ผลกระทบของปริมาณยางรถยนต์บดและยางพาราแท่งต่อสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

Effects of Ground Rubber Tire and Natural Rubber Contents on Mechanical Properties of Thermoplastic Elastomer

ชาตรี หอมเขียว[1,2*] สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[1,2] และ วรพงศ์ บุญช่วยแทน[1,2]

Chatree Homkhiew[1,2*], Surasit Rawangwong[1,2] and Worapong Boonchouytan[1,2]

Received: 4 May 2020, Revised: 6 July 2020, Accepted: 29 July 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณและชนิดยาง (ยางรถยนต์บด และยาง STR 5L) ต่อสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก ในการผลิตวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกดำเนินการผสมส่วนผสมต่างๆ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปเป็นแผ่นชิ้นงานตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัดร้อน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่า ปริมาณยางรถยนต์บดและยาง STR 5L ในช่วง 30-70 wt% มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ต่อค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง ค่าความเครียดการดึงสูงสุด และค่าความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก เมื่อผสมยางรถยนต์บดหรือยาง STR 5L เพิ่มขึ้นในช่วง 30-70 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณยางทั้ง 2 ชนิด ที่เติมเป็นส่วนผสม แต่ค่าความเครียดการดึงสูงสุดกลับมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบด้วยว่า วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความแข็งสูงกว่าวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยาง STR 5L อย่างชัดเจน ทว่าการผสมยาง STR 5L ให้ค่าความเครียดการดึงสูงสุดมากกว่า ในขณะเดียวกันจากโครงสร้างสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นด้วยว่า พลาสติกและยาง STR 5L ไม่สามารถประสานเป็นเนื้อเดียวกันได้

---

[1] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

[2] หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

[2] Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chatree.h@rmutsv.ac.th

คำสำคัญ: วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก, พอลิเมอร์ผสม, ยางรถยนต์บด, ยางธรรมชาติ, การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ABSTRACT

This research aimed to analyze the effects of rubber content and types (ground rubber tire and STR 5L) on mechanical properties of thermoplastic elastomer. In manufacturing the thermoplastic elastomer, a twin-screw extruder was used to blend mixture components. The thermoplastic elastomer pellets were then molded in a compression molding machine as sample panels. Analysis of variance (ANOVA) indicated that the ground rubber tire and STR 5L contents in the range of 30-70 wt% significantly (p-value < 0.05) affected modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), tensile strength (TS), tensile modulus (TM), maximum strain and hardness of the thermoplastic elastomer. The addition of ground rubber tire or STR 5L in range of 30-70 wt% resulted a decrease in MOR, MOE, TS, TM and hardness but an increase in the maximum strain of the thermoplastic elastomer. Furthermore, the thermoplastic elastomer blended with the ground rubber tire clearly provided higher MOR, MOE, TS, TM and hardness than blended with the STR 5L, whereas the thermoplastic elastomer with the STR 5L showed larger maximum strain. Finally, morphology of the thermoplastic elastomer revealed that plastic and rubber were immiscible polymer blends.

Key words: thermoplastic elastomer, polymer blend, ground rubber tire, natural rubber, analysis of variance

บทนำ

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการผลิตรถยนต์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีการผลิตยางรถยนต์มากขึ้นตามไปด้วย ยกตัวอย่าง ประเทศไทยมีการบริโภคผลิตภัณฑ์ยางทั้งหมดประมาณ 242 ตัน จากปริมาณดังกล่าว ประมาณ 90 ตัน เป็นผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ (Sukontasukkul and Wiwatpattanapong, 2009) เมื่อยางรถยนต์เกิดการเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งาน จะไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เนื่องจากมีความทนทานที่เกิดจากการปรับปรุงสมบัติด้วยสารเคมีต่างๆ ในกระบวนการผลิต หากนำไปกำจัดด้วยการเผาจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและมลพิษทางอากาศ เช่น สารพิษไดออกซิน (Budnumpecth and Tanpaiboonkul, 2016) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการกำจัดโดยการนำยางรถยนต์เก่ามาบดย่อยให้กลายเป็นยางผง (Crumb rubber) แล้วนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น บล็อกยางปูพื้น พรมปูพื้น ยางบังโคลน ท่อยาง และการนำไปผสมกับยางมะตอยเพื่อทำถนน (Budnumpecth and Tanpaiboonkul, 2016) ในขณะเดียวกันยางผงหรือยางรถยนต์บดสามารถนำไปผสมกับพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกได้อีกด้วย ซึ่งการกำจัดยางรถยนต์เก่าโดยการนำมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการต่างๆ เหล่านี้สามารถลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและพื้นที่กำจัดขยะ ตลอดจนสามารถลดต้นทุนการผลิต (Nunes *et al*., 2018)

วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกคือ วัสดุที่มีการผสมกันระหว่างยางและพลาสติกประเภท

เทอร์มอพลาสติก (Jamil *et al*., 2006; Homkhiew *et al*., 2018a) เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิสไตรีน เป็นต้น ซึ่งเหตุผลหลักของการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์คือ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ดั้งเดิม เพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการผลิต และเพื่อลดต้นทุนของวัสดุ (Campbell *et al*., 1978; Jamil *et al*., 2006) นอกจากนี้วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกมีสมบัติพิเศษคือ ที่อุณหภูมิสูงสามารถอ่อนตัวและหลอมไหลได้เหมือนเทอร์มอพลาสติก และที่อุณหภูมิห้องมีสมบัติยืดหยุ่นอ่อนนุ่มคล้ายยาง (Legge *et al*., 1987; Kosonmetee, 2008) ทำให้วัสดุชนิดนี้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยใช้กระบวนการที่เหมือนกับการขึ้นรูปเทอร์มอพลาสติกทั่วๆ ไป เช่น กระบวนการอัดร้อน กระบวนการอัดรีด และกระบวนการฉีดเข้าเบ้า เป็นต้น และที่สำคัญวัสดุชนิดนี้สามารถนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ หลังจากผ่านการแปรรูปมาแล้ว (Kosonmetee, 2008)

เมื่อทบทวนงานวิจัยในอดีตพบว่า มีการนำยางผสมกับพลาสติกเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก ยกตัวอย่าง Saleesung *et al*. (2010) เตรียมเทอร์มอพลาสติกวัลคาไนเซต (Thermoplastic Vulcanizates: TPVs) จากผงยางไนไตรล์วัลคาไนซ์ผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ซึ่งลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นเป็น 2 เฟส ที่อนุภาคผงยางกระจายตัวในเมทริกซ์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ Sae-Oui *et al*. (2010) นำผงยางธรรมชาติผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพบว่า ความหนืดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณยาง แต่มอดูลัสและความแข็งลดลง และ Pichaiyut *et al*. (2012) พัฒนาวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนจากการผสมยางธรรมชาติกับพอลิยูรีเทน โดยเปิดเผยว่า การผสมยางในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้ความแข็งแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดลดลง อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำยางรถยนต์บดมาผสมกับพลาสติกเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกยังมีอยู่อย่างจำกัด เช่น Nunes *et al*. (2018) นำยางรถยนต์บดมาผสมกับเทอร์มอพลาสติกเพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการผสม ขนาดอนุภาคผงยาง และชนิดพลาสติก

จากข้อมูลข้างต้น ยางรถยนต์เก่าที่หมดอายุการใช้งาน จะไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และหากกำจัดไม่ถูกวิธีจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการนำยางรถยนต์เก่ามาผสมกับพลาสติกเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกสามารถดำเนินการได้ ซึ่งเป็นวิธีการใช้ประโยชน์ยางรถยนต์เก่าที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถลดต้นทุนการผลิตวัสดุ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณยางรถยนต์บดต่อสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก และวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกระหว่างที่ผสมยางรถยนต์และที่ผสมยาง STR (Standard Thai Rubber) 5L ท้ายสุดผลจากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์เก่า

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งวิธีการดำเนินการวิจัยได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ วัสดุที่ใช้ในการวิจัย การผลิตวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก และการวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย 1) พลาสติกพอลิโพรพิลีน เกรด 1100NK ที่มีดัชนีการหลอมไหล 12 กรัม/10 นาที และผลิตโดยบริษัท ไอ อาร์พีซี จำกัด (มหาชน) 2) ยางพาราแท่ง STR 5L ดังแสดงในภาพที่ 1(ก) จัดซื้อมาจาก องค์การสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จ.นครศรีธรรมราช และ 3) ยางรถยนต์บด (Ground rubber tire) ขนาด 20 เมช จัดซื้อมาจาก KKI Recycle จ.นครปฐม ดังแสดงในภาพที่ 1(ข)

(ก) (ข)

ภาพที่ 1 วัสดุ (ก) ยางแท่ง STR 5L และ (ข) ยางรถยนต์บด

2. การผลิตวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

การเตรียมวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกจากพลาสติกพอลิโพรพิลีนและยางแท่ง STR 5L หรือยางรถยนต์บดตามสูตรที่ออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 1 กระทำโดยการนำวัสดุดังกล่าวผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รุ่น CTE-D25L40 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด จ.สมุทรปราการ) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิการผสมอยู่ในช่วง 180-200 °C และความเร็วหมุนของเกลียวในการผสม 60 rpm จากนั้นนำเส้นวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่อัดรีดออกจากเครื่องไประบายความร้อนในน้ำ และนำไปตัดให้เป็นเม็ดวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

Sample code	Polypropylene (wt%)	Rubber STR 5L (wt%)	Ground Rubber Tire (wt%)
P100	100	-	-
P7RL3	70	30	-
P6RL4	60	40	-
P5RL5	50	50	-
P4RL6	40	60	-
P3RL7	30	70	-
P7RT3	70	-	30
P6RT4	60	-	40
P5RT5	50	-	50
P4RT6	40	-	60
P3RT7	30	-	70

หมายเหตุ: wt% คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในขั้นตอนต่อไปนำเม็ดวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นชิ้นงานตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัดร้อน ซึ่งในการขึ้นรูปจะทำการอุ่นแม่พิมพ์จนมีอุณหภูมิ 190 °C ตามที่ได้ตั้งอุณหภูมิไว้ จากนั้นนำวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกใส่ในแม่พิมพ์ และอัดด้วยแรงดัน 500 psi เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลาจะทำการอัดซ้ำด้วยแรงดัน 1500 psi เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำแม่พิมพ์และแผ่นชิ้นงานตัวอย่างใส่ในเครื่องอัดเย็นที่มีน้ำหมุนเวียน และอัดด้วยแรงดัน 1500 psi เช่นกันเป็นเวลา 30 นาที เพื่อระบายความร้อนออกจากแผ่นชิ้นงานตัวอย่าง หลังจากนั้นถอดแผ่นชิ้นงานตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์และตัดเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ ต่อไป

3. การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติ

1) การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลกระทบของปริมาณยางต่อสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกดำเนินการวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และการเปรียบเทียบเชิงซ้อนทูกีย์ (Tukey's multiple comparison test) ในขณะเดียวกันการวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดยางต่อสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกดำเนินการโดยการทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรอิสระ (2-Sample t-test) ซึ่งในการวิเคราะห์ทางสถิตินี้ดำเนินการที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (α=0.05)

2) การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยา

การถ่ายภาพกำลังขยายสูงบริเวณพื้นผิวที่แตกหัก (Fracture surface) ของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก เพื่อวิเคราะห์รูพรุนภายในโครงสร้างและการประสานระหว่างเมทริกซ์ยางและเมทริกซ์พลาสติก ดำเนินการด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM รุ่น Quanta 400, FEI company, Oregon, USA) อย่างไรก็ตามก่อนการส่องด้วย SEM บริเวณผิวหน้าที่แตกหักต้องเคลือบด้วยทองคำ

3) การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบการดัด เพื่อหาค่าความแข็งแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด (Modulus of Elasticity; MOE) เป็นการทดสอบที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D790 (ASTM, 2017) โดยเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 13 mm × 100 mm × 4.8 mm บ่ารองรับชิ้นงาน (Span distance) มีระยะห่าง 80 mm และความเร็วที่ใช้ในการดัด คือ 2 mm/min ในขณะเดียวกันการทดสอบการดึง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength; TS) ค่ามอดูลัสการดึง (Tensile Modulus; TM) และค่าความเครียดการดึงสูงสุด (Maximum strain) เป็นการทดสอบที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D638 (ASTM, 2014) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบประเภทที่ 4 ซึ่งมีขนาด 19 mm × 115 mm × 4 mm และความเร็วที่ใช้ในการดึง คือ 5 mm/min สำหรับการทดสอบการดัดและการดึงนี้ ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ (รุ่น NRI-TS500-50 ของบริษัท นรินทร์ อินสทรูเม้นท์ จำกัด จ.สมุทรปราการ ประเทศไทย) นอกจากนี้ในการทดสอบความแข็งดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D2240 (ASTM, 2015) โดยใช้อุปกรณ์วัดความแข็ง Durometer แบบ Shore D (รุ่น GS-702G ของบริษัท Teclock Corporation จำกัด Nagano, Japan) ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 30 mm × 30 mm × 6 mm ในการทดสอบสมบัติทางกลทั้ง 3 ประเภทนี้ ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง 25 °C และทดลองแบบสุ่ม 5 ตัวอย่างของแต่ละสูตรการทดลอง

การทดสอบการสึกหรอ (Abrasion test) ของวัสดุ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D3389 (ASTM, 2016) โดยใช้เครื่อง Taber abrasion (TABER Industries, USA) ในการทดสอบชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นบางกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 cm และดำเนินการทดสอบ 1000 รอบ (cycle) โดยมีก้อนน้ำหนักขนาด 500 กรัม กดในขณะทดสอบ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบคือ ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการออกแบบการทดลองมีตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณและชนิดยาง ซึ่งสามารถออกแบบสูตรที่ใช้ในการทดลองได้ 11 สูตร และค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง ค่าความเครียดการดึงสูงสุด ค่าความแข็ง และค่าการสูญเสียน้ำหนัก

1. การวิเคราะห์ผลทางสถิติในผลกระทบของปริมาณและชนิดยาง

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในผลกระทบของปริมาณและชนิดยางต่อสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ปริมาณยาง STR 5L และยางรถยนต์บดในช่วง 30-70 wt% มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ต่อทุกสมบัติทางกลคือ ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง ค่าความเครียดการดึงสูงสุด และค่าความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์โดยใช้การเปรียบเทียบเชิงซ้อนทูกีย์ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณยางรถยนต์บด 30 wt% (ตัวอักษร a) ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่าปริมาณยางรถยนต์บด 40 wt% (ตัวอักษร a) อย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่าปริมาณยางรถยนต์บด 50 wt% (ตัวอักษร b), 60 wt% (ตัวอักษร c), 70 wt% (ตัวอักษร d) อย่างมีนัยสำคัญ (α=0.05) เช่นเดียวกัน ปริมาณยางรถยนต์บด 60 wt% (ตัวอักษร c) ให้ค่าความแข็งแรงดัดมากกว่าปริมาณยางรถยนต์บด 70 wt% (ตัวอักษร d) อย่างมีนัยสำคัญ (α=0.05)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในผลกระทบของปริมาณและชนิดยางต่อสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

		Rubber content (wt%)					
Property	**Rubber type**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	***P*-value**
MOR	RL	19.5 aG	15.4 bG	9.0 bcG	3.8 cdG	1.6 dG	0.000*
(MPa)	RT	24.0 aH	21.2 aH	15.6 bH	10.9 cH	7.2 dH	0.000*
MOE	RL	489 aG	465 aG	346 bG	131 cG	16 dG	0.000*
(MPa)	RT	725 aH	554 bH	419 cH	320 cH	188 dH	0.000*
TS	RL	12.3 aG	8.2 bG	5.7 cG	2.5 dG	0.9 eG	0.000*
(MPa)	RT	13.1 aG	10.5 bH	8.7 cH	6.4 dH	4.5 eH	0.000*
TM	RL	192 aG	169 bG	129 cG	52 dG	9 eG	0.000*
(MPa)	RT	205 aG	181 aG	177 abH	142 bH	76 cH	0.000*

ตารางที่ 2 (ต่อ)

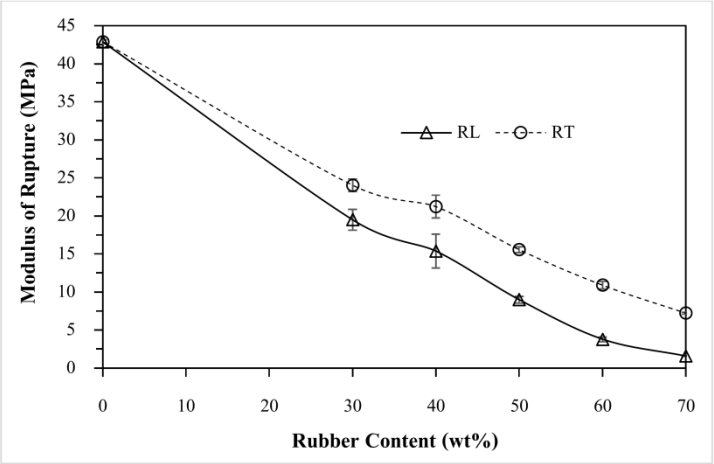
Property	Rubber type	Rubber content (wt%)					*P*-value
		30	40	50	60	70	
Max. Strain	RL	13.3 aG	15.2 aG	17.6 abG	18.8 bcG	19.2 cG	0.000*
(%)	RT	8.7 aH	13.7 aG	15.7 aH	16.2 abH	17.9 bG	0.001*
Hardness	RL	62.2 aG	55.3 bG	53.2 bG	35.2 cG	17.7 dG	0.000*
(Shore D)	RT	65.8 aH	62.5 bH	57.8 cH	53.5 dH	46.0 eH	0.000*

หมายเหตุ: * หมายถึง ปริมาณยางมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p< 0.05$) และในแต่ละสมบัติที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (a-e สำหรับผลกระทบปริมาณยาง และ G-H สำหรับผลกระทบของชนิดยาง) หมายถึง มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ (α=0.05) นอกจากนี้ RL คือ ยาง STR 5L และ RT คือ ยางรถยนต์บด

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดยางโดยใช้ 2-Sample t-test พบว่า ที่ปริมาณการเติมยางเป็นส่วนผสมในวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกเท่ากัน การเติมยางรถยนต์บด (RT) เป็นส่วนผสมปริมาณ 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% (ตัวอักษร H) ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงกว่าการเติมยาง STR 5L (RL) (ตัวอักษร G) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงพบว่า การเติมยางรถยนต์บดเป็นส่วนผสมปริมาณ 30 wt% (ตัวอักษร G) ให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าการเติมยาง STR 5L ปริมาณ 30 wt% (ตัวอักษร G) อย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

2. ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อสมบัติการดัด

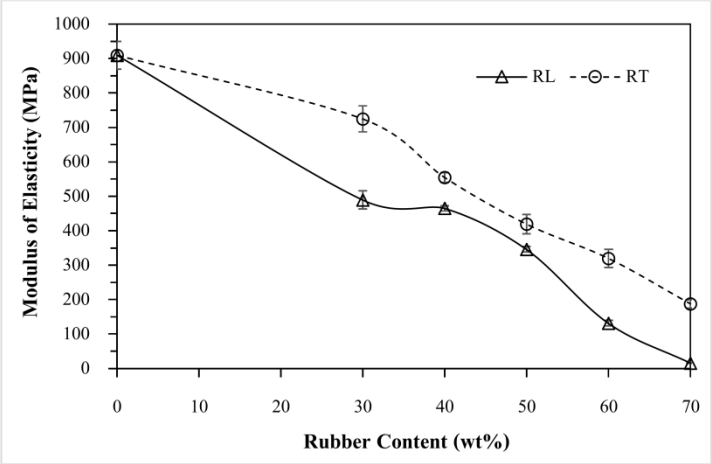
ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก แสดงดังภาพที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยแสดงให้เห็นว่า การผสมยางรถยนต์บด (RT) หรือยาง STR 5L (RL) เพิ่มขึ้นในช่วง 30-70 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณยางทั้ง 2 ชนิด ที่เติมเป็นส่วนผสม พฤติกรรมการลดลงของค่าความแข็งแรงดัดมีสาเหตุมาจากยางมีความแข็งแรงดัดน้อยกว่าพลาสติก ทำให้เมื่อผสมยางเป็นส่วนผสมมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกลดลงตามปริมาณยางที่เติมเป็นส่วนผสม ในขณะที่การลดลงของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัดมีสาเหตุมาจากธรรมชาติของยางรถยนต์บดและยาง STR 5L มีความแข็งแกร่ง (Stiffness) น้อยกว่าพลาสติก ทำให้เมื่อเติมยางเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ความแข็งแกร่งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกจึงลดลง (Mohamed *et al*., 2018)



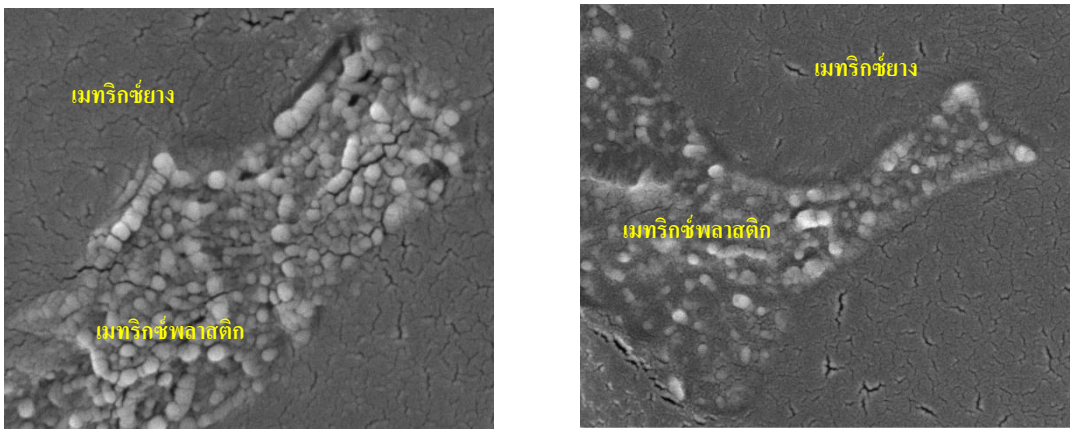
ภาพที่ 2 ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเทอร์มอพลาสติกอีลาสโทเมอร์ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าวัสดุพลาสติกและยาง STR 5L ไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับ Mohamed *et al.* (2018) ที่กล่าวว่า พลาสติกและยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันไม่ได้ และ Homkhiew *et al.* (2018b) พบด้วยว่า พลาสติกไม่สามารถหลอมเป็นเฟสต่อเนื่องในเมทริกซ์ยาง โดยภาพที่ 4(ก) เมื่อเติมยางเป็นส่วนผสม 30 wt% สังเกตเห็นได้ว่า เมทริกซ์พลาสติกมีการแยกเฟสกับเมทริกซ์ยางอย่างชัดเจน ในขณะเดียวกันภาพที่ 4(ข) เมื่อเติมยางเป็นส่วนผสม 60 wt% เมทริกซ์ยางมีการกระจายตัวแทรกเข้าสู่เนื้อพลาสติก และสังเกตเห็นด้วยว่า มีรอยแยกหรือช่องว่างเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในเนื้อยาง ลักษณะดังกล่าวนี้เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงดัดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัดระหว่างวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดกับที่ผสมยาง STR 5L ที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน พบว่า วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัดสูงกว่าวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยาง STR 5L อย่างชัดเจน เนื่องจากยางรถยนต์บดเป็นวัสดุที่ผ่านการผสมสารเคมีและสารเสริมแรง ตลอดจนผ่านการวัลคาไนซ์มาแล้ว ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่ายาง STR 5L ส่งผลให้การเติมยางรถยนต์บดเป็นส่วนผสมให้ค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัดที่สูงกว่า



ภาพที่ 3 ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

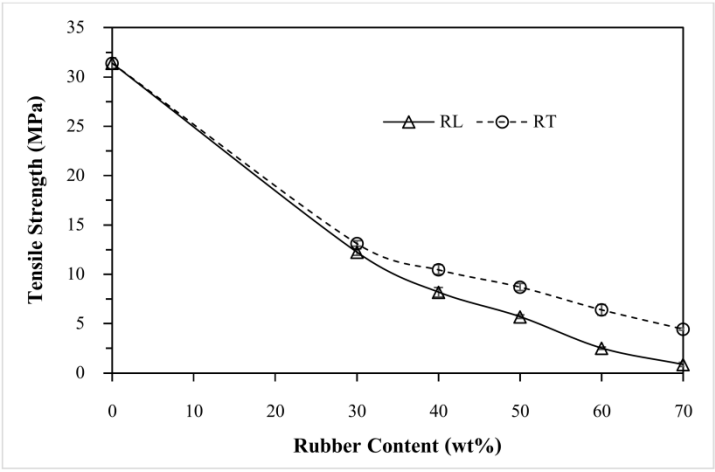


(ก) (ข)

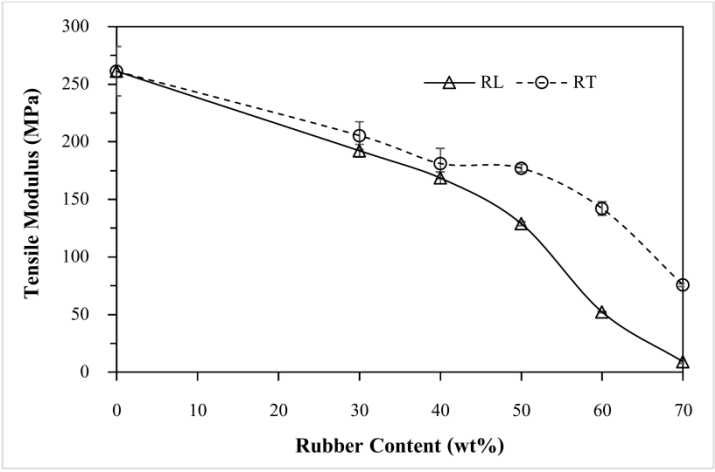
ภาพที่ 4 โครงสร้างสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 25,000 เท่า ของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่มียาง STR 5L เป็นส่วนผสม (ก) 30 wt% และ (ข) 60 wt%

3. ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อสมบัติการดึง

ภาพที่ 5 และ 6 แสดงความผันแปรในค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึง ตามลำดับของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่มีผลกระทบมาจากปริมาณและชนิดยาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเติมยางรถยนต์บดและยาง STR 5L เป็นส่วนผสมในวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกมากขึ้น ส่งผลให้ทั้งค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงลดลงตามปริมาณของยางทั้ง 2 ที่เติมเป็นส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pichaiyut *et al.* (2012) ที่พบว่า ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกลดลงตามสัดส่วนของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber; ENR) ที่ผสม สิ่งนี้เกิดจาก ความแข็งแกร่งที่ต่ำกว่า ซึ่งวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกมีการอ่อนตัวเพิ่ม เมื่อเติมยางเป็นส่วนผสมมากขึ้น (Pichaiyut *et al.*, 2012) ในทำนองเดียวกันสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ค่ามอดูลัสการดึงลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเติมยางรถยนต์บดหรือยาง STR 5L เป็นส่วนผสม 60-70 wt%



ภาพที่ 5 ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

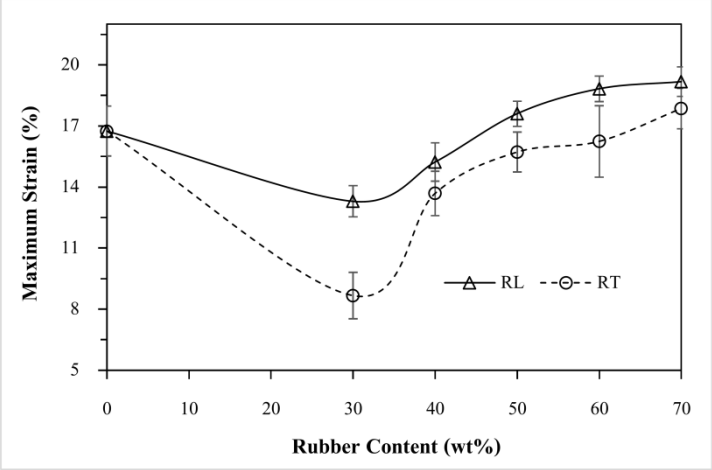


ภาพที่ 6 ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่ามอดูลัสการดึงของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

นอกจากนี้ยังพบด้วยว่า วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าที่ผสมยาง STR 5L อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน เนื่องจากในการผลิตยางรถยนต์มีการเติมสารเติมแต่งจำนวนมาก เช่น สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizers) สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) สารต้านทานปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonants) และผงคาร์บอนแบล็คในกระบวนการวัลคาไนซ์ยาง ทำให้ยางรถยนต์มีความสามารถต้านทานการสลายตัวทางชีวภาพ การสลายตัวด้วยแสงและเคมี และการเสื่อมสภาพทางความร้อน (Fazli and Rodrigue, 2020) ดังนั้นจากผลเหล่านี้สามารถกล่าวได้ว่า วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีสมรรถนะในสมบัติการดึงสูงกว่าวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยาง STR 5L

จากการทดสอบการดึงยังพบด้วยว่า ค่าความเครียดการดึงสูงสุดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกมีความผันแปรอันเนื่องมาจากปริมาณและชนิดยางที่เติมเป็นส่วนผสมเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังภาพที่ 7 โดยพบว่า วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีค่าความเครียดการดึงสูงสุดน้อยกว่าที่ผสมยาง STR 5L เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า ยางรถยนต์ได้ผ่านการผสมสารเสริมแรง เช่น ผงคาร์บอนแบล็ค ทำให้สมบัติความยืดหยุ่น

ลดลง ในขณะเดียวกันพบด้วยว่า การเติมยางทั้ง 2 ชนิด เป็นส่วนผสมในวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกปริมาณ 30 wt% ส่งผลให้ค่าความเครียดการดึงสูงสุดลดลงอย่างเห็นได้ชัด สิ่งนี้เกี่ยวข้องกับพลาสติกเหลวไม่ดีในเมทริกซ์ยาง ซึ่งพลาสติกเหลวไม่ดีนี้นำไปสู่การประสานที่ไม่ดีระหว่างพลาสติกและเมทริกซ์ยาง ในขณะเดียวกันการเติมพลาสติกเป็นการลดการยืดตัวที่จุดแตกหัก ซึ่งการลดลงนี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ลดลงระหว่างเฟสแข็งของพลาสติกและเมทริกซ์วัสดุ (Abu-Abdeen and Elamer, 2010) ทำให้ความสามารถในการยืดตัวของวัสดุลดลง อย่างไรก็ตามค่าความเครียดการดึงสูงสุดกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเติมยางเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 40-70 wt% สิ่งนี้เกิดจากวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกเริ่มมียางเป็นเนื้อพื้น ทำให้ความสามารถในการยืดตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น

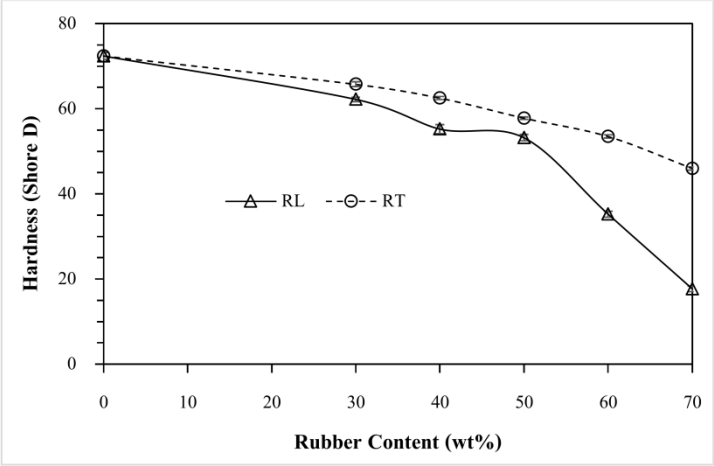


ภาพที่ 7 ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าความเครียดการดึงสูงสุดของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

4. ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อสมบัติความแข็ง

ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก แสดงดังภาพที่ 8 โดยชี้ให้เห็นว่า การเติมยาง STR 5L หรือยางรถยนต์บดเป็นส่วนผสมในวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกเพิ่มขึ้นในช่วง 30-70 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงตามปริมาณยางที่เติมเป็นส่วนผสม Saleesung *et al*. (2010) กล่าวว่า ความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมยาง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของค่ามอดูลัส การลดลงของความแข็งดังกล่าวนี้เกิดจากผลกระทบของการเจือจาง โดยคุณลักษณะของเฟสพลาสติกมีความแข็งของผลึกที่ค่อนข้างสูง และจะถูกเจือจางลงด้วยยางที่มีคุณลักษณะยืดหยุ่น ดังนั้นการเติมยางเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับผลึก (Sae-Oui *et al*., 2010; Saleesung *et al*., 2010) ในขณะเดียวกันพบด้วยว่า การเติมยาง STR 5L เป็นส่วนผสมปริมาณ 60-70 wt% ทำให้ค่าความแข็งลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่ปริมาณดังกล่าวนี้วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกมีความคงรูปที่ต่ำมาก นอกจากนี้ยังพบด้วยว่า วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีค่าความแข็งสูงกว่าที่ผสมยาง STR 5L อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน ในความเป็นจริงยางรถยนต์มีความแข็งสูงกว่ายาง STR 5L มาก เนื่องจากเป็นยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีการผสม

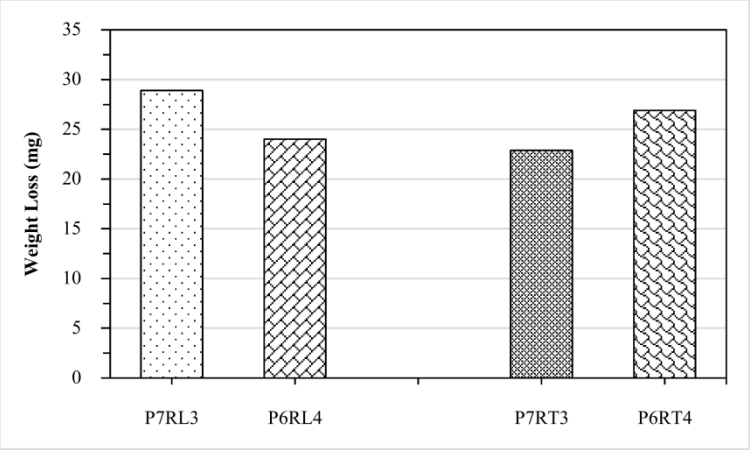
สารเสริมแรงที่มีความแข็งสูงเป็นส่วนผสม ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับการเติมยาง STR 5L เป็นส่วนผสมยางรถยนต์บดจึงให้ค่าความแข็งในวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่สูงกว่า



ภาพที่ 8 ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

5. ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อสมบัติการสึกหรอ

ภาพที่ 9 แสดงผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก โดยพบว่าการเติมยาง STR 5L เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 40 wt% ในวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักลดลง แต่การเติมยางรถยนต์บดเพิ่มขึ้นในช่วง 30-40 wt% กลับทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกเพิ่มขึ้น ในความเป็นจริงกลไกการสึกหรอของวัสดุเกิดจากการเสียดสีที่รุนแรงระหว่างผิวหน้าที่อ่อนของพอลิเมอร์กับพื้นผิวที่แข็งและหยาบของล้อหิน (Abu-Abdeen and Elamer, 2010) ดังนั้นวัสดุที่มีผิวหน้าที่อ่อน และมีการประสานที่ไม่แข็งแรงภายในโครงสร้างจะมีการสูญเสียน้ำหนักได้ง่ายกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการผสมยางเป็นส่วนผสมในวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกเท่ากันพบว่า ที่ปริมาณการผสมยาง 30 wt% วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยาง STR 5L มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการผสมยางรถยนต์บด ทว่าที่ปริมาณการผสมยาง 40 wt% วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดกลับมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการผสมยาง STR 5L สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า ที่ปริมาณการผสมยาง 30 wt% วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีผิวหน้าแข็งกว่าที่ผสมยาง STR 5L ทำให้การสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า แต่เมื่อผสมยางเพิ่มขึ้นเป็น 40 wt% วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยาง STR 5L มีความเหนียวมากขึ้น ในขณะที่วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีการประสานระหว่างเฟสเมทริกซ์ของยางและพลาสติกด้อยลง ทำให้วัสดุที่ผสมยางรถยนต์บดมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า



ภาพที่ 9 ผลกระทบปริมาณและชนิดยางต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก

สรุป

ผลจากการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่มีผลกระทบมาจากปริมาณและชนิดยาง (ยางรถยนต์บด และยาง STR 5L) พบว่า ปริมาณยางมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ต่อค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง ค่าความเครียดการดึงสูงสุด และค่าความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติก โดยความแข็งแรงดัด มอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง และความแข็งของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกมีค่าลดลง แต่ความเครียดการดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อผสมยางรถยนต์บดหรือยาง STR 5L เพิ่มขึ้นในช่วง 30-70 wt% เนื่องจากเกิดการเจือจางของระดับผลึกในเฟสพลาสติกด้วยคุณลักษณะยืดหยุ่นของยาง ในขณะเดียวกันวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความแข็งสูงกว่าที่ผสมยาง STR 5L อย่างชัดเจน เนื่องจากยางรถยนต์บดเป็นวัสดุที่ผ่านการผสมสารเคมีและสารเสริมแรงตลอดจนผ่านการวัลคาไนซ์มาแล้ว ทำให้มีความแข็งและแข็งแรงมากกว่ายาง STR 5L อย่างไรก็ตามการผสมยาง STR 5L ให้ค่าความเครียดการดึงสูงสุดมากกว่า นอกจากนี้การเติมยาง STR 5L เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นจาก 30-40 wt% ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกลดลง แต่กลับทำให้วัสดุยืดหยุ่นแบบเทอร์มอพลาสติกที่ผสมยางรถยนต์บดมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น และจากโครงสร้างสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นด้วยว่า พลาสติกและยาง STR 5L ไม่สามารถประสานเป็นเนื้อเดียวกันได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินแผ่นดิน (รหัสข้อเสนอการวิจัย 256107A1710012) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2561 และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

Abu-Abdeen, M. and Elamer, I. 2010. Mechanical and swelling properties of thermoplastic elastomer blends. **Materials and Design** 31: 808-815.

ASTM. 2014. ASTM D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. West Conshohocken, PA.

ASTM. 2015. ASTM D2240-15e1. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. ASTM International. West Conshohocken, PA.

ASTM. 2016. ASTM D3389-16. Standard Test Method for Coated Fabrics Abrasion Resistance (Rotary Platform Abrader). ASTM International. West Conshohocken, PA.

ASTM. 2017. ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International. West Conshohocken, PA.

Budnumpecth, T. and Tanpaiboonkul, N. 2016. Properties of lightweight concrete containing crumb rubber and cement replacing with fly ash from coal power plant. **Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University** 3(4): 62-75. (in Thai)

Campbell, D.S., Elliott, D.J. and Wheelans, M.A. 1978. Thermoplastic natural rubber blends. **Natural Rubber Technology** 9(21): 29-37.

Fazli, A. and Rodrigue, D. 2020. Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. **Materials** 13(3): 782-812.

Homkhiew, C., Rawangwong, S., Boonchouytan, W. and Thongruang, W. 2018a. Mechanical and physical properties of thermoplastic natural rubber composites reinforced with rubberwood sawdust. **SWU Engineering Journal** 13(1): 107-122. (in Thai)

Homkhiew, C., Rawangwong, S., Boonchouytan, W., Thongruang, W. and Ratanawilai, T. 2018b. Composites from thermoplastic natural rubber reinforced rubberwood sawdust: Effects of sawdust size and content on thermal, physical, and mechanical properties. **International Journal of Polymer Science** 2018(3): 1-11.

Jamil, M.S., Ahmad, I. and Abdullah, I. 2006. Effects of rice husk filler on the mechanical and thermal properties of liquid natural rubber compatibilized high-density polyethylene/ natural rubber blends. **Journal of Polymer Research** 13(4): 315-321.

Kosonmetee, K. 2008. Preparation and mechanical properties of rubber composites made from thermoplastic natural rubber blended with jute fiber. Thesis of Master of Science in Polymer Science and Technology, Prince of Songkla University.

Legge, N.R., Holden, G. and Schroeder, H.E. 1987. **Thermoplastic Elastomers: A Comprehensive Review.** Hanser Publishers, New York.

Mohamed, W.Z.W., Baharum, A., Ahmad, I., Abdullah, I. and Zakaria, N.E. 2018. Mengkuang fiber reinforced thermoplastic natural rubber composites: Influence of rubber content on mechanical properties

and morphology. **Malaysian Journal of Analytical Sciences** 22(5): 906-913.

Nunes, A.T., Santos, R.E., Pereira, J.S., Barbosa, R. and Ambrosio, J.D. 2018. Characterization of waste tire rubber devulcanized in twin-screw extruder with thermoplastics. **Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology** 34(3): 143-157.

Pichaiyut, S., Nakason, C. and Vennemann, N. 2012. Thermoplastic elastomers-based natural rubber and thermoplastic polyurethane blends. **Iranian Polymer Journal** 21: 65-79.

Sae-Oui, P., Sirisinha, C., Sa-nguanthammarong, P. and Thaptong, P. 2010. Properties and recyclability of thermoplastic elastomer prepared from natural rubber powder (NRP) and high density polyethylene (HDPE). **Polymer Testing** 29(3): 346-351.

Saleesung, T., Saeoui, P. and Sirisinha, C. 2010. Mechanical and thermal properties of thermoplastic elastomer based on low density polyethylene and ultra-fine fully-vulcanized acrylonitrile butadiene rubber powder (UFNBRP). **Polymer Testing** 29(8): 977-983.

Sukontasukkul, P. and Wiwatpattanapong, S. 2009. Lightweight concrete mixed with superfine crumb rubber powder part 1: Insulation properties. **The Journal of KMUTNB** 19(3): 1-10.