

การหาภาวะเหมาะสมที่สุดในการกระบวนการผลิตยางรีเคลมสำหรับขยะยางที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติ
และยางอีพีดีเอ็ม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*OPTIMIZATION OF RECLAIMED RUBBER PRODUCTION PROCESS FOR RUBBER WASTE
CONSISTING OF NATURAL RUBBER AND EPDM RUBBER*



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาภาวะเหมาะสมที่สุดในการกระบวนการผลิตยางรีเคลม
สำหรับขยะยางที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติและยางอีพีดี
เอเอ็ม

โดย

น.ส.ภัศรา สุวรรณสิงห์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

ภัลลรา สุวรรณสิงห์ : การหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกระบวนการผลิตยางรีไซเคิลสำหรับขยะยางที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็ม. (OPTIMIZATION OF RECLAIMED RUBBER PRODUCTION PROCESS FOR RUBBER WASTE CONSISTING OF NATURAL RUBBER AND EPDM RUBBER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากฎที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่สำหรับเตรียมยางรีไซเคิลจากขยะยาง 2 ชนิด ประกอบด้วยขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักและขยะยางอีพีดีเอ็ม ผลการวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนโดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส พบว่าขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักและขยะยางอีพีดีเอมมีสัดส่วนของเนื้อยางอยู่ที่ร้อยละ 53.5 และ 56.0 ตามลำดับ สำหรับการเตรียมยางรีไซเคิลจากขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักภาวะของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ได้ทำการศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 150, 200 และ 250 rpm โดยแต่ละความเร็วรอบจะใช้อุณหภูมิผสมที่ 200, 225 และ 250 องศาเซลเซียส ในขณะที่การเตรียมยางรีไซเคิลจากขยะยางอีพีดีเอมจะใช้ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูเหมือนกับกรณีแรก แต่อุณหภูมิผสมจะอยู่ที่ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของสกรูและอุณหภูมิผสมส่งผลทำให้ยางรีไซเคิลทั้งสองชนิดมีความหนืดมูลลดลง เมื่อนำยางรีไซเคิลที่ได้ไปขึ้นรูปตามมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 และทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่ายางรีไซเคิลจากขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักที่เตรียมที่ภาวะความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 250 rpm และอุณหภูมิผสมที่ 200 องศาเซลเซียส และขยะยางอีพีดีเอมที่เตรียมที่ภาวะความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 150 rpm และอุณหภูมิผสมที่ 275 องศาเซลเซียส จะมีความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด สูงที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากยางรีไซเคิลทั้ง 2 ชนิด ที่ได้จากภาวะข้างต้นมีร้อยละการดีวัลคาไนซ์สูงที่สุด ทำให้มีสภาพเป็นเทอร์โมพลาสติกสูงที่สุด เมื่อนำไปขึ้นรูปซ้ำจึงให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อนำภาวะข้างต้นไปศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารรีไซเคิลประเภทเทอร์เรเบนซิลไทยูแรมไดซัลไฟด์และเทอร์เรโอโซบิวทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ พบว่ายางรีไซเคิลคงรูปจากขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักและยางรีไซเคิลคงรูปจากขยะยางอีพีดีเอมที่เติมสารรีไซเคิลชนิดเทอร์เรโอโซบิวทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ 1 และ 3 ส่วนในร้อยละของยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด สูงที่สุดทั้งสองชนิดที่เติม ทั้งนี้เป็นผลมาจากยางรีไซเคิลดังกล่าวมีร้อยละการดีวัลคาไนซ์สูงที่สุด เมื่อนำยางรีไซเคิลทั้ง 2 ชนิดที่ไปใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ตามสูตรที่กำหนด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางรีไซเคิลเป็นผลให้สมบัติเชิงกลของยางคงรูปลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าที่มีการใช้ยางรีไซเคิลทดแทนยางบริสุทธิ์จะได้อย่างคงรูปมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนสูงที่ขึ้น

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2565	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6472030823 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: RECLAIMED RUBBER, TWIN SCREW EXTRUDER, SCREW ROTATION SPEED, MIXING
ZONE TEMPERATURE

*Passara Suwannasing : OPTIMIZATION OF RECLAIMED RUBBER PRODUCTION PROCESS FOR
RUBBER WASTE CONSISTING OF NATURAL RUBBER AND EPDM RUBBER. Advisor: Assoc. Prof.
KANOKTIP BOONKERD Co-advisor: Assoc. Prof. SIRILUX POOMPRADUB*

This research aims to study the optimum conditions for preparing reclaimed rubber from two types of rubber waste, consisting of natural rubber as the major component and EPDM rubber. Thermogravimetric analysis showed the proportion of rubber in rubber waste containing natural rubber as the major component and EPDM rubber was 53.5% and 56.0%, respectively. Preparation of reclaimed rubber from rubber waste by using a twin-screw extruder and varying the screw rotation speed at 150, 200 and 250 rpm, with each rotation speed using the mixing zone temperature at 200, 225 and 250 °C for the rubber waste containing natural rubber as a major component, while for EPDM waste, the mixing zone temperature was varied at 250, 275 and 300 °C and the rotation speed of the screw was the same as the first case. When testing Mooney viscosity, it found that the increasing of screw rotation speed and mixing zone temperature resulted in the decreasing of Mooney viscosity of reclaimed rubber. The reclaimed rubber was molded according to ISO/TS 16095:2021 and tested for mechanical properties. It found that the reclaimed rubber from rubber waste containing natural rubber as a major component prepared at screw rotation speed at 250 rpm and mixing zone temperature at 200 °C and EPDM waste prepared at screw rotation speed at 150 rpm and the mixing zone temperature at 275 °C showed the highest tensile strength and elongation at break. Because of the two types of reclaimed rubber obtained from the above conditions had a highest devulcanization percentage, resulting in the highest thermoplastic behavior. The reclaimed rubber was revulcanized, it gives the highest mechanical properties. The above conditions were used to study the influence of type and quantity of Tetrabenzylthiuram disulfide and Tetraisobutylthiuram disulfide as reclaiming agent. The addition of tetraisobutylthiuram disulfide at 1 and 3 part per hundred rubber for rubber waste containing natural rubber as the major component and EPDM waste, respectively is the best condition to prepare reclaimed rubber. Revulcanizate from both types of reclaimed rubber have the highest tensile strength and elongation at break. Due to, reclaimed rubber had highest percentage of

Field of Study: Science for Industry

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยคามอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด และรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ แนวทางในการทำงานวิจัย ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ ทั้งยังมอบความห่วงใย ให้คำแนะนำในข้อผิดพลาด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ประจำหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ห้องศรัทธา คำแนะนำ และให้คำปรึกษา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตร และเจ้าหน้าที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบพระคุณเครือข่ายการอุดมศึกษาเพื่ออุตสาหกรรมภายใต้แผนงานย่อย “การส่งเสริมและพัฒนาบุคลากรผ่านการเรียนรู้ปฏิบัติจริง” สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ที่ห้องศรัทธา แนวคิด ทฤษฎี ประสบการณ์การทำงานจริง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของโครงการ ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บริษัท อินโนเวชั่น กรุ๊ป (ประเทศไทย) จำกัด บริษัทในเครือ บริษัท พีไอ อินดัสทรี จำกัด ที่ให้คำปรึกษา ประสบการณ์ทำงานจริง และให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำงานวิจัยทำให้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอบคุณบุคลากรในแผนกวิจัย ขอขอบคุณพี่ ๆ ที่ถ่ายทอดประสบการณ์การทำงานซึ่งไม่สามารถหาได้จากในห้องเรียน เป็นความรู้ที่สามารถต่อยอดได้ ขอขอบคุณสำหรับ ทุกคำสอน คำแนะนำ และกำลังใจที่มีให้กันเสมอ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายใน และรองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัดกรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง เพื่อน และบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีได้กล่าวถึง ในครั้งนี้ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ กำลังใจ และความช่วยเหลือจนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาของทุกท่าน ทั้งที่ได้กล่าวถึงและผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนาม ในที่นี้ ที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในการสนับสนุน ให้กำลังใจด้วยดีตลอดเสมอมา ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จ ผู้ทำวิจัยจึงขอกราบ ขอบพระคุณทุกท่าน จากใจจริง ด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าว หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชนิดและโครงสร้างของขยะยางที่นำมาเตรียมเป็นยางรีไซเคิลในงานวิจัย.....	4
2.1.1 ขยะยางรถยนต์.....	4
2.1.2 ขยะยางอีพียีเอ็ม.....	12
2.2 การนำยางกลับมาใช้ใหม่.....	12
2.2.1 การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง (Tire Derived Fuel, TDF).....	12
2.2.2 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	13
2.2.3 ยางรีไซเคิล (Reclaimed rubber)	13
2.3 กระบวนการผลิตยางรีไซเคิล.....	14
2.3.1 การเตรียมยางรีไซเคิล.....	14

2.3.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากกระบวนการรีเคลม.....	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่เกี่ยวข้อง.....	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง.....	21
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบที่เกี่ยวข้อง.....	21
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	22
บทที่ 4.....	30
ผลการดำเนินงาน.....	30
4.1 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ.....	30
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของขยะยางธรรมชาติ.....	30
4.1.2 ผลของภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม.....	31
4.1.3 ผลของภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม.....	33
คงรูป.....	33
4.1.4 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ.....	35
4.1.5 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมคงรูปจากขยะยางธรรมชาติ.....	37
4.1.6 ผลของปริมาณยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติที่ใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง.....	40
4.2 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม.....	45
4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของขยะยางอีพีดีเอ็ม.....	45
4.2.2 ผลของภาวะในการเตรียมยางรีเคลมจากขยะอีพีดีเอ็มต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม.....	46

4.2.3 ผลของภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม คงรูป.....	48
4.2.4 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมจากขยะยาง อีพีดี เอ็ม	50
4.2.5 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมคงรูปจากขยะยางอีพี ดีเอ็ม.....	51
4.2.6 ผลของปริมาณยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มที่เติมทดแทนยางบริสุทธิ์ต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผลการวิจัย เรียงลำดับตามวัตถุประสงค์	60
5.1.1 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก.....	60
5.1.2 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ.....	13
ตารางที่ 3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองและหน้าที่ของสารนั้น ๆ.....	20
ตารางที่ 3.2	อุปกรณ์ เครื่องมือและหน้าที่ของอุปกรณ์และเครื่องมืออื่น ๆ.....	21
ตารางที่ 3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์/ทดสอบและหน้าที่.....	21
ตารางที่ 3.4	ภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	23
ตารางที่ 3.5	ภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	23
ตารางที่ 3.6	สูตรสารประกอบยางของยางรีเคลมอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021	25
ตารางที่ 3.7	สูตรสารเคมียางสำหรับยางธรรมชาติคงรูป	28
ตารางที่ 3.8	สูตรสารเคมียางสำหรับยางอีพีดีเอ็มคงรูป.....	28
ตารางที่ 4.1	ค่าความหนืดมูนิ, ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ และลักษณะภายนอกของยางรีเคลมจากขยะ	33
ตารางที่ 4.2	พฤติกรรมการคงรูปที่อุณหภูมิ 140 °C ของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ	34
ตารางที่ 4.3	ค่าความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ	34
ตารางที่ 4.4	ตารางเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลระหว่างยางรีเคลมทางการค้าและที่ได้จากงานวิจัย	40
ตารางที่ 4.5	พฤติกรรมการคงรูปที่อุณหภูมิ 155 °C ของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติทดแทนยางบริสุทธิในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr	41
ตารางที่ 4.6	ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางผสมที่ทดแทนยางบริสุทธิด้วยยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติในสัดส่วนต่าง ๆ.....	44
ตารางที่ 4.7	ค่าความหนืดมูนิ, ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ และลักษณะภายนอกของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	47
ตารางที่ 4.8	พฤติกรรมการคงรูปที่อุณหภูมิ 170 °C ของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม.....	48

ตารางที่ 4.9 ความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมจากขยะยางอีพดีเอ็ม.....	49
ตารางที่ 4.10 พฤติกรรมการคงรูปที่อุณหภูมิ 155 °C ของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางทดแทนยางปริสุทรีในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr	56
ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางผสมที่ทดแทนยางปริสุทรีด้วยยางรีเคลมจากขยะยางอีพดีเอ็มในสัดส่วนต่าง ๆ	58



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	ภาพตัดขวางของยางรถยนต์ชนิดผ้าใบเฉียง	5
รูปที่ 2.2	ภาพตัดขวางของยางรถยนต์ชนิดเรเดียล.....	5
รูปที่ 2.3	ส่วนประกอบของยางรถยนต์	6
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	7
รูปที่ 2.5	แผนภาพกระบวนการผลิตยางรถยนต์	10
รูปที่ 2.6	โครงสร้างของยางอีพิตีเอ็ม.....	12
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของ (a) เททระเบนซิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (b) เททระไอโซบิวทิลไทยแรมไดซัลไฟด์	26
รูปที่ 4.1	TGA Thermogram ของขยะยางธรรมชาติในช่วงอุณหภูมิ องศาเซลเซียส 700 ถึง 25... 31	
รูปที่ 4.2	ความหนืดมูนิของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ	36
รูปที่ 4.3	ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ.....	36
รูปที่ 4.4	เวลาเริ่มการคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ	37
รูปที่ 4.5	เวลาที่ใช้ในคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ.....	38
รูปที่ 4.6	ความแข็งของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ ที่เติมสารรีเคลมชนิด TIBTD และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr	38
รูปที่ 4.7	ความทนต่อแรงดึงของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ	39
รูปที่ 4.8	ร้อยละการดึงยืดของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ	39
รูปที่ 4.9	ความหนืดมูนิของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติทดแทนยางปริสุทธิ์ ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr.....	41
รูปที่ 4.10	ความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการดึงยืดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยาง ธรรมชาติ ทดแทนยางปริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr.....	42
รูปที่ 4.11	ความทนทานต่อการกัดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ ทดแทนยางปริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr.....	43

รูปที่ 4.12 ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจาก ขยะยางธรรมชาติทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr	44
รูปที่ 4.13 โครงสร้างสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของแผ่นยางที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ ทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน (a)0 , (b) 20, (c) 40 และ (d) 60 phr ตามลำดับ.....	45
รูปที่ 4.14 TGA Thermogram ของขยะยางอีพิตีเอ็มในช่วงอุณหภูมิ องศาเซลเซียส 700 ถึง 25..	46
รูปที่ 4.15 ความหนืดมูนิของยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม	51
รูปที่ 4.16 ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม.....	51
รูปที่ 4.17 เวลาเริ่มการคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม	52
รูปที่ 4.18 เวลาที่ใช้ในคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม.....	53
รูปที่ 4.19 ความแข็งของยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม	53
รูปที่ 4.20 ความทนทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม.....	54
รูปที่ 4.21 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็มที่	54
รูปที่ 4.22 ความหนืดมูนิของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม.....	55
รูปที่ 4.23 ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลม	57
รูปที่ 4.24 ความทนทานต่อการกดอัดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม.....	57
รูปที่ 4.25 ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของ.....	58
รูปที่ 4.26 โครงสร้างสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของแผ่นยางที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม..	59

บทที่ 1

บทนำ

ยางเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยก่อนนำไปใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการคงรูปเพื่อทำให้เกิดเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ได้เป็นโครงร่างสามมิติ ส่งผลให้ยางมีความยืดหยุ่นและสมบัติเชิงกลสูงพอที่จะนำไปใช้งานได้ ระบบการคงรูปที่นิยมใช้คือ การคงรูปด้วยกำมะถัน โดยกำมะถันทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างสายโซ่ของยาง ปัจจุบันอุตสาหกรรมยางทั่วโลกมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นขยะจากกระบวนการผลิตรวมไปถึงยางที่หมดอายุการใช้งานจะเกิดการสะสมเป็นจำนวนมาก ซึ่งในประเทศไทยพบว่ามีขยะยางเหล่านี้มากถึงประมาณ 60,000-70,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น (Asaro et al., 2018) เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหสามมิติ จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการให้ความร้อนเพื่อให้หลอมเหลวและขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น แก้ว พลาสติกหรือโลหะ

ในปัจจุบันมีกระบวนการกำจัดยางได้หลากหลายวิธี เช่น การฝังกลบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้เนื้อที่ในการฝังกลบจำนวนมาก อีกทั้งส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมของดิน การเผาขยะยางเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมากำจัดขยะยางได้ แต่จะส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมทางอากาศ เนื่องจากในกระบวนการมีการปลดปล่อยแก๊สพิษ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น จากปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้นักเทคโนโลยีฯ ได้พัฒนาวิธีการที่จะนำเอาขยะยางกลับมาใช้ใหม่โดยส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยการตัดพันธะเชื่อมขวางกำมะถันออก กระบวนการนี้เรียกว่า “ การดีวัลคาไนเซชัน ” (Aoudia et al., 2017; Asaro et al., 2018) กระบวนการนี้ทำให้ระดับการเชื่อมขวางในยางคงรูปลดลง ส่งผลให้ยางกลับมาไหลได้เมื่อได้รับความร้อน และสามารถนำกลับมาขึ้นรูปซ้ำใหม่ ยางที่ได้จะเรียกว่า “ ยางรีเคลม ” (Barlow, 2018) แต่เนื่องจากยางรีเคลมผ่านความร้อนและได้รับแรงเชิงกลสูง ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลต่ำ การนำไปใช้งานใหม่ส่วนมากจะนำไปใช้ร่วมกับยางบริสุทธิ์เพื่อลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ยางให้ต่าง กระบวนการดีวัลคาไนเซชันมีหลายวิธี (Adhikari et al., 2000; Formela et al., 2014) ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางกายภาพที่อาศัยแรงจากภายนอกมาช่วยในการตัดพันธะเชื่อมขวางในยาง (Esser,

1959) กระบวนการทางเคมีที่มีการใช้สารเคมีเข้ามาช่วย หรือกระบวนการทางชีวภาพที่มีการใช้จุลินทรีย์ที่หลังสารที่มีความจำเพาะในการทำลายพันธะเชื่อมขวางในยางได้ (Jiang et al., 2013) การเลือกรูปแบบกระบวนการต้องพิจารณาจากข้อดีและข้อเสียของแต่ละกระบวนการให้สอดคล้องกับชนิดยางที่ใช้

ปัจจุบันการเตรียมยางรีไซเคิลในระดับอุตสาหกรรม นิยมเตรียมด้วยวิธีการให้ความร้อนจากหม้ออัดความดันไอน้ำแรงสูง (Autoclave) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบแบตช์ โดยยางรีไซเคิลที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการอัดรีดเป็นแผ่นก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความประสงค์จะพัฒนากระบวนการผลิตยางรีไซเคิลในระดับอุตสาหกรรม โดยการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) เนื่องจากเป็นเครื่องที่สามารถทำให้เกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางด้วยกระบวนการเชิงกลควบคู่กับความร้อน อีกทั้งเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่พบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ สามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการเตรียมให้สั้นลง ยางรีไซเคิลที่ได้จะอยู่ในเส้นยางทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานในขั้นต่อไป สำหรับขยะยางที่จะนำมาทำการศึกษามีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภทคือ ขยะยางล้อที่มียางธรรมชาติองค์ประกอบหลักและขยะยางอีพีดีเอ็ม โดยจะทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ในการเตรียมยางรีไซเคิลซึ่งประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนของสกรู อุณหภูมิของโซนผสมสำหรับขยะยางแต่ละชนิด อีกทั้งจะทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมสารรีไซเคิลชนิดใหม่ที่สามารถลดปัญหาจากการปลดปล่อยสารไนโตรซามีนระหว่างกระบวนการผลิตได้ และมีการวิเคราะห์หาสัดส่วนยางรีไซเคิลที่เหมาะสมในการใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์

วัตถุประสงค์

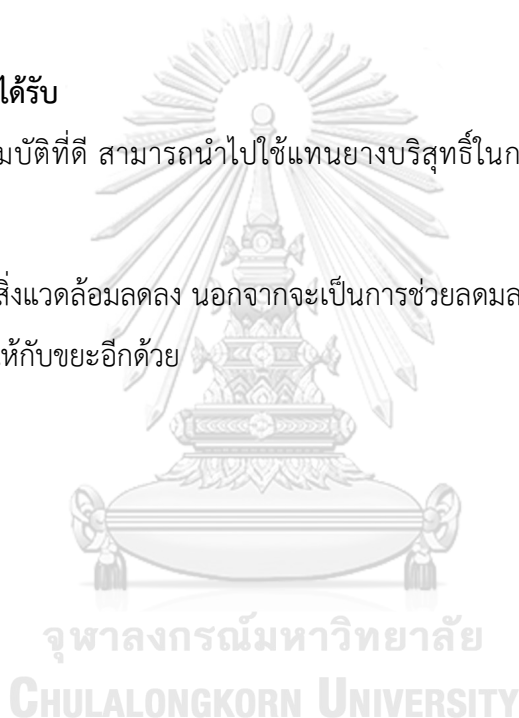
1. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมยางรีไซเคิลต่อสมบัติของยางรีไซเคิลที่ได้จากขยะยางที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยทำการแปรปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของโซนผสม ความเร็วรอบในการหมุนสกรู และอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารรีไซเคิล
2. วิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนการใช้ยางรีไซเคิลที่เหมาะสมในการทดแทนยางบริสุทธิ์ในสูตรยางที่กำหนด

ขอบเขตการศึกษา

1. ทำการเตรียมและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมจากขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก และขยะยางอีพิตีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) โดยแปรปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของโซนผสม ความเร็วรอบในการหมุนสกรู และอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารรีเคลม
2. ศึกษาผลของการใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์ที่สัดส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 0, 20, 40 และ 60 phr ต่อสมบัติ สมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปที่ได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ยางรีเคลมที่มีสมบัติที่ดี สามารถนำไปใช้แทนยางบริสุทธิ์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่าง ๆ ได้
2. ปริมาณขยะยางในสิ่งแวดล้อมลดลง นอกจากจะเป็นการช่วยลดมลภาวะที่มีต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับขยะอีกด้วย



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดและโครงสร้างของขยะยางที่นำมาเตรียมเป็นยางรีเคลมในงานวิจัย

2.1.1 ขยะยางรถยนต์

- ความหมายของยางรถยนต์

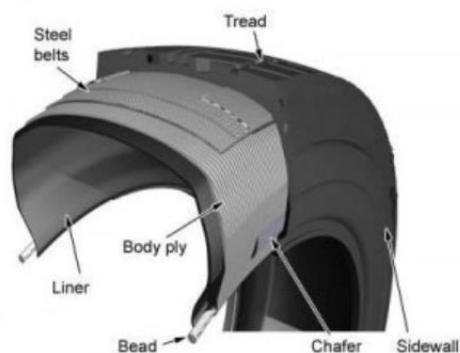
ยางรถยนต์ คือ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยยาง สารเคมี ผ้าใบ และเหล็กกล้า หรือวัสดุอื่น ๆ เมื่อติดตั้งเข้ากับวงล้อรถยนต์และสูบลมแล้วสามารถรับน้ำหนักและทำให้รถเคลื่อนที่ได้ เมื่อมีแรงกด ขยะยางรถยนต์มีหน้าที่รับน้ำหนักรถยนต์และน้ำหนักบรรทุกทุก ลดแรงกระแทกและสั่นสะเทือนจากพื้น เป็นตัวกลางถ่ายทอดพลังงาน ขับเคลื่อนและการหยุดรถลงสู่พื้นผิวถนน และทำให้รถเปลี่ยนทิศทางได้ตามต้องการ

- ชนิดของยางรถยนต์

ยางรถยนต์จำแนกตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแบ่งเป็น 2 ประเภทดังนี้

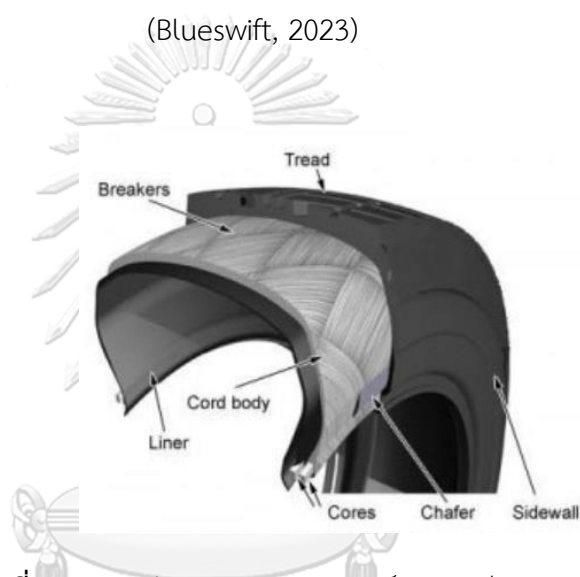
1) ยางรถยนต์ชนิดผ้าใบเฉียง (Bias ply tire) เป็นยางรถยนต์ซึ่งชั้นผ้าใบแผ่ขยายไปยังขอบลวดวางสลับกันทำมุมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกยางน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.1 โดยชั้นผ้าใบทำจากเส้นใยไนลอน ยางรถยนต์ชนิดนี้จะมี ส่วน คือ ยางนอก 2 และยางใน ซึ่งการที่จำเป็นต้องมียางในก็เพื่อช่วยในการกักเก็บลม ยางรถยนต์ประเภทนี้เรียกว่า ยางธรรมดา หรือยางผ้าใบ (Textile Bias Ply) มีความแข็งแรงทนทานไม่นานนัก อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างต่ำ ราคาถูกนิยมใช้สำหรับงานระยะสั้นเฉพาะฤดูกาล เช่น การขนส่งพืชไร่ เป็นต้น

2) ยางเรเดียล (Radial) เป็นยางรถยนต์ที่ชั้นผ้าใบแผ่ขยายไปยังขอบลวดวางทำมุมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกยางประมาณ 90 องศา ดังรูปที่ 2.2 ชั้นผ้าใบทำจากเส้นใยสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์ ซึ่งช่วยในการเก็บกักลมทำให้ยางประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องมียางในสำหรับช่วยในการเก็บกักลม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโดยเสริมเส้นลวดหรือใยเหล็กเข้าไปในโครงสร้างของยางเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะถนน และมีการพัฒนารูปแบบของดอกยางให้ยึดเกาะถนนและรีดน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของยางรถยนต์ชนิดผ้าใบเฉียง

(Blueswift, 2023)



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางของยางรถยนต์ชนิดเรเดียล

(Blueswift, 2023)

- ส่วนประกอบของยางรถยนต์

ยางรถยนต์มีประกอบส่วนสำคัญ 5 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และหน้าที่ของแต่ละส่วนมีดังนี้

1) ยางผสม ต้องมีส่วนผสมพื้นฐานเป็นยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ หรืออย่างใดอย่างหนึ่งและต้องเจือปนด้วยสารป้องกันปฏิกิริยาของออกซิเจนหรือโอโซน

2) โครงยาง (Inner Liner) ประกอบด้วยผ้าใบชั้นเดียว หรือหลายชั้น และอาจเสริมด้วยวัสดุที่ทำจากเส้นใยไนลอน โพลีเอสเตอร์ เรยอน ลวด โลหะ หรือเส้นใยชนิดอื่นที่ฉาบยาง ทำหน้าที่เก็บกักลม

3) ดอกยาง (Tread) ส่วนของยางรถยนต์ที่สัมผัสกับพื้นถนน ซึ่งอาจเรียงเป็นแนวตามเส้นรอบวง (Tread Rib) หรือเรียงตามแนวขวางกับเส้นรอบวง (Tread Element) หรือเป็นปุ่ม (Tread Block) ดอกยางทำจากส่วนผสมของยางธรรมชาติ

4) ขอบลวด (Bead Wire) ประกอบด้วยลวดเหล็กกล้าชุบด้วยทองแดง หรือบรอนซ์ ซึ่งอาจหุ้มด้วยผ้าใบฉาบยาง ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงในการยึดยางกับกระทล้อ

5) แก้มยาง (Side Wall) คือ ส่วนที่อยู่ระหว่างยางกับขอบลวด ซึ่งทำจากวัสดุประเภทเดียวกันกับดอกยาง ทำหน้าที่ห่อหุ้มโครงชั้นผ้าใบ



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของยางรถยนต์

(Learn, 2023)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

- วัตถุดิบที่ใช้ผลิตยางรถยนต์

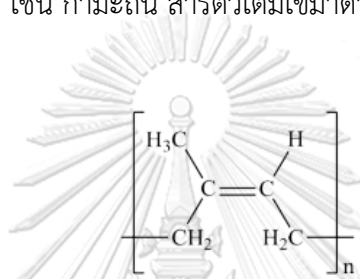
การผลิตยางรถยนต์จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ตั้งแต่การเตรียมยางผสม (Compound Rubber) และวัตถุดิบอื่น ๆ ที่นำมาผสมร่วมกับยางผสมและประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องในการผลิตยางรถยนต์สามารถจำแนกได้ดังนี้

1) ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) (Esser, 1959) คือ พอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 โดย n มีค่าตั้งแต่ 15 ถึง 20,000 จะเห็นได้ว่าใน 1 หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่ และหมู่แอลฟาเมทิลีน

(α -methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน อย่างไรก็ตามพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลยังสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อมได้ เช่น แสงแดด ออกซิเจน โอโซน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงเสื่อมสภาพได้ง่าย

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อถูกยืดออกจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้มีความทนต่อแรงดึงสูง มีความทนต่อการฉีกขาด มีสมบัติเชิงพลเชิงพลวัตที่ดี ทำให้สูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อนต่ำในการระหว่างการใช้งาน มีความต้านทานต่อการขูด แต่สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติมีความเสถียร สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน สารตัวเติมเขม่าดำ สารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

2) ยางสังเคราะห์ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นยางสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติคล้ายยางธรรมชาติ ได้แก่ SBR (Styrene - butadiene rubber) BR (Polybutadiene rubber) และ IR (Butyl rubber) ยางสังเคราะห์ในส่วนนี้จะใช้ผสมเข้ากับยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ในกลุ่มแรกในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ยางผสม (Compound Rubber) มีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

3) ผงเขม่าดำ (Carbon Black) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันดิบและเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญมากชนิดหนึ่งในกระบวนการผลิตยางรถยนต์ มีคุณสมบัติในการช่วยให้ยางแข็งตัว เพิ่มความทนทานของยางต่อรอยขีดข่วนต่าง ๆ มีสัดส่วนการใช้ประมาณหนึ่งในสามของน้ำหนักยางรถยนต์

4) ผ้าใบไนลอน (Tire Cord) เป็นส่วนของยางที่สัมผัสกับพื้นถนนและมีส่วนสำคัญในการสร้างความสมดุลของยางรถยนต์ ชั้นผ้าใบมีอยู่ 2 ประเภท คือ ชั้นผ้าใบสำหรับยางประเภทไบแอส (Bias) ซึ่งทำจากเส้นใยไนลอน และชั้นผ้าใบสำหรับยางเรเดียล (Radial) ซึ่งทำจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์

5) เส้นลวด เส้นลวดที่ใช้ในการผลิตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ที่สำคัญ คือ เส้นลวดประเภท Bead Wire สำหรับทำขอบ และเส้นลวดประเภท Stee Cord เป็นเส้นลวดใยเหล็กที่ใช้สำหรับยางเรเดียล

6) เคมีภัณฑ์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผสมยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และผงเขม่าดำให้เข้ากันเพื่อเพิ่มคุณสมบัติหรือเร่งปฏิกิริยาในการผลิต และเตรียมเป็นยางผสม ที่พร้อมจะนำไปขึ้นรูป สารเคมีเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ที่สำคัญ ดังนี้

- สารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing Agent) สารกลุ่มนี้ใส่เพื่อให้โมเลกุลของยางอยู่ในสถานะที่ยึดหยุ่นได้ดี ก่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง เพิ่มความแข็งแรง และทำให้ยางคงรูป สารในกลุ่มนี้ ได้แก่ ซัลเฟอร์ (กำมะถัน) ซิงออกไซด์ (ZnO) สารเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

- สารป้องกันยางเสื่อมคุณภาพ (Protective Agent) เป็นสารที่เพิ่มสภาพความทนทานของยางต่อปัจจัยต่าง ๆ ได้ดีขึ้น เช่น แสง ออกซิเจน โอโซน และยืดอายุการใช้งานในผลิตภัณฑ์มากขึ้น

- สารช่วยในกระบวนการผลิต สารกลุ่มนี้จะมีหลากหลายประเภท ทำหน้าที่เฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป เช่น สารพวกน้ำมันจะช่วยทำให้ยางที่กำลังบดผสมนี้ และ Pepton 22 ช่วยในการย่อยยาง เป็นต้น

- สารอื่น ๆ สารกลุ่มนี้ผู้ผลิตไม่จำเป็นต้องใส่เสมอไป แต่จะขึ้นอยู่กับความต้องการคุณสมบัติอื่นที่พิเศษบางประการของยางผสมหรือผลิตภัณฑ์ที่จะผลิต เช่น สารทำให้ยางฟูหรือการใส่เพื่อให้ยางมีสีต่าง ๆ โดยใช้สารอินทรีย์สัดส่วนการใช่วัตถุดิบประเภทต่าง ๆ สำหรับการผลิตยางแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด ลักษณะ และคุณสมบัติของยาง ยางรถยนต์ประเภทยางไบแอส ใช้ยางธรรมชาติ

- กระบวนการผลิตยางรถยนต์

กระบวนการผลิตยางรถยนต์มี 9 ขั้นตอน ดังแผนผังกระบวนการผลิตยางรถยนต์ดังรูปที่

2.5

1) การผสม การผลิตยางรถยนต์เริ่มต้นด้วยการเอายางดิบและส่วนผสมต่าง ๆ ผสมเข้าด้วยกันจนกระทั่งถึงระดับความร้อนที่กำหนด ยางที่ผสมแล้วจะออกมาเป็นแผ่น ๆ และตัดออกเป็นลึนยางยาวปล่อยขึ้นไปบนสายพานเพื่อให้เย็นลง

2) การรีดยาง ยางที่ผสมเสร็จแล้วสำหรับใช้เป็นส่วนนอกและส่วนกลางจะถูกส่งไปทำให้ร้อนแล้วส่งไปยังเครื่องรีด เครื่องรีดนี้ทำงานคล้ายเครื่องบดเนื้อ ในเครื่องรีดจะมีเกลียวหมุนซึ่งจะผลักดันยางให้ผ่านออกมาจากเครื่องรีดตามรูปแบบที่ต้องการ และยางที่รีดแล้วจะถูกปล่อยให้เย็นลงก่อนที่จะตัดเป็นชิ้นตามที่ต้องการ

3) การเคลือบยางลงบนผ้าไนลอน เส้นไนลอนจะผ่านเข้าไปในลูกกลิ้งของเครื่องอัดยาง เครื่องอัดยางจะอัดยางลงบนเส้นไนลอนทั้งสองหน้า ปริมาณของยางที่จะอัดลงบนเส้นไนลอนนี้จะต้องมีการควบคุม เพราะมีผลต่ออายุการใช้งานของยาง

4) การตัดผ้าใบไนลอน เมื่อผ้าใบไนลอนผ่านจากแผนกเคลือบยางก็จะส่งมาที่แผนกตัด ตัดออกเป็นชิ้นตามขนาดที่ต้องการ เครื่องนี้จะตัดไนลอนออกตามความกว้างและมุมที่กำหนด ชิ้นไนลอนที่ตัดแล้วจะถูกต่อกันใส่ไปกับผ้าใบสำหรับหุ้ม แล้วส่งไปประกอบเป็นโครงชั้นของยางรถ

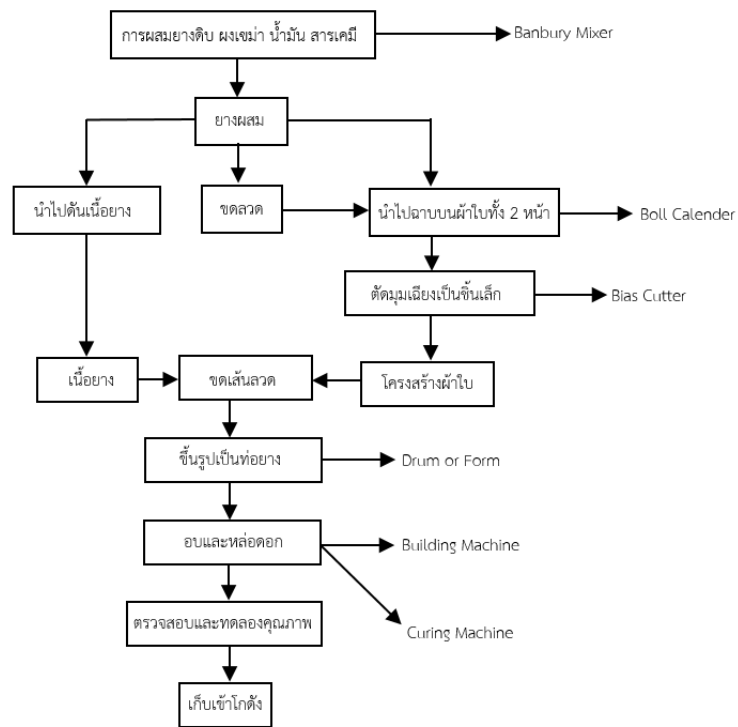
5) การทำขอบยาง ขอบยางเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด เพราะถ้าขอบยางเกิดเสียหายก็อาจเกิดความเสียหายถึงแก่ชีวิตของผู้ใช้รถยนต์ได้ ดังนั้น วัสดุที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่ดีที่สุด เส้น

6) การสร้างยางรถ เมื่อส่วนประกอบต่าง ๆ ได้เตรียมเรียบร้อยแล้วก็มาถึงการประกอบส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ยางรถจะถูกประกอบขึ้นบนแบบที่หุบได้ ชิ้นไนลอนจะถูกทับกันเป็นชั้น 1 บนแบบและจะพันกับขอบลวด หลังจากนั้นยางชั้นนอกและส่วนกลางก็จะประกอบเข้ามา เมื่อทำยางเสร็จแล้วก็จะหุบแบบเพื่อแยกยางดิบออกจากแบบ ยางดิบนี้จะมีรูปร่างเหมือนถังที่ไม่มีฝาด้านและล่าง ยางรถดิบนี้จะถูกตรวจน้ำหนัก ตรวจสอบสภาพหรือซ่อมก่อนที่จะทำให้สุก

7) การอบยางรถให้สุก ยางรถดิบจะถูกใส่ลงไปในแม่พิมพ์ เมื่อแม่พิมพ์ปิดยางรถดิบก็จะได้รับแรงอัดจนมีรูปร่างเหมือนยางรถที่ใช้กันอยู่ ความร้อนจากไอน้ำในแม่พิมพ์จะทำให้เนื้อยางไหลจนเต็มแบบ แล้วความร้อนก็จะทำให้เคมีภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ผสมกันรวมตัวกัน

8) เวลาของการอบจะมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของยาง ชิ้นสุดท้ายของการอบแม่พิมพ์จะเปิดเองโดยอัตโนมัติ

9) การตรวจครั้งสุดท้าย ยางทุกเส้นจะต้องถูกตรวจก่อนเข้าโกดัง สวนของดอกยางจะถูกตรวจดูว่ามีอะไรเสียหรือไม่ เมื่อเป็นที่พอใจและได้มาตรฐานจึงส่งผ่านเข้าโกดัง



รูปที่ 2.5 แผนภาพกระบวนการผลิตยางรถยนต์

- ปัญหาจากขยะยางยางรถยนต์

ปัญหาจากขยะยางรถยนต์ที่สำคัญ แบ่งเป็น 2 ด้าน คือ ด้านสาธารณสุข และด้านสิ่งแวดล้อม

1) ปัญหาด้านสาธารณสุข

ขยะยางรถยนต์ก่อให้เกิดปัญหาด้านสาธารณสุขที่สำคัญ คือ โรคไข้เลือดออกและโรคฉี่หนูเนื่องจากยางรถยนต์ที่มีน้ำขังจะเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุงลายพาหะนำโรคไข้เลือดออก และยางรถยนต์เป็นที่อยู่อาศัยของหนูพาหะนำโรคที่สำคัญของโรคฉี่หนู

โรคไข้เลือดออกมียุงลายเป็นพาหะนำโรคที่สำคัญ ซึ่งการป้องกันและควบคุมโรคทำได้โดยการควบคุมและกำจัดพาหะของโรค มี 2 ประเด็น คือ การควบคุมและกำจัดลูกน้ำยุงลาย เช่น การปิดฝาภาชนะเก็บน้ำ การเก็บทำลายเศษวัสดุที่อาจเป็นแหล่งขังน้ำ เช่น ขวด กระป๋อง ยางรถยนต์ เป็นต้น การใช้สิ่งมีชีวิตที่เป็นศัตรูโดยธรรมชาติของลูกน้ำยุงลาย เช่น ปลากิน ลูกน้ำ ไรน้ำจืด ตัวอ่อนแมลงปอ เป็นต้น และการใช้สารต่าง ๆ ไล่ลงในแหล่งน้ำให้ลูกน้ำตาย เช่น ใช้ทรายอะเบท เกลือแกง น้ำส้มสายชู ผงซักฟอก เป็นต้น อีกวิธีการป้องกันและกำจัดยุงลาย ทำได้โดยการนอนกางมุ้ง การใส่

เสื่อแขนยาวและกางเกงขายาว การใช้สารไล่ยุง การใช้สารเคมีฉีดพ่น หรือใช้อุปกรณ์กำจัดยุง เช่น กับดักไฟฟ้า

โรคฉี่หนูหรือโรคเล็ปโตสไปโรซิส เป็นโรคติดต่อที่มีพาหะนำโรคมารู้อันสำคัญ คือ พวกสัตว์ทะเลทั้งหลาย เช่น หนู โดยเฉพาะหนูบ้าน หนูพุก หนูนา และที่พบรองลงมา คือ สุนัข สุกร กระบือ คนจะได้รับเชื้อนี้ โดยการเดินย่ำน้ำที่มีเชื้อจากปัสสาวะของสัตว์ที่เป็นโรค โดยย่ำเท้าเปล่าไม่สวมรองเท้า ไม่สวมถุงมือ พบโรคนี้นี้มากตามแหล่งน้ำขังที่มีพาหะนำโรคชุกชุม การป้องกันและควบคุมที่สำคัญ คือ กำจัดหนู

2) ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกำจัดยางรถยนต์ ได้แก่ ปัญหาจากการฝัง กลบ และการเผายางรถยนต์

1) การฝังกลบยางรถยนต์

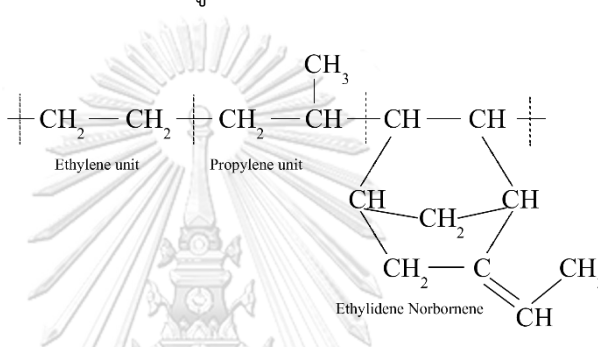
แม้ยางรถยนต์เก่าถูกนำมาทิ้งในที่หลุมฝังกลบขยะอย่างถูกหลักสุขาภิบาล แต่ก็สร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อม นอกจากจะต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการฝังกลบแล้ว ยังทำการอัดฝังกลบให้แน่นได้ยากเนื่องจากยางกลวงและมีความยืดหยุ่น รวมทั้งยางที่ถูกฝังกลบอัดแน่นไว้จะพองตัวในภายหลังซึ่งจะสร้างความเสียหายต่อวัสดุรองพื้นสังเคราะห์ และระบบรวบรวมน้ำทิ้งจากขยะ (Liquid Collection systems) ซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้น้ำเสียจากหลุมฝังกลบส่งผลเสียต่อน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน

2) การเผายางรถยนต์

สำหรับความเสียหายหรืออันตรายที่เกิดจากการทิ้งโดยไม่มีการควบคุม ซึ่งถูกทิ้งเป็นกองใหญ่ตามทีต่าง ๆ คือ อาจเกิดปัญหาไฟไหม้ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น ควันพิษ มีสารพิษปนเปื้อนในอากาศ น้ำ ดิน ทั้งนี้การใช้น้ำหรือโฟมดับไฟจะยิ่งส่งผลกระทบต่ออากาศ น้ำ ดินมากกว่าการปล่อยให้กองยางถูกเผาไหม้ ซึ่งใช้เวลานานในการเผาไหม้ นอกจากนี้จะมีน้ำมันที่ออกมาจากยางที่ถูกเผาไหม้ซึ่งอาจจะปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำส่งผลให้สัตว์น้ำตายได้ จะเห็นได้ว่าแม้การดับไฟก็สามารถสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงมีการใช้ดินมากลบเพื่อช่วยดับไฟ แต่ดินก็จะปนเปื้อนน้ำมันที่ออกมาจากยางที่ถูกเผาไหม้ ซึ่งทำให้ต้องมีการนำดินนั้นไปจัดการ

2.1.2 ขยะยางอีพดีเอ็ม

ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน หรือยางอีพดีเอ็ม (Ethylene-propylene diene rubbers, EPDM) เป็นยางที่สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) และโพรพิลีน (Propylene) และขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมีการเติมมอนอเมอร์ชนิดไดอีน (Diene) ลงไปเล็กน้อยเพื่อให้ยางอีพดีเอ็มสามารถใช้กำมะถันในการคงรูป เนื่องจากไดอีนที่เติมลงไปจะเกาะอยู่กับสายโซ่หลักเป็นลักษณะกิ่ง ดังรูปที่ 2.6 ด้วยเหตุนี้ แม้ว่าตำแหน่งพันธะคู่จะเกิดการแตกตัวอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น แสงแดด ออกซิเจน โอโซน เป็นต้น แต่สายโซ่หลักของโมเลกุลยางยังคงเดิม ยางอีพดีเอ็มจึงมีสมบัติเด่นในเรื่องทนทานต่อความร้อน แสงแดด และโอโซนได้ เรานิยมนำไปใช้ผลิตภัณฑ์ส่วนต่าง ๆ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ประตู ซีลยางกันน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางอีพดีเอ็ม

2.2 การนำยางกลับมาใช้ใหม่

ยางเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก ดังนั้นการนำยางที่ใช้แล้วหรือขยะจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่จะช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิตได้ การนำยางเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ (Myhre & MacKillop, 2002) สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

2.2.1 การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง (Tire Derived Fuel, TDF)

เนื่องจากในขยะยางรถยนต์มีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 90% ดังนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว สามารถให้พลังงานได้ประมาณ 13,000-15,500 บีทียูต่อปอนด์ ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ถ่านหินและไม้ แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

ชนิดเชื้อเพลิง	บีทียูต่อปอนด์
Petroleum coke	14,000
Wood	4,400
Bitumous coal	13,000
Lignite coal	7,000
TDF	13,000-15,000

ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นิยมนำขยะยางไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ใน stoker-fired boiler ใช้ขยะยางเผาพร้อมกับถ่านหิน โดยใช้แทนที่ถ่านหิน 10-15% นอกจากนี้ยังพบว่า การนำขยะยางไปเผาเป็นเชื้อเพลิง มีข้อได้เปรียบกว่าการเผาไหม้ด้วยถ่านหิน คือ มีการเผาไหม้ที่สะอาดกว่า จึงก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศน้อยกว่าและปริมาณขยะแข็ง (Solid waste) ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่า สำหรับอุตสาหกรรมที่มีการนำขยะยางไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมกระดาษ และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า

2.2.2 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

การนำขยะยางไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์หลายประเภท ได้แก่ ถ่านคาร์บอน (carbon char) น้ำมัน แก๊ส และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการไพโรไลซิส โดยถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C ผลิตภัณฑ์หลักคือ ถ่านคาร์บอน และผลิตภัณฑ์หลักจะมีสัดส่วนของแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของการไพโรไลซิสสูงขึ้น ตัวอย่างของกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ Tosco II process

2.2.3 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำขยะยางมาผ่านกระบวนการที่ทำให้ยางคืนกลับสู่สถานะพลาสติก (Plastic state) ซึ่งสามารถนำมาผสมและขึ้นรูปใหม่ได้อีกครั้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจมีการเติมหรือไม่เติมยางใหม่ก็ได้ (Adhikari et al., 2000; Aoudia et al., 2017; Mohaved et al., 2015) โดยกระบวนการข้างต้นจะทำลายพันธะเชื่อมขวางในยาง หรือเรียกว่า การแตกออกของพันธะเชื่อมขวาง (Devulcanization) และยังเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง (Depolymerization) อีกด้วย ซึ่งการที่โครงสร้างโมเลกุลของยางถูกทำลายนี้เอง ส่งผลให้ยางรีเคลมที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางบริสุทธิ์ (Virgin rubber)

2.3 กระบวนการผลิตยางรีเคลม

2.3.1 การเตรียมยางรีเคลม

ยางรีเคลมสามารถเตรียมได้จากหลายกระบวนการ (Adhikari et al., 2000; Ostad Movahed et al., 2016; Yazdani et al., 2011) ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของชนิดยาง เครื่องมือที่ใช้ และภาวะที่ทำการเตรียม ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ สามารถแบ่งเป็น 3 กระบวนการหลัก ๆ คือ กระบวนการรีเคลมทางกายภาพ และกระบวนการรีเคลมทางเคมี และกระบวนการรีเคลมทางชีวภาพ

- กระบวนการเตรียมยางรีเคลมด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นวิธีที่อาศัยพลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในการทำลายพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยาง ประกอบด้วยกระบวนการรีเคลมเชิงกล การรีเคลมด้วยคลื่นไมโครเวฟ การรีเคลมด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป็นต้น

1. การรีเคลมเชิงกล โดยทั่วไปจะใช้ความร้อนร่วมด้วย โดยยางจะถูกรีดด้วยเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (Open two-roll mixing mill) และมีการควบคุมให้ลูกกลิ้งมีอุณหภูมิสูง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นทำให้พันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางแตกออก วิธีนี้เป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ และปราศจากการใช้สารเคมี

2. การรีเคลมด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Aoudia et al., 2017) เมื่อยางได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ อยู่ระหว่าง 915 และ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลยางเกิดการเคลื่อนที่เพื่อให้ประจุที่มีอยู่ในโมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเคลื่อนที่ตามความถี่ดังกล่าว ทำให้โมเลกุลยางเกิดการขัดสีกันและส่งผลให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้น ทำให้พันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยาง ทั้งพันธะระหว่างคาร์บอนกับกำมะถัน และกำมะถันกับกำมะถันแตกออก วิธีนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นวิธีที่ใช้ได้สำหรับการรีไซเคิลยางที่ได้รับการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและยางที่สามารถตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดี ได้แก่ ยางที่มีขั้วสูงหรือยางไม่มีขั้วแต่มีการใช้ขี้เถ้าดำเป็นสารตัวเติมในปริมาณมาก แต่พบว่าเป็นวิธีที่มีต้นทุนสูงและไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมเนื่องจากต้องใช้ความร้อนสูง (Lloyd & marin, 2005)

3. การรีเคลมด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Isayev et al., 1996) เมื่อยางได้รับคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งเป็นคลื่นที่มีความถี่สูงประมาณ 20 ถึง 50 กิโลเฮิร์ตซ์ คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความเข้มของพลังงานสูงกว่า 1000 วัตต์ เข้าไปในยางอย่างต่อเนื่องจะทำให้พันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางแตกออก เพราะพลังงานคลื่นจะเข้าไปทำลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับกำมะถัน และกำมะถันกับกำมะถันที่มีอยู่ในยางคงรูป วิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก มีประสิทธิภาพสูง แต่วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง และหากยางได้รับคลื่นอัลตราโซนิกนานเกินไปจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลด้อยลง

- กระบวนการเตรียมยางรีเคลมด้วยสารเคมี (Joseph et al., 2016) สามารถทำได้โดยนำขยะยางไปบดให้เป็นผง จากนั้นผสมกับน้ำมันและสารรีเคลม (Reclaiming agent) พร้อมทั้งให้

ความดัน และความร้อนที่อุณหภูมิ 200 ถึง 280 °C โดยสารรีเคลมจะเกิดเป็นฟรีเรดิคัลและเข้าจับกับเรดิคัลบนสายโซ่หลักที่เกิดจากการแตกออกของพันธะเชื่อมขวาง โดยสารรีเคลมเป็นตัวป้องกันการกลับมาเชื่อมกันใหม่ของพันธะที่แตก (Isayev et al., 1996; Lloyd & marin, 2005; Myhre & MacKillop, 2002) ตัวอย่างของสารเคมีที่ใช้ เช่น สารในกลุ่มไดซัลไฟด์ เมอร์แคปแทน เป็นต้น แต่พบว่าวิธีนี้มีการใช้สารเคมีในปริมาณมาก และสารเคมีที่เหลือยากต่อการกำจัดออก

- กระบวนการรีเคลมด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ (Rajan et al., 2006) เป็นการใช้อุณหภูมิที่ลดลง สารที่มีความจำเพาะในการทำลายพันธะซัลฟิดิกที่มีอยู่ในยาง ให้เป็นธาตุกำมะถันและกรดซัลฟิวริก จุลชีพกลุ่มนี้ เช่น แบคทีเรีย Chemolithotrope นอกจากนี้ยังมีจุลชีพบางชนิดที่สามารถออกซิไดซ์กับกำมะถันที่มีในขยะยางได้ เช่น แบคทีเรียในกลุ่ม Nocardia และ Thiobacillus เป็นต้น วิธีการนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่พบว่าต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินการกระบวนการ

2.3.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากกระบวนการรีเคลม

ยางรีเคลมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการที่มีการให้ทั้งความร้อนและแรงเฉือน ส่งผลให้โมเลกุลของยางถูกทำลายไป ดังนั้นยางรีเคลมจึงมีสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ต่ำกว่ายางบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามในทางอุตสาหกรรมก็นิยมใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากมีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่

- ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตลดลง เนื่องจากยางรีเคลมสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต อีกทั้งยังมีราคาต่ำกว่ายางใหม่ นอกจากนี้ในยางรีเคลมยังมีสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น ตัวเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator), สารช่วยการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent), สารป้องกันการเสื่อม (Antioxidant) หลงเหลืออยู่ ดังนั้นในขั้นตอนการผลิตสามารถลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ลงได้

- เวลาที่ใช้ในการผลิตลดลง เนื่องจากในกระบวนการผลิตยางรีเคลม ยางถูกกระทำด้วยภาวะที่รุนแรง มีทั้งการให้ความร้อนและแรงเฉือน ยางที่ได้จึงมีลักษณะที่อ่อนนุ่ม ดังนั้นการผสมเข้ากับสารอื่นๆ ทำได้ง่ายกว่ายางใหม่ เวลาที่ใช้ในการผสมจึงลดลง อีกทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผสมมีน้อยลง ซึ่งเป็นผลดีสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีการใส่คาร์บอนแบล็คในปริมาณมาก เช่น โครงยาง (Tire carcass) ยางด้านข้าง (Side wall) เป็นต้น

- ช่วยแก้ปัญหาบางประการที่พบในกระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีการอัดรีด (Extrusion) และการรีดกลิ้ง (Calendering) เนื่องจากในยางรีเคลมมีส่วนที่เกิดการเชื่อมขวางแล้วหลงเหลือปะปนอยู่ จึงทำให้มีความเป็นเทอร์โมพลาสติกน้อยกว่ายางใหม่ สามารถรักษารูปร่างได้ดี มีการเสียน้อย

กว่า ดังนั้นในกระบวนการอัดรีด ผลิตภัณฑ์ที่ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบมีการเกิดการบวมตัวที่หัวตาย (Die swell) ลดลง และในกระบวนการรีดกลิ้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเรียบสม่ำเสมอ และการหดตัวเกิดน้อยลง

- ยางรีเคลมมีความทนทานต่อการออกซิไดส์ได้ดี เนื่องจากภาวะรุนแรงต่างๆ ที่ยางรีเคลมได้รับ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน การให้ความร้อน การให้แรงเชิงกล เปรียบเสมือนเป็นตัวทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีความคงตัวและทนทานต่อภาวะต่าง ๆ ที่เข้ามากระทำ จนสามารถเปลี่ยนแปลงต่อไปได้ยากแล้ว

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมรีเคลมจากผงยางล้อด้วยเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (Adhikari et al., 2000) โดยใช้สารเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulphide, TMTD) เป็นสารรีเคลม ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของสารรีเคลมเป็น 1.5, 2.0, 2.75 และ 3.25 กรัม ใช้เวลาในการผสมจาก 0 ถึง 40 นาที พบว่าเมื่อเวลาในการผสมเพิ่มขึ้น สัดส่วนการละลายสามารถบ่งบอกประสิทธิภาพของการรีเคลมได้ หากมีการลดลงของพันธะเชื่อมขวางเนื่องจากกระบวนการรีเคลม ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโกลูอินเกิดขึ้นได้ง่าย และค่าสัดส่วนการละลายของยางจะมีค่าสูงขึ้น งานวิจัยนี้พบว่ายางรีเคลมที่เตรียมได้มีสัดส่วนการละลายที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในทุกปริมาณของสารรีเคลม แสดงให้เห็นถึงการมีบทบาทของสารรีเคลมที่เข้าไปช่วยให้กระบวนการรีเคลมเกิดได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแรงเชิงกลที่ยางได้รับจากการบดผสม ทำให้เกิดสายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการแตกออกแบบสุ่ม ไม่ว่าจะเป็นส่วนของพันธะบนสายโซ่หลักและพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล ทำให้สารรีเคลมที่ใส่เข้าไปในกระบวนการซึ่งสามารถแตกตัวเป็นฟรีแรดิคัล เข้าจับกับพันธะที่เกิดการแตกออกทำให้พันธะดังกล่าวไม่สามารถกลับมารวมตัวกันได้

การเตรียมรีเคลมจากผงยางอีพิตีเอ็มด้วยเครื่องอบความร้อนสูงด้วยไอน้ำ (Mohaved et al., 2015) โดยใช้สารเมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (2-mercaptobenzothiazole disulphide, MBTS) และสารเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์เป็นสารรีเคลม โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารรีเคลมเมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน 6 phr วิเคราะห์ค่าร้อยละการดีวัลคาไนเซชันซึ่งคำนวณได้จากสัดส่วนของระดับการเชื่อมขวางของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปเทียบกับระดับการเชื่อมขวางของตัวอย่างก่อนการดีวัลคาไนเซชัน พบว่าภาวะที่มีการเติมสารรีเคลมเข้าไปในกระบวนการ จะมีค่าร้อยละการดีวัลคาไนเซชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารรีเคลมทั้งสองสามารถแตกตัวเป็นแรดิคัลได้ง่าย โดยการเติมสารรีเคลมชนิดเมอร์

แคปโทเบนโซโทอาโซลจะให้ค่าดีวัลคาโนเซชันที่สูงกว่า เนื่องจากหากพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของเมอร์แคปโทเบนโซโทอาโซล พบว่าเมื่อแตกตัวเป็นซัลไฟด์แรดิคัลจะมีความเสถียรต่ำกว่าเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ จึงสามารถจับกับแรดิคัลที่เกิดขึ้นบริเวณพันธะของโมเลกุลอย่างที่มีการแตกออกได้ดีกว่า

การดีวัลคาโนเซชันผงยางล้อด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Yazdani et al., 2011) โดยใช้แรงเชิงกลจากการหมุนของสกรูที่ความเร็วรอบ 30, 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ควบคู่กับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิของบารเรล 220, 250 และ 280 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ค่าร้อยละการดีวัลคาโนเซชันซึ่งคำนวณได้จากสัดส่วนของระดับการเชื่อมขวางของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปเทียบกับระดับการเชื่อมขวางของตัวอย่างก่อนการดีวัลคาโนเซชัน พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของสกรูและการเพิ่มอุณหภูมิของบารเรลส่งผลให้ร้อยละการดีวัลคาโนเซชันสูงขึ้น โดยการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของสกรูจะมีอิทธิพลมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิของบารเรล นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 220 และ 250 องศาเซลเซียส การเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของสกรูส่งผลให้ร้อยละการดีวัลคาโนเซชันสูงกว่าที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ (220 องศาเซลเซียส และ 250 องศาเซลเซียส) ยางจะมีความหนืดสูงกว่า ทำให้แรงเฉือนที่กระทำต่ออย่างมีค่าสูงส่งผลให้ยางเกิดการดีวัลคาโนเซชันได้ดีกว่า ยืนยันได้จากร้อยละการดีวัลคาโนเซชันของยางมีค่าสูงถึง 88 ที่ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิของบารเรลที่ 220

การดีวัลคาโนเซชันผงยางล้อด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Tao et al., 2013) โดยใช้แรงเชิงกลจากการหมุนของสกรู 80, 100, 120, 140 และ 160 รอบต่อนาที ควบคู่กับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิของบารเรล 160, 180, 200, 220 และ 240 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสัดส่วนเจลของยางที่ได้ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของบารเรลและความเร็วรอบการหมุนของสกรู เนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนของสกรู ประกอบกับความร้อนที่สูงขึ้นจากการเพิ่มอุณหภูมิของบารเรล ทำให้พันธะเชื่อมขวางแตกออกจากกันมากขึ้น นอกจากนี้ระดับการดีวัลคาโนเซชันไม่สามารถบ่งบอกค่าสูงต่ำของความทนทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมที่นำไปขึ้นรูปได้ เนื่องจากแนวโน้มของค่าทั้งสองไม่ได้สัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง เมื่อพิจารณาที่ระดับการดีวัลคาโนเซชันต่ำ ระดับการเชื่อมขวางยังคงสูงทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่หลัก อีกทั้งการคงรูปใหม่ที่เกิดขึ้นในยางรีเคลมไม่สามารถกระจายได้ทั่ว ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้มีค่าต่ำ ในขณะที่หากระดับดีวัลคาโนเซชันสูงเกินไป โมเลกุลบนสายโซ่หลักมีการแตกออก ทำให้พันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นใหม่

(Revulcanization) เกิดขึ้นได้น้อยลงและส่งผลให้ดัชนีของการคงรูป (Index of vulcanization) มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้มีค่าต่ำ

การตีวัลคาไนเซชันยางอีพิตีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Jalilvand et al., 2008) โดยทำการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตีวัลคาไนเซชัน เช่น อุณหภูมิบารเรล (220, 280 และ 340 องศาเซลเซียส) ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (60, 100 และ 140 รอบต่อนาที) และการเติมสารตีวัลคาไนเซชันชนิดไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (0, 1.5 และ 3 %wt) ประสิทธิภาพการตีวัลคาไนเซชันสามารถพิจารณาได้จากค่าสัดส่วนการละลายของยางในสารละลายโทลูอีน โดยยางจะละลายได้ดีหากสายโซ่โมเลกุลยาวบวมตัวได้ง่ายเมื่อมีการแตกออกของพันธะเชื่อมขวาง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิบารเรลจาก 220 เป็น 280 และ 340 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ยางที่เตรียมได้มีสัดส่วนการละลายที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้เมื่อนำไปเตรียมเป็นยางคงรูป ความทนทานต่อแรงดึงของยางที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของบารเรล ซึ่งจากการคำนวณของ Box-Behnken design คาดคะเนว่า ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจะสูงที่สุดเมื่อยางผ่านการตีวัลคาไนเซชันที่ 310 องศาเซลเซียส โดยหากอุณหภูมิการตีวัลคาไนเซชันต่ำเกินไป สารคงรูปที่เติมลงไปกระจายตัวได้ยาก แต่หากอุณหภูมิการตีวัลคาไนเซชันสูงเกินไป ยางจะได้รับความร้อนสูง ทำให้สายโซ่หลักของโมเลกุลยาวเกิดการแตกออก และส่งผลให้ความทนทานต่อแรงดึงลดลง นอกจากนี้พบว่าความทนทานต่อแรงดึงของยางเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่อุณหภูมิต่ำ (220 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง แรงเฉือนและความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพเนสายโซ่หลักถูกทำลาย นอกจากนี้การศึกษาอิทธิพลของการเติมสารตีวัลคาไนซ์ โดยเติมสารไดฟีนิลไดซัลไฟด์ 1.5 และ 3 %wt ในกระบวนการที่ควบคุมตัวแปรอื่น พบว่าความทนทานต่อแรงดึงของยางเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตีวัลคาไนซ์ที่เติม ทั้งนี้เนื่องจากไดฟีนิลไดซัลไฟด์เข้าไปทำให้พันธะเชื่อมขวางแตกออกจากกัน และป้องกันการกลับมาเชื่อมกันใหม่ของพันธะดังกล่าว ทำให้ระดับการเชื่อมขวางลดลง เมื่อนำยางรีไซเคิลไปผสมสารเคมีเพื่อขึ้นรูปอีกครั้ง สารเคมียางที่ใส่เข้าไปสามารถกระจายตัวได้ง่าย ส่งผลให้ยางมีความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น

การตีวัลคาไนเซชันยางอีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Adhikari et al., 2000; Formela et al., 2014) โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิของบารเรลที่ 60, 120 และ 180 องศาเซลเซียส และใช้แรงเชิงกลจากการหมุนของสกรูคงที่อยู่ที่ 500 รอบต่อนาที ระดับการเชื่อมขวางสามารถหาได้จากสมการของ Flory-Rehner พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของบารเรลจาก 60 ให้เป็น 120 และ 180 องศาเซลเซียส ระดับการเชื่อมขวางของยางมีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้พันธะเชื่อมขวาง

บางส่วนถูกทำลาย และเมื่อนำยางรีเคลมที่ได้ไปขึ้นรูปใหม่ สมบัติการคงรูปของยางซึ่งสามารถบ่งบอกได้ด้วยระยะเวลาที่ยางเริ่มคงรูป (T_{s2}) พบว่ายางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูง จะใช้เวลาเริ่มต้นการคงรูปนานกว่ายางบริสุทธิ์ เนื่องจากสารเร่งการคงรูป และสารกระตุ้นการคงรูปสลายไปในระหว่างกระบวนการ เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของยางที่เตรียมได้พบว่า เมื่ออุณหภูมิของบารเรลในระหว่างกระบวนการดีวัลคาไนซ์สูงขึ้น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการขีดถู สมบัติการกระด้าง กระดอนมีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มไม่เพียงแต่ทำให้พันธะเชื่อมขวางแตกออกแต่ยังส่งผลให้สายโซ่หลักของโมเลกุลยางถูกทำลายมากขึ้น เมื่อนำยางรีเคลมที่เตรียมได้ไปผสมกับยางสไตรีนบิวทาไดอีน พบว่าสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนยางรีเคลมจาก 10 เป็น 30 และ 50 phr อีกทั้งสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสมที่ได้จากยางรีเคลมที่เตรียมจากอุณหภูมิสูงมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากยางรีเคลมที่เตรียมจากอุณหภูมิสูงมีความหนืดต่ำทำให้สามารถยึดติดและกระจายตัวในเฟสของยางสไตรีนบิวทาไดอีนได้ดี



บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่เกี่ยวข้อง

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองและหน้าที่ของสารนั้นๆ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองและหน้าที่ของสารนั้น ๆ

ลำดับที่	วัตถุดิบ/สารเคมี	หน้าที่
1.	ขยะยางล้อยืด (ขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร)	วัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมยางรีเคลม
2.	ขยะยางอีพิตีเอ็ม (ขนาดประมาณ 4 มิลลิเมตร)	วัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมยางรีเคลม
3.	น้ำมันพาราฟิน	สารช่วยในกระบวนการผลิต
4.	สารเทตระเบนซิลไทยแรมไดซัลไฟด์	สารรีเคลม
5.	สารเทตระไอโซบิวทิลไทยแรมไดซัลไฟด์	สารรีเคลม
6.	ยางธรรมชาติเกรด STR-5L	ยางบริสุทธิ์ เนื้อสารของยางคอมพาวด์
7.	กรดสเตียริก	ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป
8.	ซิงค์ออกไซด์	ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป
9.	กำมะถัน	ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ยาง
10.	สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปปฐมภูมิ	ช่วยเร่งปฏิกิริยาการคงรูป
11.	สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปทุติยภูมิ	ช่วยเร่งปฏิกิริยาการคงรูป
12.	แอซีโตน	สกัดสารนำหนักโมเลกุลต่ำ
13.	โพลูอิน	สารทดสอบการละลายของยาง

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและหน้าที่ของอุปกรณ์และเครื่องมืออื่น ๆ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ เครื่องมือและหน้าที่ของอุปกรณ์และเครื่องมืออื่น ๆ

ลำดับที่	อุปกรณ์/ของใช้	หน้าที่
1.	ปีกเกอร์	อุปกรณ์ชั่งตวง
2.	แท่งแก้ว	อุปกรณ์คนสาร
3.	กระบอกตวงสาร	อุปกรณ์ชั่งตวง
4.	เครื่องชั่ง 2 และ ตำแหน่ง 4	อุปกรณ์ชั่งวัด
5.	ตู้อบลมร้อน	เครื่องมือในการให้ความร้อน
7.	ถุงมือกันความร้อน	อุปกรณ์กันความร้อน
8.	ภาชนะอลูมิเนียม	ภาชนะสำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบ
9.	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)	เครื่องมือในการเตรียมยางรีเคลม
10.	เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mills)	เครื่องมือในการเตรียมยางคอมพาวนด์
11.	เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding)	เครื่องมือในการเตรียมแผ่นยางคงรูป
12.	เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบล (Die cutting)	เครื่องมือในการตัดชิ้นทดสอบ

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบที่เกี่ยวข้อง

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์/ทดสอบสมบัติต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์/ทดสอบและหน้าที่

ลำดับที่	เครื่องมือ	สมบัติ
1.	เครื่องทดสอบความหนืดมูนิ (Mooney viscometer)	ความหนืดของยาง

ลำดับที่	เครื่องมือ	สมบัติ
2.	เครื่องทดสอบลักษณะการคงรูปแบบไม่มีโรเตอร์ (Moving die rheometer: MDR)	ลักษณะการคงรูปของยาง
3.	เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile testing machine)	ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด
4.	เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer: TGA)	น้ำหนักที่เปลี่ยนไปเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 700 °C
5.	ชุดทดสอบความต้านทานการกดอัด (Compression set tester)	ความต้านทานต่อการกดอัด
6.	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy)	ลักษณะการกระจายตัวของยางรีเคลม และความเข้ากันได้ของยางบริสุทธิ์และยางรีเคลม

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน หลัก ๆ โดยส่วนแรกจะเป็นการหาภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่สำหรับการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางล้อที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเพื่อให้กระชับจะเรียกว่าขยะยางธรรมชาติแทน และขยะยางอีพิตีเอ็มเมื่อไม่มีการเติมสารรีเคลม จากนั้นนำภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ได้จากตอนที่ 1 มาใช้เตรียมยางรีเคลมจากขยะยางที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติและขยะยางอีพิตีเอ็มโดยเติมสารรีเคลมในปริมาณต่าง ๆ กัน และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาหาปริมาณยางรีเคลมที่เหมาะสมในการใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ในสูตรยางที่กำหนด โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

ส่วนที่ :1 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่สำหรับการเตรียมยางรีเคลม

1.1 ทำการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติและขยะยางอีพิตีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิของไซนผสมและความเร็วรอบในการหมุนสกรูต่าง ๆ กัน โดยภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติและขยะยางอีพิตีเอ็ม แสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ตัวแปรที่ศึกษา	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของไซนผสม (°C)	200			225			250		
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250

ตารางที่ 3.5 ภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ตัวแปรที่ศึกษา	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของไซนผสม (°C)	250			275			300		
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250

1.2 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางรีเคลมที่เตรียมได้เทียบกับขยะยางก่อนนำมาเตรียมเป็นยางรีเคลม ดังนี้

- องค์ประกอบของขยะยางที่นำมาเตรียมยางรีเคลม ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยความร้อน (Thermogravimetric analyzer: TGA) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในอัตราเร็วคงที่ที่ห้องคาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน 30 ในช่วงอุณหภูมิ 25– 700 องศาเซลเซียส

- ค่าความหนืดมูนิของยาง ทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดของยางตามมาตรฐาน ASTM D 1646 โดยนำชิ้นยางมาตัดเป็นชิ้นให้มีน้ำหนักประมาณ 12 - 10 กรัม จำนวน 2 ชิ้น ใส่ในเครื่องทดสอบความหนืดมูนิโดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (ML(1+4)@100°C)

- ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ (Percent of devulcanization: % Dev) สามารถตรวจสอบได้ โดยนำชิ้นยางหนักประมาณ 3 - 2 กรัม ใส่ในขวดแก้วที่มีฝาปิด แช่ในสารละลายโทลูอีน 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นเทสารละลายออก ชั่งน้ำหนักของยางที่บวม และนำไปอบไล่โทลูอีนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบชิ้นงานให้แห้งและชั่งน้ำหนักหลังอบ โดยร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยาง (% Dev) คำนวณได้จากสมการ (3.1)

$$\% \text{ Dev} = \left[1 - \frac{\text{ความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยางรีเคลม}}{\text{ความหนาแน่นการเชื่อมขวางของขยยะยางเริ่มต้น}} \right] \times 100\% \quad (3.1)$$

1.3 เตรียมยางรีเคลมคอมพาวนด์ตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 Reclaimed rubber derived from products containing mainly natural rubber — Evaluation procedure

- นำยางรีเคลมที่เตรียมได้มาเตรียมยางคอมพาวนด์ตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 ดังแสดงในตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (Two roll mills) ควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งให้อยู่ในช่วง 40 ± 5 องศาเซลเซียส และช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งประมาณ 1.2 มิลลิเมตร เริ่มต้นโดยการนวดยางเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมกรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ และกรีดยางไปมาให้สารเคมีกระจายได้อย่างสม่ำเสมอ เติมสารช่วยการคงรูปต่าง ๆ ทั้งเมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล ไตฟีนิลควานิดีน และกำมะถัน ตามลำดับ กรีดยางไปมาอีกครั้งจนกว่าสารเคมีจะกระจายตัวในยางจนหมด

ตารางที่ 3.6 สูตรสารประกอบยางของยางรีเคลมอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางรีเคลม	$100+x+y+z^*$
กรดสเตียริก	2
ซิงค์ออกไซด์	5
กำมะถัน	3
เมอร์แคปโตเบนโซโทอะโซล	0.5
ไดฟีนิลกวานิดีน	0.2
รวม	$110.7+x+y+z$

* x แทนปริมาณเขม่าดำที่พบอยู่ในยางรีเคลม

y แทนสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายเอซิโตนที่พบอยู่ในยางรีเคลม

z แทนปริมาณสารอนินทรีย์ที่พบอยู่ในยางรีเคลม

1.4 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของยางคงรูปตามสูตรมาตรฐานที่เตรียมจากยางรีเคลม

นำยางคอมพาวนด์และยางคงรูปที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ดังนี้

- พฤติกรรมการคงรูป ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบโรโรเตอร์ (Moving die rheometer, MDR) ตามมาตรฐาน ASTM 5289 โดยนำขึ้นยางหนักประมาณ 7 กรัม ประกอบด้วยแผ่นเซลล์เฟนวางประกบด้านบนและล่าง จากนั้นนำไปวางในเครื่องทดสอบลักษณะการคงรูปแบบไม่มีโรเตอร์ ที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 20 นาที เครื่องจะทำการรายงานผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการบิดที่เวลาต่าง ๆ กัน โดยจะนำค่ามาวิเคราะห์ เวลาก่อนการบ่มแรง เวลาที่เหมาะสมในการคงรูปที่ 90% ดัชนีอัตราการคงรูป

- ความหนืดมูนิ ด้วยเครื่องวัดความหนืดของยางตามมาตรฐาน ASTM D 1646 โดยนำขึ้นยางมาตัดเป็นชิ้นให้มีน้ำหนักประมาณ 12 - 10 กรัม จำนวน 2 ชิ้น ใส่ในเครื่องทดสอบความหนืดมูนิโดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (ML(1+4)@100°C)

- สมบัติการทนทานต่อแรงดึง ตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลแบบยูนิเวอร์แซล ตามมาตรฐาน ASTM D 412 โดยการนำชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ ดาย C ด้วยเครื่องตัดชิ้นงานให้มี ความยาว 115 มิลลิเมตร กว้าง 6 ± 0.4 มิลลิเมตร หนาไม่ต่ำกว่า 1.5 มิลลิเมตรและไม่เกิน 3 มิลลิเมตร วัดความหนา 3 ตำแหน่งและหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบ นำไป

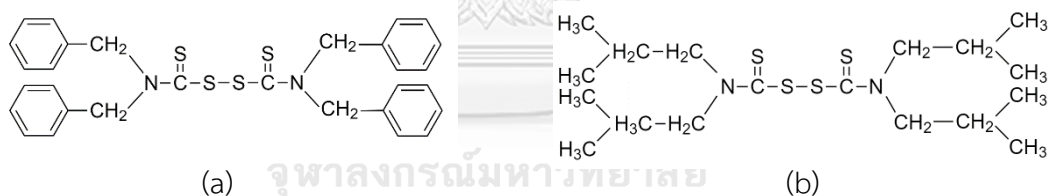
ทดสอบด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล ที่อัตราการดึง 500 ± 50 มิลลิเมตร/นาที ทำการทดลองอย่างละ 5 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

- สมบัติความแข็งของยาง ตรวจสอบด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์แบบซอร์ A ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยนำชิ้นงานที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร วัดความแข็งของยางที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 5 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

1.5 วิเคราะห์และสรุปภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง Twin screw extruder ในการเตรียมยางรีไซเคิลจากขยะยางธรรมชาติและขยะยางอีพีดีเอ็ม ตามลำดับ

ส่วนที่ 2: การศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารรีไซเคิลต่อสมบัติของยางรีไซเคิลที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

2.1 ทำการเตรียมยางรีไซเคิลจากขยะยางที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบในการหมุนสกรูที่เหมาะสมที่ได้จากจากการทดลองส่วนที่ 1 และเติมสารรีไซเคิลประเภทเทตระเบนซิลไทยแรมไดซัลไฟด์และเทตระไอโซบิวทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ที่ 1, 3 และ 5 phr โดยโครงสร้างทางเคมีของสารรีไซเคิลทั้ง 2 ชนิด แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของ (a) เทตระเบนซิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (b) เทตระไอโซบิวทิลไทยแรมไดซัลไฟด์

2.2 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางรีไซเคิลที่เติมสารรีไซเคิลชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน เทียบกับยางรีไซเคิลที่ไม่มีการเติมสารรีไซเคิล ดังนี้

- ค่าความหนืดมูนิ ด้วยเครื่องวัดความหนืดของยาง มาตรฐาน ASTM D1646 D 1646
- ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ (Percent of devulcanization: % Dev) มาตรฐาน ASTM

D6814

2.3 เตรียมยางรีเคลมคอมพาวนด์ที่เติมสารรีเคลมชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน ตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 Reclaimed rubber derived from products containing mainly natural rubber — Evaluation procedure

นำยางรีเคลมที่เตรียมได้มาเตรียมยางคอมพาวนด์ตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 ดังแสดงในตารางที่ 3.6 (แสดงไว้ในส่วนที่ 1)

2.4 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของยางคงรูปตามสูตรมาตรฐานที่เตรียมจากยางรีเคลมที่เติมสารรีเคลมชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน

นำยางคอมพาวนด์และยางคงรูปที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ดังนี้

- พฤติกรรมการคงรูป ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบไรโรเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D5289

- ความหนืดมูนิ ด้วยเครื่องวัดความหนืดของยางตามมาตรฐาน ASTM D 1646

- สมบัติการทนต่อแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลแบบยูนิเวอร์แซล ตามมาตรฐาน ASTM D412

- ความแข็งของยาง ด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ A ตามมาตรฐาน ASTM D 2240

2.5 วิเคราะห์และสรุปชนิดและปริมาณของสารรีเคลมที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางที่ยางธรรมชาติและขยะยางอีพีดีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตามลำดับ

ส่วนที่ 3: การศึกษาหาปริมาณยางรีเคลมที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางของโรงงาน

3.1 ทำการเตรียมยางธรรมชาติคงรูปและยางอีพีดีเอ็มคงรูปที่ทดแทนยางบริสุทธิ์ด้วยยางรีเคลมในปริมาณต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ ที่ 0, 20, 40 และ 60 phr โดยสูตรสารเคมียางสำหรับยางธรรมชาติคงรูปและยางอีพีดีเอ็มคงรูป แสดงในตารางที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 สูตรสารเคมีสำหรับยางธรรมชาติคงรูป

	ปริมาณ (phr)			
	0	20	40	60
ยางรีเคลม	0	20	40	60
ยางบริสุทธิ	100	80	60	40
กรดสเตียริก	2	2	2	2
ซิงค์ออกไซด์	3	3	3	3
สารช่วยในกระบวนการผลิต	1	1	1	1
สารป้องกันโอโซน	2	2	2	2
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	2	2	2	2
คาร์บอนแบล็ก	50	50	50	50
น้ำมันอะโรมาติก	10	10	10	10
กำมะถัน	1	1	1	1
ไซโคลเฮกซิลเบนโซโธอะโซลซัลฟิनाไมด์	2	2	2	2
รวม	173			

ตารางที่ 3.8 สูตรสารเคมีสำหรับยางอีพิตีเอ็มคงรูป

	ปริมาณ (phr)			
	0	20	40	60
ยางรีเคลม	0	20	40	60
ยางบริสุทธิ	100	80	60	40
กรดสเตียริก	1	1	1	1
ซิงค์ออกไซด์	2	2	2	2
สารช่วยในกระบวนการผลิต	1	1	1	1
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	2	2	2	2
คาร์บอนแบล็ก	35	35	35	35
น้ำมันพาราฟินิก	10	10	10	10
กำมะถัน	3	3	3	3
เมอร์แคปโตเบนโซโธอะโซล	1	1	1	1
ไดฟีนิล กวานิดีน	0.5	0.5	0.5	0.5
รวม	155.5			

3.2 การวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์และยางคงรูปที่ทดแทนยาง
 บริสุทธิ์ด้วยยางรีไซเคิลในปริมาณต่าง ๆ

นำยางคอมพาวนด์และยางคงรูปที่ทดแทนยางบริสุทธิ์ด้วยยางรีไซเคิลในปริมาณต่าง ๆ
 กันไปทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ดังนี้

- ทดสอบพฤติกรรมการคงรูป ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบโรโรเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM 5289
- ค่าความหนืดมูนิ ด้วยเครื่องวัดความหนืดของยางตามมาตรฐาน ASTM D 1646
- ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลแบบยูนิเวอร์แซล ตาม
 มาตรฐาน ASTM D412 กัน
- ทดสอบหาความแข็งของยาง ด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ A ตามมาตรฐาน ASTM
 D 2240
- ทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โดยการทดสอบสมบัติ
 การทนต่อแรงดึงก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48
 ชั่วโมง และรายงานค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยความต้านทานต่อ
 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน คำนวณได้จากสมการ) 3.2(

$$\text{Retention in property (\%)} = \left(\frac{X_a}{X_0} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

โดย X_a คือ ความทนต่อแรงดึงหลังการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

X_0 คือ ความทนต่อแรงดึงก่อนการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

3.4 วิเคราะห์และสรุปปริมาณยางรีไซเคิลที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ในสูตร
 ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติคงรูปและยางอีพิตีเอ็มคงรูป

3.5 สันฐานวิทยาพื้นผิวรอยแตกของยาง ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง
 กราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า โดยทำการหักตัวอย่างหักจากที่แซในไนโตรเจนเหลว จากนั้นทำการ
 เคลือบทองบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ

บทที่ 4

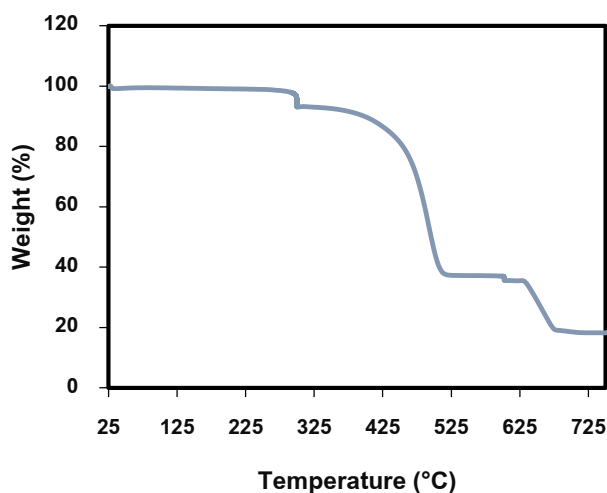
ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) สำหรับการผลิตยางรีเคลม โดยขยะยางที่นำมาใช้เตรียมเป็นยางรีเคลมมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ ขยะยางล้อยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อให้กระชับและเข้าใจง่าย จะเรียกวัดถุดิบชนิดนี้ว่า ขยะยางธรรมชาติ และขยะยางอีพีดีเอ็ม การศึกษาช่วงต้นจะเริ่มจากการหาอุณหภูมิของโซนผสมและความเร็วรอบในการหมุนสกรูที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจะนำสภาวะข้างต้นมาใช้ในการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม จากนั้นนำยางรีเคลมที่เตรียมได้ไปใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ตามสูตรยางที่กำหนดในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr และทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปที่ได้ เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางรีเคลมที่ใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ต่อสมบัติเชิงกลของยางคงรูป โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามชนิดของขยะยางได้ดังนี้

4.1 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของขยะยางธรรมชาติ

รูปที่ 4.1 แสดง TGA thermogram ของขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น น้ำมัน และไข อยู่ที่ร้อยละ 12.0 ในขณะที่มีสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ประเภทยางเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 53.5 โดยมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ 325 ถึง 525 องศาเซลเซียส และส่วนประกอบที่เป็นสารตัวเติมประเภทเขม่าดำอยู่ในปริมาณร้อยละ 26.5 ซึ่งสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 625 ถึง 675 องศาเซลเซียส อีกทั้งมีส่วนของเถ้าและสารตัวเติมเฉื่อย (inert filler) ในปริมาณร้อยละต่ำกว่า 20



รูปที่ 4.1 TGA Thermogram ของขยะยางธรรมชาติในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 700 องศาเซลเซียส



















4.1.2 ผลของภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม

ความเหนียวของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิในห้องผสมและความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ กัน แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่าความเหนียวซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกความสามารถในกระบวนการผลิต (processability) พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของสกรูและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ความเหนียวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางได้รับแรงเฉือนมากขึ้น การเกิด mechano-degradation จึงมีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้พันธะเชื่อมขวางและโมเลกุลยางมีโอกาสดูถูกทำลายมากยิ่งขึ้น จึงเป็นเหตุให้ความเหนียวของยางมีค่าลดลง และหากพิจารณาในภาวะที่มีการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของสกรูให้คงที่ และมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พบว่าความเหนียวลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ยางได้รับมีค่าสูงขึ้น การเกิด thermo-oxidation มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พันธะเชื่อมขวางและสายโซ่หลักของโมเลกุลยางจึงถูกทำลายได้มากขึ้น ความเหนียวของยางจึงมีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้ข้างต้นจะเห็นว่าความเร็วรอบของสกรูและอุณหภูมิในห้องผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ควบคุมความเหนียวของยางรีเคลม

ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของสกรูและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ พบว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 225 องศาเซลเซียส ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส การเพิ่มความเร็วยรอบของสกรูส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการตีวัลคาไนซ์ไม่ชัดเจน สำหรับภาวะของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ความเร็วยรอบการหมุนของสกรู 250 rpm และอุณหภูมิโซนผสมที่ 200 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 68.1 และหากพิจารณาในภาวะที่มีการควบคุมความเร็วยรอบการหมุนของสกรูให้คงที่ และมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พบว่าที่ความเร็วยรอบ 150 rpm การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่ความเร็วยรอบ 200 rpm การเพิ่มอุณหภูมิจาก 200 เป็น 225 องศาเซลเซียส ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิจาก 225 เป็น 250 องศาเซลเซียส ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีค่าลดลง และที่ความเร็วยรอบ 250 rpm การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีแนวโน้มลดลง

ลักษณะภายนอกของเส้นยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าที่ความเร็วยรอบการหมุนของสกรู 150 rpm และอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เส้นยางรีเคลมมีความขรุขระ ไม่สามารถออกเป็นเส้นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากแรงเฉือนที่ยางได้รับไม่เพียงพอที่จะทำให้ความหนืดของยางลดลง และเมื่อทำการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของสกรูเป็น 200 และ 250 rpm ยางรีเคลมสามารถออกเป็นเส้นเนื้อเดียวกันได้ และที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ที่ทุกความเร็วยรอบการหมุนของสกรูที่ทำการศึกษาก็ให้ผลเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของโซนผสมไปที่ 250 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วยรอบที่ 200 และ 250 rpm พื้นผิวยางรีเคลมที่ผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีลักษณะฉีกขาด ซึ่งอาจเนื่องมาจากยางรีเคลมที่ได้มีค่าความหนืดต่ำมาก ทำให้มีค่า melt strength ที่ต่ำ เมื่อถูกอัดรีดด้วยความดันที่สูงมากจึงนำไปสู่การเกิด melt fracture ตามมา

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนิ, ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ และลักษณะภายนอกของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ภาวะการเตรียม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของโซนผสม (°C)	200			225			250		
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250
ความหนืดมูนิ (mu)	56.4	52.5	49.5	52.9	58.2	46.3	25.4	29.9	27.8
S.D.	±0.5	±0.5	±0.6	±0.4	±0.5	±0.3	±0.6	±0.8	±0.4
ร้อยละการตีวัลคาไนซ์ (%)	46.3	52.6	68.3	47.5	56.1	61.2	52.2	45.2	47.8
									
S.D.	±0.7	±0.8	±0.5	±0.7	±0.8	±0.7	±0.6	±0.5	±0.7
ลักษณะภายนอก									

4.1.3 ผลของภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม
 คงรูป

เมื่อนำยางรีเคลมที่เตรียมได้ไปผสมกับสารเคมีอย่างตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 และทำการทดสอบพฤติกรรมการคงรูป ความแข็ง และสมบัติเชิงกล ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมการคงรูปที่อุณหภูมิ 140 °C ของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ

ภาวะการเตรียม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของโซนผสม (°C)	200			225			250		
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250
T ₅ 2 (นาที)	6.93	5.52	4.67	5.70	5.35	4.62	12.13	11.33	10.35
T _c 90 (นาที)	14.02	13.85	12.73	12.05	11.67	11.25	15.18	14.97	14.75

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ

ภาวะการเตรียม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของโซนผสม (°C)	200			225			250		
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250
ความแข็ง (Shore A)	67	64	66	67	65	67	56	56	61
S.D.	±0	±0	0.1	±0	±0	±0	±0	±0	±0
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	6.6	6.8	7.9	7.7	7.3	6.9	2.8	3.8	3.2
S.D.	±0.3	±0.6	±0.1	±0.5	±0.3	±0.3	±0.2	±0.2	±0.3
ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	164.8	153.6	174.3	156.7	154.5	161.7	137.1	130.6	127.1
S.D.	±1.2	±1.4	±1.2	±1.2	±2.3	±1.3	±2.2	±2.1	±1.3

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อนำยางรีเคลมที่ได้จากภาวะการเตรียมที่มีการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของสกรูและอุณหภูมิในการเตรียมไปคงรูปใหม่ ค่าระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากยางรีเคลมมีความหนืดมูนิลดลง การกระจายตัวของสารคงรูปจึงเกิดขึ้น และหากพิจารณาในภาวะที่มีการควบคุมความเร็วยรอบการหมุนของสกรูให้คงที่แต่เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจาก 200 เป็น 225 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปลดลง อย่างต่อเนื่อง

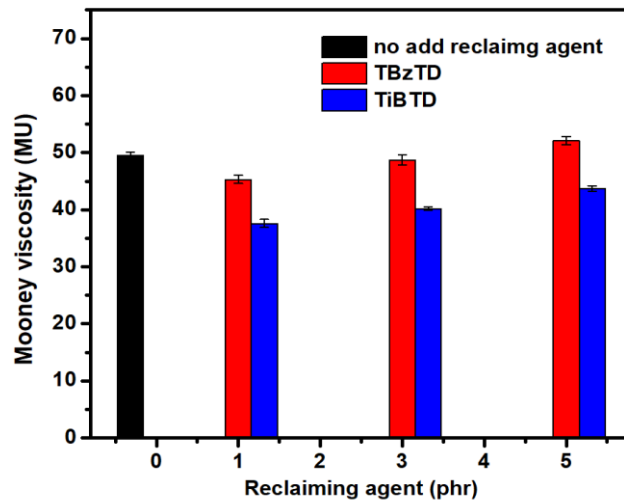
เมื่อพิจารณาความแข็งของยางรีเคลมคงรูปที่เตรียมเป็นยางมาตรฐาน พบว่ายางรีเคลมที่เตรียมที่อุณหภูมิ 200 และ 225 องศาเซลเซียส มีความแข็งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ 64 ถึง 67 ชอร์เอ ต่างจากยางรีเคลมที่เตรียมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส กล่าวคือมีความแข็งลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 56 ถึง 61 ชอร์เอ เนื่องจากยางเกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนเมื่ออย่างได้รับความร้อนสูงเกินไป เมื่อพิจารณาค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางมาตรฐานที่เตรียมจากภาวะต่าง ๆ พบว่าค่าดังกล่าวไม่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดสูงสุดอยู่ที่ 7.9 MPa และร้อยละ 174.3 ตามลำดับ ซึ่งเตรียมได้จากความเร็วยรอบการหมุนของสกรู 250 rpm และอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.3

4.1.4 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ

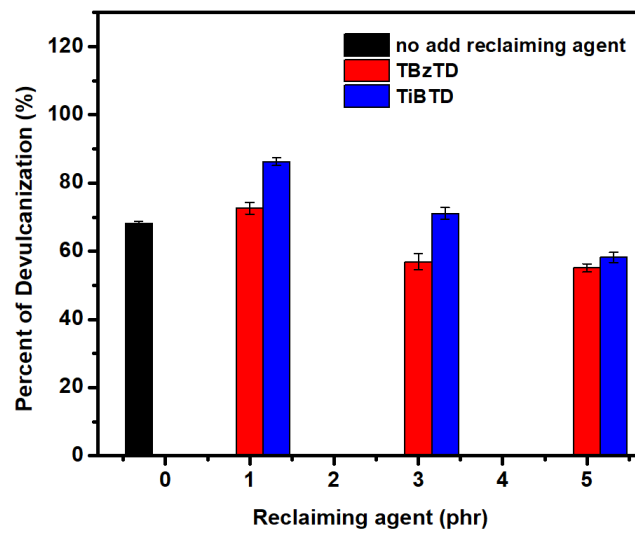
รูปที่ 4.2 แสดงความหนืดมูนิของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่ความเร็วยรอบ 250 rpm และ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และมีการเติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ที่ 1, 3 และ 5 phr เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนิ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารรีเคลม ความหนืดมูนิมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันทั้งสองชนิด เนื่องจากสารรีเคลมเป็นสารประเภทไดซัลไฟด์ ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นซัลไฟด์แรดิคัลที่เข้าจับกับซัลไฟด์แรดิคัลที่เกิดจากการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางเนื่องจากแรงเฉือนและความร้อนได้ ส่งผลให้ลดการรวมตัวกันของพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยาง (Mangili et al., 2014a) ส่งผลให้ความหนืดมูนิของยางมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการของสารรีเคลมทั้งสองชนิดหากเติมในปริมาณที่เท่ากันพบว่ายางรีเคลมที่ได้จากการเติม TiBTD มีความหนืดมูนิต่ำกว่ายางรีเคลมที่ได้จากการเติม TBzTD เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ TBzTD ประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก ส่งผลให้การเคลื่อนที่เข้าไปจับกับซัลไฟด์แรดิคัลที่เกิดจากแตกออกของพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางได้ยาก อีกทั้งแรดิคัลจากสารดังกล่าวมีความเสถียรสูงกว่าสารอีกชนิดหนึ่งเนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์สามารถเกิดการเคลื่อนที่ไปมาได้ (Delocalized electron) เมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมพบว่าแนวโน้มของค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้น โดยยางจะมีร้อยละการดีวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อพันธะเชื่อม

ขวางในยางลดลง โดยภาวะที่มีค่าร้อยละการดีวัลคาไนซ์สูงที่สุดคือ การใช้ TiBTD ที่ 1 phr ดังรูปที่ 4.3



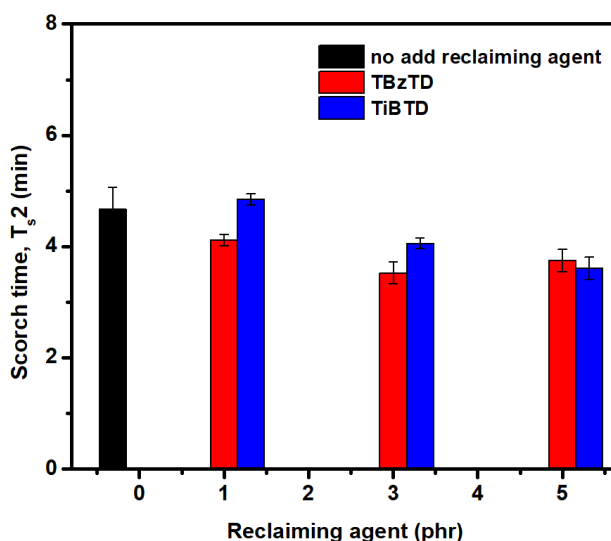
รูปที่ 4.2 ความหนืดมูนีของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ
ที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTD และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



รูปที่ 4.3 ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ
ที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTD และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr

4.1.5 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมคงรูปจากขยะยางธรรมชาติ

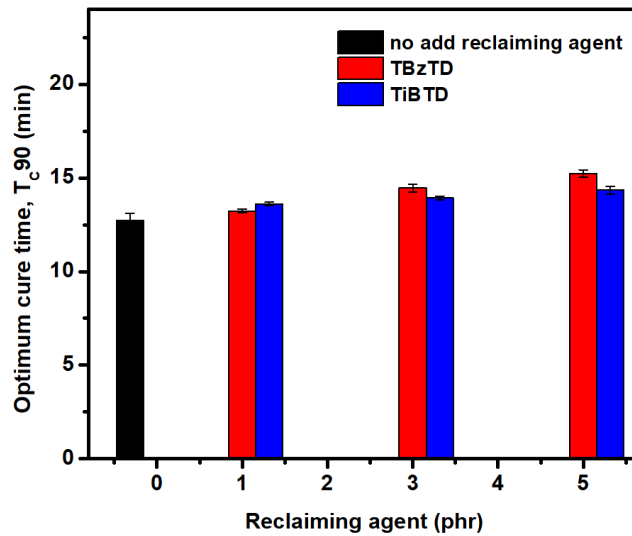
เมื่อนำยางรีเคลมที่เตรียมได้ไปผสมสารเคมียางตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:/2021 และทำการทดสอบพฤติกรรมการคงรูป ความแข็งและความทนต่อแรงดึง ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.8 จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่ายางรีเคลมที่ได้จากภาวะที่มีการเพิ่มปริมาณสารรีเคลม เมื่อนำไปคงรูปใหม่จะมีเวลาที่ยางเริ่มการคงรูปเปลี่ยนไปจากเดิมเล็กน้อย โดยในภาวะที่มีการเติมสารรีเคลมเพิ่มจากปริมาณ 1 เป็น 3 ถึง 5 phr ตามลำดับ ยางใช้เวลาในการเริ่มการคงรูปน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากสารรีเคลมที่เลือกใช้สามารถปลดปล่อยกำมะถันออกมาในกระบวนการคงรูปได้ (Sulphur donor accelerator) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของแต่ละภาวะ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารรีเคลม โดยยางที่มีการเติมสารรีเคลมชนิด TiBTD จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ต่างจากยางที่มีการเติมสารรีเคลมชนิด TBzTD ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากภาวะที่ไม่มีการเติมอย่างชัดเจน



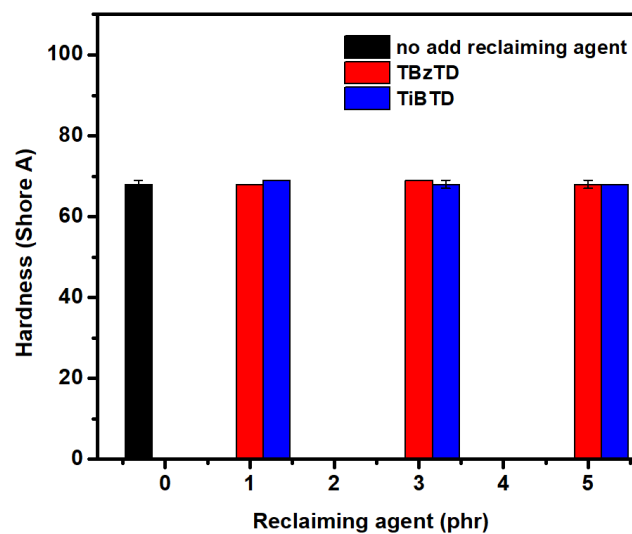
รูปที่ 4.4 เวลาเริ่มการคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ ที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTD และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr

เมื่อพิจารณาความแข็งของยางรีเคลมคงรูปที่เตรียมเป็นยางมาตรฐาน พบว่ายางมีความแข็งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ 68 ถึง 69 ชอร์เอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางมาตรฐานที่เตรียมจากภาวะต่าง ๆ ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าค่าดังกล่าวไม่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง เบื้องต้นยางรีเคลมที่เตรียมได้จากการเติมสารรีเคลม

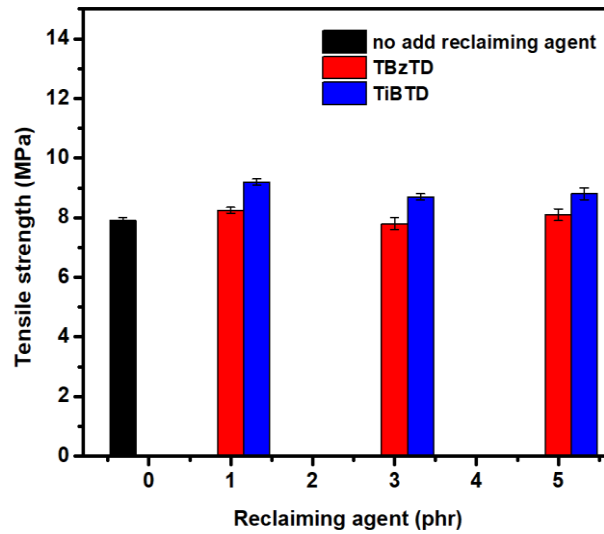
ลมนี้อาจมีความทนแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่าที่ไม่เติม โดยยางรีเคลมที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTd ในปริมาณ 1 phr ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 9.2 MPa นอกจากนี้พบว่า การเติมสารรีเคลมจะทำให้ยางคงรูปมีระยะยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น โดยชนิดและปริมาณของสารรีเคลมไม่มีผลอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามยางรีเคลมที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTd ในปริมาณ 1 phr มีระยะยืด ณ จุดขาดสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 190.7



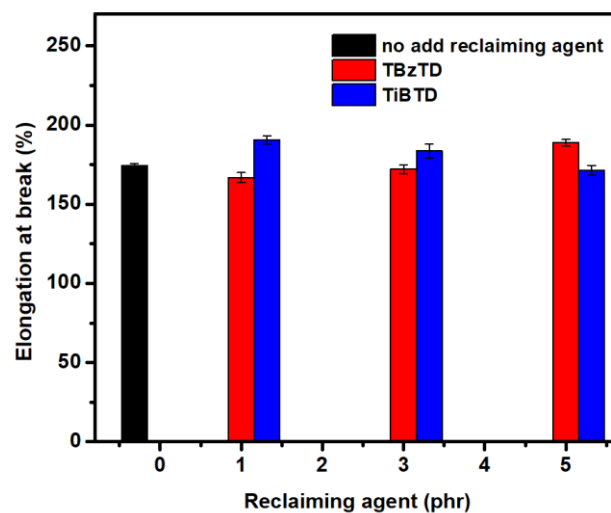
รูปที่ 4.5 เวลาที่ใช้ในคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTd และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



รูปที่ 4.6 ความแข็งของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTd และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



รูปที่ 4.7 ความทนต่อแรงดึงของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ
ที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTD และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



รูปที่ 4.8 ร้อยละการดึงยืดของยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ
ที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTD และ TBzTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr

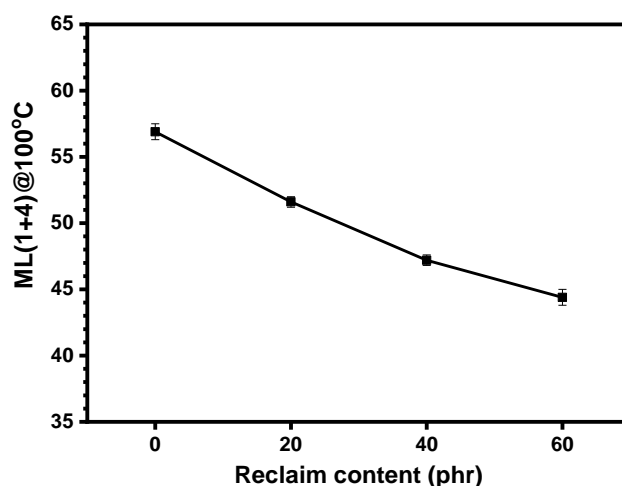
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมที่ได้จากงานวิจัยกับยางรีเคลมทางการค้าซึ่งเตรียมด้วยหม้ออัดความดันไอน้ำแรงสูง จะเห็นได้ว่าสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับยางรีเคลมทางการค้า ยกเว้นค่าระยะยืด ณ จุดขาดที่มีค่าต่ำกว่า ซึ่งอาจจะเป็นข้อจำกัดของการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เนื่องจากกลไกของเครื่องอาจทำให้พันธะเชื่อมขวางและโมเลกุลยางเกิดการถูกทำลายได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการเตรียมยางด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะใช้ระยะเวลาที่สั้น และสามารถดำเนินกระบวนการได้อย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลระหว่างยางรีเคลมทางการค้าและที่ได้จากงานวิจัย

หัวข้อที่ศึกษา	ยางรีเคลมทางการค้า	ยางรีเคลมจากงานวิจัย
1. ลักษณะภายนอก		
2. ความหนืดมูนิ	36.90	38.00
3. ความแข็ง	65.00	68.00
4. ความทนทานต่อแรงดึง	7.80	7.90
5. ระยะยืด ณ จุดขาด	239.6	165.5
6. โมดูลัสของยางที่ 200%	5.90	-

4.1.6 ผลของปริมาณยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติที่ใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง

รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดมูนิของยางคอมพาวนด์ที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลม ค่าความหนืดมูนิมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในกระบวนการเตรียมยางรีเคลม นอกจากพันธะเชื่อมขวางที่จะแตกออกแล้ว สายโซ่ของยางก็ถูกตัดขาดด้วย ทำให้โมเลกุลสั้นลง ความหนืดมูนิจึงลดลง เมื่อนำยางรีเคลมซึ่งมีความหนืดมูนิต่ำไปแทนที่ยางบริสุทธิ์ซึ่งความหนืดสูงกว่า (55-60 MU) ก็ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดมูนิลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่ใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์



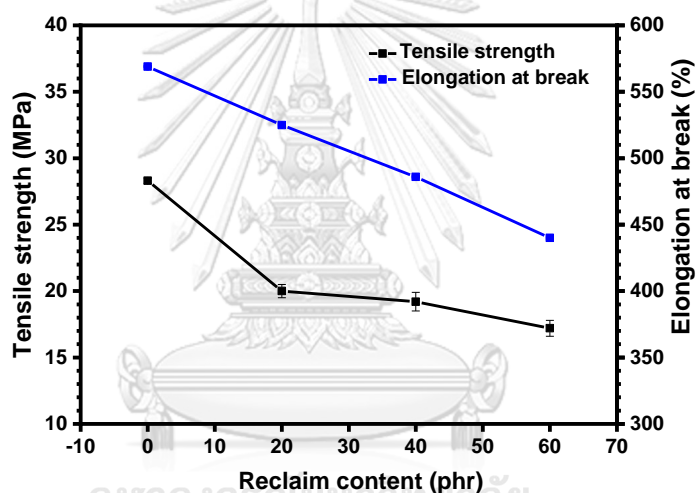
รูปที่ 4.9 ความเหนียวของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติทดแทนยางบริสุทธ์ ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

พฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่เติมยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธ์ ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อยางได้รับความร้อนจนอ่อนตัวและสามารถไหลได้ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ค่าความเหนียวต่ำสุด (M_L) ของยางผสมมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ยางคอมพาวด์เริ่มเกิดการคงรูป โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุดอยู่ 2 เดซิวินตัน-เมตร (T_{S2}) จะอยู่ในช่วง 3.18 ถึง 4.19 นาที โดยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น เมื่อให้ยางได้รับความร้อนจนกระทั่งถึงจุดที่การคงรูปเกิดขึ้นสมบูรณ์ และพิจารณาเวลาที่ยางคอมพาวด์ใช้ในการคงรูปอยู่ในช่วง 4.36 ถึง 5.49 นาที ซึ่งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมมีการหลงเหลืออยู่ของส่วนที่เป็นโครงร่างสามมิติ ซึ่งส่วนดังกล่าวอาจกีดขวางทำให้การกระจายตัวของสารคงรูปเกิดได้ไม่ดี จึงต้องใช้เวลานานขึ้นในการคงรูป

ตารางที่ 4.5 พฤติกรรมการคงรูปที่อุณหภูมิ 155 °C ของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

ระยะเวลาที่ศึกษา	สัดส่วนของยางรีเคลม (phr)			
	0	20	40	60
M_L	12.2	10.2	9.1	8.2
M_H	19.1	16.6	15.3	13.9
$M_H - M_L$	6.9	6.4	6.2	5.6
T_{S2} (นาที)	3.18	3.49	4.09	4.19
T_{c90} (นาที)	4.36	4.56	5.39	5.49

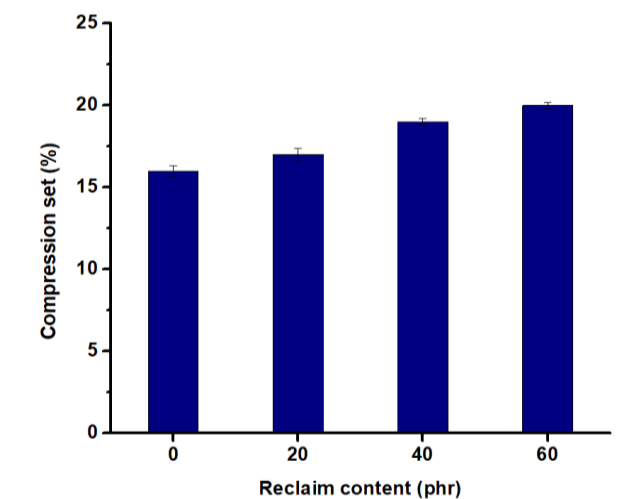
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละ ๓๓ จุดขาดของยางคงรูปเมื่อใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์ที่ 0, 20, 40 และ 60 phr โดยยางรีเคลมที่นำมาใช้ในการศึกษาในส่วนนี้ได้มาจากการเตรียมที่ยางรีเคลมที่ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 250 rpm และ อุณหภูมิไซนผสมที่ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นยางรีเคลมที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละ ๓๓ จุดขาดของยางคงรูปมีค่าลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากในกระบวนการเตรียมยางรีเคลมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีการให้ความร้อนและแรงเฉือนที่สูง ทำให้เกิดการทำลายพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางควบคู่กับการตัดขาดของสายโซ่หลัก ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมต่ำกว่ายางบริสุทธิ์ เมื่อนำยางรีเคลมมาใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของยางคงรูปลดลง ดังนั้นการนำยางรีเคลมกลับมาใช้ใหม่ ต้องพิจารณาปริมาณการใช้ให้เหมาะสม



รูปที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการดึงยืดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ ทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

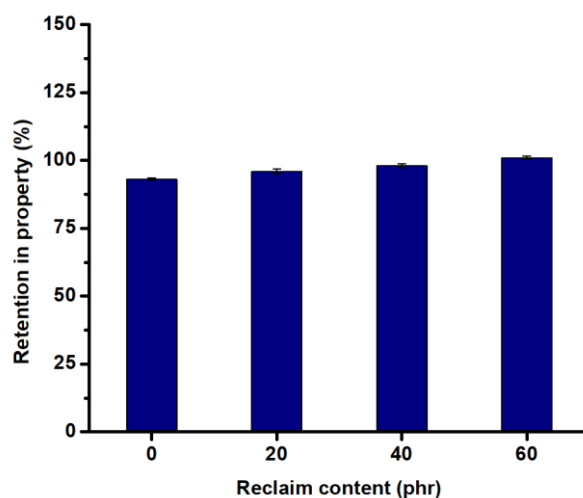
รูปที่ 4.11 แสดงความทนทานต่อการกัดกร่อนของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr โดยยางรีเคลมที่นำมาใช้ในการศึกษาในส่วนนี้ได้มาจากการเตรียมที่ยางรีเคลมที่ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 250 rpm และ อุณหภูมิไซนผสมที่ 200 องศาเซลเซียส พบว่ายางคงรูปใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์เกิดการเสีรูปลงหลังการกัดกร่อนที่สูงขึ้นตามสัดส่วนของยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากในกระบวนการเตรียมยางรีเคลมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีการให้ความร้อนและแรงเฉือนที่สูง ทำให้เกิดการทำลายพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางควบคู่กับการตัดขาดของสายโซ่หลัก ยางนิ่มเนื่องจากสายโซ่สั้นลง ความยืดหยุ่นหลังการคงรูปจึง

ลดลง ดังนั้นเมื่อนำยางรีเคลมมาใช้ทดแทนยางบริสุทธ์ จึงส่งผลให้สมบัติความทนทานต่อการกดอัดของยางคงรูปลดลง



รูปที่ 4.11 ความทนทานต่อการกดอัดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ
ทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

รูปที่ 4.12 แสดงความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงก่อนและหลังให้ความร้อนของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr พบว่ายางผสมสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลม พิจารณาจากค่าการเปลี่ยนความหนาแน่นของการเชื่อมขวางก่อนและหลังให้ความร้อนแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่ายางมีแนวโน้มการเปลี่ยนความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลมเข้าไปทดแทนยางบริสุทธ์ ส่งผลให้ในยางผสมที่มีการเติมยางรีเคลมในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของยาง ลดลง เนื่องจากในกระบวนการรีเคลมมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งส่งผลทำให้พันธะคู่ในยางรีเคลมถูกทำลาย ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่ยางผสมที่มีการใช้ยางรีเคลมไปทดแทนยางบริสุทธ์ซึ่งมีส่วนของพันธะคู่อยู่ สมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพจึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางรีเคลมที่เติม



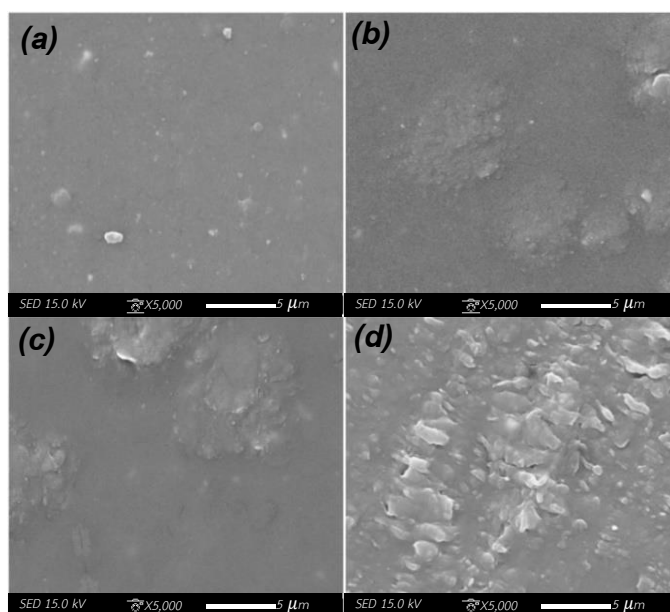
รูปที่ 4.12 ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางผสมที่ทดแทนยางบริสุทธิ์ด้วยยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติในสัดส่วนต่าง ๆ

ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง	สัดส่วนของยางรีเคลม (phr)			
	0	20	40	60
ก่อนให้ความร้อน	14.1	13.5	13.2	11.5
หลังให้ความร้อน	13.4	12.8	12.7	11.3
การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ การเชื่อมขวาง	-0.7	-0.7	-0.5	-0.2
ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	95.0	94.8	96.2	98.3

รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยหักแตกของยางคงรูปที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วนต่าง ๆ กัน พบว่าแผ่นยางคงรูปที่ไม่มีการเติมยางรีเคลมมีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.13(a) ในขณะที่เมื่อเติมยางรีเคลมเข้าไป 20 และ 40 phr พื้นผิวรอยแตกซึ่งแสดงลักษณะด้านในของยางคงรูปจะเริ่มไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.13(b) และ 4.13(c) ตามลำดับ ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากการมีอยู่ของยางรีเคลมในเนื้อยางบริสุทธิ์ และเมื่อเติมยางรีเคลมเข้าไปทดแทนยางบริสุทธิ์ที่ 60 phr สามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่ายางรีเคลมจับตัวเป็นกลุ่มก้อนที่

ชัดเจน ซึ่งการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางคงรูปที่ทดแทนยางบริสุทธ์ด้วยยางรีเคลมมีค่าลดลง

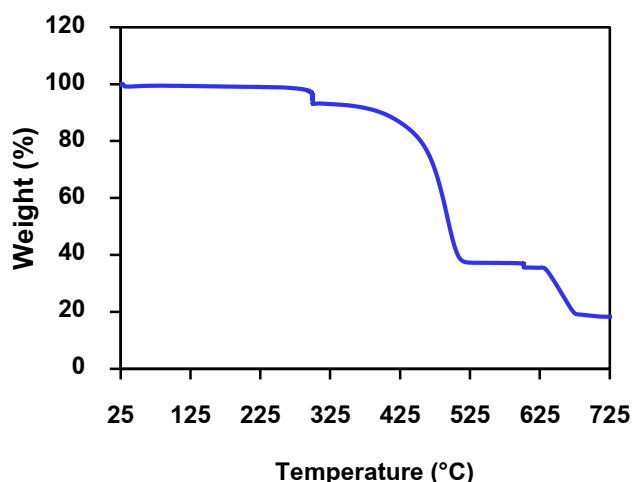


รูปที่ 4.13 โครงสร้างสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของแผ่นยางที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางธรรมชาติ ทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน (a) 0, (b) 20, (c) 40 และ (d) 60 phr ตามลำดับ

4.2 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพิตีเอ็ม

4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของขยะยางอีพิตีเอ็ม

รูปที่ 4.14 แสดง TGA Thermogram ของขยะยางอีพิตีเอ็ม จะเห็นว่าขยะที่นำมาศึกษาจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น น้ำมัน และไข อยู่ที่ร้อยละ 11.2 ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ประเภทยางเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 56.0 โดยมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 325 ถึง 525 องศาเซลเซียส และยังมีส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ที่สลายตัวในช่วง 625 ถึง 675 องศาเซลเซียส อยู่ในปริมาณร้อยละ 22.9 โดยสารอินทรีย์ที่สลายตัวในช่วงอุณหภูมินี้คาดว่าจะเป็นสารตัวเติมประเภทเขม่าดำ และมีส่วนของเถ้าและสารตัวเติมเฉื่อย (inert filler) ในปริมาณร้อยละที่ต่ำกว่า 10





















รูปที่ 4.14 TGA Thermogram ของขยะยางอีพีดีเอ็มในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 700 องศาเซลเซียส

4.2.2 ผลของภาวะในการเตรียมยางรีเคลมจากขยะอีพีดีเอ็มต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม

ความเหนียวของยางรีเคลมจากขยะอีพีดีเอ็มที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิในห้องผสมและความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ กัน แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของสกรูและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ความเหนียวนี้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางได้รับแรงเฉือนมากขึ้น การเกิด mechano-degradation จึงมีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้พันธะเชื่อมขวางและโมเลกุลยางมีโอกาสถูกทำลายมากยิ่งขึ้น จึงเป็นเหตุให้ความเหนียวของยางมีค่าลดลง และหากพิจารณาในภาวะที่มีการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของสกรูให้คงที่ และมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พบว่าความเหนียวนี้ลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ยางได้รับมีค่าสูงขึ้น การเกิด thermo-oxidation มีแนวโน้มสูงขึ้น พันธะเชื่อมขวางและสายโซ่หลักของโมเลกุลยางจึงถูกทำลายได้มากขึ้น ความเหนียวของยางจึงมีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้ข้างต้นจะเห็นว่าความเร็วรอบของสกรูและอุณหภูมิในห้องผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ควบคุมความเหนียวของยางรีเคลม เมื่อเปรียบเทียบการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มกับจากขยะยางธรรมชาติ พบว่าอุณหภูมิในการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มจะสูงกว่าจากขยะยางธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างของสายโซ่หลักของยางอีพีดีเอ็มประกอบขึ้นจากคาร์บอนที่ต่อกันแบบอิมตัว อย่างไรก็ตามการแปรอุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูส่งผลสมบัติของยางรีเคลมที่เตรียมจากขยะยางอีพีดีเอ็มและขยะยางธรรมชาติในทิศทางเดียวกัน

ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม แสดงในตารางที่ 4.7 เมื่อเพิ่มความเร็วรอบสกรูและควบคุมอุณหภูมิในห้องผสมให้คงที่ คือที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 275 และ 300 องศาเซลเซียส การเพิ่มความเร็วยรอบของสกรูส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดีวัลคาไนซ์ไม่ชัดเจน ที่ภาวะขอเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 150 rpm และอุณหภูมิห้องผสมที่ 275 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 59.7 และหากพิจารณาในภาวะที่มีการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของสกรูให้คงที่ และมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พบว่าที่ความเร็วรอบ 150, 200 และ 250 rpm การเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 เป็น 275 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 275 เป็น 300 องศาเซลเซียส ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.7 ค่าความหนืดมูนิ ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ และลักษณะภายนอกของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ภาวะการเตรียม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของไซนผสม (°C)	250			275			300		
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250
ความหนืดมูนิ (mu)	48.3	48.0	46.7	44.7	44.3	38.0	35.7	37.3	33.4
S.D.	±0.9	±1.2	±0.8	±0.5	±0.7	±0.3	±0.6	±0.6	±0.7
ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ (%)	47.3	52.6	55.3	59.7	56.1	57.2	52.2	45.2	47.8
									
S.D.	±0.8	±0.9	±0.9	±0.4	±0.7	±1.0	±0.7	±0.9	±0.2
ลักษณะภายนอก									

ลักษณะภายนอกของเส้นยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่ายางที่ได้มีลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน แต่สามารถออกเป็นเส้นได้ในทุก ๆ ภาวะการเตรียมที่ทำการศึกษา โดยเมื่อพิจารณาพื้นผิวพบว่าที่ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 200 และ 250 rpm และอุณหภูมิห้องผสมที่ 200 องศาเซลเซียส ยางมีพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ เช่นเดียวกับที่ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 200 rpm และอุณหภูมิห้องผสมที่ 300 องศาเซลเซียส

4.2.3 ผลของภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม
 คงรูป

นำยางรีเคลมที่เตรียมได้ไปผสมกับสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 และทำการทดสอบพฤติกรรมคงรูป ความแข็ง และสมบัติเชิงกล ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.8 พฤติกรรมคงรูปที่อุณหภูมิ 170 °C ของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม

ภาวะการเตรียม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของโชนผสม (°C)	250		275			300			
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250
T _{s2} (นาทีก)	1.77	1.65	1.37	1.71	1.60	1.33	1.57	1.45	1.25
T _{c90} (นาทีก)	8.22	6.77	5.20	7.95	6.50	5.11	7.63	6.15	5.13

จากตารางที่ 4.8 ยางรีเคลมที่ได้จากภาวะที่มีการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของสกรู และอุณหภูมิในการเตรียม เมื่อนำไปคงรูปใหม่ พบว่าค่าระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากยางรีเคลมมีความหนืดมูลดลง การกระจายตัวของสารคงรูปจึงเกิดดีขึ้น เมื่อพิจารณาความแข็งของยางรีเคลมที่เตรียมเป็นยางมาตรฐานจากตารางที่ 4.9 พบว่าภาวะการเตรียม ไม่ส่งผลต่อความแข็งของยางรีเคลมคงรูปอย่างมีนัยสำคัญ ยางที่ได้มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 44 ถึง 48 ชอร์เอ และเมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางมาตรฐานที่เตรียมจากภาวะต่าง ๆ พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนของสกรูและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง และหากพิจารณาในภาวะที่มีการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของสกรูให้คงที่และมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พบว่าที่ความเร็วรอบ 150, 200 และ 250

rpm การเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 เป็น 275 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิจาก 275 เป็น 300 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง โดยค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 13.4 MPa เมื่อใช้ความเร็วรอบสกรู 150 rpm ที่อุณหภูมิ 275 °C ในขณะที่เมื่อพิจารณาระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของสกรูและอุณหภูมิการเตรียม ส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน แต่จะมีค่าสัมพันธ์กับความแข็งของยางที่ได้โดยจะมีแนวโน้มที่ตรงข้ามกัน กล่าวคือ ยางรีเคลมคงรูปที่มีความแข็งน้อยสุดจะมีระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด มากที่สุด

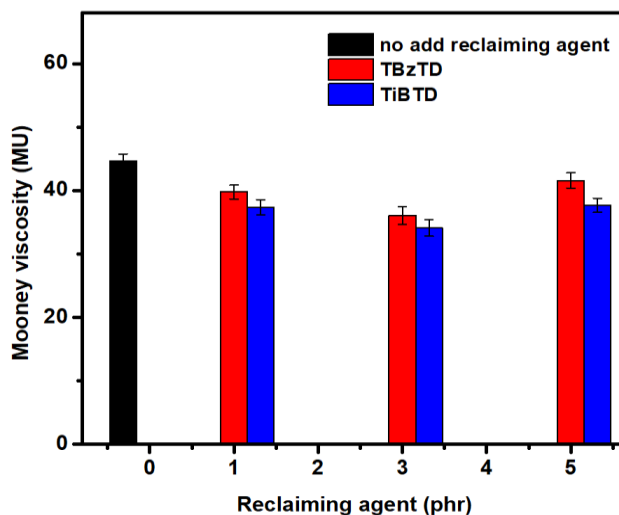
ตารางที่ 4.9 ความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม

ภาวะการเตรียม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิของโซลนผสม (°C)	250			275			300		
ความเร็วรอบการหมุนของสกรู (rpm)	150	200	250	150	200	250	150	200	250
ความแข็ง (Shore A)	47	46	47	47	46	47	47	46	46
S.D.	±1.0	±1.0	±0	±1.0	±1.0	±0	±1.0	±1.0	±0
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	11.7	10.2	8.3	13.7	12.1	10.5	12.7	9.5	8.0
S.D.	±0.5	±0.8	±0.9	±0.5	±0.8	±0.9	±0.5	±0.8	±0.3
ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	567.9	569.3	562.4	561.2	553.3	569.4	552.7	558.9	565.9
S.D.	±2.1	±1.4	±2.0	±2.1	±1.4	±2.0	±2.1	±1.4	±1.3

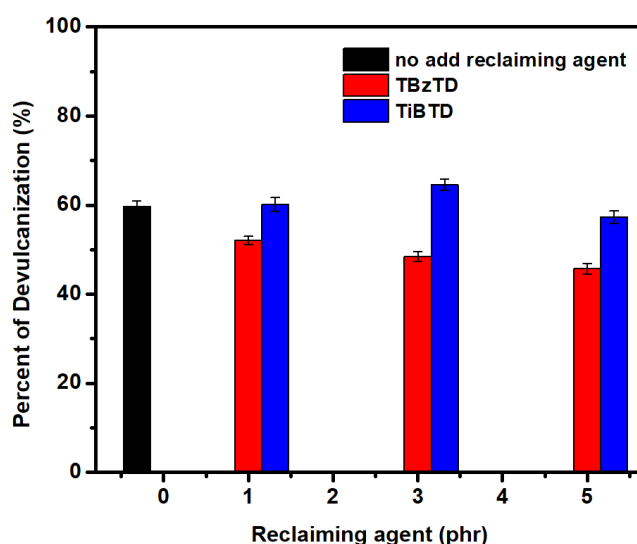
4.2.4 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม

รูปที่ 4.15 แสดงความหนืดมูนิของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มที่เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยมีการเติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ที่ 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารรีเคลมจาก 0 เป็น 1 และ 3 phr ตามลำดับ ความหนืดมูนิของยางรีเคลมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารรีเคลมเป็นสารประเภทไดซัลไฟด์ ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นซัลไฟด์แรดิคัลที่เข้าจับกับซัลไฟด์แรดิคัลที่เกิดจากการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางเนื่องจากแรงเฉือนและความร้อนที่เกิดภายในเครื่อง Twin screw extruder การกระทำดังกล่าวเป็นการยับยั้งการรวมตัวกันของพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยาง เป็นผลให้ความหนืดมูนิของยางมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารรีเคลมจาก 3 เป็น 5 phr ความหนืดมูนิของยางรีเคลมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสารรีเคลมทั้งสองชนิดที่ทำการศึกษามีแนวโน้มการเปลี่ยนความหนืดมูนิแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากรวมตัวกันเองของซัลไฟด์แรดิคัลที่เกิดจากสารรีเคลมหากเติมในปริมาณที่มากและไม่สามารถจับกับซัลไฟด์แรดิคัลที่เกิดจากการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางได้ทัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการของสารรีเคลมทั้งสองชนิดหากเติมในปริมาณที่เท่ากันพบว่าให้ผลคล้ายคลึงกับส่วนแรก กล่าวคือยางรีเคลมที่ได้จากการเติมสารรีเคลมชนิด TiBTD มีความหนืดมูนิต่ำกว่ายางรีเคลมที่ได้จากการเติมสารรีเคลมชนิด TBzTD เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ TBzTD ประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก ส่งผลให้การเคลื่อนที่เข้าไปจับกับซัลไฟด์แรดิคัลที่เกิดจากแตกออกของพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางได้ยากกว่าซัลไฟด์แรดิคัลที่มีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกที่เกิดจาก TiBTD อีกทั้งแรดิคัลจากสารดังกล่าวมีความเสถียรสูงกว่าสารอีกชนิดหนึ่งเนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเกิดการเคลื่อนที่ไปมาได้ ทำให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงด้วย เมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลม พบว่าแนวโน้มของค่าดังกล่าวมีทิศทางตรงข้ามกับความหนืดมูนิ โดยภาวะที่มีค่าร้อยละการดีวัลคาไนซ์สูงที่สุดคือการใช้ TiBTD ที่ 3 phr โดยมีค่าเท่ากับ 64.6% ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ความหนืดของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม ที่เติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



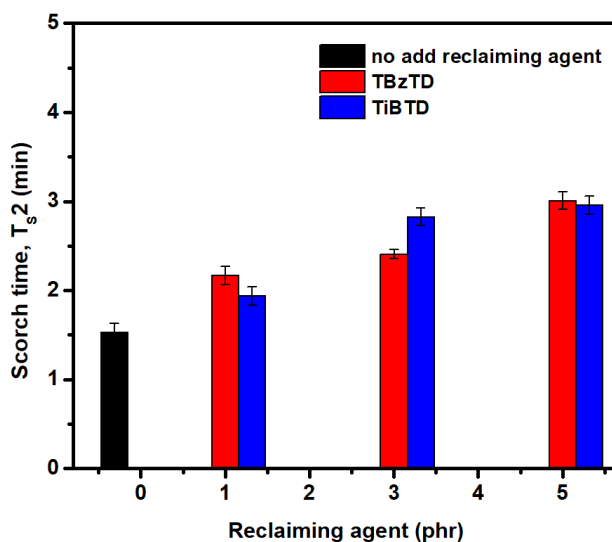
รูปที่ 4.16 ร้อยละการดีวัลคาไนซ์ของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม ที่เติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr

4.2.5 ผลของชนิดและปริมาณสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลมคงรูปจากขยะยางอีพีดีเอ็ม

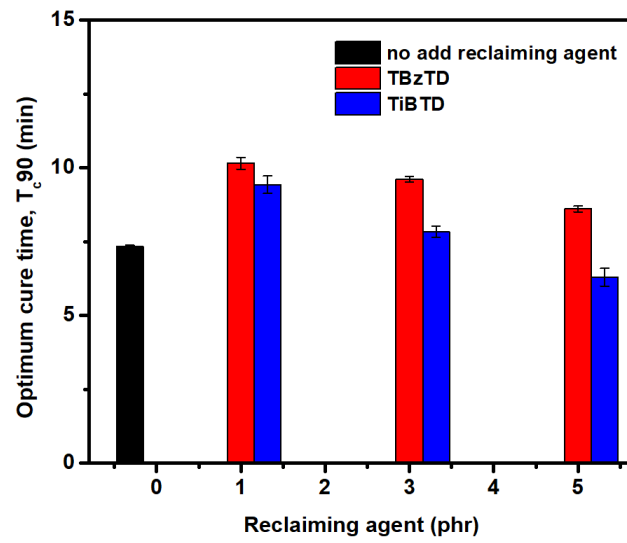
เมื่อนำยางรีเคลมที่เตรียมโดยการเติมสารรีเคลมไปผสมสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ISO/TS 16095:2021 และทำการทดสอบพฤติกรรมการคงรูป ความแข็ง และสมบัติเชิงกล ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.17 ถึง 4.21 จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่ายางรีเคลมที่ได้จากภาวะที่มีการ

เพิ่มปริมาณสารรีเคลม เมื่อนำไปคงรูปใหม่จะมีเวลาที่ยางเริ่มการคงรูปเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเวลาในการคงรูปพบว่า เมื่อใส่สารรีเคลมที่ 1 phr ยางใช้เวลาคงรูปนานขึ้นจากเดิมเมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่มีการเติมสารรีเคลม ในขณะที่เมื่อปริมาณสารรีเคลมเป็น 3 และ 5 phr พบว่ายางใช้เวลาในการคงรูปลดลงอย่างเห็นได้ชัด

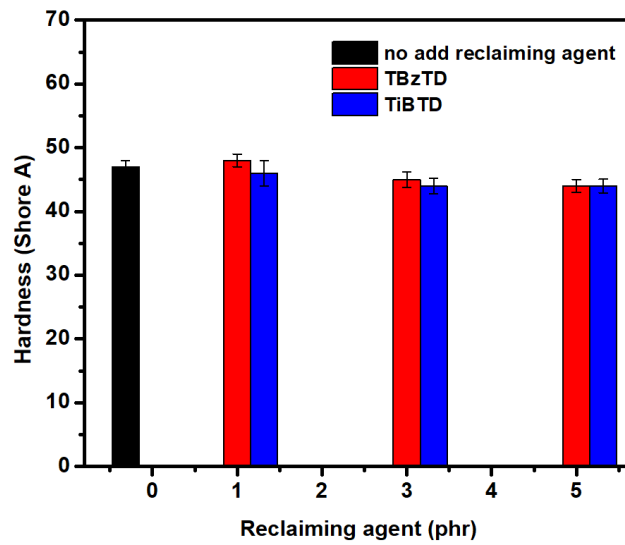
เมื่อพิจารณาความแข็งของยางรีเคลมคงรูปที่เตรียมเป็นยางมาตรฐาน พบว่ายางมีความแข็งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ 43 ถึง 45 ชอร์เอ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และเมื่อพิจารณาค่าความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางมาตรฐานที่เตรียมจากภาวะต่าง ๆ ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อเพิ่มปริมาณสารรีเคลมจาก 0 เป็น 1 และ 3 phr ความทนทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารรีเคลมจาก 3 เป็น 5 phr ความทนทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมมีค่าลดลงอีกทั้งมีค่าต่ำกว่ายางรีเคลมที่ไม่มีการเติมสารรีเคลม โดยยางรีเคลมคงรูปที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTD ในปริมาณ 3 phr ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 14.7 MPa เมื่อพิจารณาระยะยืด ณ จุดขาด พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความทนทานต่อแรงดึง อย่างไรก็ตามยางรีเคลมที่เติมสารรีเคลมชนิด TiBTD ในปริมาณ 3 phr มีระยะยืดที่จุดขาดสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 536.4



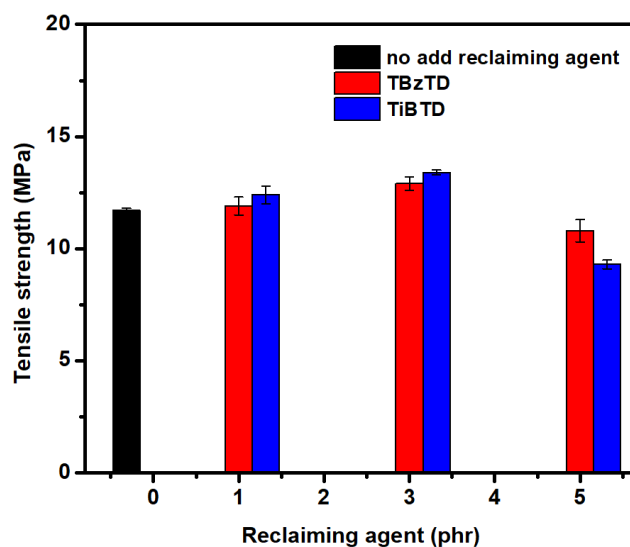
รูปที่ 4.17 เวลาเริ่มการคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม ที่เติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



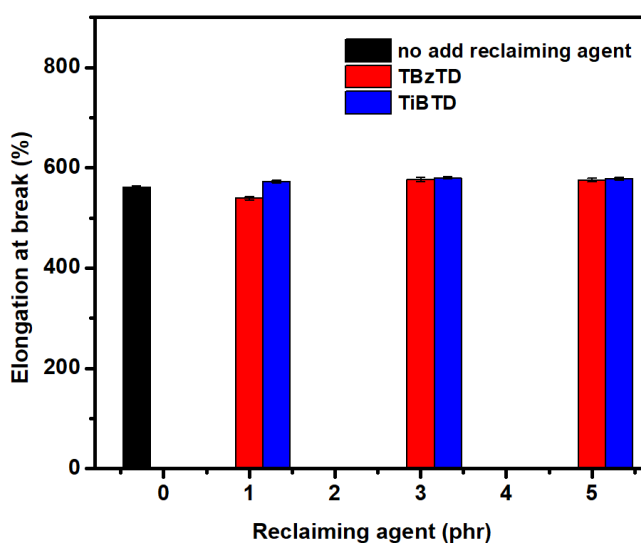
รูปที่ 4.18 เวลาที่ใช้ในคงรูปของยางรีเคลมจากขยะยางอีพดีเอ็ม ที่เติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



รูปที่ 4.19 ความแข็งของยางรีเคลมจากขยะยางอีพดีเอ็ม ที่เติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr



รูปที่ 4.20 ความทนทานต่อแรงดึงของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม ที่เติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr

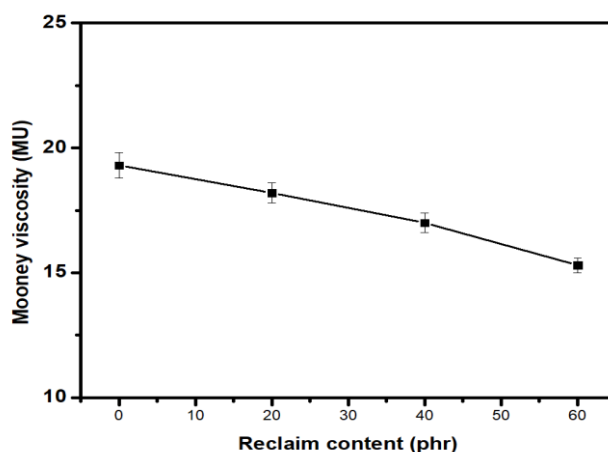


รูปที่ 4.21 ระยะเวลายืด ณ จุดขาดของยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มที่เติมสารรีเคลมชนิด TBzTD และ TiBTD ในปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr

4.2.6 ผลของปริมาณยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มที่เติมทดแทนยางบริสุทธิ์ต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง

รูปที่ 4.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดมูนิของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr โดยค่าความหนืดมูนิมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ

ยางรีเคลม เนื่องจากยางรีเคลมมีค่ามูนิต่ำกว่ายางบริสุทธิ์ (ความหนืดมูนิของยางรีเคลมอยู่ที่ 15-17 MU ส่วนความหนืดมูนิของยางบริสุทธิ์อยู่ที่ประมาณ 20 MU) เพราะยางรีเคลมเป็นยางที่ผ่านการฉีก่อนระหว่างกระบวนการเตรียม ดังนั้นยิ่งเติมยางรีเคลมในปริมาณมากขึ้น ค่าความหนืดมูนิของยางคอมพาวด์นั้นก็ยิ่งลดลง



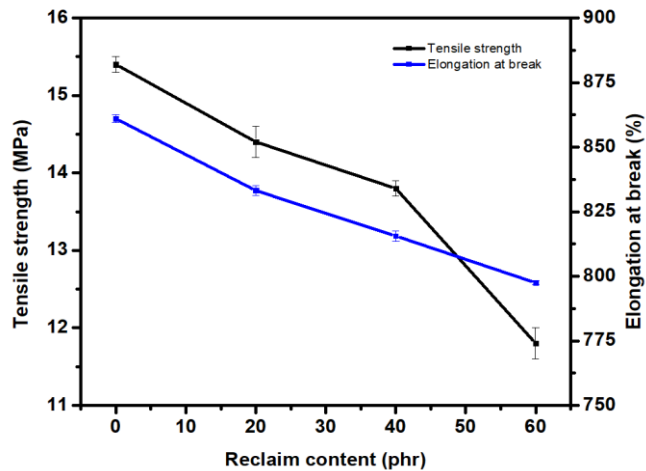
รูปที่ 4.22 ความหนืดมูนิของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

พฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่เติมยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธิ์ ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อเติมยางรีเคลมที่ได้เข้าไปทดแทนยางบริสุทธิ์ เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปอยู่ในช่วง 1.29-1.56 นาที และเวลาที่ใช้ในการคงรูปอยู่ในช่วง 3.04-3.53 นาที ซึ่งมีค่าต่ำกว่ายางคงรูปที่ไม่มีการเติมยางรีเคลมที่มีเวลาเริ่มต้นในการคงรูปเท่ากับ 2.23 นาที และเวลาที่ใช้ในการคงรูปเท่ากับ 3.47 นาที ซึ่งค่าดังกล่าวข้างต้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน อาจกล่าวได้ว่าสำหรับยางอีพีดีเอ็มรีเคลม การแปรปริมาณยางรีเคลมไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคงรูปอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.10 พฤติกรรมการคงรูปที่อุณหภูมิ 155 °C ของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยาง
ทดแทนยางบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

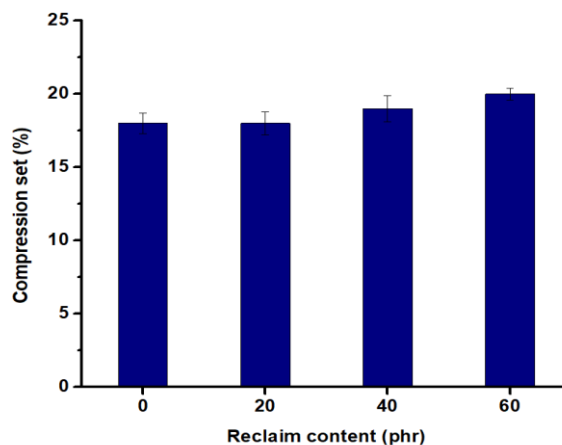
ระยะเวลาที่ศึกษา	สัดส่วนของยางรีเคลม (phr)			
	0	20	40	60
M_L	17.6	11.4	10.2	8.2
M_H	12.5	7.0	6.6	4.6
$M_H - M_L$	5.1	4.4	3.6	3.6
T_{s2} (นาที)	1.29	1.56	1.56	2.23
T_{c90} (นาที)	3.04	3.29	3.53	3.47

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าด้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางที่มีการทดแทนยางบริสุทธิ์ด้วยยางรีเคลมที่ 0, 20, 40 และ 60phr โดยยางรีเคลมที่นำมาใช้ในการศึกษาในส่วนนี้ได้มาจากการเตรียมยางรีเคลมที่ความเร็วรอบการหมุนสกรูที่ 150 rpm และอุณหภูมิของโซนผสมที่ 275 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นยางรีเคลมที่มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางคงรูปมีค่าลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากในกระบวนการเตรียมยางรีเคลมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคูมีการให้ความร้อนและแรงเฉือนที่สูง ทำให้เกิดการทำลายพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางควบคู่กับการตัดขาดของสายโซ่หลัก ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมต่ำกว่ายางบริสุทธิ์ เมื่อนำยางรีเคลมมาใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางคงรูปลดลง



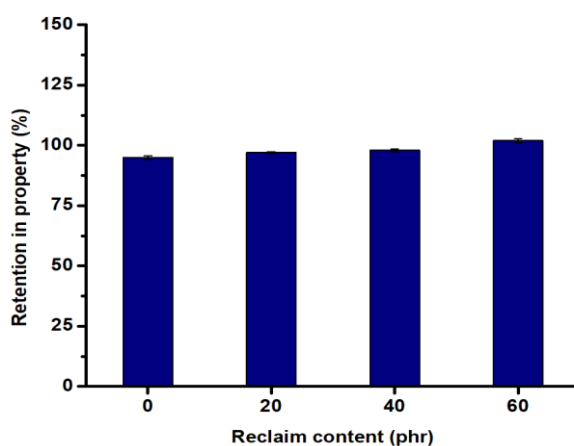
รูปที่ 4.23 ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

รูปที่ 4.24 แสดงความทนทานต่อการกดอัดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr โดยยางรีเคลมที่นำมาใช้ในการศึกษาในส่วนนี้ได้มาจากการเตรียมที่ยางรีเคลมที่ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 150 rpm และ อุณหภูมิโซนผสมที่ 275 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเทียบกับยางบริสุทธ์ ยางผสมเกิดการเสีรูปหลังการกดอัดมากขึ้นตามสัดส่วนของยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากในกระบวนการเตรียมยางรีเคลมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มือให้ความร้อนและแรงเฉือนที่สูง ทำให้เกิดการทำลายพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางควบคู่กับการตัดขาดของสายโซ่หลัก ยางนิ่มเนื่องจากสายโซ่สั้นลงความยืดหยุ่นหลังการคงรูปจึงลดลง



รูปที่ 4.24 ความทนทานต่อการกดอัดของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

รูปที่ 4.25 แสดงความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 60 และ 40phr พบว่ายางผสมสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลม ทั้งนี้เป็นผลมาจากในยางบริสุทธ์มีพันธะคู่อยู่บนสายโซ่หลักของโมเลกุล ซึ่งส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ พิจารณาควบคู่กับค่าการเปลี่ยนความหนาแน่นของการเชื่อมขวางก่อนและหลังให้ความร้อนแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่ายางมีแนวโน้มการเปลี่ยนความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลมเข้าไปทดแทนยางบริสุทธ์ ส่งผลให้ในภาวะที่มีการเติมยางรีเคลมในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติเชิงกลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยลง (Adhikari et al., 2000)

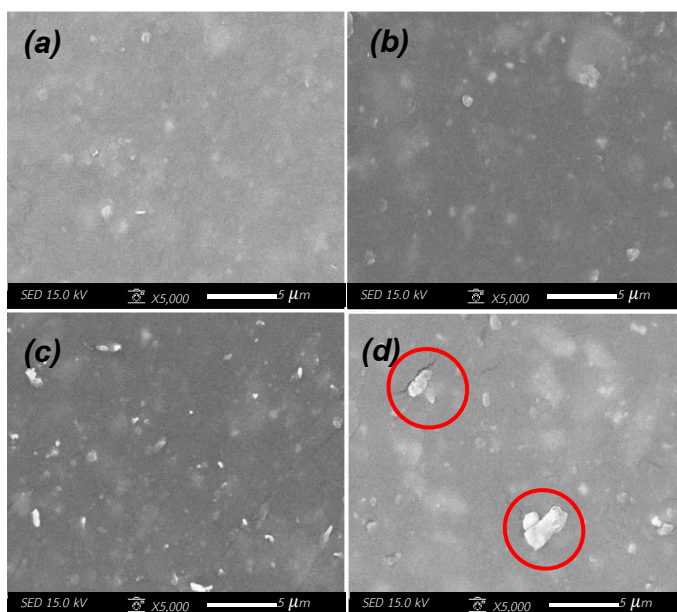


รูปที่ 4.25 ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยางผสมที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr

ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางผสมที่ทดแทนยางบริสุทธ์ด้วยยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มในสัดส่วนต่าง ๆ

ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง	สัดส่วนของยางรีเคลม (phr)			
	0	20	40	60
ก่อนให้ความร้อน	8.7	8.5	7.9	7.5
หลังให้ความร้อน	6.4	6.6	6.5	7.0
การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง	-2.3	-1.9	-1.4	-0.5
ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	73.6	77.6	82.3	93.3

รูปที่ 4.26 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของยางคงรูปที่ใช้ยางรีเคลมทดแทนยางบริสุทธ์ ในสัดส่วนต่าง ๆ กัน พบว่าแผ่นยางที่ไม่เติมยางรีเคลมมีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอดังรูปที่ 4.26(a) ในขณะที่เมื่อเติมยางรีเคลมเข้าไป 20 และ 40 phr พื้นผิวยางจะเริ่มไม่สม่ำเสมอดังรูปที่ 4.26(b) และ 4.26(c) ตามลำดับ และเมื่อเติมยางรีเคลมเข้าไปทดแทนยางบริสุทธ์ที่ 60 phr แผ่นยางมีพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ จะเห็นกลุ่มก้อนของยางรีเคลมที่จับตัวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.26(d)



รูปที่ 4.26 โครงสร้างสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของแผ่นยางที่ใช้ยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มทดแทนยางบริสุทธ์ในสัดส่วน (a) 0phr, (b) 40 phr, (c) 40 phr และ (d) 60 phr

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการผลิตยางรีเคลมโดยการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยทำการแปรภาวะของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางรีเคลมจากขยะยาง 2 ชนิด ได้แก่ ขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์หลักและขยะยางอีพีดีเอ็ม โดยทำการแปรความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่ 150, 200 และ 250 rpm สำหรับการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์หลักที่ความเร็วรอบการหมุนของสกรูหนึ่ง ๆ จะใช้อุณหภูมิของไซนผสมที่ 200, 225 และ 250 °C เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมซึ่งจะพิจารณาจากภาวะที่ให้อายุการดีวัลคาไนซ์ที่สูงที่สุด จะนำภาวะข้างต้นมาใช้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม จากนั้นนำยางรีเคลมที่เตรียมได้ไปใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ตามสูตรยางที่กำหนดในสัดส่วน 0, 20, 40 และ 60 phr และทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปที่ได้ เพื่อให้ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้ยางรีเคลมไปทดแทนยางบริสุทธิ์ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย เรียงลำดับตามวัตถุประสงค์

5.1.1 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก

จากการศึกษาภาวะการเตรียมยางรีเคลมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยการแปรความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 150, 200 และ 250 rpm และอุณหภูมิไซนผสมที่ 200, 225 และ 250 องศาเซลเซียส สำหรับขยะยางที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าความหนืดมูนิของยางรีเคลมจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของสกรูและอุณหภูมิไซนผสม อย่างไรก็ตามพบว่ายางรีเคลมที่เตรียมได้จากการใช้ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 250 rpm และอุณหภูมิไซนผสมที่ 200 องศาเซลเซียส จะมีค่าร้อยละการดีวัลคาไนซ์สูงที่สุดอยู่ที่ 68.3 เมื่อนำยางรีเคลมที่ได้ไปเตรียมเป็นยางคงรูปอีกครั้ง ยางรีเคลมที่มีร้อยละการดีวัลคาไนซ์สูงที่สุดมีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงที่สุด เมื่อนำภาวะข้างต้นมาใช้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม พบว่าการเติมสารรีเคลมชนิดเทตระโอไซบิวทิลโทยูแรมไดซัลไฟด์ปริมาณ 1 ส่วนในร้อยละของยาง เข้าไปในกระบวนการจะทำให้ยางรีเคลมมีความหนืดมูนิต่ำสุดอยู่ที่ 37.6 หน่วย แต่ยางรีเคลมที่เตรียมจากภาวะดังกล่าวมีร้อยละการดีวัลคาไนซ์สูงที่สุดอยู่ที่ 86.3 และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

ตามสูตรมาตรฐาน พบว่ายางที่เตรียมได้จากภาวะนี้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าร้อยละการตีวัลคาไนซ์เป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม เมื่อนำยางรีเคลมดังกล่าวไปใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ที่สัดส่วนที่ 0, 20, 40 และ 60 phr พบว่าค่าความเหนียวของยางคอมพาวด์ลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของยางคงรูปก็ลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน พิจารณาที่ปริมาณการทดแทนยางบริสุทธิ์ด้วยยางรีเคลม 60 phr พบการรวมตัวกันของยางรีเคลมในเนื้อยางบริสุทธิ์อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงการกระจายที่ไม่ดีของยางรีเคลมเมื่อใช้ในปริมาณที่มาก อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณยางรีเคลม ส่งผลทำให้ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพของยางผสมมีค่าสูงขึ้น

5.1.2 การเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็ม

จากการศึกษาภาวะการเตรียมยางรีเคลมจากขยะยางอีพีดีเอ็มด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยการแปรความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 150, 200 และ 250 rpm และอุณหภูมิโชนผสมที่ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของสกรูและอุณหภูมิโชนผสมของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จะทำให้ยางรีเคลมที่ได้มีความเหนียวลดลง อย่างไรก็ตามพบว่ายางรีเคลมที่เตรียมได้จากการใช้ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ 150 rpm และอุณหภูมิโชนผสมที่ 275 องศาเซลเซียส จะมีค่าร้อยละการตีวัลคาไนซ์สูงที่สุดอยู่ที่ 59.7 เมื่อนำภาวะข้างต้นมาใช้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารรีเคลมต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางรีเคลม พบว่าการเติมสารรีเคลมชนิดเทอร์อะโอโซบิวทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยละของยาง เข้าไปในกระบวนการจะทำให้ความเหนียวของยางมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 34.1 หน่วย และที่ภาวะนี้ยางมีร้อยละการตีวัลคาไนซ์สูงที่สุดอยู่ที่ 64.6 และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลตามสูตรมาตรฐาน พบว่ายางที่เตรียมได้จากภาวะดังกล่าวมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงที่สุด เมื่อนำยางรีเคลมดังกล่าวไปใช้ทดแทนยางบริสุทธิ์ที่สัดส่วนที่ 0, 20, 40 และ 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางรีเคลมเข้าไปในสูตร จะทำให้ค่าความเหนียวของยางคอมพาวด์ลดลง อีกทั้งสมบัติเชิงกล ไม่ว่าจะเป็นความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางคงรูปก็ลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน จะเห็นได้ว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางคงรูปที่มีการเติมยางรีเคลมเข้าไป 20 และ 40 phr เพื่อทดแทนยางบริสุทธิ์มีค่าใกล้เคียงกันที่ 14.1 และ 13.8 MPa แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลมเป็น 60 phr ความต้านทานต่อแรงดึงของยางคงรูปมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากกระจายตัวของยางรีเคลมเกิดได้ไม่ดี ทำให้เกิดจุดบกพร่องบนพื้นผิวของแผ่นยางคงรูป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารรีเคลม เช่น ศึกษาการเพิ่มสัดส่วนของการใส่สารรีเคลมในกระบวนการผลิต ศึกษาการทำงานร่วมกันของสารรีเคลมมากกว่าหนึ่งชนิด

5.2.2 ทำการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องอิทธิพลของการใส่น้ำมันสำหรับช่วยในกระบวนการผลิตต่อประสิทธิภาพ และสมบัติของยางรีเคลม

5.2.3 การปรับปรุงกระบวนการผลิตยางรีเคลมให้มีความจำเพาะเจาะจงของการแตกออกของพันธะในตำแหน่งการเชื่อมขวางเท่านั้น เพื่อให้ได้ยางรีเคลมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. Adhikari, B., De, D., & Maiti, S. (2000). Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*, 25(7), 909-948.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00020-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00020-4)
2. Aoudia, K., Azem, S., Ait Hocine, N., Gratton, M., Pettarin, V., & Seghar, S. (2017). Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*, 60, 471-481.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>
3. Asaro, L., Gratton, M., Seghar, S., & Ait Hocine, N. (2018). Recycling of rubber wastes by devulcanization. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 250-262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.016>
4. Barlow, F. W. (2018). *Rubber compounding: principles, materials, and techniques*. CRC Press.
5. Blueswift. (2023). Radial vs. Bias Ply Tires. Retrieved 14 June from <https://www.blueswiftaxles.com/radial-vs-bias-ply-tires/>
6. Esser, H. (1959). Vulcanizates from Natural Rubber and Bisazo Compounds. Aging Properties. *Rubber Chemistry and Technology*, 32(2), 544-556.
7. Formela, K., Cysewska, M., & Haponiuk, J. (2014). Thermomechanical reclaiming of ground tire rubber via extrusion at low temperature: Efficiency and limits. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 22.
<https://doi.org/10.1002/vnl.21426>
8. Isayev, A. I., Yushanov, S. P., Kim, S.-H., & Levin, V. Y. (1996). Ultrasonic devulcanization of waste rubbers: Experimentation and modeling. *Rheologica Acta*, 35(6), 616-630. <https://doi.org/10.1007/BF00396511>
9. Jalilvand, A. R., Ghasemi, I., Karrabi, M., & Azizi, H. (2008). An Investigation on the EPDM Devulcanization in Co-rotating Twin Screw Extruder by Response Surface Methodology. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 24(1), 33-46. <https://doi.org/10.1177/147776060802400103>
10. Jiang, K., Shi, J., Ge, Y., Zou, R., Yao, P., Li, X., & Zhang, L. (2013). Complete devulcanization of sulfur-cured butyl rubber by using supercritical carbon dioxide. *Journal of applied polymer science*, 127(4), 2397-2406.

11. Joseph, A. M., George, B., Madhusoodanan, K., & Alex, R. (2016). The current status of sulphur vulcanization and devulcanization chemistry: devulcanization. *Rubber Science*, 29(1), 62-100.
12. Learn, E. (2023). Retrieved 10 June from <https://engineeringlearn.com/>
13. Lloyd, A. C., & marin, r. (2005). Evaluation of Waste Tire Devulcanization Technologies.
14. Mohaved, S. O., Ansarifar, A., Nezhad, S. K., & Atharyfar, S. (2015). A novel industrial technique for recycling ethylene-propylene-diene waste rubber. *Polymer Degradation and Stability*, 111, 114-123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.11.003>
15. Myhre, M., & MacKillop, D. (2002). Rubber Recycling. *Rubber Chemistry and Technology*, 75, 429-474. <https://doi.org/10.5254/1.3547678>
16. Ostad Movahed, S., Ansarifar, A., & Estagy, S. (2016). Review of the reclaiming of rubber waste and recent work on the recycling of ethylene-propylene-diene rubber waste. *Rubber Chemistry and Technology*, 89, 54-78.
17. Rajan, V. V., Dierkes, W. K., Joseph, R., & Noordermeer, J. W. M. (2006). Science and technology of rubber reclamation with special attention to NR-based waste latex products. *Progress in Polymer Science*, 31(9), 811-834.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.08.003>
18. Tao, G., He, Q., Xia, Y., Jia, G., Yang, H., & Ma, W. (2013). The effect of devulcanization level on mechanical properties of reclaimed rubber by thermal-mechanical shearing devulcanization. *Journal of applied polymer science*, 129. <https://doi.org/10.1002/app.38976>
19. Yazdani, H., Karrabi, M., Ghasmi, I., Azizi, H., & Bakhshandeh, G. (2011). Devulcanization of Waste Tires Using a Twin-Screw Extruder: The Effects of Processing Conditions. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 17, 64-69.
<https://doi.org/10.1002/vnl.20257>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภัสรา สุวรรณสิงห์
วัน เดือน ปี เกิด	6 พฤษภาคม 2541
สถานที่เกิด	ตรัง
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	76/4 หมู่ที่ 2 ต.บางรัก อ.เมือง จ.ตรัง
รางวัลที่ได้รับ	<ol style="list-style-type: none"> 1. สื่อนำเสนอยอดเยี่ยม ในงานประชุมวิชาการ Hi-Fi Consortium ครั้งที่3 2. การนำเสนองานวิจัยระดับดีเยี่ยม ในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 14 ณ มหาวิทยาลัยพะเยา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY