



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลกระทบของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟ

Effect of Compatibilizing Agents on Mechanical and Physical Properties of Spent Coffee Ground Filled Polypropylene Composites

อนุชิต คงฤทธิ์^{1*} จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร²

¹ สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Anuchit Khongrit^{1*} Jittiwat Nithikarnjanatharn²

¹ Industrial Management (Continuing Program), Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: anuchit.kh@nrru.ac.th; Telephone: 08 5860 3339

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ สำหรับนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ สารช่วยผสมที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แก่ ไวนิลไตรเมทอทอกซีไซเลน 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอทอกซีไซเลน และพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮไดรด์ ใช้เครื่องอัดรีดสกรูในการผสม และขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติด้วยกระบวนการการกดอัดร้อน ทำการทดสอบสมบัติแรงดึง สมบัติความต้านทานแรงกระแทก ความแข็ง ดัชนีการหลอมไหล และอุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อน และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ผลการทดสอบพบว่าคอมโพสิตของที่ใช้สารช่วยผสมไวนิลไตรเมทอทอกซีไซเลน มีค่าความต้านทานแรงดึงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และอุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อนสูงที่สุดในการวิจัยนี้ แต่คอมโพสิตที่มีค่าความต้านทานแรงกระแทกและความแข็งสูงที่สุดคือคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักชี้ให้เห็นว่าการใช้สารช่วยผสมไวนิลไตรเมทอทอกซีไซเลน และพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮไดรด์ช่วยเพิ่มการผสมตัวกันระหว่างเฟสของพอลิโพรพิลีนกับกากกาแฟ สุดท้ายได้เลือกคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟที่เติมพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮไดรด์มาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมแก่การสร้างเป็นบรรจุภัณฑ์

คำสำคัญ

พอลิโพรพิลีน กากกาแฟ สารช่วยผสม พอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮไดรด์ ไวนิลไตรเมทอทอกซีไซเลน อะมิโนโพรพิลไตรเอทอทอกซีไซเลน

Abstract

This research aimed to investigate the mechanical properties, and physical properties of spent coffee ground (SCG) filled polypropylene composites with different types of the compatibilizer for new product development. The

compatibilizer in this research including vinyl trimethoxy silane (VTMS), 3-aminopropyl triethoxy silane (3-ATS) and polypropylene grafted maleic anhydride (PP-g-MA). Compounding by twin screw extruder and specimen prepared by Hot compression process. Properties measurement such tensile properties, impact strength, hardness, melt flow index and heat deflections temperature (HDT) and morphology investigation was performed. The result shows that PP/SCG composite containing VTMS was presenting the highest tensile strength, modulus and HDT. While PP-g-MA was the most efficient compatibilizer to better the Impact strength and hardness of PP/SCG-MA composite. Morphology investigation of fracture surface found that VTMS and PP-g-MA enhance adhesion between polypropylene and SCG. Finally, PP/SCG-MA composite be appropriate for packaging product.

Keywords

polypropylene; spent coffee ground; compatibilizer; PP-g-MA; vinyl trimethoxy silane; aminopropyl triethoxy silane

1. บทนำ

การวิจัยหรือการพัฒนาด้านวัสดุพอลิเมอร์มิได้มุ่งเน้นเพียงแต่การศึกษาเป็นองค์ความรู้ในเชิงวิชาการเท่านั้น แต่เป็นการพัฒนาเพื่อตอบโจทย์ด้านการประยุกต์ใช้งานที่มีความหลากหลาย บางครั้งเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องบางประการของวัสดุนั้น ๆ เพื่อให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางยิ่งขึ้น หรือเป็นการสร้างเอกลักษณ์เฉพาะตัว และยิ่งไปกว่านั้นต้องสามารถพัฒนาไปสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์อีกด้วย วิธีหนึ่งที่นิยมในปัจจุบันคือการนำสารตัวเติมจากธรรมชาติ (natural filler) มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ วิธีการนี้มีข้อดีคือการลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ เพิ่มคุณสมบัติของวัสดุ เป็นสร้างมูลค่าจากวัสดุธรรมชาติเหลือทิ้ง และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวอีกด้วย

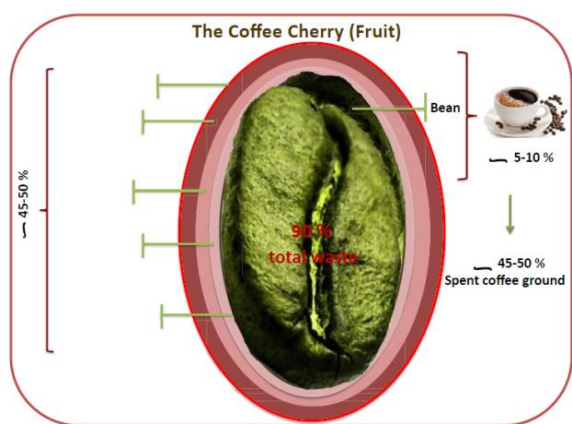
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำสารตัวเติมจากธรรมชาติมาผสมกับพอลิเมอร์ได้แก่ การสร้างไม้เทียมจากวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนผสมกับผงไม้ที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ [1] ไม้เทียมที่สร้างขึ้นมีจุดประสงค์เพื่อลดการใช้ไม้จริง ซึ่งเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ นอกจากนี้มีการนำแกลบข้าวมาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในปริมาณต่างๆ และสร้างเป็นแผ่นฟิล์มโดยใช้กระบวนการเป่าขึ้นรูป ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริง และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติอีกด้วย [2] อีกทั้งมีการนำเส้นใยปอแก้วมาผสมกับพอลิยูรีเทนกลายเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีจุดเด่นคือน้ำหนักเบา และมีสมบัติด้านการรับแรงดึงสูง [3] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่แสดงข้างต้นนี้ทำให้ทราบได้ว่าการนำสารตัวเติมจากธรรมชาติชนิดต่าง ๆ มาผสม

กับพอลิเมอร์ทำให้มีสมบัติที่ดีขึ้นเกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว

สารตัวเติมธรรมชาติที่ผู้วิจัยสนใจนำมาศึกษาในครั้งนี้คือผงกากกาแฟ (ดังรูปที่ 1) เนื่องจากในปัจจุบันกาแฟเป็นเครื่องดื่มที่คนทั่วไปนิยมดื่มกันมากมีกลิ่น และรสชาติของกาแฟที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว และมีสารคาเฟอีน (caffeine) ซึ่งมีส่วนทำให้ผู้ดื่มกาแฟตื่นตัว ไม่ง่วงซึม ทำให้นิยมดื่มกันทั่วไป [4] และมีร้านกาแฟตั้งขึ้นใหม่มากมาย ซึ่งความนิยมนี้ทำให้มีปริมาณกากกาแฟที่เหลือจากการชงกาแฟเป็นจำนวนมาก โดยมีผู้ที่นำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์ในหลายด้านได้แก่ ผลิตเป็นไบโอดีเซล นำมาเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง หรือนำไปใช้แทนขี้เลื่อยไม้ยางพาราในการเพาะเห็ดนางรมฮังการี เป็นต้น [5-8] รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบที่มีในเมล็ดกาแฟดิบซึ่งมีส่วนประกอบของเปลือก



รูปที่ 1 กากกาแฟที่ได้จากกระบวนการชงกาแฟ



รูปที่ 2 องค์ประกอบที่อยู่ในเมล็ดกาแฟ [9]

อยู่ประมาณร้อยละ 45-50 ผลกาแฟที่สามารถนำมาทำเป็นเครื่องดื่มประมาณร้อยละ 5-10 และเหลือเป็นกากกาแฟประมาณร้อยละ 45-50 กากกาแฟที่เหลือจากกระบวนการขงเครื่องดื่มแล้วมีส่วนประกอบหลักของเส้นใย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีน ลิกนิน และสารอื่น ๆ [9] ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ได้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีผู้นำกากกาแฟมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) [10] พอลิแลกติกแอซิด (PLA) [11] พอลิ-บิตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรต (PHB) [12] และพอลิโพรพิลีน (PP) [13] ซึ่งทุกงานวิจัยมีจุดประสงค์เดียวคือการนำกากกาแฟที่มีปริมาณมากขึ้นในปัจจุบันมาสร้างเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีเอกลักษณ์ และสมบัติเฉพาะตัว

ดังเช่นงานวิจัยของ Hyun Kyung Lee และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อนุภาคกากกาแฟแทนผงคาร์บอนดำในการเสริมแรง โดยทำการผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และทดสอบสมบัติทางกล ผลการศึกษาพบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับอนุภาคกากกาแฟมีค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมกับคาร์บอนดำ ต่อมา Kelen Cristina Reisa และคณะ [12] ได้นำกากของกะลากาแฟ และเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 177 ถึง 250 ไมโครเมตร (30-60 เมช) เป็นสารเสริมแรงในพอลิ-บิตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรต ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 20 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การเติมอนุภาคกากกาแฟทั้งสองชนิดในปริมาณที่มากขึ้นทำให้สมบัติการรับแรงกระแทก และมอดูลัส

ความยืดหยุ่นสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ทำให้ค่าการรับแรงดึงสูงสุดลดลง การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ทำให้เห็นว่าอนุภาคกาแฟมีการรวมกลุ่มกัน (agglomerate) และหลุด (pulled-out) ออกจากพอลิ-บิตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรตที่เป็นเมทริกซ์ เป็นผลมาจากความแข็งแรงของการประสานตัวต่ำ ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิ-บิตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรตที่เติมอนุภาคกาแฟทั้งสองชนิดไม่ได้สูงกว่าพอลิ-บิตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรต งานวิจัยทั้งสองเรื่องนี้เป็นการศึกษาการผสมกากกาแฟกับพอลิเมอร์โดยมิได้มีการเติมสารช่วยประสานหรือสารเพิ่มความเข้ากันได้แต่อย่างใด ซึ่งแท้จริงแล้วสมบัติทางกลของวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยหรือสารตัวเติมธรรมชาติที่ดีนั้นเกิดจากการประสานตัวกันที่ดีระหว่างพอลิเมอร์ และสารตัวเติม จะช่วยในการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ของส่วนที่ประสานกัน ทำให้เกิดการวิจัยถึงผลของกระบวนการปรับสภาพผิวของเส้นใยหรือการใช้สารควบคู่ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล [14]

สารประสานชนิดหนึ่งที่ยอมรับกันในปัจจุบันคือ พอลิเมอร์-กราฟท์ มาลิกอิกแอนไฮไดรต์ โดยงานวิจัยของ Chin-San Wu ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงการประสานตัวกันของพอลิแลกติกแอซิดกับกากกาแฟ (ที่ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50) ด้วยการใช้มาลิกอิกแอนไฮไดรต์-กราฟท์ พอลิแลกติกแอซิดหรือ PLA-g-MA (ปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรต์ร้อยละ 10) ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าการใช้ PLA-g-MA ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ของพอลิแลกติกแอซิดกับกากกาแฟ ทำให้วัสดุคอมโพสิตนี้มีความเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้สมบัติการรับแรงดึงสูงกว่าเมื่อเทียบกับการไม่เติม PLA-g-MA อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ค่าสมบัติการรับแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมกากกาแฟมากกว่าร้อยละ 20 และงานวิจัยของ D. García-García และคณะ [13] ได้มีการนำ PP-g-MA (ปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรต์ร้อยละ 8 ถึง 10) มาใช้ในการสร้างวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมโดยพอลิโพรพิลีนชนิดจัดเรียงตัวแบบไม่เจาะจง (polypropylene random copolymers) ผสมผงกากกาแฟร้อยละ 20 เพื่อสร้างเป็นไม้เทียม นอกจากนี้ยังได้นำปาล์มมิทวคลอไรด์ และ 2-ไกลซิโดออกซิโพรพิล ไตรเมทอกซิไซเลน (3-glycidyloxypropyl trimethoxy silane) มาใช้เป็นสารช่วยประสาน การวิเคราะห์ลักษณะของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวของกากกาแฟด้วยปาล์มมิทวคลอไรด์ด้วยเทคนิค

SEM พบว่าทำให้เกิดการแยกตัวของอนุภาคกากกาแฟ ลดการรวมตัวเป็นกลุ่ม และปรับสภาพผิวกากกาแฟเป็นไม่มีขี้ซึ่งส่งผลต่อการกระจายตัว และความเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีน และสัณฐานวิทยาของรอยแตกหักแสดงให้เห็นถึงการประสานตัวกันของกากกาแฟ และพอลิโพรพิลีนซึ่งส่งผลสอดคล้องทำให้สมบัติทางกลสูงขึ้นกว่าการไม่ใช้สารช่วยประสาน จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้พบว่าการเติมกากกาแฟไม่ควรเกินร้อยละ 20 และการใช้สารช่วยผสมนั้นช่วยเพิ่มพูนสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ผสมกับกากกาแฟ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำ พอลิโพรพิลีน ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติเด่นคือทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อสารเคมี ความร้อน และน้ำมัน สามารถทำให้มีสีสวยงามได้ ส่วนใหญ่นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่อง ขาม จาน ถัง ตะกร้า หรือกระบอกสำหรับใส่น้ำแช่เย็น [15] มาผสมกับกากกาแฟที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเพิ่มมูลค่าโดยผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิต และสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาการใช้สารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ ที่ทำให้คอมโพสิตมีสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพเหมาะสมกับการนำไปใช้สร้างเป็นผลิตภัณฑ์ โดยเลือกใช้สารช่วยผสมที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมทั่วไปภายในประเทศ โดยมีความคาดหวังว่าการวิจัยนี้จะสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีเอกลักษณ์ใหม่ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อให้เกิดประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ เป็นแนวทางในการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติให้คุ้มค่า ตลอดจนเป็นการพัฒนาขีดความสามารถด้านการวิจัยของประเทศให้สูงขึ้น

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี

พลาสติกพอลิโพรพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ (polypropylene homo polymer; PP) เกรดสำหรับการฉีดขึ้นรูป (1100 NK) ดัชนีการหลอมไหล 12 กรัม/10 นาที ของบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด สารไวน์ซิลไตรเมทอกซีไซเลน (vinyl trimethoxy silane, VTMS) Silquest A-171 สาร 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyl triethoxy silane, 3-ATS) Silquest A-1110 สารด้านการเชื่อมภาพจากความร้อน Anox PP18P และ Alkanox 240 ของบริษัท ออฟ

ตารางที่ 1 สูตรคอมโพสิตของพอลิโพรพิลีน และกากกาแฟในงานวิจัยนี้

Composite code	PP:SCG (wt/wt)	Compatibilizer
PP	100:0	-
PP/SCG	80:20	-
PP/SCG-VTMS	80:20	VTMS
PP/SCG-3ATS	80:20	3-ATS
PP/SCG-MA	80:20	PP-g-MA

ติมอลเทค จำกัด สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิก แอนด์ไฮไดรด์ (PP-g-MA) OPTIM P455 ดัชนีการหลอมไหล 110 กรัม/10 นาที (ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 1.6 ถึง 2.5) จากบริษัทโพลีเคมี เอ็กซ์เพิร์ท จำกัด และกากกาแฟ (spent coffee ground; SCG) ที่ได้จากร้านขายเครื่องดื่มกาแฟในท้องถิ่น

2.2 การสร้างตัวแบบทดลองและการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติ

สูตรคอมโพสิตในการวิจัยนี้ประยุกต์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารตัวเติมธรรมชาติและสารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ ที่ให้สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ สัดส่วนของพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟ คือ 80:20 โดยน้ำหนัก ซึ่งสูตรคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนและกากกาแฟสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

กากกาแฟสดที่ได้จากกระบวนการชงกาแฟนำมาตากแดดประมาณ 3 วัน และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นที่อยู่ในผงกากกาแฟ จากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบดทางกล และนำมาแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 30 mesh ซึ่งทำให้อนุภาคกากกาแฟที่ได้มีขนาดเล็กกว่า 600 ไมโครเมตรลงมา จากนั้นนำสารละลายไซเลน (สารไซเลนร้อยละ 5 ผสมกับสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 ที่มีอัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่ 9:1) [16–19] และพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮไดรด์ ผสมกับอนุภาคกากกาแฟในปริมาณ 2 phr (2 ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักของกากกาแฟ 100 ส่วน) ด้วยเครื่องผสมทางกล (high speed mixture) เป็นเวลา 5 นาทีจึงนำไปผสมเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน และเติมสารด้านการเชื่อมภาพ

จากความร้อนในปริมาณ 0.1 phr เทียบกับน้ำหนักของคอมพอสิต

นำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder mixture) ที่มี L/D Ratio 20 อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมคือ 165-180°C จากส่วนป้อน (feed zone) ไปจนถึงส่วนส่ง (metering zone) ตามลำดับ และนำไปขึ้นรูปเป็นเม็ดตั้งรูปที่ 3 จากนั้นเข้าสู่กระบวนการกดอัดร้อน (compression molding) ที่อุณหภูมิ 190°C แรงดัน 1,500 psi เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ

2.3 การทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ

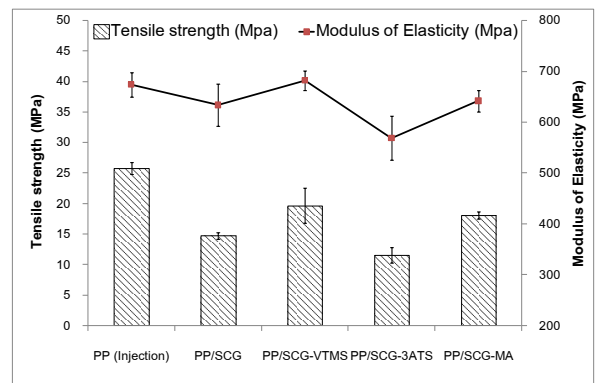
การทดสอบสมบัติแรงดึง (tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ความเร็วการดึงเคลื่อนที่ 50 มิลลิเมตร/นาที บันทึกผลค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยพลังงานกระแทก 2.7J การทดสอบความแข็งแบบชอร์ ดี (Shore D) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 น้ำหนักกด 10 lbf การทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล (melt flow index หรือ MFI) มาตรฐาน ASTM D 1238 ที่อุณหภูมิ 200°C น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม และการทดสอบการทดสอบอุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อน (heat deflections temperature หรือ HDT) ตามมาตรฐาน ASTM D648 น้ำหนักภาระงาน 0.455 MPa และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3. ผลการทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบสมบัติแรงดึง (tensile properties) ของการวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 พอลิโพรพิลีนเม็ดใหม่มีค่า tensile strength เท่ากับ 25.79 MPa และ modulus of elasticity เท่ากับ 674.15 MPa สำหรับ tensile strength ของคอมพอสิตสูตร PP/SCG, PP/SCG-VTMS, PP/SCG-3ATS และ PP/SCG-MA มีค่าเป็น 14.73 19.67 11.56 และ 18.06 MPa ตามลำดับ ค่า modulus of elasticity ของคอมพอสิต



รูปที่ 3 พอลิโพรพิลีนกับผงกากกาแฟที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่



รูปที่ 4 ผลการทดสอบสมบัติแรงดึง

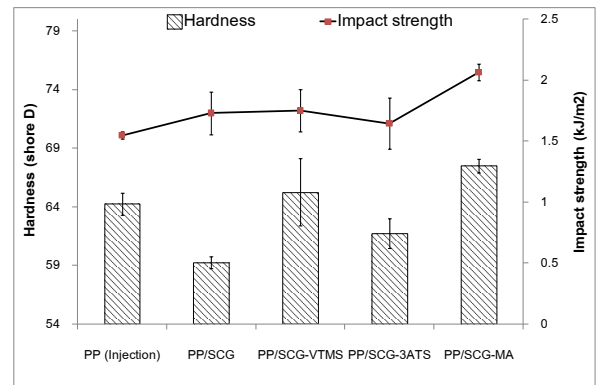
สูตร PP/SCG, PP/SCG-VTMS, PP/SCG-3ATS และ PP/SCG-MA มีค่าเป็น 634.02 682.33 569.26 และ 642.16 MPa ตามลำดับ โดยค่า tensile strength มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 11.3 ซึ่งมากกว่าผลค่า modulus of elasticity ที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยร้อยละ 4.7 เป็นผลมาจากค่า tensile strength มีการกระจายตัวของข้อมูลที่สูงกว่า

จากรูปให้เห็นว่าคอมพอสิตพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟที่ใช้ไนล่อนโรตารี่ทอกริดเป็นสารช่วยผสมมีผลการทดสอบสมบัติแรงดึงสูงสุด รองลงมาคือ คอมพอสิตสูตร PP/SCG-MA ที่ใช้พอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนไดไฮโดรด์ และคอมพอสิตสูตร PP/SCG-3ATS มีผลการทดสอบสมบัติแรงดึงต่ำที่สุด ซึ่งอนุภาคกากกาแฟที่เติมเข้าไปนั้นทำให้เกิดจุดความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration) ในขณะทำการทดสอบแรงดึง หากการยึดเกาะระหว่างเฟส (interfacial adhesion) ของ

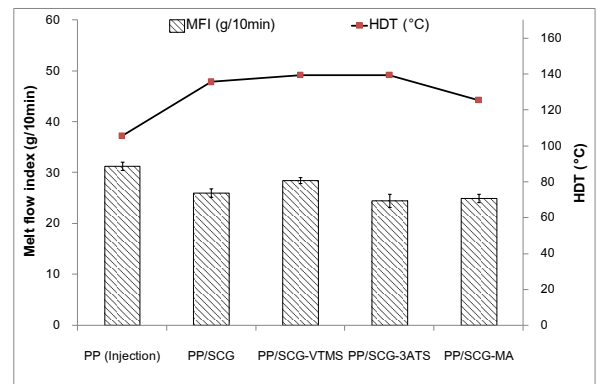
พอลิเมอร์กับอนุภาคกากกาแฟดำ จะส่งผลให้การส่งผ่านแรงกระทำจากเฟสของพอลิโพรพิลีนไปยังสารตัวเติมได้ไม่ดี จึงทำให้คอมโพสิตนั้นมีความแข็งแรงทางกลต่ำลง [20,21] ในงานวิจัยนี้พบว่าสารไวไนลไตรเมททอกซีไซเลนและพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์ทำให้อันตรกิริยาของพอลิเมอร์กับ อนุภาคกากกาแฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง และความแกร่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ข้อมูลดังรูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็ง (Hardness) ในงานวิจัยนี้ ค่า Impact strength ของคอมโพสิตที่เติมกากกาแฟทุกสูตรมีค่ามากกว่าพอลิโพรพิลีนเม็ดใหม่ (1.55 kJ/m²) คอมโพสิตสูตร PP/SCG-MA เป็นสูตรที่มีค่าสูงสุดคือ 2.07 kJ/m² รองลงมาคือคอมโพสิตสูตร PP/SCG-VTMS, PP/SCG และ PP/SCG-3ATS ซึ่งมีค่าเป็น 1.75 1.73 และ 1.65 kJ/m² ตามลำดับ และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยที่ร้อยละ 7.5 ผลการทดสอบความแข็งของการวิจัยนี้มีค่าระหว่าง 59.25 ถึง 67.50 shore D คอมโพสิตสูตร PP/SCG-MA มีค่าความแข็งสูงสุดคือ 67.50 รองลงมาคือคอมโพสิตสูตร PP/SCG-VTMS, PP/SCG-3ATS และ PP/SCG ซึ่งมีค่าความแข็งเป็น 65.25 61.75 และ 59.25 shore D ตามลำดับ และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.9 เท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะมาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์ที่เป็นส่วนหนึ่งของพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์ สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของกากกาแฟ (วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส) ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมกันระหว่างอนุภาคกากกาแฟกับสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนได้เป็นอย่างดี ดังนั้นเมื่อมีแรงกระแทกเข้ามากระทำจึงสามารถดูดซับแรงกระแทกได้สูง [22,23] และในกรณีนี้ยังพบว่าช่วยเพิ่มความแข็งแรงอีกด้วย

การทดสอบสมบัติทางกายภาพได้แก่ ดัชนีการหลอมไหล (MFI) และอุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อน (HDT) ที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 พอลิโพรพิลีนมี MFI เท่ากับ 31.30 g/10 min และเมื่อเติมผงกากกาแฟลงไป (PP/SCG) ความหนืดจึงสูงขึ้น ทำให้ดัชนีการหลอมไหลลดลงเป็น 26 g/10 min คอมโพสิต PP/SCG-VTMS มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 28.50 g/10 min ส่วนคอมโพสิต PP/SCG-3ATS มีค่าเป็น 24.50 g/10 min และคอมโพสิตสูตร PP/SCG-MA มีค่า MFI อยู่ที่ 25 g/10 min ผลการทดสอบค่า HDT



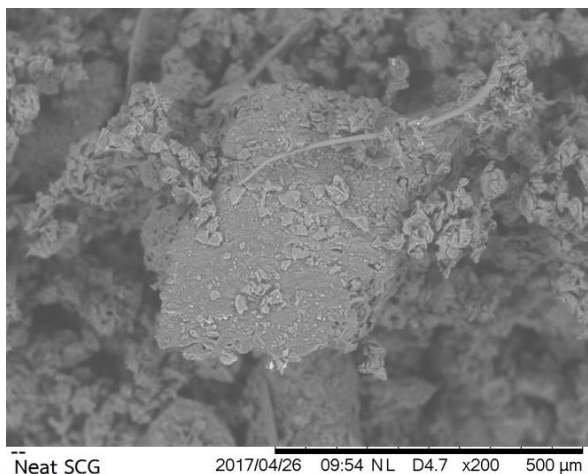
รูปที่ 5 ผลการทดสอบความแข็งและความต้านทานแรงกระแทก



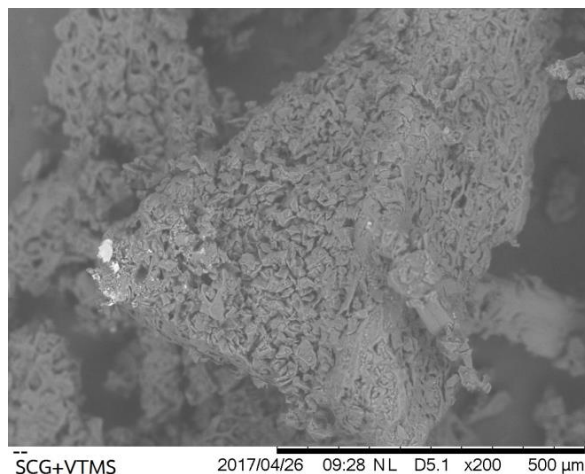
รูปที่ 6 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหลและอุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อน

ของพอลิโพรพิลีนมีเท่ากับ 105.57°C และคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของกากกาแฟทุกสูตรมีค่า HDT สูงกว่า โดยมีค่าระหว่าง 125.47 °C ถึง 139.40 °C และสูตรที่ใช้สารไซเลนทั้งสองชนิดมีค่า HDT สูงกว่าสูตรที่ใช้พอลิโพร-พิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า MFI และ HDT มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.2 และ 1.1 ตามลำดับ

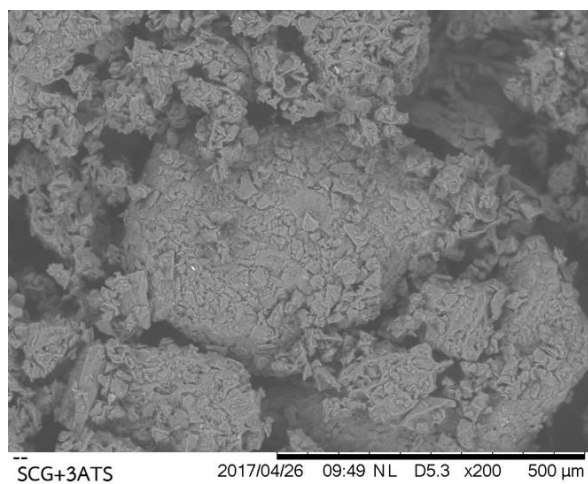
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของกากกาแฟสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ที่กำลังขยาย 200 เท่า (X200) รูปที่ 8 แสดงอนุภาคกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไวไนลไตรเมททอกซีไซเลน และรูปที่ 9 อนุภาคกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอททอกซีไซเลน พบว่าอนุภาคของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารไซเลนทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะเป็นรอยแตก ขรุขระมากกว่ากากกาแฟที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว



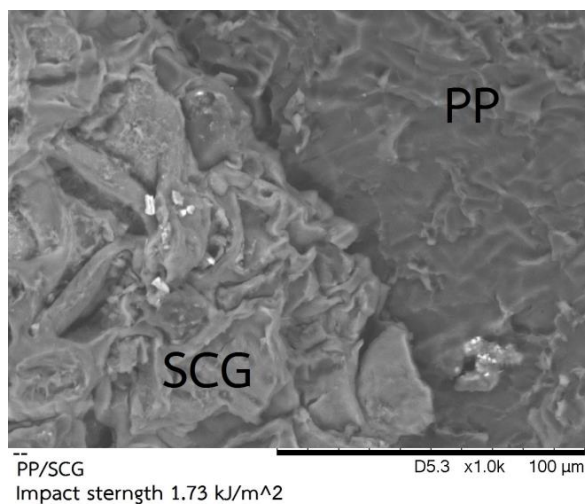
รูปที่ 7 อนุภาคกากกาแฟ (X200)



รูปที่ 8 อนุภาคกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไวนิลไตรเมททอกซีไซเลน (X200)



รูปที่ 9 อนุภาคกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (X200)

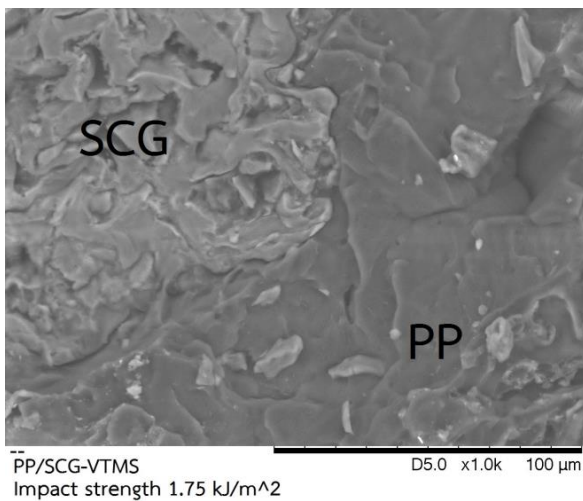


รูปที่ 10 คอมโพสิต PP/SCG (X1000)

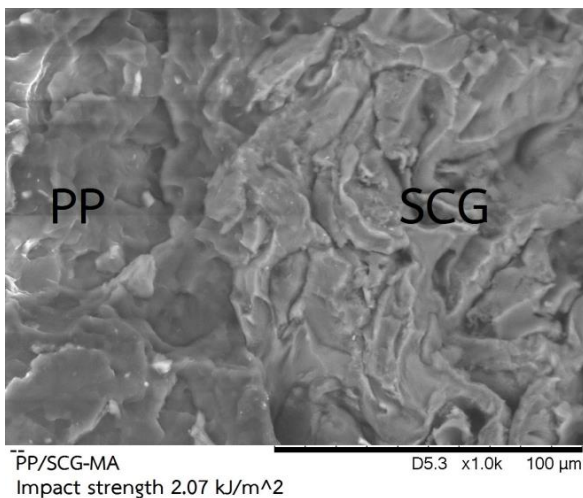
จากนั้นทำการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกดังรูปที่ 10 คอมโพสิต PP/SCG แสดงให้เห็นว่าการแยกเฟสระหว่างกากกาแฟ และพอลิโพรพิลีนอย่างชัดเจน แต่สำหรับคอมโพสิต PP/SCG-VTMS (รูปที่ 11) และคอมโพสิต PP/SCG-MA (รูปที่ 12) มีการประสานตัวกันระหว่างกากกาแฟ และพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่าคอมโพสิต PP/SCG อย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 13 คอมโพสิต PP/SCG-3ATS แม้ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนแล้วแต่กลับพบว่าการประสานกันระหว่างกากกาแฟและพอลิโพรพิลีนไม่ดีเหมือนการใช้ไวนิลไตรเมททอกซีไซเลน และพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์

4. การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่าการทดสอบสมบัติทางกายภาพ โดยดูจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ทั้งนี้เป็นเป็นผลมาจากการใช้สารตัวเติมธรรมชาติที่มีลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่กว้าง และอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) ที่แตกต่างกันนั้นส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ [23] ค่า MFI ของคอมโพสิตทุกสูตรมีค่าต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน แต่มีค่า HDT สูงกว่า เนื่องจากฟิลเลอร์ทำให้ความหนาแน่นของคอมโพสิตสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนืด และอุณหภูมิ



รูปที่ 11 คอมโพลีเมอร์ PP/SCG-VTMS (X1000)



รูปที่ 12 คอมโพลีเมอร์ PP/SCG-MA (X1000)

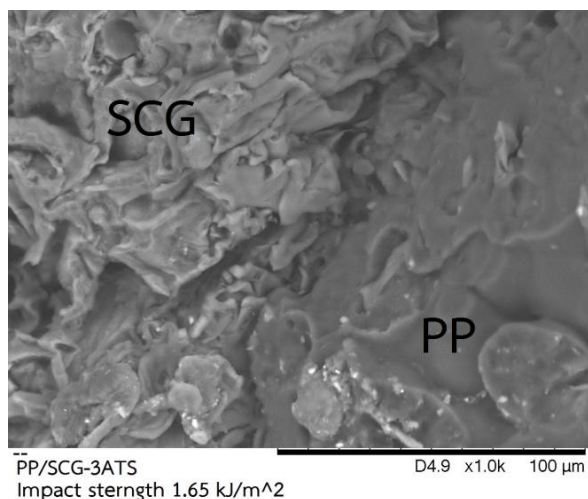
การติดเนื่องมาจากความร้อนของพอลิเมอร์หมอมมากขึ้นตามไปด้วย [24]

คอมโพลีเมอร์ PP/SCG มีสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าคอมโพลีเมอร์ที่ใช้สารช่วยผสมทั้งหมด อันเนื่องมาจากมีพันธะการยึดเหนี่ยวที่ต่ำระหว่างไฮโดรฟิลิกฟิลเลอร์ (hydrophilic filler) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันมีขั้ว กับไฮโดรโฟบิกเมทริกซ์ (hydrophobic matrix) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันไม่มีขั้ว [25] ทำให้ทั้งสองเฟสไม่สามารถผสมตัวกันได้ดี ภาพ SEM รูปที่ 10 ยืนยันให้เห็นว่าการแยกเฟสของพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคกากกาแฟอย่างชัดเจนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chin-San Wu. [11] และ D. García-García และคณะ [13] ที่พบว่าอนุภาคกากกาแฟมีการแยกตัวและหลุดออกจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้

ความสามารถในการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นในการทดสอบได้น้อยจึงทำให้ความต้านทานแรงกระแทกต่ำลง

คอมโพลีเมอร์ PP/SCG-MA และคอมโพลีเมอร์ PP/SCG -VTMS เป็นคอมโพลีเมอร์ที่มีความต้านทานแรงกระแทกสูงสุด และมีสมบัติแรงดึงสูงกว่า PP/SCG ในกรณีของการใช้ PP-g-MA นั้นช่วยให้สมบัติของคอมโพลีเมอร์สูงขึ้นได้เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันแอนด์ไฮโดรด์ ที่กราฟท่อนสายโซ่ของพอลิเมอร์ทำหน้าที่เชื่อมต่อกันทางเคมีระหว่างพอลิโพรพิลีนกับสารตัวเติมธรรมชาติซึ่งในการวิจัยนี้คืออนุภาคกากกาแฟ ส่วนกรณีของการใช้ไซเลนเพื่อปรับสภาพผิวของกากกาแฟทำให้เกิดพันธะ Si-O-Si/Si-O-C ทำให้เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวของกากกาแฟด้วยไซเลนแล้วช่วยให้ผิวหน้าสัมผัสของพอลิโพรพิลีนและกากกาแฟผสานตัวดีขึ้น [13] ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ช่วยยืนยันว่าสมบัติทางกลที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการผสมผสานตัวกันของพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคกากกาแฟที่มีช่องว่างระหว่างเฟสน้อยกว่าการไม่ใช้สารช่วยผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมโพลีเมอร์ PP/SCG-MA ดังรูปที่ 12 เฟสของพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคกากกาแฟมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า PP/SCG-VTMS ส่งผลให้การส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ที่เกิดขึ้นในคอมโพลีเมอร์ PP/SCG-MA ดีที่สุดในการวิจัยนี้

อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลการวิจัยของ García-García และคณะ [13] ได้ เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดัด (Flexural properties) และความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ แต่สิ่งที่งานวิจัยนี้พบและสอดคล้องกันคือการใช้ PP-g-MA เป็นสารช่วยผสมส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าการใช้สารช่วยผสมชนิดไซเลนคอมโพลีเมอร์ PP/SCG-3ATS มีสมบัติทางกลต่ำที่สุดในการวิจัยนี้ จากภาพ SEM ที่ได้ดังรูปที่ 13 พบว่าเกิดการแยกเฟสและช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีนกับอนุภาคกากกาแฟอีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับรอยแตกหักของคอมโพลีเมอร์ PP/SCG พบว่าอนุภาคกากกาแฟของ PP/SCG-3ATS มีการแตกตัวมากกว่า จึงเป็นไปได้ที่ทำให้ค่า Aspect ratio ของอนุภาคกากกาแฟต่ำลงจึงทำให้สมบัติทางกลของคอมโพลีเมอร์ PP/SCG-3ATS ต่ำกว่าคอมโพลีเมอร์ PP/SCG-MA และคอมโพลีเมอร์ PP/SCG-VTMS สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hyeok-Jin Kwona [23] ที่สรุปไว้ว่าหากฟิลเลอร์มีค่า Aspect



รูปที่ 13 คอมโพสิต PP/SCG-3ATS (X1000)



รูปที่ 14 ถังบรรจุภัณฑ์ของเนกประสงค์ และกล่องใส่นามบัตร ที่ผลิตจากคอมโพสิต PP/SCG-MA

ratio ต่ำลงจะทำให้ให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ของเมทริกซ์ลดลงตามไปด้วย

5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบสมบัติพบว่าค่าความต้านทานการรับแรงดึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น อุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อนของคอมโพสิตที่ใช้สารช่วยผสมผสานไวนิลไตรเมทอทอกซีไซเลน (PP/SCG-VTMS) มีค่าสูงที่สุดในการวิจัยนี้ ส่วนคอมโพสิตที่มีค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็งสูงที่สุดในการวิจัยนี้คือ PP/SCG-MA ที่ใช้พอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์เป็นสารช่วยผสมผสาน ผลการวิเคราะห์หาลักษณะพื้นฐานวิทยาของรอยแตกหักที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรง

กระแทกชี้ให้เห็นว่า การใช้สารไวนิลไตรเมทอทอกซีไซเลน (VTMS) และพอลิโพรพิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนด์ไฮโดรด์เป็นสารช่วยผสมผสาน ทำให้พอลิโพรพิลีนที่เป็นเมทริกซ์เข้ากันได้กับกากกาแฟที่เป็นฟิลเลอร์ เพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ของเมทริกซ์ให้สูงขึ้น จึงมีสมบัติทางกลที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสมผสาน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าสาร 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอทอกซีไซเลน เป็นสารช่วยผสมผสานที่มีประสิทธิภาพด้อยกว่าสารช่วยผสมผสานอื่นๆ เนื่องจากเมื่ออนุภาคของกากกาแฟผ่านการปรับสภาพผิวด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอทอกซีไซเลนแล้วนั้น มีลักษณะการแตกตัว และลดขนาดอนุภาค อีกทั้งภาพ SEM แสดงให้เห็นว่ามีช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีนกับกากกาแฟ

เพื่อให้เห็นถึงการนำไปใช้เป็นรูปธรรมทางผู้วิจัยจึงมีความต้องการนำคอมโพสิตจากงานวิจัยนี้ไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ ซึ่งบรรจุภัณฑ์ได้รับการทางกลหลายอย่างขณะใช้งาน เกิดแรงกระทำในลักษณะของการกดอัด หรือการกระแทกที่เกิดขึ้นจากการบรรจุ การแบกถือ การบรรจุทุก และการขนส่ง ดังนั้นตามทฤษฎีแล้ววัสดุบรรจุภัณฑ์ควรมีสมบัติที่ทนต่อภาระทางกลที่เกิดขึ้น เพื่อให้แน่ใจว่าผลิตภัณฑ์จะปราศจากความเสียหายขณะใช้งาน [26] ซึ่งสมบัติที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับต้นสำหรับภาชนะบรรจุภัณฑ์นี้คือ impact strength, hardness และ modulus of elasticity ผู้วิจัยจึงเลือกคอมโพสิตสูตร PP/SCG-MA มาสร้างเป็นกล่องบรรจุภัณฑ์ของเนกประสงค์ และกล่องใส่นามบัตร (ดังรูปที่ 14) โดยได้นำไปจัดแสดงในงานนิทรรศการที่ใหญ่ที่สุดของอุตสาหกรรมชิ้นส่วนการผลิต และการจับคู่ทางธุรกิจของอาเซียน (SUBCON Thailand 2017) วันที่ 17-20 พฤษภาคม 2560 ณ ศูนย์ประชุมไบเทค บางนา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ สถาบันพลาสติก กระทรวงอุตสาหกรรม และบริษัท น่ายางสง อุตสาหกรรม จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยและการดำเนินการต่าง ๆ ภายใต้โครงการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมคอมโพสิตและการแปรรูปพลาสติกชีวภาพ ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น และสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตนครราชสีมาที่ให้การ

สนับสนุนด้านเครื่องมือวิเคราะห์จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Khongrit A, Meekum U. DESIGN OF EXPERIMENT: WOOD COMPOSITES BASED ON CROSSLINKED POLYPROPYLE. In *18th International Conference on Composite Materials, 21-26 August 2011, Jeju Island. Korea*; 2011.
- [2] Khaliq M, Azman H, Aznizam AB. Tensile, Oxygen Barrier and Biodegradation Properties of Rice Husk-Reinforced Polyethylene Blown Films. *Agricultural Biomass Based Potential Materials*. 2015: 143–154.
- [3] Janusz D, Patrycja K. Effect of kenaf fibre modification on morphology and mechanical properties of thermoplastic polyurethane materials. *Industrial Crops and Products*. 2015; 74: 566–576.
- [4] สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยรามคำแหง. บทบาทของกาแฟในสังคมมนุษย์ และคุณสมบัติของกาแฟในฐานะสมุนไพร. เข้าถึงได้จาก: http://www.lib.ru.ac.th/journal/about_coffee02.html [เข้าถึงเมื่อ 22 เมษายน 2559].
- [5] เจริญพร ถาวรประเสริฐ, ธนัชชา สุวรรณวิภากร, พิชัย เอี้ยวเล็ก, กฤช สมนึก. การศึกษากระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยตัวทำละลายและระยะเวลาสกัด. ใน *การประชุมวิชาการ วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 16, 17-19 มีนาคม, กรุงเทพฯ. ประเทศไทย*: 2558. p. 390–392.
- [6] พรพรรณ แสนภูมิ, มนัสนันท์ นพรัตน์ไมตรี, สุภาวดี ฉิมทอง. การปรับปรุงกากกาแฟด้วยเอนไซม์เพื่อใช้เป็นพรีไบโอติกส์ในอาหารสัตว์. *คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยศิลปากร*; 2558.
- [7] นพพร สุดใจธรรม. เชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟ. สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหิดล; 2546.
- [8] วันทนา นาคิลินธ์. การใช้กากกาแฟแทนขี้เลื่อยในการเพาะเห็ดนางรมอังการี. สาขาสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2556.
- [9] Rocio CV, Guadalupe LP, Hayde A, Castañeda V, Oomah DB. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*. 2015; 54: 24–36.
- [10] Lee HK, Young GP, Taikyeong J, Young SS. Green nanocomposites filled with spent coffee grounds. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015; 132(23).
- [11] Wu CS. Renewable resource-based green composites of surface-treated spent coffee grounds and polylactide: Characterisation and biodegradability. *Polymer Degradation and Stability*. 2015; 121: 51–59.
- [12] Kelen CR, et al. Particles of Coffee Wastes as Reinforcement in Polyhydroxybutyrate (PHB) Based Composites. *Materials Research*. 2015; 18(3): 546–552.
- [13] 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.
- [14] NABI SD, JOG JP. Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Advances in Polymer Technology*. 1999; 18(4): 351–363.
- [15] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกประเภทและการใช้งาน. เข้าถึงได้จาก: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_and_usage_plas.html [เข้าถึงเมื่อ 7 พฤษภาคม 2559].
- [16] Yanling W, Rongrong Q, Xiong C, Huang M. Effects of Coupling Agent and Interfacial Modifiers on Mechanical Properties of Poly (lactic acid) and Wood Flour Biocomposites. *Iranian Polymer Journal*. 2011; 20(4): 281–294.
- [17] Shanshan L, Haiyan T, Jiyong G, Yanhua Z. Silane Modified Wood Flour Blended with Poly (lactic

- acid) and its Effects on Composite Performance. *Bio Resources*. 2015; 10(3): 5426–5439.
- [18] Fang L, Liang C, Guo W, Yongping C, Wang Z. Influence of silane surface modification of veneer on interfacial adhesion of wood-plastic plywood. *Applied Surface Science*. 2014; 288: 682–689.
- [19] Benttini HPS, Bonse CB, Melo AE, Munoz ARP. Effect of sawdust surface treatment and compatibilizer addition on mechanical behavior, morphology, and moisture uptake of polypropylene/sawdust composites. *Polymer engineering and science*. 2009; 50(5): 978–985.
- [20] Benttini HPS, Bonse CB, Melo AE, Munoz ARP. Effect of Sawdust Surface Treatment and Compatibilizer Addition on Mechanical Behavior, Morphology, and Moisture Uptake of Polypropylene/Sawdust Composites. *Polymer Engineering and science*. 2010; 50(5): 978–985.
- [21] Kim HS, Lee BH, Choi SW, Kim S, Kim HJ. The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007; 38: 1473–1482.
- [22] Yang HS, Kim HJ, Son J, Park HJ, Lee BJ, Hwang TS. Rice-husk flour filled polypropylene composites; mechanical and morphological study. *Composite Structures*. 2004; 63: 305–312.
- [23] Kwona JH, et al. Tensile properties of kenaf fiber and corn husk flour reinforced poly (lactic acid) hybrid bio-composites: Role of aspect ratio of natural fibers. *Composites: Part B*. 2014; 56: 232–237.
- [24] Nunesa GS, et al. Study of Composites Produced with Recovered Polypropylene and Piassava. *Materials Research*. 2017; 20(1): 144–150.
- [25] 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.
- [26] Sajid A, Sabu T. *Polymers for Packaging Applications*. Canada: Apple Academic Press; 2014.