

ผลของเส้นใยเหลือใช้จากเศษวัสดุทางการเกษตรต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของวัสดุไม้ผสมพลาสติกจากพอลิโพรพิลีน

ณคนัท รักษารักษ์¹ ธเนศ รัตนวิไล^{2*} และ ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร³

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ถ.กาญจนวณิชย์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

* Corresponding Author: thanate.r@psu.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 28 พฤษภาคม 2562

แก้ไข : 23 กันยายน 2562

ตอบรับ : 3 ตุลาคม 2562

คำสำคัญ :

วัสดุผสมไม้พลาสติก /
พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล /
เส้นใยธรรมชาติ / สมบัติเชิงกล /
สมบัติทางกายภาพ /
สมบัติทางความร้อน

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เส้นใยเหลือใช้จากเศษวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ เส้นใยกาบมะพร้าว เส้นใยกาบทะเลลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยชังข้าวโพด มาเป็นวัสดุเสริมแรงในไม้ผสมพลาสติกจากพอลิโพรพิลีน โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใย (ร้อยละ 26, 36 และ 46 โดยน้ำหนัก) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน ทั้งนี้ เตรียมขึ้นไม้ผสมพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ และเครื่องอัดรีดร้อน จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Tukey's multiple comparison test พบว่า ปริมาณของเส้นใยส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติแรงดึงและสมบัติแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติก โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงและแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น วัสดุผสมที่ผสมกับเส้นใยกาบมะพร้าว มีแนวโน้มค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุที่ผสมด้วยเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันและเส้นใยชังข้าวโพด ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยทุกชนิดส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวของวัสดุผสมอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม พบว่าวัสดุผสมที่เตรียมจากเส้นใยแต่ละชนิดในอัตราส่วนปริมาณที่แตกต่างกันมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Effects of the Use of Natural Fibers from Agricultural Wastes on Mechanical, Physical and Thermal Properties of Wood Plastic Composites from Polypropylene

Nakanat Raksarak¹, Thanate Ratanawilai^{2*} and Chanarong Srivabut³

Prince of Songkla University, Karnjanavanich Road, Hat Yai, Songkhla 90110

* Corresponding Author: thanate.r@psu.ac.th

¹ Graduated Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

³ Graduated Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: May 28, 2019

Revised: September 23, 2019

Accepted: October 3, 2019

Keywords:

Wood Plastic Composites /

Recycled Polypropylene /

Natural Fiber /

Mechanical Properties /

Physical Properties /

Thermal Properties

This study investigated the use of natural fibers from agricultural wastes, i.e., coconut fiber, palm oil fiber and corn fiber, as reinforcement in wood plastic composites from polypropylene. Influences of the fiber type and fiber content (26%, 36% and 46% by weight) on mechanical, physical and thermal properties were determined. The wood plastic composites were manufactured into panels by using a twin-screw extruder and hot compressors. The data were statistically analyzed by the Tukey's multiple comparison tests to detect the significant differences between groups. The amount of fiber was noted to exhibit a significant effect on the tensile and compressive properties of the wood plastic composites. Tensile strength and compressive strength decreased when the amount of fiber increased. This was in contrast to the modulus values, which increased with an increasing amount of fiber. Tensile and compressive strength of composite material reinforced with coconut fiber tended to increase more than those of other test material groups. In terms of physical properties, surface roughness significantly increased as the amount of fiber increased. No significant differences were noted on the thermal properties of the different test material groups, however.

1. บทนำ

ปัจจุบัน เส้นใยธรรมชาติได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทดแทนเส้นใยสังเคราะห์ โดยมักนิยมใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุผสม เนื่องจากผลกระทบจากปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การนำเอาเส้นใยธรรมชาติมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ [1] จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งช่วยลดปัญหาอันเกิดจากระยะเวลาในการย่อยสลายของเส้นใยสังเคราะห์ นอกจากนี้ ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น ในอดีต ได้มีการศึกษาการนำเส้นใยธรรมชาติหลายชนิดมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์ (Fiber reinforced polymers) หรือพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) [2-4] โดยเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ เป็นตัวช่วยเสริมแรง ให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ เมื่อเทียบกับวัสดุที่เติมสารเสริมแต่งชนิดอื่นๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Fiberglass) เป็นต้น นอกจากนี้ วัสดุธรรมชาติที่ได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุผสม ส่วนใหญ่ถูกทำให้อยู่ในรูปของเส้นใย (Fiber) ผงไม้ (Flour) ไม้เลื่อย (Sawdust) และเนื้อไม้ (Chip) ซึ่งวัสดุธรรมชาติที่ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตวัสดุผสมไม้พลาสติก คือ เส้นใยจากไม้ไผ่ ยางพารา ปอแก้ว สน และใบสับปะรด [5-6] แต่ยังมีไม้อีกหลากหลายชนิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพียงเล็กน้อย เช่น มะพร้าว ปาล์ม และข้าวโพด ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย [7-8]

มะพร้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งมีพื้นที่ในการเพาะปลูกทุกภูมิภาค สำหรับส่วนประกอบของมะพร้าวสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เนื้อมะพร้าว น้ำมะพร้าว และกาบมะพร้าว โดยในอุตสาหกรรมการผลิตเพื่อการบริโภคใช้วัตถุดิบหลัก คือ เนื้อมะพร้าว และน้ำมะพร้าว คิดเป็นสัดส่วนร้อยละประมาณ 60-65 ส่วนที่เหลือเป็นกาบมะพร้าว คิดเป็นสัดส่วนร้อยละประมาณ 35-40 โดยการสร้างมูลค่าเพิ่มของกาบมะพร้าวส่วนใหญ่ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอุตสาหกรรมเครื่องนอน โดยกาบมะพร้าวมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบคิดเป็นร้อยละ 35 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 25.8 และลิกนินคิดเป็นร้อยละ 16.01 ของน้ำหนัก [9]

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจอันดับต้นๆ ของประเทศไทย ซึ่งพบว่าปาล์มน้ำมันในประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า

4 ล้านไร่ โดยเฉพาะในภาคใต้ของประเทศ คิดเป็นร้อยละ 52 ของพื้นที่เพาะปลูกภายในประเทศ [10] โดยปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้ปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 70 ต่อปี เพื่อสกัดเป็นน้ำมันปาล์ม ซึ่งหลังจากกระบวนการแปรรูปได้น้ำมันปาล์มและกากทะลายน้ำมันปาล์มเป็นจำนวนมาก [11] โดยกากทะลายน้ำมันปาล์มที่เหลือมักถูกนำไปเผาไหม้เพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า [12] นอกจากนี้ กากทะลายน้ำมันมีเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 33 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 20.5 และลิกนินคิดเป็นร้อยละ 15.1 ของน้ำหนัก [9]

ข้าวโพดนับเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทยสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศ คิดเป็นมูลค่าประมาณปีละ 10,000 ล้านบาท โดยที่มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดประมาณ 7-8 ล้านไร่ ส่งผลให้ได้ผลผลิตประมาณปีละ 4-5 ล้านตัน ซึ่งแบ่งเป็นปริมาณการบริโภคภายในประเทศ ร้อยละ 65 ของผลผลิต ส่วนที่เหลือส่งออกในรูปแบบของข้าวโพดดิบ ข้าวโพดบด และแป้งข้าวโพด อย่างไรก็ตามหลังจากการแปรรูปแล้วเหลือซึ่งข้าวโพดคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 40 [13] ซึ่งถือว่าเป็นอัตราส่วนที่สูง จึงมีการนำเศษซึ่งข้าวโพดที่เหลือไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ โดยซึ่งข้าวโพดมีปริมาณเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 39 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 22.9 และลิกนินคิดเป็นร้อยละ 15.85 ของน้ำหนัก [9]

แม้ว่ามีการประยุกต์นำวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ไปยังอุตสาหกรรมหรือใช้เป็นแหล่งพลังงาน เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือใช้ [13] โดยวิธีการต่างๆ แต่ยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่วัสดุเหลือใช้ได้เช่นกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการนำเศษวัสดุเหลือใช้มาผสมกับพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุผสมไม้พลาสติก ซึ่งมีข้อดี คือ ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยสร้างประโยชน์จากเศษวัสดุเหลือใช้ให้มีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ การนำวัสดุเหลือใช้มาเป็นวัสดุผสมไม้พลาสติกยังมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานด้านผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน [14-16] ส่งผลให้ก่อนการสร้างวัสดุผสมใดๆ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบปัจจัยเหล่านี้ [17-18] สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาว่าวัตถุดิบเหลือใช้ทางธรรมชาติ ได้แก่ กาบมะพร้าว กากทะลายน้ำมันปาล์ม และซึ่งข้าวโพด ซึ่งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตร มาใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพลาสติก เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และเศษวัสดุเหลือใช้

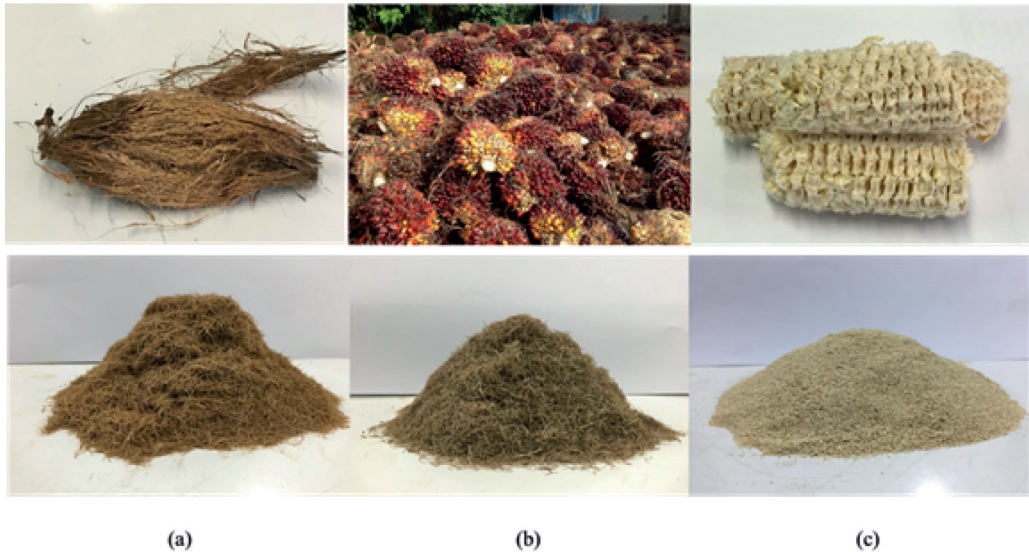
จากธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการ

1. วัสดุ

พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเกรด WT 170 มีค่าดัชนีการไหล 11 กรัมต่อ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัย ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท วิทยาอินเตอร์เทรด จำกัด (จังหวัดสมุทรปราการ) กาบมะพร้าวจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยกาบมะพร้าว (จังหวัดสมุทรปราการ) กากทะเล

ปาล์มน้ำมันจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม (จังหวัดกระบี่) และวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติซึ่งข้าวโพด ชนิดสายพันธุ์ข้าวโพดหวานที่เหลือจากอุตสาหกรรมท้องถิ่น (จังหวัดตรัง) ดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ยังมีเมทริกซ์พลาสติก Maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) โดยมี maleic anhydride ในช่วงร้อยละ 8-10 ของน้ำหนัก ถูกใช้เข้ามาเป็นสารเสริมแต่งจากบริษัท Sigma Aldrich จำกัด (Missouri, USA) และสารหล่อลื่นพาราฟินแว็กซ์จากบริษัท Nippon Seiro จำกัด (Yamaguchi, Japan)



รูปที่ 1 เส้นใยทางธรรมชาติจากเศษวัสดุทางการเกษตร (a) เส้นใยกาบมะพร้าว (b) เส้นใยกากทะเลปาล์มน้ำมัน และ (c) เส้นใยซึ่งข้าวโพด

2. การผลิตขึ้นทอสบวัสดุไม้พลาสติก

กระบวนการเตรียมเส้นใยจากธรรมชาติ (เส้นใยกาบมะพร้าว เส้นใยกากทะเลปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซึ่งข้าวโพด) ล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า PH 6-7 [12] และอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [19] จากนั้นนำไปบดละเอียดแล้วแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาดตั้งแต่ขนาด 212-300 μm [20] แล้วนำไปทำการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [21] ทำการ

จัดเก็บโดยการพ่นกึ่งเพื่อรอการผสม จากนั้นผสมวัสดุตามอัตราส่วนที่กำหนดของวัสดุไม้พลาสติก คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ร้อยละ 50, 60 และ 70 ตามลำดับ เส้นใยจากวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติ ร้อยละ 26, 36 และ 46 ตามลำดับ เมทริกซ์พลาสติก ร้อยละ 3 และสารหล่อลื่น (Lubricant; lub) ร้อยละ 1 จากนั้นทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยการเขย่าเป็นเวลา 5 นาที และจัดเก็บโดยการบรรจุเพื่อรอการขึ้นรูป

นำวัตถุดิบที่ได้จากการผสมไปขึ้นรูปโดยผ่านกระบวนการ

อัดรีดเกลียวคู่ที่อุณหภูมิ 180-190 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วหมุนเกลียว 40 รอบต่อนาที จากนั้นผ่านกระบวนการตัดเม็ดเพื่อให้ได้เม็ดวัสดุผสมไม้พลาสติกที่มีขนาดความยาวของเม็ดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร นำเม็ดพลาสติกที่ได้จากการผสมมาขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบ ด้วยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยแรงอัด 1,000 psi ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยการอุ่นขึ้นงาน (15 นาที) กดอัดขึ้นงาน (15 นาที) และทำการหล่อเย็น (30 นาที) เป็นเวลารวมประมาณ 60 นาที เมื่อขึ้นงานเย็นตัวนำไปตัดให้มีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบตามมาตรฐาน American society for testing and materials (ASTM)

3. ทดสอบสมบัติของขึ้นทดสอบวัสดุผสม

3.1 การทดสอบแรงดึง และการทดสอบแรงอัด (Tensile and Compressive test) ตามมาตรฐานของการทดสอบแรงดึง ASTM D638-99 [22] และมาตรฐานของการทดสอบแรงอัด ASTM D6108-97 ด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine (Model 5582, Instron Corporation, Massachusetts, USA) โดยใช้ความเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตร/นาที ในส่วนของการทดสอบแรงอัดทำการทดสอบแรงกดโดยใช้อัตราการเคลื่อนที่คงที่ 0.5 มิลลิเมตร/นาที โดยทั้งสองทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส แต่ละสูตรมีการทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง

3.2 ทดสอบความขรุขระ (Surface Roughness) ตามมาตรฐานของการทดสอบความขรุขระ ANSI/ASME B 46.1-1995 โดยเครื่องวัดความขรุขระผิว (Model Mitutoyo SJ-301 from Mitutoyo Corporation, Japan)

3.3 ทดสอบแคลอริเมตรีแบบส่องกราดอนุพันธ์ (Differential Scanning Calorimetry: DSC) ตามมาตรฐาน ASTM D2900 ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Model Perkin Elmer DSC7, Perkin Elmer Thailand Corporation, Thailand) โดยวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนและการถ่ายความร้อนออกจากระบบ กระบวนการหลอมและตกผลึก เพื่อหาข้อมูลของพอลิเมอร์ที่เกี่ยวกับจุดเปลี่ยนทางความร้อน และปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมและการตกผลึก (Δh_f และ Δh_c) ความจุความร้อน เพื่อใช้คำนวณหาร้อยละที่เกิดผลึกของวัสดุผสมไม้พลาสติก ดังสมการที่ 1 โดยการให้ความร้อนครั้งแรก (1st Heating) ทำการเพิ่มอุณหภูมิ

จาก 25 องศาเซลเซียส จนถึง 250 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ติดอยู่ในตัวชิ้นงานทดสอบ และทำการลดอุณหภูมิจาก 250 องศาเซลเซียส จนถึง 25 องศาเซลเซียส จากนั้นให้ความร้อนครั้งที่สอง (2nd Heating) เพิ่มอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส จนถึง 250 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิในอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนจากการทดสอบ 3 ซ้ำ

$$C_m (\%) = \frac{(\Delta h_f)}{(\Delta h_{or})} \times 100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดยที่ $C_m (\%)$ = ร้อยละที่เกิดผลึก

Δh_f = เอนทาลปีของการเกิดผลึกที่เกิดในกระบวนการหลอม

Δh_{or} = เอนทาลปีของการเกิดผลึกที่ 100% ของพอลิโพรพิลีน (165 J/g)

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยวิธีจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Quanta 400, FEI Company, Oregon, USA) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของเส้นใย และการยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับเส้นใย โดยก่อนทำการทดสอบ ชิ้นงานทั้งหมดถูกอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบปิดด้วยทองคำบริเวณผิวหน้า และใช้วิธี SEM ที่กำลังขยาย 150X

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่างการทดสอบมาวิเคราะห์หาค่าทางสถิติ เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุผสมโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลกระทบของชนิดของเส้นใยกับปริมาณของเส้นใย ด้วยวิธี Tukey's multiple comparison test โดยที่การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดใช้ระดับนัยสำคัญที่ 5% ($\alpha = 0.05$)

5. ผลการวิจัย และการอภิปราย

สมบัติเชิงกลและกายภาพของขึ้นทดสอบพลาสติกคอมโพสิตกับเส้นใยเหลือใช้ทางธรรมชาติ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลและกายภาพของขึ้นทดสอบวัสดุผสมจากเส้นใยเหลือใช้ทางธรรมชาติ ในสัดส่วนร้อยละ

26, 36 และ 46 ได้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง ที่มากที่สุด (R_{max}) จากการทดสอบ 5 ซ้ำ แสดงดังตารางที่ 1 ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดูลัสแรงอัด และค่าความขรุขระผิว

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมไม้พลาสติก

สมบัติ	ชนิดของเส้นใย	ร้อยละปริมาณเส้นใย			P-value
		46	36	26	
ความแข็งแรงดึง (MPa)	กากมะพร้าว	21.34 ^{ad}	23.12 ^{bd}	25.2 ^{cd}	0.000 [*]
	ทะลายปาล์มน้ำมัน	20.7 ^{ae}	21.48 ^{abe}	23.97 ^{be}	0.026 [*]
	ซังข้าวโพด	17.93 ^{af}	19.61 ^{bf}	23.65 ^{cf}	0.000 [*]
มอดูลัสแรงดึง (MPa)	กากมะพร้าว	2515.71 ^{ad}	2379.57 ^{bd}	2277.83 ^{cd}	0.000 [*]
	ทะลายปาล์มน้ำมัน	2328.8 ^{ae}	2190.35 ^{be}	2041.92 ^{ce}	0.000 [*]
	ซังข้าวโพด	2232.58 ^{af}	2139.82 ^{bf}	1939.44 ^{cf}	0.002 [*]
ความแข็งแรงอัด (MPa)	กากมะพร้าว	46.11 ^{ad}	47.45 ^{bd}	49.59 ^{cd}	0.001 [*]
	ทะลายปาล์มน้ำมัน	43.46 ^{ae}	44.63 ^{be}	46.6 ^{ce}	0.000 [*]
	ซังข้าวโพด	42.04 ^{af}	42.74 ^{bf}	44.46 ^{cf}	0.000 [*]
มอดูลัสแรงอัด (MPa)	กากมะพร้าว	1523 ^{ad}	1442 ^{abd}	1368 ^{bd}	0.016 [*]
	ทะลายปาล์มน้ำมัน	1483 ^{ae}	1402 ^{abe}	1347 ^{abde}	0.021 [*]
	ซังข้าวโพด	1450 ^{af}	1389 ^{bef}	1298 ^{cf}	0.000 [*]
ความขรุขระผิว (μm)	กากมะพร้าว	4.26 ^{ad}	3.38 ^{bd}	2.30 ^{cd}	0.001 [*]
	ทะลายปาล์มน้ำมัน	4.35 ^{ae}	3.76 ^{be}	2.55 ^{ce}	0.000 [*]
	ซังข้าวโพด	4.38 ^{af}	3.77 ^{bf}	2.64 ^{cf}	0.000 [*]

*ปริมาณเส้นใยส่งผลอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ (สัญลักษณ์ a-c แทนผลกระทบปริมาณเส้นใย และสัญลักษณ์ d-f แทนผลกระทบของชนิดเส้นใย) โดยผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันส่งผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

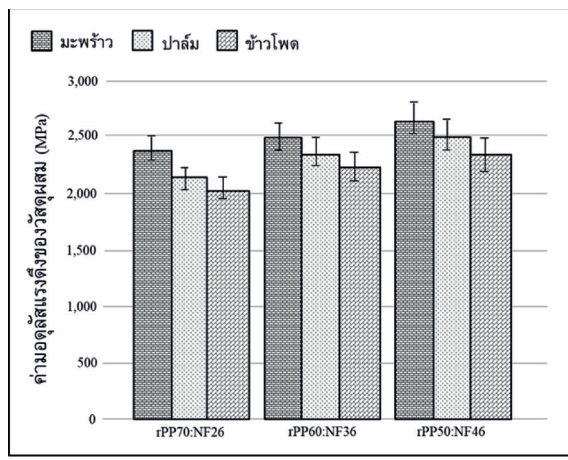
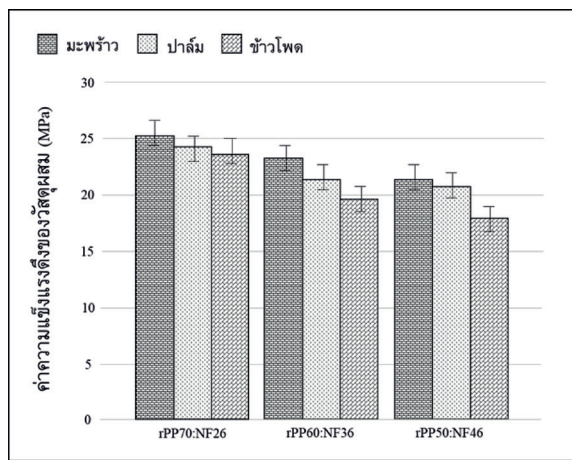
สมบัติแรงดึง

จากรูปที่ 2 (a) และ (b) แสดงความแตกต่างของค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ปริมาณแตกต่างกันของชั้นทดสอบ

วัสดุผสมไม้พลาสติกผสมกับเส้นใยกากมะพร้าว เส้นใยกากทะลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพด ตามลำดับ พบว่า ชั้นทดสอบวัสดุผสมไม้พลาสติกที่มีการเติมเส้นใยกากมะพร้าว

มีค่ามอดูลัสแรงดึงและความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่า เมื่อเติมเส้นใย กากทะเลลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพดของแต่ละส่วนผสม โดยค่าความแข็งแรงดึงที่ร้อยละ 26 เป็นค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากการเติมเส้นใยในปริมาณมากส่งผลต่อโครงสร้างตาข่ายของชิ้น ทดสอบวัสดุผสมให้อ่อนแอลง [21] ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการทำให้ ค่าความแข็งแรงดึงลดลง จากรูปที่ 3 ยังแสดงผลของสมบัติ เหนียวที่ดีเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณพลาสติก เนื่องมาจาก ปริมาณเมทริกซ์พลาสติกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่าง เส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พลาสติกเกิดขึ้นได้ง่าย จึงทำให้ ช่องว่างที่มีลักษณะเป็นรูพรุนภายในวัสดุผสมลดน้อยลง ทำให้ ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น [21, 23] นอกจากนี้พบว่า ค่ามอดูลัส ที่เป็นค่าที่ดีที่สุดคือ ร้อยละ 46 เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ เส้นใยธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการขัดขวางในการเคลื่อนที่ของ โพลีเมอร์ ทำให้ยากต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุผสม ค่ามอดูลัสแรงดึงจึงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณเส้นใย ธรรมชาติเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้น [23] นอกจากนี้ ชนิดของเส้นใยที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสของวัสดุผสม และจากตารางที่ 1 พบว่าชิ้น

ทดสอบวัสดุผสมจากเส้นใยกากมะพร้าวให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสที่ต่ำกว่าเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน และ เส้นใยซังข้าวโพดในปริมาณที่เท่ากัน เพราะเส้นใยกากมะพร้าว มีปริมาณลิกนินที่สูงกว่าเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน และ เส้นใยซังข้าวโพดดังตารางที่ 2 จึงทำให้โครงสร้าง OH ของ เส้นใยกากมะพร้าวผสมเข้ากับเมทริกซ์พลาสติกได้มากกว่าไม้ ชนิดอื่น [24-26] นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากตารางที่ 1 ของชิ้นทดสอบวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างเส้นใยกากมะพร้าว เส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน และ เส้นใยซังข้าวโพด พบว่าปริมาณเส้นใยที่ปริมาณต่างๆ ส่งผลต่อ ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ 5% ($\alpha = 0.05$) นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบ Tukey's multiple comparison test ดังตารางที่ 1 พบว่าที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 46 (ปัจจัย a) มีค่าความแข็งแรงดึงที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ ปริมาณเส้นใยร้อยละ 36 (ปัจจัย b) อย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ ปริมาณเส้นใยร้อยละ 36 (ปัจจัย b) กลับมีค่าความแข็งแรงดึง ที่ต่ำกว่าปริมาณเส้นใยร้อยละ 26 (ปัจจัย c) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 2 แผนภูมิแสดงค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของชิ้นทดสอบ (a) ค่าความแข็งแรงดึง และ (b) ค่ามอดูลัสของชิ้นทดสอบวัสดุผสม

ตารางที่ 2 ปริมาณร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากเส้นใยธรรมชาติโดยน้ำหนัก [9]

ตารางที่ 2 ปริมาณร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากเส้นใยธรรมชาติโดยน้ำหนัก [9]

ชนิดเส้นใย	เซลลูโลส (wt%)	เฮมิเซลลูโลส (wt%)	ลิกนิน (wt%)
กากมะพร้าว	35.55	25.80	16.01
ทะลายปาล์มหมัก	33.08	20.51	15.09
ชังข้าวโพด	39.35	22.90	15.85

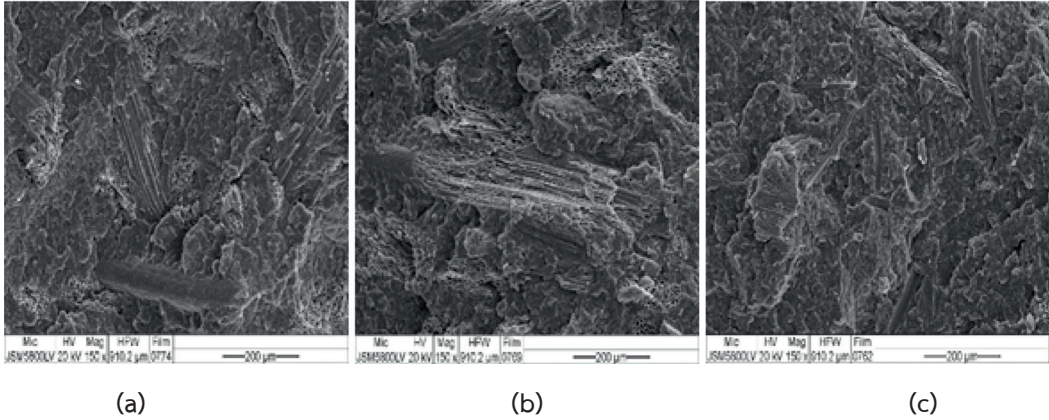
สมบัติแรงอัด

สมบัติแรงอัดของขึ้นทสดอบวัสดุผสมมีความสำคัญอย่างมาก ในปัจจุบันสำหรับการใช้วิเคราะห์ออกแบบชิ้นงานที่ต้องรับน้ำหนัก หรือใช้สำหรับงานโครงสร้าง จากรูปที่ 4 (a) และ (b) แสดงความแตกต่างของค่าความแข็งแรงอัด และค่ามอดุลัสที่ปริมาณแตกต่างกันของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ผสมกับเส้นใย กากมะพร้าว เส้นใยจากทะลายปาล์มหมัก และเส้นใยชังข้าวโพด ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงอัดของขึ้นทสดอบวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณพลาสติกเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยที่ผสมอยู่สามารถยึดเกาะเข้ากับพลาสติกให้เป็นเนื้อเดียวกันได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงสามารถปรับปรุงสมบัติแรงอัดให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ด้วยสมบัติของเส้นใย กากมะพร้าวที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุดดังตารางที่ 2 จึงทำให้เส้นใยกากมะพร้าวสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์พลาสติกได้ดีกว่าเส้นใยจากทะลายปาล์มหมักและเส้นใยชังข้าวโพด ตามลำดับ [24] ส่งผลให้เส้นใยกากมะพร้าวมีค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสที่ดีกว่าเส้นใยจากทะลายปาล์มหมัก และเส้นใยชังข้าวโพดในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสแรงดึง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากตารางที่ 1 ยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณของเส้นใยนั้นส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอัด และค่ามอดุลัสแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญที่ 5% ($\alpha = 0.05$)

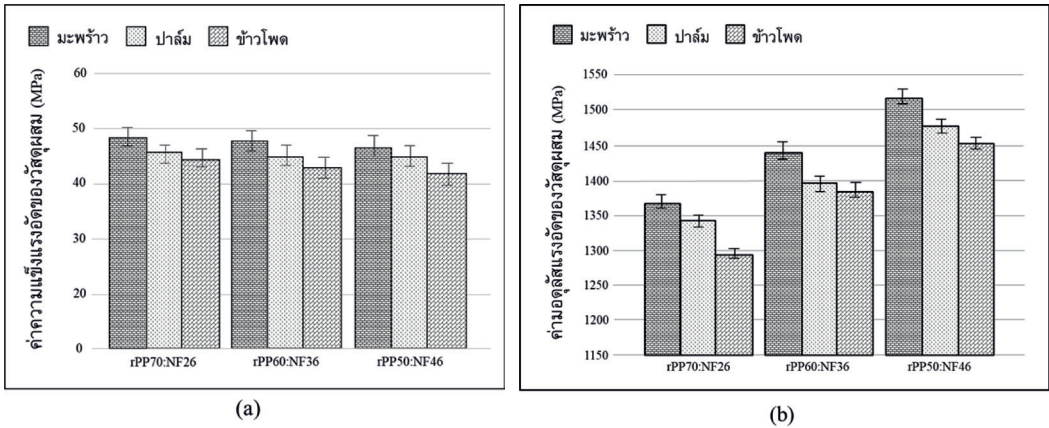
สมบัติความขรุขระผิว

จากรูปที่ 5 แสดงความแตกต่างของค่าความขรุขระที่ปริมาณแตกต่างกันของขึ้นทสดอบวัสดุผสม ที่ผสมกับเส้นใยกากมะพร้าว

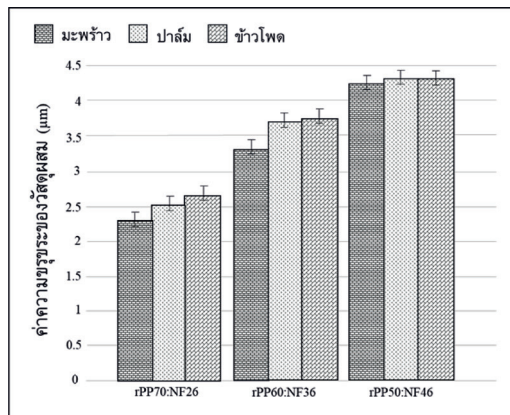
เส้นใยจากทะลายปาล์มหมัก และเส้นใยชังข้าวโพด ตามลำดับ ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน โดยค่าเฉลี่ยของความขรุขระผิวของขึ้นทสดอบวัสดุผสม มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยลดลง โดยที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก ให้ความขรุขระผิวที่ต่ำที่สุด เป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณเส้นใยลดลง ทำให้อัตราส่วนของพลาสติกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมทริกซ์พลาสติกสามารถยึดติดกับเส้นใยได้มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ช่องว่างภายในขึ้นทสดอบวัสดุผสมลดลงส่งผลให้ความขรุขระผิวลดลง นอกจากนี้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นยังทำให้เส้นใยถูกห่อหุ้มด้วยเนื้อเมทริกซ์พลาสติก จึงส่งผลทำให้วัสดุผสมที่มีปริมาณเส้นใยน้อยมีผิวเรียบกว่าที่มีปริมาณเส้นใยมาก ดังแสดงดังรูปที่ 4 ที่ปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 46 โดยน้ำหนักให้ความขรุขระผิวสูงสุด นอกจากนี้ (จากรูปที่ 3) ยังพบว่าที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก ของเส้นใย กากมะพร้าวมีการยึดติดกันระหว่างเส้นใยกับพลาสติกที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณอื่น ยิ่งไปกว่านั้นขึ้นทสดอบวัสดุผสมที่ผสมกับเส้นใยกากมะพร้าวยังมีค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับขึ้นทสดอบวัสดุผสมที่ผสมกับเส้นใยจากทะลายปาล์มหมัก และเส้นใยชังข้าวโพด ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากตารางที่ 1 ยังแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของเส้นใยนั้นส่งผลต่อความขรุขระผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ผสมจากเส้นใยกากมะพร้าว เส้นใยจากทะลายปาล์มหมัก และเส้นใยชังข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญที่ 5% ($\alpha = 0.05$)



รูปที่ 3 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม่ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยปริมาณร้อยละ 46 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 150X (a) เส้นใยกาบมะพร้าว (b) เส้นใยกาทะลายปาล์มน้ำมัน และ (c) เส้นใยซังข้าวโพด



รูปที่ 4 แผนภูมิแสดงค่าความแข็งแรงอดและค่ามอดุลัสแรงอดของชิ้นทดสอบ (a) ค่าความแข็งแรงอด และ (b) ค่ามอดุลัสแรงอดของชิ้นทดสอบวัสดุผสม



รูปที่ 5 ค่าความขรุขระผิวของชิ้นทดสอบวัสดุผสม

สมบัติทางความร้อนของขึ้นทสดอบวัสดุผสมพลาสติกคอมโพสิตกับเส้นใยเหลือใช้ทางธรรมชาติ

การศึกษาสมบัติทางความร้อนเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของขึ้นทสดอบวัสดุผสมจากเส้นใยธรรมชาติ ทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุผสมไม้พลาสติกต่อค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3 ที่ปริมาณ rPP ที่แตกต่างกัน โดยทำการพิจารณาที่เส้นใยชนิดเดียวกัน พบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของ rPP ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) แต่เมื่อปริมาณของ rPP เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มที่องค์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเมทริกซ์พลาสติกที่เพิ่มส่งผลให้ค่าเอนทาลปีเพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดผลึกเกิดได้กว้างขึ้น จึงทำให้ที่มีปริมาณของ rPP สูงมีค่าความเป็นผลึกที่สูง [20] นอกจากนี้

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากตารางที่ 3 ของขึ้นทสดอบวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างเส้นใยจากมะพร้าว เส้นใยจากทะเลสาบปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพด พบว่า ปริมาณเส้นใยที่ปริมาณต่างๆ ส่งผลต่อค่าความเป็นผลึกอย่างมีนัยสำคัญที่ 5% ($\alpha = 0.05$) นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบ Tukey's multiple comparison test ระหว่างเส้นใยต่างชนิดกัน พบว่าค่า T_m และ T_c ของเส้นใยแต่ละชนิดไม่ต่างกัน แต่องค์ความเป็นผลึกของ rPP ในเส้นใยจากมะพร้าวมีค่ามากกว่าเส้นใยจากทะเลสาบปาล์มและเส้นใยซังข้าวโพดตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยจากมะพร้าวมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าเส้นใยจากทะเลสาบปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพด ตามลำดับ (จากรูปที่ 3) จึงทำให้พลาสติกเมท-ริกซ์มีพื้นที่ในการยึดเกาะเข้ากับเส้นใยจากมะพร้าวได้ดีที่สุด จึงส่งผลให้เส้นใยจากมะพร้าวมีความเป็นผลึกมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น [18]

ตารางที่ 3 ปริมาณร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากเส้นใยธรรมชาติโดยน้ำหนัก [9]

สมบัติ	ชนิดของเส้นใย	ร้อยละปริมาณเส้นใย			P-value
		46	36	26	
อุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	กาบมะพร้าว	159.83 ^{ad}	160.24 ^{bd}	160.34 ^{bd}	0.506
	ทะเลสาบปาล์มน้ำมัน	160.30 ^{ad}	160.60 ^{abd}	160.37 ^{ad}	0.062
	ซังข้าวโพด	159.81 ^{ad}	160.17 ^{bd}	160.35 ^{bd}	0.351 [*]
อุณหภูมิกการตกผลึก ($^{\circ}\text{C}$)	กาบมะพร้าว	117.63 ^{ad}	117.63 ^{ad}	117.47 ^{ad}	0.601
	ทะเลสาบปาล์มน้ำมัน	118.30 ^{ad}	118.3 ^{ad}	117.97 ^{bd}	0.055
	ซังข้าวโพด	115.47 ^{ae}	116.63 ^{be}	117.13 ^{bd}	0.003
เอนทาลปี (J/g)	กาบมะพร้าว	42.31 ^{ad}	48.31 ^{bd}	52.21 ^{cd}	0.001 [*]
	ทะเลสาบปาล์มน้ำมัน	41.34 ^{ad}	44.52 ^{be}	48.47 ^{ce}	0.000 [*]
	ซังข้าวโพด	40.92 ^{ae}	44.13 ^{be}	46.57 ^{cd}	0.000 [*]
ร้อยละความเป็นผลึก	กาบมะพร้าว	25.64 ^{ad}	29.45 ^{bd}	31.64 ^{cd}	0.001 [*]
	ทะเลสาบปาล์มน้ำมัน	24.85 ^{ae}	26.98 ^{be}	29.37 ^{ce}	0.000 [*]
	ซังข้าวโพด	24.80 ^{ae}	26.74 ^{be}	28.22 ^{cf}	0.000 [*]

6. สรุปผลการวิจัย

จากการนำเส้นใยเหลือใช้จากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยกาบมะพร้าว เส้นใยกาบทะลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพด ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีจำนวนมาก นำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติกกรีซไคเคิล โดยการใช้ rPP ผสมเข้ากับเส้นใยธรรมชาติผ่านเข้าเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ พบว่า การเติมเส้นใยจากกาบมะพร้าว เส้นใยกาบทะลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพด ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ดังนี้ สำหรับสมบัติเชิงกล ประกอบด้วย ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดุลัสแรงดึง และค่ามอดุลัสแรงอัด พบว่า ปริมาณเส้นใยธรรมชาติน้อย (ร้อยละ 26) ให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงอัดสูง ในทางตรงกันข้ามที่ปริมาณเส้นใยธรรมชาติมาก (ร้อยละ 46) ให้ค่ามอดุลัสแรงดึงและมอดุลัสแรงอัดสูง โดยผลจากการศึกษาเส้นใยกาบมะพร้าวเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยกาบทะลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพด สำหรับสมบัติทางกายภาพ การทดสอบความขรุขระผิว พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวของวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้น และสำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่า เสถียรภาพทางความร้อน ได้แก่ ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของวัสดุผสมไม้พลาสติกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นส่งผลให้แนวโน้มที่องค์การความเป็นผลึกของวัสดุผสมไม้พลาสติกลดลง

7. เอกสารอ้างอิง

1. Lertwattanaruk, P. and Masuwan, K., 2015, "Investigation of Sound Insulation Properties of Fiber Cement Board Containing Natural Fibers," *KMUTT Research and Development Journal*, 38 (1), pp. 71-86. (In Thai)
2. Geethamma, V.G., Mathew, K.T., Lakshminarayanan, R. and Thomas, S., 1997, "Composite of Short Coir Fiber and Natural Rubber, Effect of Chemical Modification, Loading and Orientation of Fibre," *Polymer*, 1 (39), pp. 1483-1491.
3. Jacob, M., Sabu, T. and Varughese, K.T., 2004, "Mechanical Properties of Sisal/Oil Palm Hybrid Fiber Reinforced Natural Rubber Composites," *Composites Science and Technology*, 64, pp. 955-965.
4. De, D. and Adhikari, B., 2004, "The Effect of Grass Fiber Filler on Curing Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber," *Polymers for Advanced Technologies*, 15, pp. 708-715.
5. Homkiew, C. and Ratanawilai, T., 2014, "Optimal Proportions of Composites from Polypropylene and Rubberwood Flour After Water Immersion Using Experimental Design," *KKU Research Journal*, 19 (6), pp. 780-793. (In Thai)
6. Putra, A., Hee, K., Selamat, M.Z., Jailani, M., Nor, M., Hassan, M.H. and Prasetyo, I., 2018, "Sound Absorption of Extracted Pineapple-Leaf Fibres," *Applied Acoustics*, 136, pp. 9-15.
7. Sajjakulnukit, B., Yingyuad, R., Maneekhao, V., Pongnarintasut, V., Bhattacharya, S.C. and Salam, P.A., 2005, "Assessment of Sustainable Energy Potential of Non-Plantation Biomass Resources in Thailand," *Biomass and Bioenergy*, 29, pp. 214-224.
8. Srisovanna, P., 2004, "Thailand's Biomass Energy," *Proceedings of Electricity Supply Industry in Transition: Issues and Prospect for Asia*, pp. 16-35.
9. Chirathapong, W. and Songthanasak, K., 2011, "A Case Study of Bioplastic Film Production from Cellulose Hemicellulose and Lignin of Plant Wastes," *Proceedings of International Chemical Engineering and Applied Chemistry of Thailand*, 21. (In Thai)
10. Tangmanotienchai, S., Tia, W. and Soponronnari, S., 2014, "Feasibility Study of Using Oil Palm and Coconut Fronds for Electricity Generation," *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (2), pp. 199-213. (In Thai)
11. Suksawat, J., Oonjittichai, W. and Jangchud, I., 2011, "Mechanical and Morphological Studies of Wood Plastic Composites (WPC) Made from Polypropylene (PP) and Waste Oil Palm Fibers: Empty Fruit Bunch Fibers (EFBF) and Frond Fibers (FF)," *Proceedings of*

- the 8th Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, pp. 1578-1585. (In Thai)
12. Sawangpol, K., Tia, W. and Chairasert, P., 2013, "A Feasibility Study of Power Generation Using Biogas from Cellulosic Materials," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (4), pp. 477-492. (In Thai)
 13. Office of Agricultural Economics Ministry of Agriculture and Cooperatives., 2016, "Forecasting the Results of Agricultural Production in 2016," *Forecasting of Agricultural Production Results*, 11. (In Thai)
 14. Law, T.T. and Ishak, Z.A.M., 2010, "Water Absorption and Dimensional Stability of Short Kenaf Fiber-Filled Polypropylene Composites Treated with Maleated Polypropylene," *Journal of Applied Polymer Science*, 1 (120), pp. 563-72.
 15. Yang, H.S., Kim, H.J., Park, H.J., Lee, B.J. and Hwang, T.S., 2006, "Water Absorption Behavior and Mechanical Properties of Lignocellulosic Filler-Polyolefin Bio-composites," *Composite Structures*, 4 (72), pp. 429-437.
 16. Pokawanavit, t. and Lertwattanak, P., 2017, "Properties of Composite Panel Made from Waste Paper and Glass Fiber for Applications in Building," *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (2), pp. 203-216. (In Thai)
 17. Charlet, K., Saulnier, F., Dubois, M. and Beakou, A., 2015, "Improvement of Wood Polymer Composite Mechanical Properties by Direct Fluorination," *Materials and Design*, 74, pp. 61-66.
 18. Friedrich, D. and Luible, A., 2016, "Standard-Compliant Development of a Design Value for Wood-Plastic Composite Cladding: An Application-Oriented Perspective," *Case Studies in Structural Engineering*, 5, pp. 13-16.
 19. Chaisupakitsin, M., Tannil, A., Wongsilarat, A. and Apitchitsakulchai, S., 2007, "Pole of Natural Fibers on Properties of Fiberboard Made from Polystyrene Foam and Fibers," *National Research Council of Thailand*, 41 (2), pp. 43-55. (In Thai)
 20. Hidalgo-Salazar, M.A., Correa-Aguirre, J.P., Montalvo-Navarrete, J.M., Lopez-Rodriguez, D.F. and Rojas-González, A.F., 2018, Recycled Polypropylene-Coffee Husk and Coir Coconut Biocomposites: Mechanical, Thermal and Environmental Studies [Online], Available: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81635> [21 May 2019].
 21. Ratanawilai, T., Nakawiro, K., Deachsrijan, A. and Homkiew, C., 2014, "Influence of Wood Species and Particle Size on Mechanical and Thermal Properties of Wood Polypropylene Composites," *Fibers and Polymers*, 15 (10), pp. 2160-2168.
 22. Ramos, R.R.F., Siqueira, D.D., Wellen, R.M.R. and Leite, I.F., 2019, "Development of Green Composites Based on Polypropylene and Corncob Agricultural Residue," *Journal of Polymers and the Environment* [Online], Available : <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01462-7> [20 May 2019].
 23. Kuo, P.Y., Wang, S.Y., Chen, J.H., Hsueh, H.C. and Tsai, M.J., 2009, "Effects of Material Compositions on The Mechanical Properties of Wood Plastic Composites Manufactured by Injection Molding," *Materials and Design*, 30 (9), pp. 3489-3496.
 24. Nygard, P., Tanem, B.S., Karlsen, T. and Brachet, P., 2008, "Extrusion-Based Wood Fibre-PP Composite: Wood Powder and Pelletized Wood Fibres-A Comparative Study," *Composites Science and Technology*, 68 (15-16), pp. 3418-3424.
 25. Wang, Q., Xiao, S., Shi, S.Q. and Cai, L., 2019, "Mechanical Property Enhancement of Self-Bonded Naturalfiber Material via Controlling Cell Wall Plasticity and Structure," *Materials and Design*, 172, pp. 1-8.
 26. Gil, B.M. et al., 2019, "Introduction of Primary Chemical Bonding in Lignin-Based PP Composites for Mechanical Reinforcement Via Reactive Extrusion," *Composites Part B: Engineering*, 165, pp. 510-515.