

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยาง
อีพีดีเอ็มจากซีลประตูรถยนต์

Study of Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene Blended with EPDM Rubber Powder from Automotive Door Seals

ศิรินทร ทองแสง^{1*} ณัฐรัตน์ เก่งกล้า¹ นันทินี บุญจันทร์¹ และกมลทิพย์ ถิรดิษสกุล¹
Sirinthorn Thongsang^{1*} Nattarat Kengkla¹ Nuntinee Boonjan¹ and
Kamonthip Tiraditsakul¹

Received: January 2, 2024; Revised: April 24, 2024; Accepted: April 24, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางอีพีดีเอ็มจากซีลประตูรถยนต์ ซึ่งพยางอีพีดีเอ็มทำการเตรียมทั้งแบบไม่ตีวัลคาไนซ์และตีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล โดยศึกษาการตีวัลคาไนซ์ของอีพีดีเอ็มในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 220 °C และ 230 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นบดต่อในเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 200 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปตรวจสอบความสามารถในการตีวัลคาไนซ์ของยางจากวิธีการสกัดด้วยชอกเลต เพื่อเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยนำพยางอีพีดีเอ็มทั้งสองแบบผสมลงในพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 0/100 10/90 20/80 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมภายในแล้วขึ้นรูปแผ่นจากเครื่องอัดรีด และนำไปทดสอบสมบัติการรับแรงดึงและแรงกระแทก รวมถึงตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า การตีวัลคาไนซ์ในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 230 °C มีเปอร์เซ็นต์ของยางส่วนที่ละลายสูงกว่าที่อุณหภูมิ 220 °C ซึ่งแสดงถึงสามารถในการตีวัลคาไนซ์ดีกว่า โดยพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางอีพีดีเอ็มทั้งสองแบบในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า Young's Modulus ลดลง แต่ความยืดหยุ่น จุดขาด และความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความต้านแรงดึงเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมพยางอีพีดีเอ็ม

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹ Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

* Corresponding Author; Tel. 08 1777 1178, E - mail: sirinthorn.tho@mail.kmutt.ac.th

แบบไม่วัลคาไนซ์และแบบวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งการผสมพยางอีพีดีเอ็มแบบวัลคาไนซ์ลงในพอลิโพรพิลีนให้สมบัติเชิงกลค่อนข้างดีกว่าพยางแบบไม่วัลคาไนซ์ เนื่องจากพยางอีพีดีเอ็มแบบวัลคาไนซ์ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวได้ดี ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนมากขึ้น อีกทั้งพยางแบบวัลคาไนซ์ถูกตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระและสามารถเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น

คำสำคัญ : พยางอีพีดีเอ็ม; ซีลประตูรถยนต์; ยางวัลคาไนซ์; พอลิโพรพิลีน

Abstract

This research studied the mechanical and morphological properties of polypropylene blended with Ethylene Propylene Dine Monomer (EPDM) rubber powder from automotive door seals. EPDM rubber powder was prepared as non-devulcanized and devulcanized by a thermo-mechanical method. The devulcanization of EPDM rubber powder in the crushing stage on a two-roll mill was studied at 220 °C and 230 °C, and a roller speed of 40 rpm for 25 minutes, and then further mashed in an internal mixer at 200 °C, and a rotor speed of 140 rpm for 10 minutes. Then, the devulcanization ability of the rubber was determined using the Soxhlet Extraction method to select the appropriate temperature. Both types of EPDM powder were mixed in polypropylene (PP) in the ratio of 0/100, 10/90, 20/80, 30/70, and 40/60 %wt. using an internal mixer and molded into a sheet by a hot press. It was found that the rubber devulcanization in the crushing stage on a two-roll mill with a temperature of 230 °C had a higher sol content than that of 220 °C, indicating a better ability to devulcanize. The tensile modulus of PP blends decreased with increasing both types of EPDM rubber powder, while the elongation at break and impact strength increased. The tensile strength tended to decrease when increasing with non-devulcanized and devulcanized EPDM at 30 and 40 %wt., respectively. The addition of devulcanized EPDM into PP gave rather better mechanical properties than that of non-devulcanized EPDM. The reason was that the devulcanized EPDM was a smaller powder and had a good dispersion, resulting in more surface area for adhesion with the PP matrix. In addition, the devulcanized EPDM that was scissored crosslinks became the free molecular chains, leading to a greater compatibility with PP.

Keywords: EPDM Rubber Powder; Automotive Door Seals; Devulcanized Rubber; Polypropylene

บทนำ

ปัจจุบันมีการนำวัสดุพยางมาใช้ในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความโดดเด่นทั้งทางด้านความสามารถในการรับแรงกระแทก รับแรงสั่นสะเทือน หรือกันการรั่วซึมของของไหล อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก็เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการนำพยางมาใช้กันมากไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์อย่างเช่น ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน ยางไนไตรล์ ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนหรือพยางอีพีดีเอ็ม เป็นต้น ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมสำหรับการผลิตยางล้อรถ ยางรองแท่นเครื่องยนต์ ซีลประตูรถยนต์ สายยางน้ำมันเบรก เป็นต้น [1] - [2] โดยชิ้นส่วนยางเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางทำให้ยางแข็งแรงขึ้นและมีสมบัติความเป็นอิลาสติกที่ดี แต่โครงสร้างการเชื่อมขวางของยางวัลคาไนซ์นี้

ทำให้ไม่สามารถนำไปแปรใช้ใหม่ (Recycle) ได้โดยตรง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการตัดขาดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางก่อนเพื่อให้กลับไปสู่โครงสร้างคล้ายเดิมที่เรียกว่า กระบวนการดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization Process) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล การใช้คลื่นอัลตราโซนิก การใช้คลื่นไมโครเวฟ การใช้สารเคมี เป็นต้น [3] - [4] พบว่า ความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิบารเรลของเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนร่วม (Co-Rotating Twin-Screw Extruder) เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการดีวัลคาไนเซชันด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล เมื่อนำผงยางล้อรถที่มียางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบประมาณ 50 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ร่วมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ มาทำการดีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิบารเรล 140 และ 160 °C การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสกรูไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดีวัลคาไนซ์ หากใช้อุณหภูมิบารเรลตั้งแต่ 170 °C ขึ้นไป ร่วมกับการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสกรูที่สูงขึ้นจะทำให้มีการดีวัลคาไนซ์มากขึ้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิบารเรลและความเร็วรอบสกรูที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของผงยางล้อมากกว่า ดังนั้น พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการดีวัลคาไนซ์ของงานวิจัยนี้คือ การใช้อุณหภูมิบารเรลที่ 190 °C ร่วมกับความเร็วยรอบสกรู 60 รอบต่อนาที โดยส่วนใหญ่งานวิจัยได้ทำการศึกษาการนำยางที่ผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชันไปผสมกับยางบริสุทธิ์แล้วนำไปผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันใหม่ [5] - [8] จากงานวิจัยของ [8] ได้รายงานว่ายางอีพดีเอ็มจากแผ่นปูหลังคาที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกลตามด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้สารเบนโซิลเพอร์ออกไซด์เป็นสารดีวัลคาไนซ์ เมื่อนำมาผสมในยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอีนที่ปริมาณ 20 - 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอีนสามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ดีในระหว่างกระบวนการวัลคาไนเซชันได้ แต่การผสมยางอีพดีเอ็มที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยปริมาณที่มากขึ้นในยางอีพดีเอ็มบริสุทธิ์ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มของยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์ซึ่งเกิดการเชื่อมขวางมากกว่าในเมทริกซ์ยางอีพดีเอ็มบริสุทธิ์จึงทำให้สมบัติเชิงกลและความเสถียรทางความร้อนมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ เป็นการศึกษาการนำยางที่ผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชันไปผสมกับเทอร์โมพลาสติก [9] - [13] จากงานวิจัยของ [11] รายงานว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีการผสมผงยางล้อรถที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 820 วัตต์ เป็นเวลามากถึง 5 นาที ร่วมกับการผสมสารเติมแต่งยางส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเนื่องจากเกิดการยึดเกาะไม่ดีระหว่างเฟสพอลิเมอร์ทั้งสองจากการแสดงผลของค่ามอดูลัสสะสม (Storage Modulus) ที่ลดลง ส่วน [12] พบว่า เมื่อนำยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์แบบซัลเฟอร์และแบบเพอร์ออกไซด์มาผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีความร้อนร่วมกับแรงทางกลจากการนำยางอีพดีเอ็มมาเข้าเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) ที่อุณหภูมิ 210 และ 230 °C ด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้ง 4 รอบต่อนาที แล้วนำไปบดผสมต่อในเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยความเร็วโรเตอร์ 140 รอบต่อนาที ส่งผลให้การลดลงของความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (Crosslink Density) สูงถึง 85 % โดยยางที่วัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์แสดงประสิทธิภาพการดีวัลคาไนซ์ดีเยี่ยมในการตัดขาดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ส่วนยางที่วัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์กลับแสดงการเสื่อมสภาพของยางที่เป็นการตัดขาดสายโซ่โมเลกุลยางร่วมกับการตัดขาดการเชื่อมขวาง และเมื่อนำยางที่ไม่วัลคาไนซ์ ยางที่วัลคาไนซ์ และยางที่วัลคาไนซ์ผสมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงจากการยึดเกาะที่ไม่เพียงพอระหว่างเฟสพอลิเมอร์ทั้งสองโดยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผสมยางที่ไม่วัลคาไนซ์ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และงานวิจัยของ [13] รายงานว่า พอลิโพรพิลีนที่ผสมยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์ด้วยการใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-Screw Extruder) ที่ความเร็วรอบสกรู 200 รอบต่อนาที ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกที่แอมพลิจูด 13 ไมครอน ให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าการใช้แอมพลิจูดที่ต่ำกว่า โดยเฉพาะการผสมยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์ปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้สมบัติเชิงกลสูงสุดเนื่องจากทำให้เกิดพันธะระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางอีพดีเอ็ม อีกทั้งยางดีวัลคาไนซ์ที่ถูกวัลคาไนซ์อีกครั้งมีขนาดเล็กจึงส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการนำผงยางล้อซึ่งมีส่วนผสมของยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอีน [14] มาทำการดีวัลคาไนซ์ แต่การนำซิลิโคนยางอีพดีเอ็มยังไม่พบรายงานวิจัย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจนำพยางค์อีพีดีเอ็มจากซีลประตูลอยนํ้ามาผ่านกระบวนการดิวัลคาไนเซชันด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล แล้วนำมาผสมกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติการรับแรงดึงและแรงกระแทก รวมถึงตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา และเปรียบเทียบสมบัติกับพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางค์แบบไม่ดิวัลคาไนซ์ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาของการเกิดของเสียสะสมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และอาจใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีนได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 พยางค์อีพีดีเอ็มจากซีลประตูลอยนํ้า ซึ่งผ่านการคัดแยกด้วยตะแกรงขนาด 20 - 40 เมช
- 1.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรด EL-Pro™ P700J มีค่าดัชนีการไหล (MFI) เท่ากับ 12 กรัมต่อ 10 นาที (ที่อุณหภูมิ 230 °C, 2.16 กิโลกรัม) อุณหภูมิหลอมเหลว 163 °C
- 1.3 โทลูอีน (Toluene) ความบริสุทธิ์ 99.5 % เกรด AR
- 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Electric Balance) รุ่น PB 602-L (0.5 - 200g)
- 1.5 เครื่องผสมภายใน รุ่น MX300-TQ
- 1.6 เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง รุ่น MGLRM 110/1E
- 1.7 เครื่องอัดร้อน (Hot Press)
- 1.8 ตู้อบแห้ง (Hot Air Oven)
- 1.9 แม่พิมพ์ขึ้นรูปแผ่นพลาสติก
- 1.10 มีดบล็อกตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง
- 1.11 เครื่องอัดไฮดรอลิก
- 1.12 เครื่องเลื่อยสายพาน

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเตรียมยางดิวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกลตามแนวการดำเนินงานวิจัยของ [12] ที่มีการบดพยางค์อีพีดีเอ็มด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งแล้วบดต่อด้วยเครื่องผสมภายใน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำพยางค์อีพีดีเอ็มจากการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 220 และ 230 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที แล้วบดต่อในเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 200 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำยางดิวัลคาไนซ์ไปตรวจสอบความสามารถในการดิวัลคาไนซ์จากวิธีการสกัดด้วยซอกเลต โดยนำพยางค์อีพีดีเอ็มปริมาณ 10 กรัมมาแช่ในโทลูอีน 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นนำมารองและทำให้แห้งด้วยการนำเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายได้ของยางดิวัลคาไนซ์ (%Sol) ตามสมการ (1) ซึ่ง M_i และ M_f คือ ปริมาณยางดิวัลคาไนซ์ก่อนและหลังแช่ในโทลูอีน (กรัม) [12] เพื่อพิจารณาเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดิวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็ม

$$\%Sol = \left[1 - \frac{M_f}{M_i} \right] \times 100 \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2 นำพยางค์อีพีดีเอ็มแบบไม่ดิวัลคาไนซ์และแบบดิวัลคาไนซ์ผสมกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วน 0/100 10/90 20/80 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 210 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเตรียมเป็นแผ่นพรีฟอร์มด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง 20 รอบต่อนาที โดยมีช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง

7 มิลลิเมตร แล้วนำมาอัดขึ้นรูปแผ่นพลาสติกความหนา 2 และ 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C แรงดัน 175 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 12 นาที แล้วทำการหล่อเย็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำแผ่นพลาสติกหนา 2 มิลลิเมตร มาทำการตัดชิ้นงานทดสอบการรับแรงดึงด้วยมีดบล็อกตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV และแผ่นพลาสติกหนา 3 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานทดสอบรับแรงกระแทกแบบ Izod พร้อมกับทำรอยบาก ตามมาตรฐาน ASTM D256

2.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

2.2.1 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง นำชิ้นงานมาทดสอบการรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ รุ่น LR50K ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 10 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อหาค่ามอดุลัสแรงดึง ความต้านแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

2.2.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก นำชิ้นงานมาทดสอบการรับแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยง (Pendulum) ขนาด 4 จูล ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยหลังจากที่ลูกตุ้มเหวี่ยงกระแทกกับชิ้นงานทดสอบให้อ่านค่ามุมที่เปลี่ยนไป เพื่อนำไปคิดเป็นค่าพลังงานดูดซับ (Absorbed Energy) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ด้วยการนำค่าพลังงานดูดซับหารด้วยความยาวรอยบาก

2.2.3 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา นำผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ และแบบดิวลคาไนซ์ และชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการรับแรงดึงไปเคลือบทองภายใต้สภาวะสุญญากาศ จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6610LV เพื่อพิจารณาลักษณะรูปร่างของผงยางและพื้นผิวรอยขาดของชิ้นงาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

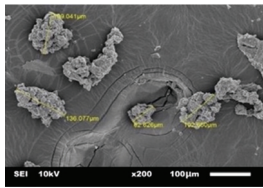
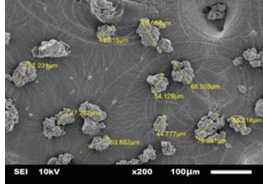
1. ผลการตรวจสอบส่วนที่ละลายได้ของยางดิวลคาไนซ์

ผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ที่ถูกเตรียมในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 220 และ 230 °C พบว่า ผงยางที่ดิวลคาไนซ์ด้วยอุณหภูมิ 220 °C มีส่วนที่ละลายของยางดิวลคาไนซ์ 19 % ในขณะที่ผงยางที่ดิวลคาไนซ์ด้วยอุณหภูมิ 230 °C มีส่วนที่ละลายของยางดิวลคาไนซ์ 24.2 % โดยเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายได้แสดงถึงความสามารถในการดิวลคาไนซ์ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการดิวลคาไนซ์มีการตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้โซ่พอลิเมอร์แทรกเข้าไปทำลายได้มากขึ้น อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งเสริมการดิวลคาไนซ์เพราะทำให้มีพลังงานมากขึ้นในการตัดขาดการเชื่อมขวาง [15] ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] กล่าวคือ เมื่อใช้อุณหภูมิในกระบวนการดิวลคาไนซ์มากขึ้นทำให้มีความสามารถในการดิวลคาไนซ์มากขึ้น ดังนั้น ผงยางดิวลคาไนซ์ที่ถูกเตรียมในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 230 °C มีความสามารถในการดิวลคาไนซ์ดีกว่า จึงเลือกอุณหภูมินี้สำหรับการเตรียมยางดิวลคาไนซ์ต่อไป

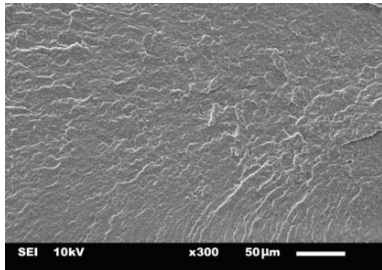
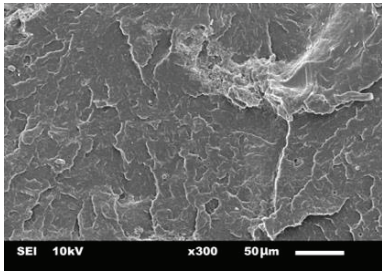
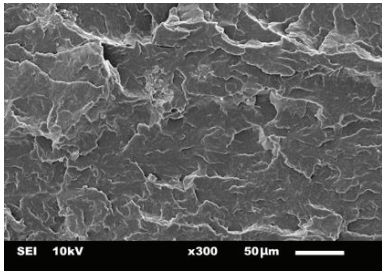
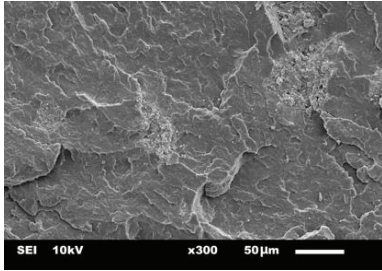
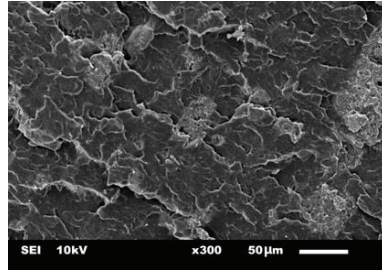
2. ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากตารางที่ 1 แสดงภาพถ่ายผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์และแบบดิวลคาไนซ์ สังเกตได้ว่ามีความคล้ายกัน กล่าวคือ มีลักษณะเป็นผงสีดำนละเอียด ซึ่งเมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่า ผงยางอีพิตีเอ็มทั้งสองแบบมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระและแยกกันอยู่เดี่ยว ๆ โดยผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ มีขนาดประมาณ 60 - 140 ไมโครเมตร แต่ผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์มีขนาดเล็กกว่าในช่วงประมาณ 40 - 80 ไมโครเมตร เนื่องจากการดิวลคาไนซ์นี้มีการใช้อุณหภูมิทำให้การเปลี่ยนการเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิกและแบบไดซัลฟิดิกเป็นการเชื่อมขวางแบบมอนอซัลฟิดิก ในระหว่างที่ยางได้รับแรงทางกลร่วมด้วยก็必将ทำให้การเชื่อมขวางแบบมอนอซัลฟิดิกถูกตัดขาด [16] และเกิดความเค้นเฉือนจนทำให้ยางแยกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ [17] ซึ่งการตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้ยางมีโครงสร้างกลับคืนสู่สถานะเดิมและมีความอ่อนตัวลง [18]

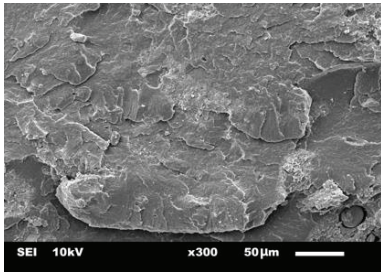
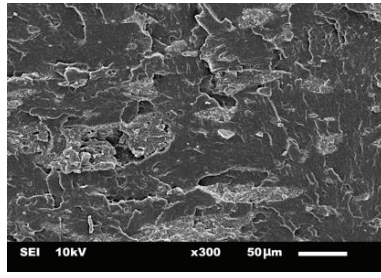
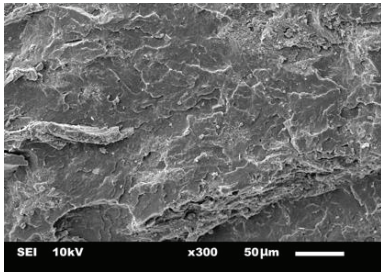
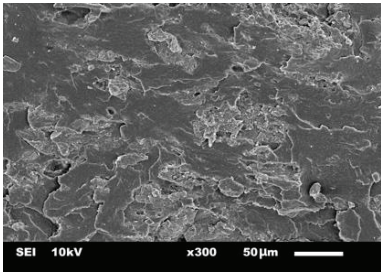
ตารางที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงยางอีพิตีเอ็ม

ผงยางอีพิตีเอ็ม	กล้องดิจิทัล	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
แบบไม่ดิวลคาไนซ์		
แบบดิวลคาไนซ์		

ตารางที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวรอยขาดพอลิเมอร์ผสมระหว่างผงยาง- อีพิตีเอ็มกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนระหว่างผงยางอีพิตีเอ็ม กับพอลิโพรพิลีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์	ผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์
0/100		
10/90		
20/80		

ตารางที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวรอยขาดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
ผงยาง- อีพิตีเอ็มกับพอลิพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ (ต่อ)

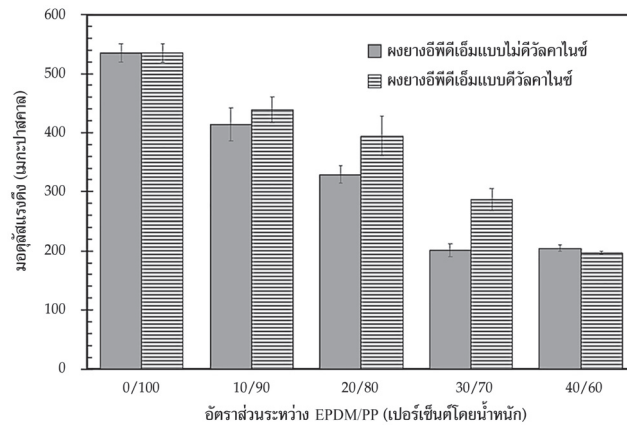
อัตราส่วนระหว่างผงยางอีพิตีเอ็ม กับพอลิพรพิลีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคานซ์	ผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคานซ์
30/70		
40/60		

เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300 เท่า ของพื้นผิวรอยขาดพอลิเมอร์ผสมระหว่างผงยางอีพิตีเอ็มกับพอลิพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า พื้นผิวรอยขาดของพอลิพรพิลีนมีลักษณะการยึดก่อนขาดที่สม่ำเสมอ แต่เมื่อผสมผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคานซ์ในพอลิพรพิลีนที่อัตราส่วน 10/90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้พื้นผิวรอยขาดมีความสม่ำเสมออ่อนลงเพราะมีผงยางแทรกอยู่ อย่างไรก็ตาม ผงยางยังสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิพรพิลีนและมีการปกคลุมของเมทริกซ์พอลิพรพิลีนบนผิวอนุภาคผงยางทำให้รอยขาดเกิดขึ้นในส่วนของเมทริกซ์เป็นหลัก เมื่อผสมผงยางอีพิตีเอ็มในพอลิพรพิลีนในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ยางเกาะกลุ่มกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและพอลิพรพิลีนไม่สามารถปกคลุมบนผิวของอนุภาคผงยางได้ทั่วถึง ส่งผลให้เกิดรอยขาดบริเวณตำแหน่งที่ผงยางมาเกาะกันเองซึ่งมีการยึดเกาะกันที่ไม่แข็งแรง จึงเห็นลักษณะการขาดเป็นชั้น ๆ ต่างระดับมากขึ้นสำหรับการนำผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคานซ์ผสมในพอลิพรพิลีนในปริมาณต่าง ๆ มีความคล้ายคลึงกับพอลิพรพิลีนที่ผสมผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคานซ์ กล่าวคือ เมื่อผสมผงยางอีพิตีเอ็มในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ผงยางมาเกาะกลุ่มกันเองมากขึ้นและเกิดรอยขาดตรงยางที่มากเกาะกันทำให้มีรอยขาดเป็นชั้น ๆ มากขึ้น แต่การผสมผงยางแบบดิวลคานซ์ที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้รอยขาดมีลักษณะเป็นชั้น ๆ น้อยกว่าหรือมีความสม่ำเสมอมากกว่า

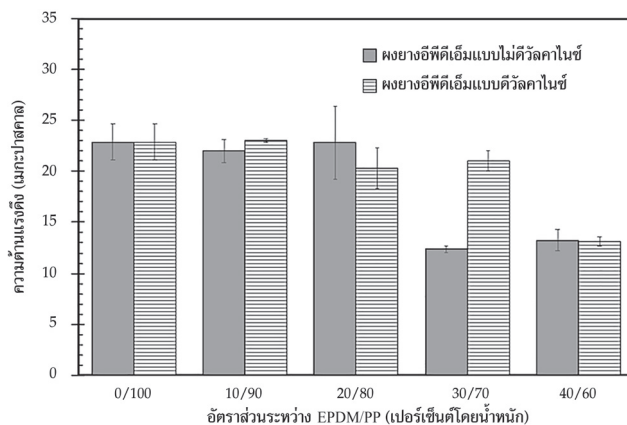
3. ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

จากรูปที่ 1 แสดงค่ามอดุลัสแรงดึงของการผสมผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคานซ์และแบบดิวลคานซ์ในพอลิพรพิลีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า พอลิพรพิลีนมีค่ามอดุลัสแรงดึง 535.25 เมกะปาสคาล เมื่อทำการผสมผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคานซ์ในพอลิพรพิลีนด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามอดุลัสแรงดึงลดลงเป็นลำดับ เนื่องจากผงยางอีพิตีเอ็มอ่อนตัวและมีความมอดุลัสแรงดึงที่ต่ำกว่าพอลิพรพิลีน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือผงยางอีพิตีเอ็มต้องการแรงเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เปลี่ยนรูปได้ง่าย ในขณะที่พอลิพรพิลีนต้องใช้แรงที่มากกว่าจึงจะเกิดการเปลี่ยนรูป [19] โดยการผสมผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคานซ์ในพอลิพรพิลีนด้วยปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับเช่นเดียวกับการผสมผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคานซ์ แต่การผสมผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคานซ์จะให้ผลค่ามอดุลัสแรงดึงค่อนข้างสูงกว่า

เนื่องจากพยางค์อีพีดีเอ็มแบบดิวคาลาโนซึ่งถูกตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของพยางค์อีพีดีเอ็มและพอลิโพรพิลีนมีความคล้ายกันจึงทำให้มีความเข้ากันได้ที่แสดงถึงการยึดเกาะกันที่ดีขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง [20]



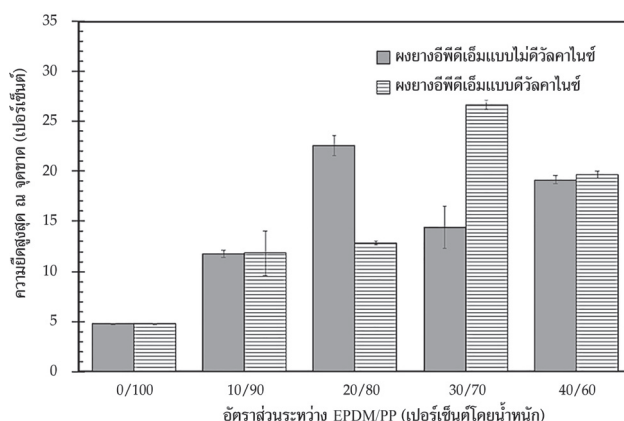
รูปที่ 1 มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างพยางค์อีพีดีเอ็มกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 2 ความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างพยางค์อีพีดีเอ็มกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ

สำหรับผลการทดสอบความต้านแรงดึงแสดงดังรูปที่ 2 พบว่า พอลิโพรพิลีนมีค่าความต้านแรงดึง 22.89 เมกะปาสคาล เมื่อผสมพยางค์อีพีดีเอ็มแบบไม่ดิวคาลาโนในพอลิโพรพิลีนด้วยอัตราส่วน 10/90 และ 20/80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความต้านแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมพยางค์ เนื่องจากการผสมพยางค์ในปริมาณน้อยทำให้อนุภาคพยางค์สามารถกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีและพอลิโพรพิลีนสามารถปกคลุมบนผิวยางได้ทั่วถึง จึงทำให้เกิดรอยขาดตรงส่วนของพอลิโพรพิลีนเป็นหลักดังลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายพื้นผิวรอยขาดที่แสดงในตารางที่ 2 แต่เมื่อนำพยางค์อีพีดีเอ็มผสมลงในพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ความต้านแรงดึงลดลง เนื่องจากพยางค์เกาะกลุ่มกันเป็นขนาดใหญ่ทำให้พอลิโพรพิลีนไม่สามารถปกคลุมบนผิวยางได้ทั่วถึง ดังนั้น จึงทำให้เกิดการเสียหายได้ง่าย โดยเฉพาะตรงตำแหน่งที่พยางค์มาเกาะกันเองเพราะมีการยึดเกาะกันไม่แข็งแรง ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากก่อนหน้า ส่วนค่าความต้านแรงดึงในกรณีของการผสมพยางค์อีพีดีเอ็มแบบดิวคาลาโนในพอลิโพรพิลีนนั้นมีแนวโน้มคล้ายกับการผสมพยางค์อีพีดีเอ็มแบบไม่ดิวคาลาโน กล่าวคือ การผสมพยางค์ที่ปริมาณ 10/90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความต้านแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และ ความต้านแรงดึงยังไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงการผสมพยางค์อีพีดีเอ็มที่อัตราส่วน 30/70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งความต้านแรงดึงที่อัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่าการผสมพยางค์แบบไม่ดิวคาลาโน เนื่องจากพยางค์อีพีดีเอ็มหลังผ่าน

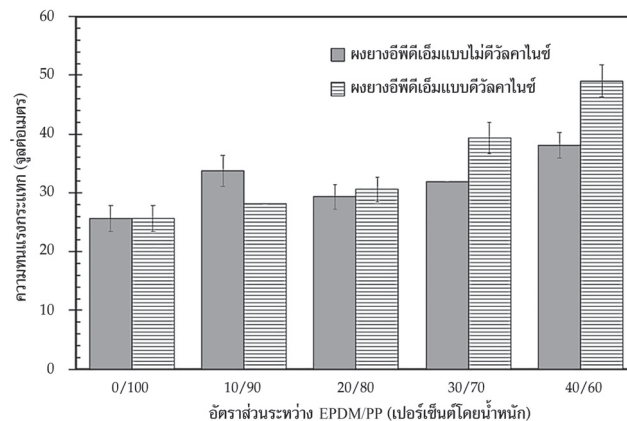
กระบวนการตีวัลคาไนเซชันทำให้มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวในเมทริกซ์พอลิพรอพิลีนได้ดี [13], [21] ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับพอลิพรอพิลีนมากขึ้นและมีการถ่ายโอนความเค้นได้ดีในพอลิเมอร์ผสม [22] อีกทั้งการที่พยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ถูกตัดขาดในตำแหน่งการเชื่อมขวางจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระและสามารถเข้ากันได้กับพอลิพรอพิลีนได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [23] ได้รายงานว่าการตีวัลคาไนซ์พยางล้อยู่ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูและเครื่องผสมภายในทำให้การเชื่อมขวางลดลง เมื่อนำมาผสมในพอลิเมอร์คอมพอสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยขุยมะพร้าวส่งผลให้ความต้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าการผสมพยางล้อย่อยที่ไม่ผ่านการตีวัลคาไนซ์ อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราส่วนพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ในพอลิพรอพิลีนมากขึ้นเป็น 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก็จะทำให้ความต้านแรงดึงลดลง



รูปที่ 3 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างพยางอียีตีเอ็มกับพอลิพรอพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ

ส่วนความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมพยางอียีตีเอ็มแสดงดังรูปที่ 3 พบว่าพอลิพรอพิลีนมีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่ 4.75% แต่เมื่อผสมพยางอียีตีเอ็มแบบไม่ตีวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 10/90 และ 20/80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 11.80 และ 22.58 % เนื่องจากพยางอียีตีเอ็มเป็นวัสดุอ่อนตัวทำให้ยืดตัวได้มากขึ้น เมื่อนำพยางอียีตีเอ็มผสมลงในพอลิพรอพิลีนที่อัตราส่วน 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงที่สอดคล้องกับค่าความต้านแรงดึงและสัณฐานวิทยา เนื่องจากพยางเกาะกลุ่มกันเป็นขนาดใหญ่ขึ้น และพอลิพรอพิลีนไม่สามารถปกคลุมบนผิวของอนุภาคพยางได้ทั่วถึงทำให้การยึดเกาะกันไม่แข็งแรง จึงทำให้ความสามารถในการยืดตัวไม่ต่อเนื่อง สำหรับการผสมพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ในพอลิพรอพิลีนมีแนวโน้มของค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดคล้ายกับการผสมพยางอียีตีเอ็มแบบไม่ตีวัลคาไนซ์ กล่าวคือ การผสมพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 10/90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีน และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมพยางในพอลิพรอพิลีนด้วยปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 30/70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่มีค่าสูงกว่าการผสมพยางแบบไม่ตีวัลคาไนซ์ด้วย เนื่องจากพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์มีขนาดเล็กกว่าและกระจายตัวทั่วเมทริกซ์ [21] ทำให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับพอลิพรอพิลีนมากกว่า [22] อีกทั้งพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ถูกตัดขาดในตำแหน่งการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลอิสระในการเคลื่อนที่ซึ่งสามารถเข้ากันได้กับพอลิพรอพิลีนได้มากขึ้น จึงทำให้มีความสามารถในการยืดตัวที่ต่อเนื่องมากขึ้นด้วย และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิพรอพิลีนที่ผสมพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์เริ่มลดลงที่อัตราส่วน 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านแรงดึงและสัณฐานวิทยา

4. ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก



รูปที่ 5 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์กับพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

สำหรับการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์และแบบดิวลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 0/100 10/90 20/80 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 3 พบว่า พอลิโพรพิลีนมีค่าความทนแรงกระแทก 25.63 จูลต่อเมตร เมื่อผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ โดยที่อัตราส่วน 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความทนแรงกระแทกสูงสุดที่ 38.08 จูลต่อเมตร เนื่องจากอนุภาคยางทำหน้าที่ดูดซับและกระจายพลังงานซึ่งช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น ส่วนกรณีของการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนทำให้ค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นลำดับเช่นเดียวกับการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ ซึ่งการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์จะให้ความทนแรงกระแทกสูงกว่า เนื่องจากผงยางมีขนาดเล็กกว่าและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน [21] อีกทั้งการที่สายโซ่โมเลกุลยางถูกตัดขาดตรงการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่เข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่า

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

1. การดิวลคาไนซ์ในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 230 °C ทำให้มีความสามารถในการดิวลคาไนซ์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส
2. พอลิโพรพิลีนที่ผสมผงยางอีพดีเอ็มทั้งสองแบบไม่ดิวลคาไนซ์และดิวลคาไนซ์ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า Young's Modulus ลดลง แต่ความยืดหยุ่น ผนว ความหนาแน่น และความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความต้านแรงดึงเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์และแบบดิวลคาไนซ์ที่ปริมาณ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. การผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ลงในพอลิโพรพิลีนให้สมบัติเชิงกลค่อนข้างดีกว่าผงยางแบบไม่ดิวลคาไนซ์ เนื่องจากผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวได้ดีขึ้น ดังนั้น ผลงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำผงยางอีพดีเอ็มจากซิลิโคนไปใช้ในการแปรรูปใหม่ได้ด้วยการผสมกับพอลิโพรพิลีน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติความทนแรงกระแทก เช่น ท่อบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้การสนับสนุนการทดสอบในงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- [1] Erman, B., Mark, J. E., and Roland, C. M. (2013). **The Science and Technology of Rubber**. 4th eds. Amsterdam: Elsevier
- [2] German, R. (1999). **Non-Tyre Rubber Components in the Automotive Industry**. Shrewsbury: iSmithers Rapra Publishing
- [3] Dorigato, A., Rigotti, D., and Fredi, G. (2022). Recent Advances in the Devulcanization Technologies of Industrially Relevant Sulfur-Vulcanized Elastomers. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**. Vol. 6, Issue 3, pp. 288-309. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.11.003
- [4] Simon, D. Á. and Bárány, T. (2023). Microwave Devulcanization of Ground Tire Rubber and Its Improved Utilization in Natural Rubber Compounds. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**. Vol. 11, No. 5, pp. 1797-1808. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c05984
- [5] Movahed, S. O., Ansarifard, A., Karbalaee, S., and Far, S. A. (2015). Devulcanization and Recycling of Waste Automotive EPDM Rubber Powder by Using Shearing Action and Chemical Additive. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**. Vol. 31, Issue 2, pp. 87-116. DOI: 10.1177/147776061503100202
- [6] Rigotti, D., Dorigato, A., Valentini, F., and Pegoretti, A. (2023). Devulcanization Parameters and Mechanical Properties of EPDM/Ground Tire Rubber Compounds. **Rubber Chemistry and Technology**. Vol. 96, Issue 1, pp. 114-129. DOI: 10.5254/rct.23.77949
- [7] Simon, D. Á. and Bárány, T. (2021). Effective Thermomechanical Devulcanization of Ground Tire Rubber with a Co-rotating Twin-Screw Extruder. **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 190, Article 109626. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109626
- [8] Colom, X., Carrillo-Navarrete, F., Saeb, M. R., Marin, M., Formela, K., and Cañavate, J. (2023). Evaluation and Rationale of the Performance of Several Elastomeric Composites Incorporating Devulcanized EPDM. **Polymer Testing**. Vol. 121, Article 107976. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.107976
- [9] Sripornsawat, B., Saiwari, S., and Nakason, C. (2018). Thermoplastic Vulcanizates Based on Waste Truck Tire Rubber and Copolyester Blends Reinforced with Carbon Black. **Waste Management**. Vol. 79, pp. 638-646. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.08.038
- [10] Simon, D. Á., Halász, I. Z., Karger-Kocsis, J., and Bárány, T. (2018). Microwave Devulcanized Crumb Rubbers in Polypropylene Based Thermoplastic Dynamic Vulcanizates. **Polymers**. Vol. 10, Article 767. DOI: 10.3390/polym10070767
- [11] de Sousa, F. D. B., Gouveia, J. R., de Camargo Filho, P. M. F., Vidotti, S. E., Scuracchio, C. H., Amurin, L. G., and Valera, T. S. (2015). Blends of Ground Tire Rubber Devulcanized by Microwaves/HDPE - Part A: Influence of Devulcanization Process. **Polímeros**. Vol. 25, No. 3, pp. 256-264. DOI: 10.1590/0104-1428.1747

- [12] Purityi, D. Z. and Pölöskei, K. (2021). Thermomechanical Devulcanization of Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber and Its Application in Blends with High-Density Polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 138, Issue 13, Article 50090. DOI: 10.1002/app.50090
- [13] Dong, H., Zhong, J., and Isayev, A. I. (2021). Manufacturing Polypropylene (PP)/Waste EPDM Thermoplastic Elastomers Using Ultrasonically Aided Twin-Screw Extrusion. **Polymers**. Vol. 13, Issue 2, Article 259. DOI: 10.3390/polym13020259
- [14] Garcia, P. S., de Sousa, F. D. B., de Lima, J. A., Cruz, S. A., and Scuracchio, C. H. (2015). Devulcanization of Ground Tire Rubber: Physical and Chemical Changes after Different Microwave Exposure Times. **eXPRESS Polymer Letters**. Vol. 9, No. 11, pp. 1015-1026. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2015.91
- [15] Görbe, Á., Kohári, A., and Bárány, T. (2024). Efficiency of Thermomechanical Reclaiming of Ground Tire Rubber Conducted in Counter-rotating and Co-rotating Twin Screw Extruder. **Polymers**. Vol. 59, Issue 3, Article 455. DOI: 10.14314/polimery.2014.231
- [16] Brunella, V., Aresti, V., Romagnolli, U., Muscato, B., Girotto, M., Rizzi, P., and Luda, M. P. (2022). Recycling of EPDM via Continuous Thermo-Mechanical Devulcanization with Co-Rotating Twin-Screw Extruder. **Polymers**. Vol. 14, Issue 22, Article 4853. DOI: 10.3390/polym14224853
- [17] Diaz, R., Colomines, G., Peuvrel-Disdier, E., and Deterre, R. (2018). Thermo-Mechanical Recycling of Rubber: Relationship Between Material Properties and Specific Mechanical Energy. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 252, pp. 454-468. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.014
- [18] Simon, D. Á., Purityi, D. Z., and Bárány, T. (2020). Devulcanization of Ground Tire Rubber: Microwave and Thermomechanical Approaches. **Scientific Reports**. Vol. 10, Article 16587. DOI: 10.1038/s41598-020-73543-w
- [19] Zulkifli, M. H., Rasidi, M. S. M., Musa, L., and Masa, A. H. (2021). The Study of Recycled Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM-r)/Polypropylene (PP) Polymeric Blends. **Journal of Physics: Conference Series**. Vol. 2080, Article 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/2080/1/012012
- [20] Song, L. F., Bai, N., Shi, Y., Wang, Y. X., Song, L. X., and Liu, L. Z. (2023). Effects of Ethylene-Propylene-Diene Monomers (EPDMs) with Different Moony Viscosity on Crystallization Behavior, Structure, and Mechanical Properties of Thermoplastic Vulcanizates (TPVs). **Polymers**. Vol. 15, Issue 3, Article 642. DOI: 10.3390/polym15030642
- [21] Lendvai, L. (2023). Mechanical and Morphological Properties of PP/XNBR Blends Produced with Rubber Latex. **Journal of Polymer Research**. Vol. 30, Article 276. DOI: 10.1007/s10965-023-03660-3
- [22] Ridhwan, M., Nasir, J., Zulkepli, N. N., Mustafa, M., Abdullah, M. M. A. B., Omar, M. F., Ismail, H., and Sandu, A. V. (2014). The Effects of Different Particle Sizes of Recycled Acrylonitrile Butadiene Rubber and its Blend Ratios on Mechanical and Morphological Properties of vNBR/rNBR Blends. **Materiale Plastice**. Vol. 51, No.2, pp. 201-204
- [23] Ujianto, O., Putri, D. B., and AWinarto, D. (2017). A Comparative Study of Ground Tire Rubber Devulcanization using Twin Screw Extruder and Internal Mixer. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 223, Article 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/223/1/012005