วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลกระทบของปริมาณการเติมและขนาดของเถ้าแกลบต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล

Effect of additional contents and particle sizes of rice husk ash on physical and mechanical properties of recycled-polypropylene composites

วรรณนิศา นุชคุ้ม[1] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร[1] รัฐพล สมนา[1] วรพงศ์ พงศ์ภัทรวุฒิ[2] พัชระ กัญจนกาญจน์[3] อนุชิต คงฤทธิ์[4]*

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
[2] คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
[3] คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
[4] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Wannisa Nutkhum[1] Jittiwat Nithikarnjanatharn[1] Rattapon Somna[1] Worapong Phongphattarawut[2] Patchara Kunjanakarn[3] Anuchit Khongrit[4]*

[1] Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000
[2] Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Muang, Khon Kaen 40000
[3] Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Muang, Nonthaburi 11000
[4] Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

*Corresponding author.
E-mail: anuchit.kh@nrru.ac.th; Telephone: 085-8603339

วันที่รับบทความ 10 กรกฎาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 29 ตุลาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 9 มกราคม 2566
วันที่ตอบรับบทความ 18 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของคอมโพสิตจากพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วผสมเถ้าแกลบ โดยพอลิโพรพิลีนในการวิจัยนี้รีไซเคิลจากขวดเครื่องดื่ม ถุงบรรจุอาหารร้อน ถุงน้ำเกลือ และตะกร้าบรรจุของ เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองขนาดคือ 17 และ 29 ไมครอน โดยผสมกับพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิลในอัตราส่วน 1 ถึง 7 ส่วนเทียบน้ำหนัก 100 ส่วน กระบวนการเตรียมคอมพาวน์ดำเนินการด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่และสร้างเป็นคอมโพสิตและชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระบวนการกดอัดร้อน ผลจากการศึกษาพบว่าชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลส่งผลต่อสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญ ขนาดของเถ้าแกลบส่งผลต่อค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก และค่าดัชนีการหลอมไหล ส่วนปริมาณการเติมเถ้าแกลบตั้งแต่ 1 ถึง 7 ส่วนเทียบน้ำหนัก 100 ส่วน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าดัชนีการหลอมไหล โดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จากปริมาณการเติมเถ้าแกลบที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง ค่ามอดุลัสของยังก์สูงขึ้น แต่ทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าเปอร์เซ็นการยืดตัว และค่าดัชนีการหลอมไหลลดลง ส่วนขนาดของเถ้าแกลบที่ต่างกันพบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตที่เติมเถ้าแกลบขนาด 29 ไมครอน สูงกว่าสูตรที่เติมเถ้าแกลบขนาด 17 ไมครอน ส่วนค่าดัชนีการหลอมไหลของคอมโพสิตเติมเถ้าแกลบขนาด 17 ไมครอน มีค่าสูงกว่าสูตรที่เติมเถ้าแกลบขนาด 29 ไมครอน ทั้งนี้คอมโพสิตที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่างได้

คำสำคัญ

พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เถ้าแกลบ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล คอมโพสิต วัสดุผสม

Abstract

This research is a primary study of polypropylene composites mixed with rice husk ash. Polypropylene in this study was recycled from drinking water bottles, hot food packaging bags, bags of saline solution, and storage baskets. Two sizes of rich husk ash were used in this study, 17 and 29 μm, mixed with recycled polypropylene at 1:7 PHR proportion. The compound preparation process was made possible a with Twin Screw Extruder and the composite and sample works were created by a hot-pressing process. Results of this study indicated that the types of recycled-polypropylene affected the mechanical and physical properties significantly. The size of rice husk ash affected the hardness value, impact resistance value, and melting index. Increasing the proportion of rice husk ash from 1 to 7 PHR significantly affected the tensile strength, hardness value, impact resistance value, and melting index. The possible trend of this study revealed that a higher proportion of rice husk ash addition resulted in higher hardness and Young' s modulus values. However, it reduced the impact resistance, the stretch percentage, and melting index values. In terms of the different sizes of rice husk ash addition, it was found that the impact resistance value of composites, which had rice husk ash of 29 μm addition was higher than rich husk ash of 17 μm. In terms of the melting index, the value of composites which had rice husk ash of 17 μm addition was higher than composites which had rice husk ash of 29 μm addition. Consequently, the composite from this study could be used to form sample products.

Keywords

recycled polypropylene, rice husk ash, physical properties, mechanical properties, composite.

1. บทนำ

กลไกการขับเคลื่อนนวัตกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีหัวใจสำคัญคือการพัฒนาการวิจัย และใช้เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสอดคล้องกับหลักของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่จุดประสงค์เพื่อคืนสภาพหรือให้ชีวิตใหม่แก่วัสดุต่าง ๆ ในวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์แทนการทิ้งเป็นขยะเมื่อสิ้นสุดการบริโภค โดยจะนำวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหล่านั้นกลับมาสร้างคุณค่าใหม่มุ่งเน้นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสร้างความสมดุลในการดึงทรัพยากรธรรมชาติมาใช้งานใหม่ [1] สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของอนุชิต คงฤทธิ์ และคณะ [2] ที่ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในสัดส่วนต่าง ๆ และใช้สารควบคู่ชนิดไซเลนเป็นสารเติมแต่ง พบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ทำให้ความทนต่อแรงกระแทกลดลง ซึ่งสมบัติที่ได้นั้นสูงกว่าเดิมเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสอง สำหรับงานวิจัยที่นำกากกาแฟ [3] ซึ่งเป็นสิ่งที่มีมากตามร้านกาแฟมาผสมกับพอลิโพรพิลีนโดยสร้างเป็นวัสดุคอมโพสิตโดยศึกษาอิทธิพลของสารช่วยผสาน ซึ่งผลจากการศึกษานี้พบว่าการใช้สารช่วยผสานสามารถเพิ่มสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต และสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่สามารถใช้งานได้จริง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิล ซึ่งเป็นเศษวัสดุในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมาวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลโดยการใช้เทคนิคการเชื่อมโยงสายโซ่ พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทางแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และความต้านทานแรงกระแทกของพอลิออกซีเมทิลีนรีไซเคิลให้สูงขึ้น และสามารถสร้างเป็นชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีด [4]

ทั้งนี้คณะผู้วิจัยยังคงมีความสนใจพัฒนาการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักของเศรษฐกิจหมุนเวียนทั้งในส่วนของพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วและชีวมวลจากการเกษตร โดยมีความสนใจศึกษาพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิลซึ่งจัดเป็นวัสดุที่มีการใช้งานในลักษณะบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Single-use plastic) ซึ่งการใช้งานในลักษณะนี้มีอายุการใช้งานสั้น แต่ระยะเวลาในการย่อยสลายนาน บางส่วนถูกกำจัดโดยการเผาฝังกลบ บางส่วนถูกทิ้งลงทะเลและมหาสมุทร ส่งผลต่อระบบนิเวศทางทะเล [5] และเถ้าแกลบ (Rice husk ash) คือผลผลิตพลอยได้จากการเผาแกลบที่เหลือจากกระบวนการสีข้าวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลักของประเทศไทย ซึ่งสามารถสร้างเป็นพลังงานสำหรับนำไปใช้ในการผลิตเป็นไฟฟ้า โดยเถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งมี

มากกว่าร้อยละ 90 มีลักษณะเป็นรูพรุน เถ้าแกลบยังถูกนำมาใช้ในงานวิจัยวัสดุก่อสร้าง เช่น การนำเถ้าแกลบมาสกัดเอาซิลิกาเพื่อใช้เป็นในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ [6]

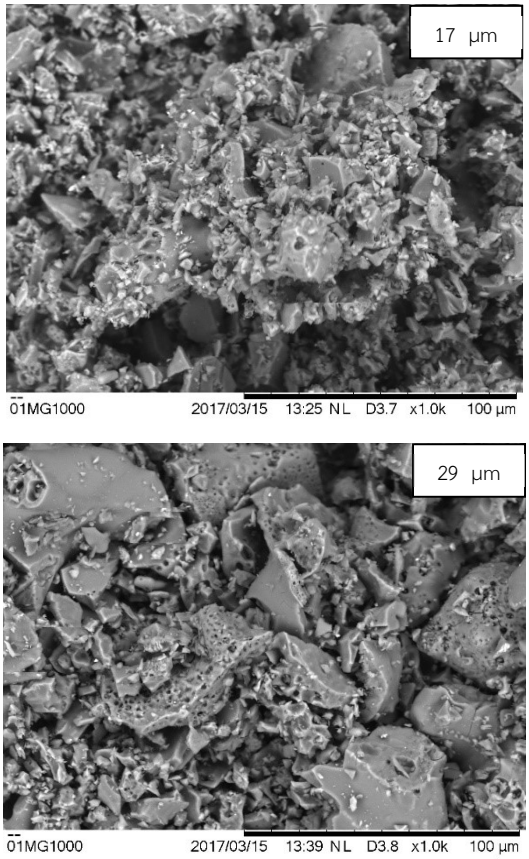
สำหรับการวิจัยในส่วนของการใช้พอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้นในวัสดุคอมโพสิต (Polymer based composite) มีการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลครอไรด์ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [7-10] ที่เป็นพลาสติกเม็ดใหม่และใช้เถ้าแกลบเป็นสารเสริมแรง ผลการศึกษาพบว่าขนาดและปริมาณของเถ้าแกลบที่เติมเข้าไป มีผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิต และสามารถเพิ่มพูนสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีสนใจศึกษาการนำเถ้าแกลบที่มีขนาดแตกต่างกันมาผสมกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเกรดต่าง ๆ ที่มีในท้องถิ่นเพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิต โดยศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณการเติมและขนาดของเถ้าแกลบต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ยังพิจารณาว่าวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการวิจัยนี้มีสมบัติทางกลใดที่โดดเด่น และสามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงานจริงได้

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในงานวิจัยนี้ได้จากกระบวนการนำขยะพลาสติกมาหลอมขึ้นรูปใหม่ ได้แก่ เกล็ดพลาสติก (จากการรีไซเคิลขวดเครื่องดื่ม) ถุงร้อน ถุงน้ำเกลือ และตะกร้า จากบริษัท โคราชทีอาร์ซีพลาสติก จำกัด ส่วนเถ้าแกลบได้จากบริษัท เจียเม้ง จำกัด จังหวัดนครราชสีมา โดยนำมาบดเป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที [11-13] ซึ่งได้ขนาดกลางของอนุภาคเท่ากับ 29 และ 17 ไมโครเมตร ตามลำดับ ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคเถ้าแกลบทั้ง 2 ขนาด และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 และในรูปที่ 1 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาคเถ้าแกลบขนาด 17 μm และ 29 μm ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่รอบอนุภาคขนาดใหญ่ และพบรูพรุนในอนุภาคเถ้าแกลบที่มาขนาดเฉลี่ย 29 μm



รูปที่ 1 สัณฐานวิทยาของอนุภาคเถ้าแกลบขนาด 17 μm และ 29 μm ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

2.2 การออกแบบการทดลอง และการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติ

ตัวแปรที่ศึกษาในการวิจัยนี้มี 3 ตัวแปร ได้แก่ ชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (เกล็ด ถุงร้อน ถุงบรรจุน้ำเกลือ และตะกร้า) ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ (0, 1, 3, 5 และ 7 Phr) (Phr ย่อมาจาก part per hundred parts of resin ซึ่งคือการผสมสารตัวเติมโดยคิดสัดส่วนปริมาณเทียบกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล 100 ส่วนโดยน้ำหนัก) การตั้งชื่อตัวแบบทดลองจะลำดับชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและต่อด้วยขนาดของอนุภาคเถ้าแกลบ เช่น rPP-ถุงน้ำเกลือ+RHA 17 μm หมายถึงคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากถุงน้ำเกลือที่ผสมเถ้าแกลบอนุภาค 17 ไมโครเมตร เป็นต้น และตัวแบบทดลองอื่น ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

Chemical Compositions	%
SiO_2	93.67
Al_2O_3	0.58
Fe_2O_3	0.86
CaO	0.88
TiO_2	<0.01
MgO	0.39
Na_2O	<0.01
K_2O	1.32
P_2O_5	0.26
SO_3	<0.01
LOI	1.99

*Quartz = 3.8%, Cristobalite = 62.3%, Amorphous = 33.9%

ตารางที่ 2 ตัวแบบทดลองในการวิจัยนี้

ชื่อตัวแบบทดลอง	ชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล	ขนาดอนุภาคเถ้าแกลบ (µm)
rPP-เกล็ด+RHA 17 µm	เกล็ด	17
rPP-เกล็ด+RHA 29 µm	เกล็ด	29
rPP-ถุงร้อน+RHA 17 µm	ถุงร้อน	17
rPP-ถุงร้อน+RHA 29 µm	ถุงร้อน	29
rPP-ถุงน้ำเกลือ+RHA 17 µm	ถุงน้ำเกลือ	17
rPP-ถุงน้ำเกลือ+RHA 29 µm	ถุงน้ำเกลือ	29
rPP-ตะกร้า+RHA 17 µm	ตะกร้า	17
rPP-ตะกร้า+RHA 29 µm	ตะกร้า	29

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเริ่มต้นจากการเตรียมการผสมแบบแห้ง (Dry blend) โดยชั่งน้ำหนักของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและอนุภาคเถ้าแกลบตามตัวแบบทดลอง จากนั้นนำไปผสมแห้งในถังหมุนที่ทำให้เกิดการผสมทางกลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เถ้าแกลบกระจายตัว แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นก่อนนำไปผสมในเครื่องอัดรีดกรูคู่ (Twin screw extruder) ที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 12 โดยใช้อุณหภูมิการผสม 180 °C หลังจากนั้นนำพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมเถ้าแกลบไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลด้วยกระบวนการกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C

2.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การวัดค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index หรือ MFI) มาตรฐาน ASTM D1238-13 [14] ที่อุณหภูมิ 230°C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม

สมบัติทางกลที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหาความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัสของยังก์ (Young's modulus) และค่าการยืดตัว (Elongation) ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 [15] โดยใช้อัตราการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้น้ำหนักภาระงาน 10 กิโลนิวตัน การทดสอบความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-15e1 [16] แบบชอร์ ดี (Shore D) น้ำหนักกด 10 แรงปอนด์ (Lbf) การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 [17] ด้วยพลังงานกระแทก 2.7 จูล (Jule)

สำหรับการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจะใช้ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อใช้อธิบายผลที่เกิดขึ้นจากการทดสอบสมบัติทางกล

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

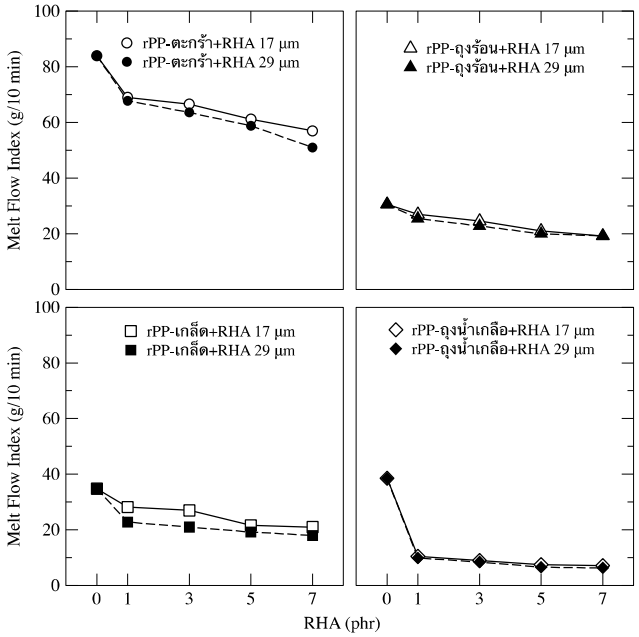
หลังจากทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพแล้วจะนำข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้มาประมวลผลทางสถิติ เริ่มจากการหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำไปรายงานผลในรูปแบบของกราฟ เพื่อดูผลของสมบัติทางกลของคอมโพสิตสูตรต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากปริมาณการเติมเถ้าแกลบ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) เพื่อศึกษาว่าชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ขนาดของอนุภาคเถ้าแกลบ และปริมาณการเติมเถ้าแกลบ ส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

3. ผลการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

3.1 ผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล

จากผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิด

ถุงร้อนและชนิดเกล็ด มีการลดลงของดัชนีการหลอมไหลเป็นลักษณะเส้นตรงทีละน้อย โดยที่ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr พบว่าค่าดัชนีการหลอมไหลของคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงร้อนมีค่าเท่ากับ 34.8, 22.8, 21.0, 19.2 และ 18.0 กรัม/10 นาที ตามลำดับ ส่วนคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ดมีค่าเท่ากับ 30.6, 25.5, 22.8, 20.0 และ 19.2 กรัม/10 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 2 ผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล

สำหรับคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดตะกร้า และชนิดถุงน้ำเกลือ พบว่ามีค่าดัชนีการหลอมไหลลดลงค่อนข้างมากเมื่อเติมเถ้าแกลบในส่วนผสม แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงเป็นแบบเส้นตรงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมเถ้าแกลบ ทั้งนี้การลดลงของค่าดัชนีการหลอมไหลเป็นผลมาจากอนุภาคเถ้าแกลบเข้าไปขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมส่งผลให้เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้นส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้นตามไปด้วย [18] โดยคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดตะกร้ามีค่าดัชนีการหลอมไหลสูงที่สุด ในขณะที่คอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงน้ำเกลือมีค่าดัชนีการหลอมไหลต่ำที่สุด โดยค่าดัชนีการหลอมไหลที่ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr ของคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดตะกร้ามีค่าเท่ากับ 84.0, 69.0, 66.6, 61.2 และ 57.0 กรัม/10 นาที ตามลำดับ ส่วนคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงน้ำเกลือมีค่าเท่ากับ 38.5, 10.5, 9.0, 7.5 และ 7.2 กรัม/10 นาที ที่ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr ตามลำดับ นอกจากการเติมเถ้าแกลบที่ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลลดลงแล้ว ยังพบว่าการเติมเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่กว่า (29 µm) ส่งผลให้ค่าค่าดัชนีการหลอมไหลมีค่าต่ำกว่าการเติมเถ้าแกลบขนาดเล็กกว่า (17 µm) ที่ปริมาณเดียวกันในคอมโพสิต

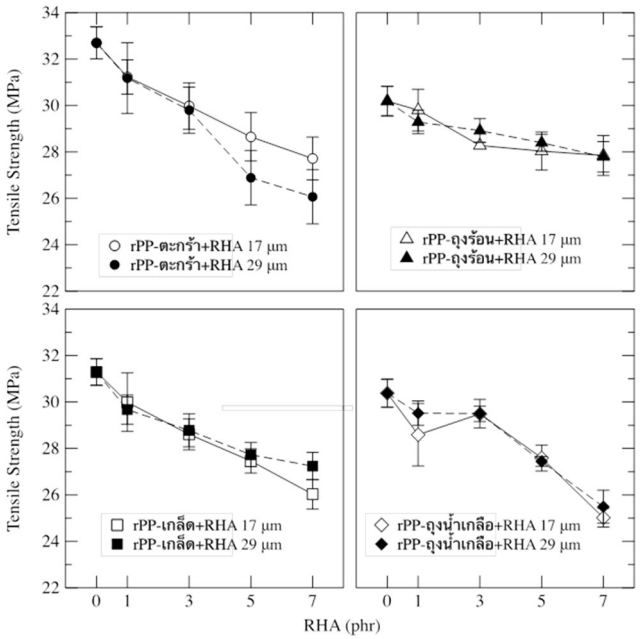
3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) แสดงได้ดังรูปที่ 3 พบว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ด ถุงร้อน ถุงน้ำเกลือ และตะกร้า มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 31.3, 30.2, 30.4 และ 32.7 MPa ตามลำดับ สำหรับคอมโพสิตมีแนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดลงไปตามปริมาณของเถ้าแกลบที่ผสมเข้ากับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลทุกเกรด การใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่างกันเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sevdalina et.al [19] ที่พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนเถ้าแกลบในคอมโพสิตส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงเนื่องด้วยการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้นทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคจนเกิดเป็นเนื้อวัสดุที่ไม่แข็งแรง (weak zone) ระหว่างวัสดุเนื้อพื้นและอนุภาคเถ้าแกลบจึงทำให้ความแข็งแรงของคอมโพสิตลดลง

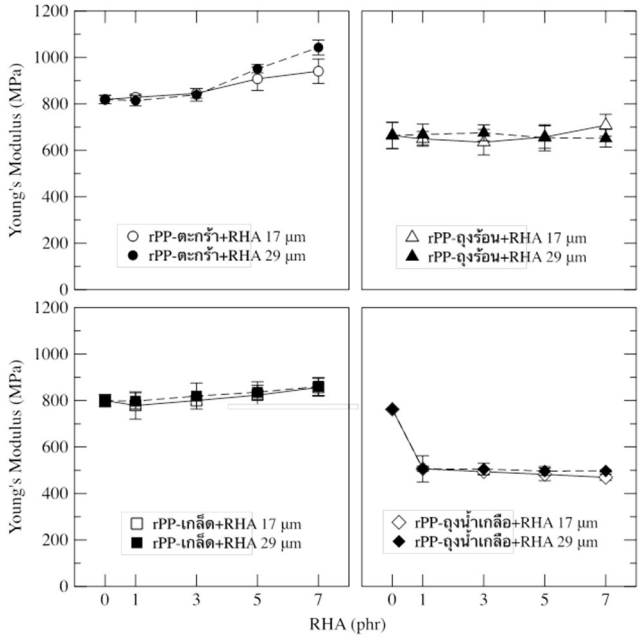
จากรูปที่ 4 ซึ่งแสดงค่ามอดุลัสของยังก์ พบว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ด ถุงร้อน ถุงน้ำเกลือ และตะกร้า มีค่ามอดุลัสของยังก์ (Young's modulus) เฉลี่ยเท่ากับ 800, 664, 763 และ 819 MPa ตามลำดับ ส่วนค่ามอดุลัสของยังก์ของคอมโพสิตที่เติมเถ้าแกลบในปริมาณและขนาดที่ต่างกัน พบว่าคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากตะกร้า และคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามปริมาณการเติมเถ้าแกลบทั้งสองขนาด เช่น rPP-เกล็ด+RHA 29 µm ที่เติมเถ้าแกลบ 1 phr มีค่ามอดุลัสของยังก์เป็น 798 MPa มีค่าเพิ่มเป็น 861 MPa เมื่อเติมเถ้าแกลบ 7 Phr เป็นต้น สำหรับคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากถุงร้อน และถุงน้ำเกลือไม่เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่ามอดุลัส

ของยังก์ที่ชัดเจน ค่อนข้างจะมีค่าคงที่ เช่น rPP-ถุงน้ำเกลือ+RHA 29 µm ที่เติมเถ้าแกลบ 1 และ 3 Phr มีค่าเป็น 506 และ 505 MPa ตามลำดับ เป็นต้น

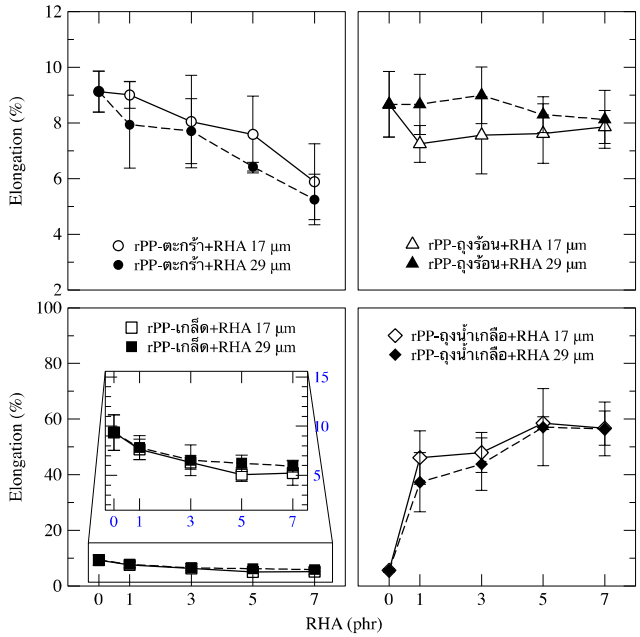
ค่าเปอร์เซ็นการยืด (Elongation) ที่ดังรูปที่ 5 พบว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ด ถุงร้อน ถุงน้ำเกลือ และตะกร้ามีค่าเปอร์เซ็นการยืดตัวเป็นร้อยละ 9.4, 8.7, 5.6 และ 9.1 ตามลำดับ ปริมาณการเติมเถ้าแกลบส่งผลให้คอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากถุงน้ำเกลือมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงขึ้นอย่างมาก และสูงขึ้นตามปริมาณการเติมเถ้าแกลบที่สูงขึ้นด้วย เช่น rPP-ถุงน้ำเกลือ+RHA 17 µm ที่ไม่เติมเถ้าแกลบปอร์เซ็นต์การยืดตัว 5.6 % เมื่อเติมเถ้าแกลบ 1 และ 5 Phr มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเมเป็น 46.2 % และ 58.6 % ตามลำดับ เป็นต้น สำหรับคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดตะกร้า และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ด มีแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ โดยเฉพาะคอมโพสิต rPP-ตะกร้า+RHA 17 µm และ rPP-ตะกร้า+RHA 29 µm มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ rPP-เกล็ด+RHA 17 µm สำหรับคอมโพสิต rPP-ถุงร้อน+RHA 17 µm และ rPP-ถุงร้อน+RHA 29 µm ที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงร้อนไม่สามารถบอกแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นการยืดตัวที่เป็นผลจากการเติมเถ้าแกลบได้ชัดเจน



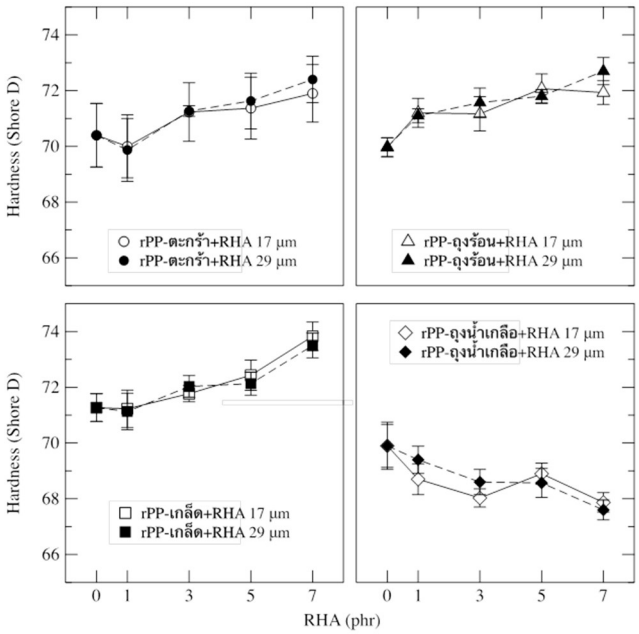
รูปที่ 3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง



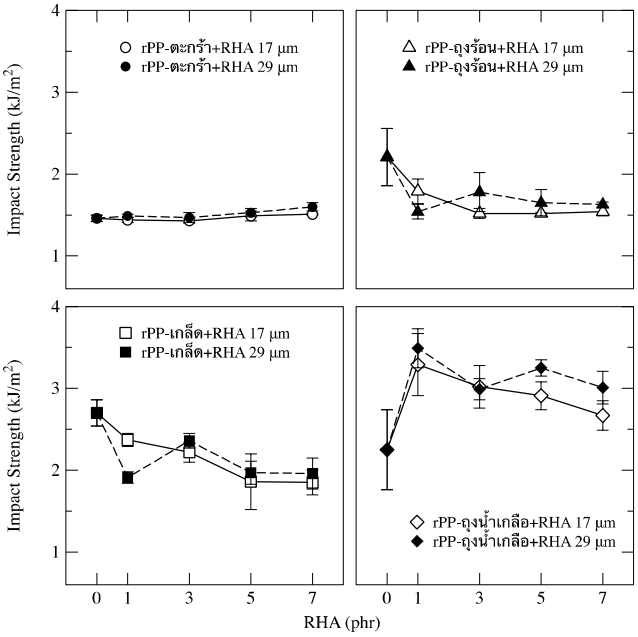
รูปที่ 4 ค่ามอดุลัสของยังก์



รูปที่ 5 ผลการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว



รูปที่ 6 ผลการทดสอบค่าความแข็ง



รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก

ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness) แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสม ยกเว้นส่วนผสมที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงน้ำเกลือเป็นเมทริกซ์ที่ค่าความแข็งนั้นลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสม การใช้ขนาดของเถ้าแกลบที่แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็ง ยกตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ดมีค่าความแข็งเฉลี่ย 71.27 shore D เมื่อเติมเถ้าแกลบขนาด 17 µm ปริมาณ 1, 3, 5 และ 7 phr ส่งผลให้มีค่าความแข็งเฉลี่ย 71.2, 71.8, 72.4 และ 73.8 shore D ตามลำดับ โดยคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดตะกร้าและพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงร้อนมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

สำหรับค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากค่ามากที่สุดไปน้อยที่สุด คือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ดที่มีค่าเฉลี่ย 2.7 kJ/m² รองลงมา คือพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงน้ำเกลือ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงร้อน และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดตะกร้า ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 2.3, 2.2 และ 1.5 kJ/m² ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงร้อน และชนิดเกล็ดมีแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบทั้งสองขนาด

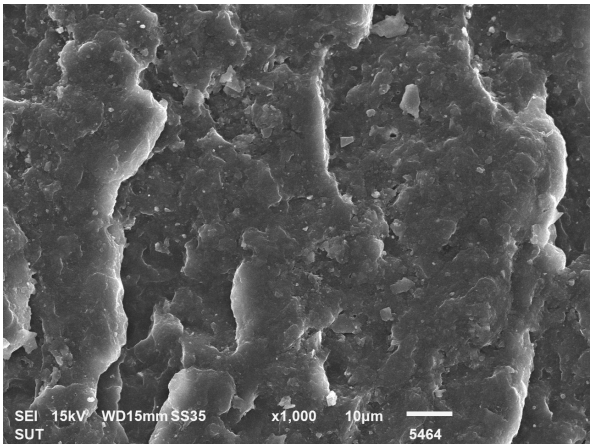
ในขณะที่คอมโพสิต rPP-ตะกร้า+RHA 29 µm และ rPP-ตะกร้า+RHA 17 µm มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ ส่วนการเพิ่มเถ้าแกลบในพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงน้ำเกลือ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น แต่จะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าแกลบที่เติมเข้าไปในปริมาณเพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถช่วยให้ความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตสูงกว่าการใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า แม้ภาพรวมนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ลดลง

3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

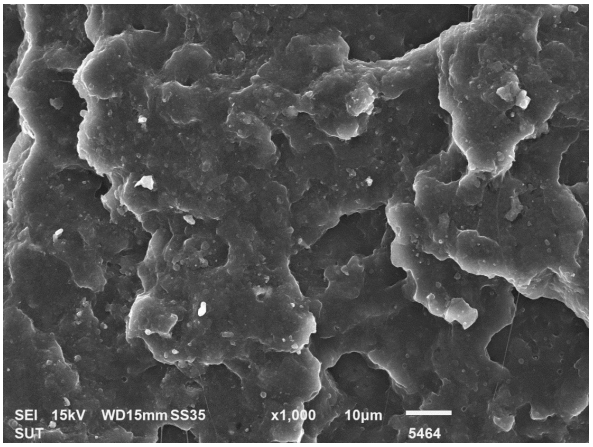
รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงภาพสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต rPP-ตะกร้า+RHA 29 µm และคอมโพสิต rPP-ถุงน้ำเกลือ+RHA 17 µm ที่เติมเถ้าแกลบ 1 Phr ตามลำดับ โดยมีค่าความต้านทานแรงกระแทกเป็น 1.4 และ 3.3 kJ/m² ตามลำดับ ซึ่งเป็นสูตรที่มีค่าการรับแรงกระแทกสูงที่สุด และต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้ เมื่อดูที่ผิวเฟสหรือเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนทั้งสองชนิดพบว่ามีลักษณะที่คล้ายกัน มีสัณฐานวิทยาที่สามารถพบได้จากการศึกษาพอลิโพรพิลีน คือเป็นลักษณะเป็นเฟสที่มีความต่อเนื่องสลับกับรอยฉีกขาดที่เห็นชัดแต่ยังคงความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในภาพของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากตะกร้าพบรูพรุนอยู่เล็กน้อย และลักษณะของเฟสที่มีความ

ราบเรียบมากกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากถุงน้ำเกลือที่มีรอยแตกหักในลักษณะที่เห็นรอยของเนื้อวัสดุที่แตกหักออกไปและที่ยังเกาะกันอยู่ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุเหนียวที่สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่า แต่เนื่องด้วยอนุภาคเถ้าแกลบที่มีขนาดเล็กและการเติมในปริมาณน้อยจึงไม่สามารถแยกได้ชัดจนว่าบริเวณใดคืออนุภาคเถ้าแกลบหรือสารมลทินที่ปะปนอยู่

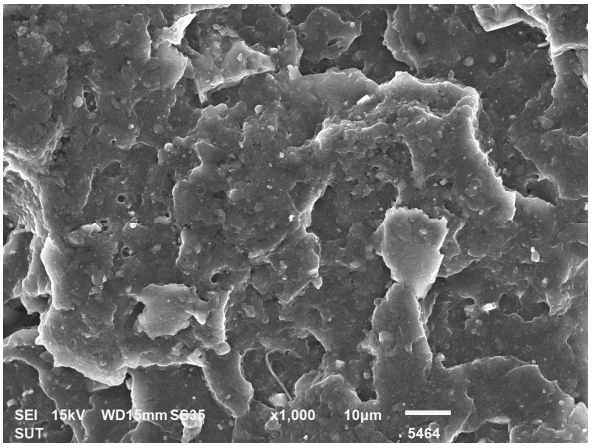
รูปที่ 10 คือคอมโพสิตสูตร rPP-ถุงร้อน+RHA 17 μm ที่เติมเถ้าแกลบ 7 phr (ค่าความต้านทานแรงกระแทก 1.54 kJ/m²) เมื่อดูที่ผิวรอยแตกหักพบช่องว่าง หรือรูพรุนจำนวนมากซึ่งมากกว่าทั้งสองสูตรที่กล่าวไปข้างต้นอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุลดลงไปพร้อมกับค่าการดูซับแรงกระแทกที่ต่ำลงไปด้วย ส่วนรูปที่ 11 คือคอมโพสิตสูตร rPP-เกล็ด+RHA 29 μm ที่เติมเถ้าแกลบ 7 phr ซึ่ง ค่าความต้านทานแรงกระแทก 1.96 kJ/m²) พบพื้นผิวรอยแตกหักที่มีความขรุขระมากที่สุดสอดคล้องกับลักษณะของวัสดุที่มีความสามารถในการดูซับแรงกระแทกได้ดี แต่พบการปะปนของอนุภาคที่เป็นสารมลทินอยู่มากและชัดเจน เป็นเหตุทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง



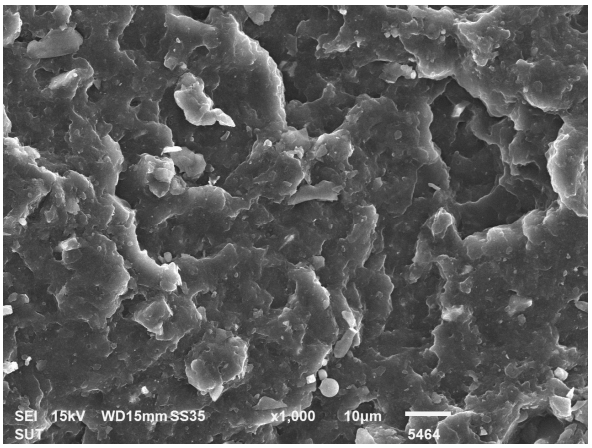
รูปที่ 8 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต rPP-ตะกร้า+RHA 17 μm ที่เติมเถ้าแกลบ 1 phr



รูปที่ 9 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต rPP-ถุงน้ำเกลือ+RHA 29 μm ที่เติมเถ้าแกลบ 1 phr



รูปที่ 10 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต rPP-ถุงร้อน+RHA 17 μm ที่เติมเถ้าแกลบ 7 phr



รูปที่ 11 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต rPP-เกล็ด+RHA 29 μm ที่เติมเถ้าแกลบ 7 phr

3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการทดสอบสมบัติทางกลและการทดสอบสมบัติทางกายภาพที่ได้ข้อมูลเชิงตัวเลขออกมาแล้วนั้น ขั้นตอนต่อมาคือการวิเคราะห์ทางสถติเพื่อศึกษาว่าปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (A) ขนาดอนุภาคเถ้าแกลบ (B) และ ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ (C) ส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยการวิเคราะห์จะใช้ค่าความเชื่อมั่น 95% (α=0.05) ซึ่งตารางที่ 4 ถึงตารางที่ 6 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยเดี่ยว

Properties	A	B	C
Tensile Strength (MPa)	0.001	0.340	0.000
Modulus of Elasticity (MPa)	0.000	0.269	0.542
Elongation (%)	0.000	0.911	0.291
Hardness (Shore D)	0.000	0.041	0.000
Impact strength (kJ/m²)	0.000	0.003	0.000
Melt flow index (g/10min)	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปฏิสัมพันธ์แบบสองทาง

Properties	A*B	A*C	B*C
Tensile Strength (MPa)	0.182	0.000	0.000
Modulus of Elasticity (MPa)	0.339	0.607	0.430
Elongation (%)	0.951	0.005	0.723
Hardness (Shore D)	0.187	0.000	0.836
Impact strength (kJ/m²)	0.009	0.000	0.000
Melt flow index (g/10min)	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปฏิสัมพันธ์แบบสามทาง

Properties	A*B*C
Tensile Strength (MPa)	0.666
Modulus of Elasticity (MPa)	0.510
Elongation (%)	0.860
Hardness (Shore D)	0.183
Impact strength (kJ/m²)	0.001
Melt flow index (g/10min)	0.000

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเดี่ยวพบว่าชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (A) ส่งผลต่อสมบัติทุกค่าอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยปริมาณการเติมเถ้าแกลบส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงกระแทกและค่าดัชนีการหลอมไหลเนื่องจากมีค่า P-value น้อยว่า 0.05 ต่อสำหรับปัจจัยขนาดของเถ้าแกลบมีเพียงค่าดัชนีการหลอมไหลเท่านั้นที่มีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 เมื่อดูที่ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปฏิสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way interactions) และ ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปฏิสัมพันธ์แบบสามทาง (3-Way interactions) พบว่าทุกปัจจัยส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลและค่าความต้านทานแรงกระแทกในอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (A) กับปริมาณการเติมอนุภาคเถ้าแกลบ (C) ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ค่าร้อยละการยืดตัว และค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ และมีเพียงค่าความต้านทานแรงดึงที่เป็นผลจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยขนาดอนุภาคเถ้าแกลบ (B) กับปริมาณการเติมเถ้าแกลบ (C) เนื่องด้วยผลการวิเคราะห์มีค่า P-value น้อยว่า 0.05

5. การอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าทั้งสามปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่

ชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ขนาดอนุภาคเถ้าแกลบ และปริมาณการเติมเถ้าแกลบนั้นส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของคอมโพสิต โดยปริมาณการเติมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นส่งผลต่อแนวโน้มสมบัติความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทกที่ลดลง ส่วนค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ยกเว้นสูตรที่ใช้พอลิโพนพิลีนรีไซเคิลจากถุงน้ำเกลือที่ความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลง สำหรับปัจจัยขนาดของอนุภาคเถ้าแกลบที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อสมบัติการรับแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลต่อค่าความแข็ง และสมบัติความต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญ โดยในภาพรวมอนุภาคเถ้าแกลบขนาด 29 μm ส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งและความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าสูตรที่เติมเถ้าแกลบขนาด 17 μm สำหรับการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลพบว่าคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากถุงน้ำเกลือมีค่าดัชนีการหลอมไหลอยู่ในช่วง 6.30 ถึง 10.50 g/10 min มีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) และกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational molding process) สำหรับคอมโพสิตรสูตรอื่น ๆ มีค่าดัชนีการหลอมไหลสูงจึงเหมาะสมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) [20] ชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ต่างกันมีค่าสมบัติทางกลที่ต่างกัน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักพบว่าเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลแต่ละชนิดมีความต่างกัน จุดบกพร่องที่พบได้แก่ รูพรุนตลอดจนสารมลทิน อีกทั้งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเติมสารช่วยผสานทำให้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของคอมโพสิตด้อยลงไป เนื่องความเป็นขั้ว (hydrophilic) ของเถ้าแกลบ และความไม่เป็นขั้ว (hydrophobic) ของพอลิเมอร์ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุทั้งสองนั้นไม่ดีเพียงพอในการส่งผ่านความเค้นเมื่อรับรับแรงกระทำในการทดสอบสมบัติทางกล [21]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าแกลบเพื่อการเสริมแรงในพอลิเมอร์พบการเปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างพอลิเมอร์ที่ทำการศึกษาและพอลิเมอร์ที่มีการเติมเถ้าแกลบซึ่งผลที่เกิดขึ้นคือเมื่อเติมเถ้าแกลบทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นการยืดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่มีค่ามอดุลัสของยังก์ และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น [7-10] ซึ่งสิ่งที่แตกต่างระหว่างการวิจัยนี้กับการงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือ ชนิดของพอลิเมอร์ ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ และการใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกัน ในการวิจัยนี้เติมเถ้าแกลบในปริมาณที่น้อยกว่า (1-7 phr หรือคิดเป็นร้อยละ 1.1-7.5 โดยประมาณ) ซึ่งต่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ใช้ปริมาณการเติมเถ้าแกลบสูงกว่ามาก (ร้อยละ 10-60) จึงทำให้เห็นแนวโน้มหรืออิทธิพลของปริมาณเถ้าแกลบเด่นชัดกว่า ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติชี้ให้เห็นว่าระดับของปัจจัยของเถ้าแกลบทั้งขนาดและปริมาณการเติมที่ทำการศึกษานี้ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติการรับแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นได้ว่าเนื่องจากเถ้าแกลบที่ทำการศึกษานี้มีการกระจายของขนาดที่กว้าง (ค่าเบนเบนมาตรฐานสูง) สอดคล้องกับภาพสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบที่ทำการศึกษานี้พบว่าลักษณะของเถ้าแกลบนั้นมีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่และมีอนุภาคขนาดเล็กปะปนอยู่มาก อีกทั้งมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ (Irregular shape) มีความเป็นรูพรุน และมีสารเจือปน ซึ่งสารเจือปนนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสารเสริมแรงจากการใช้เถ้าแกลบอันเนื่องจากความสามารถในการรวมตัวให้เป็นระเบียบ (Filler packing) ลดลง [22] จึงส่งผลให้ปัจจัยด้านขนาดที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของสมบัติทางกลโดยเฉพาะสมบัติแรงดึงได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกที่เป็นแรงกระทำแบบไดนามิกส์เห็นผลต่างที่ชัดเจนกว่าทั้งภาพสัณฐานวิทยาและผลการทดสอบชี้ให้เห็นถึงสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน คอมโพสิตที่เติมอนุภาคขนาดใหญ่มีโอกาสในการรวมตัวกันน้อยและช่วยลดการเกิดจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ในทางกลับกันอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกในเนื้อเมทริกซ์ได้ดีแต่มีโอกาสเกิดการรวมตัวกันสูงกว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมฟิลเลอร์ซึ่งในกรณีนี้เป็นฟิลเลอร์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตรจะเกิดการเกาะกลุ่มกันและเป็นจุดที่เกิดรอยแตกร้าวจากนั้นจะเกิดการขยายตัวของรอยแตกอย่างรวดเร็วจนคอมโพสิตเกิดการแตกหัก [10, 22] แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นไม่ได้นำสารช่วยผสานมาศึกษาร่วมด้วยดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

6. สรุปผลการวิจัย

จากจุดประสงค์ของการวิจัยนี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติและการวิเคราะห์ทางสถิติทำให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ทำการศึกษาดังนี้ ชนิดของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลส่งผลต่อสมบัติทางกล และค่าดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญ ขนาดของเถ้าแกลบที่ใช้งานวิจัยนี้ 2 ขนาดส่งผลต่อค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก และค่าดัชนีการหลอมไหล ส่วนปริมาณการเติมเถ้าแกลบตั้งแต่ 1 ถึง 7 Phr ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าดัชนีการหลอมไหล โดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จากปริมาณการเติมเถ้าแกลบที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง ค่ามอดุลัสของยังก์สูงขึ้น แต่ทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าเปอร์เซ็นการยืดตัว ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าดัชนีการหลอมไหลลดลง ส่วนขนาดของเถ้าแกลบที่ต่างกันพบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตที่เติมเถ้าแกลบขนาด 29 µm สูงกว่าสูตรที่เติมเถ้าแกลบขนาด 17 µm ส่วนค่าดัชนีการหลอมไหลของคอมโพสิตเติมเถ้าแกลบขนาด 17 µm สูงกว่าสูตรที่เติมเถ้าแกลบขนาด 29 µm

2) สามารถสร้างคอมโพสิตจากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมเถ้าแกลบที่สามารถใช้กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมได้ สำหรับการนำไปใช้สามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มตามความต้องการในด้านสมบัติทางกลคือ กลุ่มที่ 1 เป็นสูตรที่มีค่าความแกร่งและมีความแข็งสูงคือสูตรที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดเกล็ดและรีไซเคิลจากตะกร้าที่เติมเถ้าแกลบ 7 Phr กลุ่มที่ 2 เป็นสูตรที่รับแรงดึงได้ดี ยืดหยุ่นตัว และมีความเหนียวแน่น คือสูตรสูตรที่ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลชนิดถุงน้ำเกลือที่เติมเถ้าแกลบ 1 Phr ทั้งขนาด 17 และ 29 µm ซึ่งในเบื้องต้นได้ทำการเลือกสูตร rPP-ตะกร้า+RHA 29 µm ที่เติมเถ้าแกลบ 7 Phr มาทดลองขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดร้อนขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 14 ซึ่งได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ คงตัวดี ขึ้นรูปได้ง่าย มีสีดำเข้มและมีความเงา

รูปที่ 12 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดร้อน (rPP-ตะกร้า+RHA 29 µm ที่เติมเถ้าแกลบ 7 phr)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ และสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณสมาชิกในหน่วยวิจัยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์และอบชุบความร้อน ที่ร่วมแรงร่วมใจและได้ช่วยเหลือเกื้อกูลกันในการทำงานหลายอย่างจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร. เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy). เข้าถึงได้จาก: https://library2.parliament.go.th/ ebook/content-issue/2562/hi2562-010.pdf [เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2564]

[2] อนุชิต คงฤทธิ์, กนกวรรณ แช่มพุดซา, รัชนก แป้นโพธิ์กลาง, พงษ์ศักดิ์ รุนกระโทก, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. อิทธิพลของสารคู่ควบต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2559; 11(2): หน้า 57-66.

[3] อนุชิต คงฤทธิ์, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. ผลกระทบของสารช่วยผสานที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทาง

กายภาพของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟ. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2561;11(1): หน้า 18-28.

[4] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, อนุชิต คงฤทธิ์. ผลกระทบของสารเชื่อมโยงและระยะเวลาการอบไอน้ำในกระบวนการเชื่อม โยงสายโซ่ที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิออกซีเมทิลลีนรีไซเคิล. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ*. 2562; 12(2): หน้า 49-62.

[5] กรีนพีซ. *อะไรคือ "พลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้ง"*. เข้าถึงได้จาก:https://www.green peace.org /thailand/ explore/resist/plastic1/single -use-plastic/ [เข้าถึงเมื่อ 13 มีนาคม 2564]

[6] เกียรติสุดา สมนา, ประมวล พันชนะ, รัฐพล สมนา. กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าก่านหินและซิลิก้าที่สกัดจากเถ้าแกลบ. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 2564; 13(1): หน้า 25-35.

[7] Alfaro EF, Dias DB, Silva LGA. The study of ionizing radiation effects on polypropylene and rice husk ash composite, *Radiation Physics and Chemistry*. 2013; 84: 163–165.

[8] Ismail H, Nizam JM, Khalil AHPS. The effect of a compatibilizer on the mechanical properties and mass swell of white rice husk ash filled natural rubber/ linear low density polyethylene blends. *Polymer Testing*. 2001; 20(2): 125–133.

[9] Nawadon P, Jakkid S. Static and dynamic mechanical properties of poly (vinyl chloride) andWaste rice husk ash composites compatibilized with y - aminopropyltrimethoxy silane, *Silicon*. 2018;10: 287–292.

[10] Siriwardena S, Ismail H, Ishiaku US. A comparison of the mechanical properties and water absorption behavior of white rice husk ash and silica filled polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2003; 22(18): 1645-1666.

[11] Rissanen J, Ohenoja K, Kinnunen P, Romagnoli M, Illikainen M. Milling of peat-wood fly ash: effect on water demand of mortar and rheology of cement paste. *Construction and Building Materials*. 180; 143-153.

[12] Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S. Mechanical activation of volcanic ash for geopolymer synthesis: effect on reaction kinetics, gel characteristics, physical and mechanical properties. *RSC Advances*. 2016; 6(45): 39106-39117.

[13] Mucsi G, Molnar Z, Kumar S. Geopolymerisation of mechanically activated lignite and brown coal fly ash. *Acta Physica Polonica A*. 2014; 126(4): 994-998.

[14] ASTM standards. ASTM D1238-13. *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*. West Conshohocken: PA; 2013.

[15] ASTM standards. ASTM D638- 14. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken: PA; 2014.

[16] ASTM standards. ASTM D2240- 15e1, *Standard Test Method for Rubber Property— Durometer Hardness*. West Conshohocken: PA; 2015.

[17] ASTM standards. ASTM D256- 10. *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. West Conshohocken: PA; 2018.

[18] Rosa SML, Nachtigall SMB, Ferreira CA. Thermal and dynamic - mechanical characterization of rice - husk filled polypropylene composites, *Macromolecular Research*. 2009.;17(1) : 8-13.

[19] Sevdalina T, Svetlana G, Lyubomir V. Obtaining some polymer composites filled with rice husks ash - a review. *International Journal of Chemistry*. 2012; 4(4): 62-89.

[20] Vlachopoulos J, Strutt D. Overview polymer processing. *Materials Science and Technology*. 2003; 19: 1161-1169.

[21] Deeptangshu SC, Margaret CJ, Ferenc C. Recycling rice hull ash: a filler material for

polymeric composites, *Advances in Polymer Technology*. 2004; 23(2): 147–155.

[22] Chaudhary DS, Jollands MC, Cser F. Understanding rice hull ash as fillers in polymers: a review. *Silicon Chemistry 1.* 2002; 281–289.