha=0.05$)

2.4 การทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ

การทดสอบการดึง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัสการดึง (Tensile modulus) และค่าความเครียดการดึง (Tensile strain) เป็นการทดสอบที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D638-99 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบประเภทที่ 4 ซึ่งมีขนาด 19 mm x 115 mm x 4 mm และความเร็วจึงที่ใช้ทดสอบการดึง คือ 5 mm/min ในขณะที่การทดสอบการดัด เพื่อหาค่าความแข็งแรงดัด (Modulus of rupture) และค่ามอดูลัสการดัด (Modulus of elasticity) เป็นการทดสอบที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D790-92 โดยเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 13 mm x 100 mm x 4.8 mm บ่ารองรับชิ้นงาน (Span distance) มี

ระยะห่าง 80 mm และความเร็วที่ใช้ทดสอบการตัด คือ 2 mm/min เช่นเดียวกับการทดสอบการอัด เพื่อหาค่าความแข็งแรงอัด (Compressive strength) และค่ามอดูลัสการอัด (Compressive modulus) เป็นการทดสอบที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D6108-97 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 6 mm x 6 mm x 12 mm และความเร็วที่ใช้ทดสอบการอัด คือ 0.5 mm/min นอกจากนี้ในการทดสอบการดึง การตัด และการอัดดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ (รุ่น NRI-TS500-50 ของ บริษัท นรินทร์ อินสทรูเมนต์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) และดำเนินการในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 25 °C

การทดสอบความแข็งดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์วัดความแข็ง Durometer แบบ Shore D (รุ่น GS-702G ของบริษัท Teclock corporation จำกัด Nagano, Japan) ในการทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D2240-91 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 30 mm x 30 mm x 6 mm และกระทำที่อุณหภูมิห้อง 25 °C

การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำและการพองตัว เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (Water absorption) และเปอร์เซ็นต์การพองตัว (Thickness swelling) เป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D570-88 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 10 mm x 20 mm x 6 mm ก่อนการทดสอบนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่น้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.001 g และวัดขนาดความหนาด้วยเวอร์เนียดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.01 mm หลังจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง 25 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานตัวอย่างชั่งน้ำหนักและวัดขนาดความหนาอีกครั้ง เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและเปอร์เซ็นต์การพองตัว ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\text{การดูดซับน้ำ (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักก่อนการแช่น้ำ (g) และ น้ำหนักหลังการแช่น้ำ (g) ตามลำดับ

$$\text{การพองตัว (\%)} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ t_1 และ t_2 คือ ความหนาก่อนการแช่น้ำ (mm) และ ความหนาหลังการแช่น้ำ (mm) ตามลำดับ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. การวิเคราะห์โครงสร้างสันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ

โครงสร้างสันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบบางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลียอไมล์ยางพารา แสดงดังรูปที่ 1 โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลียอไมล์ 30 wt% (รูปที่ 1ก) และ 50 wt% (รูปที่ 1ข) มีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และดูเหมือนว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลียอไมล์ 50 wt% มีขนาดของรูพรุนและช่องว่างระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และซีลียอไมล์ที่ใหญ่กว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลียอไมล์ 30 wt%

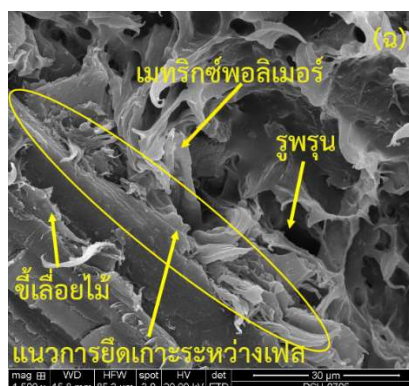
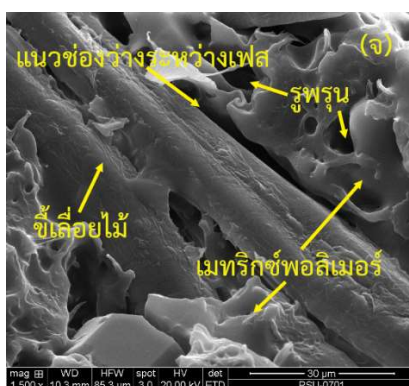
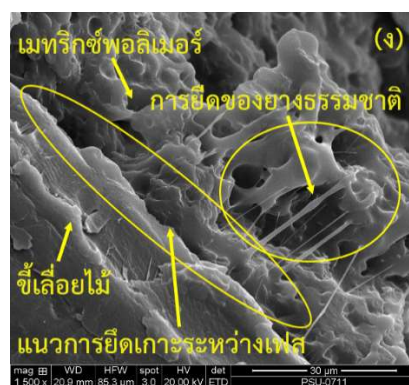
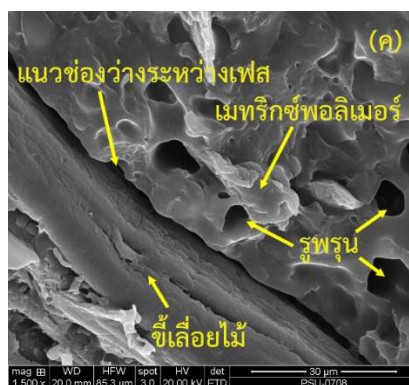
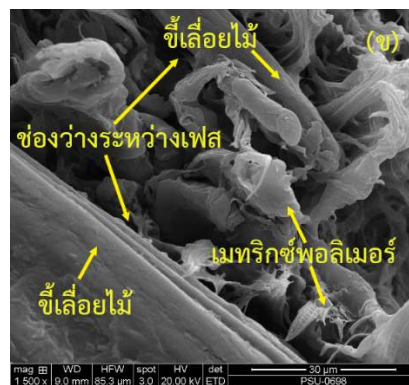
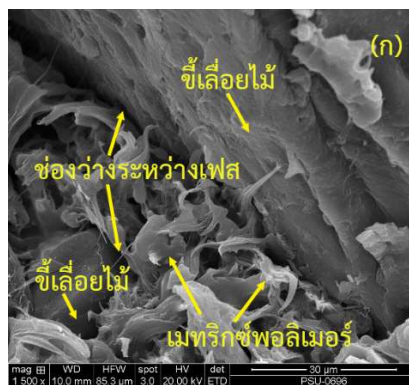
โครงสร้างสันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลียอไมล์ 30 wt% (รูปที่ 1ค) และ 50 wt% (รูปที่ 1ด) ซึ่งให้เห็นว่า ความถี่ในการเกิดรูพรุนและช่องว่างระหว่างเฟสภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลียอไมล์ 50 wt% มีมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลียอไมล์ 30 wt% เนื่องจากซีลียอไมล์มีความสามารถการยึดเกาะที่ไม่ดีกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ทำให้เมื่อเติมซีลียอไมล์เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้รูพรุนและช่องว่างระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับ Ashori [12] กล่าวด้วยว่า พลาสติกและไม้เปรียบเสมือนน้ำกับน้ำมัน ซึ่งไม่สามารถผสมกันได้เป็นอย่างดี [13] ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะและความเข้ากันได้ระหว่างซีลียอไมล์และเมทริกซ์พอลิเมอร์มักต้องปรับปรุงด้วยการเติมสารคู่ควบ [13, 14] และเมื่อเติมสารคู่ควบชนิด MAPP ปริมาณ 4 wt% ในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลียอไมล์ 30 wt% (รูปที่ 1ง) และ 50 wt% (รูปที่ 1ฉ) แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างซีลียอไมล์และ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

เมทริกซ์พอลิเมอร์มีมากขึ้น โดยช่องว่างระหว่างเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงเกิดขึ้นน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ 30 wt% (รูปที่ 1ก) และ 50 wt% (รูปที่ 1ข) กับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน

เสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ 30 wt% (รูปที่ 1ค) และ 50 wt% (รูปที่ 1ง) พบว่าที่ปริมาณซีล้อยไม้เท่ากัน โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีรูพรุนเกิดขึ้นมากกว่าและช่องว่างระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และซีล้อยไม้ใหญ่กว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ (ก) ปริมาณ 30 wt% (R30H70W30) (ข) ปริมาณ 50 wt% (R30H70W50) และที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ (ค) ปริมาณ 30 wt% (R30P70W30) (ง) ปริมาณ 30 wt% และเติม MAPP 4 wt% (R30P70W30M4) (จ) ปริมาณ 50 wt% (R30P70W50) และ(ฉ) ปริมาณ 50 wt% และเติม MAPP 4 wt% (R30P70W50M4)

3.2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติในสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบ

ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยไม้ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้แสดงดังรูปที่ 2 ผลการทดสอบทางสถิติแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารคู่ควบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็ง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว เช่นเดียวกันปริมาณซีลี้อยไม้ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ต่อทุกสมบัติทางกลและทางกายภาพ ในขณะที่การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารคู่ควบและซีลี้อยไม้ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) เฉพาะค่ามอดูลัสการดัด ค่า

มอดูลัสการอัด ค่าความแข็ง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยไม้ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ทั้งปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยไม้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ยกเว้นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่ปริมาณซีลี้อยไม้ไม่มีผลกระทบอย่างไม่มีนัยสำคัญ (P-value > 0.05) นอกจากนี้พบว่า การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารคู่ควบและซีลี้อยไม้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเคียวการดึง ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็ง และค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

Two-way ANOVA: Tensile Strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	4.0526	1.35086	16.02	0.000
Sawdust content	1	5.2136	5.21365	61.82	0.000
Interaction	3	0.2146	0.07152	0.85	0.478
Error	32	2.6987	0.08434		
Total	39	12.1795			

Two-way ANOVA: Tensile Modulus					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	2713.2	904.41	1.36	0.272
Sawdust content	1	3818.7	3818.69	5.75	0.023
Interaction	3	698.0	232.66	0.35	0.789
Error	32	21255.3	664.23		
Total	39	28485.1			

Two-way ANOVA: Tensile Strain					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	2.7484	0.9161	2.49	0.078
Sawdust content	1	17.5300	17.5300	47.65	0.000
Interaction	3	0.7786	0.2595	0.71	0.556
Error	32	11.7722	0.3679		
Total	39	32.8293			

Two-way ANOVA: Modulus of Rupture					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	10.3122	3.4374	3.63	0.023
Sawdust content	1	31.0735	31.0735	32.78	0.000
Interaction	3	0.2555	0.0852	0.09	0.965
Error	32	30.3342	0.9479		
Total	39	71.9755			

Two-way ANOVA: Modulus of Elasticity					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	162352	54117	38.07	0.000
Sawdust content	1	171819	171819	120.86	0.000
Interaction	3	45421	15140	10.65	0.000
Error	32	45494	1422		
Total	39	425085			

Two-way ANOVA: Compressive Strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	5.6784	1.89278	3.42	0.029
Sawdust content	1	5.4317	5.43169	9.81	0.004
Interaction	3	1.7214	0.57380	1.04	0.390
Error	32	17.7152	0.55360		
Total	39	30.5466			

Two-way ANOVA: Compressive Modulus					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	133273	44424.4	65.83	0.000
Sawdust content	1	64658	64658.5	95.82	0.000
Interaction	3	40257	13419.0	19.89	0.000
Error	32	21593	674.8		
Total	39	259782			

Two-way ANOVA: Hardness					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	69.159	23.053	38.79	0.000
Sawdust content	1	133.627	133.627	224.85	0.000
Interaction	3	19.550	6.517	10.97	0.000
Error	32	19.018	0.594		
Total	39	241.353			

Two-way ANOVA: Water Absorption					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	20.1346	6.71153	33.75	0.000
Sawdust content	1	9.7895	9.78952	49.23	0.000
Interaction	3	5.8637	1.95458	9.83	0.000
Error	32	6.3634	0.19885		
Total	39	42.1512			

Two-way ANOVA: Thickness Swelling					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPE content	3	9.2599	3.08665	38.70	0.000
Sawdust content	1	9.3339	9.33390	117.03	0.000
Interaction	3	5.4954	1.83180	22.97	0.000
Error	32	2.5522	0.07976		
Total	39	26.6414			

รูปที่ 2 ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยไม้ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

3.3. สมบัติการดึงของวัสดุเชิงประกอบ

สมบัติการดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา ซึ่งประกอบด้วย ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความเครียดการดึงแสดงดังรูปที่ 4ก 4ข และ 4ค ตามลำดับ โดยซีให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและซีลี้อยู่มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความเครียดการดึงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและซีลี้อยู่ไม่อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน เนื่องจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากกว่าชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ดังแสดงข้อมูลในหัวข้อที่ 2.1 ทำให้เมื่อผสมกับยางธรรมชาติ พอลิโพรพิลีนสามารถยังคงรักษาความแข็งแรงได้สูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

การเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่เพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเครียดการดึงลดลง เพราะความสามารถการเสียดระหว่างผิวหน้าของซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์พอลิเมอร์ลดลง ตลอดจนการเติมซีลี้อยู่ไม่ที่เปราะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง [9] อย่างไรก็ตามกลับพบว่า ค่ามอดูลัสการดึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบมากขึ้น เนื่องจากซีลี้อยู่ไม่มีความมอดูลัสสูงกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นการเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในเมทริกซ์พอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเป็นการปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญ [9]

Two-way ANOVA: Tensile Strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	298.140	99.3800	234.87	0.000
Sawdust content	1	88.031	88.0309	208.05	0.000
Interaction	3	6.671	2.2236	5.26	0.005
Error	32	13.540	0.4231		
Total	39	406.382			

Two-way ANOVA: Tensile Modulus					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	13980.0	4660.0	6.90	0.001
Sawdust content	1	33987.2	33987.2	50.35	0.000
Interaction	3	3033.5	1011.2	1.50	0.234
Error	32	21599.4	675.0		
Total	39	72600.0			

Two-way ANOVA: Tensile Strain					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	31.074	10.3581	26.60	0.000
Sawdust content	1	83.781	83.7813	215.14	0.000
Interaction	3	17.448	5.8161	14.94	0.000
Error	32	12.461	0.3894		
Total	39	144.765			

Two-way ANOVA: Modulus of Rupture					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	559.494	186.498	126.00	0.000
Sawdust content	1	68.727	68.727	46.43	0.000
Interaction	3	2.183	0.728	0.49	0.691
Error	32	47.366	1.480		
Total	39	677.769			

Two-way ANOVA: Modulus of Elasticity					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	2424455	808152	305.08	0.000
Sawdust content	1	89592	89592	33.82	0.000
Interaction	3	4625	1542	0.58	0.631
Error	32	84768	2649		
Total	39	2603440			

Two-way ANOVA: Compressive Strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	240.324	80.1079	39.85	0.000
Sawdust content	1	59.952	59.9515	29.82	0.000
Interaction	3	45.797	15.2655	7.59	0.001
Error	32	64.325	2.0102		
Total	39	410.397			

Two-way ANOVA: Compressive Modulus					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	210420	70140	133.01	0.000
Sawdust content	1	439125	439125	832.71	0.000
Interaction	3	91507	30502	57.84	0.000
Error	32	16875	527		
Total	39	757927			

Two-way ANOVA: Hardness					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	238.672	79.557	69.63	0.000
Sawdust content	1	128.128	128.128	112.15	0.000
Interaction	3	18.862	6.287	5.50	0.004
Error	32	36.560	1.143		
Total	39	422.222			

Two-way ANOVA: Water Absorption					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	3.93736	1.31245	11.46	0.000
Sawdust content	1	0.45281	0.45281	3.95	0.055
Interaction	3	1.81581	0.60527	5.28	0.004
Error	32	3.66637	0.11457		
Total	39	9.87235			

Two-way ANOVA: Thickness Swelling					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	1.44609	0.48203	4.54	0.009
Sawdust content	1	2.57742	2.57742	24.28	0.000
Interaction	3	0.49387	0.16462	1.55	0.220
Error	32	3.39682	0.10615		
Total	39	7.91419			

รูปที่ 3 ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยู่ไม่ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ไม่

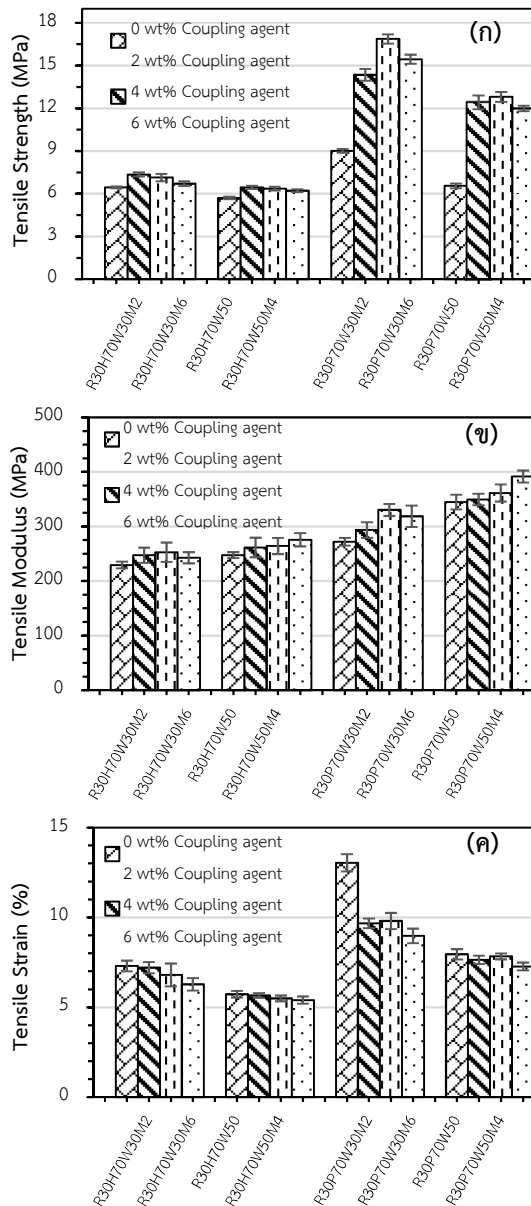
การเติมสารคู่ควบทั้งชนิด MAPE และ MAPP ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลียอไม้สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงให้มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเติมสาร MAPP ปริมาณ 2 wt% ในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มประมาณ 59% และ 89% สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลียอไม้ 30 wt% และ 50 wt% ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 87% และ 95% ตามลำดับ เมื่อเติมสาร MAPP เป็นส่วนผสม 4 wt% พฤติกรรมนี้สามารถพิสูจน์ได้จากโครงสร้างสัณฐานวิทยาในรูปที่ 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่เติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 4 wt% มีการยึดเกาะระหว่างซีลียอไม้และเมทริกซ์พอลิเมอร์แข็งแรงมากขึ้น โดยช่องว่างระหว่างวัสดุเสริมแรงและเมทริกซ์เกิดขึ้นน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมสารคู่ควบ ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบที่เติมสารคู่ควบจึงมีการถ่ายทอดแรงเค้นภายในโครงสร้างจากพอลิเมอร์ไปยังซีลียอไม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [15, 16] อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึงลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมสาร MAPP เป็นส่วนผสม 6 wt% ในขณะเดียวกันพบด้วยว่า การเติมสาร MAPE ปริมาณมากกว่า 2 wt% ในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงตามปริมาณของสาร MAPE ที่เติมเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลียอไม้ 30 wt% พบว่าค่ามอดูลัสการดึงลดลงเช่นกัน เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 6 wt% อย่างไรก็ตามสำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลียอไม้ 50 wt% กลับพบว่า การเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นในช่วง 2-6 wt% ส่งผลให้ค่ามอดูลัสการดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสม

นอกจากนี้ค่าความเครียดการดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลียอไม้ยังพารามีค่าลดลง เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ

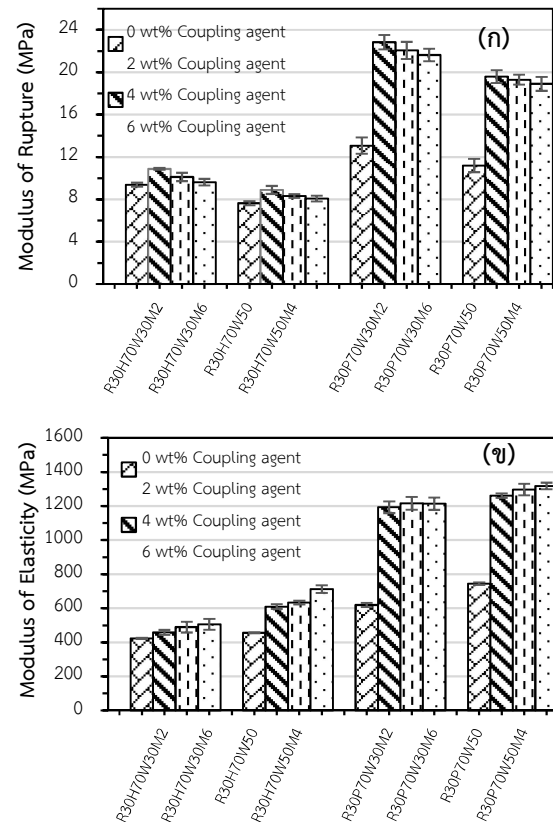
วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและซีลียอไม้ 30 wt% พบว่ามีค่าความเครียดการดึงลดลงประมาณ 34% เมื่อเติมสารคู่ควบชนิด MAPP ปริมาณ 2 wt% เป็นส่วนผสม สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า สัดส่วนยางพาราที่เติมเป็นส่วนผสมมีปริมาณลดลง เนื่องจากการเติมสารคู่ควบทดแทน ทำให้ความสามารถการยึดตัวของวัสดุเชิงประกอบลดลง

3.4. สมบัติการดึงของวัสดุเชิงประกอบ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติก่อนหน้า ผลปรากฏว่า ปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลียอไม้มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสการดึง และในรูปที่ 5ก และ 5ข แสดงให้เห็นด้วยว่า ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสการดึง ตามลำดับ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม โดยการเติมสารคู่ควบชนิด MAPP ปริมาณ 2 wt% เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น 74% และ 75% ในขณะที่ค่ามอดูลัสการดึงเพิ่มขึ้น 92% และ 69% สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลียอไม้ 30 wt% และ 50 wt% ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและกลุ่มแอนไฮไดรด์ของ MAPP ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของระบบวัสดุเชิงประกอบ [7] เช่นเดียวกันการสร้างพันธะระหว่าง MAPP กับห่วงโซ่ของพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นมาจากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังนั้นการถ่ายทอดความเค้นที่เกิดขึ้นในเมทริกซ์พอลิเมอร์ไปยังซีลียอไม้ เกิดขึ้นโดยผ่านการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ [7] อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 wt% (ปริมาณ 4-6 wt%) พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงลดลงบ้าง ตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสม ซึ่งการเติมสารคู่ควบปริมาณมากเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณซีลียอไม้ สารคู่ควบที่เป็นส่วนเกินจะส่งผลให้โมเลกุลของพลาสติกเกิดการเลื่อนหลุด [15]



รูปที่ 4 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัสการดึง และ (ค) ความเครียดการดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ ยางพารา



รูปที่ 5 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) ความแข็งแรงดัด และ (ข) โมดูลัสการดัดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพารา

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นด้วยว่า การเติมซีลี้อยไม้ ยางพาราเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้เพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดลดลง สิ่งนี้เป็น เพราะเมทริกซ์พอลิเมอร์ไม่สามารถห่อหุ้มผิวซีลี้อยไม้ได้ อย่างทั่วถึง และเกิดช่องว่างภายในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่ง นำไปสู่การยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงระหว่างผิวหน้าของซีลี้อย ไม้และเมทริกซ์ ทำให้การแยกตัวระหว่างวัสดุทั้งสอง เกิดขึ้นได้อย่างง่าย [17, 18] ดังนั้นความแข็งแรงทางกล ของวัสดุเชิงประกอบจึงลดลง [18] ในทางตรงกันข้ามการ เติมซีลี้อยไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นกลับทำให้ค่ามอดูลัสการ ดัดเพิ่มขึ้น เพราะในความเป็นจริงซีลี้อยไม้ยางพารามี ความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์ [16] ดังนั้นวัสดุเชิง ประกอบที่มีซีลี้อยไม้เป็นส่วนผสมมากกว่า จำเป็นต้องใช้

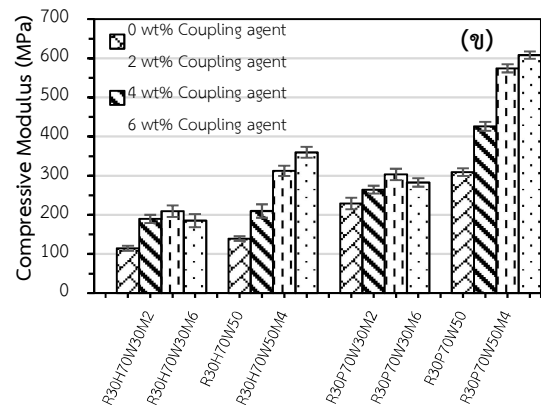
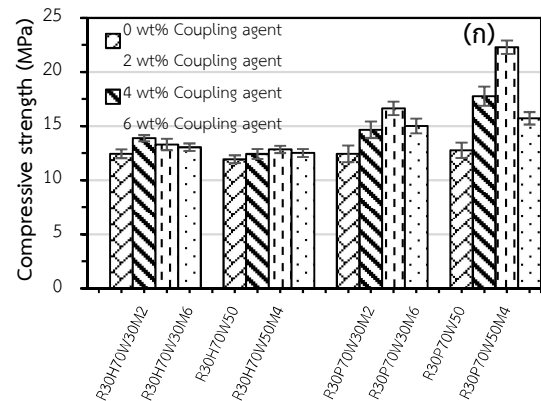
ความเค้นที่สูงกว่า เพื่อให้เกิดการเสีรูปร่างเท่ากัน [16, 19] นอกจากนี้พบว่า ที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน

3.5. สมบัติการอัดของวัสดุเชิงประกอบ

ความผันแปรของค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัด แสดงในรูปที่ 6 และ 6x ตามลำดับ โดยมีผลกระทบมาจากชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบ โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัดต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับสมบัติการดึง โดยปกติพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความแข็งแรงต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและเสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 50 wt% มีค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัดสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 30 wt% แต่วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 50 wt% กลับมีค่าความแข็งแรงอัดต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 30 wt% เล็กน้อย

การเติมสารคู่ควบทั้งชนิด MAPE และชนิด MAPP สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัด โดยวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและซีลี้อยไม้ 50 wt% และวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและซีลี้อยไม้ 30 wt% และ 50 wt% มีค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบ เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมในช่วง 2-4 wt% แต่เมื่อเติมสารคู่ควบ 6 wt% กลับส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดลดลง นอกเหนือจากนี้พบว่าวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีส่วนผสมของซีลี้อยไม้ยางพารา 50 wt% มีค่ามอดูลัสการ

อัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสมเมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมในช่วง 2-6 wt% แต่สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลี้อยไม้ยางพารา 30 wt% มอดูลัสการอัดมีค่าลดลงเมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 6 wt%



รูปที่ 6 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) ความแข็งแรงอัด และ (ข) มอดูลัสการอัดของวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพารา

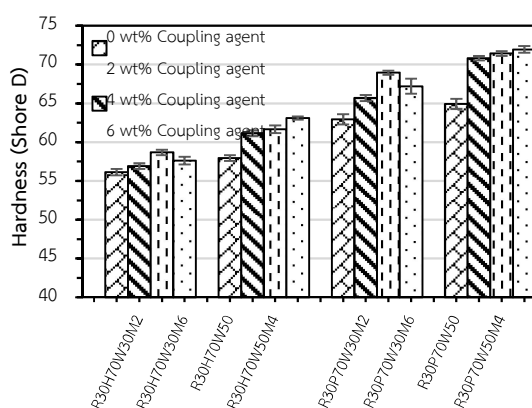
3.6. สมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ 7 แสดงการเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 2-6 wt% สามารถปรับปรุงความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพาราให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสม เนื่องจากสารคู่ควบปรับปรุงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างลิกโนเซลลูโลสและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของซีลี้อยไม้และพอลิ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

เมอร์แข็งแรงขึ้น [7] อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ไม่ ยางพารา 30 wt% แสดงการลดลงของค่าความแข็งเมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 6 wt% โดย Kuo และคณะ [20] กล่าวว่า ปริมาณที่เหมาะสมของสารคู่ควบอยู่ในช่วง 3–4.5 wt% เพราะการยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์พอลิเมอร์จะอ่อนแอลง เมื่อมีการเติมสารคู่ควบในปริมาณที่มากกว่านี้

นอกจากนี้พบว่า ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีลี้อยู่ไม่ที่เติมเป็นส่วนผสมมากขึ้น สิ่งนี้เป็นเพราะในความเป็นจริงไม่มีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์ [21] ทำให้เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ทดแทนเนื้อยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีลี้อยู่ไม่ เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน พบด้วยว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนมีค่าความแข็งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอย่างชัดเจน เนื่องจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีความแข็งมากกว่าชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีความแข็ง 91.5 Shore D และชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความแข็ง 65.25 Shore D



รูปที่ 7 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยู่ไม่ และปริมาณสารคู่ควบต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ยางพารา

3.7. สมบัติการดูดซับน้ำและการพองตัวของวัสดุเชิงประกอบ

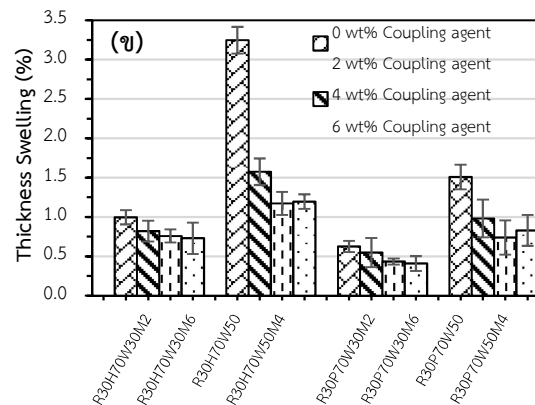
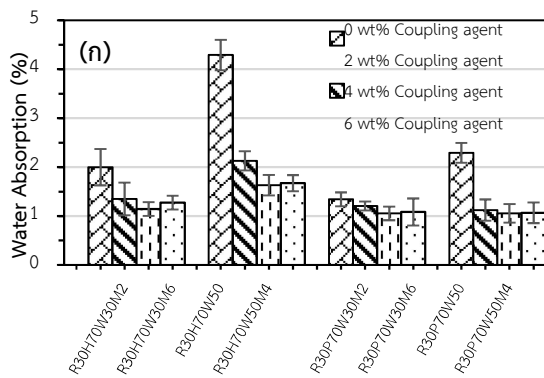
ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยู่ไม่ และปริมาณสารคู่ควบต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ยางพาราแสดงในรูปที่ 8 และ 8ข ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอย่างชัดเจน สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า การแทรกตัวของซีลี้อยู่ไม่เข้าสู่เมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นได้ดีกว่า ทำให้การกระจายตัวของซีลี้อยู่ไม่และการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์พอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่า ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากโครงสร้างสัณฐานวิทยาในรูปที่ 1 โดยเห็นได้ว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 1ค และ 1ง) มีรูพรุนเกิดขึ้นภายในโครงสร้างน้อยกว่า และมีการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์ที่แน่นหนาแน่นกว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (รูปที่ 1ก และ 1ข) อย่างชัดเจน ดังนั้นการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนจึงมีค่าที่น้อยกว่า

วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวมากขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% เนื่องจากธรรมชาติของพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ไม่ชอบดูดซับน้ำ ในขณะที่ซีลี้อยู่ไม่เป็วัสดุที่ชอบดูดซับน้ำ เพราะหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ที่อยู่ในผนังเซลล์เซลลูโลสเกิดการจับตัวกับพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ของโมเลกุลน้ำ [22, 23] ทำให้เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมมากขึ้น การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีลี้อยู่ไม่ที่เติมเป็นส่วนผสม นอกจากนี้ Klyosov [24] กล่าวว่าด้วยว่า การเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบมากกว่า 40

เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เมทริกซ์พอลิเมอร์ห่อหุ้มซีลี้อยู่ไม่ได้ไม่ทั่วถึง [25] ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

การเติมสารคู่ควบทั้งชนิด MAPE และ MAPP เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 50 wt% เมื่อเติมสาร MAPE เป็นส่วนผสม 2 wt% ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวลดลงประมาณ 101% และ 105% ตามลำดับ พฤติกรรมนี้ชี้ให้เห็นว่า สารคู่ควบสามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่และเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ โดยส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเฟสและรูพรุนภายในโครงสร้างลดลง [7] ซึ่งเป็นการลดที่อยู่ของน้ำภายในโครงสร้าง และลดความสามารถการแทรกตัวของน้ำเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ เช่นเดียวกันการเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นจาก 2 wt% เป็น 4 wt% พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวมีการลดลงอีกเล็กน้อย และเมื่อเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นเป็น 6 wt% แทบไม่ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพาราลดลง สิ่งนี้สามารถกล่าวได้ว่า การเติมสารคู่ควบปริมาณ 6 wt% นั้นเกินความจำเป็นในการปรับปรุงสมบัติการดูดซับน้ำและการพองตัวของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 8 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยู่ และปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และ (ข) เปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา

4. สรุป

ผลจากการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา พบว่า ปริมาณซีลี้อย่างพาราและปริมาณสารคู่ควบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ซึ่งสาเหตุของความผันแปรในสมบัติทางกลและทางกายภาพมีผลมาจากความสามารถการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่และเมทริกซ์พอลิเมอร์ โดยวัสดุเชิงประกอบที่มีการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่และเมทริกซ์ที่

แน่นหนากว่า หรือมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยกว่า จะมีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีกว่า ดังนั้นการเติมซีลี้อยู่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเครียดการดึง และค่าความแข็งแรงดัดลดลง เนื่องจากเมทริกซ์พอลิเมอร์ไม่สามารถห่อหุ้มผิวซีลี้อยู่ได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงระหว่างผิวหน้าของซีลี้อยู่และเมทริกซ์ เช่นเดียวกันการเติมสารคู่ควบในวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับปรุงให้สมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบ

ปรับปรุงความสามารถการยึดเกาะระหว่างซีลื้อยไม้และเมทริกซ์ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบในปริมาณมากเกินไปกลับส่งผลในทางลบต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ นอกจากนี้การใช้พลาสติกพอลิโพรพิลีนเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลื้อยไม้ยางพาราแสดงอย่างชัดเจนว่าให้สมบัติการดึง การตัด การอัด ความแข็งแรง และการดูดซับน้ำดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RDG5950008 ที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. J. Elliot, “Developments with thermoplastic natural rubber blends,” *NR Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 59-68, 1981.
- [2] M. S. Jamil, I. Ahmad, and I. Abdullah, “Effects of rice husk filler on the mechanical and thermal properties of liquid natural rubber compatibilized high-density polyethylene/natural rubber blends,” *J. Polym. Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 315-321, 2006.
- [3] D. S. Campbell, D. J. Elliott, and M. A. Wheelans, “Thermoplastic natural rubber blends,” *NR Technol.*, vol. 9, no. 21, pp. 29-37, 1978.
- [4] N. R. Legge, G. Holden, and H. E. Schroeder, *Thermoplastic elastomers: a comprehensive review*. Hanser Publishers: New York, 1987.
- [5] K. Kosonmetee, “Preparation and mechanical properties of rubber composites made from

thermoplastic natural rubber blended with jute fiber,” M.S. thesis, Dept. Mater. Sci. Technol., Prince of Songkla Univ., Songkhla, Thailand, 2009.

- [6] M. A. López-Manchado and M. Arroyo, “Effect of the incorporation of pet fibers on the properties of thermoplastic elastomer based on PP/elastomer blends,” *Polym.*, vol. 42, no. 15, pp. 6557-6563, 2001.
- [7] W. N. W. Busu, H. Anuar, S. H. Ahmad, R. Rasid, and N. A. Jamal, “The mechanical and physical properties of thermoplastic natural rubber hybrid composites reinforced with *Hibiscus cannabinus, L* and short glass fiber,” *Polym. Plas. Technol. Eng.*, vol. 49, no. 13, pp. 1315-1322, 2010.
- [8] H. Anuar and A. Zuraida, “Improvement in mechanical properties of reinforced thermoplastic elastomer composite with kenaf bast fibre,” *Compos. B: Eng.*, vol. 42, no. 3, pp. 462-465, 2011.
- [9] Z. H. Xu and Z. N. Kong, “Mechanical and thermal properties of short-coir-fiber-reinforced natural rubber/polyethylene composites,” *Mec. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 3, pp. 353-358, 2014.
- [10] M. R. M. Piah, A. Baharum, and I. Abdullah, “Mechanical properties of bio-composite natural rubber/high density polyethylene/mengkuang fiber,” *Polym. Polym. Compos.*, vol. 24, no. 9, pp. 767-774, 2016.
- [11] Y. A. El-Shekeil, S. M. Sapuan, K. Abdan, and E. S. Zainudin, “Influence of fiber content on the mechanical and thermal properties of Kenaf fiber reinforced thermoplastic

- polyurethane composites,” *Mater. Des.*, vol. 40, pp. 299-303, Sep. 2012.
- [12] A. Ashori, “Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!,” *Biores. Technol.*, vol. 99, no. 11, pp. 4661-4667, 2008.
- [13] C. Homkhiew, “Development and applications of natural fiber/thermoplastic composites for industrial,” *J. Indus. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 97-110, 2014.
- [14] M. A. S. Spinace, K. K. G. Feroseli, and M. A. D. Paoli, “Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 112, no. 6, pp. 3686-3694, 2009.
- [15] S. Mohanty, S. K. Verma, S. K. Nayak, and S. S. Tripathy, “Influence of fiber treatment on the performance of sisal-polypropylene composites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 94, no. 3, pp. 1336-1345, 2004.
- [16] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang, “Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: Effects of composition on mechanical properties,” *J. Thermoplas. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 179-194, 2015.
- [17] D. Ndiaye, L. M. Matuana, S. M. Therias, L. Vidal, A. Tidjani, and J. L. Gardette, “Thermal and mechanical properties of polypropylene/wood-flour composites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 119, no. 6, pp. 3321-3328, 2011.
- [18] T. Ratanawilai, N. Thanawattanasirikul, and C. Homkhiew, “Mechanical and thermal properties of oil palm wood sawdust reinforced post-consumer polyethylene composites,” *ScienceAsia*, vol. 38, no. 3, pp. 289-294, 2012.
- [19] M. R. Rahman, M. M. Huque, M. N. Islam, and M. Hasan, “Improvement of physico-mechanical properties of jute fiber reinforced polypropylene composites by post-treatment,” *Compos. A: Appl. Sci. Manufac.*, vol. 39, no. 11, pp. 1739-1747, 2008.
- [20] P. Y. Kuo, S. Y. Wang, J. H. Chen, H. C. Hsueh, and M. J. Tsai, “Effects of material compositions on the mechanical properties of wood-plastic composites manufactured by injection molding,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 9, pp. 3489-3496, 2009.
- [21] B. Kord, “Effect of wood flour content on the hardness and water uptake of thermoplastic polymer composites,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 12, no. 9, pp. 1632-1634, 2011.
- [22] A. Ashori and S. Sheshmani, “Hybrid composites made from recycled materials: Moisture absorption and thickness swelling behavior,” *Biores. Technol.*, vol. 101, no. 12, pp. 4717-4720, 2010.
- [23] C. Homkhiew, “Factors affecting water absorption behavior of wood-plastic composites,” *J. Indus. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 94-111, 2015.
- [24] A. A. Klyosov, *Wood-Plastic Composites*. New Jersey, John Wiley & Son Inc., 2007.
- [25] S. Tamrakar and R. A. Lopez-Anido, “Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties,” *Construc. Build. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 3977-3988, 2011.