



วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลกระทบของสารควบคู่ปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของ คอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดผสมกากกาแฟ

Effects of coupling agent on mechanical and physical properties of spent coffee ground filled with polylactic acid composites

จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร¹ อนุชิต คงฤทธิ์^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Jittiwat Nithikarnjanatharn¹ Anuchit Khongrit^{2*}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

² Industrial Management (Continuing Program), Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

*Corresponding author.

E-mail: anuchit.kh@nrnu.ac.th; Telephone: 085-8603339

วันที่รับบทความ 24 เมษายน 2562; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 4 มิถุนายน 2562; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 17 กันยายน 2562

วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 6 มกราคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ 20 มกราคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพอลิแลคติกแอซิด และกากกาแฟมาสร้างเป็นคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติเพื่อการศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณการผสมกากกาแฟ (ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก) และปริมาณของสารควบคู่ปฏิกิริยา (0, 1, 3 และ 5 ส่วนเทียบกับร้อยละ) ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรู และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้วยกระบวนการกดอัดร้อน ผลการทดสอบสมบัติและการวิเคราะห์ผลทางสถิติทำให้ทราบว่า การเพิ่มปริมาณกากกาแฟส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหล ค่าความแข็ง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และร้อยละการยืดตัวของคอมโพสิตสูงขึ้น สำหรับการเพิ่มปริมาณสารควบคู่ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น แต่การวิเคราะห์การถดถอยทำให้ทราบว่าอิทธิพลของทั้งสองตัวแปรส่งผลต่อสมบัติในลักษณะสมการยกกำลังสองมากกว่าความเป็นเส้นตรง การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาทำให้ทราบว่าไม่ควรผสมกากกาแฟสูงกว่าร้อยละ 20 เพราะจะส่งผลต่อความสามารถในการคงรูปและความเป็นเนื้อเดียวกันของคอมโพสิต ผลสรุปการวิจัยพบว่าควรผสมกากกาแฟร้อยละ 10 และเติมสารควบคู่ที่ 5 ส่วนเทียบกับร้อยละทำให้สมบัติของคอมโพสิตมีสมบัติที่เหมาะสมกับการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์และมีสี กลิ่น ของกากกาแฟซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว

คำสำคัญ

พอลิแลคติกแอซิด กากกาแฟ สารควบคู่ปฏิกิริยา สมบัติทางกล

Abstract

This study investigates the feasibility of using polylactic acid and coffee grounds to create environmentally friendly composites. The study applied the design of a statistical experiment to study two factors, namely coffee grounds mixing volume (10, 20 and 30% by weight) and the amount of the reaction substance (0, 1, 3 and 5 parts per hundred). The compositions were mixed by twin screw extruder and formed into specimen for testing the properties by the hot-pressing process. The results of the property testing and statistical analysis show that increasing coffee grounds increased the melting index, hardness, modulus of elasticity, and the percent elongation of the composite. The addition of a coupling agent led to an increase in tensile strength and modulus of elasticity. However, the regression analysis showed that the influence of both factors affected the properties, in which the relationship of factors can be modeled using quadratic polynomial model rather than simple linear model. Morphological analysis shows that coffee grounds should not be mixed more than 20% because it affects the stability and homogeneity of the composite. The results of the research show that 10% coffee grounds should be mixed with 5 parts per hundred, resulting in the properties of composites that are suitable for creating a product with unique color and aroma of coffee grounds.

Keywords

polylactic acid; spent coffee ground; coupling agent; mechanical properties

1. บทนำ

กลไกการขับเคลื่อนนวัตกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีหัวใจสำคัญคือการพัฒนาการวิจัย และใช้เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการพัฒนาระบบการผลิตให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยอุตสาหกรรมวัสดุต้องมีการใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมพัฒนาวัสดุต่าง ๆ เช่น วัสดุคอมโพสิต (Composite material) หรือการพัฒนาวัสดุให้ทนทาน ยั่งยืน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Sustainable material) เพื่อเสริมสร้างให้อุตสาหกรรมสามารถเติบโตอย่างยั่งยืนได้ [1] คอมโพสิตระหว่างไม้ และพลาสติก (Wood plastic composite, WPC) เป็นกลุ่มวัสดุที่มีส่วนผสมระหว่างวัสดุสังเคราะห์เช่น พลาสติก และวัสดุจากธรรมชาติเช่น ผงไม้หรือเศษวัสดุจากธรรมชาติ ปัจจุบันมีแนวโน้มการนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากราคาถูก มีสมบัติทางกลที่ดี มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [2-4]

การวิจัยทางด้านคอมโพสิต และสารตัวเติมธรรมชาตินั้นโดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องใช้สารควบคู่ปฏิกิริยาเนื่องจากฟิลเลอร์ธรรมชาตินั้นเป็นสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดที่มีขั้ว (Hydrophilic filler) แต่พอลิเมอร์นั้นสารประกอบซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันชนิดที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic) จึงทำให้เมื่อนำมารวมกันแล้วมีพันธะการยึดเหนี่ยวที่ต่ำส่งผลต่อการแยกเฟสและทำให้ความแข็งแรงทางกลของวัสดุคอมโพสิตลดลง ซึ่งการใช้สารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน (Silane coupling agent) เป็น

วิธีการทางเคมีที่ใช้ความสามารถของสารควบคู่ปฏิกิริยาที่มี 2 หมู่ฟังก์ชันซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ $R-Si-R$ โดยที่ R คือหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) ทำหน้าที่เป็นสะพานเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสภายในของเมทริกซ์เฟส และฟิลเลอร์ทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตสูงขึ้น [5-6]

ก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาการนำผงไม้มาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อสร้างเป็นคอมโพสิตไม้เทียม และมีการประยุกต์ใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ จากผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มปริมาณผงไม้ และสารเชื่อมขวางส่งผลให้คอมโพสิตมีสมบัติทางกล และความสามารถในการคงรูปจากความร้อนสูงขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาซึ่งชี้ให้เห็นถึงผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์ และฟิลเลอร์ที่ดี [7] จากนั้นได้ทำการศึกษาต่อยอดโดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการเพิ่มสมบัติความเหนียวแน่น (Toughening) ของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมผงไม้โดยการผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงยิ่งยวด (UHMWPE) และยางอีพดีเอ็ม (EPDM) ซึ่งผลการวิจัยพบว่า การผสม UHMWPE ในปริมาณ 5-10 Phr ส่งผลให้สมบัติความต้านทานแรงกระแทก และสมบัติการรับแรงดัดของคอมโพสิตสูงขึ้น ส่วนการเติม EPDM ส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิตสูงกว่าสูตรที่เติม UHMWPE แต่ทำให้สมบัติการรับแรงดัดลดลง [8]

ต่อมาแนวโน้มของการวิจัยด้านคอมโพสิตระหว่างไม้และพลาสติกเปลี่ยนไป โดยเน้นที่การศึกษาฟิลเลอร์ที่มาจากธรรมชาติ หรือพลาสติกชีวภาพมากขึ้น โดยเฉพาะกากกาแฟ ซึ่งเป็นสิ่งที่เหลือจากการทำกาแฟที่นิยมดื่มกันมากในปัจจุบัน และมีลักษณะเป็นผงเช่นเดียวกับฟิลเลอร์จากธรรมชาติอื่น ๆ จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากกาแฟมาใช้เป็นฟิลเลอร์สำหรับคอมโพสิต โดยเริ่มจากการนำพอลิเมอร์พอลิ-โพรพิลีน (ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก) ผสมกับกากกาแฟ (ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ จากนั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ โดยผลการวิจัยพบว่าคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการฉีด และกระบวนการกดอัดร้อนได้ อีกทั้งสมบัติทางกลที่ได้มีความเหมาะสมสำหรับนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อีกด้วย [9] ซึ่งการวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนาต่อยอดให้เป็นคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นจึงมีความสนใจที่จะนำกากกาแฟมาผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพนั่นคือพอลิแลคติกแอซิดโดยมีความคาดหวังว่าจะสามารถยกจุดเด่นในเรื่องสี กลิ่นของกากกาแฟ ตลอดจนความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของพอลิแลคติกแอซิดให้กลายเป็นวัสดุคอมโพสิตที่สามารถนำไปต่อยอดในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมได้

สำหรับการวิจัยนี้มีจุดประสงค์คือ 1) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพอลิแลคติกแอซิดและกากกาแฟมาสร้างเป็นคอมโพสิตที่สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการผลิตที่มีในอุตสาหกรรม 2) ผลกระทบของสารควบคุมปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดผสมกากกาแฟ และ 3) หาระดับของตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้คอมโพสิตมีสมบัติทางกลเหมาะกับการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งรายละเอียดการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุดิบ และสารเคมี

เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เกรด 3052D จากบริษัท เนเจอร์ เฟรนด์ จำกัด สารควบคุมปฏิกิริยาไวโนลไตรเมทอทอกซีไซเลน (Vinyltrimethoxysilane, VTMS) Silquest A-171 สารริเริ่มปฏิกิริยา ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เกรดอุตสาหกรรม สารด้านการเชื่อมสภาพ

จากความร้อน Anox PP18P และ Alkanox 240 ของบริษัท ออฟติมอลเทค จำกัด และกากกาแฟสด (Spent coffee ground; SCG) จากร้านกาแฟในท้องถิ่น

2.2 การออกแบบการทดลอง และการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติ

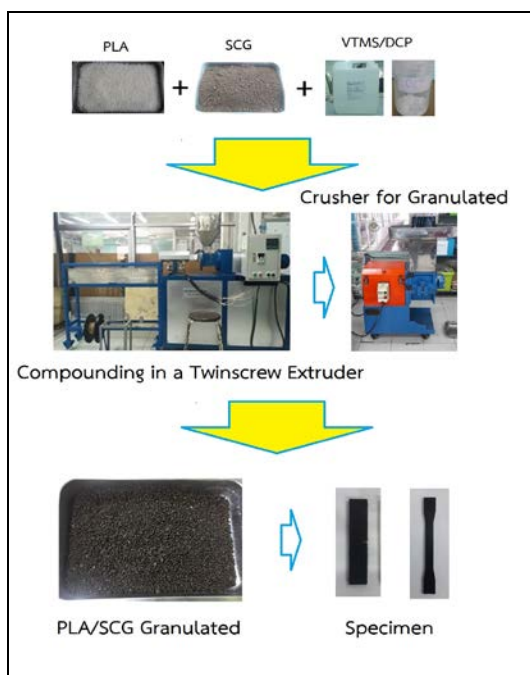
ตัวแปรที่นำมาศึกษาในการวิจัยนี้มีสองตัวแปรได้แก่ ปริมาณการเติมกากกาแฟ (ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก) และปริมาณการเติมสารควบคุมปฏิกิริยา (0, 1, 3 และ 5 Phr) (Phr ย่อมาจาก part per hundred part of resin คือการผสมสารเคมีโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่าง ๆ เมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด 100 ส่วนโดยน้ำหนัก) จึงได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial design) ดังนั้นการวิจัยนี้มีตัวแบบทดลองทั้งสิ้น 12 ชุด แต่ละตัวแบบการทดลองทำ 5 ซ้ำแบบสุ่ม (Randomization) โดยแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแบบทดลองในการวิจัยนี้

ชื่อตัวแบบทดลอง	กากกาแฟ (ร้อยละ) (A)	สารควบคุมปฏิกิริยา (Phr) (B)
PLA/10/0	10	0
PLA/20/0	20	0
PLA/30/0	30	0
PLA/10/1	10	1
PLA/20/1	20	1
PLA/30/1	30	1
PLA/10/3	10	3
PLA/20/3	20	3
PLA/30/3	30	3
PLA/10/5	10	5
PLA/20/5	20	5
PLA/30/5	30	5

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเริ่มต้นจากการเตรียมกากกาแฟโดยนำกากกาแฟสดที่ได้จากกระบวนการชงกาแฟมาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดเพื่อลดขนาดด้วยเครื่องบดทางกล และนำมาแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 30 Mesh ซึ่งทำ

ให้อนุภาคกากกาแฟที่ใช้ในการวิจัยนี้มีขนาดระหว่าง 300 ถึง 600 ไมโครเมตร นำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดมาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้น จากนั้นเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.1 Phr ผสมแห้งด้วยเครื่องผสมทางกลประมาณ 5 นาทีก่อนที่จะนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเติมสารควบคุมปฏิกิริยาตามปริมาณต่าง ๆ ที่ออกแบบการทดลองไว้แล้วนำไปผสมด้วยเครื่องผสมทางกลอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที และอบลดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำไปคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่มี L/D ratio เท่ากับ 40 อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมคือ 145-150°C จากส่วนป้อน (Feed zone) ไปจนถึงหัวตาย (Die zone) หลังจากนั้นนำไปกดให้เป็นเม็ดขนาดเล็กด้วยเครื่องกด และนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลด้วยกระบวนการกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 145°C



รูปที่ 1 กระบวนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติในการวิจัยนี้

2.3 การทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

หลังจากคอมพาวนด์พอลิแลคติกแอซิดกับกากกาแฟด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ จากนั้นนำมาทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index หรือ MFI) มาตรฐาน ASTM D 1238 ที่

อุณหภูมิ 190°C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม จากนั้นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดร้อนจะนำไปทดสอบความแข็งแบบชอร์ ดี (Shore D) น้ำหนักกด 10 แร่งปอนด์ (Lbf) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 และการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยพลังงานกระแทก 2.7 จูล (Jule) และทดสอบสมบัติการรับแรงดึง (Tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 (Type I) ด้วยอัตราเคลื่อนที่ 50 มิลลิเมตร/นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติทางกลมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักด้วยกล้องดิจิทัลไมโครสโคป (Digital microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

หลังจากทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพแล้วจะนำข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้มาประมวลผลทางสถิติ เริ่มจากการหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากแต่ละตัวแบบทดลองเพื่อนำไปแสดงผลในรูปแบบของกราฟแท่ง จากนั้นทำการทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง (Two way ANOVA) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% และวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression) เพื่อให้ทราบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

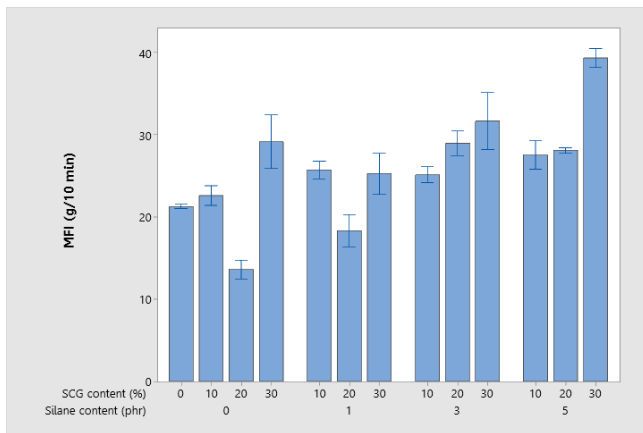
3. ผลการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ

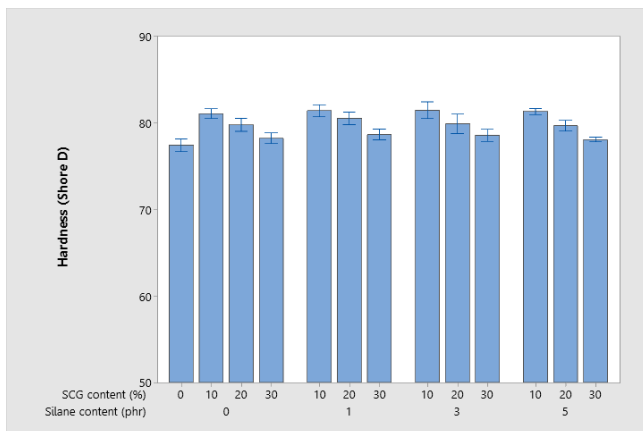
ค่าดัชนีการหลอมไหลในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมกากกาแฟร้อยละ 10 มีค่าดัชนีการหลอมไหล 22.62 กรัม/10 นาที เมื่อเพิ่มกากกาแฟเป็นร้อยละ 20 ทำให้ลดลงเหลือ 13.62 กรัม/10 นาที แต่เมื่อเพิ่มกากกาแฟเป็นร้อยละ 30 ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลกลับมาสูงขึ้นเป็น 29.16 กรัม/10 นาที ซึ่งพอลิแลคติกแอซิดผสมกากกาแฟที่เติมสารควบคุมปฏิกิริยา 1 Phr (PLA/10/1) มีผลการทดสอบลักษณะเดียวกัน แต่สำหรับพอลิแลคติกแอซิดผสมกากกาแฟที่เติมสารควบคุมปฏิกิริยา 3 Phr (PLA/10/3, PLA/20/3 และ PLA/30/3) และ 5 Phr (PLA/10/5, PLA/20/5 และ PLA/30/5) มีค่าดัชนีการหลอมไหลที่ต่าง

ออกไป นั่นคือเมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟจะส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ผลการทดสอบค่าความแข็งที่มีหน่วยเป็น Shore D แสดงดังรูปที่ 3 โดยลักษณะแนวโน้มของค่าความแข็งที่พบในงานวิจัยนี้คือค่าความแข็งของคอมโพสิตจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟ เช่น คอมโพสิตสูตร PLA/10/3 มีค่าความแข็ง 81.40 Shore D เมื่อเพิ่มกากกาแฟเป็นร้อยละ 20 (PLA/20/3) ทำให้ค่าความแข็งลดลงเป็น 80.47 Shore D และมีค่าความแข็ง 78.50 Shore D เมื่อผสมกากกาแฟร้อยละ 30 (PLA/30/3) เป็นต้น แต่หากพิจารณาผลของสารควบคู่ปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของคอมโพสิตพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และไม่สามารถเห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงได้ โดยค่าความแข็งของคอมโพสิตในงานวิจัยนี้อยู่ระหว่าง 78.03 ถึง 81.40 Shore D

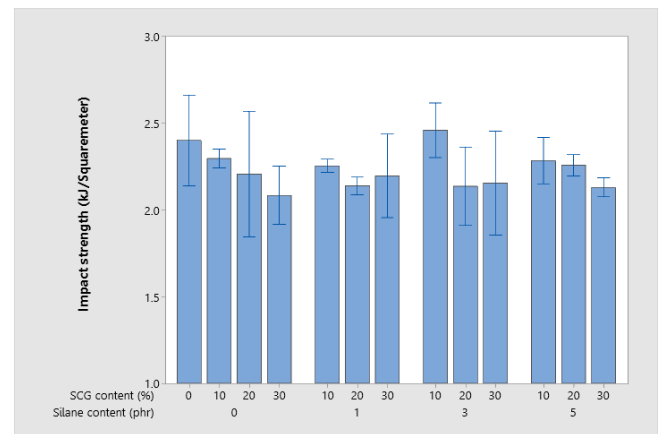


รูปที่ 2 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหล



รูปที่ 3 ผลการทดสอบค่าความแข็ง

ผลการทดสอบการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอดของคอมโพสิตในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4 โดยภาพรวมพบว่าผลจากปริมาณการเติมกากกาแฟ และปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาส่งผลต่อสมบัติความเหนียวแน่นของคอมโพสิตไปในทางเดียวกับค่าความแข็งนั่นคือความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟ สำหรับคอมโพสิตที่มีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดคือสูตร PLA/10/3 ที่ผสมกากกาแฟร้อยละ 10 และเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา 3 Phr โดยมีค่าเป็น 2.46 kJ/m^2 และค่าความต้านทานแรงกระแทกต่ำสุดคือ PLA/30/0 ที่ผสมกากกาแฟร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าเป็น 2.08 kJ/m^2

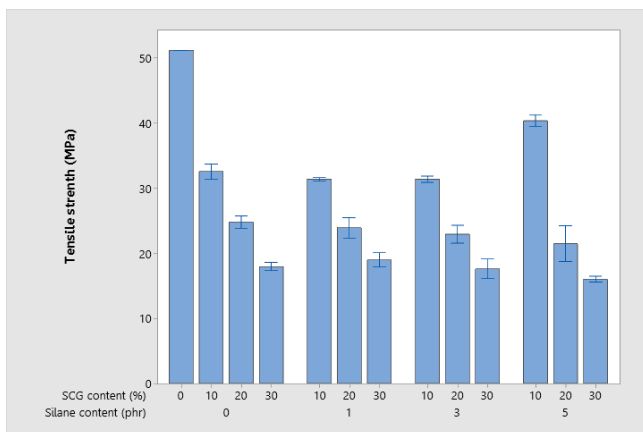


รูปที่ 4 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก

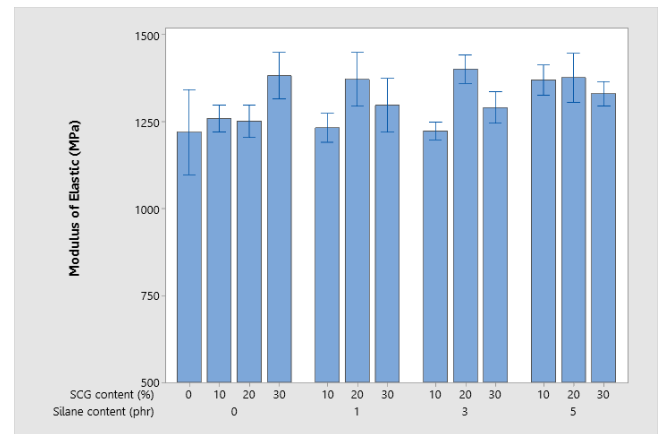
การทดสอบสมบัติการรับแรงดึงในการวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง มอดูลัสความยืดหยุ่น และร้อยละการยืดตัว โดยผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าผลของปริมาณการเติมกากกาแฟที่สูงขึ้นส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่คอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดผสมกากกาแฟร้อยละ 10 ที่เติมสารควบคู่ปฏิกิริยา 5 Phr (PLA/10/5) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดในการวิจัยนี้โดยมีค่าเป็น 40.34 MPa แต่คอมโพสิตสูตร PLA/30/5 ที่มีปริมาณสารควบคู่ปฏิกิริยา 5 Phr เท่ากันแต่มีปริมาณกากกาแฟสูงกว่า (ร้อยละ 30) มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้โดยมีค่าเป็น 16.03 MPa อย่างไรก็ตามคอมโพสิตทุกสูตรมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA/0/0) ซึ่งมีค่าสูงถึง 51.13 MPa

สำหรับค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า คอมโพลีเมอร์ในกลุ่มที่เติมสารควบคู่ปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มปริมาณ กากกาแฟจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 ส่งผลให้ค่ามอดูลัส ความยืดหยุ่นสูงขึ้น แต่จะลดต่ำลงเมื่อเพิ่มกากกาแฟเป็น ร้อยละ 30 เช่น คอมโพลีเมอร์สูตร PLA/10/3 ที่ผสมกากกาแฟ ร้อยละ 10 มีค่าเป็น 1224.0 MPa และเพิ่มเป็น 1402.13 MPa เมื่อผสมกากกาแฟร้อยละ 20 (PLA/20/3) แต่เมื่อเพิ่ม กากกาแฟเป็นร้อยละ 30 (PLA/30/3) ทำให้มีค่าลดลงเหลือ 1291.37 MPa เป็นต้น

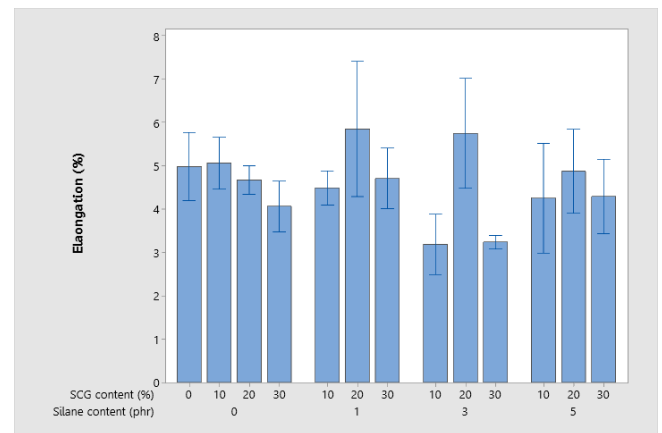
และสุดท้ายค่าร้อยละการยืดตัวที่แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า คอมโพลีเมอร์ที่ไม่เติมสารควบคู่ปฏิกิริยามีแนวโน้มค่าที่ลดลงเมื่อ เพิ่มปริมาณกากกาแฟ สำหรับคอมโพลีเมอร์กลุ่มที่เติมสารควบคู่ ปฏิกิริยามีแนวโน้มของค่าร้อยละการยืดตัวคล้ายกับค่ามอดูลัส ความยืดหยุ่นนั่นคือมีค่าร้อยละการยืดตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณกากกาแฟจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 และลดลง เมื่อผสมกากกาแฟร้อยละ 30 โดยคอมโพลีเมอร์ที่ผสมกากกาแฟ ร้อยละ 20 และเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา 1 Phr (PLA/20/1) มี ค่าร้อยละการยืดตัวสูงที่สุดในการวิจัยนี้โดยยืดตัวได้ร้อยละ 5.85



รูปที่ 5 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 6 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

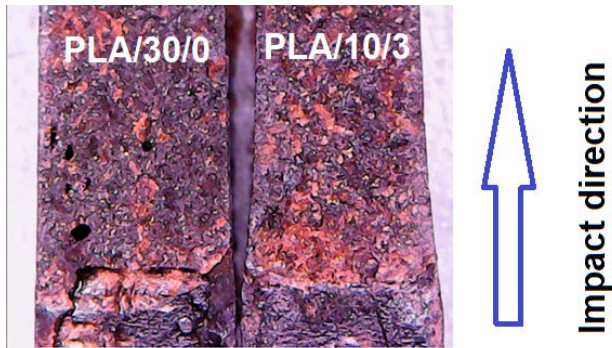


รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว

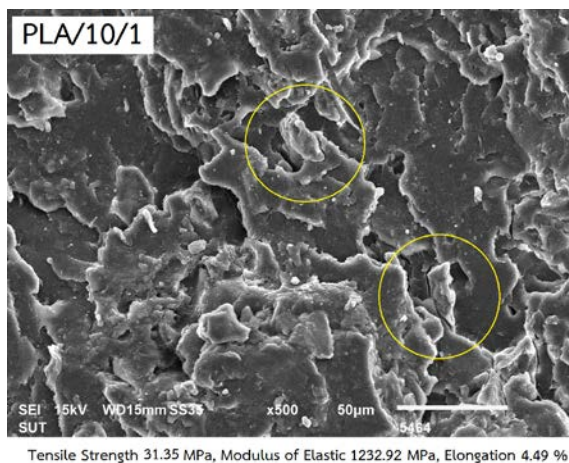
3.2 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา

การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาจากผิวรอยแตกหักของชิ้นงาน ในการวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือการวิเคราะห์ภาพถ่ายจาก กล้องดิจิทัลไมโครสโคปสำหรับการวิเคราะห์รอยแตกหักของ ชิ้นงานที่กำลังขยายต่ำเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการรับ แรงกระแทกของชิ้นงาน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดสำหรับการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาที่กำลังขยายสูง โดยรูปที่ 8 เป็นภาพของชิ้นงานคอมโพลีเมอร์ที่ผ่านการทดสอบ แรงกระแทกสูตร PLA/30/0 (ซ้าย) และ PLA/10/3 (ขวา) ที่กำลังขยาย 50 เท่า ที่บันทึกด้วยกล้องดิจิทัลไมโครสโคป จากภาพแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าคอมโพลีเมอร์ที่เติมสารควบคู่ ปฏิกิริยามีความเหนียวเหนียวกันมากกว่าคอมโพลีเมอร์ที่ไม่เติม สารควบคู่ปฏิกิริยา หากมองที่ด้านล่างของภาพซึ่งเป็นบริเวณที่ สร้างรอยบากของชิ้นงานทดสอบตามแนวแรงกระแทกพบว่า คอมโพลีเมอร์ PLA/30/0 มีลักษณะของการฉีกขาดอย่าง

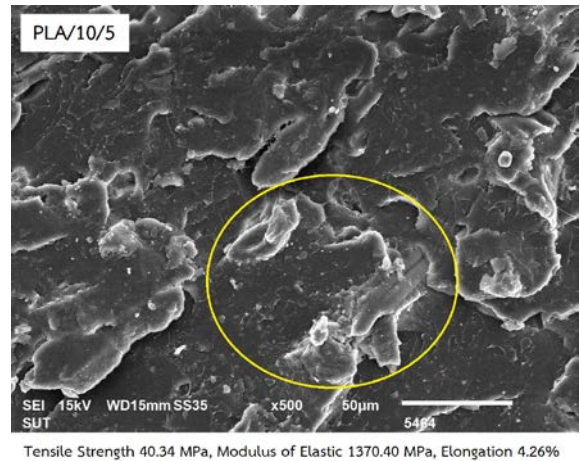
รวดเร็ว สื่อให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้น้อย และบริเวณที่เป็นพื้นที่รับแรงกระทำพบรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นได้ทั้งการหลุดไป (Pull out) ของกากกาแฟหรือเป็นรูพรุนจากความชื้น ส่วนชิ้นงาน PLA/10/3 สามารถเห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของเฟส และสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงกระแทกที่ว่าคอมโพสิตสูตร PLA/10/3 มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้มากที่สุดในการวิจัยนี้



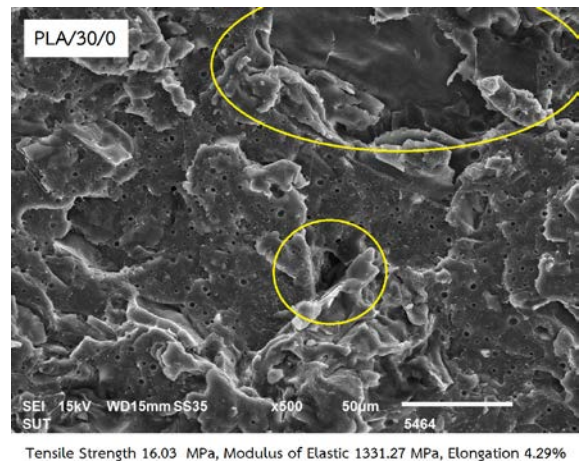
รูปที่ 8 รอยแตกหักของคอมโพสิตสูตร PLA/30/0 (ซ้าย) และ PLA/10/3 (ขวา) (กำลังขยาย 50 เท่า) บันทึกด้วยกล้องดิจิทัลไมโครสโคป



รูปที่ 9 สันฐานวิทยาของคอมโพสิต PLA/10/1 (กำลังขยาย 500 เท่า) บันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 10 สันฐานวิทยาของคอมโพสิต PLA/10/5 (กำลังขยาย 500 เท่า) บันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 11 สันฐานวิทยาของคอมโพสิต PLA/30/0 (กำลังขยาย 500 เท่า) บันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปที่ 9 ถึง 11 เป็นภาพสันฐานวิทยาของคอมโพสิตที่ผ่านการทดสอบแรงดึงโดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า ที่บันทึกโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยรูปที่ 9 คือคอมโพสิตสูตร PLA/10/1 พบลักษณะผิวรอยแตกหักที่มีความขรุขระจากการเคลื่อนตัวของเฟส เป็นลักษณะของวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูป นอกจากนี้พบช่องว่างระหว่างกากกาแฟ และเฟสของพอลิแลคติกแอซิด

รูปที่ 10 คือคอมโพสิตสูตร PLA/10/5 ที่เติมสารควบคู่ปฏิกิริยา 5 Phr มีลักษณะผิวรอยแตกหักที่เรียบกว่าคอมโพสิตสูตร PLA/10/1 แต่พบการประสานเฟสระหว่างกากกาแฟ และพอลิแลคติกแอซิดที่ดีกว่า สุดท้ายรูปที่ 11 คือคอมโพสิตสูตร PLA/30/0 ซึ่งมีปริมาณกากกาแฟสูงที่สุด พบเห็นรูพรุน

ขนาดเล็กจำนวนมาก และยังพบร่องรอยการหลุด (Pull out) ของกากกาแฟอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติแรงดึงที่พบว่าคอมโพสิตสูตร PLA/10/5 มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด รองลงมาคือคอมโพสิตสูตร PLA/10/1 และคอมโพสิตสูตร PLA/30/0 มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด

4. ผลการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากการทดสอบสมบัติที่กล่าวไปแล้ว เพื่อให้เข้าใจอิทธิพลของทั้งสองตัวแปรที่นำมาศึกษาที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดผสมกากกาแฟจึงได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเริ่มจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two Way ANOVA) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิจัยนี้

สมบัติ	กากกาแฟ	สารควบคุมปฏิกิริยา	อิทธิพลร่วม
ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min)	0.000	0.000	0.000
ความแข็ง (Shore D)	0.000	0.049	0.787
ความต้านทานแรงกระแทก (kJ/m ²)	0.001	0.720	0.252
ความต้านทานแรงดึง (Mpa)	0.000	0.000	0.000
มอดูลัสความยืดหยุ่น (Mpa)	0.000	0.001	0.000
ร้อยละการยืดตัว (%)	0.000	0.006	0.001

จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรกากกาแฟส่งผลต่อทุกสมบัติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ส่วนตัวแปรสารควบคุมปฏิกิริยามีเพียงค่าความต้านทานแรงกระแทกเท่านั้นที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรนี้ หากดูค่าความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมพบว่าปริมาณการเติมกากกาแฟ และปริมาณการเติมสารควบคุมปฏิกิริยาไม่ได้มีอิทธิพลร่วม (Interaction) ต่อสมบัติความแข็ง และความต้านทานแรงกระแทก

ตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์การถดถอยในรูปแบบของสมการถดถอยแบบพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression) และตารางที่ 5 แสดงการวิเคราะห์การถดถอยในรูปแบบของพหุคูณกำลังสอง (Polynomial regression)

ตารางที่ 4 สมการถดถอยแบบพหุคูณเชิงเส้นของการวิจัยนี้

สมบัติ	สมการถดถอย	สัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (ร้อยละ)
ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min)	$19.06 + 0.129 (A) + 0.500 (B) + 0.0787 (A) \times (B)$	58.74
ความแข็ง (Shore D)	$82.636 - 0.1373 (A) + 0.057 (B) - 0.00418 (A) \times (B)$	82.04
ความต้านทานแรงกระแทก (kJ/m ²)	$2.3625 - 0.00832 (A) + 0.0149 (B) - 0.00035 (A) \times (B)$	21.12
ความต้านทานแรงดึง (Mpa)	$36.50 - 0.5929 (A) + 2.087 (B) - 0.0979 (A) \times (B)$	89.63
มอดูลัสความยืดหยุ่น (Mpa)	$1172.3 + 5.89 (A) + 39.9 (B) - 1.412 (A) \times (B)$	27.93
ร้อยละการยืดตัว (%)	$5.226 - 0.0247 (A) - 0.229 (B) + 0.00715 (A) \times (B)$	4.38

หมายเหตุ : (A) คือปริมาณการเติมกากกาแฟ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

(B) คือปริมาณการเติมสารควบคุมปฏิกิริยา (Phr)

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจจากสมการถดถอยที่แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าสมบัติความแข็ง และความต้านทานแรงดึงที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นจากตัวแปรทั้งสอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจเท่ากับ 82.04% และ 89.63% ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์สมการถดถอยที่แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าปริมาณการเติมกากกาแฟ และปริมาณการเติมสารควบคุมปฏิกิริยาส่งผลอย่างสัมพันธ์กันต่อค่าดัชนีการหลอมไหล ค่าความแข็ง และความต้านทานแรงดึงเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่สูง (มากกว่า 70%) แต่ความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรสำหรับสมการถดถอยของค่าความต้านทานแรงกระแทกแสดงแค่พจน์ของตัวแปรกากกาแฟเท่านั้นสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่แสดงให้เห็นว่าตัวแปรปริมาณการเติมสารควบคุมไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ แต่สมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่น และร้อยละการยืดตัวนั้น แม้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะแสดงให้เห็นว่าทั้งสองตัวแปรมีอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อสมบัติดังกล่าว แต่การวิเคราะห์การถดถอยแสดงให้เห็นว่าทั้งสองตัวแปรไม่ได้ส่งผลทั้งในลักษณะเส้นตรง และกำลังสองเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าสมการถดถอยพหุคูณกำลังสองนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่สูงกว่า แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณกำลังสองมีความเหมาะสมในการนำไปใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่นำมาศึกษาที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิตในการวิจัยนี้

ตารางที่ 5 สมการถดถอยแบบพหุคูณกำลังสองของการวิจัยนี้

สมบัติ	สมการถดถอย	สัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (ร้อยละ)
ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min)	$39.21 - 2.289 (A) + 0.500 (B) + 0.06045 (A)^2 + 0.0787 (A \times B)$	78.9
ความแข็ง (Shore D)	$82.661 - 0.14667 (A) + 0.293 (A) - 0.0634 (B)^2$	83.3
ความต้านทานแรงกระทำ (kJ/m ²)	$2.3962 - 0.00910 (A)$	20.15
ความต้านทานแรงดึง (Mpa)	$45.47 - 1.5939 (A) + 0.848 (B) + 0.02499 (A)^2 + 0.2460 (B)^2 - 0.0979 (A \times B)$	93.9
มอดูลัสความยืดหยุ่น (Mpa)	$998.5 + 26.75 (A) + 39.9 (B) - 0.521 (A)^2 - 1.412 (A \times B)$	39.3
ร้อยละการยึดตัว (%)	$1.156 + 0.4412 (A) - 0.0863 (B)^2 - 0.01124 (A \times B)$	30.5

หมายเหตุ : (A) คือปริมาณการเติมกากกาแฟ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

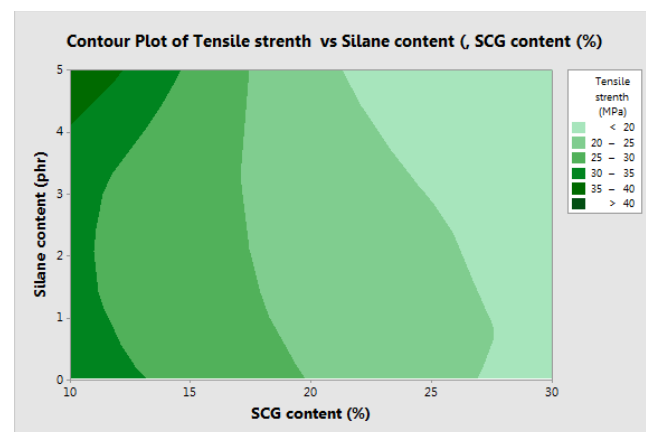
(B) คือปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา (Phr)

หากวิเคราะห์สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ในแต่ละพจน์ของสมการถดถอยสามารถอธิบายลักษณะอิทธิพลของแต่ละตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ พบว่าตัวแปรกากกาแฟส่งผลในเชิงลบ (Negative effect) ต่อค่าดัชนีการหลอมไหล ความต้านทานแรงกระทำ ความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งนั้นหมายความว่าหากเพิ่มส่วนผสมกากกาแฟมากขึ้นส่งผลให้สมบัติที่กล่าวมาข้างต้นลดลง สำหรับตัวแปรสารควบคู่ปฏิกิริยาส่งผลในเชิงบวก (Positive effect) ต่อดัชนีการหลอมไหลค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นนั้นหมายความว่าหากเพิ่มปริมาณสารควบคู่ปฏิกิริยามากขึ้นส่งผล

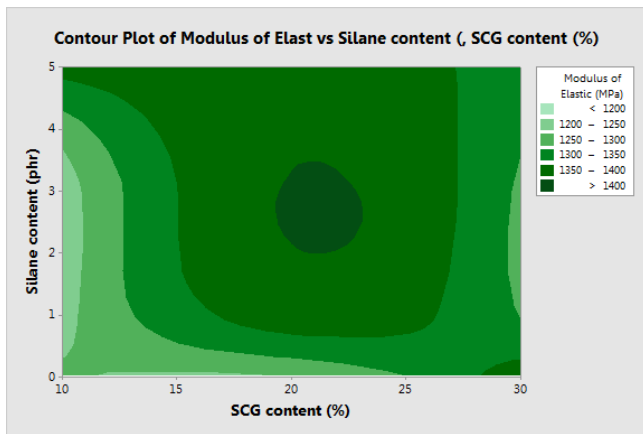
ให้สมบัติที่กล่าวมาข้างต้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน และเข้าใจอิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษาได้ง่ายขึ้น จึงได้นำสมการถดถอยที่ได้มาสร้างเป็นกราฟโครงสร้าง (Contour plot) ซึ่งในในที่นี้จะแสดงเฉพาะสมบัติที่ได้จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าร้อยละการยึดตัวโดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 ถึง 14 ตามลำดับ

5. การอภิปรายผลการวิจัย

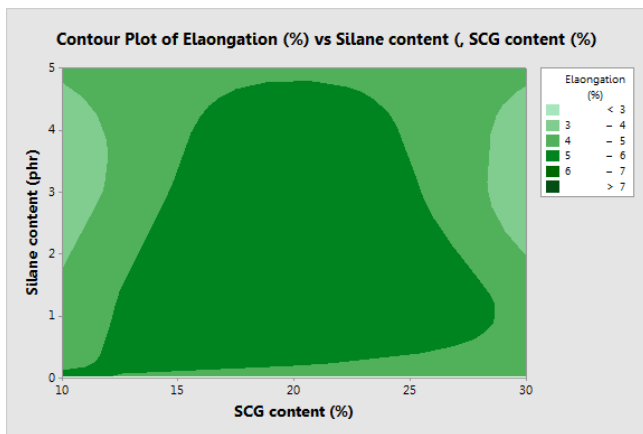
ผลการทดสอบสมบัติการหลอมไหลแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณกากกาแฟจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลลดลง แต่เมื่อเพิ่มกากกาแฟเป็นร้อยละ 30 กลับส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลสูงขึ้น ซึ่งจากการสังเกตขณะทำการทดสอบพบว่าคอมโพสิตสูตรที่เติมกากกาแฟร้อยละ 30 มีลักษณะของพอลิเมอร์หลอมที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีการขาดตัวอย่างรวดเร็วเมื่อไหลออกจากเครื่องทดสอบ และเมื่อทำการศึกษารอยแตกหักของคอมโพสิตสูตรดังกล่าวด้วยกล้องดิจิทัลไมโครสโคป และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทำให้สามารถพบเห็นเฟสของคอมโพสิตมีช่องว่าง และรูพรุนจำนวนมากเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมทำให้เกิดการรวมตัวกัน (Agglomerate) ของอนุภาคกากกาแฟทำให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของคอมโพสิตอีกทั้งเกิดดูดซึมความชื้นที่สูงขึ้นตามไปด้วยส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลายของสายโซ่พอลิเมอร์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากกาแฟและปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกาจากาแฟและปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกาจากาแฟและปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการยืดตัว

ดังนั้นเมื่อกาจากาแฟในปริมาณที่สูงเกินร้อยละ 20 ส่งผลให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความต้านทานแรงดึง [11-13] จากการดูผลการทดสอบสมบัติทางกลที่แสดงโดยแผนภูมิแท่งไม่สามารถอธิบายถึงอิทธิพลของปริมาณการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาชัดเจนเท่าที่ควร แต่หากใช้การวิเคราะห์ผลทางสถิติการวิเคราะห์การถดถอยตลอดจนการใช้กราฟโครงร่างทำให้สามารถทราบได้ว่าอิทธิพลของสารควบคู่ปฏิกิริยาที่ทั้งช่วยเพิ่มสมบัติการรับแรงดึง (ค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น) ให้สูงขึ้นได้ แต่จากการวิเคราะห์การถดถอยทำให้ทราบว่าไม่เพียงค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้รับอิทธิพลจากทั้งสองตัวแปรในเชิงเส้นตรง

หากนำผลที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Chin-San Wu [14] ที่ทำการศึกษาคอมโพสิตของ

พอลิแลคติกแอซิดกับกาจากาแฟ และใช้พอลิแลคติกแอซิด-กราฟท์-มาเลอิกแอนดไฮโดรด์เป็นสารช่วยผสมผสานพบสิ่งที่สอดคล้องกันนั่นคือเมื่อเพิ่มปริมาณกาจากาแฟสูงขึ้นสัมพันธ์กับการดูดซึมน้ำที่มากขึ้นส่งผลต่อการเสื่อมสลาย และส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดลงตามปริมาณการเติมกาจากาแฟ แต่การใช้สารช่วยผสมผสานส่งผลให้สมบัติทางกลสูงกว่าการไม่เติมสารช่วยผสมผสาน

เมื่อนำผลการวิจัยที่ผ่านมา [9] และงานวิจัยของ García D. [15] ที่ได้ศึกษาคอมโพสิตจากพอลิโพรพิลีนกับกาจากาแฟมาอธิบายในการวิจัยนี้ สามารถอธิบายได้ว่าการเสียรูปของคอมโพสิตที่เกิดขึ้นในการทดสอบสมบัติทางกลเป็นผลมาจากความสามารถในการประสานตัวกันระหว่างเมทริกซ์และฟิลเลอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณกาจากาแฟร้อยละ 30 พบการรวมกลุ่มของอนุภาคกาจากาแฟส่งผลให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของคอมโพสิตลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพในการส่งผ่านความเค้น (Stress transfer) ลดต่ำลง อีกทั้งอิทธิพลจากความชื้นยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความเข้ากันได้ของทั้งสองเฟสเนื่องจากความต่างทางสภาพผิวของโมเลกุล อย่างไรก็ตามการผสมกาจากาแฟร้อยละ 10 ช่วยให้คอมโพสิตมีสมบัติความต้านทานแรงกระแทก และค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นโดยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้การส่งผ่านความเค้นดีกว่าคอมโพสิตสูตรที่ผสมกาจากาแฟร้อยละ 30

จากการศึกษาผลของการใช้สารควบคู่ปฏิกิริยาไวนิลไตรเมทอซซีนในการเตรียมคอมโพสิต อาจอธิบายได้ว่าการผสมสารควบคู่ปฏิกิริยาแบบผสมโดยตรงทางกล (Direct mechanical mixing) ในการเตรียมคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดผสมกาจากาแฟนั้นอาจมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงผิวของกาจากาแฟที่ดีกว่าการปรับปรุงผิวของกาจากาแฟ (Surface treating) ด้วยสารละลายไซเลนทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวของกาจากาแฟก่อนจะทำให้มีปริมาณของไซเลนยึดจับอยู่ที่ผิวของกาจากาแฟโดยปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจำนวนมาก และที่ผิวของกาจากาแฟที่มีไซเลนเกาะอยู่จะหันเอาหมู่ฟังก์ชัน -R ออกมา และหมู่ฟังก์ชันนี้จะเกิดปฏิกิริยากาจากาแฟ (Grafting) กับหมู่ฟังก์ชัน -OH ของพอลิเมอร์ จึงเป็นไปได้ว่าในการวิจัยนี้อาจมีปริมาณสารควบคู่ปฏิกิริยาที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง

พอลิแลคติกแอซิด และกากกาแฟในปริมาณที่ค่อนข้างน้อยจากการผสมโดยตรง ถ้าหากเปลี่ยนไปใช้วิธีการปรับปรุงด้วยสารละลายไซเลนก่อนอาจได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าก็เป็นได้

จากผลการทดสอบสมบัติทางกล และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติทำให้สามารถสรุปอิทธิพลของทั้งสองตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิตซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

สมบัติ	กากกาแฟ	สารควบคู่ปฏิกิริยา
ดัชนีการหลอมไหล	+	—
ความแข็ง	+	—
ความต้านทานแรงกระแทก	—	N/A
ความต้านทานแรงดึง	—	+
มอดูลัสความยืดหยุ่น	+	+
ร้อยละการยืดตัว	+	—

การหาระดับตัวแปรที่เหมาะสมในการวิจัยนี้ (Response optimization) โดยตั้งค่าเป้าหมายคือสมบัติทางกลสูงสุด (Maximum) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15 โดยลำดับที่ 1 คือการเติมกากกาแฟร้อยละ 10 และเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา 5 Phr ส่วนการแสดงผลในลำดับที่ 2 ถึง 5 นั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาได้ตามต้องการตั้งแต่ 0 ถึง 5 Phr ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการสร้างผลิตภัณฑ์ เช่น หากต้องการคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงสูงจะต้องผสมกากกาแฟร้อยละ 20 และเติมสารควบคู่ปฏิกิริยา 3 Phr เป็นต้น

Solutions

Solution	SCG content (%)	Silane content (phr)	Tensile strength (MPa) Fit	Hardness (shore D) Fit	impact strength (kJ/m ²) Fit	Elaongation (%) Fit	Modulus of Elastic (MPa) Fit
1	10	5	40.3420	81.2667	2.282	4.25522	1370.40
2	20	1	23.8960	80.4667	2.136	5.85121	1372.45
3	10	0	32.5511	81.0000	2.294	5.06459	1259.73
4	20	3	22.9090	79.8333	2.134	5.75332	1402.13
5	20	5	21.4653	79.6333	2.256	4.87814	1377.79
Solution	Composite Desirability						
1	0.626720						
2	0.511985						
3	0.505103						
4	0.485622						
5	0.440549						

รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ระดับตัวแปรที่เหมาะสมในการวิจัยนี้

จากนั้นได้นำคอมโพสิตสูตร PLA/10/5 ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสองมิติโดยกระบวนการกดอัดร้อน ชิ้นงานที่เลือกผลิตคือพวงกุญแจรูปทรงถ้วยกาแฟ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 16 ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ดีตามแบบ มีสี และกลิ่นของกาแฟชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการนำพอลิแลคติกแอซิดและกากกาแฟมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวได้



รูปที่ 16 พวงกุญแจรูปถ้วยกาแฟจากคอมโพสิตสูตร PLA/10/5

6. สรุปผลการวิจัย

จากจุดประสงค์ของการวิจัยนี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) สามารถสร้างคอมโพสิตที่ประกอบขึ้นจากพอลิแลคติกแอซิด และกากกาแฟ โดยสามารถคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูซึ่งเป็นเครื่องมืออยู่แล้วในภาคอุตสาหกรรม และผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลแสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดได้ดี แต่ทั้งนี้ไม่ควรผสมกากกาแฟเกินร้อยละ 20 เพราะจะส่งผลต่อความสามารถในการคงรูปและความเป็นเนื้อเดียวกันของคอมโพสิต

2) การวิเคราะห์ผลทางสถิติทำให้ทราบถึงผลกระทบของทั้งสองตัวแปร โดยการเติมกากกาแฟส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหล ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งของคอมโพสิตลดลง สำหรับการเติมสารควบคู่ปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น แต่ทั้งสองตัวแปรส่งผลต่อสมบัติของคอมโพสิตแบบสมการพหุนามยกกำลังสองมากกว่าสมการพหุนามเชิงเส้น

3) จากการวิเคราะห์หาระดับตัวแปรที่เหมาะสมในการวิจัยนี้โดยผลิตภัณฑ์ที่เลือกนำมาผลิตคือพวงกุญแจรูปทรงถ้วย

กาแพซึ่งต้องการสมบัติความแกร่งเป็นหลักเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหักเสียหายขณะนำไปใช้งาน โดยจากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าการเติมกากกาแพร้อยละ 10 และเติมสารสารควบคู่ปฏิกิริยาไวโนลไตรเมททอกซีไซเลน 5 Phr จะได้คอมโพสิตที่มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็งแรงสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด เกรด 3052D

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์กรมมหาชน) ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่สนับสนุนการดำเนินการต่าง ๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2016. ยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมไทย 4.0 ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560 - 2579). เข้า ถึง ได้ จ า ก : http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachmentsindustry_planthailandindustrialdevelopmentstrategy4.0.pdf.
- [2] นภัส ปัทมสัตยาสนธิ กัลลิตา เชาว์ชาญชัยกุล และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติภพ. ผลของการบ่มเร่งสภาวะด้วยแสงยูวีและสารเคลือบผิวชนิดซีเรียมออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีในคอมโพสิตระหว่างฟิวิซีและผงซีลี้อยไม้. *วารสารวิจัย มช (บศ)*, 2010; 10(2) : 1-9.
- [3] ศุภศิษย์ ศรีอักษรินทร์ สันติ สุขสะอาด วุฒิพล หัวเมืองแก้ว และทรงกลด จารุสมบัติ. การตลาดของผลิตภัณฑ์ไม้ประกอบพลาสติกในประเทศไทย. *วารสารวนศาสตร์*, 2555; 31(1) : 46-54.
- [4] Andreas K. Wood Polymer Composites and their contribution to cascading utilization. *Journal of Cleaner Production*, 2016;110: 9-15.
- [5] Yanjun X, Callum ASH, Zefang X, Holger M, Carsten M. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites: Part A*, 2010;41 : 806-819.
- [6] Yang S, Hyun JK, Hee JP, Bum LJ, Taek SH. Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites. *Composite Structures*. 2007;77: 45-55.
- [7] Anuchit K., Utai M. Design of Experiment: Wood Composite Based on Crosslinked Polypropylene, *The 18th International Conference on Composite Materials*. 21-26 August 2011. Jeju island, Korea.
- [8] Meekum U, Khongrit A. Toughening Of Wood Plastic Composite Based On X-PP, *Proceeding of PPS-31: The 31st International Conference of the Polymer Processing Society*, 7-11 June 2015, Jeju Island, Korea, doi: 10.1063/1.4942319.
- [9] อนุชิต คงฤทธิ์, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. ผลกระทบของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแพ. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2018; 11(1): 18-28.
- [10] Sarawut R, Watanachai S, Sarot J, Sunan T. Highly Filled Polypropylene Rubber Wood Flour Composites. *Engineering Journal*, 2011;15(2): 17-30.
- [11] Mehdi T. Ghanbar E. Water Uptake and Mechanical Characteristics of Natural Filler-Polypropylene Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2003;88 : 941-946.
- [12] Sombatsompop N. and Chaochanchaikul K. 2004. Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability and Extrudate Texture of Poly(vinyl Chloride)/Wood Sawdust Composites. *Polymer International*, 53(9) : 1210-1218.
- [13] Moe MT, Kin L. Effect of Environmental Aging on the Mechanical Properties of Bamboo-Glass

Fiber Reinforced Polymer Matrix Hybrid Composites. 2002

- [14] Chin-San W. Renewable Resource-Based Green Composites of Surface-Treated Spent Coffee Grounds and Polylactide: Characterisation and Biodegradability. *Polymer Degradation and Stability*, 2015; 121:51-59.
- [15] García-García D, Carbonell A, Samper MD, García-Sanoguera D, Balart R. Green Composites Based on Polypropylene Matrix and Hydrophobized Spent Coffee Ground (SCG) Powder, *Composites Part B*. 2015; 78: 256-265.