

ผลขององค์ประกอบและภาวะการเตรียมต่อสมบัติของยางรีเคลมจากเศษยางเหลือใช้



นางสาว พนอ วรรณวงศ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4119-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF COMPOSITION AND PREPARATION CONDITION ON PROPERTIES OF
RECLAIM FROM RUBBER WASTE



Miss Panor Wannawong

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

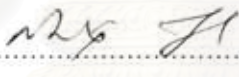
ISBN 974-17-4119-7

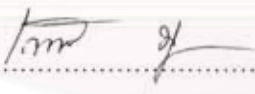
หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลขององค์ประกอบและภาวะการเตรียมต่อสมบัติของยางรีเคลมจากเศษยางเหลือใช้
โดย	นางสาวพนอ วรรณวงศ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษภาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษภาทร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรรณกุลชัย)

นางสาวพนอ วรรณวงศ์ : ผลขององค์ประกอบและภาวะการเตรียมต่อสมบัติของยางรีเคลมจากเศษยางเหลือใช้ . (EFFECT OF COMPOSITION AND PREPERATION CONDITION ON PROPERTIES OF RECLAIM FROM RUBBER WASTE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. เกียรติ พุฒยาทร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. ชูชาติ บารมี, 94 หน้า. ISBN 974-17-4119-7.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการรีเคลม ด้วยวิธีการดัดแปรทางอุณหเคมี (Modified thermochemical method) ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณสารรีเคลม: ULTRA-PEP 96 ในช่วง 0.5-3 phr และภาวะในขั้นตอนการบำบัดด้วยความร้อน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิที่ 110 และ 140°C และเวลาที่ 2 และ 4 ชั่วโมง จากการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม พบว่า การเติมยางรีเคลมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยางไม่มีผลกระทบต่อค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยาง และการนำยางผ่งไปผ่านกระบวนการรีเคลม จะสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นได้ ผลของภาวะในการบำบัดด้วยความร้อนมีแนวโน้มเดียวกันทุกๆ ปริมาณสารรีเคลมที่ผสม คือ เมื่อผลิตยางรีเคลมที่ 110°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางยังคงมีค่าต่ำเช่นเดียวกับการไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน หรือไม่ผ่านกระบวนการรีเคลม แต่เมื่อผลิตที่ 140°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางเริ่มมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ ภาวะการผลิต โดยภาวะการผลิตยางรีเคลมที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ ใช้สารรีเคลม 0.5 phr ให้ความร้อนที่ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และพบว่าที่ปริมาณการผสมยางรีเคลมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมเชิงการค้า แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยางมีแนวโน้มที่จะทนทานต่อการเสียดสีทางความร้อนดีขึ้น

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต.....พนอ วรรณวงศ์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4572398223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: RECLAIMED RUBBER / MODIFIED THERMOCHEMICAL METHOD

PANOR WANNAWONG : EFFECT OF COMPOSITION AND PREPARATION
CONDITION ON PROPERTIES OF RECLAIM FROM RUBBER WASTE. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D. THESIS COADVISOR :
ASSOC. PROF. SHOOSHAT BARAME, Ph.D. , 94 pp. ISBN 974-17-4119 -7.

This research was to study the possibility of recycle waste tire via reclaiming process: modified thermochemical method. The studied parameters were the quantity of reclaiming agent: ULTRA-PEP 96 in the range of 0.5-3 phr and thermal treatment conditions: temperature at 110 and 140°C and heating duration at 2 and 4 hours. The parameters effect on mechanical properties and cure characteristics of Virgin NR/reclaimed rubber blending were investigated. The results showed that the incorporated reclaimed rubber in the rubber product had no effect on the scorch time and cure time of rubber product. It was found that the Ground Tire Rubber (GTR) treated with this reclaiming process gave the better mechanical properties. The effect of thermal treatment conditions showed the same trend for all quantities of reclaiming agent. At heating temperature of 110°C, the tensile strength of Virgin NR/reclaimed rubber product was still low same as non-thermal treatment or untreated GTR. When temperature increased to 140°C, the tensile strength of product increased. The % Elongation was improved in every reclaiming conditions. The condition indicated the highest value of tensile strength was 0.5 phr of reclaiming agent and heating at 140°C for 4 hours. The tensile strength of Virgin NR/reclaimed rubber product and Virgin NR/RTR (commercial) product was comparable to 5-10% weight of reclaimed rubber loading. But it will be decreased with increasing of loading. The rubber product containing higher reclaimed rubber loading had a good resistance of thermal aging.

Department Chemical Technology
Field of study Chemical Technology
Academic year 2005

Student's signature.....*Panor Wannawong*
Advisor's signature.....*Kejvalee Pruksathorn*
Co-advisor's signature.....*Shooshat Barame*

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พุกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา และ
ความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สม
เกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ
ประศาสน์สารกิจ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่
กรุณาให้ความเห็น คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยอีสเทิร์น รีบเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อย่างธรรม
ชาติ เพื่อใช้ในการวิจัย จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท ยูเนี่ยน พัฒนกิจ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบและสาร
เคมีเพื่อใช้ในการวิจัย จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค
ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความ
ช่วยเหลือและให้กำลังใจ งานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และพี่สาว-พี่ชายที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความ
ช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ชนิดและโครงสร้างของยาง	3
2.2 การผสมยาง.....	5
2.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง	8
2.3.1 สารช่วยการวัลคาไนซ์	9
2.3.2 สารเร่งให้ยางคงรูป.....	12
2.3.3 สารกระตุ้นสารเร่ง	14
2.3.4 สารตัวเติม	14
2.3.5 สารช่วยกระบวนการผลิต	15
2.4 การทดสอบสมบัติของยาง	16
2.4.1 การทดสอบสมบัติการเชื่อมขวาง	17
2.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	18
2.5 การนำยางกลับมาใช้ใหม่	19
2.6 ยางรีเคลม	24
2.6.1 กระบวนการผลิตยางรีเคลม.....	24
2.6.2 สารเคมีที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลม.....	26
2.6.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ยางรีเคลม	30
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	35

บทที่	หน้า
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	36
3.4 การผลิตยางรีเคลม.....	36
3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณ Sol-Gel fraction ของยางรีเคลม	36
3.6 การผลิตผลิตภัณฑ์ยาง	36
3.7 การทดสอบสมบัติการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยาง.....	37
3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง	38
3.9 การทดสอบสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อน.....	38
3.10 ฐานานวิทยา (Morphology) ของผลิตภัณฑ์ยาง	39
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	40
4.1 ผลของปริมาณยางพงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) ใน ผลิตภัณฑ์ยาง.....	40
4.2 ผลของปริมาณ ULTRA-PEP 96 และภาวะที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมต่อ สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ยางผสม.....	43
4.3 ผลของปริมาณยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยางที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆ	60
4.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมกับผลิตภัณฑ์ ประเภทต่างๆ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	64
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	66
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก	72
ภาคผนวก ข	74
ภาคผนวก ค	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชื่อและโครงสร้างสารเร่งให้ยวกรรพษนคดต่าง ๆ.....	13
2.2 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	20
2.3 การแยกประเภทกระบวนการผลิตและการนำไปใช้งานของยางพวง.....	23
2.4 มอดไฟเออร์สำหรับกระบวนการผลิตยางรีเคลม โดยวิธีความร้อนเชิงกล.....	30
3.1 สูตรสำหรับการผสมยางที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
4.1 สมบัติการกรรพษนคดกัณขยเมือมียางพวงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) เป็นองค์ประกอบ.....	40
4.2 สมบัติเชิงกลของผลิตกัณขยเมือมียางพวงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) เป็นองค์ประกอบ.....	41
4.3 ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการกรรพษนคดและเวลาที่ใช้ในการกรรพษนคดของผลิตกัณขยที่ผสมกับยางรีเคลมซึ่งผลิตที่ภาวะต่างๆ.....	44
4.4 ค่าร้อยละของยางรีเคลมที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ.....	56
4.5 สมบัติเชิงกลของผลิตกัณขยผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยการเติมและไม่เติม มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	59
4.6 ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการกรรพษนคดและเวลาที่ใช้ในการกรรพษนคดของผลิตกัณขยผสมยางรีเคลมและยางพวงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมที่ปริมาณต่างๆ.....	61
4.7 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของผลิตกัณขยหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน.....	64
4.8 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตกัณขยผสมยางรีเคลมกับผลิตกัณขยตามมาตรฐานผลิตกัณขยอุตสาหกรรม.....	65

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 แสดงปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละปีของประเทศต่างๆ.....	1
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ-ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน	3
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางสไตรีน-บิวตะไดอิน	4
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของยางพอลิบิวตะไดอิน	4
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของยางไนไตรล์	5
2.5 เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง	7
2.6 เครื่องผสมภายในแบบบานบุรี	7
2.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง	8
2.8 โครงสร้างโมเลกุลของเปรียบเทียบจำนวน Allylic hydrogen	10
2.9 พันธะเชื่อมขวางประเภทต่างๆ ในโครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมขวางด้วยกำมะถัน ..	10
2.10 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความแข็งแรงดึงและการดึงยืด ณ จุดขาด	11
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวางของยางกับสมบัติเชิงกล บางประการของยาง	11
2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง ODR.....	17
2.13 ลักษณะของกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR.....	17
2.14 ภาพวาดแสดงเครื่องทดสอบแรงดึงและส่วนประกอบต่างๆ	19
2.15 Tosco II process	21
2.16 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของยางผงที่ได้จากกระบวนการ Ambient Grinding	22
2.17 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของยางผงที่ได้จากกระบวนการ Cryogenic Grinding.....	22
2.18 ภาพรวมของ Reclaimator process.....	25
3.1 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง	38
4.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยาง	42
4.2 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 140 °C เป็นเวลา 0-4 ชั่วโมง.....	46
4.3 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 1 phr ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 140 °C เป็นเวลา 0-4 ชั่วโมง.....	48
4.4 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 3 phr ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 140 °C เป็นเวลา 0-4 ชั่วโมง.....	50

ภาพประกอบที่	หน้า
4.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 0.5, 1 และ 3 phr ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 140 °C เป็นเวลา 0-4 ชั่วโมง.....	53
4.6 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางพงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR)	57
4.7 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 0.5 phr	58
4.8 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม, ผลิตภัณฑ์ยางผสม ยางพงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมและผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมเชิงการค้า	62

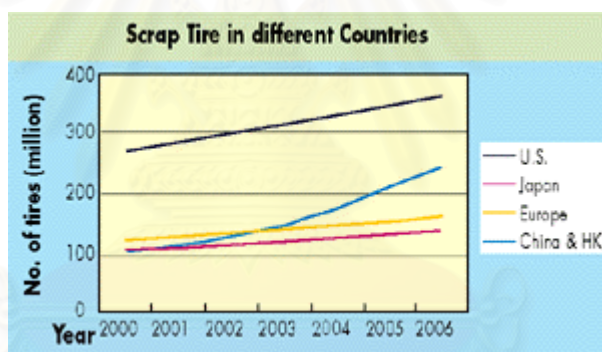


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ยางเป็นวัสดุที่นิยมใช้และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายอย่าง เช่น ยืดหยุ่น เหนียว แข็งแรงตลอดจนมีสมบัติที่หลากหลายสามารถเลือกตามการใช้งานได้ง่าย ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยางจึงมีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ผลเสียที่ตามมาคือ ปริมาณขยะที่เกิดจากยางมีมากตามไปด้วย เมื่อเทียบจากปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมด เศษยางรถยนต์ถือเป็นขยะที่มีสัดส่วนอยู่มากที่สุด ซึ่งในแต่ละปีทั่วโลกจะมีเศษยางรถยนต์เหลือทิ้งมากถึงหนึ่งพันล้านหน่วยและจากรูปที่ 1.1 พบว่าในหลายๆประเทศ ปริมาณเศษยางรถยนต์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต [1] เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างแหสามมิติ จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการให้ความร้อนหลอมเหลวขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น แก้ว โลหะหรือพลาสติก



รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละปีของประเทศต่างๆ [1]

ในปัจจุบันยางสามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น ฟังกลบ เผาเป็นเชื้อเพลิง ทำยางรีเคลม ผลิตยางผง การกำจัดที่เป็นที่นิยมและทำได้ง่ายที่สุด คือ การฟังกลบแต่การฟังกลบก็มีข้อเสียคือต้องใช้เนื้อที่มากและต้องอาศัยระยะเวลาที่ยาวนาน เนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยาก นอกจากนี้อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ อีกทั้งยังถือเป็นการสูญเสียเศษยางไปโดยเปล่าประโยชน์ การกำจัดยางที่ใช้แล้วโดยการนำกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิล เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหายางที่ได้ผล โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษยางแล้วยังถือเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุดวิธีหนึ่ง วิธีนำเศษยางเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ การนำมาผลิตเป็นยางรีเคลม วิธีการผลิตยางรีเคลมสามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ การนำมาผลิตเป็นยางรีเคลม วิธีการผลิตยางรีเคลมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Pan process, Desulfurization process ซึ่งวิธีที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัด

บางประการ เช่น Pan process เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการมากตามไปด้วย และเนื่องจากภาวะการผลิตที่รุนแรงเกินไปส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกทำลายไปมาก ยางรีเคลมที่ได้จากกระบวนการนี้จึงมีสมบัติเชิงกลไม่ดีหรือ Desulfurization process หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการมีการปลดปล่อยสารจำพวกโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซึ่งถือเป็นสารพิษ ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตยางรีเคลมให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและปรับปรุงกระบวนการผลิตยางรีเคลมให้มีสมบัติที่ดีเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ โดยจะทำการศึกษาปริมาณสารรีเคลมและผลของภาวะการเตรียมยางรีเคลมที่มีต่อสมบัติของยางรีเคลมที่เตรียมได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษยางเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในงานด้านต่างๆ
2. ศึกษาผลของภาวะการเตรียมและปริมาณของสารรีเคลมที่เป็นองค์ประกอบในยางรีเคลมที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆ ของยางรีเคลม

ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของปริมาณสารรีเคลม (Reclaiming agent) ที่ใช้ในการเตรียมยางรีเคลม โดยสารรีเคลมที่เลือกใช้ได้แก่ ULTRA-PEP 96 ซึ่งมีสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ Dibenzamido diphenyl disulphide และยังมี Pentachlorothiophenol เป็นองค์ประกอบรองอีกด้วย นอกจากนี้ยังศึกษาผลของภาวะการเตรียม ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบำบัดด้วยความร้อน (Thermal treatment) ที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ โดยสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่จะทำการตรวจวัดได้แก่ สมบัติเกี่ยวกับการสุกตัว (Cure characteristics) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal aging characteristics)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ยางรีเคลมที่มีสมบัติที่ดี สามารถนำไปใช้แทนวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่างๆ ได้
2. เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตยางรีเคลมและปรับปรุงคุณภาพของยางรีเคลม
3. ปริมาณเศษยางเหลือใช้ลดลง ทำให้ปริมาณของเสียลดลง ซึ่งนอกจากเป็นการช่วยลดมลภาวะที่มีต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับขยะอีกด้วย

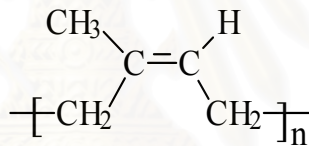
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดและโครงสร้างของยาง [2,3,4]

- ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubbers, NR) มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง ยาว มีหน่วยซ้ำๆ กันคือ ไอโซพรีน (C₅H₈) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือ ต้นยางพารา ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส (Hevea Brasiliensis) เป็นต้นไม้ยืนต้น สูงใหญ่ อายุยืน มีมากมายหลายพันธุ์ ซึ่งให้ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำยางที่แตกต่างกัน



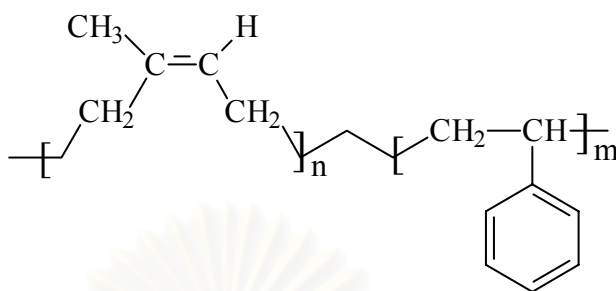
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ-ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน [2]

ยางธรรมชาติจะให้สมบัติเชิงกลที่สูง [2] เนื่องจากเมื่อถูกยืดออกจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง สมบัติการคืนตัวและการกระดอนสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยางธรรมชาติมีจุดอ่อนตัว (Softening point) ประมาณ 120°C มีความทนทานน้ำ กรดเจือจาง ด่างและเกลือได้ดี แต่เมื่อยางธรรมชาติสัมผัสกับออกซิเจน โอโซน แสงแดดและแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้ยางเกิดรอยแตกหรือเกิดการแตกหักได้ นอกจากนี้ความทนทานต่อน้ำมันของยางธรรมชาติมีค่าต่ำมาก

- ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน (Styrene-Butadiene Rubbers, SBR)

ยางสไตรีน-บิวตะไดอินเป็นพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ของสไตรีนและบิวตะไดอิน ซึ่งปกติจะมีสไตรีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 23.5% มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ -55°C เป็นยางสังเคราะห์ที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในโลก เนื่องจากเป็นยางที่มีสมบัติ

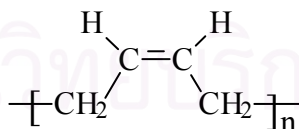
ที่ดี มีปริมาณการใช้มากในยางรถยนต์ โดยเฉพาะหน้ายาง (Tread) เนื่องจากมีสมบัติทนทานต่อการขัดถูเสียดสี (Wear resistance) โครงสร้างโมเลกุลของยางชนิดนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางสไตรีน-บิวตะไดอีน [2]

- ยางพอลิบิวตะไดอีน (Polybutadiene Rubber, BR)

ยางพอลิบิวตะไดอีนหรือยางบีอาร์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ พอลิบิวตะไดอีน ดังรูปที่ 2.3 ยางบีอาร์เป็นยางสังเคราะห์ที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยาง นิยมใช้ในลักษณะยางผสมกับยางชนิดอื่น เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางเอสบีอาร์ (SBR) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากยางบีอาร์เป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีความยากในขบวนการผลิต ยากในการผสม อย่างไรก็ตามยางบีอาร์เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีสมบัติหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อการขัดถูเสียดสี (Abrasion resistance) ดีเยี่ยม มีความยืดหยุ่นคืนตัว (Resilience) และมีสมบัติยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature flexibility) ดังนั้นจึงนิยมใช้ประโยชน์เป็นหน้ายางของยางรถยนต์ (Tire treads) ยางด้านข้าง (Side-walls) เป็นต้น

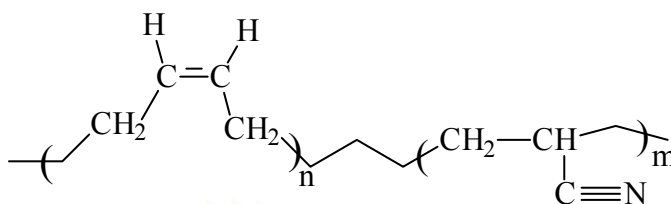


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของยางพอลิบิวตะไดอีน [2]

- ยางไนไตรล์ (Nitrile Rubber, NBR)

ยางไนไตรล์เป็นพอลิเมอร์ร่วมของบิวตะไดอีน (Butadiene) และอะคริโลไนไตรล์ มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 ยางไนไตรล์จัดเป็นยางสำหรับการใช้งานพิเศษ (Special-purpose rubbers) นิยมใช้ในงานทนน้ำมัน (Oil resistance) ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ และทนตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังทนต่อการ

ขัดถูเสียดสี (Abrasion) และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 150°C) ตัวอย่างการใช้งานยางไนไตรล์ ได้แก่ สายยางส่งน้ำมัน (Oil hoses) ปะเก็น (Oil seal) ชิ้นส่วนรถยนต์ในห้องเครื่อง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของยางไนไตรล์ [2]

2.2 การผสมยาง (Rubber Compounding) [2,4]

การผสมยาง (Rubber Compounding) คือ ขั้นตอนการผสมยางดิบ (ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์) เข้ากับสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ องค์ประกอบของยางผสมสูตร (Rubber compound) ได้แก่

1. ยาง (Elastomers) เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเลือกใช้ได้หลายรูป เช่น ยางดิบ, ยางมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatches)
2. สารช่วยการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) เช่น กำมะถัน (Sulfur) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide) เป็นต้น ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง
3. สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerators) ทำหน้าที่ช่วยสารช่วยการวัลคาไนซ์ทำให้มีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางมากขึ้น ลดเวลาการเชื่อมขวาง ทำให้เกิดการเชื่อมขวางอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและใช้สารช่วยการวัลคาไนซ์น้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมขวางดีขึ้นด้วย
4. สารกระตุ้นสารเร่ง (Activators) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมขวาง โดยเกิดเป็นสารเชิงซ้อน (Complexes) กับสารเร่งให้ยางคงรูป ทำให้สารเร่งให้ยางคงรูปมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมขวางสูงขึ้น เวลาเชื่อมขวางลดลง และยังช่วยให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมขวางดีขึ้น
5. สารตัวเติม (Fillers) หรือสารเพิ่มเนื้อ (Extenders) เป็นสารราคาถูก ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อหรือลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมบางชนิดนอกจากใช้ลดต้นทุนแล้วยังเพิ่มความแข็งแรงหรือเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง เช่น เขม่าดำ (Carbon black), ซิลิกา (Silica)

6. สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aid) คือ สารเคมีที่ใส่เพื่อช่วยปรับปรุงให้สามารถผสมหรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่ายขึ้น
7. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ได้แก่ สารป้องกันออกซิเดชันหรือแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant), สารป้องกัน โอโซน หรือแอนติ โอโซนแนนท์ (Antiozonant) รวมทั้งสารอื่นๆ ที่ช่วยลดการเสื่อมสภาพของยางจากสิ่งแวดล้อม เช่น ออกซิเจน โอโซน แสงแดด ความร้อน รังสียูวี
8. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) หรือสารเพิ่มความนิ่ม (Softeners) คือ สารที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มหรือความยืดหยุ่นของยาง
9. สารหล่อลื่น (Lubricants) ทำหน้าที่ช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุหรือหล่อลื่นระหว่างเครื่องผสมกับวัสดุ ช่วยในกระบวนการผลิตทำให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่ายขึ้น
10. สารเติมแต่งอื่น (Miscellaneous ingredients) เติมเพื่อเพิ่มสมบัติบางประการ เช่น
 - สารหน่วง (Retarders) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงช้าลง มีเวลานานเพียงพอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง
 - สารให้สี (Colorants) ทำหน้าที่เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ยางให้มีสีที่สวยงามตามต้องการ
 - สารให้กลิ่น (Fragrances) ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีกลิ่นหอม หรือระงับกลิ่นของยางที่ไม่พึงปรารถนา
 - สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดที่ผิวหน้ายาง ให้เหนียวและยึดติดกับวัสดุอื่นหรือยางด้วยกันเองได้ดีขึ้น

จะเห็นได้ว่าการผลิตผลิตภัณฑ์ยางชนิดหนึ่ง ต้องใช้สารเติมแต่งหลายชนิดและมีจำนวนมาก ที่สำคัญคือ จำเป็นต้องมีการผสมสารช่วยการวัลคาไนซ์และสารตัวเติม การผสมยางจึงเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญยิ่งต่อกระบวนการผลิตและมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากการผสมยางไม่ดีหรือไม่มีประสิทธิภาพอาจทำให้สารเติมแต่งไม่กระจายตัว หรือเกิดการเชื่อมขวางก่อนเวลา ทำให้ไม่ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ เครื่องผสมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เครื่องผสมภายในแบบบานบุรี (Banbury Internal mixer) เป็นต้น เครื่องผสมแต่ละชนิดมีหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ หรือมีขนาดใหญ่มากสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม ตัวอย่างของเครื่องผสมแสดงดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง มีข้อดี คือ ราคาถูก ใช้งานง่าย นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ใช้เวลาผสมนานกว่า และต้องใช้แรงงานในการผสมมากกว่า เทียบกับเครื่องผสมภายในแบบบานบุรีซึ่งมีราคาแพง แต่ให้แรงเฉือนมากกว่า เกิดการกระจายตัวในการผสมดีกว่า และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า นอกจากนี้ยังสามารถผสมยางแต่ละครั้งในปริมาณมากกว่า



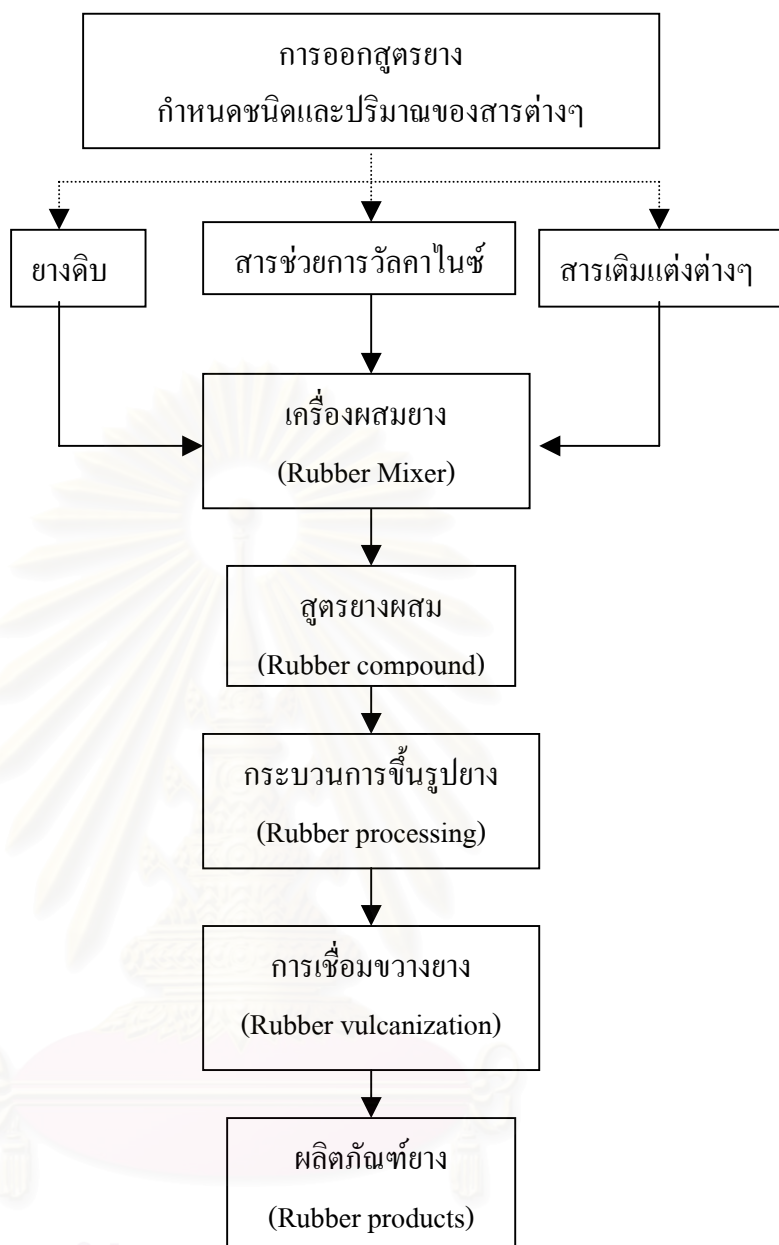
รูปที่ 2.5 เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) [5]



รูปที่ 2.6 เครื่องผสมภายในแบบบานบุรี (Banbury Internal mixer) [6]

ขั้นตอนในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่สามารถแสดงเป็นแผนผังในรูปที่ 2.7 เริ่มต้นกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการออกสูตรยาง (Rubber formulation) คือ การกำหนดชนิดและปริมาณยางและสารเติมแต่งต่างๆที่จะผสมเข้ากันเป็นสูตรยางผสม ทั้งการผสมและสูตรยางรวมทั้งชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งเหล่านี้ จะส่งผลโดยตรงกับสมบัติต่างๆ ของยาง หลักการออกสูตรยางมีดังนี้

- การกำหนดสัดส่วนปริมาณของสารต่างๆ ในสูตรยางจะกำหนดเป็น “phr” หรือ ส่วนในร้อยส่วนของยาง (Parts per hundred of rubber) นั่นคือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารต่อยางหนัก 100 กรัม ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบและการปรับสูตรยาง
- ปกตินิยมเขียนสูตรยางเรียงตามลำดับของการผสมยาง เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน
- จากน้ำหนักรวมของวัสดุที่ใช้ในสูตรสามารถนำมาคำนวณราคาต้นทุนการผลิตต่อ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ยาง



รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง [4]

2.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for Rubber)

สารเติมแต่งต่างๆ ที่ผสมเข้าไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการทั้งในระหว่างการผลิต การคงรูป และการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ยางที่ผสมสารเคมีแล้วนี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จนกว่าสารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งอาจเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้นด้วยการให้ความร้อน

2.3.1 สารช่วยการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือการเชื่อมขวาง (Crosslinking) เป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยางจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ถ้ายังไม่ผ่านกระบวนการทำให้สุกหรือวัลคาไนเซชัน เพราะยางจะไม่แข็งตัว ไม่คงรูปไหลได้ เสียดสภาพเหนียวติด (Sticky) ไม่สามารถรับแรงหรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างอย่างมากได้

วัลคาไนเซชันเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติหรือเทอร์โมเซต ยางจะมีสมบัติที่ดีขึ้น กล่าวคือจะเปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อน นุ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติดและไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimension stability) ไหลได้เมื่อกึ่งไว้นาน กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง ไม่เหนียวติด และทนอุณหภูมิสูง การเชื่อมขวางสามารถทำได้โดยการผสมสารช่วยการวัลคาไนซ์ ได้แก่ กำมะถัน เปอร้ออกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerators) และสารกระตุ้นสารเร่ง (Activators) ผสมเข้ากับยาง แล้วให้อุณหภูมิสูงภายหลังการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้สารช่วยการวัลคาไนซ์ต่างๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเชื่อมขวางโครงสร้างโมเลกุลยาง การเชื่อมขวางทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนไป ดังนี้

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
 - มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
 - มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
 - มีการเปลี่ยนขนาดถาวรเมื่อได้รับแรง (Set) ลดลง
 - มีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
 - เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
 - ทนต่อความร้อน แสงแดดและการใช้งานนานขึ้น
- การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization)

การเชื่อมขวางยางสามารถทำได้หลายวิธี ที่นิยมที่สุด ได้แก่ การเชื่อมขวางด้วยกำมะถัน เนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือ ยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นอย่างที่ไม่

อิมตัว มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวตะไดอิน และยางบิวตะไดอิน เป็นต้น จึงว่องไวต่อการเชื่อมขวางด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งให้ยางคงรูป และสารกระตุ้นสารเร่ง

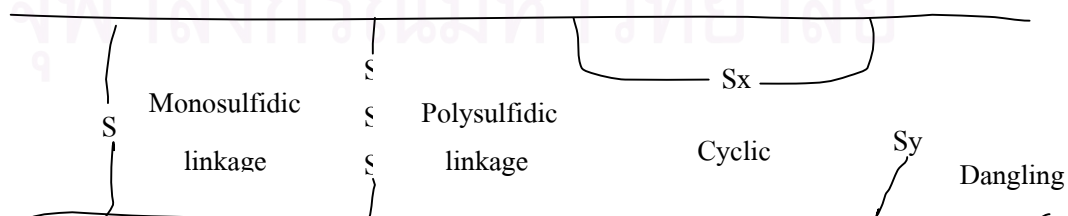
กำมะถันสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ดีกับยางที่ไม่อิมตัวมีพันธะคู่และมีอะตอมของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งแอลลิลิก (Allylic) หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ถัดจากพันธะคู่ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้นยางที่มี Allylic hydrogen มากก็จะเชื่อมขวางได้ว่องไวกว่ายางที่มี Allylic hydrogen น้อย ตัวอย่างเช่น ยางธรรมชาติ มี Allylic hydrogen 7 อะตอมในโครงสร้าง จะเชื่อมขวางด้วยกำมะถันได้ว่องไวกว่ายางบิวตะไดอิน ซึ่งมี Allylic hydrogen 4 อะตอม (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลยางเปรียบเทียบจำนวน Allylic hydrogen (เส้นประ) (a) ยางธรรมชาติ (b) ยางบิวตะไดอิน [4]

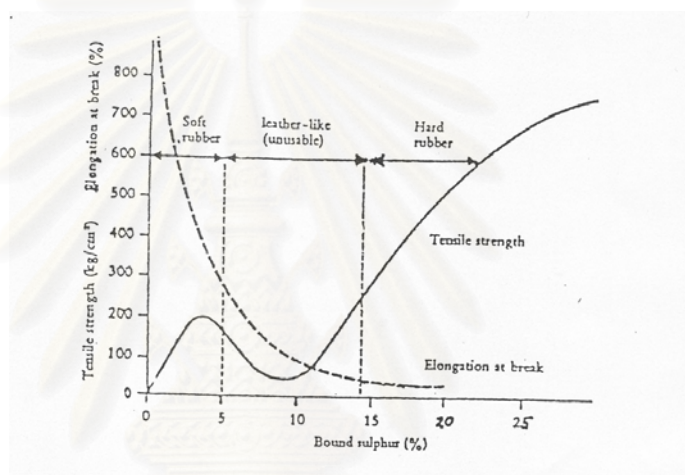
เมื่อกำมะถันเกิดการแตกตัวเข้าทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับสายโซ่โมเลกุลของยาง สามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางหลายลักษณะดังรูปที่ 2.9 คือ

1. เกิดพันธะเชื่อมขวางกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic linkage)
2. เกิดพันธะเชื่อมขวางกำมะถันหลายอะตอมหรือพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkage)
3. เกิดการเชื่อมขวางบนสายโซ่เดียวกัน ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นวง (Ring) หรือไซคลิก (Cyclic)
4. เกิดการเชื่อมขวางด้านเดียว ทำให้เกิดโครงสร้างห้อย (Dangling)

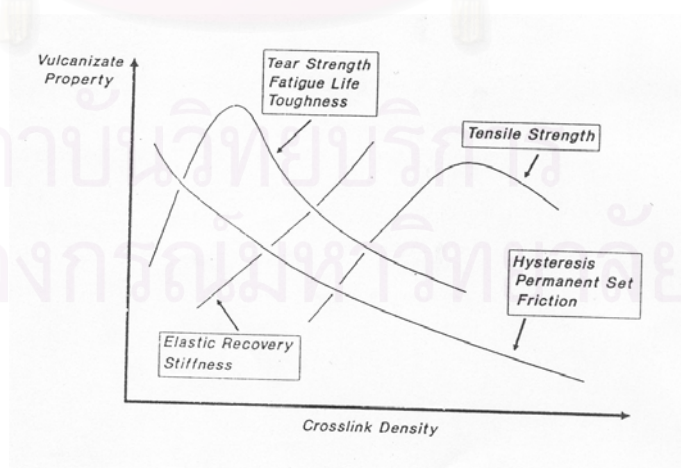


รูปที่ 2.9 พันธะเชื่อมขวางประเภทต่างๆ ในโครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมขวางด้วยกำมะถัน[4]

ปริมาณกำมะถันที่ใช้ในช่วง 1-3 phr แต่โดยทั่วไปไม่เกิน 2.5 phr เนื่องจากจะทำให้ยางมีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด นอกจากนี้ถ้าต้องการให้ยางมีค่ามอดุลัสต่ำ เช่น ลูกโป่ง การเชื่อมขวางทำให้โมเลกุลของยางมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณของกำมะถันที่ใช้มีผลต่อสมบัติของยาง ดังรูปที่ 2.10 แสดงผลของปริมาณกำมะถันต่อความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาด จะเห็นได้ว่าปริมาณกำมะถัน 0-5 phr ยางมีสภาพยืดหยุ่น ปริมาณ 5-15 phr ทำให้ยางมีลักษณะยืดได้เล็กน้อยคล้ายหนัง (leather like) เมื่อปริมาณกำมะถันมากกว่า 5-15 phr ทำให้ยางมีความแข็งแรงมาก และรูปที่ 2.11 แสดงสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ยางที่เปลี่ยนไป เมื่อความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวาง (Crosslink density) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความแข็งแรงดึงและการดึงยืด ณ จุดขาด [7]



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวางของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [8]

- การวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Vulcanization)

การเชื่อมขวางยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์เริ่มมีใช้ตั้งแต่ต้น ค.ศ. 1950 วิธีเชื่อมขวางนี้มีข้อเด่นเหนือการเชื่อมขวางด้วยกำมะถันคือ

- สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubbers) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) นิยมใช้โดยเฉพาะยางอิ่มตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมขวาง เช่น ยางเอทิลีนพรอพิลีนและยางซิลิโคน
- ยางที่เชื่อมขวางด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า สามารถทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนดีกว่า
- ยางที่เชื่อมขวางด้วยเปอร์ออกไซด์มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent set) น้อยกว่า
- ยางที่เชื่อมขวางด้วยเปอร์ออกไซด์มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีกว่า
- สามารถใช้เชื่อมขวางผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใสหรือยางสีขาว เนื่องจากจะไม่ก่อให้เกิดสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางได้แก่ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ไดบีวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-*t*-butyl peroxide, DBP) ไดเมทิลเปอร์ออกไซด์เฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di(*t*-butyl-peroxy) hexane)

2.3.2 สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerators)

สารเร่งให้ยางคงรูป คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมขวางให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมขวาง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมขวางมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันในปริมาณที่น้อยลง

สารเร่งให้ยางคงรูปมีหลายชนิด แสดงชื่อและโครงสร้างดังตารางที่ 2.1 สารเร่งให้ยางคงรูปแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น เวลาเริ่มเกิดการเชื่อมขวางหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) อัตราเร็วการเชื่อมขวาง (Cure rate) เวลาเชื่อมขวางสมบูรณ์ (Cure time) ความสามารถในการละลายในยาง (Solubility) ความเป็นพิษ (Toxicity) เป็นต้น ดังนั้นการเลือกชนิดสารเร่งให้ยางคงรูปที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

ในการใช้งานสารเร่งให้ยางคงรูปในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือ สารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerators) ส่วน สารเร่งที่ใช้ น้อยกว่าจะเรียกว่าเป็น สารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerators)

สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาที่เสริมกันที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมขวางที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งสารเร่งให้ยงคกรรพเป็น 6 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)

กลุ่มที่ 2 ไทเอโซล (Thiazoles)

กลุ่มที่ 3 กัวนิดีน (Guanidines)

กลุ่มที่ 4 ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)

กลุ่มที่ 5 ไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)

กลุ่มที่ 6 ไทยูเรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ทั้งนี้ยังมีสารเร่งให้ยงคกรรพอีกสองกลุ่มที่ไม่ได้รวมอยู่ด้วย เนื่องจากมีปริมาณการใช้น้อย และมีความเป็นพิษ (Toxicity) ได้แก่ อัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amines) และไทโอยูเรีย (Thioureas)

ตารางที่ 2.1 ชื่อและโครงสร้างสารเร่งให้ยงคกรรพ (Accelerators) ชนิดต่างๆ [8]

Compound	Abbreviation	Structure
<i>Benzothiazoles</i>		
2-Mercaptobenzothiazole	MBT	
2,2'-Dithiobisbenzothiazole	MBTS	
<i>Benzothiazolesulfenamides</i>		
N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide	CBS	
N-4-Butylbenzothiazole-2-sulfenamide	TBBS	
2-Morpholinobenzothiazole	MBS	
N-Dicyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide	DCBS	
<i>Dithiocarbamates</i>		
Tetramethylthiuram monosulfide	TMTM	
Tetramethylthiuram disulfide	TMTD	
Zinc diethyldithiocarbamate	ZDEC	
<i>Amines</i>		
Diphenylguanidine	DPG	
Di-o-tolylguanidine	DOTG	

2.3.3 สารกระตุ้นสารเร่ง (Activators)

สารกระตุ้นสารเร่ง (Activators) เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งให้ยังคงรูป สารกระตุ้นสารเร่งที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป โดยปกติในอุตสาหกรรมปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ คือ 2-4 phr ได้มีการศึกษาพบว่าการใช้ปริมาณเกิน 4 phr มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกระตุ้นการเชื่อมขวาง นอกจากการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นแล้ว อาจใช้ออกไซด์ของลิเทียม (Li_2O) แมกนีเซียม (MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amines)

2.3.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นหนึ่งในสารเติมแต่งที่สำคัญที่สุดของยาง เนื่องจากสารตัวเติมเป็นวัสดุที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ซึ่งมีราคาแพง สามารถใช้ผสมในยางเพื่อเพิ่มปริมาณของสูตรยางผสมหรือผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรงให้กับยางได้อีกด้วย กล่าวคือ ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น บางชนิดสามารถทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่า 10 เท่า สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มสูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เขม่าดำหรือคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ซิลิกา (Silica) เป็นต้น
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับยาง สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดินขาว (Kaolin, Clay) เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมยาง สารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เขม่าดำ (Carbon black) เนื่องจากราคาถูกและช่วยเสริมแรงอย่างมากให้กับยาง ข้อจำกัดของการใช้เขม่าดำคือใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีดำเท่านั้น จึงมีการใช้สารตัวเติมชนิดอื่น เช่น ซิลิกา ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีอื่น ดังนั้นนอกจากการแบ่งสารตัวเติมเป็นชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรงแล้ว ในวงการอุตสาหกรรมยางได้มีการแบ่งสารตัวเติมออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมสีดำ (Black fillers) คือ คาร์บอนแบล็ค
2. สารตัวเติมสีไม่ดำ (Non-black fillers) เช่น ซิลิกา ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

- สารตัวเติมสีดำ (Black fillers)

คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ได้จากกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือ เขม่าดำสามารถเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก อาจทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการแปรรูป (Processibility) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์หลังการขึ้นรูป เป็นต้น แต่การใช้เขม่าดำมีข้อเสีย คือสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำเท่านั้น เช่น ยางรถยนต์ สายพาน เป็นต้น

- สารตัวเติมสีไม่ดำ (Non-black fillers)

สารตัวเติมสีไม่ดำ (Non-black fillers) มีข้อดีคือ นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีที่สวยงาม หรือสียางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีราคาถูก เนื่องจากส่วนมากเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินขาว (Kaolin) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ซิลิกา (Silica) เป็นต้น

สารตัวเติมสีไม่ดำมีข้อเสียบางประการคือ มีน้ำหนักมาก ความหนาแน่นสูง และมีการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟซ (Interfacial adhesion) ระหว่างสารตัวเติมกับยางดำ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำเมื่อเทียบกับเขม่าดำ ส่วนมากเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ยกเว้นซิลิกาที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงรองจากเขม่าดำ

ดินขาวเป็นสารตัวเติมสีไม่ดำที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง คือประมาณ 54% รองลงมาคือ แคลเซียมคาร์บอเนต (27%) และซิลิกา (15%)

2.3.5 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือ สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น นั่นคือใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือความเป็นเนื้อเดียว (Homogeneity) ทำให้อัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติจะใช้สารช่วยกระบวนการผลิตในปริมาณน้อย ไม่เกิน 5 phr

- เพปไทเซอร์ (Peptizers)

เพปไทเซอร์ (Peptizers) ทำหน้าที่ในการช่วยเร่งการขาดของสายโซ่ (Chain scission) ของยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความหนืดของยางลดลง เกิดการผสมได้ง่ายขึ้น นิยมใช้เพื่อลดเวลาการบดย่อย (Mastication) โดยเฉพาะยางดิบที่แข็งเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณเพปไทเซอร์ที่ใช้ประมาณ 1-3 phr ตัวอย่างของเพปไทเซอร์ ได้แก่ กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรโรไทโอเฟนอล (Pentachlorothiophenol) เป็นต้น

- พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง และยังช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลง ทำให้ยางมีสมบัติความยืดหยุ่นดีขึ้น นิ่มตัวขึ้น และสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีขึ้น พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยาง ไม่แพร่ออกที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยาง ตัวอย่างพลาสติไซเซอร์สำหรับยางได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมัน (Oils) สารจำพวกเอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine) เป็นต้น

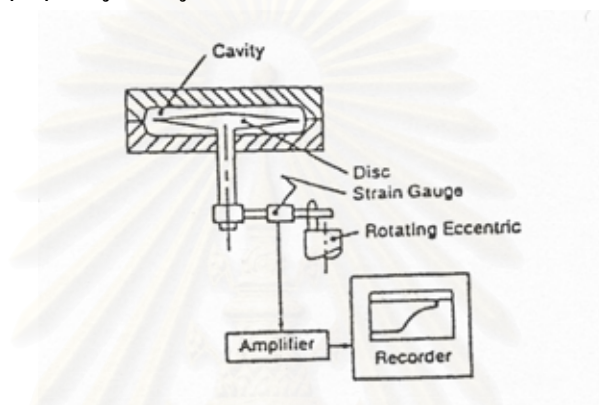
2.4 การทดสอบสมบัติของยาง [4]

การทดสอบยางเป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดในอุตสาหกรรมยาง ทั้งอุตสาหกรรมผลิตยางดิบ ทั้งยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง การทดสอบสมบัติต่างๆ ของยาง จะทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ ควบคุมวัสดุขณะผลิต ควบคุมกระบวนการผลิต และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง นอกจากการควบคุมคุณภาพแล้ว การทดสอบยางยังมีประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยและการพัฒนาเพื่อให้กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ยางที่ดีมีคุณภาพ สมบัติสม่ำเสมอเหมาะสมกับการใช้งาน และเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค

2.4.1 การทดสอบสมบัติการเชื่อมขวาง (Cure characterization)

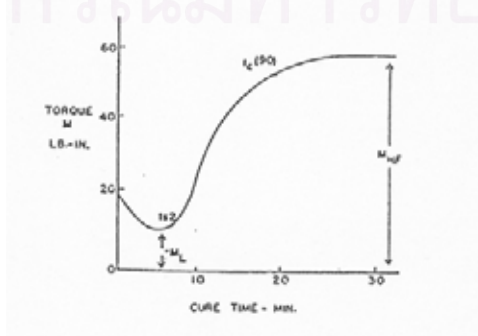
การหาสถานะในการเชื่อมขวางที่เหมาะสม เวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตยาง เพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สามารถทดสอบโดยใช้การไหลแบบจานสั้นหรือเครื่องโอดีอาร์ (Oscillating Disc Rheometers, ODR) ที่สามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

หลักการทำงานของเครื่อง ODR คือการตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดหรือทอร์ก (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนสั้นอยู่ในตัวอย่าง ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง ODR [8]

ในการทดสอบ ยางตัวอย่างจะถูกใส่ในช่องปิด (Cavity) โดยการตัดเป็นแผ่นประกบหุ้มจานโลหะ (Disc) และทำการให้อุณหภูมิที่ทดสอบการเชื่อมขวางของยาง จานโลหะจะหมุนแบบสั้นไปมาที่มุม $\pm 1, 3, 5$ องศาตามแนวระนาบ การเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลยางจะวัดได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงบิด (Torque) ที่ใช้เพิ่มขึ้นทำให้การหมุนของจานหมุนที่มุมคงที่ เนื่องจากการทดสอบนี้ทำที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดอันเนื่องมาจากความหนืด ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้นของแรงบิดของตัวอย่างยางที่เกิดการเชื่อมขวางจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุดเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในรูปของกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะของกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR [8]

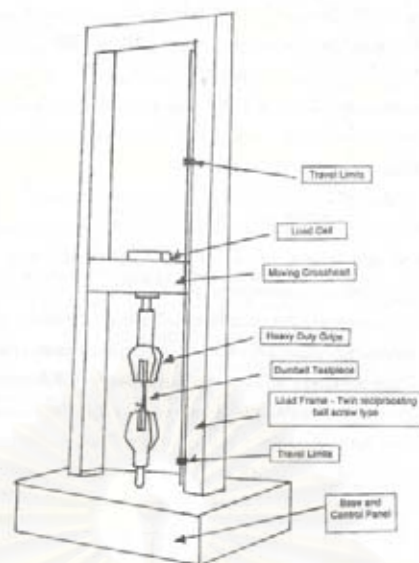
ตามมาตรฐาน ASTM ได้ให้คำนิยามค่าต่างๆ ในกราฟการเชื่อมขวางดังนี้

- M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
- M_{HF} = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)
- M_{HR} = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)
- M_H = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)
- t_{s2} = เวลาเริ่มเชื่อมขวาง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch) เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมขวางจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด
- t_{c90} = เวลาเชื่อมขวาง คือ เวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมขวาง 90% นิยามให้ เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมขวาง (Optimum cure time)

โดยช่วงเวลา t_{s2} คือช่วงเวลาที่ปลอดภัยที่ผู้ผลิตสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ก่อนที่จะเกิดการเชื่อมขวางกลายเป็นโครงร่างแหสามมิติจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ กล่าวคือ กระบวนการขึ้นรูปยางใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของยางจะต้องกระทำภายในช่วงเวลานี้ ส่วนเวลา t_{c90} คือเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเชื่อมขวางยางให้มีสมบัติดีที่สุด

2.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties testing)

ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆ และจำเป็นที่จะต้องทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึง คือ การวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยืดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียหาย การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยใช้ที่จับ (Grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำต่อชิ้นงานตัวอย่าง ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumb-bell) เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของตัวอย่าง ห่างจากบริเวณที่จับ การยืดออกของชิ้นงานสามารถวัดได้จากการวัดระยะห่างระหว่างสองเส้น (Gauge marks) บนชิ้นงานตัวอย่าง ที่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับความยาวเกจหรือ Gauge length ตามมาตรฐานใช้ความยาวเกจ 25 มิลลิเมตร โดยการใช้เครื่องเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ (Extensometer) รูปและส่วนประกอบของเครื่องแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพวาดแสดงเครื่องทดสอบแรงดึงและส่วนประกอบต่างๆ [4]

ค่าแรงดึงและการยืดออกของตัวอย่างที่ได้จากเครื่อง สามารถคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้ดังนี้

- ความเค้นดึง (Tensile stress), $\sigma = F/A$
- ความเครียดดึง (Tensile strain), $\epsilon = \Delta l/l_0$
- ร้อยละความเครียด หรือร้อยละการดึงยืด (% Strain, Elongation) = $\Delta l/l_0 \times 100$

2.5 การนำยางกลับมาใช้ใหม่ [9]

ยางเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก ดังนั้นการนำยางใช้แล้วหรือเศษยางเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ จะช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิตได้

การนำเศษยางกลับมาใช้ใหม่ สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

- การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง (Tire Derived Fuel , TDF)

เนื่องจากในเศษยางรถยนต์มีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 90% ดังนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว สามารถให้พลังงานได้ประมาณ 13,000-15,500 บีทียู/ปอนด์ ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ถ่านหินและไม้ แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ [9]

ชนิดเชื้อเพลิง	บีทียู/ปอนด์
Petroleum coke	14,000
Wood	4,400
Bitumous coal	13,000
Lignite coal	7,000
TDF	13,000-15,500

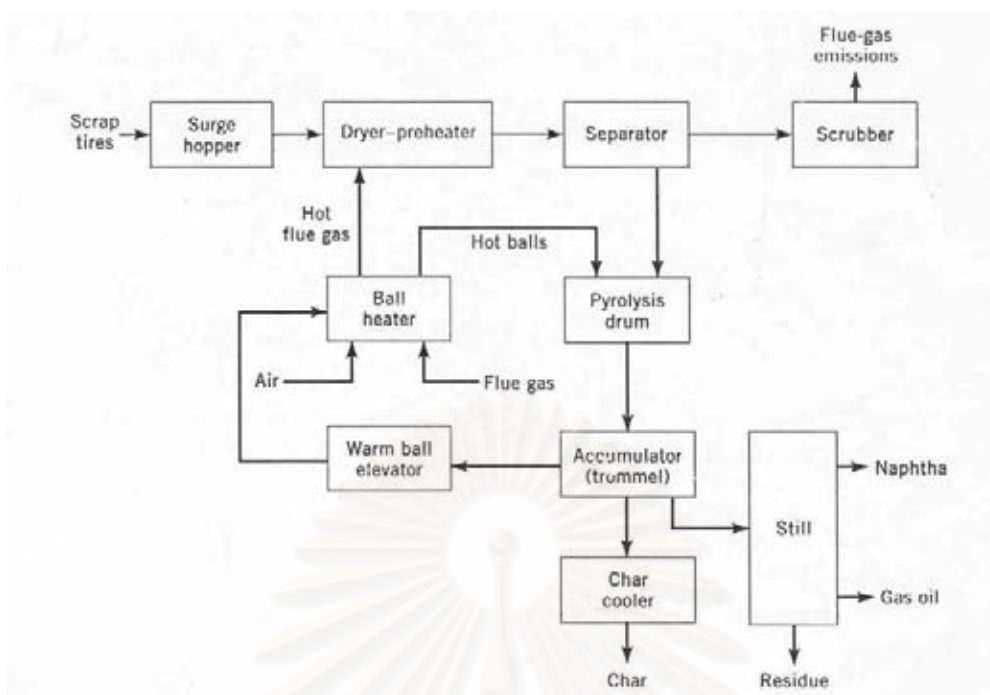
ในอุตสาหกรรมต่างๆ นิยมนำเศษยางไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ใน stocker-fired boiler ใช้เศษยางเผาพร้อมกับถ่านหิน โดยใช้แทนที่ถ่านหิน 10-15% นอกจากนี้ยังพบว่า การนำเศษยางไปเผาเป็นเชื้อเพลิงมีข้อได้เปรียบกว่าการเผาไหม้ด้วยถ่านหิน คือ มีการเผาไหม้ที่สะอาดกว่า จึงก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศน้อยกว่าและปริมาณขยะแข็ง (Solid waste) ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่า สำหรับอุตสาหกรรมที่มีการนำเศษยางไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมกระดาษ และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า

- กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

การนำเศษยางไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์หลายประเภท ได้แก่ ถ่านคาร์บอน (carbon char) น้ำมัน แก๊ส และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการไพโรไลซิส โดยถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 400°C ผลิตภัณฑ์หลัก คือ ถ่านคาร์บอน และผลิตภัณฑ์หลักจะมีสัดส่วนของแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของการไพโรไลซิสสูงขึ้น

ตัวอย่างของกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ Tosco II process แผนผังของกระบวนการแสดงดังรูปที่ 2.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 Tosco II process [10]

ขั้นตอนในการผลิตเริ่มจากเศษยางจะถูกนำเข้าสู่ดรัมแบบหมุน (rotary drum) โดยภายในบรรจุเม็ดกลมเซรามิกร้อน (hot ceramic balls) ที่มีอุณหภูมิ 480°C ซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการให้ความร้อน โดยภายในนี้ยางจะถูกไพโรไลส์ภายใต้บรรยากาศรีดิวซิง (reducing atmosphere) จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลส์จะถูกนำเข้าสู่ถังพัก (Accumulator) เพื่อแยกเอาถ่านชาร์ (char) ออกจากเม็ดกลมเซรามิก (ceramic balls) จากนั้นถ่านชาร์จะถูกตัดให้เป็นเม็ด (Pelletized) หลังจากทำการแยกเอาเส้นใยและสิ่งปลอมปนอื่นๆ ออกแล้ว สำหรับผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นแก๊ส จะถูกนำไปกลั่นแยก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมา ได้แก่ แนฟทา แก๊สซึ่งเป็นแก๊สผสมของเอทิลีน โพรพิลีนและบิวทิลีน และน้ำมันที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 1% โดยสามารถนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้

- ยางผง (Powdered Rubber, PR)

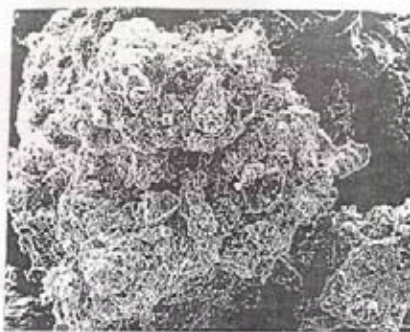
กระบวนการหลักที่ใช้ในการผลิตยางผง ได้แก่

- Ambient Grinding เป็นกระบวนการบดตัดเชิงกล ภายใต้อุณหภูมิห้อง เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ได้แก่ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll cracker-type mill) โดยลูกกลิ้งของเครื่องมือนี้จะถูกเซาะร่องให้มีขอบที่แหลมคม เพื่อช่วยในการฉีกและตัดเศษยางให้มีขนาดเล็กตามต้องการ เมื่อกระบวนการบดตัดสิ้นสุดลงแล้วยางผงที่ได้จะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน เช่น การจำแนกยางผงตามขนาดอนุภาค (Coarse crumb sizing and Ultra fine sizing) การแยกเอาโลหะและเส้นใยออก (Metal and Fiber separation) ซึ่งขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ของยางผงที่ได้จากกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการนำไปผ่านเครื่องบด ตัดและชนิดของเครื่องบดตัดที่ใช้ โดยทั่วไปยางผงที่ได้จะมีขนาดเล็กกลงได้ถึง 80 mesh

- Cryogenic Grinding เป็นกระบวนการบดตัดเชิงกล ที่กระทำภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของยาง โดยขั้นตอนของกระบวนการเริ่มจาก นำเศษยางที่มีขนาดเล็กกว่า 3 นิ้ว ไปแช่ไว้ในไนโตรเจนเหลว จนกระทั่งยางแข็งตัวจึง นำไปผ่านเครื่องบดผสมแบบแฮมเมอร์ (Hammer mill) หรือเครื่องบดผสมแบบพิน (Pin mill) เพื่อให้ยางมีอนุภาคเล็กกลง จากนั้นยางผงที่ได้จะถูกทำให้แห้ง ส่วนโลหะ เส้นใยและสิ่งปลอมปนต่างๆจะถูกแยกออกไป ในขั้นตอนสุดท้ายยางผงจะถูกจำแนก แยกออกเป็นกลุ่มๆตามขนาดอนุภาค

รูปร่าง ขนาด การกระจายตัวของขนาดและลักษณะพื้นผิวของยางผงที่ได้จากทั้ง 2 กระบวนการมีความแตกต่างกัน โดยพบว่า ยางผงที่ได้จาก Ambient Grinding มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ รูปร่างไม่แน่นอนและมีพื้นผิวที่ขรุขระ ในขณะที่ Cryogenic Grinding เป็นกระบวนการที่กระทำภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า -70°C ซึ่งภาวะนี้ยางอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state) ดังนั้นเศษยางจะเกิดการแตกหัก อนุภาคของยางผงที่ได้จึงมีขนาดเล็กกว่า การกระจายตัวของขนาดอนุภาคค่อนข้างกว้างและพื้นผิวมีความเรียบสูง ลักษณะพื้นผิวของยางผงที่ได้จากทั้ง 2 กระบวนการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.16 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของยางผงที่ได้จากกระบวนการ Ambient Grinding [9]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของยางผงที่ได้จากกระบวนการ Cryogenic Grinding [9]

ยางผงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน เช่น

- นำไปผสมกับยางมะตอย เพื่อใช้ราดถนน โดยผงยางจะเป็นตัวช่วยให้ยางมะตอยมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีขึ้นและช่วยเพิ่มอุณหภูมิการอ่อนตัวของยางมะตอยให้สูงขึ้นด้วย
- นำไปผสมกับยางมะตอยและทรายทำเป็นพื้นสนามเทนนิสและลู่วิ่งในสนามกีฬา
- นำไปเป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิเมอร์บางชนิด โดยผงยางจะเป็นตัวช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ได้ เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance)

การจำแนกยางผง (Powdered Rubber, PR) ออกเป็นประเภทต่างๆ ตามขนาดอนุภาค กระบวนการผลิตตลอดจนการนำไปใช้งาน แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแยกประเภทกระบวนการผลิตและการนำไปใช้งานของยางผง [11]

ประเภท	ขนาดอนุภาค		เครื่องมือที่ใช้	การประยุกต์ใช้
	µm	Mesh		
Coarse PR	1400-1500	-	Grinding mill, rolling mill, rotary mill	Ballast mats, the raw material of degrading regenerated rubber
Tiny PR	500-300	30-47	Rolling mill, rotary mill Cryogening mill	The raw material of oiling regenerated rubber Products of molding and extrusion,
Fine PR	300-75	47-200	freezing crushing mill	rubber mats for crossie, soft pipe for irrigating, vases
Ultrafine PR	Under 75	Above 200	Rotary colloid mill	Used in renew of tire

- ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

เป็นการนำยางเหลือทิ้งมาผ่านกระบวนการซึ่งทำให้เศษยางเหล่านั้นกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง โดยจะขอกว่าในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.6 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

Rubber recycling division of the National Association of Recycling Industries (1980) ประเทศสหรัฐอเมริกา ให้คำนิยามว่า ยางรีเคลมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเศษยางเหลือทิ้งมาผ่านกระบวนการที่ทำให้ยางคืนกลับสู่สถานะพลาสติก (Plastic state) ซึ่งสามารถนำมาผสมและขึ้นรูปใหม่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจจะมีการเติมหรือไม่เติมยางใหม่ (Virgin rubber) ก็ได้ [2]

โดยการที่จะทำให้ยางกลับคืนสู่สถานะพลาสติกนั้นต้องมีการทำลายพันธะเชื่อมขวางในยาง แต่เนื่องจากค่าพลังงานพันธะระหว่าง C-C C-S และ S-S มีค่าใกล้เคียงกันคือ 370, 310 และ 270 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ [12] ในกระบวนการผลิตยางรีเคลม พันธะทุกพันธะในโครงสร้างของยางมีโอกาสแตกออกจากกันได้ ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นร่วมกัน คือ การแตกออกของพันธะเชื่อมขวาง (Devulcanization) และการแตกออกของสายโซ่โพลีเมอร์ของยาง (Depolymerization) ซึ่งการที่โครงสร้างโพลีเมอร์ของยางถูกทำลายนี้เอง ส่งผลให้ยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางใหม่ (Virgin rubber)

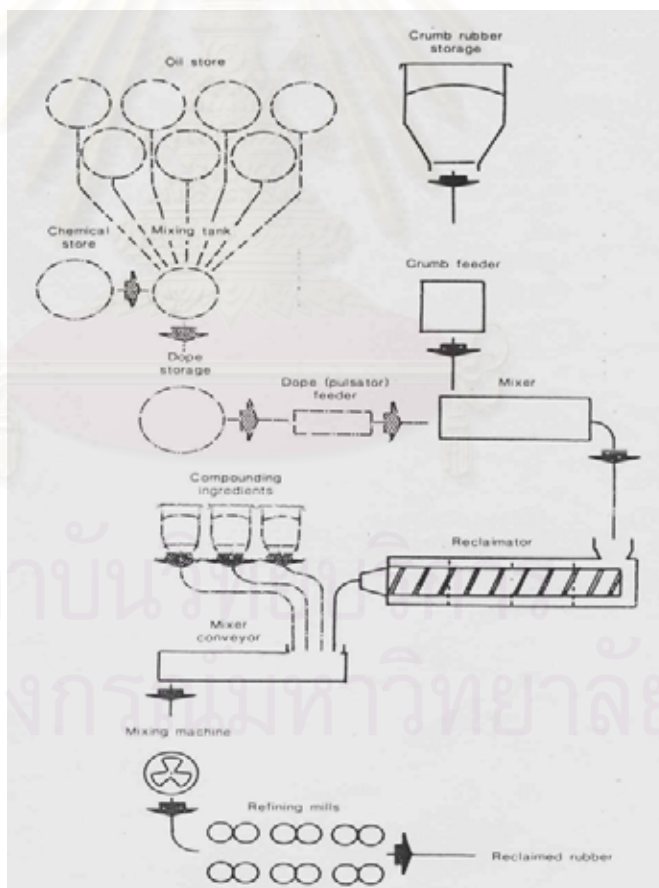
2.6.1 กระบวนการผลิตยางรีเคลม

กระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยางรีเคลมจากเศษยางรถยนต์ มีอยู่หลายกระบวนการ ได้แก่

1. Heater or Pan process เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมที่เป็นยางธรรมชาติ (NR), ยางบิวทิล (IIR) และยางประเภทต่างๆที่มีการจัดเส้นใยออกหมดแล้ว ขั้นตอนในการผลิตเริ่มจาก ผสมเศษยางเข้ากับสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) แล้วนำเข้าสู่ภาชนะก้นแบน (pan) ที่มีการให้ความดันไอน้ำประมาณ 1.01-1.42 เมกะพาสคัล และระยะเวลาในการผลิตอยู่ในช่วง 3-8 ชั่วโมง
2. Digester process ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้วิธีนี้ในการผลิต โดยขั้นตอนในการผลิตเริ่มจากเศษยางรถยนต์ที่ถูกบดตัดให้มีขนาดเล็กจะถูกนำไปแยกเส้นใยออก จากนั้นน้ำมันและสารเติมแต่งจะถูกผสมเข้ากับเศษยางก่อนจะมีการนำเข้าสู่ Digester ซึ่งเป็นถังอัดความดันไอน้ำ (Steam pressurized tank) โดยจะมีการติดตั้งใบพัดไว้ด้วยเพื่อช่วย

ให้การส่งผ่านความร้อนในกระบวนการเกิดได้ดียิ่งขึ้น ความดันไอน้ำที่ให้อยู่ในช่วง 1.01-1.7 เมกะพาสคัล ระยะเวลาของกระบวนการคือ 4-6 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการยางรีเคลมที่ได้จะถูกนำมาล้างและทำให้แห้ง หลังจากนั้นองค์ประกอบในการผสมสูตร เช่น คาร์บอนแบล็ค, ดินขาว (Clay) จะมีการเติมเข้าไปในยางรีเคลมเพื่อให้มีสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ ส่วนเหล็กและสิ่งปลอมปนต่างๆจะถูกกรองออกโดยเครื่องอัดรีด (Extruders) จากนั้นยางรีเคลมจะถูกนำไปอัดเป็นก้อน ตัดเป็นเม็ดหรือทำเป็นแผ่นเพื่อรอการจำหน่ายต่อไป

3. Reclaimator process เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตคือเครื่องอัดรีดแบบสกรู (Screw extruder) ในระหว่างกระบวนการผลิตยางจะได้รับแรงกดอัดและแรงเฉือนที่สูงมากภายในกระบอกใส่สกรู (Barrel) ทำให้การผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เวลาเพียง 1-3 นาที ซึ่งขั้นตอนในการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพรวมของ Reclaimator process [10]

2.6.2 สารเคมีที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลม [13,14]

ในกระบวนการผลิตยางรีเคลม นอกจากจะอาศัยความร้อนและความดันเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ยังต้องมีการใช้สารเคมีประเภทต่างๆร่วมด้วย เนื่องจากยางบางประเภท เช่น ยางเอส.บี.อาร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในยางรถยนต์ การให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว จะทำให้ยางแข็ง แห้งและเปราะมากขึ้น

- ซอฟเทนเนอร์ (Softener)

เป็นสารที่ช่วยให้ยางเกิดการบวมตัวหรือนิ่มตัวลง และแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง จนทำให้แรงดึงดูระหว่างสายโซ่ลดลง เป็นผลให้ยางสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีประเภทต่างๆ ได้ดีขึ้น ดังนั้นการแตกออกของโมเลกุลของยางและพันธะเชื่อมขวางในยางเกิดได้ดีขึ้น โดยปริมาณของซอฟเทนเนอร์ (Softener) ที่ใช้ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลม, ชนิดของยางตลอดจนชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่เป็นองค์ประกอบในยาง แต่โดยทั่วไปปริมาณที่นิยมใช้ คือ ปริมาณตั้งแต่ 40 phr ขึ้นไป ตัวอย่างของซอฟเทนเนอร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ อินดิน (Indene), เทอร์พีน (Terpene), และแนฟทา (Naphthas)

- อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier)

เป็นสารที่ช่วยให้อนุภาคของยางเกิดการกระจายตัวไม่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน สารประเภทนี้ได้แก่ Rosin, Naphthalene- β -sulphonic acid, Sodium soaps of oleic acid

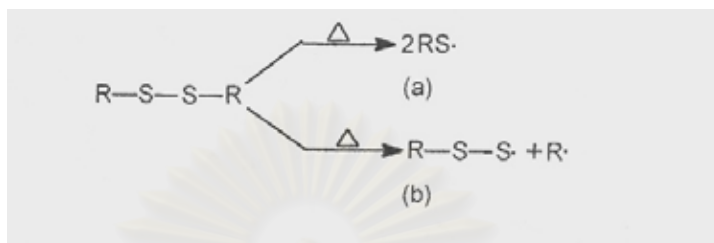
- สารรีเคลม (Reclaiming agent)

เป็นสารจำพวกเดียวกับสารตัดสายโซ่ (Peptizer) เป็นตัวช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว มีลักษณะการทำงานตรงกันข้ามกับสารเร่งให้ยางคงรูป แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- ฟีนอลแอลคิลซัลไฟด์ และไดซัลไฟด์ (Phenol alkyl sulfides and disulfides) เป็นสารที่นิยมใช้กับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน โดยหลักการทำงาน คือ เร่งให้โมเลกุลของยางขาดออกจากกัน โดยการออกซิไดส์พร้อมกับเร่งให้พันธะเชื่อมขวางแตกออกจากกัน นอกจากนี้ยังมีหน้าที่ป้องกันการกลับมารวมตัวกันใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ขาดออกจากกันแล้ว และหากในปฏิกิริยามีออกซิเจนอยู่ด้วย จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารรีเคลม (Reclaiming agent) ในกลุ่มนี้

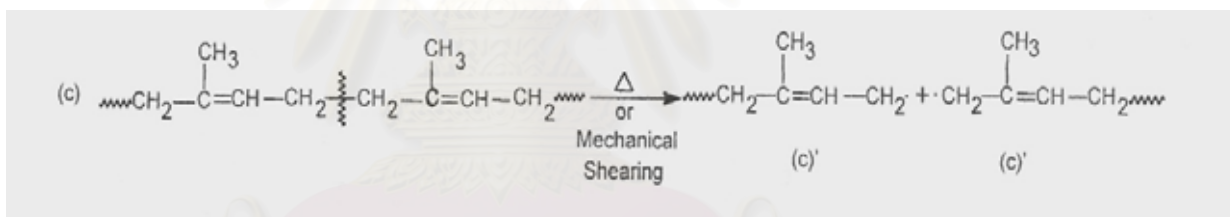
ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาของสารรีเคลมไดซัลไฟด์ที่เสนอโดย Adhikari และคณะ [15, 16] มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสลายตัวทางความร้อนของสารรีเคลมไดซัลไฟด์ (Thermal decomposition of the disulfide reclaiming agent)

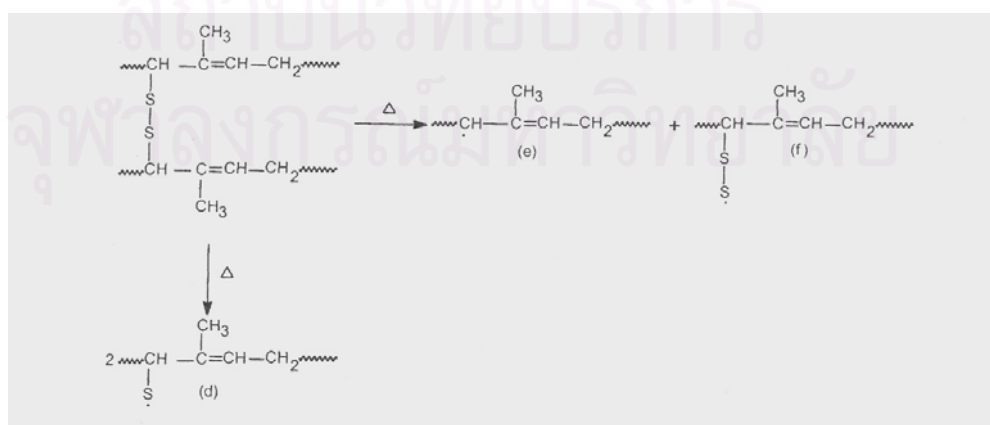


ในขั้นตอนนี้สารประกอบประเภทไดซัลไฟด์ จะเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน กลายเป็นอนุมูลซัลเฟอร์ (Sulfur radicals) (a และ b)

ขั้นตอนที่ 2 ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization)

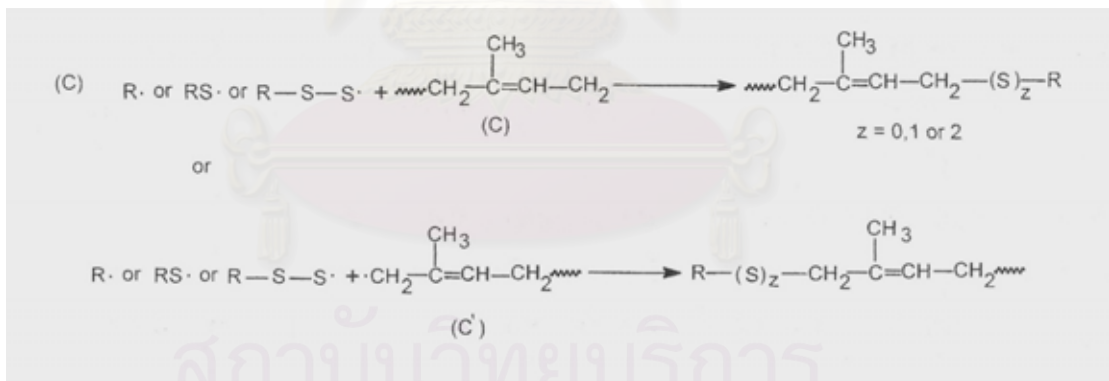
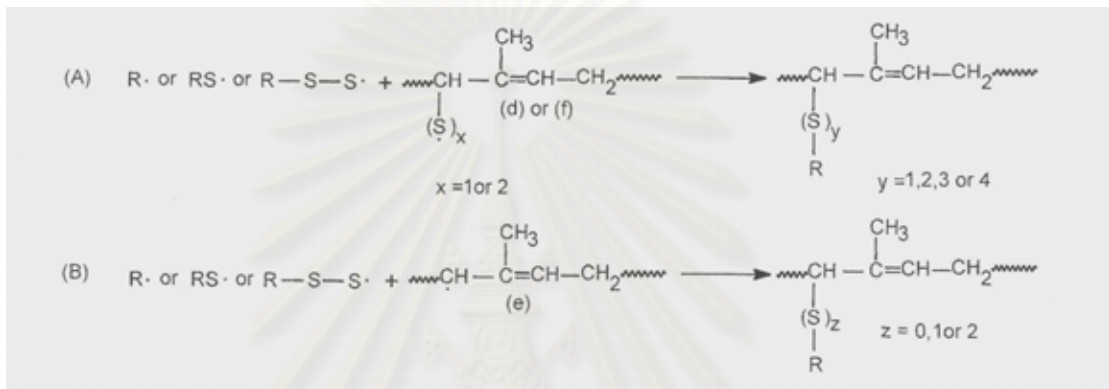


ขั้นตอนที่ 3 การแตกตัวทางความร้อนของพันธะเชื่อมขวาง (Thermal scission of sulfur crosslinks)



ในขั้นตอนที่ 2 และ 3 โมเลกุลของยางจะเกิดการสลายตัวเนื่องมาจากความร้อนหรือแรงเชิงกลที่ได้รับ โดยอาจเกิดการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลของยาง หรือเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางในยาง ทำให้มีอนุมูลพอลิเมอร์ (Polymer radicals) เกิดขึ้น (ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 2 และ 3) ซึ่งอนุมูลพอลิเมอร์เหล่านี้จะเข้าร่วมตัวกับอนุมูลซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1 เกิดเป็นสารประกอบประเภทต่างๆ ดังแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกริยาการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระ (Radicals coupling reaction)



จากกลไกการผลิตยางรีเคลมข้างต้น อาจสรุปได้ว่า บทบาทของสารประเภทไดซัลไฟด์ ในกระบวนการผลิตยางรีเคลม คือ เป็นตัวป้องกันการกลับมารวมตัวกันอีกครั้ง (Recombination) ของสายโซ่โมเลกุลของยางที่เกิดการแตกออกจากกันแล้ว โดยจะเข้าไปรวมตัวกับอนุมูลพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเอง สายโซ่โมเลกุลของยางจึงเกิดการแตกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ สายโซ่โมเลกุลของยางจึงสั้นลง

- อะลิฟาติก และแอโรแมติกส์เมอร์แคปแทน (Aliphatic and aromatic mercaptan) ซึ่งพบว่าอะลิฟาติกเมอร์แคปแทนมีประสิทธิภาพเหนือกว่าแอโรแมติกส์เมอร์แคปแทน แต่เป็นสารที่ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีกลิ่นเหม็น

- สารประกอบพวกอะมิโน(Amino compound) เป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงปฏิกิริยาการแข็งตัวเนื่องจากความร้อน (Heat hardening process) และนิยมใช้กับยางที่ไม่ได้วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน โดยประสิทธิภาพของเอมีน(Amine) สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ Primary amine > Secondary amine > Tertiary amine

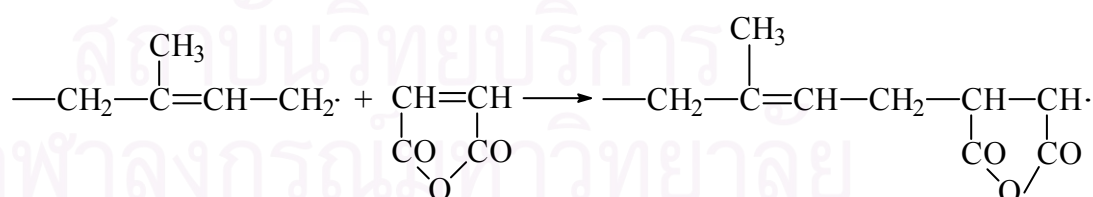
- มอดิไฟเออร์ (Modifiers)

เป็นสารเคมีที่เมื่อเติมลงไปในช่วงกระบวนการผลิตยางรีเคลมแล้ว สมบัติของยางรีเคลมที่ผลิตได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นหรือทำให้ยางรีเคลมมีสมบัติพิเศษบางประการ โดยสารเคมีประเภทนี้ได้แก่

- มอนอเมอร์ (Monomer) เช่น สไตรีน (Styrene) เมทิลเมทาครีเลต (Methyl methacrylate) และพอลิเมอร์ (Polymer) เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene) พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride) โดยในระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลม โมเลกุลของยางและพันธะเชื่อมขวางในยางเกิดการสลายตัว ทำให้มีอนุมูลอิสระ (Free radicals) เกิดขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้เป็นตัวริเริ่มให้มอนอเมอร์และพอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังนั้นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจึงกระจายตัวเป็นองค์ประกอบอยู่ในยางรีเคลม ส่งผลให้ยางรีเคลมที่ผลิตได้มีสมบัติดีขึ้น

- สารเคมีที่มีหมู่เอ็กโซโทริกที่ตำแหน่งแอลฟาของพันธะคู่ เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) กรดมาเลอิก (Maleic acid) กรดซิตริก (Citric acid)

ยกตัวอย่างในกรณีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยเมื่อเติมเข้าไปในกระบวนการผลิตยางรีเคลม ด้วยวิธีความร้อนเชิงกล (Thermomechanical method) มันจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของโมเลกุลยางที่เกิดการสลายตัวดังนี้ [14]



อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของโมเลกุลของยางโมเลกุลอื่นหรือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อไป ส่งผลให้ยางรีเคลมที่ผลิตได้มีความเป็นขั้วมากขึ้น โดยพบว่าเมื่อเติมลงไปปริมาณตั้งแต่ 9 phr ขึ้นไป จะทำให้ยางรีเคลมที่ผลิตได้มีความทนทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายเบนซีนมากขึ้น สมบัติของยางรีเคลมถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น เมื่อเติมมอดิไฟเออร์ประเภทต่างๆ ลงไป ในกระบวนการผลิตยางรีเคลมด้วยวิธีความร้อนเชิงกลแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มอดิไฟเออร์สำหรับกระบวนการผลิตยางรีเคลม ด้วยวิธีความร้อนเชิงกล [14]

ชนิด	ปริมาณ (phr)	ความแข็งแรงการยึดติด (Cohesive strength, MPa)	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ร้อยละการดึงยืด (%Elongation)
ไม่เติม	-	0.25	6.6	358
Maleic anhydride	0.5	0.42	7.4	373
	1.0	0.59	7.7	375
	2.0	0.79	7.8	388
Maleic acid	0.5	0.43	7.5	435
	1.0	0.60	7.9	423
	2.0	0.55	8.8	433
Monoamyl maleate	1.0	0.29	8.1	385
	2.0	0.39	8.3	394
	4.0	0.47	9.8	396

2.6.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ยางรีเคลม [15,17]

ยางรีเคลมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการที่มีการให้ทั้งความร้อนและแรงกดอัด ส่งผลให้โมเลกุลของยางถูกทำลายไป ดังนั้นยางรีเคลมจึงมีสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ความทนทานต่อการขัดถูเสียดสี (Wear resistance) ดีกว่ายางใหม่ อย่างไรก็ตามในทางอุตสาหกรรมก็นิยมใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากมีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่

- ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตลดลง เนื่องจากยางรีเคลมสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต อีกทั้งยังมีราคาต่ำกว่ายางใหม่ นอกจากนี้ในยางรีเคลมยังมีสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น ตัวเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator), สารช่วยการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent), สารป้องกันการเสื่อม (Antioxidant) หลงเหลืออยู่ ดังนั้นในขั้นตอนการผลิตสามารถลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ลงได้
- เวลาที่ใช้ในการผลิตลดลง เนื่องจากในกระบวนการผลิตยางรีเคลม ยางถูกกระทำด้วยภาวะที่รุนแรง มีทั้งการให้ความร้อนและแรงกดอัด ยางที่ได้จึงมีลักษณะที่อ่อนนุ่ม ดังนั้นการผสมเข้ากับสารอื่นๆ ทำได้ง่ายกว่ายางใหม่ เวลาที่ใช้ในการผสมจึงลดลง อีกทั้ง

ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผสมมีน้อยลง ซึ่งเป็นผลดีสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีการใส่คาร์บอนแบล็คในปริมาณมาก เช่น โครงยาง (Tire carcass), ยางด้านข้าง (Side wall) - ช่วยแก้ปัญหาบางประการที่พบในกระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีการอัดรีด (Extrusion) และการรีดกลิ้ง (Calendering) เนื่องจากในยางรีเคลมมีส่วนที่เกิดการเชื่อมขวางแล้วหลงเหลือปะปนอยู่ จึงทำให้มีความเป็นเทอร์โมพลาสติกน้อยกว่ายางใหม่ สามารถรักษารูปทรงได้ดี มีการเสีรูปร่างน้อยกว่า ดังนั้นในกระบวนการอัดรีด ผลิตภัณฑ์ที่ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ มีการเกิดการบวมตัวที่หัวตาย (Die swell) ลดลง และในกระบวนการรีดกลิ้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเรียบ สม่ำเสมอและการหดตัวเกิดน้อยลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้อัตราเร็วในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นอีกด้วย

- ยางรีเคลมมีความทนทานต่อการออกซิไดส์ได้ดี เนื่องจากภาวะรุนแรงต่างๆ ที่ยางรีเคลมได้รับ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน การให้ความร้อน การให้แรงเชิงกล เปรียบเสมือนเป็นตัวทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีความคงตัวและทนทานต่อภาวะต่างๆที่เข้ามากระทำ จนสามารถเปลี่ยนแปลงต่อไปได้ยากแล้ว

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Koda และคณะ [18] ศึกษากระบวนการผลิตยางรีเคลม ภายใต้ภาวะอุณหภูมิห้อง และไม่ต้องอาศัยเครื่องมือใดๆเป็นพิเศษเหมือนกับกระบวนการโดยทั่วไป โดยสามารถใช้กับยางได้หลายชนิด เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางบิวตะไดอิน (BR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับยางที่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบอยู่มากถึง 6% ขั้นตอนในการผลิตเริ่มจากผสมยางผงเข้ากับ Petroleum process oil ซึ่งทำหน้าที่เป็น สารช่วยทำให้ยางเกิดการนิ่มตัว (Softening agent) ตัวอย่างของ Petroleum process oil ที่สามารถใช้ได้ในกระบวนการนี้คือน้ำมันแนฟทีน (Naphthene oil) น้ำมันแอโรแมติกส์ (Aromatic oil) น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) โดยปริมาณที่ใช้อยู่ในช่วง 80-150 ส่วน โดยน้ำหนัก จากนั้นจะผสมเข้ากับสารจำพวกเพปไทเซอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยให้โมเลกุลของยางเกิดปฏิกิริยา Peroxidation ตัวอย่างของเพปไทเซอร์ที่ใช้ได้คือ Zinc salt of pentachlorothiophenol, Dixylyl disulfides, Diaryl disulfides โดยปริมาณที่ใช้อยู่ในช่วง 2-10 ส่วน โดยน้ำหนัก ต่อมาจึงทำการปั่นกวนและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ยางผงที่ได้จะเกิดการบวมตัว จนโครงสร้างร่างแหสามมิติที่เกิดการเชื่อมขวางในยางเกิดการพลาสติกไซส์และกระจายตัวอยู่ในรูปของคอลลอยด์ (Colloidal form) ส่งผลให้เมื่อนำไปผสมเข้ากับยางใหม่ ความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ (Untreated powdered rubber) อีกทั้งยังมีสมบัติดีเทียบเท่ากับยางรีเคลมที่ผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงการค้า

Yap [19] ศึกษากระบวนการผลิตยางรีเคลมโดยใช้วิธีทางกายภาพ เนื่องจากพบว่า เมื่อยางได้รับแรงกดอัดและแรงเฉือนที่มากเพียงพอ พันธะเชื่อมขวางในยางสามารถแตกออกจากกันได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีใดๆ ช่วยในการเกิดปฏิกิริยา โดยในขั้นตอนการผลิต เศษยางที่ถูกบดตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะถูกนำเข้าสู่เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip) ของเครื่องจะถูกปรับให้ใกล้เคียงศูนย์มากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อที่จะให้ยางได้รับแรงกดอัดได้เต็มที่ ซึ่งพบว่าแรงกดอัดที่ยางได้รับจะมีค่าประมาณ 100 เมตริกตันหรือมากกว่า และเพื่อให้ยางได้รับแรงเฉือนควบคู่ไปด้วย จึงทำการปรับความเร็วของลูกกลิ้งทั้งสองให้ต่างกันเป็นอัตราส่วน 1:1.6 นอกจากนี้ยังต้องมีการติดตั้งระบบทำความเย็นควบคุมอุณหภูมิในขณะบดผสมให้อยู่ในช่วง 70-100°C และเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างลูกกลิ้งกับยางซึ่งอาจส่งผลให้ยางเกิดการไหม้ได้ หลังจากยางถูกบดผสมไปได้ประมาณ 30 รอบการหมุนของลูกกลิ้ง จะได้ยางที่มีลักษณะเป็นแผ่นที่ดึงยืดได้ ยางมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งยางที่ได้นี้สามารถนำไปผสมกับยาง สารเคมีหรือสารตัวเติม เพื่อนำไปขึ้นรูปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง

Mouri และคณะ [20] ศึกษากระบวนการผลิตยางรีเคลมที่อาศัยทั้งความร้อนและแรงกดอัด เพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาคีวูลคาไนเซชัน โดยสามารถใช้กับยางได้หลายชนิดเช่นยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน (SBR) ยางบิวทิล (IIR) แรงกดอัดที่ใช้ในช่วง 10-150 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ในช่วงอุณหภูมิ 180-350°C และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-5 นาที นอกจากนี้จะมีการเติมเขม่าดำ (carbon black) เข้าไปในยางในระหว่างกระบวนการคีวูลคาไนเซชันด้วย เนื่องจากพบว่าเมื่อเขม่าดำกระจายตัวอยู่ในยาง อุณหภูมิของยางจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของเขม่าดำ ที่ตำแหน่งนี้เองเสมือนว่าเป็นจุดเชื่อมขวางเชิงกลในยาง ส่งผลให้ยางคีวูลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากได้รับการเสริมแรงจากเขม่าดำ โดยอุณหภูมิของเขม่าดำที่จะทำหน้าที่ในการเสริมแรงได้ต้องมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 5-100 นาโนเมตร และเพื่อให้กระบวนการคีวูลคาไนซ์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจะมีการใช้สารเคมีร่วมด้วย โดยจะทำการเติมสารที่ช่วยในการเกิดการคีวูลคาไนซ์ (devulcanizing agent) เช่น ไทโอฟีโนล (thiophenol) ไดไซลิลไดซัลไฟด์ (dixylyl disulfide) นอกจากนี้จะมีการเติมพวคน้ำมันเนฟทินิกหรือน้ำมันพาราฟินิกกลงไปด้วย ยางรีเคลมที่ได้จากกระบวนการนี้พบว่าสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับยางที่ไม่เคยผ่านกระบวนการใดมาก่อน จึงสามารถนำยางรีเคลมที่ได้จากกระบวนการนี้ไปใช้งานในด้านต่างๆ ได้ โดยไม่จำเป็นต้องนำไปผสมกับยางใหม่แต่อย่างใด

Fukumori และคณะ [12] ศึกษาเทคโนโลยีการรีไซเคิลแบบต่อเนื่องสำหรับยางรถยนต์ โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) โดยสกรูที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร และยาว 1260 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย ที่มีผล

ต่อคุณภาพของยางที่ผลิตได้ ได้แก่ รูปร่างของสกรู (Screw configuration) อุณหภูมิในช่วง 100-300°C และความเร็วรอบการหมุนของสกรูในช่วง 100-900 รอบ/นาที จากการทดลองพบว่าเมื่อกระบวนการดีวัลคาไนเซชันเกิดภายใต้ภาวะที่เหมาะสม ยางดีวัลคาไนซ์ที่ได้มีลักษณะพื้นผิวที่ดี และเมื่อนำไปผสมกับยางใหม่แล้วทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มียางดีวัลคาไนซ์เป็นองค์ประกอบในช่วง 0-30 ส่วนต่ออย่างร้อยละ (phr) มีค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกับยางใหม่ นอกจากนี้ยังนำยางดีวัลคาไนซ์ 10% ผสมกับยางธรรมชาติทำเป็นยางล้อรถบรรทุกแล้วนำไปทดสอบการสึกกร่อนของหน้ายางโดยได้ทำการวัดความหนาของหน้ายางที่ลดลงเมื่อนำไปใช้งานจริงๆพบว่าช่วงกิโลเมตรที่ 0-200,000 ยางที่มีส่วนประกอบของยางดีวัลคาไนซ์มีสมบัติใกล้เคียงกับยางใหม่ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ายางรีเคลมที่เตรียมได้จากกระบวนการนี้มีสมบัติเป็นที่น่าพอใจ

Kovalak [21] ศึกษากระบวนการผลิตยางดีวัลคาไนซ์ซึ่งสามารถใช้กับยางได้หลายชนิด และยังสามารถใช้กับยางผสมได้อีกด้วยโดยปฏิกิริยาดีวัลคาไนเซชันเกิดภายใต้อุณหภูมิ 150-300°C ความดันอย่างต่ำ 3.4×10^6 พาสคัล ภายใต้ภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ในตัวทำละลายพวก แอลกอฮอล์หรือคีโตน ที่มีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ในช่วง 200-350°C เช่น เมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเพื่อเป็นการเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาดีวัลคาไนเซชัน ต้องมีการบดตัดยางให้มีขนาดเล็ก ก่อนที่จะนำเข้าสู่ปฏิกิริยา และในปฏิกิริยาต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงกว่า 300°C เพื่อป้องกันการแตกออกของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bond) ในสายโซ่โมเลกุลของยาง ซึ่งอาจส่งผลให้ยางที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จากการทดลองพบว่า เมื่อยางเกิดปฏิกิริยาภายใต้ภาวะและตัวทำละลายที่เหมาะสม ยางดีวัลคาไนซ์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ค่อนข้างสูง (มากกว่า 100,000) อีกทั้งโครงสร้างภายในของยางไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก ยางดีวัลคาไนซ์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถนำไปผสมสูตรหรือทำให้เกิดการเชื่อมขวางใหม่ เพื่อนำไปใช้ในงานด้านต่างๆ ต่อไป

Grigoryeva และคณะ [22] ศึกษากระบวนการผลิตยางรีเคลมจากเศษยางรถยนต์ โดยวิธีการดัดแปรทางอุณหเคมี (Modified thermochemical method) สารเคมีที่ใช้ในการผลิตเป็นของผสมของ ซอฟเทนเนอร์ (Mixture of softeners) ซึ่งประกอบด้วย Rosin, Indene-Coumarone, Mineral rubber และ Phthalic anhydride ขั้นตอนในการผลิตเริ่มจากนำมาแช่ใน Processing oil ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ยางเกิดการบวมตัวอย่างเต็มที่ จากนั้นยางผงที่เกิดการบวมตัวแล้วจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยความร้อน (Thermal treatment) โดยนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 0-6 ชั่วโมง จากนั้นยางรีเคลมที่ผลิตได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาสัดส่วน โซล (Sol fraction) โดยพบว่าเมื่ออบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ยางรีเคลมที่ได้มีสัดส่วน โซลสูงที่สุด จึงเลือกผลิตยางรีเคลมที่สภาวะนี้เพื่อนำไปผสมกับยางประเภทต่างๆ ได้แก่ ยางบิวตะไดอิน (BR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน

(SBR) ยางไอโซพรีน (IR) พบว่า ผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบประมาณ 20% มีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถนำไปแทนที่ยางใหม่ (Virgin rubber) สำหรับสูตรมาตรฐานในการผลิตยางรถยนต์ราคาต่ำ (Low-cost tires) ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) STR 20 BR : บริษัท ไทยอีลทีร์น รีบเบอร์ จำกัด
2. ผงยางรถยนต์ (Ground Tire Rubber, GTR) ขนาด 20 mesh : บริษัท ยูเนียน พัฒนกิจ จำกัด
3. ยางรีเคลมเชิงการค้า (Reclaimed Tire Rubber) : บริษัท ยูเนียน พัฒนกิจ จำกัด
4. น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil), Commercial grade : บริษัท เอส เอ็น พี เชนเนอร์ลเทรดดิ้ง จำกัด
5. สารรีเคลม : ULTRA-PEP 96, Commercial grade : บริษัท เบ็น เมเยอร์ เคมีคอล ที่ จำกัด
6. กรดสเตียริก (Stearic acid), Lab grade : Ajax
7. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide), Commercial grade : บริษัท เบ็น เมเยอร์ เคมีคอล ที่ จำกัด
8. 2-เมอแคปโทเบนโซไทอาโซล (2-Mercaptobenzothiazole, MBT) : Commercial grade
9. ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine, DPG) : Fluka
10. ซัลเฟอร์ (Sulfur) : Commercial grade
11. อะซีโตน (Acetone) : CARLO ELBA
12. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) : Fluka

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) : Lab tech
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression mould) : Lab tech
3. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง
4. ตู้อบ
5. เครื่องแก้วอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ
6. ชุดปั่นกวนพร้อมใบพัด
7. ไมโครมิเตอร์

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Universal Testing Machine (UTM) : LLOYD Instruments LR 5K
2. Oscillating Disc Rheometer (ODR) : Rotor type TECH PRO 121105
3. Scanning Electron Microscope (SEM) : Jeol-5410 LV

3.4 การผลิตยางรีเคลม

1. นำยางผง (Ground Tire Rubber, GTR) มาผสมกับน้ำมันพาราฟินในปริมาณ 80 phr และเพื่อให้ยางเกิดการบวมตัวอย่างเต็มที่ จะแช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง
2. นำยางที่เกิดการบวมตัวแล้วผสมกับสารรีเคลม : ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 0.5 - 3 phr แล้วจึงทำการปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที
3. นำของผสมที่ได้เข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยความร้อน โดยนำไปให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 110°C และ 140°C เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง

3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณ Sol-Gel fraction ของยางรีเคลม [23]

นำยางรีเคลมที่ผลิตได้ในแต่ละภาวะมาประมาณ 1 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) มาห่อไว้ด้วยผ้าขาวบางเพื่อให้ตัวทำละลายสามารถซึมผ่านเข้าไปสกัดตัวอย่างยางได้ จากนั้นจะนำไปแช่ในตัวทำละลายอะซิโตน เป็นเวลานาน 7 วัน เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ยางรีเคลมจะถูกนำออกจากตัวทำละลาย แล้วจึงนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าตัวทำละลายระเหยออกจากตัวอย่างยางจนหมด จากนั้นชั่งน้ำหนักของยางหลังการสกัดโดยร้อยละ (% gel) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละ} = \left[\frac{\text{น้ำหนักของยางรีเคลมหลังการสกัด}}{\text{น้ำหนักของยางรีเคลมเริ่มต้น}} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

3.6 การผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

เครื่องมือที่ใช้ในการผสม คือ เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยขั้นตอนในการผสมมีดังนี้

1. ตั้งอุณหภูมิของลูกกลิ้งให้อยู่ที่ประมาณ 50°C แล้วทำการบดย่อยยางธรรมชาติ (NR) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติจนสามารถเข้ากับสารอื่นๆ ได้ดียิ่งขึ้น

- ผสมยางที่บดแล้ว เข้ากับซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริก เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นจึงผสมเข้ากับ MBT, DPG และ ซัลเฟอร์ แล้วผสมต่อไปอีกเป็นเวลา 4 นาที โดยสูตรที่ใช้ในการผสมแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรสำหรับการผสมยางที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)
Rubber	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	2
MBT	0.5
DPG	0.2
Sulfur	3

- ในการเตรียมผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ใช้ยางธรรมชาติที่บดย่อยแล้วในข้อ 1. ผสมกับยางรีเคลมที่ผลิตได้ในแต่ละภาวะเป็นเวลา 5 นาที โดยในขั้นตอนนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งไม่ให้เกิน 45°C เพราะจะทำให้ยางเหนียวติดลูกกลิ้งไม่สามารถผสมต่อไปได้ จากนั้นผสมกับสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 3.1
- นำยางผสมสารเคมีที่ได้ไปทดสอบหาเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป (Optimum cure time, T_{c90}) โดยใช้เครื่อง ODR
- นำยางที่ผสมสารเคมีแล้วมาอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression mould) ที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 150 kg/cm^2 และใช้เวลาเท่ากับค่า t_{c90} ซึ่งหาได้จากเครื่อง ODR ยางที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วจะมีลักษณะเป็นแผ่น โดยจะถูกนำมาตัดและเก็บไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.7 การทดสอบสมบัติการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยาง (Cure characteristics)

การทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_s) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้เครื่อง ODR จะทดสอบตาม ISO 3417 Rubber-measurement of vulcanization characteristic with the Oscillating Disc Rheometer โดยตัวอย่างยางที่ใช้ทดสอบจะถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร โดยทดสอบที่ 150°C เป็นเวลา 30 นาที

3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางที่ทำการตรวจวัดได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าร้อยละการดึงยืด (% Elongation) และค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% (300% Modulus) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 : Test method for vulcanized rubber and thermoplastic rubber and thermoplastic elastomer tension โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งอัตราเร็วที่ใช้ในการดึงยืด คือ 500 มิลลิเมตร/นาที และชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะถูกตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbell) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง

3.9 การทดสอบสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal aging characteristics)

การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน ทำการทดลองโดยนำชิ้นงานไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นอย่างน้อยครึ่งชั่วโมงในอุณหภูมิที่จะทดสอบ แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยผลที่ได้จะแสดงในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนดังสมการที่ 3.2 [24]

$$P = [(A-O)/O] \times 100 \quad (3.2)$$

P = ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

O = ค่าสมบัติก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน

A = ค่าสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ค่าที่ได้จากสมการอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ โดยถ้าเป็นบวกแสดงว่าสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการบ่มเร่งเป็นไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อค่าที่ได้เป็นลบ สมบัติเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ลดลง

3.10 สัณฐานวิทยา (Morphology) ของผลิตภัณฑ์ยาง

ทดสอบโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้ นำตัวอย่างยางมาจุ่มในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) จนกระทั่งยางแข็งตัว จึงนำยางขึ้นมาก้อยอย่างรวดเร็วเพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ ผิวหน้าของชิ้นงานจะถูกนำไปเคลือบด้วยทองและเก็บไว้ก่อนที่จะนำไปทดสอบโดยใช้เครื่อง SEM ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่โดยการนำมาผลิตเป็นยางรีเคลม วิธีที่ใช้ในการผลิตเป็นวิธีการดัดแปรทางอุณหเคมี (Modified thermochemical method) [21] ซึ่งอาศัยทั้งผลของความร้อนและสารเคมีที่ใช้ในการผลิต สำหรับตัวแปรที่จะทำการศึกษา คือ ปริมาณสารรีเคลม : ULTRA-PEP 96 ที่ใช้ ซึ่งจะทำการศึกษาในช่วง 0.5-3 phr รวมถึงภาวะที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบำบัดด้วยความร้อน (Thermal treatment) โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 110°C และ 140°C เวลาที่ 2 และ 4 ชั่วโมง ยางรีเคลมที่ผลิตได้ในแต่ละภาวะจะนำมาผสมกับยางธรรมชาติ (NR) เพื่อนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติด้านการคงรูป (Cure characteristics) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology) ของผลิตภัณฑ์ยางเมื่อมียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ

4.1 ผลของปริมาณยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) ในผลิตภัณฑ์ยาง

เพื่อเป็นการศึกษาผลของการนำเศษยางใช้แล้วมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรีเคลมก่อน ว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางธรรมชาติอย่างไร จึงผสมยางผงที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปศึกษาสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 สมบัติการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางเมื่อมียางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) เป็นองค์ประกอบ

ปริมาณยางผง (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2} , นาที)	เวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90} , นาที)
0	2.92	9.05
20	2.33	8.53
40	2.08	8.42
60	1.83	7.75

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยาง ทั้งค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{c2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) มีแนวโน้มที่จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่า สารเคมีประเภทต่างๆ ที่ยังคงเหลืออยู่ในยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาคัดค้านในเซชัน ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางเกิดได้เร็วขึ้น [9, 25] ซึ่งการที่เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปหรือที่เรียกว่าระยะเวลาปลอดภัยสำหรับการขึ้นรูปลดลงนี้ เป็นผลให้ความสามารถในการแปรรูป (Processibility) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ยางรูปแบบต่างๆ ลดลง

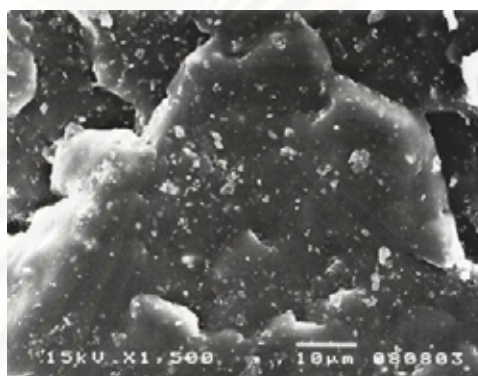
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางเมื่อมียางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) เป็นองค์ประกอบ

ปริมาณยางผง (% โดยน้ำหนัก)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการดึงยืด (%)	มอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
0	21.12 ± 0.59	731.12 ± 30.84	1.89 ± 0.09
20	11.43 ± 0.83	464.93 ± 21.31	3.33 ± 0.42
40	11.18 ± 1.26	399.24 ± 23.25	6.12 ± 0.92
60	9.37 ± 0.45	322.35 ± 15.88	8.23 ± 0.40

จากตารางที่ 4.2 เมื่อปริมาณยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงกว่าการใช้ยางธรรมชาติอย่างเดียว โดยค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยืดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจาก ยางผงเป็นอนุภาคยางที่เกิดการเชื่อมขวางแล้ว มีความแข็งแรงสูง จึงไม่สามารถหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกับยางธรรมชาติได้ ส่งผลให้มีขอบเขตวัฏภาค (Phase boundary) เกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ยางจึงสามารถทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งสามารถยืนยันการมี ขอบเขตวัฏภาคในผลิตภัณฑ์ยางได้จากโครงสร้างพื้นฐานวิทยารูปที่ 4.1 โดยรูปที่ 4.1 (ก) เป็นโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติพบว่า เมตริกซ์ของยางมีความต่อเนื่อง ส่วนรูปที่ 4.1 (ข) อนุภาคของยางผงไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับยางธรรมชาติและกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเมตริกซ์ของยางธรรมชาติและมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ส่งผลให้มีขอบเขตวัฏภาคเกิดขึ้นมากมาย จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมด้อยลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยาง (ก) ยางธรรมชาติ 100% (ข) ยางธรรมชาติผสมยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) 60% โดยน้ำหนัก

ส่วนค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม ที่เป็นเช่นนี้นอกจากจะเป็นผลมาจากขอบเขตวัฏภาคที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ยางแล้ว ยังเกิดจากการเติมอนุภาคของยางผงซึ่งเป็นยางส่วนที่เกิดการเชื่อมขวางแล้ว ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวาง (Crosslink density) โดยรวมของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นน้อยลง การดึงให้ยืดออกต้องใช้แรงมากขึ้น มอดูลัสจึงมีค่าสูงขึ้น [8, 26]

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น การนำยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมมาใช้ประโยชน์ ส่งผลกระทบต่อทั้งสมบัติเชิงกลและความสามารถในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Processibility) จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้โดยตรงได้ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงเลือกที่จะนำยางผงมาผ่านกระบวนการรีเคลมก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์

4.2 ผลของปริมาณ ULTRA-PEP 96 และภาวะที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมต่อสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ยางผสม

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตยางรีเคลม เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมการผลิตและปรับปรุงคุณภาพของยางรีเคลม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณสารรีเคลม (Reclaiming agent) : ULTRA-PEP 96 ที่ 0.5-3 phr การผ่านการบำบัดและไม่บำบัดด้วยความร้อน ภาวะสำหรับขั้นตอนการบำบัดด้วยความร้อน (Thermal treatment) ได้แก่ อุณหภูมิที่ 110°C และ 140°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการทำงานของ ULTRA-PEP 96 ช่วงเวลาการให้ความร้อนที่ 2 และ 4 ชั่วโมง จากนั้นนำยางรีเคลมที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ ข้างต้น ผสมกับยางธรรมชาติที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และนำยางผสมที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

ผลของเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมกับยางรีเคลมซึ่งผลิตจากภาวะต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อเติมยางรีเคลมที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ เข้าไปผสมกับยางธรรมชาติ 10% ผลิตภัณฑ์ยางจะมีค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) ของผลิตภัณฑ์ยางอยู่ในช่วง 2.38-2.96 นาที และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) อยู่ในช่วง 8.00-9.75 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ 100% ที่มีค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) เท่ากับ 2.92 นาที และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) เท่ากับ 9.05 นาที จึงสรุปได้ว่า การเติมยางรีเคลมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยาง ไม่ได้มีผลกระทบต่อสมบัติการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) จึงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tukachinsky และคณะ [27] และ Cavalieri และคณะ [28] ซึ่งพบว่า ยางรีเคลมที่ผลิตได้ในแต่ละภาวะ แม้ว่าจะมีความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวางที่แตกต่างกัน แต่เมื่อเติมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยางแล้วพบว่ารีโอกราฟ (Rheograph) ของผลิตภัณฑ์ยางมีลักษณะเหมือนกันทุกสูตรและไม่มี ความแตกต่างของค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) แสดงว่า การเติมยางรีเคลมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยาง ไม่ได้ส่งผลให้จลนพลศาสตร์ของการเชื่อมขวาง (Kinetics of vulcanization) เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าจลนพลศาสตร์ของการเชื่อมขวางขึ้นอยู่กับระบบสารวัลคาไนซ์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในงานวิจัยได้มีการกำหนดให้ระบบสารวัลคาไนซ์เป็นระบบเดียวกันหรือผสมด้วยสูตรเดียวกันทั้งหมดรวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์คือ 150°C เท่ากันทุกสูตร ดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อสมบัติการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางแต่อย่างใด

ตารางที่ 4.3 ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมกับยางรีเคลมซึ่งผลิตที่ภาวะต่างๆ

ปริมาณ ULTRA-PEP 96 (phr)	ภาวะที่ใช้ในการผลิต		เวลาที่ยางเริ่มเกิด	เวลาที่ใช้ในการ
	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (ชั่วโมง)	การคงรูป (t_{s2} , นาที)	คงรูป (t_{c90} , นาที)
0.5	ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน		2.67	8.75
0.5	110	2	2.54	8.79
0.5	110	4	2.54	8.96
0.5	140	2	2.79	8.00
0.5	140	4	2.58	9.33
1	ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน		2.63	9.21
1	110	2	2.83	9.33
1	110	4	2.46	8.09
1	140	2	2.38	8.01
1	140	4	2.63	8.03
3	ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน		2.96	9.75
3	110	2	2.71	9.00
3	110	4	2.54	8.38
3	140	2	2.83	8.46
3	140	4	2.54	8.00

ค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ค่าร้อยละการดึงยืด (% Elongation) และค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (300% Modulus) ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 - 4.4 โดยที่ในแต่ละรูปแสดงผลของค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ (NR) 100% และผลิตภัณฑ์ยางผสมยางฟงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมไว้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบด้วย

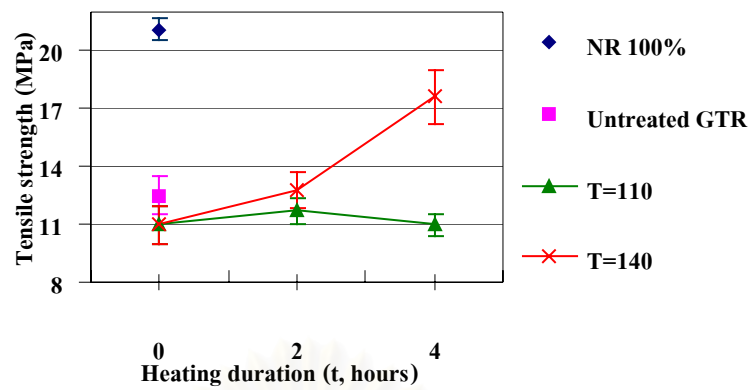
จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ปริมาณ ULTRA-PEP 96 0.5 phr ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่า

1) ค่าความแข็งแรงดึง จากรูปที่ 4.2 (ก) การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C ไม่ว่าจะเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหรือ 4 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ไม่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดย

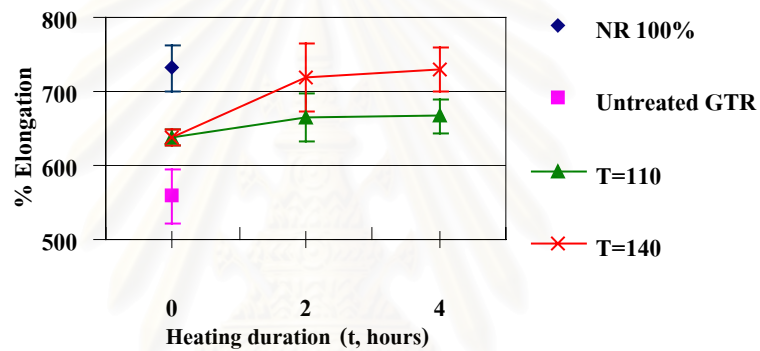
ค่าที่ได้ยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 140°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางเริ่มมีค่าสูงขึ้นและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการให้ความร้อน โดยค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมกับยางรีเคลมมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 17.62 MPa เมื่อใช้ยางรีเคลมที่ผลิตที่ภาวะอุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ยังมีค่าน้อยกว่าค่าของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ 100% อยู่ที่ร้อยละ 16.56

2) ค่าร้อยละการดึงยืด จากรูปที่ 4.2 (ข) พบว่า ในทุกๆ ภาวะการผลิต ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 637.06-730.78 ซึ่งสูงกว่าค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 558.47 โดยที่ภาวะการผลิตเป็น 140°C ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าเทียบเท่ากับค่าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

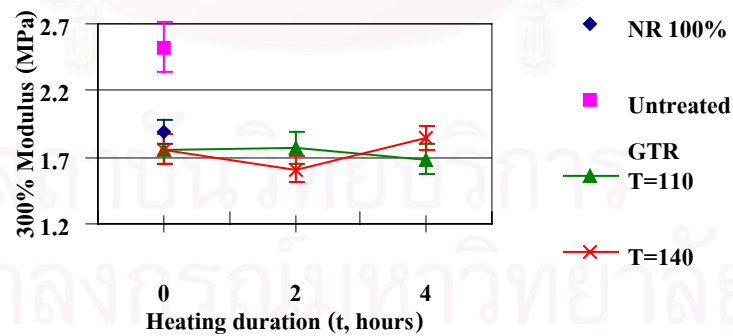
3) ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% จากรูปที่ 4.2 (ค) พบว่า ในทุกๆ ภาวะการผลิต ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าต่ำกว่าค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม และในทุกๆ ภาวะการผลิตค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าอยู่ในช่วง $1.61\text{-}1.85\text{ MPa}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าของยางธรรมชาติเล็กน้อย



(ก)



(ข)



(ค)

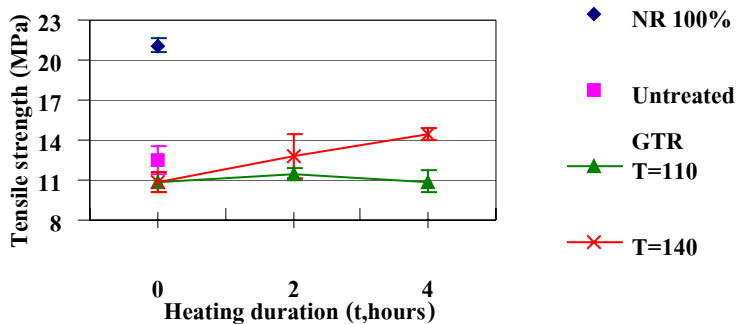
รูปที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 110°C และ 140°C เป็นเวลา 0-4 ชั่วโมง
(ก) ค่าความแข็งแรงดึง (ข) ค่าร้อยละการดึงยืด (ค) ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300%

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมเป็นยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ปริมาณ ULTRA-PEP 96 1 phr ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่า

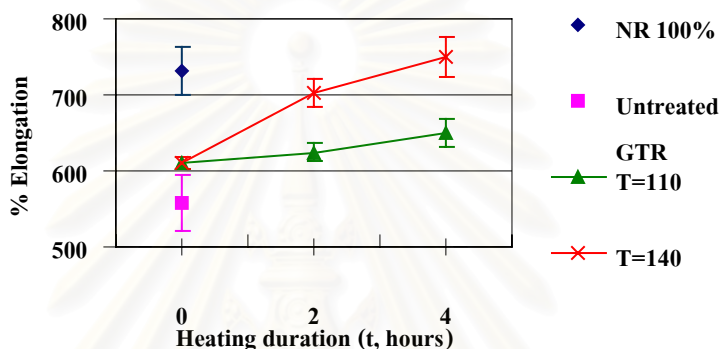
1) ค่าความแข็งแรงดึง จากรูปที่ 4.3 (ก) พบว่าเมื่อผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 110°C แม้ว่าจะเพิ่มเวลาในการผลิตเป็น 4 ชั่วโมงแล้วก็ตาม ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมไม่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยค่าที่ได้ยังมีค่าต่ำแต่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางพงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 140°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางเริ่มมีค่าสูงขึ้นและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการให้ความร้อน โดยค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 14.38 MPa เมื่อใช้ยางรีเคลมที่ผลิตที่ภาวะอุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2) ค่าร้อยละการดึงยืด จากรูปที่ 4.3 (ข) พบว่า ในทุกๆ ภาวะการผลิต ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 610.22-749.56 ซึ่งสูงกว่าค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางพงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 558.47 แต่การเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตเป็น 140°C ไม่ว่าจะมีการให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 2 หรือ 4 ชั่วโมงก็ตาม มีผลทำให้ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงกว่าการผลิตที่ 110°C และยังมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ 100% อีกด้วย

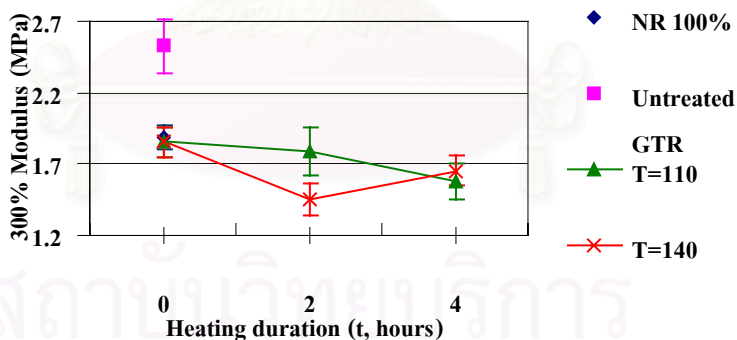
3) ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% จากรูปที่ 4.3 (ค) พบว่า ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าต่ำกว่าค่าของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางพงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม ในทุกๆ ภาวะการผลิต และในทุกๆ ภาวะการผลิตค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.45-1.85 MPa



(ก)



(ข)



(ค)

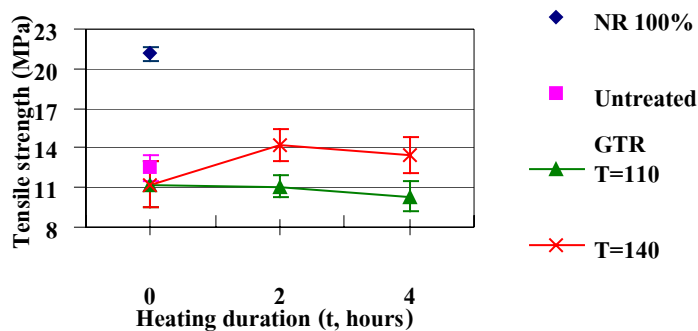
รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีคอมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 1 phr ที่อุณหภูมิ 110°C และ 140°C เป็นเวลา 0-4 ชั่วโมง (ก) ค่าความแข็งแรงดึง (ข) ค่าร้อยละการดึงยืด (ค) ค่ามอดุลัสการดึงยืด 300%

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ปริมาณ ULTRA-PEP 96 3 phr ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ พบว่า

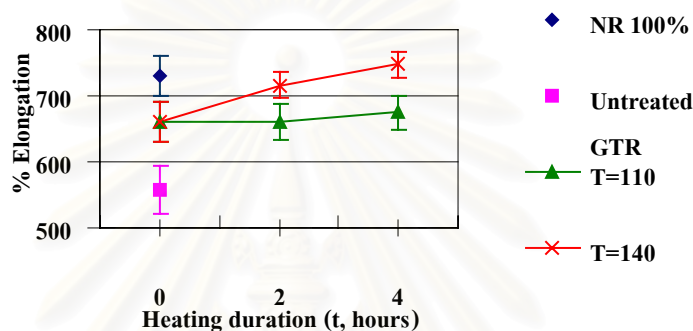
1) ค่าความแข็งแรงดึง จากรูปที่ 4.4 (ก) เมื่อผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 110°C ไม่ว่าจะเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหรือ 4 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยังคงมีค่าต่ำโดยมีค่าอยู่ในช่วง 10.33-11.09 MPa ซึ่งยังคงมีค่าต่ำใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 140°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางเริ่มมีค่าสูงขึ้นแต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็น 4 ชั่วโมง มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับที่อุณหภูมิ 110°C โดยค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 14.21 MPa เมื่อผลิตที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2) ค่าร้อยละการดึงยืด จากกราฟที่ 4.4 (ข) พบว่า ในทุกๆ ภาวะการผลิตยางรีเคลม ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีการปรับปรุงให้มีค่าสูงขึ้นได้ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 660.47-747.05 ซึ่งสูงกว่าค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 558.47 การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน จะมีผลต่อค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 140°C มากกว่าที่อุณหภูมิ 110°C โดยภาวะที่ทำให้ค่าร้อยละการดึงยืดมีค่าสูงที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

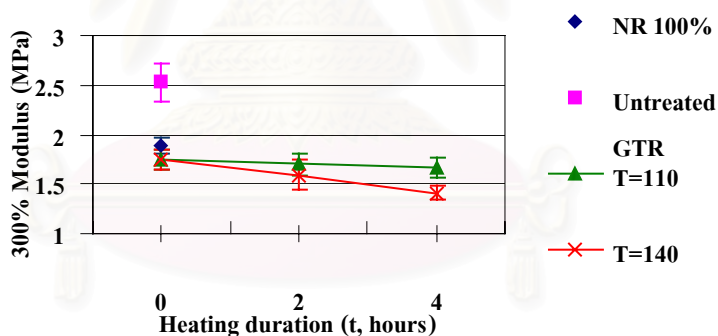
3) ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% จากรูปที่ 4.4 (ค) พบว่า ในทุกๆ ภาวะการผลิต ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าต่ำกว่าค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม และในทุกๆ ภาวะการผลิตค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.41-1.75 MPa โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตเป็น 140°C และค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าต่ำลงตามระยะเวลาในการให้ความร้อน แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 3 phr ที่อุณหภูมิ 110°C และ 140°C เป็นเวลา 0-4 ชั่วโมง (ก) ค่าความแข็งแรงดึง (ข) ค่าร้อยละการดึงยืด (ค) ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300%

เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลของภาวะการผลิตยางรีเคลมที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 ต่างๆ จึงได้นำข้อมูลมาแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 (ก) ได้แสดงการเปรียบเทียบผลของภาวะการผลิตยางรีเคลมที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 ต่างๆ ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยาง พบว่าที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 เท่ากันผลของภาวะการผลิตที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ

- เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยังคงมีค่าต่ำใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม ถึงแม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็น 4 ชั่วโมงแล้วก็ตาม แสดงว่า ที่อุณหภูมิ 110°C ปริมาณความร้อนที่ให้ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคของยางผงเกิดการสลายตัวเป็น โมเลกุลที่เล็กลงได้ ส่วนที่ยังไม่เกิดการสลายตัว หรือยังมีส่วนที่เป็นเจลเชื่อมขวาง (Crosslink-gel) นี้เอง ทำให้ยางรีเคลมไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับยางธรรมชาติ ในผลิตภัณฑ์จึงมีขอบเขตวิฤภาคเกิดขึ้นซึ่งจุดนี้เองเปรียบเสมือนเป็นจุดอ่อนแอ (Weak points) ของชิ้นงาน เมื่อมีการให้แรงดึง ชิ้นงานจึงไม่สามารถทนรับแรงได้และขาดออกจากกันในที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ้าทำการผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิที่ยังไม่ทำให้ยางเกิดการสลายตัว แม้ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่สารรีเคลมเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ (ช่วงการทำงานของ ULTRA-PEP คือ $90-140^{\circ}\text{C}$) การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือเพิ่มปริมาณสารรีเคลม ก็ไม่มีผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางไม่สามารถถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยยังคงมีค่าต่ำเทียบเท่ากับค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม หรือยางรีเคลมที่ผลิตโดยไม่มีผลจากการบำบัดด้วยความร้อน และการที่ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมเล็กน้อย อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากการมีน้ำมันพาราฟินในผลิตภัณฑ์ยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น เมื่อมีแรงดึงภายนอกกระทำ ความสามารถในการทนรับแรงจึงมีน้อยลง

- เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140°C ยางเริ่มเกิดการสลายตัวเป็น โมเลกุลที่เล็กลง จนสามารถกระจาย เข้าไปอยู่ในเมตริกซ์ของยางธรรมชาติ ทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์ยางมีมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางจึงมีค่าสูงขึ้น ที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 0.5 phr และ 1 phr การเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนเป็น 4 ชั่วโมง จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เมื่อปริมาณ ULTRA-PEP 96 เพิ่มเป็น 3 phr ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงเล็กน้อย

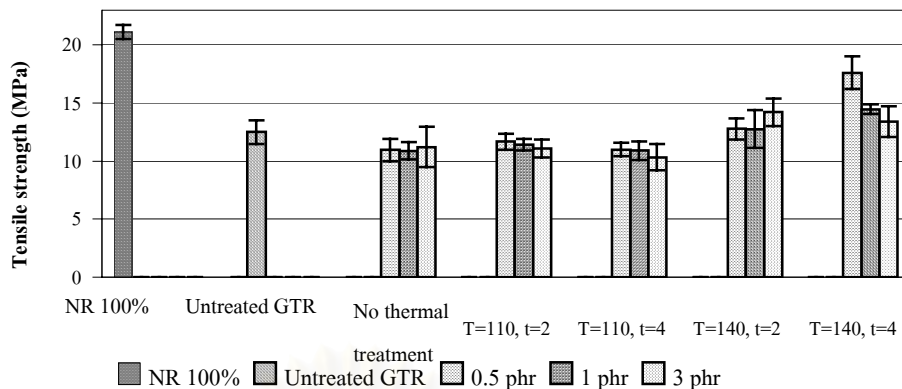
- เมื่อทำการผลิตยางรีเคลมโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ปริมาณ 0.5 phr ที่ 140°C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าสูงที่สุดคือ 17.62 MPa และที่ภาวะนี้เอง เมื่อเพิ่มปริมาณ ULTRA-PEP 96 มากกว่า 0.5 phr ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางกลับมีค่าต่ำลง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณสารรีเคลมที่มากเกินไป ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัวมากเกินไป ส่งผลให้ยางรีเคลมที่ผลิตได้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ เมื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางจึงมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับกลไกการผลิตยางรีเคลมโดยใช้สารประกอบประเภทไดซัลไฟด์

(Disulfide) ที่เสนอโดย Adhikari และคณะ [15, 16] โดยสารเคมีที่ใช้เป็นสารรีเคลมในงานวิจัยนี้คือ ULTRA-PEP 96 ซึ่งสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ Dibenzamido diphenyl disulfide ซึ่งเป็นสารประเภทไดซัลไฟด์เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Adhikari

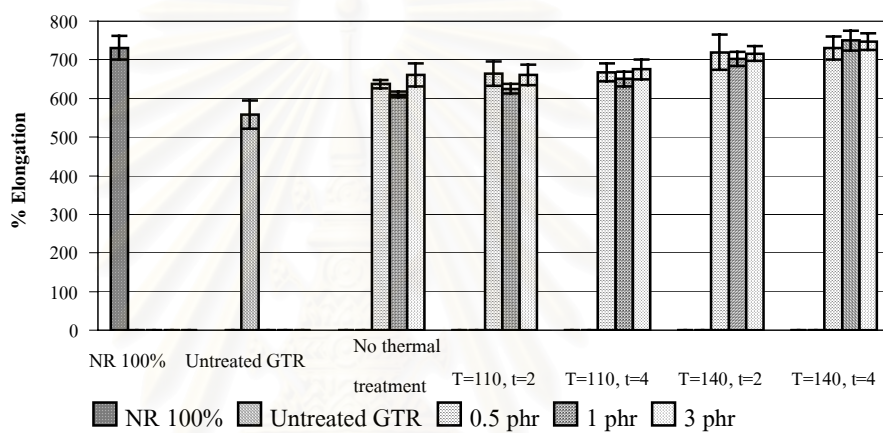
จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาสามารถนำมาอธิบายผลจากการเพิ่มปริมาณสารรีเคลมที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางได้ดังนี้คือ เมื่อปริมาณสารรีเคลมเพิ่มขึ้นปริมาณอนุมูลซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณมากขึ้นด้วย ซึ่งอนุมูลซัลเฟอร์เหล่านี้ก็จะเข้าร่วมตัวกับอนุมูลพอลิเมอร์ได้มากขึ้น หรือทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกตัดออกเป็นโมเลกุลที่เล็กลงได้มากขึ้น ส่งผลให้ในยางรีเคลมที่ผลิตได้มีส่วนของยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอยู่ในปริมาณมาก ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตได้จึงมีค่าต่ำลง

จากกราฟที่ 4.5 (ข) แสดงการเปรียบเทียบผลของภาวะการผลิตที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 คงที่หนึ่งๆ ต่อค่าร้อยละการดึงยืด พบว่า ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณของ ULTRA-PEP 96 คงที่ ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการมีน้ำมันพาราฟินในผลิตภัณฑ์ เพราะในขั้นตอนการผลิตยางรีเคลมได้มีการเติมน้ำมันพาราฟิน เข้าไปในปริมาณ 80 phr โดยน้ำมันพาราฟินจัดอยู่ในกลุ่มของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) สำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นการมีน้ำมันพาราฟินอยู่ในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการดึงยืดมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ ภาวะการผลิต นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมยางรีเคลมซึ่งผลิตที่อุณหภูมิ 140°C มีค่าสูงกว่าค่าการดึงยืด ณ จุดขาดของผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมยางรีเคลมซึ่งผลิตที่อุณหภูมิ 110°C ที่ทุกๆ ปริมาณของ ULTRA-PEP 96 ทั้งนี้เนื่องจากการมีผลของความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์ร่วมด้วย โดยการผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 140°C โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงจนสามารถกระจายเข้าไปอยู่ในเมตริกซ์ของยางธรรมชาติได้มากกว่า ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยางมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมซึ่งผลิตที่อุณหภูมิ 140°C เป็นองค์ประกอบ จึงถูกปรับปรุงให้มีค่าที่สูงกว่าได้

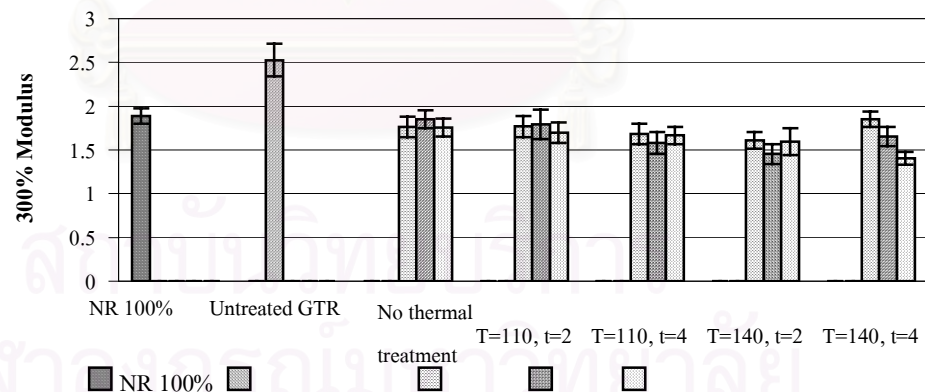
จากรูปที่ 4.5 (ค) แสดงการเปรียบเทียบผลของภาวะการผลิตที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 ต่างๆ ที่มีต่อค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% พบว่า ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าลดลงในทุกๆ ปริมาณของ ULTRA-PEP 96 และทุกๆ ภาวะการผลิต แสดงว่าผลิตภัณฑ์ยางมีความนุ่มตัวมากขึ้น มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลของน้ำมันพาราฟินเช่นเดียวกับในกรณีของค่าร้อยละการดึงยืด



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 ในปริมาณ 0.5, 1, 3 phr ที่อุณหภูมิ 110°C และ 140°C เวลา 0-4 ชั่วโมง
(ก) ค่าความแข็งแรงดึง (ข) ค่าร้อยละการดึงยืด (ค) ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300%

- ปริมาณสัดส่วนเจล (Gel fraction) ของยางรีเคลมที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ

โดยปกติแล้วในการตรวจวัดความก้าวหน้าของกระบวนการรีเคลม (Extent of reclaiming) จะวิเคราะห์โดยใช้ค่าความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวาง แต่ Tukachinsky และคณะ [27] พบว่าค่าความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวางกับค่าร้อยละเจล (% gel) มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจง คือ เมื่อร้อยละเจลเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวางก็มีค่ามากขึ้นด้วย จึงสามารถนำค่าร้อยละเจลมาวิเคราะห์ความก้าวหน้าของกระบวนการรีเคลมได้เช่นเดียวกัน

ดังนั้นจึงใช้การวิเคราะห์ปริมาณสัดส่วนเจลของยางรีเคลม มาตรวจวัดความก้าวหน้าของกระบวนการรีเคลม โดยอาศัยหลักการที่ว่า ในระหว่างการผลิตยางรีเคลม โมเลกุลของยางจะเกิดการแตกสลายเป็น โมเลกุลที่เล็กลง ดังนั้นเมื่อนำยางรีเคลมที่ผลิตได้มาสกัดด้วยตัวทำละลาย โมเลกุลที่เกิดการแตกสลายจนมีขนาดเล็กลงนี้จะถูกสกัดเข้าไปอยู่ในเฟสของตัวทำละลาย ส่งผลให้ปริมาณสัดส่วนเจลในยางรีเคลมมีปริมาณลดลง

ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์ความก้าวหน้าของกระบวนการรีเคลมไม่สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าร้อยละเจลที่หาได้โดยตรง เนื่องจากน้ำมันพาราฟินและสารรีเคลม : ULTRA-PEP 96 ซึ่งเป็นองค์ประกอบในยางรีเคลมสามารถละลายเข้าไปอยู่ในเฟสของตัวทำละลายอะซิโตนได้ ดังนั้นค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมที่หาได้จึงไม่ใช่ค่าร้อยละเจลที่แท้จริงของยางรีเคลมที่ผลิตได้ในแต่ละภาวะ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในแง่ของความแตกต่างระหว่างค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมที่ผลิตได้ที่ภาวะใดๆ กับค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมที่ผลิตได้โดยไม่มีผลจากการบำบัดด้วยความร้อน ที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 เดียวกัน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 ใดๆ การลดลงของร้อยละเจลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ

- การผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 110°C การลดลงของค่าร้อยละเจลมีน้อยมากจนแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่ 0.5 phr ของ ULTRA-PEP 96 ค่าร้อยละเจลที่ลดลงอยู่ในช่วง 0.15-0.23 ที่ 1 phr ของ ULTRA-PEP 96 ค่าร้อยละเจลที่ลดลงอยู่ในช่วง 0.24-0.33 และที่ 3 phr ของ ULTRA-PEP 96 ค่าร้อยละเจลที่ลดลงอยู่ในช่วง 0.19-0.25 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ที่อุณหภูมิ 110°C ปริมาณความร้อนที่ยางได้รับยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ยางเกิดการสลายตัวเป็น โมเลกุลที่เล็กลงได้ ดังนั้น โมเลกุลของยางจึงไม่สามารถถูกสกัดเข้าไปอยู่ในเฟสของตัวทำละลายได้ ค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมจึงแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

- การผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 140°C การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมเริ่มมีมากขึ้น โดยที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 ใดๆ การลดลงของค่าร้อยละเจล จะมีมากที่สุด เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผลิตเป็น 4 ชั่วโมง โดยที่ 0.5 phr ของ ULTRA-PEP 96 ค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมลดลง 2.24% ที่ 1 phr ของ ULTRA-PEP 96 ค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมลดลง 2.78% และที่ 3 phr ของ ULTRA-PEP 96 ค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมลดลงร้อยละ 3.01 และเมื่อเปรียบเทียบกับใน

แต่ละระดับของ ULTRA-PEP 96 พบว่า เมื่อปริมาณของ ULTRA-PEP 96 เพิ่มขึ้น การลดลงของค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมมีมากขึ้น แสดงว่าเมื่อปริมาณ ULTRA-PEP 96 มีมากขึ้น ส่งผลให้ยางมีการสลายตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงได้ดียิ่งขึ้น การสลายตัวที่มากขึ้นนี้ส่งผลให้ยางรีเคลมที่ผลิตได้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบมีค่าลดลง เมื่อผลิตยางรีเคลมที่ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และใช้ ULTRA-PEP 96 มากกว่า 0.5 phr โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัวมากขึ้นไป ส่งผลให้ได้ยางรีเคลมที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จนมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมเหล่านี้เป็นองค์ประกอบมีค่าต่ำลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละเจลของยางรีเคลมที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ

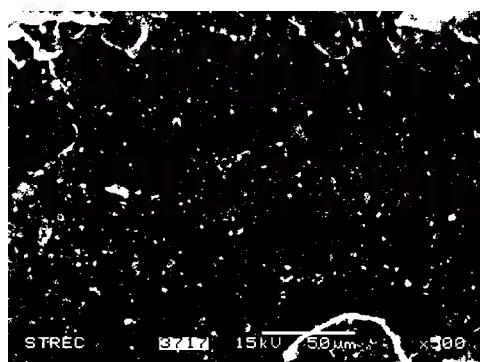
ปริมาณ ULTRA-PEP 96 (phr)	ภาวะที่ใช้ในการผลิต		สัดส่วนเจล (%)	การลดลงของ ร้อยละเจล*
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)		
	Untreated GTR		91.69	-
	RTR		84.63	-
0.5	ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน		51.80	-
0.5	110	2	51.65	0.15
0.5	110	4	51.57	0.23
0.5	140	2	50.85	0.95
0.5	140	4	49.56	2.24
1	ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน		51.88	-
1	110	2	51.64	0.24
1	110	4	51.55	0.33
1	140	2	50.79	1.09
1	140	4	49.10	2.78
3	ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน		51.53	-
3	110	2	51.34	0.19
3	110	4	51.28	0.25
3	140	2	50.27	1.26
3	140	4	48.52	3.01

*[การลดลงของร้อยละเจล] = [ร้อยละเจลที่ภาวะการผลิตใดๆ - ร้อยละเจลที่ภาวะการผลิตที่ไม่มีผลจากการบำบัดด้วยความร้อน] ที่ปริมาณ ULTRA-PEP 96 เดียวกัน

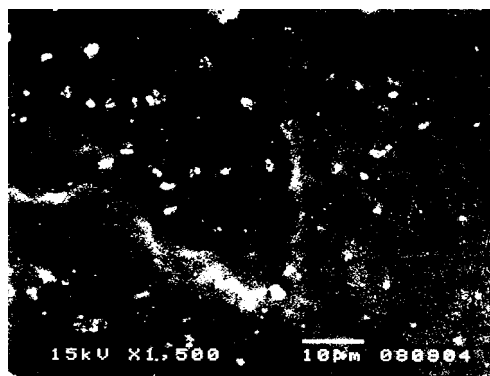
- สัณฐานวิทยา (Morphology) ของผลิตภัณฑ์ยาง

เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของยางผงและความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า โดยโครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 0.5 phr ที่ภาวะการผลิตต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7

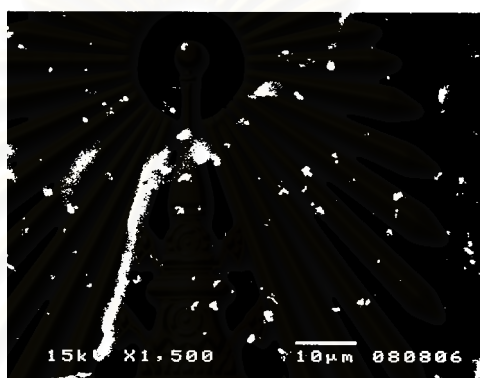
เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.7 (ก) ซึ่งแสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ 0.5 phr ของ ULTRA-PEP 96 โดยไม่มีผลของการบำบัดด้วยความร้อน และรูปที่ 4.7 (ข) ซึ่งแสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ 0.5 phr ของ ULTRA-PEP 96 ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ยังคงมีอนุภาคของยางผงกระจายอยู่ทั่วไปในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติ ความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์มีน้อย เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (รูปที่ 4.6) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล ที่พบว่า การผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 110°C ไม่สามารถทำให้ยางผงเกิดการสลายตัวเป็น โมเลกุลที่เล็กลงจนสามารถกระจายเข้าไปอยู่ในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติได้ในผลิตภัณฑ์ยางจึงมีขอบเขตวิฎภาคเกิดขึ้นมากมาย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมที่ผลิตโดยไม่มีผลของการบำบัดด้วยความร้อน และยางรีเคลมที่ผลิตที่อุณหภูมิ 110°C จึงยังคงมีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตเป็น 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 (ค) จะเห็นได้ว่า อนุภาคของยางที่กระจายอยู่ทั่วไปในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติมีขนาดเล็กลง ความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์มีมากขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตวิฎภาคในผลิตภัณฑ์ลดลง ดังนั้นค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางจึงถูกปรับปรุงให้มีความสูงขึ้นได้



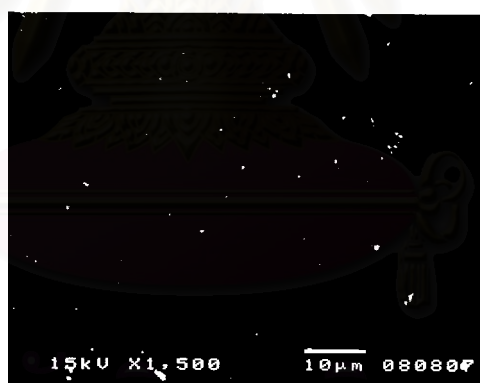
รูปที่ 4.6 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.7 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยใช้ ULTRA-PEP 96 0.5 phr (ก) ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน (ข) ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ค) ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

- ผลของการใช้มอดิไฟเออร์ในการผลิตยางรีเคลม

จากค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ได้นำเสนอแล้ว พบว่าเมื่อผลิตยางรีเคลมโดยใช้ ULTRA-PEP 96 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงที่สุด คือ 17.62 MPa แต่ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงของยางธรรมชาติ 100% ดังนั้นเพื่อปรับปรุงค่าความแข็งแรงดึงให้สูงขึ้นต้องมีการเติมมอดิไฟเออร์ร่วมด้วย มอดิไฟเออร์ที่เลือกใช้คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งเป็นมอดิไฟเออร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยางรีเคลมโดยวิธีความร้อนเชิงกล (Thermomechanical) [14] ซึ่งพบว่าเมื่อเติมเข้าไปในระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลมที่ปริมาณ 0.5-2 phr มีผลให้ผลิตภัณฑ์ยางรีเคลมมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม ในงานวิจัยนี้จึงได้อาศัยผลการทำงานร่วมกันของทั้งสารรีเคลม : ULTRA-PEP 96 และมอดิไฟเออร์ซึ่งจะเติมเข้าไปในปริมาณ 2 phr โดยผลของสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตได้ แสดงได้ตารางที่ 4.5

จากตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มเข้าไปในระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลม ค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ทั้งในส่วนของค่าความแข็งแรงดึง, ค่าร้อยละการดึงยืด และค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% แสดงว่าการผลิตยางรีเคลมโดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นมอดิไฟเออร์ ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจาก ภาวะที่ใช้ผลิตยางรีเคลมในงานวิจัยซึ่งเป็นวิธีการตัดแปรทางอุณหภูมิ ไม่มีความเหมาะสมพอที่จะทำให้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากโดยปกติมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะใช้เป็นมอดิไฟเออร์สำหรับการผลิตยางรีเคลมโดยวิธีความร้อนเชิงกลซึ่งเป็นวิธีที่มีภาวะในการผลิตที่ค่อนข้างรุนแรง คือ มีแรงเชิงกลและอุณหภูมิที่สูงอยู่ในช่วง 167-170°C ดังนั้นการนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์มาประยุกต์ใช้กับวิธีการผลิตยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงไม่มีผลทำให้ค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงขึ้นได้

ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตโดยการเติมและไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ปริมาณการเติม (phr)	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (%)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
0	17.62 ± 1.41	730.78 ± 29.71	1.85 ± 0.09
2	17.16 ± 0.99	742.07 ± 31.66	1.54 ± 0.06

4.3 ผลของปริมาณยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสมบัติด้านต่างๆ

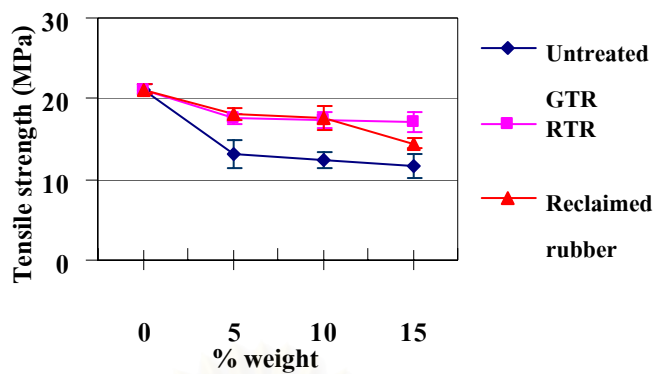
เพื่อศึกษาผลของปริมาณยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยางต่อสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อน จึงได้นำยางรีเคลมที่ผลิตได้จากภาวะที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงสุด คือ ภาวะที่ใช้ ULTRA-PEP 96 ปริมาณ 0.5 phr โดยผลิตที่ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มาผสมกับยางธรรมชาติที่ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักในผลิตภัณฑ์ยาง

ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมและยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมที่ปริมาณต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่า เมื่อผสมยางรีเคลมและยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมกับยางธรรมชาติที่ปริมาณเท่ากัน ทั้งค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม มีค่ามากกว่าผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม และเป็นเช่นนี้ในทุกๆ ปริมาณการเติม ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kim และ Park [29] ซึ่งพบว่า การนำยางผงไปผ่านกระบวนการรีเคลม แล้วจึงนำยางรีเคลมที่ได้ไปเติมในผลิตภัณฑ์ยางที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งพบว่าค่าเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมเมื่อเติมในปริมาณที่เท่ากัน และมีแนวโน้มเป็นเช่นนี้ในทุกๆ ปริมาณการเติมในช่วงร้อยละ 5 – 20 โดยน้ำหนัก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากว่า ซัลเฟอร์และสารอื่นๆ ที่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาคัลคาไนเซชันที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในยางผงถูกทำลายหรือเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลม ดังนั้นจึงไม่มีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาคัลคาไนเซชันได้ ปฏิกิริยาคัลคาไนเซชันจึงเกิดได้ช้าลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการนำยางผงไปผ่านกระบวนการรีเคลมก่อนที่จะนำไปใช้ ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการนำยางผงไปใช้โดยตรง โดยทำให้ความสามารถในการแปรรูปของผลิตภัณฑ์ยางมีมากขึ้น

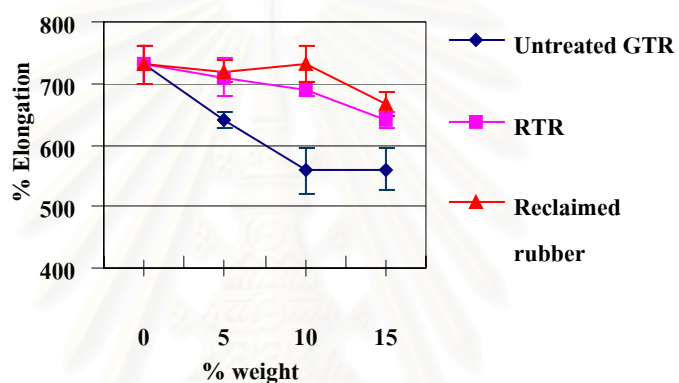
ตารางที่ 4.6 ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมและยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมที่ปริมาณต่างๆ

ประเภทของยาง	ปริมาณ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	เวลาที่ยางเริ่มเกิด การคงรูป (t_{s2} , นาที)	เวลาที่ใช้ในการ คงรูป (t_{c90} , นาที)
Untreated GTR	5	2.64	9.32
	10	2.46	8.46
	15	2.33	8.83
Reclaimed rubber	5	2.75	9.42
	10	2.58	9.33
	15	2.54	9.58

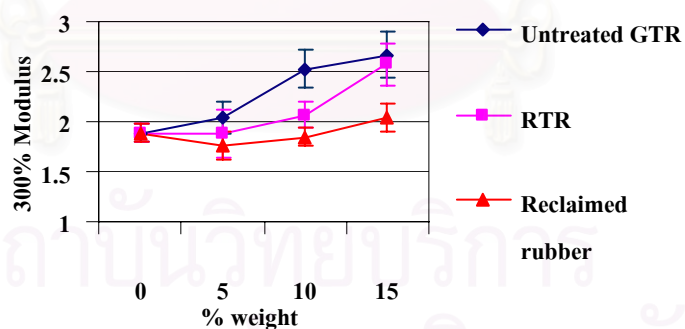
เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมกับผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม เมื่อเติมลงไปปริมาณที่เท่ากัน พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมมีค่าสูงกว่า ในขณะที่ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% มีค่าต่ำกว่าและเป็นเช่นนี้ในทุกๆ ปริมาณการเติม แสดงให้เห็นว่าการนำยางผงมาผ่านกระบวนการรีเคลมก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่ดีขึ้นได้ เพราะช่วยให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์ยางมีสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมและผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมเชิงการค้า (Reclaimed Tire Rubber, RTR) ที่ปริมาณการเติมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเติมยางรีเคลมเข้าไปร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่า ยางรีเคลมที่ผลิตได้นี้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ค่อนข้างต่ำ จนส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ได้มีค่าลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่า กระบวนการผลิตยางรีเคลมโดยวิธีอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการผลิตซึ่งมีความเฉพาะเจาะจงที่จะทำให้เกิดการแตกออกเฉพาะที่ตำแหน่งพันธะเชื่อมขวางมีน้อย การแตกสลายของพันธะใน โมเลกุลยางจึงเป็นไปแบบสุ่ม ดังนั้นพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ในสายโซ่หลักของยางมีโอกาสแตกออกจากกันได้มาก ยางรีเคลมที่ผลิตได้จากวิธีนี้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลที่ค่อนข้างต่ำ [30]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม ผลิตภัณฑ์ยางผสมยางพวงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม และผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมเชิงการค้า (RTR)
 (ก) ค่าความแข็งแรงดึง (ข) ค่าร้อยละการดึงยืด (ค) ค่ามอดุลัสการดึงยืด 300%

เพื่อต้องการตรวจวัดความสามารถในการทนทานต่อการเสียดสภาพทางความร้อนจึงได้ทดสอบสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal aging properties) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ประเภทต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.7 จากตารางที่ 4.7 พบว่า เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ผลิตภัณฑ์ทุกประเภทมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกัน คือ ค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยึดมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ลดลง ในขณะที่ค่ามอดูลัสการดึงยึด 300% มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าในระหว่างการบ่มเร่ง โมเลกุลของยางจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ยางเกิดการเสียดสภาพในลักษณะที่ทำให้ยางยิ่งแข็ง เพราะภายในโมเลกุลของยางมีความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวางมากขึ้น ส่งผลให้ยางมีความยืดหยุ่นลดลง จากตารางที่ 4.7 ยังพบว่า เมื่อมียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ยาง การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทั้งค่าความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการดึงยึดและค่ามอดูลัสการดึงยึด 300% มีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ 100% และเมื่อปริมาณยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยึดมีแนวโน้มที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณยางธรรมชาติลดลง ซึ่งยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่อิมตัว คือ มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็ว ดังนั้นการมียางธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ยางน้อยลง ผลิตภัณฑ์ยางจึงมีความทนทานต่อการเสียดสภาพได้ดีขึ้น หรืออาจจะเป็นเพราะสมบัติเฉพาะของยางรีเคลมที่พบว่า ยางรีเคลมมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูง เนื่องจากยาง รีเคลมผ่านภาวะการกระทำต่างๆ ที่รุนแรง ทั้งความร้อน แรงเชิงกลและความดัน จนทำให้โมเลกุลของยางมีเสถียรภาพจนยากที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป [15, 17]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ผลิตภัณฑ์ยาง	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ค่าความแข็งแรงดึง	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ค่าร้อยละการดึงยืด	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300%
ยางธรรมชาติ 100%	-14.82	-10.98	34.63
ผลิตภัณฑ์ยางผสม ยางรีเคลม 5%	-11.11	-9.06	28.14
ผลิตภัณฑ์ยางผสม ยางรีเคลม 10%	-6.29	-7.09	31.11
ผลิตภัณฑ์ยางผสม ยางรีเคลม 15%	-4.81	-7.90	31.42

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมกับผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมไปใช้ในงานด้านต่างๆ จึงต้องนำค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักมาเปรียบเทียบกับค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

จากตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาจากค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการดึงยืดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้ในงานทุกประเภท แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สามารถนำมาใช้ได้ในงานบางประเภทเท่านั้น โดยสามารถนำไปใช้เป็นอย่างพื้นรองเท้าชั้นคุณภาพที่ 1 และ 2, ยางขอบประตูรถยนต์และยางหุ้มขอบกระจกรถยนต์ ชนิด 60, 70 IRHD และยางในรถจักรยานยนต์ แต่เนื่องจากยังมีสมบัติอื่นๆ ที่เป็นข้อกำหนดอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีผลิตภัณฑ์บางประเภทที่ต้องมีการทดสอบสมบัติที่เฉพาะเจาะจง เช่น แผ่นยางกันซึม ต้องมีการทดสอบสมบัติการดูดน้ำ ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมสามารถนำไปใช้งานได้จริง ต้องมีการทดสอบสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติมอีกครั้งหนึ่ง ดังรายละเอียดในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมกับผลิตภัณฑ์ยางตาม
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [31-37]

ประเภทของผลิตภัณฑ์ยาง	ชั้นคุณภาพ/ชนิด	ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (% Elongation)
ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ 100%	-	21.12	731.12
ผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมยางรีเคลม 5% โดยน้ำหนัก	-	18.10	720.18
ผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมยางรีเคลม 10% โดยน้ำหนัก	-	17.62	730.78
ผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมยางรีเคลม 15% โดยน้ำหนัก	-	14.49	667.05
ยางพื้นรองเท้า	ชั้นคุณภาพที่ 1	7.5	175
	ชั้นคุณภาพที่ 2	6.5	150
แผ่นยางรองสะพาน	ชนิด 50 IRHD	17	450
	ชนิด 60 IRHD	17	400
	ชนิด 70 IRHD	17	300
ยางขอบประตูรถยนต์	ชนิด 60 IRHD	7	300
	ชนิด 70 IRHD	7	250
ยางหุ้มขอบกระจกรถยนต์	ชนิด 60 IRHD	7	300
	ชนิด 70 IRHD	7	200
แผ่นยางกันซึม	-	17.5	450
ยางในรถยนต์	ชนิดทำจากยางธรรมชาติหรือมียางธรรมชาติผสมอยู่เป็นส่วนใหญ่	15	500
ยางในรถจักรยานยนต์	-	11.77	500

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาหาความเป็นไปได้ในการนำเศษยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ โดยการนำมาผลิตเป็นยางรีเคลม ซึ่งวิธีการที่นำมาใช้ในการผลิต คือ วิธีตัดแปรทางอุณหภูมิ โดยสารรีเคลมที่เลือกใช้คือ ULTRA-PEP 96 ภาวะที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลม คือ ที่อุณหภูมิ 110 และ 140°C ที่ระยะเวลาในการผลิต 2 และ 4 ชั่วโมง ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- เมื่อปริมาณยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) มีแนวโน้มที่จะลดลง และสมบัติเชิงกลที่ด้อยลง
- สำหรับในขั้นตอนการผลิตยางรีเคลมพบว่า เมื่อผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 110°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางไม่สามารถปรับปรุงให้มีความสูงขึ้นได้ แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือเพิ่มปริมาณสารรีเคลม แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผลิตเป็น 140°C ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางเริ่มมีความสูงขึ้น โดยที่ปริมาณสารรีเคลมเท่ากับ 0.5 และ 1 phr ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยาง เพิ่มตามระยะเวลาในการให้ความร้อน ในขณะที่เมื่อปริมาณสารรีเคลมเท่ากับ 3 phr การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางมีค่าลดลง และพบว่า ภาวะการผลิตที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางมีค่ามากที่สุด คือ ใช้ปริมาณสารรีเคลมเป็น 0.5 phr และผลิตที่ 140°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในส่วนของค่าร้อยละการดึงยึดพบว่า ค่าร้อยละการดึงยึดของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตได้จากทุกๆ ภาวะการผลิต สามารถปรับปรุงให้มีความสูงขึ้นได้ เมื่อผลิตยางรีเคลมที่อุณหภูมิ 140°C ค่าร้อยละการดึงยึดถูกปรับปรุงให้มีความสูงขึ้นได้มากกว่าการผลิตที่ 110°C หรือการผลิตโดยไม่มีผลจากการบำบัดด้วยความร้อน ในส่วนของค่ามอดูลัสการดึงยึด 300% พบว่าผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ได้จากทุกๆ ภาวะการผลิต มีค่าต่ำกว่าค่ามอดูลัสการดึงยึด 300% ของทั้งผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ 100% และผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม แต่ผลจากภาวะการผลิตไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสการดึงยึด 300% ของผลิตภัณฑ์ยาง
- ที่ปริมาณการผสมยางรีเคลมที่เท่ากัน ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม น้อยกว่าค่าของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม เมื่อเติมยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยางร้อยละ 5 และ 10

โดยน้ำหนัก สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางยังคงมีค่าสูงอยู่ แต่เมื่อปริมาณการเติมเพิ่มเป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สมบัติเชิงกลมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

- ในส่วนของสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า ผลิตภัณฑ์ยางที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบมีความทนทานต่อการเสียดสภาพทางความร้อน ได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ 100% และเมื่อปริมาณยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ยางมีแนวโน้มที่จะทนทานต่อการเสียดสภาพได้ดีขึ้น
- เมื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ปริมาณการเติมต่างๆ กับค่าของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่า ผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมสามารถนำไปใช้ในงานได้หลายประเภท แต่ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต้องมีการนำไปทดสอบสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติมอีกครั้ง

ข้อเสนอแนะ

1. พยายามปรับปรุงกระบวนการผลิตยางรีเคลมให้เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง เช่น มีการนำเครื่องรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) มาใช้ในกระบวนการผลิต
2. พยายามปรับปรุงวิธีการผลิตยางรีเคลมให้มีความเฉพาะเจาะจงของการแตกออกของพันธะในตำแหน่งของการเชื่อมขวางเท่านั้น เพื่อให้ได้ยางรีเคลมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น ในกระบวนการผลิตมีการอาศัยผลของแรงเชิงกลร่วมด้วย
3. ศึกษาผลของการลดปริมาณน้ำมันพาราฟินที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมต่อความสามารถในการผสมยางรีเคลมเข้ากับยางธรรมชาติ และสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม
4. ในการผสมยางรีเคลมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ยางในปริมาณมากกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถผสมได้โดยใช้เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง เพราะทำให้ยางเหนียวติดลูกกลิ้ง ดังนั้นจึงต้องใช้เครื่องมืออื่นในการผสม เช่น เครื่องผสมภายในแบบบานบุรี

รายการอ้างอิง

1. Yang, M. Scrap tire in different countries Earth-Link Technology Enterprises Ltd. Available from: <http://www.earth-link.com.hk/market 1-c.htm> [2004, Dec 15].
2. Barlow, F.W., Rubber Compounding : Principle, Materials, and Techniques. 2nd ed. New York: Marcel Dekker., 1993.
3. Roberts, A.D., Natural Rubber Science and Technology. New York: Oxford University Press, 1988.
4. อธิพิณ แจ่มชัด., เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการยาง, คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
5. Jeff, K. Equipments and Facilities Wenzhou Sanhuan Rubber & Plastic Products Inc. Available from: shxs.en.alibaba.com/Column/50010029.html [2002, Jan 10].
6. Wong, A. Rubber machinery index Rimpex Rubber Import & Export Co.Ltd. Available from: www.Rubberimpex.com/images/RubberMachinery/SC. [2001, Aug 28].
7. พรพรรณ นิธิอุทัย., สารเคมีสำหรับยาง., คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528.
8. Mark, J.E., Erman, B, and Eirich, F.R., Science and Technology of rubber. 2nded. Sandiego: Academic Press, 1994.
9. Mackillop, D.A., and Myhre, M., Rubber recycling, Rubber Chemistry and Technology, 75 (2002): 429-474.
10. Howe-Grant, M., Encyclopedia of chemical technology . vol 21. 4thed. Wiley-interscience Publication, 1998.
11. Fang, Y., Zhan, M., and Wang, Y., The status of recycling of waste rubber, Material and Design 22 (2001): 123-127.
12. Fukumori, K., Mutsushita, M., Okamoto, H., Sato, N., Suzuki, Y., and Takeuchi, K., Recycling technology of tire rubber, ISAE Review, 23 (2002): 259-264.
13. Voronov, V.M., Usachev, S.V., and Sergeeva, N.L., Investigation of devulcanisation of vulcanisates based on butyl rubber in a plasticizer, International Polymer Science and Technology, 23 (1996): 51-53.
14. Makarov, V.M., and Drozdovski, V.F., Reprocessing of tyres and rubber waste: Recycling from the rubber products industry. New York: Ellis Herwood, 1991.

15. Adhikari, B., De, D., and Maiti, S., Reclamation and recycling of waste rubber, Progress in polymer science, 25 (2000): 909-948.
16. Adhikari, B., De, D., and Maiti, S., Reclaiming of Rubber by a Renewable Resource Material (RRM). II. Comparative Evaluation of Reclaiming Process of NR Vulcanizate by RRM and Diallyl Disulfide, Journal of Applied Polymer Science, 73 (1999): 2951-2958.
17. Morton, M., Rubber Technology. 2nd ed. New York: Van Nostran Reinhold Company, 1987.
18. Koda, T., and Hara, M., US Patent, 5,556,888 (1996).
19. Yap, C.K., US Patent, 6,047,911 (2000).
20. Mouri, M., US Patent, 6,133,413 (2000).
21. Kovalak, K., US Patent 6,548,560 (2003).
22. Grigoryeva, O., Fainleib, A., Starostenko, O., Danilenko, I., Kozak, N., and Dudarenko, G., Ground tire rubber reclamation: virgin rubber/ reclaimed GTR (re) vulcanizates, Rubber Chemistry and Technology, 76 (2003): 131-146.
23. Bristow, G.M., The use of Sol-Gel analysis to Estimate chain scission during vulcanization. Part I. Peroxide vulcanization of natural rubber, Journal of Applied Polymer Science, 7 (1963): 1023-1030.
24. ASTM D 572-88 Standard Test method for Rubber-Deterioration by Heat and Oxygen. Annual Book of ASTM Standards Vol.09.01.
25. Ceni, J., De, P.P., Bhowmick, A.K., and De, S.K., Recycling of EPDM waste I. Effect of Ground EPDM Vulcanizate on Properties of EPDM Rubber, Journal of Applied Polymer Science, 82 (2001): 3293-3303.
26. Adhikari, B., De, D., and Maiti, S., Reclaiming of Rubber by a Renewable Resource Material (RRM). III. Evaluation of Properties of NR Reclaim, Journal of Applied Polymer Science, 75 (2000): 1493-1502.
27. Tukachinsky, A., Schworm, D., and Isayev, A.I., Devulcanization of waste tire rubber by powerful ultrasound, Rubber Chemistry and Technology, 69 (1995): 92-103.
28. Cavalieri, F., Padella, F., and Cataldo, F., Mechanochemical Surface Activation of Ground Tire Rubber by Solid-State Devulcanization and Grafting, Journal of Applied Polymer Science, 90 (2003): 1631-1638.
29. Kim, J.K., Park, J.W., The Biological and Chemical Desulfurization of Crumb Rubber for the Rubber Compounding, Journal of Applied Polymer Science, 72 (1999): 1543-1549.

30. Dierkes, I.W., Solution to the rubber waste problem incorporating the use of recycled rubber, Rubber World, 214 (1996): 25-31.
31. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 749-2531, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531.
32. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 951-2533, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2533.
33. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 800-2531, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531.
34. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 697-2530, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2530.
35. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1135-2536, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2536.
36. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 651-2535, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535.
37. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 683-2530, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2530.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ก-1 สมบัติของ ULTRA-PEP 96

Peptizing agent for natural rubber

Composition : Blend of organo metal complexes as catalysts, fatty acid derivatives and peptizing agents

PROPERTIES	TYPICAL
Apperance	Blue Pastilles
Specific Gravity (g/cm ³)	1.26
Dropping Point (° C)	50-60
Ash Content (% max)	19
Physiological behavior	Refer to Material safe Data Sheet
Storage stability	At least 2 years under normal conditions
Packing	25 kg Polyethylene bags

Recommendations for application :

- ULTRA-PEP 96 is a combined peptizing and processing additive for natural rubber.
- ULTRA-PEP 96 is easily dispersed in rubber due to its dispersing agent present.
- ULTRA-PEP 96 is extremely active and therefore can be used at low dosage levels.
- It's peptizing action starts at 90°C but reaches an optimum at 140°C.

ก-2 สมบัติของยางรีเคลมเชิงการค้า (RTR, UCD-103)

1. Chemical analytical data

- Acetone extract (%) 15 ± 3
- Ash (%) 6 ± 3
- Carbon black (%) 25 ± 3
- Moisture : less than (%) 1
- Rubber hydrocarbon (%) (By difference) 50 ± 3

2. Physical properties of the vulcanized reclaim

- Specific gravity (at 25^oC) 1.14 ± 0.02
- Mooney viscosity (ML 1' + 4' at 100^oC) 60 ± 15
- Hardness (Shore A) 55 ± 3
- Tensile strength - kg/cm² 65 Min
 - psi 920 Min
 - MPa 6.38 Min
- Elongation (%) 250 Min

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณ

1. ผลของปริมาณยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) ในผลิตภัณฑ์ยาง

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลของกราฟการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม

ปริมาณยางผง (%โดยน้ำหนัก)	Max Torq (in.lbs.)	Min Torq (in.lbs.)	t_{s1}	t_{s2}	t_{c10}	t_{c50}	t_{c90}
0	60.79	3.27	2.29	2.92	3.01	4.25	9.05
20	58.86	2.9	2.13	2.33	2.71	4.58	8.53
40	80.64	3.42	1.92	2.08	2.46	3.83	8.42
60	86.88	4.24	1.67	1.83	2.17	3.42	7.75

ตารางที่ ข-2 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางผงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีเคลม

ปริมาณยางผง (%โดยน้ำหนัก)	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
0	1	20.231	681.104	2.065
	2	20.811	695.829	1.909
	3	21.780	721.293	1.856
	4	21.410	753.993	1.898
	5	21.132	743.524	1.857
	เฉลี่ย	21.118	731.116	1.888
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.591	30.839	0.086
20	1	10.666	486.496	2.934
	2	11.699	475.482	2.670
	3	11.928	435.167	3.793
	4	10.187	487.468	3.004
	5	12.069	472.168	3.202
	เฉลี่ย	11.431	464.935	3.333
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.834	21.308	0.421
40	1	13.266	424.013	6.475
	2	11.350	391.397	6.164
	3	9.868	399.719	5.410
	4	11.527	375.018	7.280
	5	10.658	431.293	4.908
	เฉลี่ย	11.179	399.236	6.117
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.262	23.249	0.925

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

ปริมาณยางผง (%โดยน้ำหนัก)	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
60	1	10.228	345.116	7.995
	2	9.471	320.660	8.368
	3	9.055	300.815	9.002
	4	9.239	319.805	8.264
	5	9.411	326.595	8.062
	เฉลี่ย	9.374	322.353	8.231
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.448	15.883	0.400

2. ผลของปริมาณ ULTRA-PEP 96 และภาวะที่ใช้ในการผลิตยางรีเคลมต่อสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ยางผสม

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลของกราฟการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ

ภาวะการผลิต	Max Torq (in.lbs.)	Min Torq (in.lbs.)	t _{s1}	t _{s2}	t _{c10}	t _{c50}	t _{c90}
ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา							
0.5/-/-	54.4	1.41	2.46	2.67	3.00	4.54	8.75
0.5/110/2	51.73	1.56	2.33	2.54	2.79	4.46	8.79
0.5/110/4	53.96	1.11	2.42	2.54	2.83	4.46	8.96
0.5/140/2	46.23	0.82	2.63	2.79	3.00	4.50	8.00
0.5/140/4	54.25	1.26	2.38	2.58	2.92	4.83	9.33
0.5/140/4 + 2 phr Maleic anhydride	44.96	1.19	2.71	2.92	3.25	5.42	9.96
1/-/-	53.21	1.86	2.38	2.63	2.88	4.42	9.21
1/110/2	59.75	5.50	2.71	2.83	3.13	4.88	9.33
1/110/4	55.00	5.20	2.29	2.46	2.67	4.13	8.09
1/140/2	50.76	5.05	2.29	2.38	2.58	3.92	8.01
1/140/4	46.82	0.97	2.46	2.63	2.83	4.5	8.03
3/-/-	54.70	1.11	2.71	2.96	3.29	5.00	9.75
3/110/2	53.81	1.64	2.50	2.71	2.96	4.58	9.00
3/110/4	50.91	1.71	2.38	2.54	2.79	4.46	8.38
3/140/2	52.17	1.26	2.63	2.83	3.08	4.75	8.46
3/140/4	51.35	1.04	2.33	2.54	2.79	4.46	8.00

ตารางที่ ข-4 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลมซึ่งผลิตได้จากภาวะต่างๆ

ภาวะการผลิต	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา				
Untreated GTR 10%	1	12.41	604.594	2.56
	2	13.115	555.421	2.619
	3	11.972	515.389	2.399
	4	10.956	587.417	2.745
	5	13.512	597.337	2.892
เฉลี่ย		12.499	558.468	2.526
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.002	36.816	0.187
0.5/-/-	1	9.436	630.982	1.517
	2	9.829	615.409	1.727
	3	11.499	631.121	1.815
	4	11.468	643.642	1.779
	5	9.916	636.428	1.693
เฉลี่ย		10.961	637.064	1.762
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.979	10.381	0.116
0.5/110/2	1	10.866	637.533	1.736
	2	12.415	688.418	1.850
	3	11.042	627.537	1.934
	4	12.227	663.173	1.753
	5	11.783	702.240	1.619
เฉลี่ย		11.684	664.317	1.768
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.693	31.973	0.120
0.5/110/4	1	10.124	708.958	1.492
	2	11.544	663.536	1.620
	3	11.161	679.767	1.603
	4	10.559	646.224	1.818
	5	11.261	675.580	1.633
เฉลี่ย		10.994	667.190	1.685
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.576	23.106	0.117

ตารางที่ ข-4 (ต่อ)

ภาวะการผลิต ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
0.5/140/2	1	11.971	804.188	1.473
	2	12.097	710.397	1.556
	3	12.607	752.390	1.583
	4	13.636	776.196	1.692
	5	13.958	695.238	1.699
เฉลี่ย		12.780	719.342	1.610
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.901	45.190	0.096
0.5/140/4	1	17.113	741.283	1.775
	2	18.117	737.435	1.841
	3	14.874	667.527	2.001
	4	18.448	725.062	1.854
	5	17.632	713.628	1.932
เฉลี่ย		17.621	730.782	1.849
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.414	29.712	0.087
0.5/140/4+2 phr Maleic anhydride	1	17.359	781.12	1.599
	2	17.848	750.369	1.567
	3	16.954	715.094	1.485
	4	15.245	699.987	1.444
	5	17.158	730.008	1.533
เฉลี่ย		17.157	742.074	1.539
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.990	31.662	0.062
1/-/-	1	11.254	605.749	1.704
	2	10.959	615.945	1.955
	3	10.445	608.975	1.897
	4	12.115	620.974	1.752
	5	10.195	624.398	1.875
เฉลี่ย		10.886	610.223	1.852
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.753	7.851	0.105

ตารางที่ ข-4

ภาวะการผลิต ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
1/110/2	1	10.542	625.915	1.751
	2	11.778	605.397	1.844
	3	11.360	633.297	1.447
	4	11.718	610.959	1.783
	5	11.239	630.113	1.860
เฉลี่ย		11.439	624.790	1.793
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.495	12.274	0.168
1/110/4	1	11.172	635.495	1.591
	2	10.612	657.111	1.596
	3	10.905	658.291	1.552
	4	11.251	687.874	1.297
	5	9.315	648.312	1.527
เฉลี่ย		10.896	650.299	1.580
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.788	19.313	0.124
1/140/2	1	10.687	664.987	1.337
	2	14.026	703.323	1.542
	3	12.947	705.176	1.430
	4	11.320	696.916	1.389
	5	14.321	710.339	1.231
เฉลี่ย		12.764	701.805	1.454
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.612	18.069	0.115
1/140/4	1	14.136	749.514	1.694
	2	14.117	691.159	1.558
	3	15.129	743.312	1.423
	4	14.518	748.184	1.671
	5	14.743	750.976	1.594
เฉลี่ย		14.466	749.558	1.653
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.427	25.581	0.108

ตาราง ข-4 (ต่อ)

ภาวะการผลิต ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
3/-/-	1	10.812	656.001	1.712
	2	11.861	657.172	1.760
	3	14.090	675.759	1.549
	4	10.953	668.247	1.787
	5	9.372	600.576	1.798
เฉลี่ย		11.209	660.473	1.753
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.740	29.642	0.102
3/110/2	1	10.972	659.115	1.587
	2	12.631	680.123	1.487
	3	11.124	670.459	1.745
	4	11.162	654.146	1.768
	5	10.587	610.654	1.635
เฉลี่ย		11.086	661.240	1.700
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.781	26.713	0.116
3/110/4	1	10.562	669.462	1.594
	2	10.779	650.999	1.61
	3	9.660	706.003	1.794
	4	11.987	704.963	1.623
	5	9.014	660.852	1.789
เฉลี่ย		10.334	675.488	1.666
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.136	25.525	0.101
3/140/2	1	13.883	710.230	1.788
	2	14.433	739.655	1.356
	3	12.367	699.321	1.598
	4	15.638	734.182	1.615
	5	14.303	698.741	1.643
เฉลี่ย		14.206	716.209	1.595
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.179	19.356	0.156

ตารางที่ ข-4 (ต่อ)

ภาวะการผลิต	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง	ค่าร้อยละการดึงยืด	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300%
ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา		(MPa)	(ร้อยละ)	(MPa)
3/140/4	1	12.111	715.698	1.398
	2	12.582	724.500	1.432
	3	15.555	732.561	1.402
	4	13.753	768.729	1.296
	5	13.886	747.920	1.488
เฉลี่ย		13.407	747.050	1.405
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.340	20.927	0.070

3. ปริมาณสัดส่วนเจล (Gel fraction) ของยางรีไซเคิลที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ

ตารางที่ ข-5 ร้อยละเจลของยางรีไซเคิลที่ผลิตได้ที่ภาวะต่างๆ

ภาวะการผลิต	ครั้งที่	น้ำหนักสารเริ่มต้น	น้ำหนักสารหลังสกัด	ร้อยละเจล
ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา		(กรัม)	(กรัม)	
Untreated GTR	1	1.0045	0.9137	90.959
	2	0.9998	0.9177	91.787
	3	1.0589	0.9775	92.315
เฉลี่ย				91.687
0.5/-/-	1	0.9997	0.5133	51.345
	2	1.0012	0.5162	51.556
	3	0.9999	0.5251	52.511
เฉลี่ย				51.804
0.5/110/2	1	1.0078	0.5243	52.029
	2	1.0047	0.5161	51.365
	3	0.9987	0.5149	51.559
เฉลี่ย				51.651
0.5/110/4	1	1.0023	0.5174	51.622
	2	1.0145	0.5209	51.349
	3	0.9995	0.5173	51.751
เฉลี่ย				51.574
0.5/140/2	1	1.0056	0.5099	50.708
	2	1.0034	0.5116	50.991
	3	0.9987	0.5079	50.857
เฉลี่ย				50.852

ตารางที่ ข-5 (ต่อ)

ภาวะการผลิต ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา	ครั้งที่	น้ำหนักสารเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสารหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละเจด
0.5/140/4	1	1.0056	0.4972	49.443
	2	1.0095	0.5012	49.651
	3	1.0012	0.4965	49.595
เฉลี่ย				49.563
1/-/-	1	1.0028	0.5284	52.692
	2	1.0056	0.5226	51.968
	3	1.0111	0.5156	50.992
เฉลี่ย				51.884
1/110/2	1	1.0056	0.5162	51.333
	2	0.9998	0.5199	51.998
	3	1.0027	0.5173	51.595
เฉลี่ย				51.642
1/110/4	1	1.0056	0.5180	51.51
	2	1.0014	0.5182	51.745
	3	0.9875	0.5076	51.398
เฉลี่ย				51.551
1/140/2	1	1.0045	0.5110	50.874
	2	1.0009	0.5060	50.555
	3	0.9987	0.5088	50.947
เฉลี่ย				50.792
1/140/4	1	0.9996	0.4884	48.855
	2	1.0052	0.4961	49.356
	3	1.0046	0.4932	49.098
เฉลี่ย				49.103
3/-/-	1	0.9985	0.5147	51.543
	2	1.0021	0.5180	51.687
	3	1.0015	0.5145	51.369
เฉลี่ย				51.533
3/110/2	1	1.0087	0.5168	51.23
	2	1.0052	0.5149	51.225
	3	1.0047	0.5181	51.568
เฉลี่ย				51.341

ตารางที่ ข-5 (ต่อ)

ภาวะการผลิต	ครั้งที่	น้ำหนักสารเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักสารหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละเจด
ปริมาณ ULTRA-PEP96/อุณหภูมิ/เวลา				
3/110/4	1	1.0059	0.5161	51.312
	2	0.9998	0.5105	51.059
	3	1.0064	0.5181	51.478
เฉลี่ย				51.283
3/140/2	1	1.0036	0.5057	50.391
	2	1.0011	0.5039	50.336
	3	0.9996	0.5007	50.095
เฉลี่ย				50.274
3/140/4	1	1.0058	0.4888	48.596
	2	0.9995	0.4883	48.859
	3	1.0021	0.4822	48.114
เฉลี่ย				48.523

4. ผลของปริมาณยางรีเคลมในผลิตภัณฑ์ยาง

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลของกราฟการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม (Reclaimed rubber), ยางรีเคลมเชิงการค้า (RTR) และยางผงที่ไม่ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) ที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

ประเภท/ปริมาณของยาง (%โดยน้ำหนัก)	Max Torq (in.lbs.)	Min Torq (in.lbs.)	t_{s1}	t_{s2}	t_{c10}	t_{c50}	t_{c90}
Untreated GTR 5%	60.79	1.78	2.46	2.64	3.04	4.79	9.32
Untreated GTR 10%	64.44	2.01	2.21	2.46	2.75	4.17	8.46
Untreated GTR 15%	65.7	1.86	2.29	2.33	2.79	4.42	8.83
Reclaimed rubber 5%	52.17	1.19	2.54	2.75	3.04	4.88	9.42
Reclaimed rubber 10%	54.25	1.26	2.38	2.58	2.92	4.83	9.33
Reclaimed rubber 15%	47.71	1.34	2.29	2.54	2.92	5.00	9.58
RTR 5%	60.27	1.56	2.38	2.58	2.88	4.50	8.83
RTR 10%	63.10	0.74	2.50	2.71	2.96	4.42	8.17
RTR 15%	61.83	1.49	2.25	2.46	2.83	4.46	8.75

ตารางที่ ข-7 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีเคลม (Reclaimed rubber), ยางรีเคลมเชิงการค้า (RTR) และยางพที่ไม่ผ่านกระบวนการรีเคลม (Untreated GTR) ที่ร้อยละ 5,10 และ 15 โดยน้ำหนัก

ประเภท/ปริมาณของยาง (%โดยน้ำหนัก)	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
Untreated GTR 5%	1	12.816	638.529	2.054
	2	14.418	632.453	2.245
	3	16.182	665.336	2.174
	4	12.418	652.737	1.820
	5	12.003	650.115	2.112
เฉลี่ย		13.217	641.240	2.040
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.725	12.833	0.162
Untreated GTR 10%	1	12.41	604.594	2.56
	2	13.115	555.421	2.619
	3	11.972	515.389	2.399
	4	10.956	587.417	2.745
	5	13.512	597.337	2.892
เฉลี่ย		12.499	558.468	2.526
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.002	36.816	0.187
Untreated GTR 15%	1	8.778	503.814	2.762
	2	12.417	575.139	2.631
	3	10.727	531.877	2.881
	4	11.739	573.811	2.482
	5	10.136	581.096	2.304
เฉลี่ย		11.628	560.276	2.665
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.416	33.830	0.228
Reclaimed rubber 5%	1	16.828	747.038	1.505
	2	18.740	718.051	1.833
	3	17.883	736.790	1.678
	4	18.186	718.645	1.803
	5	18.223	705.116	1.807
เฉลี่ย		18.097	720.184	1.762
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.710	16.648	0.137

ตารางที่ ข-7 (ต่อ)

ประเภท/ปริมาณของยาง (%โดยน้ำหนัก)	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
Reclaimed rubber 10%	1	17.113	741.283	1.775
	2	18.117	737.435	1.841
	3	14.874	667.527	2.001
	4	18.448	725.062	1.854
	5	17.632	713.628	1.932
เฉลี่ย		17.621	730.782	1.849
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.414	29.712	0.087
Reclaimed rubber 15%	1	13.574	694.382	1.825
	2	14.062	650.922	2.122
	3	14.548	661.744	1.869
	4	14.856	688.480	2.114
	5	15.165	652.756	1.889
เฉลี่ย		14.489	667.049	2.035
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.633	20.402	0.143
RTR 5%	1	17.739	674.872	2.127
	2	16.539	688.435	2.006
	3	18.145	693.471	1.982
	4	17.326	754.032	1.519
	5	17.485	699.643	1.987
เฉลี่ย		17.517	709.516	1.878
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.594	30.436	0.234
RTR 10%	1	16.091	713.290	1.882
	2	18.552	693.586	2.163
	3	16.329	692.086	1.903
	4	17.242	685.358	2.135
	5	16.206	684.806	2.116
เฉลี่ย		17.375	690.343	2.067
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.038	11.565	0.136

ตารางที่ ข-7 (ต่อ)

ประเภท/ปริมาณของยาง (%โดยน้ำหนัก)	ชั้นที่	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (ร้อยละ)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
RTR 15%	1	14.941	634.418	2.331
	2	17.855	622.758	2.784
	3	17.665	653.540	2.537
	4	16.208	645.632	2.386
	5	17.596	624.180	2.790
เฉลี่ย		17.156	641.117	2.571
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.254	13.397	0.215

5. ผลของปริมาณยางรีไซเคิลในผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal aging properties)

ตารางที่ ข-8 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางผสมยางรีไซเคิล (Reclaimed rubber) ที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักและผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ 100% หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ประเภท/ปริมาณยาง (% โดยน้ำหนัก)	ชั้นที่	สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน		
		ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (%)	ค่ามอดูลัสการดึงยืด 300% (MPa)
NR 100%	1	17.457	670.591	2.713
	2	18.312	652.795	2.692
	3	18.195	629.11	2.221
	4	17.112	654.984	2.289
	5	18.548	670.987	2.117
เฉลี่ย		17.988	650.832	2.542
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.610	17.113	0.277
Reclaimed rubber 5%	1	16.096	630.411	2.051
	2	15.948	665.022	2.328
	3	16.217	670.122	2.395
	4	16.558	666.154	2.114
	5	14.321	610.223	2.578
เฉลี่ย		16.087	655.185	2.258
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.872	26.667	0.214

ตารางที่ ข-8 (ต่อ)

ประเภท/ปริมาณยาง % โดยน้ำหนัก	ชั้นที่	สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน		
		ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการดึงยืด (%)	ค่ามอดุลัสการดึงยืด 300% (MPa)
Reclaimed rubber 10%	1	15.388	656.429	2.559
	2	16.989	689.005	2.195
	3	17.159	691.452	2.518
	4	17.569	687.444	2.274
	5	15.119	640.963	2.793
เฉลี่ย		16.512	678.962	2.424
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.112	22.947	0.239
Reclaimed rubber 15%	1	15.121	632.938	2.765
	2	13.711	597.995	2.766
	3	10.238	553.952	2.85
	4	12.544	612.036	2.493
	5	15.546	615.879	2.559
เฉลี่ย		13.792	614.323	2.674
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		2.144	29.89	0.152

ตัวอย่างการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงดึงของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ (NR) 100%

$$\text{คำนวณจากสมการ } P = [(A-O)/O] \times 100 \dots\dots(3.2)$$

แทนค่าตามสูตร A = ค่าความแข็งแรงดึงหลังการบ่มเร่งเท่ากับ 17.988 MPa (ข้อมูลจากตารางที่ ข-8)

O = ค่าความแข็งแรงดึงก่อนการบ่มเร่งเท่ากับ 21.118 MPa (ข้อมูลจากตารางที่ ข-2)

$$P = [(17.988-21.118)/21.118] \times 100$$

$$P = -14.82$$

จากการคำนวณจะได้ว่า หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ (NR) 100% มีค่าความแข็งแรงดึงลดลง 14.82%

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางพื้นรองเท้า (Standard for Rubber Soles) [31]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบ
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	
ความหนาแน่น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่เกิน	1.35	1.45	ISO 2781 method A
ความแข็ง IRHD ไม่น้อยกว่า	85	90	ISO 48 ที่อุณหภูมิ 27°C ตัดแผ่นตัวอย่างหนา 6.0 มม. ขนาด 50x50 มม. โดยอ่านค่าความแข็ง 3 ตำแหน่ง บนชั้นทดสอบ
ความต้านแรงดึงขาดในแต่ละแนว* เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	7.5	6.5	ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์หนา 2.0 mm. จำนวน 3 ชิ้น ทดสอบตาม ISO 37 ที่อุณหภูมิ 27°C
การยืดที่จุดขาดในแต่ละแนว ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	175	150	ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์จำนวน 3 ชิ้น ISO 37 ที่อุณหภูมิ 27°C
การยืดที่จุดขาดภายหลังการบ่มเร่ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	145	120	ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์จำนวน 3 ชิ้น อบที่อุณหภูมิ 70°C นาน 168 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็น แล้วทดสอบความยืดที่จุดขาด
ความทนทานต่อการพียงอในแต่ละแนวแกน รอบ ไม่น้อยกว่า	100 000	50 000	ตัดแผ่นตัวอย่างหนา 2.5 มม. ขนาด 25x150 มม. จำนวน 3 ชิ้น ทดสอบตาม ISO 6907 ที่อุณหภูมิ 27°C
การสึกหรอ ลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่เกิน	2	2	ใช้เครื่องมือเทเบอร์ อะเบอร์ เซอร์ พร้อมล้อขัด H-18 ใช้น้ำหนักกดที่ 1000 กรัม ตัดแผ่นตัวอย่างที่มีความหนา 6.0 มม. เป็นรูวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 110 มม. จำนวน 3 ชิ้น เจาะรูตรงกลาง เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 มม.

ตารางที่ ค-2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นยางรองสะพาน (Standard for Rubber Bridge Bearing) [32]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			วิธีทดสอบ
	ชนิด 50	ชนิด 60	ชนิด 70	
ความแข็ง IRHD	50	60	70	ISO 48 โดยใช้ชั้นทดสอบ ซึ่งเตรียมจาก ส่วนผิวด้านนอกของแผ่นยาง
ความต้านแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	17	17	17	ISO 37 ตัดชั้นทดสอบรูปดัมเบลล์ซึ่งเตรียม จากส่วนผิวด้านนอกของแผ่นยาง
การยืดเมื่อขาด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	450	400	300	ISO 37 ตัดชั้นทดสอบรูปดัมเบลล์ซึ่งเตรียม จากส่วนผิวด้านนอกของแผ่นยาง
ความทนอุณหภูมิสูง ความแข็งเปลี่ยนแปลง IRHD ความต้านแรงดึง ลดลง ร้อยละ ไม่เกิน	10 25 25	10 25 25	10 25 25	ใช้ชั้นตัวอย่างเช่นเดียวกับที่ทดสอบความ ต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาด นำไปบ่ม เร่งตาม ISO 188 ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 168 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบความต้านแรง ดึงและความยืดเมื่อขาดนำข้อมูลที่ได้เปรียบ เทียบกับค่าก่อนการบ่มเร่ง
ความยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ร้อยละ ไม่เกิน	25	25	25	ISO 815 ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 22 ชั่วโมง
ความทนไอโซน	ต้องไม่มีรอยแตก			ISO 1431/1 procedure A โดยใช้ชั้น ทดสอบซึ่งเตรียมจากส่วนผิวด้านนอกของ แผ่นยางดึงให้ยืด ร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ 40°C โดยใช้ความเข้มข้นของไอโซน 25 cm ³ /100m ³ นาน 48 ชั่วโมง แล้วตรวจรอย แตกด้วยแว่นขยาย
ความทนแรงกด				ใช้น้ำหนักกดลงบนแผ่นยาง โดยเพิ่มน้ำ หนักครั้งละ 0.2 เท่าของที่ออกแบบไว้ ทั้ง ใ้ครั้งละ 30 วินาที บันทึกค่าน้ำหนักกด และระยะยุบตัว เพิ่มน้ำหนักจนเท่ากับ ค่าที่ออกแบบไว้ แล้วนำไปคำนวณหาค่า ความแข็งดึงการอัด ทำซ้ำโดยเพิ่มค่าน้ำ หนักที่กดเป็น 1.5 เท่าของที่ออกแบบไว้ ทั้ง ใ้จนกระทั่งน้ำหนักที่กดมีค่าคงที่ ปล่อย น้ำหนักกดออก แล้ววัดความหนาของชั้น ยาง

ตารางที่ ค-3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางขอบประตูรถยนต์ (Standard for Door Weather Strips for Automobiles) [33]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบ
	ชนิด 60 IRHD	ชนิด 70 IRHD	
ความแข็ง IRHD	60	70	ISO 48 โดยใช้ชิ้นทดสอบจากแต่ละด้านของตัวอย่าง
ความต้านแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	7	7	ISO 37 ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ซึ่งเตรียมจากแต่ละด้านของตัวอย่าง
การยืดที่จุดขาด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	300	250	ISO 37 ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ซึ่งเตรียมจากแต่ละด้านของตัวอย่าง
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ร้อยละ ไม่เกิน	50	50	ISO 815 โดยใช้ชิ้นทดสอบชนิดเล็กที่อุณหภูมิ 70°C นาน 24 ชั่วโมง
ความต้านแรงฉีก นิวตันต่อมิลลิเมตร ไม่น้อยกว่า	15	15	
ความทนต่อโอโซน	ต้องไม่มีรอยแตก		ISO 1431/1 procedure A ที่อุณหภูมิ 40 °C โดยใช้ความเข้มข้นของโอโซน 50 ซม ³ /100ม ³ แล้วตรวจสอบรอยแตกด้วยแว่นขยาย ขนาด 7 เท่า
การบ่มเร่ง -ความแข็ง เปลี่ยนไปจากความแข็งก่อนบ่มเร่ง -ความต้านแรงดึง ลดลงจากความต้านแรงดึงก่อนบ่มเร่ง ร้อยละ ไม่เกิน -การยืดที่จุดขาด ลดลงจากการยืดที่จุดขาด ก่อนบ่มเร่ง ร้อยละ ไม่เกิน	+10 -5 25	+10 -5 25	ใช้ชิ้นตัวอย่างเช่นเดียวกับที่ทดสอบความต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาด นำไปบ่มเร่งตาม ISO 188 ที่อุณหภูมิ 70°C นาน 72 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบความต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาด นำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าก่อนการบ่มเร่ง

ตารางที่ ค-4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางหุ้มขอบกระจกรถยนต์ (Standard for Weather Strips for Automobiles) [34]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบ
	ชนิด 60 IRHD	ชนิด 70 IRHD	
ความแข็ง IRHD	60	70	ISO 48
ความต้านแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	7	7	ISO 37 ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์
การยืดที่จุดขาด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	300	200	ISO 37 ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ร้อยละ ไม่เกิน	50	50	ISO 815 โดยใช้ชิ้นทดสอบชนิดใหญ่ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 24 ชั่วโมง
ความต้านแรงจิก นิวตันต่อมิลลิเมตร ไม่น้อยกว่า	15	15	ISO 34 method B procedure(a)
ความทนต่อโอโซน	ต้องไม่มีรอยแตก		ISO 1431/1 procedure A ที่อุณหภูมิ 40 °C โดยใช้ความเข้มข้นของโอโซน 50 ชม ³ /100/ม ³ แล้วตรวจสอบรอยแยกด้วยแว่นขยายขนาด 7 เท่า
การบ่มเร่ง -ความแข็ง เปลี่ยนไปจากความแข็งก่อนบ่มเร่ง -ความต้านแรงดึง ลดลงจากความต้านแรงดึงก่อนบ่มเร่ง ร้อยละ ไม่เกิน -การยืดที่จุดขาด ลดลงจากการยืดที่จุดขาดก่อนบ่มเร่ง ร้อยละ ไม่เกิน	+10 -5 25	+10 -5 25	ใช้ชิ้นตัวอย่างเช่นเดียวกับที่ทดสอบความต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาด นำไปบ่มเร่งตาม ISO 188 ที่อุณหภูมิ 70°C นาน 72 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบความต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาด นำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าก่อนการบ่มเร่ง

ตารางที่ ค-5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางแผ่นกันซึม (Rubber Water Stops) [35]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
ความแข็ง IRHD	60-67	ISO 48 ที่อุณหภูมิ 27°C โดยใช้ชิ้นทดสอบจากตำแหน่งต่างๆ กันของตัวอย่าง จำนวน 3 ชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ย
ความต้านแรงดึง	17.5	ISO 37 ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ จำนวน 3 ชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ย
การยืดเมื่อขาด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	450	ISO 37 ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ จำนวน 3 ชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ย
การบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ความแข็งเปลี่ยนแปลง IRHD ไม่เกิน ความต้านทานแรงดึงเปลี่ยนแปลง ร้อยละ ไม่เกิน การยืดเมื่อขาดเปลี่ยนแปลง	+10 -20 -20	ใช้ตัวอย่างชิ้นงานเช่นเดียวกับที่ทดสอบความต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาด นำไปบ่มแรงตาม ISO 188 ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบ ความต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาดนำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าก่อนการบ่มแรง
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ร้อยละไม่เกิน	30	ISO 815 อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง
การดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 2 วัน น้ำหนักที่เปลี่ยนไป ร้อยละไม่เกิน	5	ISO 1817 โดยแช่ชิ้นทดสอบในน้ำที่อุณหภูมิ 23°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ ค-6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางในรถยนต์ (Tubes of rubber tires) [36]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
	ชนิดทำจากยางธรรมชาติ หรือมียางธรรมชาติผสม อยู่เป็นส่วนใหญ่	
ความต้านทานแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	15	ISO ตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์
การยืดร้อยละไม่น้อยกว่า	500	จับชิ้นทดสอบรูปปากกาให้แน่น ดึงชิ้นทดสอบ ด้วยความเร็ว 500 มม./นาที จนชิ้นงานขาด อ่านค่า แรงดึงสูงสุด พร้อมวัดระยะระหว่างเครื่องหมาย ความยาวพิคัด บันทึกค่า
ความต้านแรงดึงของรอยต่อ เมกะพาสคัล น้อยกว่า	8.5	ทำเช่นเดียวกับการทดสอบความยืด
การยืดถาวร ร้อยละ ไม่เกิน	25	ใช้เครื่องมือดึงชิ้นทดสอบให้ยืดคงที่ ด้วยระยะ ประมาณ 30 มม. และตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 104-110°C วิธีการทดสอบให้ยืดออกเป็น 1.5 เท่า ของความยาวพิคัดแล้ว นำไปอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง แล้วปลด ออกจากอุปกรณ์ดึงชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ปล่อยให้ ไว้อีกอย่างน้อย 8 ชั่วโมง วัดความยาวพิคัดชิ้น ทดสอบอีกครั้ง แล้วคำนวณหาความยืดถาวร
ความเสื่อมสภาพ ความต้านทาน แรงดึง หลังการบ่มเร่งลดลง ร้อยละไม่เกิน	10	ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง และตู้อบที่ควบคุม อุณหภูมิที่ 70°C วิธีทดสอบ คือ นำเข้าตู้อบเป็น เวลา 96 ชั่วโมง โดยไม่ให้เกิดความเค้นใดๆ ต่อชิ้น ทดสอบ นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 16 ชั่วโมง แล้วใช้วิธีทดสอบความยืด ให้เสร็จภายใน 96 ชั่วโมงนับตั้งแต่ นำออกจากตู้อบ คำนวณหา ความต้านทานแรงดึงที่ลดลง

ตารางที่ ค-7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางในรถจักรยานยนต์ (Motorcycle Rubber inner tube) [37]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
ความต้านทานแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	11.77	จับชิ้นทดสอบรูปปากกาให้แน่น ดึงชิ้นทดสอบด้วยความเร็ว 500 มม./นาที จนชิ้นงานขาด อ่านค่าแรงดึงสูงสุด โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 2 พร้อมวัดระยะระหว่างเครื่องหมายความยาวพิกัด บันทึกค่า
การยืดร้อยละไม่น้อยกว่า	500	
ความต้านแรงดึงของรอยต่อ เมกะพาสคัล น้อยกว่า	6.86	
การยืดถาวร ร้อยละ ไม่เกิน	25	ใช้เครื่องมือดึงชิ้นทดสอบให้ยึดคงที่ ด้วยระยะประมาณ 30 มม. และตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 104-110°C วิธีการทดสอบให้ยืดออกเป็น 1.5 เท่าของความยาวพิกัดแล้ว นำไปอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ปลดข้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง แล้วปลดออกจากอุปกรณ์ดึงชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ปลดข้อทิ้งไว้อีกอย่างน้อย 8 ชั่วโมง วัดความยาวพิกัดชิ้นทดสอบอีกครั้ง แล้วคำนวณหาความยืดถาวร
ความเสื่อมสภาพ ความต้านทานแรงดึง หลังการบ่มแรงลดลง ร้อยละ ไม่เกิน	10	ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง และตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 70°C นาน 96 ชั่วโมง โดยไม่ให้เกิดความเค้นใดๆ ต่อชิ้นทดสอบ นำออกจากตู้อบ ปลดข้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง 16 ชั่วโมง แล้วใช้วิธีทดสอบความยืด ให้เสร็จภายใน 96 ชั่วโมงนับตั้งแต่นำออกจากตู้อบ คำนวณหาความต้านทานแรงดึง เปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงก่อนอบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว พนอ วรรณวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัด สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544 เข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย