

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและ  
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

THERMOPLASTIC ELASTOMERS FROM NATURAL RUBBER AND  
LOW DENSITY POLYETHYLENE



สุพิชญ์ ปัญญาวัฒน์พงศ์  
SUPICH PANYAWATTANAPONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-79-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและ  
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

THERMOPLASTIC ELASTOMERS FROM NATURAL RUBBER AND  
LOW DENSITY POLYETHYLENE



สุพิชญ์ ปัญญาวัฒน์พงศ์  
SUPICH PANYAWATTANAPONG

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 49631  
จัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ข้อมูลไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2545  
ISBN 974-9546-79-2

**THERMOPLASTIC ELASTOMERS FROM NATURAL RUBBER AND  
LOW DENSITY POLYETHYLENE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2002

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ISBN 974-9546-79-2**



**COPYRIGHT 2002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่มีเหตุผลบางเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

**หัวข้อวิทยานิพนธ์**      เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
 THERMOPLASTIC ELASTOMER FROM NATURAL RUBBER AND LOW DENSITY POLYETHYLENE

**ชื่อนักศึกษา**            นายสุพิชญ์      ปัญญาวัฒน์พงศ์

**รหัสประจำตัว**            42065107

**ปริญญา**                    วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา**                เทคโนโลยีพอลิเมอร์

**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์**      ดร.ชลลดา                    ถุตวิรุพห์

**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม**      ผศ.ดร.อิทธิพล            แจ่มชัด

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.จุฑารัตน์	ปรีชญาวารากร	
ดร.ชลลดา	ถุตวิรุพห์	
ผศ.ดร.อิทธิพล	แจ่มชัด	
ดร.กัลยาณี	เปรมเพ็ชร	
ดร.สุภารัตน์	รัฐชลธิ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 17 พฤษภาคม 2545 เวลา 9.30-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารัตน์วิทยาลัย 1 ชั้น 6 ห้อง 602



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกนอกระบบโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของการนำใบนี้ไปใช้  
 วันที่.....จ.....เดือน..... พ.ศ. ๒๕๔๕

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
นักศึกษา	นายสุพิชญ์ ปัญญาวัฒนพงศ์
รหัสประจำตัว	42065107
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกหรือทีพีเอ็นอาร์ (Thermoplastic Natural Rubber; TPNR) จากการผสมยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) ทำการเตรียมโดยการนำยางธรรมชาติผสมสูตรในเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นนำไปผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และนำไปผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปและฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ในงานวิจัยนี้เสนอการศึกษาสภาวะในการผสม สัดส่วนของ NR/LDPE ผลของชนิดและปริมาณสารเชื่อมโยงซึ่งได้แก่ กำมะถันกับไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) ที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR และผลของสารช่วยผสมยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (ENR)

จากการศึกษาผลของ TPNR ที่เตรียมโดยใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยงพบว่า ที่ปริมาณกำมะถัน 3 phr กับสารเร่งปฏิกิริยา CBS 0.5 phr เป็นสูตรผสมที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR และเมื่อศึกษาสภาวะการเตรียมของ TPNR ในเครื่องผสมบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder) พบว่าที่อุณหภูมิ 150 °C และความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ 50 รอบต่อนาที เป็นสภาวะการเตรียมที่เหมาะสม จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าลดลง เมื่อปริมาณสัดส่วนของยางธรรมชาติใน TPNR เพิ่มขึ้น จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์เจล (%Gel) พบว่า %Gel มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จากศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyser) พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของ TPNR มีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วนของ

ยางธรรมชาติใน TPNR เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีกระจายตัวของ LDPE ใน TPNR ดีกว่า TPNR ที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป

จากการศึกษาผลของ TPNR ที่เตรียมโดยใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าปริมาณ DCP 1 phr เป็นสูตรผสมที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR และจากศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น เปอร์เซ็นต์เจล สมบัติสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน พบว่า มีแนวโน้มไปทางเดียวกับระบบของกำมะถัน และจากการศึกษาผลของสารช่วยผสม ENR พบว่าเมื่อเติม ENR ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้น และการเติม ENR-3 ให้สมบัติเชิงกลดีกว่า ENR-10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Thermoplastic Elastomers from Natural Rubber and Low Density Polyethylene
Student	Mr. Supich Panyawattanapong
Student ID.	42065107
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2002
Thesis Advisor	Dr. Chonlada Ritvirulh
Co-Advisor	Asst.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

## ABSTRACT

This thesis involved preparation and properties of a thermoplastic elastomer (TPE) prepared from natural rubber (NR) and low density polyethylene (LDPE) so called "TPNR" (Thermoplastics Natural Rubber). It can be prepared by compounding the natural rubber with a two-roll mill. Then the compounds were mixed with the low density polyethylene in an internal mixer. TPNR was shaped by compression moulding and injection moulding techniques. Properties of the thermoplastic elastomers were then characterised such as mechanical, physical, thermal and morphological properties. Several factors were investigated, i.e., mixing conditions, ratio of the NR/LDPE, the optimum type and amount of crosslinking agents (Sulphur and DCP) for preparing TPNR, and the effect of epoxidised natural rubber (ENR) as a compatibilisers.

The optimum vulcanisation of sulfur system was prepared with sulphur 3 phr and CBS 0.5 phr at 150 °C and screw speed of 50 rpm in Brabender Plasticoder. It was found that mechanical properties of TPNR such as tensile strength and modulus decreased whereas %gel increased when increasing the ratio of NR composition. Thermal properties were investigated by DMTA. It was found that  $T_g$  of TPNR increased when increasing ratio of NR composition. SEM micrographs indicated that TPNR prepared by injection moulding technique disclosed a better phase dispersion compared to those prepared by compression moulding technique.

The optimum vulcanisation of DCP system was prepared with DCP 1 phr. DCP vulcanised system indicated that all properties (e.g. %gel, mechanical, thermal, and morphological properties) of TPNR presented the same trends as those of the sulphur vulcanised system. From compatibilised TPNR, it was found that tensile strength and modulus increased when ENR was added. Addition of ENR-3 showed better mechanical properties than those of ENR-10.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวข้องกับ  
ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ตลอดจนทุกๆสิ่งจาก ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้  
ควบคุมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ผู้ร่วมควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ทำให้  
การปรึกษา คำแนะนำและช่วยแก้ไขปัญหาดังๆ

ขอขอบคุณ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ดร.กัลยาณี สิริสิงห และดร.สุภารัตน์ รักชลธิ  
อาจารย์และคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ปราวณี ภิญโญชีพ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
มหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ ENR

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคาร  
ฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
และสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ยาง  
แผ่นรมควัน และทุนวิจัยสนับสนุนงานวิจัยบางส่วน

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (TPE) ที่เอื้อเฟื้อพอลิเอทิลีนชนิดความหนา  
แน่นต่ำ (LD1807F) เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ พี่น้อง และเพื่อนๆ นักศึกษาทุกท่านที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนการ  
ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความกรุณา ช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึง  
อีกมากมายทางผู้เขียนขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุพิชญ์ ปัญญาวัฒน์พงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
คำอธิบายสัญลักษณ์ตัวย่อ.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	4
2.2 พอลิเมอร์ผสม.....	7
2.3 ยางธรรมชาติ.....	9
2.4 สารเคมีสำหรับยาง.....	11
2.4.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยง.....	13
2.4.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง.....	16
2.4.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง.....	19
2.4.4 สารตัวเติม.....	20
2.4.5 พลาสติไซเซอร์.....	21
2.4.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ.....	23
2.4.7 สารเติมแต่งอื่นๆ.....	24
2.5 การผสม.....	27
2.5.1 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	27
2.5.2 เครื่องผสมแบบปิด.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษตามกฎหมายและทางอาญาระหว่างของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 การศึกษา TPNR ที่เตรียมโดยใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง.....	87
5.2 การศึกษา TPNR ที่เตรียมได้โดยใช้ไดคิมิวเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยง....	88
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่.....	32
3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	40
3.2 สูตรที่ใช้ในการศึกษาเตรียมยางผสมสูตร.....	42
4.1 เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE ในเครื่องบราเวนเดอร์.....	48
4.2 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 2 phr และปริมาณ CBS 1.0 phr.....	49
4.3 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 3 phr และปริมาณ CBS 1.0 phr.....	49
4.4 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 4 phr และปริมาณ CBS 1.0 phr.....	50
4.5 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 3 phr โดยมีปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาช่วงระหว่าง 0.5-1.5 phr.....	51
4.6 สมบัติทางความร้อนเชิงกลของ TPNR จากเครื่อง DMTA.....	65
4.7 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 0.5 phr.....	67
4.8 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 1.0 phr.....	67
4.9 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 1.5 phr.....	67
4.10 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 2.0 phr.....	68
4.11 สมบัติทางความร้อนเชิงกลของ TPNR จากเครื่อง DSC.....	68
4.12 สมบัติทางความร้อนเชิงกลของ TPNR จากเครื่อง DMTA.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยาง.....	1
2.1 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	5
2.2 ช่วงความแข็งกตของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	8
2.4 สูตรโครงสร้างของหน่วยไอโซพรีน.....	10
2.5 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบไม่ใช้ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงรวมทั้งการเชื่อมโยง ในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ.....	17
2.6 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบใช้ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง แบบเร็วยิ่งยวด แบบธรรมดา และแบบช้า.....	18
2.7 ส่วนประกอบหลักของเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	28
2.8 ส่วนประกอบหลักของเครื่องผสมแบบปิด.....	29
2.9 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง Rotorless curemeter.....	30
2.10 Monsanto moving die rheometer (MPR) เป็น Pressurised rotorless curemeter	30
2.11 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve).....	31
2.12 ลักษณะโครงสร้างของสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ.....	33
2.13 โครงสร้างของ ENR.....	34
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของNR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	53
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	53
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วต่างๆ.....	54
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีการสัตวศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงนอกรายชื่อและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	56
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	56
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกหักของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	57
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	57
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	58
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	59
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR และอัตราส่วนของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	59
4.12 สันฐานวิทยาพื้นผิวแตกหักของ NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีนในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 จากกระบวนการอัดขึ้นรูป กำลังขยาย 1500 เท่า (ก) NR/LDPE (50/50) (ข) NR/LDPE (60/40) (ค) NR/LDPE (70/30).....	61
4.13 สันฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 50/50 (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	62
4.14 สันฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 60/40 (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	63
4.15 สันฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 70/30 (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	64
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE.....	71

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE.....	71
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE....	72
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE.....	72
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE.....	73
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE.....	73
4.22 สัณฐานวิทยาพื้นผิวแตกหักของ NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 จากกระบวนการอัดขึ้นรูป กำลังขยาย 1500 เท่า (ก) NR/LDPE (50/50) (ข) NR/LDPE (60/40) (ค) NR/LDPE (70/30).....	75
4.23 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 50/50 (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	76
4.24 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 60/40 (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	77
4.25 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 70/30. (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	78
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติม สารช่วยผสม ENR 5 phr.....	80
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติม สารช่วยผสม ENR 5 phr.....	80
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกหักของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติม สารช่วยผสม ENR 5 phr.....	81
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติม สารช่วยผสม ENR 5 phr.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษารายงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr.....	83
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr.....	83
4.32 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 60/40 ที่เติมสารช่วยผสม ENR3% (ก) การฉีกขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	84
4.33 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 60/40 ที่เติมสารช่วยผสม ENR10% (ก) การฉีกขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์ตัวย่อ

CBS	N-cyclohexyl-benzothiazole-2-sulphenamide
CR	ยางคลอโรพรีน
CRI	ดัชนีแสดงอัตราเร็วการเชื่อมโยง
DCP	ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์
DMTA	Dynamic Mechanical Thermal Analyser
DSC	Differential Scanning Calorimeter
ENR-3	ยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ 3 เปอร์เซนต์โมล
ENR-10	ยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ 3 เปอร์เซนต์โมล
HDT	จุดอ่อนตัว
IIR	ยางบิวทิล
LDPE	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
NR	ยางธรรมชาติ
PVC	พอลิไวนิลคลอไรด์
SA	กรดสเตียริก
SEM	Scanning Electron Microscope
SG	ความตึงจำเพาะ
tan $\delta$	ความสามารถในการกระจายพลังงาน
TPEs	เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์
TPNR	ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก
TPO	เทอร์โมพลาสติกพอลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์
TPV	เทอร์โมพลาสติกเชื่อมโยง
$T_g$	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
$T_m$	อุณหภูมิการหลอมเหลว
$t_{2}$	Scorch time
$t_c(90)$	Cure time
ZnO	ซิงค์ออกไซด์

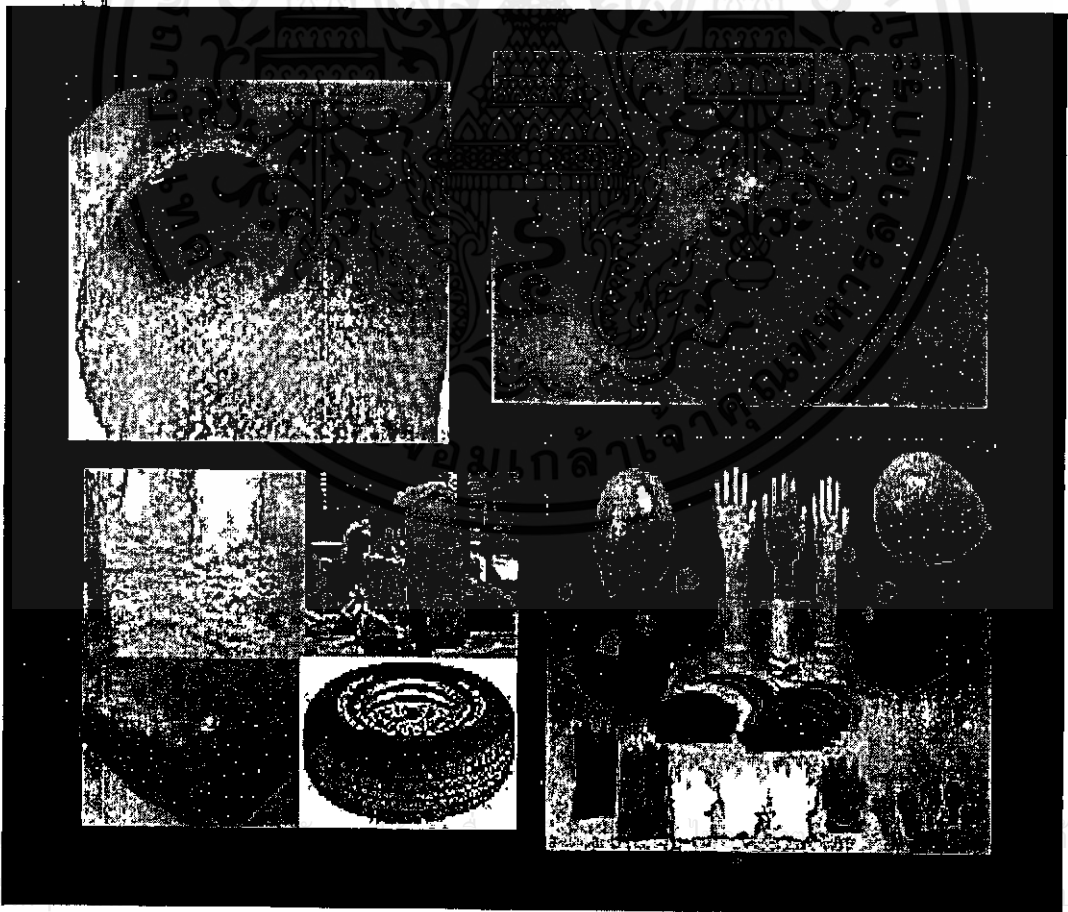
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้คำปรึกษาใดๆขอโทษ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก มีปริมาณการผลิตมากกว่า 2.3 ล้านตันต่อปี [1] คิดเป็นร้อยละ 30 ของการผลิตของโลก โดยยางธรรมชาติสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางเพื่อใช้งานในประเทศและเพื่อการส่งออก ซึ่งการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางนํารายได้เข้าประเทศปีหนึ่งๆมากกว่าแสนล้านบาท ทั้งจากมูลค่าการส่งออกยางดิบ และการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปมีความสำคัญยิ่งเนื่องจากสามารถเพิ่มมูลค่าให้ยางดิบได้มาก จึงควรได้รับการผลักดันสนับสนุนให้มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตยางธรรมชาติแปรรูปเป็นอย่างมาก



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยาง

ในปัจจุบันเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers; TPEs) เป็นที่รู้จักในอุตสาหกรรมต่างๆกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่น คือ สามารถใช้แทนวัสดุจำพวกยาง แต่สามารถขึ้นรูปง่ายเหมือนเทอร์โมพลาสติก และสามารถเป็นคู่แข่งที่สำคัญในการใช้งานแทนยางที่เชื่อมโยงหรือยางวัลคาไนซ์ (Vulcanised rubber) รวมทั้งสามารถนำไปใช้ทดแทนพอลิเมอร์อื่นๆที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดอ่อน (Flexible PVC) ไปจนถึงวัสดุที่มีความแข็งแรง ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกและยางด้วยอัตราส่วนต่างๆกัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแตกต่างกันไปตามความต้องการ นอกจากนี้กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไม่ยุ่งยากและมีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่ายางเทอร์โมเซต สามารถใช้กับเครื่องในการผลิตเทอร์โมพลาสติกต่างๆไปได้ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มขั้นตอนในการเชื่อมโยงหรือวัลคาไนเซชัน (Vulcanisation) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ได้ทำให้สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งและมีต้นทุนการผลิตต่ำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (TPEs) ชนิดหนึ่งที่เรียกว่ายางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกหรือเรียกอย่างย่อว่า ทีพีเอ็นอาร์ (Thermoplastic Natural Rubber; TPNR) จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาหาสูตรที่ใช้ในการผสม สภาวะในการผสม ผลของชนิดและปริมาณสารเชื่อมโยงและสารช่วยผสม เพื่อให้ได้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติที่ดี

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะและสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (TPNR) จากยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)
2. ศึกษาสมบัติต่างๆของ TPNR ที่ได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และ สันฐานวิทยา เป็นต้น
3. ศึกษาผลของสารเชื่อมโยงและสารช่วยผสม ที่มีผลต่อสมบัติของ TPNR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะและสูตรที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR เช่น อุณหภูมิ เวลา ความเร็วรอบของโรเตอร์
2. ศึกษาชนิดและปริมาณของสารเชื่อมโยง และสภาวะการเชื่อมโยง ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของ TPNR
3. ศึกษาผลของสารช่วยผสม ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของ TPNR ที่ได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสูตรและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิต TPNR ให้มีสมบัติตามที่ต้องการ
2. ช่วยลดปัญหาทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ เช่น ปัญหาราคายางธรรมชาติตกต่ำ และปัญหาการกำจัดขยะยางวัลคาไนซ์ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
3. เป็นแนวทางการผลิต TPNR ในเชิงพาณิชย์ เพื่อทดแทนเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer; TPE)

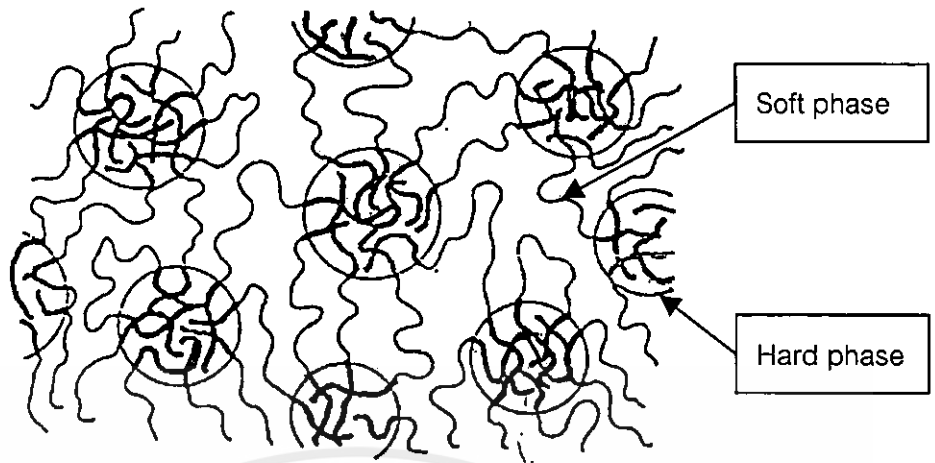
เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง โดยไม่มีการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างโซ่โมเลกุล แต่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพเป็นผลเนื่องมาจากการแยกวัฏภาคที่ไม่เข้ากันออกเป็น 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคแข็ง (Hard phase) และวัฏภาคอ่อน (Soft phase) โดยที่วัฏภาคแข็งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าวัฏภาคอ่อน คือไม่สามารถเคลื่อนที่ ณ อุณหภูมิห้อง แต่สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน โดยทำหน้าที่คล้ายกับการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink) ในขณะที่วัฏภาคอ่อนมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) คือมีอิสระในการเคลื่อนที่ได้มากกว่าวัฏภาคแข็งและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) ที่ต่ำ จึงมีสถานะคล้ายยาง อ่อนนิ่มยืดหยุ่นได้ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีความต้านทานต่อการเสียรูปร่างได้ดี วัฏภาคแข็งและวัฏภาคอ่อนของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

วัฏภาคแข็งมักเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดที่มีความแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน พอลิคาร์บอนเนต เป็นต้น และวัฏภาคอ่อนมักเป็นอิลาสโตเมอร์ เช่น ยางธรรมชาติ ยางพอลิบิวทาไดอีน พอลิไอโซพรีน เป็นต้น

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของวัฏภาคแข็ง เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เปลี่ยนแปลงสมบัติจากยางมาเป็นของเหลวหนืด ทำให้สามารถนำไปใช้กับกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกได้ เมื่อให้ความเย็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แข็งตัวและมีสมบัติคล้ายยาง ทำให้สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีข้อดีกว่ายางเชื่อมโยงแล้ว คือ ง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูป โดยใช้เทคนิคเดียวกับเทอร์โมพลาสติก ใช้สารเติมแต่ง (Additives) ใสในพอลิเมอร์ไม่มาก ใช้เวลาในการผสมสั้น สามารถนำเศษและของเสียกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียและมีสมบัติคงเดิม พลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ สามารถควบคุมรูปร่างให้เป็นไปตามความต้องการได้ง่าย และมีน้ำหนักเบากว่ายางเทอร์โมเซตที่ปริมาตรเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [2]

### 2.1.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [3]

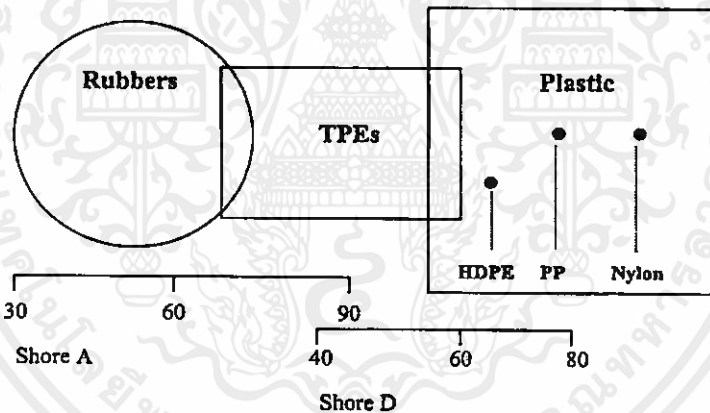
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPEs) สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyolefin Elastomer; TPO*) เป็นพอลิเมอร์ผสมทางเชิงกลระหว่างพอลิโอเลฟินกับอีลาสโตเมอร์ ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (PP) กับยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีน (EPDM)
2. เทอร์โมพลาสติกเชื่อมโยง (*Thermoplastic Vulcanisate; TPV*) ต่างจาก TPO ในส่วนของวัฏภาคยางที่มีการเชื่อมโยงสูงกว่า TPO สมรรถนะของ TPV จะใกล้เคียงกันกับยางเทอร์โมเซต
3. เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyester Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก ซึ่งประกอบด้วยส่วนแข็งและส่วนอ่อน โดยส่วนแข็งคือพอลิอัลคิลีนเทอเรพทาเลต และส่วนอ่อน คือพอลิอัลคิลีนอีเทอร์
4. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyurethane Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์แบบชั้นระหว่างไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับไดไอโซไซยานเตต
5. เทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyamide Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มที่มีสองโครงสร้าง คือพอลิอีเทอร์สลับกับพอลิเอไมด์และพอลิเอสเทอร์สลับกับพอลิเอไมด์

6. เทอร์โมพลาสติกพอลิ (สไตรีน-ไดอีน) อีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Poly(styrene – diene) Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีความหนืดหลอมเหลวสูงมาก ส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์ คือโมเลกุลที่มีพันธะคู่ ส่วนแข็ง คือพอลิสไตรีน

### 2.1.2 ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Natural Rubber; TPNR) [4]

จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทหนึ่ง มีจุดเริ่มต้นมาจากความพยายามค้นคว้าหาวัสดุชนิดใหม่ ที่มีสมบัติอยู่ระหว่างยางและพลาสติก คือสามารถขึ้นรูปหรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ โดยใช้กระบวนการเช่นเดียวกับที่ไว้ในกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แต่มีสมบัติพิเศษกว่า คือมีสมบัติยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ (Flexibility) มีการกระดอนดี (Resilience) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของยาง ยางเทอร์โมพลาสติกมีค่าความแข็งกตกอยู่ในช่วงระหว่างยางกับพลาสติกสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ช่วงความแข็งกตกของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [4]

### 2.1.3 สมบัติและการประยุกต์ใช้งานของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [2,4]

ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุอื่นดังนี้

1. มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิยูรีเทน และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ
2. มีสมบัติที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตต พอลิเอทิลีน และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

3. มีความทนทานต่อแรงกระแทกดีกว่าพอลิพรอพิลีน
4. มีความหนาแน่นต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิยูรีเทน และมีราคาถูกกว่าพอลิยูรีเทน
5. มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่ายางเชื่อมโยง
6. สามารถทนทานต่อน้ำและสารเคมีได้ดี

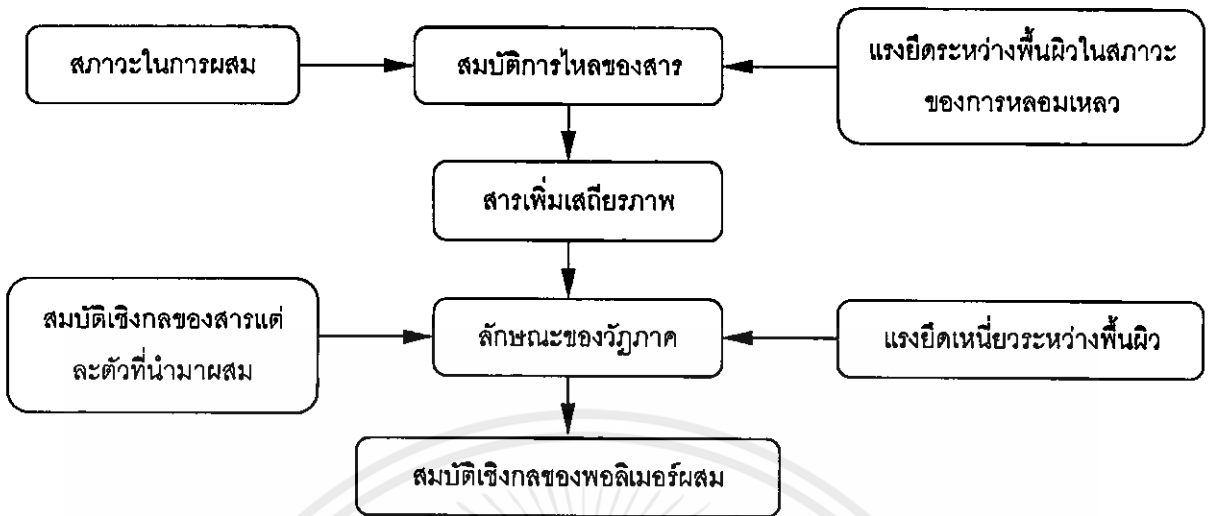
จากสมบัติข้างต้น จึงมีการนำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ได้ดังนี้

1. ใช้ทดแทนยางเชื่อมโยงในผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องมีความยืดหยุ่นสูง และความแข็งแรงมาก
2. ใช้แทนพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น เช่น พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตต พอลิยูรีเทน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น
3. ใช้ในอุตสาหกรรมด้านใหม่ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมรถยนต์

ในบรรดาเทอร์โมพลาสติกชนิดต่างๆ พอลิโพลีเอทิลีนถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นจำนวนมาก โดยเทอร์โมพลาสติกพอลิโพลีเอทิลีนอีลาสโตเมอร์มีช่วงของความยืดหยุ่นครอบคลุมระหว่างยางอ่อนและพลาสติกที่ใช้ในทางวิศวกรรม ซึ่งสามารถทำเป็นสูตรต่างๆ เพื่อให้ได้ความแข็งและความเหนียวขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน เทอร์โมพลาสติกพอลิโพลีเอทิลีนอีลาสโตเมอร์ที่ได้มีความแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 70 Shore A ถึง 70 Shore D โมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) อยู่ในช่วงระหว่าง 1,000 ถึงมากกว่า 250,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยเทอร์โมพลาสติกพอลิโพลีเอทิลีนอีลาสโตเมอร์ตัวหนึ่งสามารถถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่นมากหรือให้แข็งมาก แต่ยังคงมีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ดี และมีศักยภาพสูงในการผลิตเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ เช่น กันชน (Bumper) สปอยเลอร์ (Spoilers) และแผ่นที่ต้องการความโค้งงอชนิดอื่นๆ ได้

## 2.2 พอลิเมอร์ผสม [5]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้าด้วยกัน โดยมีโครงสร้างของพอลิเมอร์หลักทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันนี้อยู่รวมกัน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้นี้แตกต่างจากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์หลัก แต่จะชนิดที่นำมาผสมกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม [5]

### 2.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม [6]

พอลิเมอร์ผสมแบ่งตามลักษณะพื้นฐานวิทยาได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

#### 2.2.1.1 พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้ มีโมเลกุลของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B อยู่รวมกันมองเห็นเป็นวัฏภาคเดียว โดยที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ A มีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ B ทำให้เกิดแรงดึงดูดกัน สมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีลักษณะคล้ายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม ซึ่งพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีน้อย เช่น ยางธรรมชาติกับพอลิবিටဒါ

#### 2.2.1.2 พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้แยกออกจากกันเป็น 2 วัฏภาคอย่างเห็นได้ชัดเจน ในระดับจุลภาคโดยที่พอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยเป็นวัฏภาคกระจาย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทนี้ เช่น พอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน

#### 2.2.1.3 พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้บางส่วน (Partially miscible blend)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้อาจรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ถ้ามีปริมาณของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งในสัดส่วนน้อยๆ ถ้าอัตราส่วนของพอลิเมอร์เท่ากันเกิดการแยกออกเป็น 2 วัฏภาค พอลิเมอร์ A อาจเข้าไปแทรกอยู่ในวัฏภาคของพอลิเมอร์ B ซึ่งช่วยให้วัฏภาคมีแรงยึดเหนี่ยวที่มากขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีสมบัติที่ดี เช่น พอลิเอทิลีนกับพอลิไอโซบิวทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ผ่านการพิจารณาจากเจ้าของข้อมูล

### 2.2.2 วัตถุประสงค์ของการผสมพอลิเมอร์ [7]

1. เพื่อเพิ่มราคาของวัสดุที่มีราคาถูกให้มีราคาแพงขึ้น
2. เพื่อปรับเปลี่ยนองค์ประกอบให้ตรงความต้องการของลูกค้า
3. เพื่อนำเศษพลาสติกหรือพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
4. เพื่อพัฒนาวัสดุที่มีอยู่ให้มีสมบัติตรงตามความต้องการโดยไม่ต้องคิดค้นวิธีการสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่

### 2.2.3 การเชื่อมโยงในระหว่างการผสม

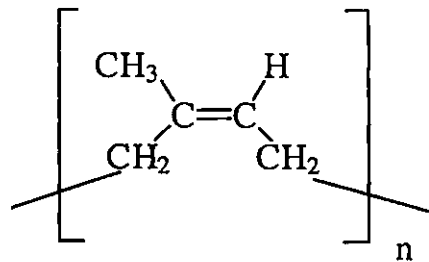
การปรับปรุงสมบัติยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [8] สามารถทำได้โดยการเชื่อมโยงโมเลกุลบางเพียงบางส่วน (Partially crosslink) ในระหว่างการผสม ดังนั้นของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง หรือพอลิไวนิลคลอไรด์ จึงสามารถนำไปใช้กับกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกได้ เนื่องจากโมเลกุลของยางที่ถูกเชื่อมโยงกระจายเป็นอนุภาคเล็กๆ ในเมตริกซ์ของพลาสติก การเกิดการเชื่อมโยงแบบนี้เรียกว่า การเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic crosslinking) ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรง ค่ามอดุลัสความทนทานต่อแรงกระแทก และความยืดหยุ่นให้สูงขึ้น ในขณะที่เกิดการเชื่อมโยงความหนืดของวัสดุอย่างสูงขึ้น และทำให้พลาสติกก่อตัวเป็นวัสดุต่อเนื่อง นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก เช่น การเกิดตอกกิ่ง (Grafting) ของยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีน มีผลทำให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก มีสมบัติอยู่ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสอง เป็นต้น

## 2.3 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (NR) เป็นส่วนผสมหลักในสูตรผสมยางทั่วไป ผลิตได้จากการกรีตต้นยาง โดยที่น้ำยางไหลออกมารวมกันในภาชนะรองรับ น้ำยางธรรมชาติเป็นของเหลวสีขาวโดยมีอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในน้ำ องค์ประกอบทางเคมีของน้ำยางธรรมชาติมีส่วนประกอบดังนี้ [9]

- ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 Polyisoprene) 35 เปอร์เซ็นต์
- สารประกอบเคมีที่ไม่ใช่ยาง เช่น โปรตีน ไขมัน และเกลืออนินทรีย์อื่นๆ 5 เปอร์เซ็นต์
- น้ำ 60 เปอร์เซ็นต์

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่โมเลกุลยาวมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากหน่วยไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ที่ซ้ำๆ กันมาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 50,000 -3,000,000



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของหน่วยไอโซพรีน [10]

สมบัติที่สำคัญของยางธรรมชาติได้แก่

- มีค่าความแข็งแรงของยางดิบ (Green strength) สูง
- มีสมบัติเชิงกลที่ดีภายใต้แรงดึง
- มีความยืดหยุ่นสูง
- ไม่ทนทานต่อแรงเฉือน
- ไม่ทนทานต่อโอโซนและออกซิเจนเนื่องจากมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง

ในสายโซ่พอลิเมอร์ของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ ทำให้ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นและมีอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ต่ำ ทำให้มีสมบัติในการกระดอนสูงแต่สมบัติการคืบ (Creep) ต่ำ การทำให้คงรูปสามารถทำได้ง่ายโดยใช้กำมะถัน ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อได้รับแรงดึง (Strain-induced crystallisation) เนื่องจากมีพันธะคู่ในโมเลกุลและมีการจัดเรียงตัวแบบซิส (Cis-conformation) ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงโมเลกุลของยางธรรมชาติเคลื่อนเข้ามาชิดกันมากขึ้นทำให้เกิดการตกผลึก

การผสมยางธรรมชาติเพื่อใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้น ต้องมีการผสมยางชนิดอื่นๆ และสารเคมีเพื่อเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติที่บกพร่อง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพและมีสมบัติที่สม่ำเสมอ โดยต้องทำให้วิฤภาคของยางและสารเคมีที่เติมเข้าไปมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยการทำให้อนุภาคต่างๆ เกิดการกระจายตัวแบบสุ่มและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของอนุภาค ยางธรรมชาติอาจเกิดการไหลในทิศทางของแรงเฉือนซึ่งทำให้ขนาดของอนุภาคต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากกระบวนการผสม

## 2.4 สารเคมีสำหรับยาง

สารเคมีสำหรับยาง [1] (Rubber additives) หมายถึง สารเคมีต่างๆที่ผสมลงไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่อาจนำไปใช้งานได้ เว้นแต่สารเคมีเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับยางก่อน การให้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยาง สามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูปหรือยางไม่เชื่อมโยง (Green compounds หรือ Uncured compounds) ส่วนยางที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารเคมีแล้ว เรียกว่า ยางคงรูปหรือยางเชื่อมโยง (Vulcanised rubbers หรือ Cured rubbers)

### เหตุผลในการผสมยางกับสารเคมี

การที่ต้องมีการผสมยางกับสารเคมี เนื่องจากเหตุผล 4 ประการ คือ

#### 1. เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องบางประการ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1.1 ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก สมบัติเป็นพลาสติก คือความสามารถที่ยางพยายามรักษารูปร่างที่ได้เปลี่ยนไปตามแรงกระทำ ส่วนสมบัติเป็นอีลาสติก คือความสามารถที่ยางพยายามรักษารูปร่างเดิมก่อนที่เกิดการเปลี่ยนไปตามแรงกระทำ การที่ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติกนี้ ทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรง

1.2 ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่อุณหภูมิต่ำ ยางมีความแข็งกระด้าง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยางมีความนิ่มหรือเอิ่ม การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ทำให้การใช้งานของยางอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

1.3 ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ

1.4 ยางสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด

#### 2. เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการแปรรูปยาง

ในยางดิบที่ยังไม่ได้ผสมกับสารเคมี มีความเหนียว ซึ่งเกี่ยวกับความยืดหยุ่นของส่วนประกอบที่อยู่ในยางดิบ และทำให้ลำบากในการนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การรีดยางให้เป็นแผ่นเรียบจากเครื่องรีดกลิ้ง (Calender) หรือการทำท่อยาง-เส้นยาง จากเครื่องอัดรีด (Extruder) เป็นต้น ดังนั้นถ้ามีการผสมสารเคมีลงในยาง สามารถลดปัญหาเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของแผ่นยางหรือการพองตัวของท่อยาง ทำให้สามารถผ่านกระบวนการดังกล่าวเพื่อแปรรูปยางได้

### 3. ทำให้ยางมีช่วงอุณหภูมิของการใช้งานกว้างขึ้น

จากความเหมาะสมในการเลือกสารเคมีผสมในยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางอย่างมาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้ เปลี่ยนจากอ่อนไปจนถึงผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการทนความร้อน เช่น ขวดใส่น้ำร้อน และผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุด เช่น เปลือกหม้อเบตเตอร์ ดังนั้นเราสามารถเลือกชนิดและปริมาณของสารเคมี เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ

### 4. เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้เนื้อยางอย่างเดียวทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ถ้าสามารถผสมสารอื่นที่มีราคาถูกลงไป เช่น เขม่าดำ (Carbon black) เคลย์หรือดินขาว (Clay) ทำให้ลดต้นทุนการผลิตลง

### สารที่ใช้ผสมยางเพื่อการผลิตวัตถุยางสำเร็จรูป

สารต่างๆที่ใช้สำหรับการผลิตวัตถุยางสำเร็จรูป อาจจำแนกเป็นประเภทต่างๆได้ดังนี้

1. สารทำให้ยางคงรูป หรือสารเชื่อมโยง (Vulcanising agents) เช่น กำมะถัน สารประเภทที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ และสารประเภทเปอร์ออกไซด์
2. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) คือ สารเคมีที่ใส่ในยางเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว
3. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) เช่น กรดสเดียริก และซิงค์ออกไซด์
4. สารตัวเติม (Fillers) ได้แก่ เคลย์ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และเขม่าดำ เป็นต้น
5. สารช่วยในการแปรรูปยาง หรือพลาสติกไซเซอร์ (Plasticisers) เช่น สารทำให้ยางนิ่ม โดยทางเคมี และสารทำให้ยางนิ่มโดยกายภาพ
6. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agents) เช่น สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidants) และสารต้านทานปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonants)
7. สารพิเศษอื่นๆ (Miscellaneous ingredients) ได้แก่ สารที่ทำให้เกิดสี (Colorants) สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) และสารหน่วง (Retarders) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยง

สารทำให้ยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง เพื่อการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น เรียกว่า การทำให้ยางสุกหรือการเชื่อมโยง (Curing หรือ Vulcanisation) ซึ่งทำให้สมบัติของยางที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. ยางเปลี่ยนจากความเป็นพลาสติกไปสู่ความเป็นอีลาสติกสูงขึ้น
2. เพิ่มความแข็งแรง เพิ่มมอดุลัส และ เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ
3. เปลี่ยนสภาพของยางจากการละลายได้ในตัวทำละลาย เป็นยางที่ไม่ละลายในตัวทำละลายและไม่บวมตัว
4. เป็นการเปลี่ยนยางจากสภาพเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นเทอร์โมเซต (Thermosetting)

สารทำให้ยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยง แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.4.1.1 กำมะถัน (Sulphur; S) และธาตุบางชนิดที่อยู่ในหมู่เดียวกับกำมะถัน

2.4.1.2 สารที่ให้กำมะถัน (Sulphur donor)

2.4.1.3 สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน

2.4.1.1 กำมะถัน (Sulphur; S) และธาตุบางชนิดที่อยู่ในหมู่เดียวกับกำมะถัน

กำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยงที่นิยมใช้มากที่สุด ประมาณ 90% และนิยมใช้กับยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) ได้แก่ ยางธรรมชาติ SBR BR และ NBR เป็นต้น

เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อน กำมะถันทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยางเรียกว่า เกิดการเชื่อมโยง ทำให้ยางคงรูป

ปริมาณของกำมะถันที่ใช้อยู่ในช่วงประมาณ 1-3 phr (ส่วนในยาง 100 ส่วน) แต่โดยทั่วไปในยางธรรมชาติ มีการเติมกำมะถันไม่เกิน 2.5 phr เพราะปริมาณกำมะถัน 2.5 phr ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด แต่ใน SBR ปริมาณของกำมะถันที่ใช้น้อยกว่าใน ยางธรรมชาติ คือประมาณ 1.5-2.0 phr

กำมะถันที่ใช้ในยางต้องเป็นกำมะถันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เนื่องจากทำให้กำมะถันกระจายในยางได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดการคงรูปได้ทั่วถึง และทำให้ยางมีสมบัติที่ดี การเติมกำมะถันลงในยาง เติมหหลังจากเติมสารเคมีทั้งหมดแล้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อน

กำหนดแต่อย่างบางชนิด เช่น NBR ซึ่งกำมะถันมีความสามารถในการกระจายในยางได้ไม่ดี จำเป็นต้องใส่กำมะถันเข้าไปตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อช่วยให้เวลาในการกระจายเพิ่มขึ้น

การผสมกำมะถันเข้าไปในยางในปริมาณที่มาก เมื่อตั้งทิ้งไว้กำมะถันที่เป็นส่วนเกินจะตกผลึกออกมาที่ผิวยางเรียกว่า เกิดการบลูม (Blooming) การแก้ปัญหาของการที่กำมะถันเกิดการเคลื่อนที่มาอยู่ที่ผิวยางสามารถทำได้โดยผสมกำมะถันเข้าไปในยางที่อุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่ทำได้ หรืออาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulphur) แทนกำมะถันธรรมดาซึ่งเป็นแบบชนิดละลาย (Soluble sulphur) แต่กำมะถันชนิดไม่ละลายไม่คงตัว จึงมีการเปลี่ยนรูปเป็นกำมะถันชนิดละลายอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนเป็นกำมะถันชนิดละลายภายใน 10-20 นาที ดังนั้นในกระบวนการแปรรูปยาง ต้องให้อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปจนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูป ในการนำไปใช้งาน อาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายปนกับกำมะถันชนิดละลายได้ เช่น ใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายประมาณ 70% ของปริมาณทั้งหมด ทำให้ลดการตกผลึกของกำมะถันที่ผิวยางได้

ข้อดีและข้อเสียของการใช้กำมะถัน

#### ข้อดี

1. กำมะถันมีราคาค่อนข้างถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ
2. กระจายตัวในยางได้ดี
3. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
4. มีผลโดยตรงต่อสารเร่ง จึงเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดเชื่อมโยง

#### ข้อเสีย

1. มีแนวโน้มทำให้เกิดการเคลื่อนที่มาอยู่ที่ผิวยาง
2. มีการติดสีของซัลไฟด์
3. เมื่อนำยางที่ผสมกำมะถันไปอบ มีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี
4. มีข้อจำกัดในการใช้ คือ ใช้ได้กับยางที่ไม่อิมิตัว

นอกจากกำมะถันแล้ว ยังมีธาตุอื่นๆที่คล้ายกำมะถัน ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางคงรูป ได้แก่ ซีลีเนียม (Selenium) และเทลลูเรียม (Tellurium) ซึ่งสามารถใช้แทนกำมะถันเมื่อต้องการสมบัติความต้านทานต่อความร้อน แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับธาตุ 2 ชนิดนี้ ไม่ดีเท่ากับกำมะถันและยังเป็นพิษด้วย โดยทั่วไปนิยมใช้ธาตุ 2 ชนิดนี้เป็นสารทำให้ยางคงรูปเสริมร่วมกับกำมะถัน ซึ่งทำให้ลดปริมาณกำมะถันที่ใช้ และทำให้ได้ยางที่มีความต้านทานต่อความร้อนและไอน้ำ และมี modulus สูงขึ้นด้วย

#### 2.4.1.2 สารที่ให้กำมะถัน (Sulphur donor)

สารที่ให้กำมะถัน (Sulphur donor) หมายถึง สารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการคงรูปได้แก่ ทีเอ็มทีดี TMTD (Tetramethyl thiuram disulfide)

การใช้สารที่ให้กำมะถัน ใช้ร่วมกับกำมะถันปริมาณเล็กน้อย คือใช้กำมะถันปริมาณน้อยกว่า 1 phr ร่วมกับสารที่ให้กำมะถัน 3-4 phr หรือบางกรณีอาจไม่ใช้กำมะถัน โครงสร้างของการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น มีประสิทธิภาพแข็งแรงดีกว่าการเชื่อมโยงโมเลกุลโดยระบบที่ใช้กำมะถันอย่างเดียว ไม่เกิดการคงรูปก่อนกำหนดและผลผลิตที่ได้มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงดีกว่า และให้มอดุลัสสูงกว่าการใช้กำมะถันอย่างเดียวในปริมาณเท่ากัน แต่การใช้สารที่ให้กำมะถันอย่างเดียวมีราคาแพงกว่ากำมะถันธรรมดา และต้องใช้สารปริมาณมาก

#### 2.4.1.3 สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน

สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. โลหะออกไซด์ (Metallic oxides) ซึ่งได้แก่ พวกซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide; PbO) ใช้ในการเชื่อมโยงอย่างบางชนิด เช่น

- ซิงค์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้เชื่อมโยงยาง Neoprene (CR)
- แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้เชื่อมโยง Fluoroelastomer (FPM)
- ตะกั่วออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้เชื่อมโยงยางไฮพาลอน (CSM)

2. สารพวกที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยา 2 หมู่ สารพวกนี้สามารถเกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลยางโดยทำปฏิกิริยากับซิงก์ของสายโซ่โมเลกุล เช่น การใช้ Epoxy resin เชื่อมโยงยางไนไตรล์ (Nitrile rubber) การใช้ Quinone dioxime เชื่อมโยงยางบิวทิล (Butyl rubber) เป็นต้น

3. สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) สารใช้ทำปฏิกิริยากับยางประเภทที่มีความอิมมัตว์ได้ เช่น ยางซิลิโคน และยางประเภทที่ไม่อิมมัตว์ หรือประเภทที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาการคงรูป

สารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้กับยางควรเป็นสารที่มีความเสถียรที่เก็บรักษาไว้ได้นาน มีความว่องไวพอสมควรในการทำปฏิกิริยากับยางที่อุณหภูมิของการคงรูป และปลอดภัยในการใช้ ซึ่งได้แก่ Dicumyl peroxide และ Benzoyl peroxide เป็นต้น

ข้อดีและข้อเสียของการใช้เปอร์ออกไซด์

#### ข้อดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1. ยางทุกๆ ส่วนเกิดการคงรูปในเวลาใกล้เคียงกัน
2. สมบัติด้านคงรูปต่อแรงกดอัด (Compression set) ดีมาก
3. มีความต้านทานต่อความร้อนดีมาก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องลึกเบื้องหลังและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ไม่เกิดปัญหาการบวม
5. ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีสดใส
6. มีสมบัติทางไฟฟ้าดี

### ข้อเสีย

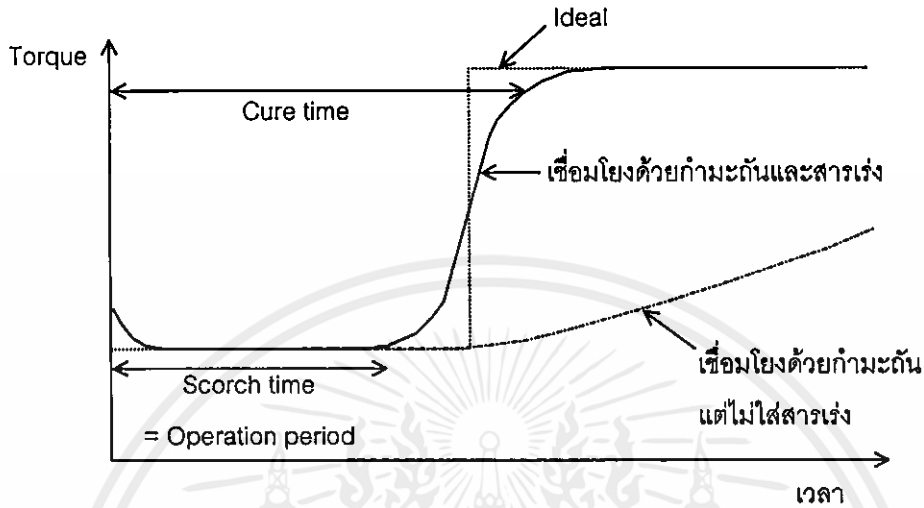
1. ราคาแพงกว่าการใช้กำมะถัน
2. มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าอย่างที่ใช้กำมะถัน
3. ค่อนข้างมีกลิ่น
4. เวลาก่อนการขึ้นรูปสั้นมาก
5. สมบัติส่วนใหญ่ด้อยกว่าอย่างที่ใช้กำมะถัน

#### 2.4.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง หรือ Accelerators คือสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันปริมาณน้อยลง พิจารณารูปที่ 2.5 การใช้สารเชื่อมโยง (เช่น กำมะถัน) เพียงอย่างเดียวสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ แต่ใช้เวลานานมาก (อาจใช้เวลาเป็นวัน) ถึงจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ เนื่องจากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่ำ การใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาและลดเวลาเชื่อมโยงอย่างมาก (อาจลดเวลาจากหลายชั่วโมงเหลือเพียงไม่กี่นาที) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยง

จากรูปที่ 2.5 แสดงกราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลา ได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยงเช่นเครื่อง ODR (Oscillating disc rheometer) สามารถใช้ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปและเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ การใส่ยางผสมสูตรประกอบจานหมุนแล้วให้อุณหภูมิสูง (เท่ากับอุณหภูมิเชื่อมโยง เช่น 150°C) และศึกษาแรงบิดของจานหมุนที่ใช้ทำให้เกิดการหมุนไปมาที่มุมคงที่ (1,3 หรือ 5 องศา) เทียบกับเวลา จุดที่แรงบิดเริ่มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจุดที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรงเป็นสารโซ่กิ่งหรือเกิดร่างแหสามมิติทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นจึงใช้แรงบิดจานหมุนเพิ่มขึ้น จะทำให้สามารถทราบเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงหรือ เวลาสกอร์ช (Scorch time) เวลานี้มีความสำคัญเนื่องจากยางจะสามารถเคลื่อนที่ได้หรือไหลได้ก่อนถึงจุดนี้ เมื่อ Scorch time ผ่านไปยางเริ่มเชื่อมโยง ไม่สามารถไหลได้สะดวก ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการการไหลของยางต้องทำให้เสร็จสิ้นก่อน Scorch time เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) การอัดขึ้นรูป

(Compression moulding) เป็นต้น เมื่อแรงบิดขึ้นสูงสุดและคงที่ ทำให้ทราบเวลาที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงสมบูรณ์หรือ เวลาการเชื่อมโยง (Cure time)



รูปที่ 2.5 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงรวมทั้งการเชื่อมโยงในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ [9]

**ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง**

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่นเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) อัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate) เวลาเชื่อมโยงสมบูรณ์ (Cure time) ความสามารถในการละลายในยาง (Solubility) ความเป็นพิษ (Toxicity) เป็นต้น ดังนั้นการเลือกชนิดสารเร่งที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

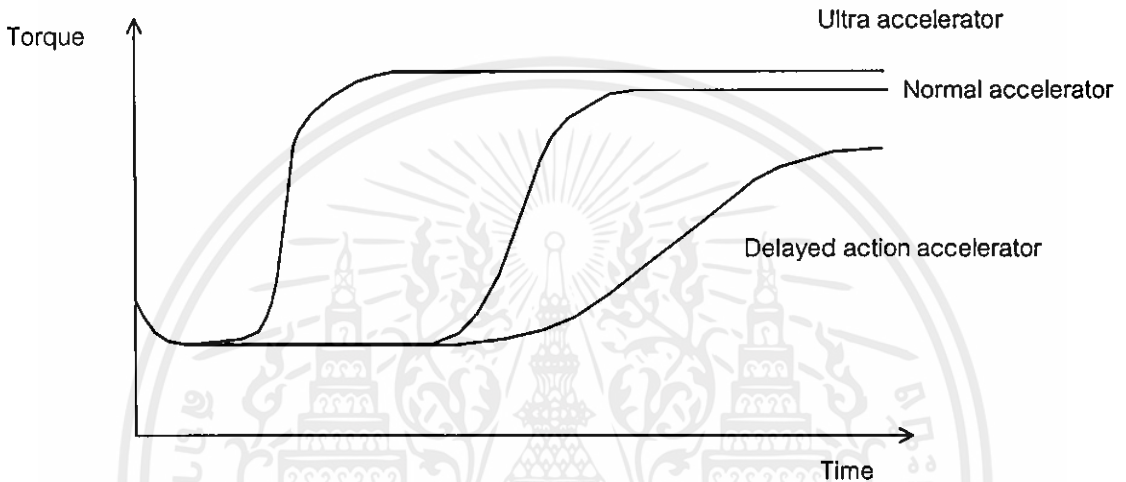
ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าเป็นสารเร่งหลักหรือ "สารเร่งปฐมภูมิ" (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าเรียกว่าเป็น "สารเร่งทุติยภูมิ" (Secondary accelerators) หรือคิกเกอร์ (Kickers) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า "ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก" (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงเป็น 6 กลุ่มดังนี้

- กลุ่มที่ 1 ซัลฟีนามิด (Sulfenamides)
- กลุ่มที่ 2 ไทเอโซล (Thiazoles)
- กลุ่มที่ 3 กัวนิดีน (Guanidines)

- กลุ่มที่ 4 ไตโทไอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)  
 กลุ่มที่ 5 ไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)  
 กลุ่มที่ 6 ไทยูเรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ทั้งนี้ยังมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกสองกลุ่มที่ไม่ได้รวมอยู่ด้วยเนื่องจากมีปริมาณการใช้ที่น้อยและมีความเป็นพิษ (Toxicity) ได้แก่ อัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amines) และไทโอยูเรีย (Thioureas)



รูปที่ 2.6 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง แบบเร็วยิ่งยวด แบบธรรมดา และแบบช้า [9]

สารเร่งที่ดีควรมีสมบัติดังนี้ คือ

- สามารถนำให้ยางคงรูปได้เร็ว
- มีความว่องไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง
- ละลายได้ดีในยาง
- มีความปลอดภัยในกระบวนการผลิต
- สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ
- ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง
- เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่นๆที่ใส่เข้าไปในยาง
- ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้
- ไม่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reversion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ผิดเป็นสงวนเนื้อที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activator)

สารกระตุ้นหรือสารเสริมตัวเร่ง (Activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัดค่าในซิงค์อย่างให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น และไปเร่งอัตราการเชื่อมโยงอย่างให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้ยางมีมอดุลัสสูงขึ้น

#### 2.4.3.1 ชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง

สารกระตุ้น สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. สารอนินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide; CdO) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide; Ca(OH)<sub>2</sub>) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO) ในบรรดาสารต่างๆเหล่านี้ ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เป็นสารที่จำเป็นในการทำยางคงรูปได้สมบูรณ์ เป็นสารที่มีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะสูง คือ 5.57 จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ซิงค์ออกไซด์มากเกินไป ปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์นิยมใช้ในปริมาณ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งทำให้ได้ยางที่มีมอดุลัสสูงและยางมีลักษณะโปร่งใส

ซิงค์ออกไซด์สามารถจัดเกรดได้ตามความบริสุทธิ์ ปกติซิงค์ออกไซด์มีตะกั่วปนอยู่ ซึ่งทำให้สีของยางคล้ำได้ ดังนั้นการจัดเกรดของซิงค์ออกไซด์ขึ้นกับปริมาณตะกั่วที่ปนอยู่ ซึ่งมีการแบ่งเป็นชนิดที่มีปริมาณตะกั่วน้อย (White seal) และชนิดที่มีปริมาณตะกั่วมาก (Red seal) กรณียางสีดำสามารถใช้ซิงค์ออกไซด์ชนิดที่มีปริมาณตะกั่วมากได้ แต่ถ้าต้องการยางที่มีสีขาวหรือสีสดต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ชนิดที่มีปริมาณตะกั่วน้อย

อาจใช้เบสซิงค์คาร์บอเนตแทนซิงค์ออกไซด์ได้ เพราะมีความสามารถในการละลายในยางได้ดีกว่า ใช้ในปริมาณมากๆได้ เหมาะที่ใช้ในยางโปร่งใส ถ้าเบสซิงค์คาร์บอเนตถูกบดให้มีขนาดเล็กเรียกว่า Transparent zinc oxide ทำให้ง่ายสีใสและโปร่งใสดีกด้วย

นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์บางชนิดที่มีอนุภาคเล็ก และอยู่ปนกับออกไซด์ของโลหะตัวอื่น ซึ่งเรียกว่า Active zinc oxide สามารถใช้กับยางได้ โดยใส่ในปริมาณน้อย ทำให้ง่ายใสเช่นเดียวกัน และยังทำให้สมบัติทางกายภาพของยาง ได้แก่ มอดุลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารอินทรีย์ สารกระตุ้นพวกอินทรีย์ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดลอริก (Lauric acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) เป็นต้น กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นสารกระตุ้นสำหรับสารเร่งบางตัว โดยเฉพาะพวกไทเอโซล

กรดไขมันที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นมากที่สุด คือ กรดสเตียริก (Stearic acid) ปริมาณที่ใช้ในยางขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางมีกรดไขมันอยู่แล้ว ไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ในปริมาณน้อย โดยทั่วไปในการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติ ใส่กรดสเตียริกประมาณ 1-3 phr เพื่อลดอัตราการเสื่อมโยงที่แตกต่างกัน

#### 2.4.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม (Fillers) หมายถึง สารอื่นที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น พวกเขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น

สารตัวเติมที่ใส่ลงไปยาง ใส่เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆดังนี้

1. เพื่อลดต้นทุน
2. เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง
3. เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต
4. ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
5. เพื่อเพิ่มการนำทางไฟฟ้า
6. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

สารตัวเติมแบ่งเป็น 2 ประเภท คือแบ่งตามการผลิต และแบ่งตามลักษณะ

##### 2.4.4.1 การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต แบ่งได้เป็น 5 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมาบดให้ละเอียด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย ซอล์ค แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม
2. สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลิน
3. สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต อะลูมิเนียมซิลิเกต
4. สารตัวเติมในรูปของผงฝุ่น เช่น เขม่าดำ ซิงค์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์
5. สารตัวเติมประเภทที่มีการทำปฏิกิริยาที่ผิว (Surface modified products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาทำปฏิกิริยาที่ผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่น

กับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทาลค์ม ซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาที่ผิวหรือฉาบผิว

2.4.4.2 การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulated fillers) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เชม่าดำ
2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous fillers) เช่น แอสเบสทอส ผงเยื่อไม้
3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous fillers) เช่น High styrene resin และ Phenolic resin

2.4.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticisers)

สารที่ใส่เข้าไปในยาง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการใช้งาน เรียกว่า พลาสติไซเซอร์ (Plasticisers) ซึ่งพลาสติไซเซอร์ทำให้ความแข็งของยางลดลง และช่วยให้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

พลาสติไซเซอร์มีชื่อเรียกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับหน้าที่และปริมาณการใช้ คือ

1. Processing aid คือ สารพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr เพื่อช่วยในกระบวนการขึ้นรูปยาง และช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปในยางง่ายขึ้น
2. Softener คือ สารพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณ 5-15 phr ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มขึ้น ทั้งในขณะยังไม่คงรูป และคงรูปแล้ว
3. Extender คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณเกิน 15 phr ใส่เพื่อลดต้นทุน

หน้าที่ของพลาสติไซเซอร์

1. เพื่อช่วยในกระบวนการขึ้นรูปยาง เนื่องจากการเติมสารตัวเติมต่างๆ เข้าไปในยาง ทำให้ยางแข็งขึ้น สารพลาสติไซเซอร์ทำให้ยางทั้งที่คงรูปแล้ว และยางที่ยังไม่คงรูปอ่อนลง ทำให้การไหลของยางสู่แม่พิมพ์ ตลอดจนกระบวนการแปรรูปง่ายขึ้น

2. เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ยางที่ใส่สารพลาสติไซเซอร์จะนิ่มขึ้น การที่ยางมีความแข็งลดลง ทำให้มอดุลัสลดลง แรงดึงยึด ณ จุดขาดของยางสูงขึ้น และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น

3. เพื่อลดต้นทุน การใส่สารตัวเติมลงไปปริมาณมากๆ ทำให้ยางแห้งจนไม่สามารถใส่สารตัวเติมลงไปได้อีก แต่ถ้าเติมสารพลาสติไซเซอร์เข้าไป ช่วยให้สามารถใส่สารตัวเติมเพิ่มได้อีก จึงเป็นการลดต้นทุนลง

4. เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ยางบางอย่างแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ยางไนไตรล์ และ ยางคลอโรพรีน ถ้าหากใส่พลาสติกไซเซอร์ ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำลงไป และสามารถขยายขอบเขตการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปได้อีก

5. เพื่อลดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปยาง การใส่พลาสติกไซเซอร์ลงไปในยาง ทำให้ยางนิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการผสมยาง รวมทั้งอุณหภูมิในการขึ้นรูปยางลดลง

### สารพลาสติกไซเซอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.4.5.1 สารช่วยให้นิ่มโดยทางเคมี (Chemical plasticisers)

2.4.5.2 สารช่วยให้นิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticisers)

2.4.5.1 สารช่วยให้นิ่มโดยทางเคมี (Chemical plasticisers)

เป็นสารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปในยางในปริมาณน้อย ทำให้ยางนิ่ม และลดเวลาของการบด ยางลงหรือเรียกว่า สารตัดสายโซ่หรือเปปไทเซอร์ (Peptisers) ใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์พวกที่มีความหนืดสูง ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่และขึ้นรูปได้ยาก ปริมาณสารที่ใช้ประมาณ 2 phr มักใส่สารเคมีประเภทนี้ลงไปในยางเมื่อเริ่มต้นการผสมในเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง และปล่อยให้สารเคมีนี้ทำปฏิกิริยากับยางเป็นระยะเวลาสั้นๆก่อนที่จะใส่สารอื่นลงไป

2.4.5.2 สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticiser)

เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปแล้ว ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลยาง ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางนิ่มลง ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น เป็นสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับยาง และเป็นสารที่ต้องผสมเข้ากันได้ (Compatible) กับยางและสารอื่นๆได้

พลาสติกไซเซอร์ชนิดนี้ ที่สำคัญ ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเอสเทอร์

น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oil) เป็นน้ำมันที่เข้ากันได้ดีกับยาง ทำให้ความหนืดลดลง เป็นน้ำมันที่ไม่ระเหย ไม่ติดสี และสีไม่ตก น้ำมันชนิดนี้ เมื่อใช้ทำให้ยางมีสมบัติตรงกันข้ามกับการใช้สารตัวเติม คือ มีผลให้ความแข็งแรงลดลง ค่ามอดุลัสลดลง

น้ำมันที่ใช้กับยางประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ แต่มีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจนปนอยู่บ้างเล็กน้อย โครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจนในน้ำมันแตกต่างกันซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. อะโรมาติก (Aromatic) หมายถึง พวกน้ำมันมีพันธะคู่ มีสีคล้ำความหนืดสูงมาก

2. แนฟทาติก (Naphthenic) หมายถึง พวกน้ำมันไม่มีพันธะคู่ มีความหนืดปานกลาง และไหลได้ง่าย

3. พาราฟินิก (Paraffinic) หมายถึง พวกน้ำมันที่มีโซ่กิ่ง ไม่มีพันธะคู่ มีสีขาวมีความหนืดต่ำ และไหลได้ง่าย

น้ำมันเอสเทอร์ (Ester) เป็นเอสเทอร์ของกรดอินทรีย์ หรือกรดฟอสฟอริก ใช้ในการผสมยางทนน้ำมัน เช่น ยางไนไตรล์ ยางคลอโรพรีน น้ำมันชนิดนี้ทำให้ลดความแข็งของยางลงได้มากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม

ตัวอย่างน้ำมันเอสเทอร์ เช่น

พวก Phthalate ได้แก่ DOP (Diocetyl phthalate)  
DIOP (Di-2- isooctyl phthalate)  
พวก Adipate ได้แก่ DOA (Diocetyl adipate)

#### 2.4.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agents)

ช่วงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง เกิดการเสื่อมสภาพขึ้นเรื่อยๆ การเสื่อมสภาพของยางเรียกว่า Degradation ซึ่งสาเหตุการเสื่อมสภาพของยางเกิดเนื่องจากโมเลกุลยางถูกทำให้เปลี่ยนแปลงโดยออกซิเจนและโอโซน การเสื่อมสภาพของยางเกิดช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่งแต่ธรรมชาติ เช่น แสง ความร้อน ความไม่บริสุทธิ์ของโลหะล้วนเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น นอกจากนี้ช่วงที่มีการอบยาง (Aging) ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดเปลี่ยนแปลง หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิว ผิวแข็งและสูญเสียความแข็งแรง ซึ่งกระบวนการเสื่อมสภาพของยาง สามารถแบ่งเป็น 5 แบบ คือ

1. เสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน (Self aging)
2. เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat aging)
3. เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (Light aging)
4. เสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา (Flex aging)
5. เกิดรอยแตกเนื่องจากบรรยากาศ (Atmospheric cracking)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้นกว่าเดิม จึงจำเป็นต้องมีสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) หรือสารแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิด ทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวขึ้น

2.4.6.1 สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxdant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องมาจากการที่ออกซิเจน (Oxygen;  $O_2$ ) เข้าทำปฏิกิริยากับยางซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)

สารแอนติออกซิแดนท์ แบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

1. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสี (Staining antioxidant) เป็นแอนติออกซิแดนท์ที่เป็นสารประกอบเอมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของเอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีคล้ำ หรือตกสี นิยมใช้กับยางที่มีสีดำ

2. สารแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องมาจากโอโซน (Ozone; O<sub>3</sub>) ปกติปริมาณโอโซนมีปริมาณน้อย ประมาณ 3-4 ppm แต่มีผลต่อยางโดยทำให้ยางเกิดรอยแตก

ยางที่ทนทานต่อโอโซน เช่น ยาง EPDM สามารถใช้ยาง EPDM ล้วนๆ หรือใช้ยางอื่นผสมกับยาง EPDM เป็นการป้องกันปฏิกิริยาที่เกิดจากโอโซนโดยไม่ใช้สารแอนติโอโซนแนนท์

#### 2.4.7 สารเติมแต่งอื่นๆ

สารเติมแต่งอื่นๆนี้ ไม่ได้ว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารให้สี (Colorants) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) สารหน่วง (Retarders) เป็นต้น

##### สารให้สี (Colorants)

ผลิตภัณฑ์ยางบางชนิด เช่น ยางพื้นรองเท้า กระเป๋าน้ำร้อน ยางรัดของ ยางลบ ยางรถจักรยาน หมวกอาบน้ำ ถุงมือแม่บ้าน ลูกโป่ง และผลิตภัณฑ์อื่นอีกหลายชนิด เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีสีต่างๆ เพื่อความสวยงาม จึงจำเป็นต้องมีการใส่สารที่ทำให้เกิดสีลงไปในยาง

สีที่ใส่ลงไปในยางควรมีลักษณะดังนี้

1. เป็นสีที่มีประสิทธิภาพ
2. ทนทานต่อแสง
3. ทนทานต่อความร้อน
4. ไม่ตกสี
5. ไม่เป็นพิษ
6. มีราคาถูก
7. ไม่มีผลต่ออายุของยาง และอัตราความเร็วในการทำให้ยางคงรูป

สารให้สี สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สีอินทรีย์ และ สีอนินทรีย์

1. สีอินทรีย์ เป็นสีที่สังเคราะห์ขึ้น และเป็นสีที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพดี คือ ใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ประมาณ 1 phr ให้สีที่เห็นชัด สีสดสวย แต่มีราคาแพง สีอินทรีย์บางตัวเปลี่ยนสีหรือสีจางลงได้ง่าย ถ้าถูกแสงนานๆ หรือถูกสารเคมี และสีไม่ทนทานต่อการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง

สีอินทรีรี่เมื่อนำไปใช้อาจใช้ในรูปของผง หรือในรูปของส่วนผสมของยางกับสารเคมีหรือมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)

2. สีอินทรีรี่ เป็นสีที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าพวกสีอินทรีรี่ ราคาค่อนข้างถูก แต่ต้องใช้ปริมาณมาก ประมาณ 5-10 phr สีค่อนข้างทึบไม่ใส แต่มีความคงตัวอยู่นาน สีมักไม่จาง และทนอุณหภูมิสูง

ตัวอย่างของสีอินทรีรี่ ได้แก่

2.1 ทิทาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide;  $TiO_2$ ) เป็นสารที่ให้สีขาว ผลิตได้จากการสกัดจากแร่ในธรรมชาติ แล้วทำให้ตกตะกอนอยู่ในรูปผลึก มี 2 แบบ คือ

- Rutile ให้สีขาวดีที่สุด และสีมีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง
- Anatase ให้สีขาวออกน้ำเงิน

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มีสีขาว ต้องใช้ทิทาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 10-15 phr แต่ผลิตภัณฑ์ที่มีสีใช้ทิทาเนียมไดออกไซด์เพียง 1 phr

2.2 ลิโทพอน (Lithopone) มีประสิทธิภาพอ่อนกว่าทิทาเนียมไดออกไซด์ ต้องใช้ในปริมาณมาก ประมาณ 25-40 phr เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสีขาว

2.3 เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) ส่วนใหญ่เป็น Ferric oxide ทำให้เกิดสีตั้งแต่สีแดงแก่จนกระทั่งสีส้มและสีเหลือง มีราคาค่อนข้างถูก

2.4 Ultramarine blue เป็นสารสีน้ำเงินที่ใช้กันทั่วไป เป็นสารที่มีความทนทานต่อความร้อน แสง ดินฟ้าอากาศ แต่ไวในการทำปฏิกิริยากับกรด และต้องใช้ในปริมาณมาก ถ้านำผลิตภัณฑ์ที่ใช้สีชนิดนี้ไปผ่านไอน้ำ สีจางลง

2.5 Chromium oxide สีชนิดนี้ให้สีเขียวค่อนข้างทึบ และมีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง

#### สารหน่วง (Retarder)

สารหน่วงเป็นสารที่ช่วยลดหรือชะลอความว่องไวของสารเร่งระหว่างกระบวนการเก็บรักษา หรือระหว่างกระบวนการผลิต จุดมุ่งหมายของการใช้สารนี้ เพื่อป้องกันการเกิดยางคงรูประหว่างกระบวนการผลิตและระหว่างการเก็บรักษา สารชนิดนี้ต้องสลายตัวและไม่ขัดขวางปฏิกิริยาของสารเร่งที่อุณหภูมิปกติ หรือที่อุณหภูมิสูงขึ้น และต้องไม่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยาง

สารพวกนี้เป็นพวกกรดอินทรีรี่ซึ่งทำหน้าที่ลดความเป็นกรด-ด่างของยาง อันเป็นผลให้ชะลอการเกิดยางคงรูป สารหน่วงนี้ใช้ในปริมาณน้อย 0.3-1 phr

สารหน่วงสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. พวกกรดอินทรีรี่ สามารถละลายได้ในยาง เป็นสารชนิดแรกที่พบ ไม่เพียงแต่มีผลต่ออัตราการคงรูป แต่ยังมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยาง สารชนิดนี้นิยมใช้มากในการแก้ปัญหา

การเกิด scorch ในฤดูร้อน เพราะว่ามีอัตราการคงรูปในฤดูร้อนเพิ่ม และการเกิด scorch เพิ่มด้วย ได้แก่ กรด Salicylic กรด Benzoic

2. Nitroso compound สารชนิดนี้ใช้ป้องกันการเกิด scorch ในยางพวก diene ทุกชนิด และทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารเร่งปฏิกิริยาทุกชนิด ยกเว้นพวก อัลดีไฮด์เอมีน สารหน่วงชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงต่อกระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำๆ แต่ไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาการคงรูปที่อุณหภูมิปกติ สารชนิดนี้มีการกระจายตัวดีเพราะเป็นสารที่มีจุดหลอมตัวต่ำ แต่ติดสีเล็กน้อย ได้แก่ NDPA (N-Nitrosodiphenylamine)

3. N-(cyclohexylthio)-phthalimide ได้แก่ Santogard PVI (Prevulcanisation Inhibitor) ของ Monsanto เป็นสารหน่วงที่นิยมใช้มาก และมีประสิทธิภาพสูงกว่าพวกกรดอินทรีย์ โดยเฉพาะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ร่วมกับสารเร่งกลุ่มซัลฟิनाไมด์ และไฮโอโซล สารชนิดนี้ไม่ติดสี มีอัตราส่วนเวลาระหว่างกรไลและการคงรูปกว้างมาก ทำให้เกิดการคงรูปง่าย ไม่เกิดฟองอากาศระหว่างกระบวนการแปรรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเครื่องอัดขึ้นรูป

สารขัดสี (Abrasive) เป็นสารที่ใส่ลงไปในยางเพื่อเพิ่มสมบัติการขัดสี วัตถุประสงค์บางอย่าง เช่น ลูกล้อขัดสี จำเป็นต้องมีสมบัตินี้ ซึ่งสารพวก Pumica และผงแก้ว นิยมใช้ในการทำยางลบ ส่วนลูกล้อขัดสีมักใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์

สารป้องกันรังสี โดยการใช้ผงตะกั่ว หรือ Litharge ผสมเข้าไปในยาง ทำให้ได้ยางที่รังสีผ่านได้ยากขึ้น ใช้สำหรับทำชุดพนักงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารกัมมันตรังสีต่างๆ

สารระงับกลิ่น (Deodorants) เป็นสารที่ช่วยระงับกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในยาง ซึ่งอาจใช้พวกอะโรมาติก

สารลดไฟฟ้าสถิตย์ของยาง (Antistatic agent) ผลิตภัณฑ์ยางบางประเภท เช่น ล้อที่ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้าและล้อเข็นในโรงพยาบาล สายพานลำเลียง มักใส่สารที่ลดไฟฟ้าสถิตย์ของยาง คือ ใช้เขม่าดำชนิด Conductive channel black หรือ ใช้สาร Antistatic agent

สารช่วยลดความเสียดทาน ผงแกรไฟท์มักใช้ผสมยาง เพื่อให้ยางมีความเสียดทานของผิวต่ำลง โดยเฉพาะมักทำผิวของยางก่อนนำไปคงรูป นอกจากนี้แกรไฟท์ยังใช้เป็นสารทนความร้อนได้อีกด้วย

สารที่ทำให้ยางมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก ได้แก่ การใช้แบเรียมเฟอไรท์ (Barium ferrite) ผสมในยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก

สารหน่วงการติดไฟ (Flame retarder) เป็นสารที่ช่วยให้ยางมีความทนทานต่อการลุกไหม้ โดยในยางต้องมีฮาโลเจน (Halogen) อยู่ ทำให้ยางมีความทนทานต่อการลุกไหม้ได้ดี แต่ถ้ายางไม่มีพวกฮาโลเจนอยู่ ทำให้ยางไม่มีความต้านทานการลุกไหม้เลย

## 2.5 การผสม (Mixing)

เครื่องที่ใช้บดผสมยางโดยทั่วไปมี 2 ระบบ คือ เครื่องบดผสมระบบเปิด (Open mill) หรือที่เรียกตามลักษณะของเครื่องว่า เครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer)

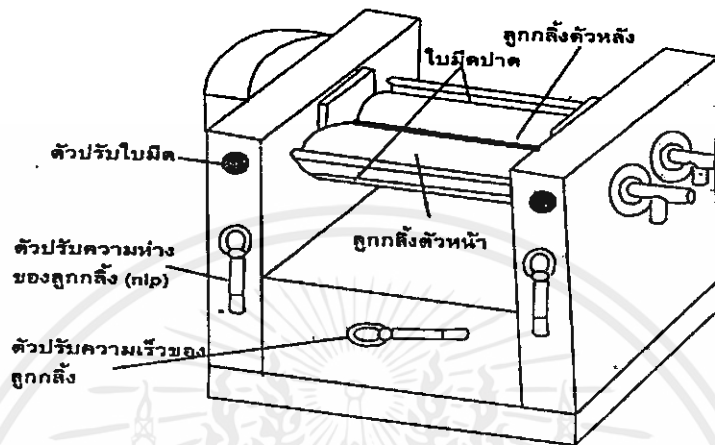
### 2.5.1 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ใช้ได้กับทั้งการผสมสารเคมีกับยางและพลาสติก ในกรณีพลาสติกนิยมใช้ในการเตรียมคอมปาวด์ (Compound) ของ PVC ลูกกลิ้งของเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่น ขนาดของเครื่องผสมชนิดนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของลูกกลิ้ง ซึ่งอาจมีความยาวตั้งแต่ 15 เซนติเมตร กรณีเครื่องที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ จนถึงเครื่องที่มีลูกกลิ้งยาวมากกว่า 2 เมตร ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นตามความยาว ลักษณะของเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งแสดงดังรูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ ลูกกลิ้งสองตัวที่บรรจุน้ำหรือน้ำมันร้อนผ่านภายในลูกกลิ้ง เพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อนไปยังสารที่ต้องการผสม ส่วนอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น ไบมีดปาด เป็นต้น

ข้อดีของเครื่องผสมชนิดนี้ คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของสารเคมีกับพลาสติกได้ มีความสะดวกในการทำความสะดวกเครื่องผสม สามารถทำการผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้ กล่าวคือ ตั้งแต่แบทช์ (Batch) ขนาดเล็กจนถึงใหญ่ได้ การผสมแบบนี้ได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งเหมาะสำหรับการขึ้นรูปต่อโดยเทคนิคอื่นๆ เช่น การอัดขึ้นรูป (Compression moulding)

ข้อเสียของการผสมโดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง คือ ผู้ผสมต้องมีทักษะในการใช้เครื่อง และมีความรู้เรื่องการคอมปาวด์สูง ในกรณีที่ต้องการผสมให้มีสมบัติในแต่ละแบทช์ที่เหมือนกันทำได้ยากมาก เนื่องจากอาจมีการสูญเสียสารเคมีบางส่วนในขณะที่ทำการผสม นอกจากนี้การผสม

โดยใช้เครื่องผสมชนิดนี้เป็นระบบเปิด ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ฝุ่นละออง และสิ่งปนเปื้อนชนิดต่างๆ เข้ามาปะปนกับคอมปาวด์ และมีโอกาสที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคอมปาวด์ได้ง่าย และการผสมโดยการใช้อุปกรณ์ผสมสองลูกกลิ้งเป็นการผสมที่ได้ช้ากว่ากรณีการใช้อุปกรณ์ผสมแบบปิด



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหลักของเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง [11]

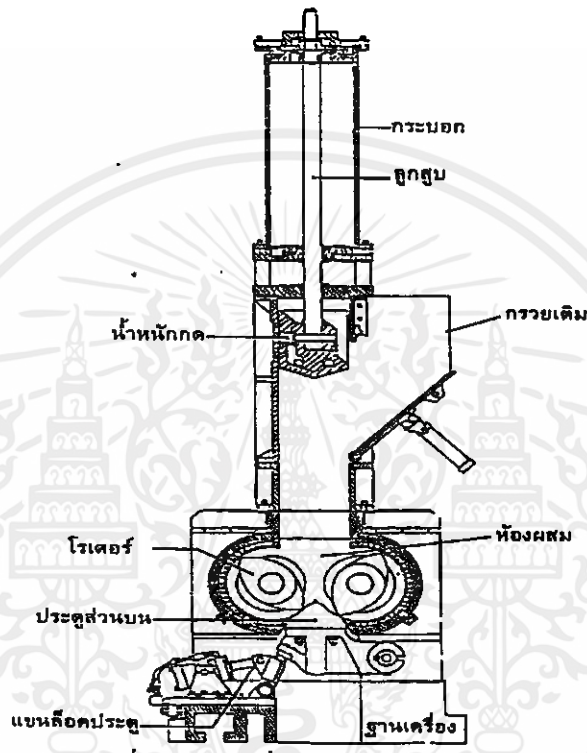
### 2.5.2 เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer)

การคอมปาวด์พลาสติกในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ใช้การหมุนของโรเตอร์ (Rotor) ภายในห้องผสม (Mixing chamber) เพื่อผสมสารเคมีกับพลาสติกเข้าด้วยกัน ลักษณะของโรเตอร์ที่เป็นเหมือนเกลียวไม่เรียบเหมือนผิวของลูกกลิ้ง ทำให้ในขณะหมุนเกิดแรงเฉือนภายในของผสมสูงมาก ส่งผลให้การกระจายตัวของสารเคมีในพลาสติกดีกว่า และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่ามาก กล่าวคือใช้เวลาในการผสมประมาณ 4 ถึง 5 นาที เท่านั้น ลักษณะของเครื่องผสมแบบปิด แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งองค์ประกอบหลักของเครื่อง คือโรเตอร์สองชุดหมุนในทิศสวนทางกันและสามารถปรับความเร็วได้ ห้องผสมซึ่งโดยทั่วไปปรับอุณหภูมิโดยใช้น้ำมันร้อนและน้ำไหลหมุนเวียน มีน้ำหนักรัดซึ่งใช้ในการเปิดห้องผสมขณะเดินเครื่อง มีประตูและระบบล๊อคใช้ในการเปิดให้คอมปาวด์ออกจากห้องผสม เป็นต้น

ข้อดีของการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด คือ ผสมได้คอมปาวด์พลาสติกเร็ว ผู้ใช้เครื่องไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง เช่นเดียวกับกรณีการใช้อุปกรณ์ผสมสองลูกกลิ้ง เนื่องจากการผสมกระทำในภาชนะปิด จึงไม่มีการสูญเสียวัสดุ ไม่เกิดการปนเปื้อน ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และขนาดของแบทช์ในการผสมแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน ดังนั้นการคอมปาวด์โดยเครื่องชนิดนี้ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่า กรณีการผสมเป็นแบทช์ขนาดใหญ่ มีความจำเป็นที่ต้องใช้เครื่องมือชนิดอื่นช่วยในการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปแปรรูป เช่น ใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งวัดให้เป็น

แผ่น ก่อนที่นำแผ่นคอมปาวด์ไปทำเม็ดโดยใช้เครื่องบด หรือเครื่องทำเม็ดพลาสติก เพื่อให้สามารถนำเม็ดพลาสติกไปใช้แปรรูปโดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) หรือ กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding)

ข้อเสียอื่นๆ ของการผสมแบบปิด คือ มีโอกาสที่สารเคมีบางตัวติดภายในห้องผสม ทำให้ปริมาณของสารเคมีชนิดนั้นในคอมปาวด์ต่ำกว่าที่ต้องการ



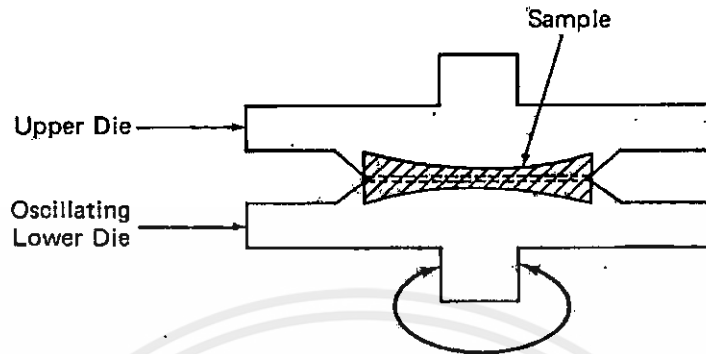
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักของเครื่องผสมแบบปิด [12]

## 2.6 เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยาง (Curemeters for Rubber Compounds)

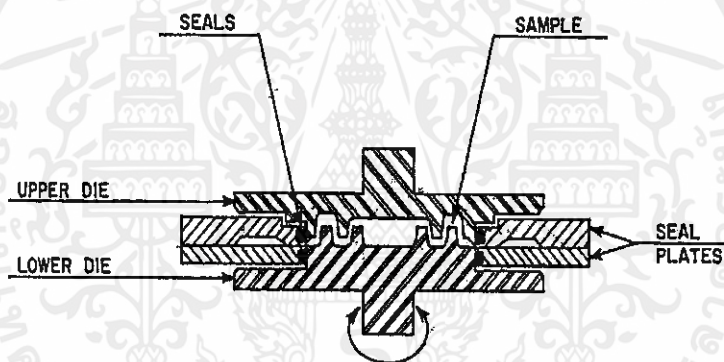
เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (Rotorless curemeters) บางครั้งอาจเรียกว่า Moving Die Rheometer (MDR) เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้สามารถทดสอบการเชื่อมโยงได้รวดเร็ว กว่า นอกจากนั้นเครื่องชนิดนี้ ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน จะให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ให้ข้อมูลมากกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ Phase angle

รูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงเครื่อง Rotorless curemeter จานด้านล่าง (Lower die) จะหมุนขึ้นไปมาทำมุม  $\pm 1, 3$  หรือ 5 องศา ที่ความถี่ 1.7 Hz จานด้านบนจะอยู่กับที่และวัดแรงบิด

(Torque) ก็จะได้กราฟการเชื่อมโยงเช่นเดียวกับ ODR ปัจจุบันเครื่องวัดการเชื่อมโยงประเภทนี้ได้แก่ Wallace precision cure analyzer (PCA) และ Monsanto moving die rheometer (MDR)

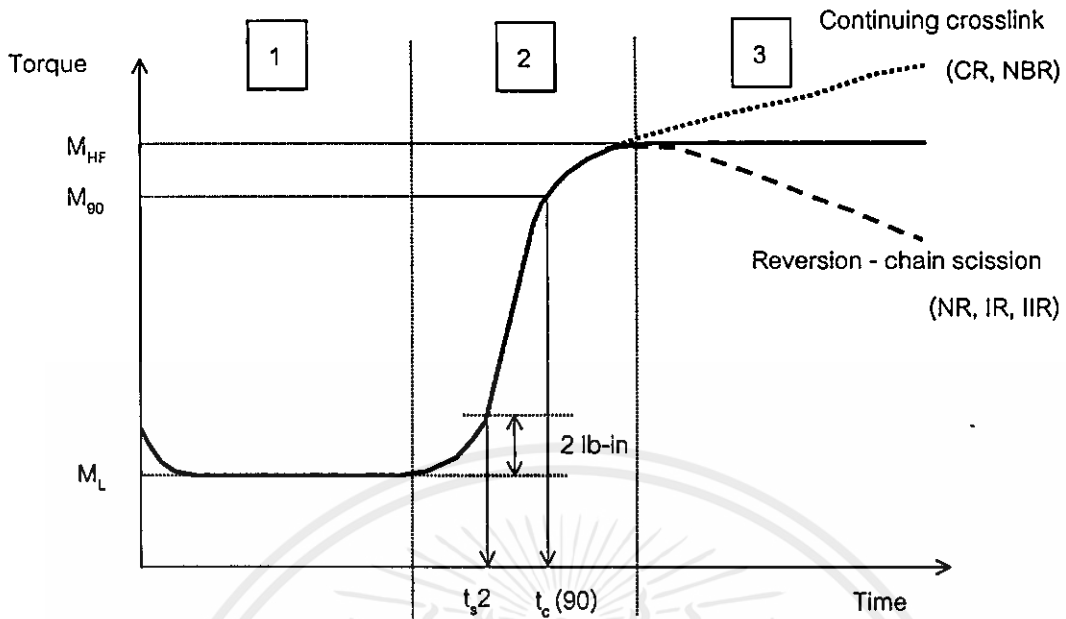


รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง Rotorless curemeter [9]



รูปที่ 2.10 Monsanto moving die rheometer (MDR) เป็น Pressurised rotorless Curemeter [9]

ในการทดสอบยางตัวอย่างจะถูกใส่ในช่องว่างปิด (Cavity) โดยการตัดเป็นแผ่นประกบหุ้มจานโลหะ (Disc) และทำการให้อุณหภูมิที่ทดสอบการเชื่อมโยงของยาง จานโลหะจะหมุนแบบสั้นไปมาแบบที่มุม  $\pm 1, 3$  หรือ  $5$  องศา ตามแนวระนาบ การเชื่อมโยงของสายไซโมเลกุลยางสามารถวัดได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงบิด (Torque) ที่ใช้เพิ่มทำให้การหมุนของจานที่มุมคงที่ เนื่องจากการทดสอบนี้ทำที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแรงบิดอันเนื่องมาจากความหนืด ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้นของแรงบิดตัวอย่างที่เกิดการเชื่อมโยงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุดเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ผลการทดสอบอยู่ในรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งอาจเรียกว่า กราฟรีโอมิเตอร์ (Rheometer chart, รีโอมิกราฟ (Rheograph) หรือกราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟการเชื่อมโยง (Cure cuve)

ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่างๆ ในกราฟการเชื่อมโยงดังนี้

$M_L$  = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

$M_{HF}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

$M_{HR}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)

$M_H$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)

$t_{s2}$  = เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือ "Scorch time" เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว (lb-in) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ )

$M_{90}$  = ค่าแรงบิดที่ 90 % ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L)$$

$t_c(90)$  = เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90 % ( $M_{90}$ ) นิยามเท่ากับเวลาที่เหมาะสมที่สุด ที่ใช้ในการเชื่อมโยงยาง (Optimum cure time)

CRI = ดัชนีแสดงอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index) คำนวณได้จากสมการ

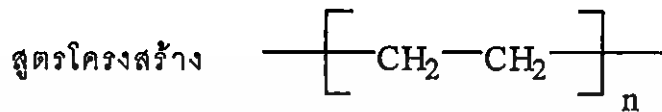
$$\text{Cure rate index (CRI)} = 100 / (t_c(90) - t_{s2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ จากรูปที่ 2.11 ช่วงเวลา  $t_{s2}$  (Scorch time) คือช่วงเวลานี้คือเวลาปลอดภัยที่ผู้ผลิตสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ก่อนที่จะเกิดการเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ จนไม่สามารถขึ้นรูปได้ กล่าวคือขบวนการขึ้นรูปยางใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับกาลของยางจะต้อง

กระทำภายในช่วงเวลานี้ ส่วนเวลา  $t_0(90)$  คือเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางให้มีสมบัติดีที่สุด

## 2.7 พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE)



พอลิเอทิลีน [13] เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์โดยใช้กระบวนการที่แตกต่างกัน ทำให้ได้พอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ที่อุณหภูมิห้องพอลิเอทิลีนไม่ละลายในทำตัวละลายใดๆ แต่ถ้าให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องพอลิเมอร์สามารถพองตัวและละลายได้ใน พารา-ไซลีน (p-Xylene) ไตรคลอโรเบนซีน (Trichlorobenzene) เดคเคน (Decane) และเดคคาลิน (Decalin) ทนต่อกรด ต่าง และ สารออกซิไดส์แต่ไม่ทนกับสภาพแวดล้อม อุณหภูมิสูงและรังสี เมื่อขีดข่วนสามารถเกิดรอยได้ พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุไม่มีขั้วจึงไม่นำไฟฟ้า สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่ได้ 3 แบบ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่ [14]

พอลิเมอร์	โครงสร้างของสายโซ่	ความเป็นผลึก	กระบวนการผลิต	ความหนาแน่น g/cm <sup>3</sup>
LDPE	เชิงเส้น/มีโซ่กิ่งมาก	~50%	ใช้ความดันสูง	0.912-0.94
LLDPE	เชิงเส้น/มีโซ่กิ่งเล็กน้อย	>50%	ใช้ความดันต่ำ	0.92-0.94
HDPE	เชิงเส้น	<90%	ใช้ความดันต่ำ	>0.958

### 2.7.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene; LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเอทิลีนแบบอนุกรมอิสระ โดยใช้ความดันสูง อุณหภูมิ 150-200 °C บางครั้งเรียกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความดันสูง พอลิเมอร์ที่ได้มีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมาก ทำให้พอลิเอทิลีนชนิดนี้มีความเป็นผลึกน้อย ความหนาแน่นต่ำ จุดหลอมเหลวต่ำและมีช่วงกว้าง 80-110 °C มีความอ่อนนุ่ม โค้งงอได้ง่าย ซึ่งมีโครงสร้างของสายโซ่ดังรูปที่ 2.12 ก

### 2.7.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear-Low-Density Polyethylene; LLDPE)

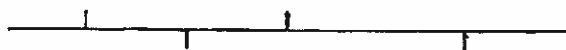
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบ ซิเกลอร์แนททา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลิปป์ (Phillips) โดยใช้ความดันต่ำ ในกระบวนการผลิตมีการใส่โคมอนอเมอร์จำพวก 1-alkene เช่น 1-butene (นิยมใช้มากกว่าและราคาถูก) 1-hexene 1-octene หรือ 4-methylpentene ลงไปประมาณร้อยละ 10 ทำให้มีสายโซ่คาร์บอนสั้นๆ เกิดขึ้นที่พอลิเมอร์หลัก นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ความสม่ำเสมอของโมเลกุลและความเป็นผลึกลดลงสมบัติโดยทั่วไปคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่มีความแข็งแรงมากกว่าจึงนิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม และมีโครงสร้างของสายโซ่ดังรูปที่ 2.12 ข

### 2.7.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE)

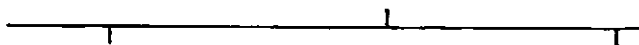
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบ ซิเกลอร์แนททา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลิปป์ (Phillips) หรือ Standard Oil โดยใช้ความดันต่ำ บางครั้งเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ มีโครงสร้างแบบเชิงเส้นที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างสม่ำเสมอมีโซ่กิ่งน้อยและสั้นจึงมีความเป็นผลึกสูง จุดหลอมเหลวสูงประมาณ 120-135 °C เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่น มีความแข็งแรงมากนิยมใช้ในการเป่าขวดและบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ทำฟิล์มทอและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดฉีด มีโครงสร้างของสายโซ่ดังรูปที่ 2.12 ค



(ก) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



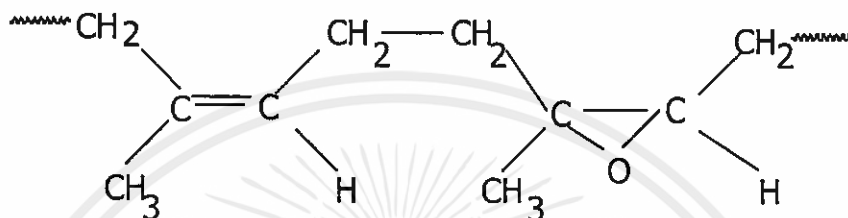
(ข) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน (ค) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ (Epoxydised Natural Rubber; ENR)

ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ เป็นการปรับปรุงให้ยางธรรมชาติมีหมู่อีพอกซี (Epoxy groups) ในโครงสร้างแบบสุ่ม (Random) ในปริมาณที่กำหนด เช่น ENR-10 ENR-25 และ ENR-50 มีหมู่อีพอกซี 10 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล (% mole) ตามลำดับ โครงสร้างของ ENR แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ ENR [10]

ยาง ENR ผลิตโดยการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxydation) นำยางธรรมชาติด้วยตัวออกซิไดส์ (Oxidising agents) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) การทำให้ยางธรรมชาติมีหมู่อีพอกซีเพิ่มมากขึ้นทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเปลี่ยนแปลงดังนี้

- อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) เพิ่มขึ้น (ENR-25 มี  $T_g = -45^\circ\text{C}$  ส่วน ENR 50 มี  $T_g = -20^\circ\text{C}$ )
- ยางหนักขึ้น มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity; SG) สูงขึ้น (ENR-25 มี SG = 0.97 ส่วน ENR 50 มี SG = 1.03)
- ความทนน้ำมัน (Oil resistance) ของยางเพิ่มขึ้น สมบัติคล้ายกับยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber; CR)
- การซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ต่ำลง คล้ายกับยางบิวทิล (Butyl rubber; IIR)
- ความมีขี้ของยางเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกซีที่มีอยู่ในโครงสร้าง มีประโยชน์ในการใช้งานประเภทสารยึดติดหรือกาว (Adhesives) และผลิตพอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) กับพอลิเมอร์ที่มีขี้ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride; PVC)

### วิธีการเตรียม ENR [15]

นำน้ำยางธรรมชาติ (Latex) ที่มีปริมาณยางแห้ง (Dry rubber content; DRC) 60% มา 250 มิลลิลิตร กรองเอาสิ่งสกปรกออก แล้วเติมกรดเทอริก (Teric acid) 3% โดยน้ำหนักของ ปริมาณยางแห้ง ซึ่งกรดเทอริกทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) โดยค่อยๆ ละลายกรด เทอริกด้วยน้ำจนมีปริมาณ 250 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารที่ได้ไป ใส่ใน Reactor ที่อุณหภูมิ 70°C เติมฟีนิลไฮโดรราซีน (Phenylhydrazine) แล้วลดอุณหภูมิให้เหลือ 60°C แบ่งบางส่วนมาตกตะกอนด้วยเมทานอล (Methanol) แล้วนำไปอบ จากนั้นนำไปหา น้ำหนักโมเลกุลโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Viscometer เมื่อได้น้ำหนักโมเลกุลที่ต้องการแล้ว ลด อุณหภูมิใน Reactor ให้เหลือ 50°C เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และ กรดฟอร์มิก (Formic acid) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) นำไปตกตะกอนด้วย เมทานอล แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C

### 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรรณิ [16] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและ พอลิพรอพิลีน โดยมุ่งเน้นที่พัฒนาพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวให้เป็นยางเทอร์โมพลาสติก จึงได้ศึกษา ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวซึ่งได้แก่ ชนิดของพอลิพรอพิลีน ความหนืดของยางธรรมชาติ วิธีการผสม สมบัติของการผสม อัตราส่วนของยางธรรมชาติและ พอลิพรอพิลีน ชนิดและปริมาณของสารเชื่อมโยง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป นอกจากนี้ยัง ได้ศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว และการคอมปาวด์ พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวนี้เพื่อนำไปใช้งานด้านการทำพื้นรองเท้า

จากการศึกษาพบว่า การเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีควรใช้พอลิพรอพิลีนชนิดที่เป็นพอลิเมอร์รวม และยางธรรมชาติ TTR 5L การผสม ควรทำที่อุณหภูมิ 175 °C โดยการหลอมพอลิพรอพิลีนก่อนใส่ยางธรรมชาติ แล้วจึงผสมต่อ ประมาณ 5-7 นาที ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน พอลิเมอร์ผสมมี ความแข็งแรงและแสดงความเป็นยางถ้ามีการเชื่อมโยงเกิดขึ้น และพบว่า DCP เป็นสารเชื่อมโยง โมเลกุลที่ดีกว่า HVA-2 (m-Phenylene bismaleimide) แต่ให้ผลในทางกลับกันต่อ Aging properties แต่สามารถแก้ไขได้โดยปรับส่วนผสมของ DCP และ HVA-2

เอกสาร... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฤตย์ [17] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน โดยมุ่งเน้นเกี่ยวกับวิธีการผสม ชนิดและอัตราส่วนของสารเชื่อมโยงโมเลกุล เพื่อพัฒนาสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมนี้สำหรับอุตสาหกรรม

เมื่อพิจารณาถึงการใช้งาน และความสามารถในการผลิต ผลการศึกษาพบว่า การปรับค่าความหนืดของยางธรรมชาติ โดยวิธีนวดในลูกกลิ้งก่อนนำไปผสมกับพอลิพรอพิลีน ทำให้ของผสมผสมเข้ากันง่ายขึ้น แต่วิธีดังกล่าวไม่สมควรใช้เป็นวิธีการมาตรฐาน เพราะสมบัติทางกายภาพลดลงอย่างมาก และพบว่า การตั้งอุณหภูมิการผสมที่  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  และความเร็วรอบของโรเตอร์ (Rotor) เครื่องผสมที่ 80 รอบต่อนาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดผลความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพในสองทิศทางที่เนื่องจากการรีดเป็นแผ่นด้วยลูกกลิ้งหลังการผสม ทำได้โดยการวางแผ่นขึ้นงานสลับทิศทางให้ตั้งฉากกันเมื่ออัดขึ้นรูปร้อน

ผลการศึกษาการเปรียบเทียบพอลิพรอพิลีนโคพอลิเมอร์กับพอลิพรอพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ผสมกับยางธรรมชาติในอัตราส่วนของ ยาง / พอลิพรอพิลีน 60:40 และ 70:30 โดยใช้สารเชื่อมโยงโมเลกุลชนิดต่างๆ พบว่าให้สมบัติทางกายภาพที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการเลือกใช้สารเชื่อมโยงไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) 0.5 phr ร่วมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) 5.0 phr ให้สมบัติทางกายภาพของของผสมได้ดีที่สุดโดยปรับค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น 2 เท่า การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า Tension set ลดลง 2.5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับของผสมที่ไม่ใช้สารเชื่อมโยง

Al-Malaika และ Amir [18] ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะกระบวนการและรูปแบบของการผสม ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของส่วนประกอบที่แตกต่างของยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน ทำการศึกษาโดยการใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) 0.3 phr ในการผสมยางธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีนที่อัตราส่วน 60:40 ภายใต้สภาวะกระบวนการที่เหมาะสม เป็นผลทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยการผสมด้วยเครื่องอัดราแรงเขื่อนสูง (Bass-Ko kneader) ให้การผสมและสมบัติเชิงกลเริ่มต้นที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องผสมที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป (Hampden- RAPRA Torque Rheometer) จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิระหว่าง  $160\text{-}180\text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่า การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มีค่าลดลง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ

Yin และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาโดยการนำพอลิเมอร์ร่วมของพอลิเอทิลีนกับพอลิไอโซพรีนแบบโอบลิค (Polyethylene-b-polyisoprene; PE-b-PI) มาใช้เป็นสารช่วยผสม (Compatibiliser) ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดเชิงเส้น

(LLDPE) โดยสารช่วยผสมดังกล่าว ประกอบด้วยส่วนของโครงสร้างพอลิเอทิลีนและพอลิโอไซพรีนที่สามารถเกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับพลาสติกและยาง ความสามารถในการเข้ากันได้ของ NR และ LLDPE สามารถหาได้จากสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา และสถานะการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการผสม จากการศึกษาด้วย SEM และ TEM พบว่าการเพิ่มสารช่วยผสม PE-b-PI แสดงถึงการเกี่ยวพันของวัฏภาคระหว่าง NR และ LLDPE ที่มีการยึดติดระหว่าง 2 วัฏภาคดีขึ้น นอกจากนั้น สารช่วยผสมทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น และการเข้ากันได้ของยางกับพลาสติกดีขึ้น ถ้าใช้สารช่วยผสมมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น

Dahlan และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยการใช้ยางธรรมชาติเหลวเป็นสารช่วยผสม ซึ่งใช้ LNR 15% ของปริมาณยางแห้ง โดยทำการผสมในเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder) อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม  $135^{\circ}\text{C}$  และความเร็วรอบของโรเตอร์ 55 รอบต่อนาที ทำการผสมโดยเติมยางลงในเครื่องผสมก่อนเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นจึงเติม LNR ลงไปผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที ก่อนที่จะเติม LLDPE ลงไป ใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 15 นาที โดยใช้เครื่อง Gel permeation chromatograph; GPC จากผลการทดลองพบว่า LNR ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คือ  $M_w 4.8 \times 10^5$  และ  $M_n 1.66 \times 10^5$  เตรียมได้จาก UV radiation 6 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงที่สุดเท่ากับ 7.3 MPa และ 592% ตามลำดับ ถ้าเพิ่มปริมาณ LNR มากกว่านี้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดจาก LNR ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะมีพื้นที่ระหว่างวัฏภาค (Interphasing area) มาก ส่งผลให้เกิดการยึดติดเชิงกายภาพ ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของเมทริกซ์ได้ง่าย

Mousa และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic crosslink) ของพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) กับยางธรรมชาติชนิดอีพอกซิไดซ์ (Epoxidised natural rubber; ENR) โดยการผสม PVC ที่อยู่ในรูปของผงกับ ENR ในเครื่องบราเบนเดอร์ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  และความเร็วรอบ 50 rpm และใช้เวลาผสม 8 นาที จากนั้นเติมสารเชื่อมโยงก้ำมะถันและผสมต่อไป ที่ความเร็วรอบ 30 rpm จนค่าทอร์กมีค่าคงที่ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร และนำแผ่นผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตัดและนำไปผสมอีกครั้งด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ที่ความเร็วรอบ 50 rpm เป็นเวลา 2 นาที และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปรีออน จากผลทดลองพบว่า เมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงก้ำมะถันเพิ่มขึ้น ค่าทอร์กมีค่าสูงขึ้น

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE / MFI = 7) เกรด ฉีดขึ้นรูป (LD1807F) จากบริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงดังตารางที่ 3.1
2. ยางธรรมชาติชนิดแผ่นรมควันชั้นสอง (2-Grade Ribbed smoke sheet; RSS) จากสวนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
3. กรดสเตียริก (Stearic acid; SA) จากบริษัท Aldrich Co.,Ltd.
4. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) จากบริษัท Aldrich Co.,Ltd.
5. เฮอร์กานอกซ์ (Irganox 1010) จากบริษัท Ceba-Kike Co.,Ltd.
6. พอลิเอทิลีนแว็กซ์ (PE Wax) จากบริษัท P&M Associate Co.,Ltd
7. สารเร่ง CBS (N-cyclohexyl-benzothiazole-2-sulphenamide) จากบริษัท P&M Associate Co.,Ltd.
8. กำมะถัน (Sulphur; S) จากบริษัท Aldrich Co.,Ltd.
9. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) จากบริษัท Aldrich Co.,Ltd.
10. สารช่วยผสมยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidised Natural Rubber; ENR)

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่ง
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) จากบริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น FC 209
3. เครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอร์เตอร์ (Brabender Plasticorder) จากบริษัท C. melchers & Corporation
4. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression moulding machine) จากบริษัท Welltec Industrial Equipment Ltd. จำกัด รุ่น LP 20
5. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากบริษัท แลบทศเอ็นจีเนียริง จำกัด รุ่น LRM 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด

6. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection moulding machine) จากบริษัท Welte Industrial Equipment Co.,Ltd.
7. เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Curelasmeter) จากบริษัท Nichigo Shigi รุ่น II F
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) จากบริษัท Intro LLOYD Instruments จำกัด
9. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester) จากบริษัท Intro Enterprise จำกัด
10. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC (Differential Scanning Calorimeter) จากบริษัท Perkin elmer จำกัด
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5410
12. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyser) จากบริษัท Rheometric Scientific จำกัด รุ่น DMTA-V
13. ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven) บริษัท Hotpack corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

สมบัติ	หน่วย	ค่า	วิธีการทดลอง
ดรรชนีการไหล (MFI) (Melt flow index)	กรัม/10 นาที	7.0	ASTM D 1238
ความหนาแน่น (Density)	กรัม/ลบ.ซม.	0.920	ASTM D 1505
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	กก./ตร.ซม.	110	ASTM D 638
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	500	ASTM D 638
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	กก./ตร.ซม.	1,650	ASTM D 790
ความแข็งกด (Shore A) (Hardness)	-	48	ASTM D 2240
จุดหลอมเหลว ( $T_m$ ) (Melting point)	องศาเซลเซียส	106	ASTM D 2117
จุดอ่อนตัว (HDT) (Softening point)	องศาเซลเซียส	90	ASTM D 1525

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การศึกษาหาสภาวะการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

3.3.1.1 ศึกษาหาอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

1. นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาชั่งน้ำหนักให้ได้ 6-8 มิลลิกรัม
2. ทำการศึกษาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180 °C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น
3. นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมผลึก ( $T_m$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

3.3.1.2 ศึกษาหาเวลาในการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์

1. ชั่งพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ประมาณ 50 กรัม
2. นำมาใส่ลงในเครื่องผสมบราเบนเดอร์
3. ทำการศึกษาที่ช่วงอุณหภูมิ 140-160 °C ที่ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที
4. นำผลที่ได้มาหาเวลาที่ทำให้พอลิเอทิลีนหลอมเหลวหมด

#### 3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตร

ทำการเตรียมยางผสมสูตร ซึ่งศึกษาระบบการเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 2 ระบบใหญ่ โดยระบบที่ 1 ศึกษาการเชื่อมโยงของกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (CBS) ส่วนระบบที่ 2 ศึกษาการเชื่อมโยงของไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) ทำการผสมดังนี้

1. ตัดยางและขังสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 3.2 เพื่อทำการหาสูตรที่เหมาะสมในการผสม
2. ทำการผสมยางผสมสูตร

เริ่มจากการนำยางธรรมชาติมาบดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง จนกระทั่งยางพันเป็นแถบติดลูกกลิ้งเต็มพอลิเอทิลีนแวกซ์ กรดสเตียริก ซิงค์ออกไซด์ และสารเออร์คิวทอนอกซ์ หลังจากนั้นผสมให้เข้ากันต้องมีกรรตียางและกลับหน้ายางตลอดเวลาในการผสม โดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 10 นาที

จากนั้นเติมสารผสมส่วนสุดท้าย ซึ่งประกอบด้วยสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยงคือ กำมะถัน และสารเร่ง CBS ลงไป (สำหรับระบบที่ 1) หรือใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (สำหรับระบบที่ 2) และใช้เวลาในการผสมอีกประมาณ 5 นาที

3. นำยางธรรมชาติผสมสูตรที่ได้มาทดสอบสมบัติในการสุกตัวของยางผสมสูตร โดยใช้เครื่องวัดสมบัติการคงรูป (Curelaster) โดยศึกษาที่อุณหภูมิช่วงระหว่าง  $140^{\circ}\text{C}$  -  $160^{\circ}\text{C}$  เพื่อหา Scorch time และ Cure time

ตารางที่ 3.2 สูตรที่ใช้ในการศึกษาเตรียมยางผสมสูตร

สาร	phr (ส่วนในร้อยละของยาง)	
	ระบบที่ 1	ระบบที่ 2
ยางธรรมชาติ	100	100
เออร์แกนอกซ์	1	1
พอลิเอทิลีนแว็กซ์	1	1
กรดสเตียริก	3	—
ซิงค์ออกไซด์	5	—
สารตัวเร่ง CBS	ช่วง 0.5-1.5	—
กำมะถัน	ช่วง 2-4	—
ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP)	—	ช่วง 0.5-2

### 3.3.3 การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

1. ชั่งยางธรรมชาติผสมสูตรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่อัตราส่วนการผสม 50/50 60/40 และ 70/30 โดยนำมาผสมในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ โดยทำการศึกษหาอุณหภูมิ เวลา และความเร็วรอบในการผสมที่เหมาะสม
2. ทำการใส่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำลงในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ ก่อนยาง ตามเวลาที่หาได้จากข้อ 3.3.1.2
3. จากนั้นใส่ยางธรรมชาติผสมสูตร โดยใช้เวลาในการผสมให้อยู่ในช่วงเวลาไม่เกิน Scorch time ที่ได้จากเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง
4. นำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ได้มาวัดการเชื่อมโยง โดยใช้เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Curelaster)

5. นำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เหลือ มาบดแล้วทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding machine) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding machine)
6. ทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 5 นาที
7. ทำการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้สภาวะตามในภาคผนวก ค ซึ่งในกระบวนการฉีดขึ้นรูปทำการฉีดขึ้นรูปซ้ำอีก 2 ครั้ง
8. นำชิ้นงานที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปของทั้ง 2 กระบวนการไปทดสอบ

### 3.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำสารตัวอย่างที่ได้มาทดสอบหาสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.3.4.1 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) โดยกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้ (ASTM D 638) [22]

- สภาวะที่ใช้กับ TPNR ที่ได้จากการบวนการอัดขึ้นรูป

ความเร็วในการดึง	100	มิลลิเมตรต่อนาที
ความยาวเกจ (Gauge length)	50	มิลลิเมตร
Load cell ที่ใช้	30	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ	5	ชิ้นงาน

- สภาวะที่ใช้กับ TPNR ที่ได้จากการบวนการฉีดขึ้นรูป

ความเร็วในการดึง	100	มิลลิเมตรต่อนาที
ความยาวเกจ (Gauge length)	70	มิลลิเมตร
Load cell ที่ใช้	30	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ	5	ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้จะนำมาหาค่าต่างๆ ดังนี้

1. ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง} = F/A \quad (3.1)$$

เมื่อ  $F =$  แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดขาด (N)

$A =$  พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำแนะนำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{ค่า \% การยืด ณ จุดขาด} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $L$  = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน ณ จุดขาด (mm)

$L_0$  = ความยาวเริ่มต้นก่อนการดึง (mm) หรือความยาวเกจ

3. ค่าความยืดหยุ่นของมอดุลัส (Modulus of elasticity) คืออัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดในช่วง Proportional limit หรือช่วงที่ความเค้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเครียด (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) ที่ความเครียด 3 % หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าความยืดหยุ่นของมอดุลัส} = \text{ความเค้น/ความเครียด} \quad (3.3)$$

3.3.4.2 ทดสอบความแข็งกต (Hardness) โดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกตแบบน้ำหนักคงที่ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D 2240 วัดค่าความแข็งกตได้โดยตรงจากเครื่อง [23]

จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ	5	ชิ้นงาน
กตเป็นเวลา	5	วินาที
อุณหภูมิทดสอบ	25	องศาเซลเซียส

3.3.4.3 ทดสอบสมบัติการเชื่อมโยง โดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาทดสอบด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Curelaster) ที่อุณหภูมิใช้ในการผสมของแต่ละสูตร และทำการหา Scorch time ( $t_{s2}$ ) และ Cure time ( $t_c(90)$ )

### 3.3.5 การหาเปอร์เซ็นต์เจล (%Gel)

1. โดยนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาตัดให้มีขนาด  $4 \times 8 \times 2$  มิลลิเมตร แล้วนำมาใส่ในถุงอะลูมิเนียมขนาดเล็ก และนำถุงอะลูมิเนียมที่มีสารตัวอย่างมาซึ่งน้ำหนักก่อน

2. นำถุงอะลูมิเนียมที่มีสารตัวอย่างมาแช่ในตัวทำละลายไซลีน (Xylene) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Thermostat ในการควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3. นำถุงอะลูมิเนียมที่มีการแช่โซลีนมาอบด้วยเครื่องอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่ และทำการชั่งน้ำหนัก
4. นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เจลดังนี้ (ASTM D3616) [24]

$$\text{เปอร์เซ็นต์เจล (\%Gel)} = \left( \frac{W}{W_1} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

$W_1$  = น้ำหนักสารและถุงอะลูมิเนียมก่อนแช่โซลีน

$W$  = น้ำหนักสารและถุงอะลูมิเนียมหลังแช่โซลีนเมื่อทำการอบแล้ว

### 3.3.6 ทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยดูจากภาพตัดขวางและลักษณะพื้นผิวของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

1. เตรียมตัวอย่างโดยการนำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ได้ด้วยการแตกหักที่อุณหภูมิ ต่ำ (Cryogenic crack) โดยแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวประมาณ 5 นาที แล้วหักชิ้นงานเป็นชิ้น เล็กๆ จากนั้นนำสกัดด้วยโซลีน (Xylene) เพื่อสกัดวัฏภาคของพลาสติกที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการสกัด 5 วินาที

2. นำตัวอย่างที่ได้ไปอบด้วยเครื่องอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำแล้วนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปศึกษาด้วยเครื่อง SEM

### 3.3.7 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA

การเตรียมชิ้นงานจะนำตัวอย่างมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้วนำไปเข้าเครื่อง DMTA โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

ขนาดของชิ้นงานโดยประมาณ	6 x 25 x 2.5	มิลลิเมตร
รูปแบบในการทดสอบ	Single cantilever bending geometry	
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน (Frame)	Medium Frame	
ความถี่	1	เฮิรตซ์ (Hz)
อุณหภูมิ	-100 ถึง 50	องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate)	3	องศาเซลเซียส/นาที

โดยค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) และค่า  $\tan \delta$  สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$E' = E^* \cos \delta \quad (3.5)$$

$$E'' = E^* \sin \delta \quad (3.6)$$

$$\tan \delta = E'' / E' \quad (3.7)$$

$E'$  = มอดุลัสสะสม (Storage modulus)

$E''$  = มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus)

$E^*$  = คอมเพล็กซ์มอดุลัส (Complex modulus)

$\tan \delta$  = ความสามารถในการกระจายพลังงาน

### 3.3.8 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

โดยใช้สภาวะการทดลองดังนี้

ชั่งตัวอย่างประมาณ	6-8	มิลลิเมตร
อุณหภูมิ	40-180	องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate)	10	องศาเซลเซียส/นาที

นำมาหาค่าจุดหลอม ( $T_m$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของพอลิเอทิลีนในเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้

คำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนใน TPNR ที่อัตราส่วนการผสม LDPE : NR เท่ากับ 50 : 50 จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f / 0.5}{\Delta H_f^0} \quad (3.8)$$

$\Delta H_f$  = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนตัวอย่าง (J/g) โดยขั้นตอนการคำนวณ

$\Delta H_f^0$  = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนที่มี

ความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [25]

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งการศึกษาอย่างธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (TPNR) ที่เชื่อมโยงแตกต่างกันออกเป็นสองระบบ โดยระบบแรกทำการศึกษาอย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กำมะถัน (Sulphur; S) เป็นสารเชื่อมโยง และระบบที่สองทำการศึกษาอย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) เป็นสารเชื่อมโยง จากนั้นนำ TPNR ที่เตรียมได้จากทั้งสองระบบมาศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษา TPNR ที่เตรียมโดยใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง

##### 4.1.1 การศึกษาสภาวะในการหลอมเหลวของ LDPE

ในการผสมยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก การผสมจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อทำการหลอมเหลว LDPE ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมก่อนทำการผสมยางธรรมชาติ ดังนั้นในช่วงแรกของการศึกษา จึงเป็นการศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวของ LDPE

###### 4.1.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE

การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) จากผลการทดลองพบว่า LDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอุณหภูมิการหลอมเหลว ประมาณ  $107\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ภาคผนวก ก) จากนั้นเราจะนำ LDPE ไปหาเวลาในการหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง  $140\text{-}160\text{ }^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง LDPE มีความหนืดลดลง อาจทำให้การผสมระหว่าง LDPE และยางผสมสูตรดีขึ้น และในกระบวนการขึ้นรูปยางนิยมใช้ช่วงอุณหภูมินี้

###### 4.1.1.2 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE

การศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE ซึ่งศึกษาช่วงอุณหภูมิระหว่าง  $140\text{-}160\text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการ

หลอมเหลว LDPE อยู่ในช่วงระหว่าง 1.0-1.7 นาที ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 และภาคผนวก ข ดังนั้นในขั้นตอนการผสม LDPE กับยางธรรมชาติผสมสูตรในบราเวนเดอร์ จึงทำการใส่ LDPE เพื่อให้เกิดการหลอมเหลวก่อนประมาณ 2 นาที แล้วจึงเติมยางธรรมชาติผสมสูตร ซึ่งเป็นเวลาที่คาดว่า LDPE สามารถเกิดการหลอมเหลวได้หมดก่อนเกิดการผสมกับยางธรรมชาติผสมสูตร

ตารางที่ 4.1 เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE ในเครื่องบราเวนเดอร์

อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว (นาที)
140	1.7
150	1.2
160	1.0

#### 4.1.2 การศึกษาทางผสมสูตรที่เหมาะสม

จากการศึกษาสภาวะการหลอมเหลวของ LDPE ในช่วงแรก ทำให้ทราบอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวของ LDPE โดยนำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการผสมกับยางผสมสูตรที่เหมาะสม ซึ่งการหาทางผสมสูตรที่เหมาะสมทำได้โดยการศึกษาปริมาณกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง CBS ที่เหมาะสมในยางผสมสูตร เพื่อหาเวลาก่อนการเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) ที่นานเพียงพอเพื่อให้ง่ายเกิดการหลอมเหลวผสมกับ LDPE ก่อนที่ง่ายเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสมบูรณ์

##### 4.1.2.1 การศึกษาปริมาณกำมะถันที่เหมาะสมในยางผสมสูตร

การศึกษาปริมาณกำมะถันที่ใช้ผสมสูตรในยางธรรมชาติด้วยเครื่อง Curelaster® ซึ่งเป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยง แบบไม่มีจานหมุน (Rotorless curemeters) โดยศึกษาปริมาณกำมะถันอยู่ในช่วงระหว่าง 2-4 phr และใช้ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา CBS ที่คงที่ในแต่ละสูตร 1.0 phr ซึ่งทำการศึกษาอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 140-160 °C จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้ปริมาณกำมะถันคงที่ ที่อุณหภูมิ 140-160 °C พบว่าค่า Scorch time ( $t_{2}$ ) และ Cure time ( $t_{c}(90)$ ) มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น ยางผสมสูตรเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการคงรูปสั้นลง

และเมื่อทำการศึกษาที่อุณหภูมิคงที่ โดยใช้ปริมาณกำมะถันช่วงระหว่าง 2-4 phr พบว่าที่ปริมาณกำมะถันแตกต่างกันไม่ทำให้ค่า Scorch time และ Cure time ซึ่งเป็นระยะเวลาในการ

คงรูปเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากที่อุณหภูมิคงที่ ระยะเวลาในการคงรูปไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ค่า Scorch time ลดลงเล็กน้อย [9] ทำให้ระยะเวลาในการคงรูปมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2-4.4 เนื่องจากผลการทดลองพบว่าอย่างผสมสูตรแต่ละสูตรให้ค่า Scorch time และ Cure time ที่เวลาใกล้เคียงกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นจึงเลือกอย่างผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 3 phr เพื่อทำการศึกษหาปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา CBS ที่เหมาะสมต่อไป สาเหตุที่เลือกปริมาณกำมะถันนี้ เนื่องจากถ้าใส่ปริมาณกำมะถันน้อยอาจทำให้ยางผสมสูตรมีความแข็งแรงดีและมอดุลัสต่ำ และถ้าใส่ปริมาณกำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการบวม (Bloom) ของกำมะถัน

ตารางที่ 4.2 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 2 phr และปริมาณ CBS 1.0 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Time (min)	
	Scorch time	Cure time
140	4.4	11.5
150	2.0	6.4
160	1.1	3.4

ตารางที่ 4.3 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 3 phr และปริมาณ CBS 1.0 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Time (min)	
	Scorch time	Cure time
140	4.2	10.4
150	2.4	6.1
160	1.3	3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 4 phr และปริมาณ CBS 1.0 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Time (min)	
	Scorch time	Cure time
140	4.3	12.0
150	2.4	7.0
160	1.4	4.3

#### 4.1.2.2 การศึกษาปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา CBS ที่เหมาะสมในยางผสมสูตร

จากผลการทดลองข้างต้น เราเลือกใช้ปริมาณกำมะถัน 3 phr จากนั้นได้ทำการศึกษากำมะถัน ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา CBS ในช่วงระหว่าง 0.5-1.5 phr เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการผสม TPNR จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิคงที่ โดยมีปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา CBS เพิ่มขึ้น ให้ระยะเวลาในการคงรูปลดลง เนื่องจากปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา CBS ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ไปกระตุ้นยางเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น ดังนั้นทำให้ระยะเวลาในการคงรูปสั้นลง และที่อุณหภูมิต่ำอย่างกับพลาสติกมีความหนืดสูง ทำให้การผสมระหว่าง LDPE กับ NR ไม่ได้ และที่อุณหภูมิสูงขึ้น Scorch time มีเวลาที่สั้น เนื่องจากเกิดการแตกตัวของกำมะถัน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างรวดเร็ว

ในงานวิจัยนี้จะจึงเลือกสภาวะ ที่ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา CBS 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 150 °C เนื่องจากให้ค่าระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม กล่าวคือมี Scorch time ประมาณ 3.30 นาที ซึ่งคาดว่าจะทำให้ LDPE สามารถเกิดการผสมรวมกับยาง ก่อนที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น และ Cure time ประมาณ 10.30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่ทำให้ TPNR ที่เตรียมได้เกิดการเชื่อมโยง 100 % ในขณะขึ้นรูป

ตารางที่ 4.5 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถัน 3 phr โดยมีปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา CBS ช่วงระหว่าง 0.5-1.5 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Accelerator CBS (phr)	Time (min)	
		Scorch time	Cure time
140	0.5	6.1	20.0
	1.0	4.2	10.4
	1.5	4.0	9.1
150	0.5	3.3	10.3
	1.0	2.4	6.1
	1.5	2.1	4.4
160	0.5	2.0	5.4
	1.0	1.3	3.4
	1.5	1.2	3.0

#### 4.1.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR จากกระบวนการอัดขึ้นรูป

##### 4.1.3.1 การศึกษาอัตราส่วนของ TPNR

การเตรียม TPNR จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ในอัตราส่วนต่างๆกัน คือ 50/50 60/40 และ 70/30 (NR/LDPE) จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจาก LDPE เป็นพลาสติกมีความสามารถในการรับแรงดึง หรือมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุจำพวกยางที่มีการเชื่อมโยงเพียงบางส่วนมีความแข็งแรงดึงต่ำกว่า ดังนั้นการลดปริมาณอัตราส่วนของ LDPE ต่อยางธรรมชาติทำให้ความแข็งแรงดึงของวัสดุโดยรวมต่ำลง ดังรูปที่ 4.1

จากการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR ที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางธรรมชาติ ทำให้ TPNR ที่เตรียมได้แสดงลักษณะที่เหมือนยางซึ่งมีการเชื่อมโยงโครงร่างแหสามมิติ จึงเพิ่มความสามารถในการยืดให้กับพอลิเมอร์ผสมทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.2

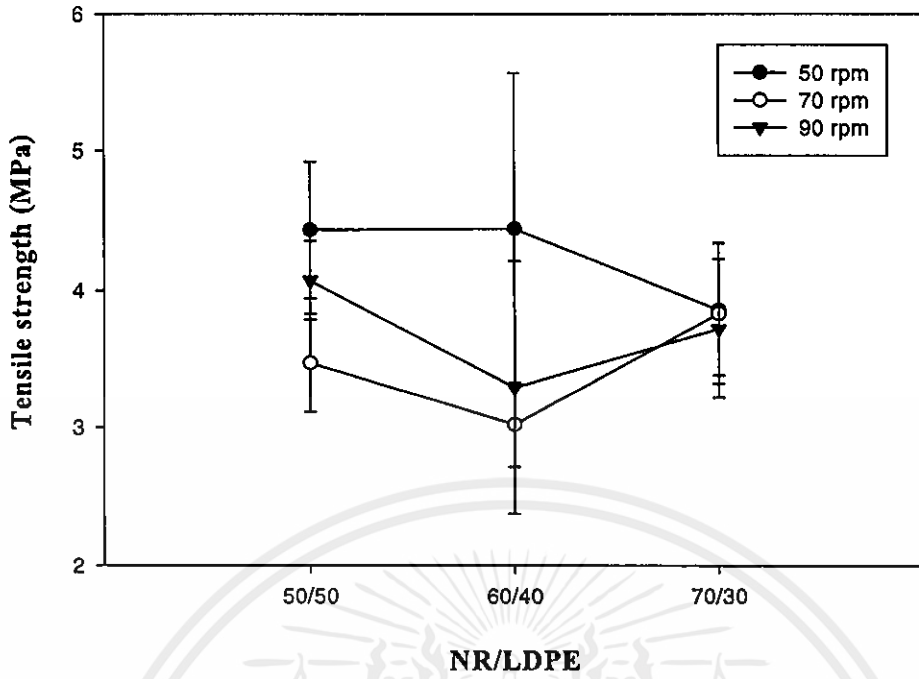
พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) มีค่าเท่ากับงานที่ใช้ในการดึงยึดจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก (Work done) จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ค่างานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงได้ว่าต้อง

ใช้พลังงานจำนวนมากที่ทำให้วัสดุในการทำให้เกิดการแตกหัก เนื่องจากยางที่มีการเชื่อมโยงโครงร่างแหสามมิติจึงทนต่อการแตกหัก ดังรูปที่ 4.3

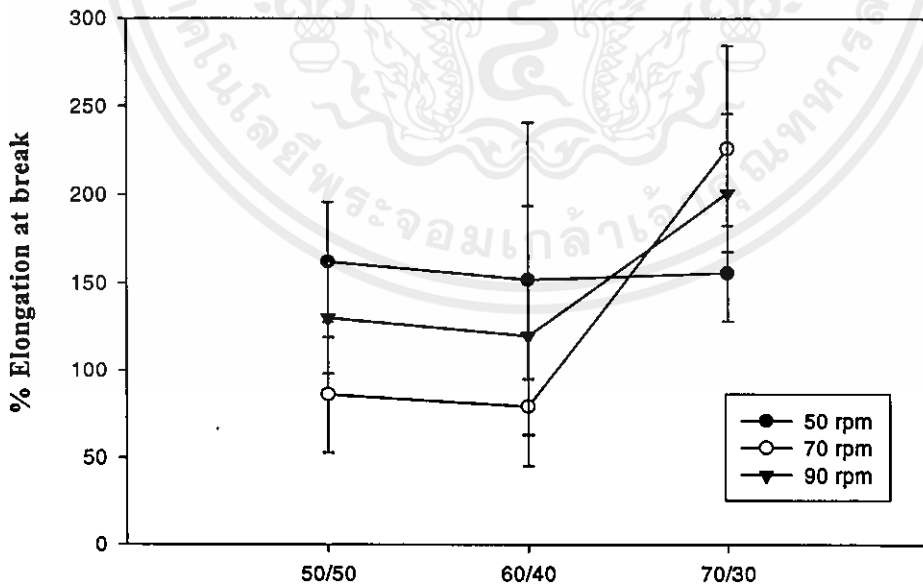
มอดุลัสเป็นค่าที่บอกความแข็งของพอลิเมอร์ โดยหาได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ค่ามอดุลัสที่รายงานในงานวิจัยนี้ คือมอดุลัส ณ ตำแหน่งความเครียด 3% จากผลการทดลองพบว่า ค่ามอดุลัสมีแนวโน้มสอดคล้องไปทางเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง คือ เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามอดุลัสมีค่าลดลง เนื่องจาก LDPE ที่เป็นพลาสติกมีความสามารถในการรับแรงดึง หรือมีค่ามอดุลัสสูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุจำพวกยางที่มีการเชื่อมโยงเพียงบางส่วน ซึ่งมีความแข็งแรงดึงต่ำกว่า ดังนั้นการลดปริมาณอัตราส่วนของ LDPE ต่อยางธรรมชาติ ทำให้ค่ามอดุลัสของวัสดุโดยรวมต่ำลง ดังรูปที่ 4.4

#### 4.1.3.2 การศึกษาความเร็วรอบของโรเตอร์ที่เหมาะสมจากเครื่องบราเบนเดอร์

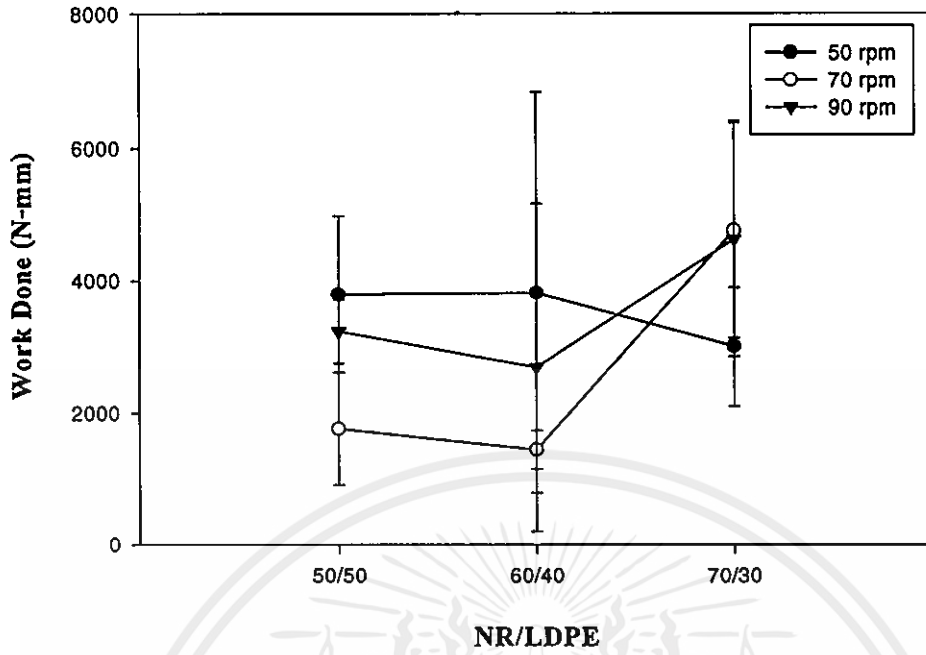
จากการเตรียม TPNR จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยเครื่องผสมแบบปิดหรือบราเบนเดอร์ ที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ (Roter speed) ตั้งแต่ 50 70 และ 90 รอบต่อนาที จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตร จากผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรนั้นมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ทั้งอาจเนื่องมาจากแรงเค้นเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบของโรเตอร์ทำให้ยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สามารถกระจายตัวเข้ากันได้ดี แต่เมื่อใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์สูงขึ้นสมบัติเชิงกลด้อยลง อาจเนื่องมาจากผลของแรงเหวี่ยง หรือการลื่นไถล (Slip) ของโรเตอร์กับของผสม เนื่องจากในยางผสมสูตรมีกรดสเตียริกซึ่งเป็นสารหล่อลื่น [26] ทำให้มีการผสมและการกระจายตัวไม่ดี ดังรูปที่ 4.1-4.4 ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เพื่อใช้ผสม LDPE กับ NR ในเครื่องบราเบนเดอร์ ก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป (การอัดขึ้นรูปและการฉีดขึ้นรูป)



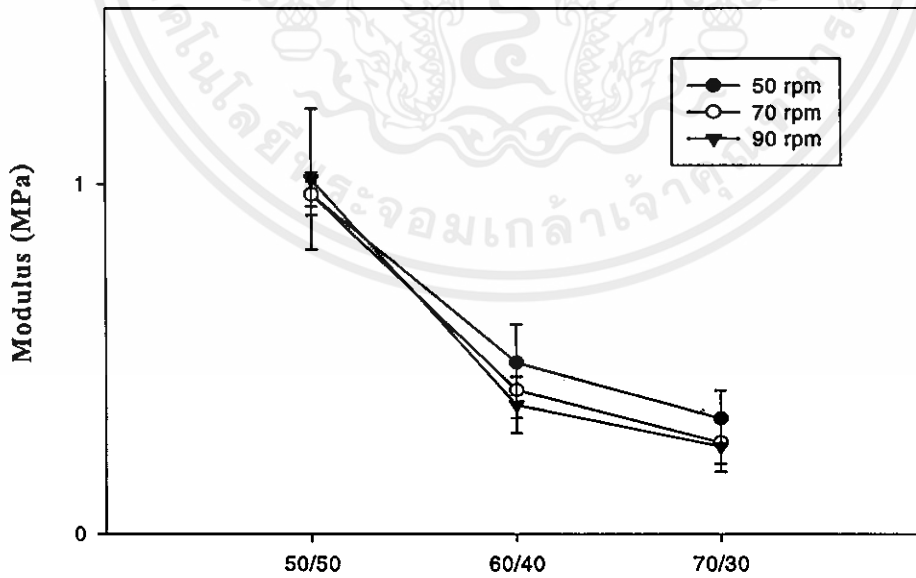
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วรอบต่างๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วรอบต่างๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างงานที่ทำให้แตกของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อผสมที่ความเร็วรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

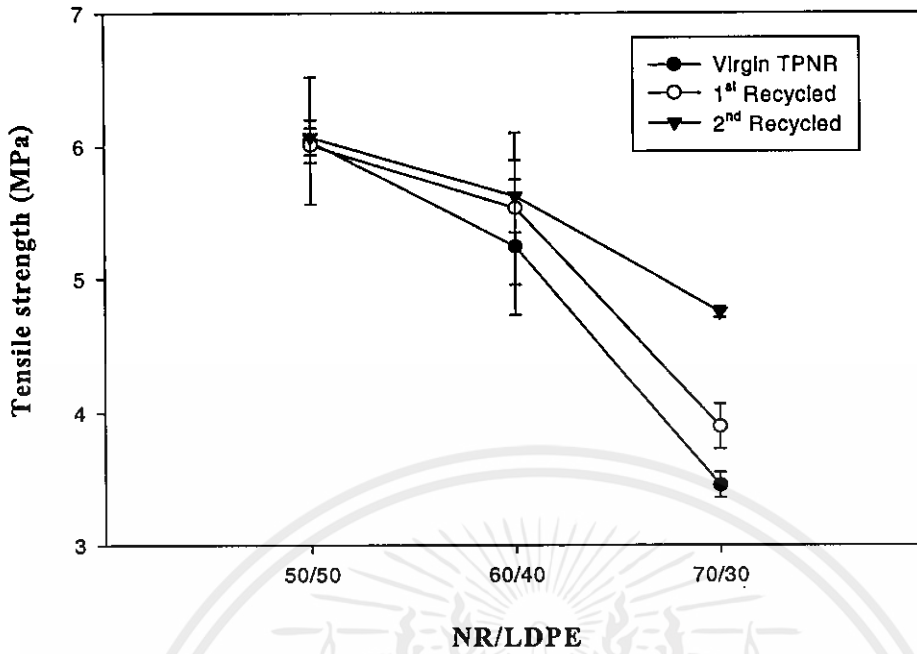
#### 4.1.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้ทำการศึกษาผลของการนำกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิล (Recycle) โดยการฉีดขึ้นรูปซ้ำเป็นจำนวนสองครั้ง เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลที่ได้ โดยนำยางผสมสูตรที่เตรียมได้ไปผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้สภาวะดังภาคผนวก ค

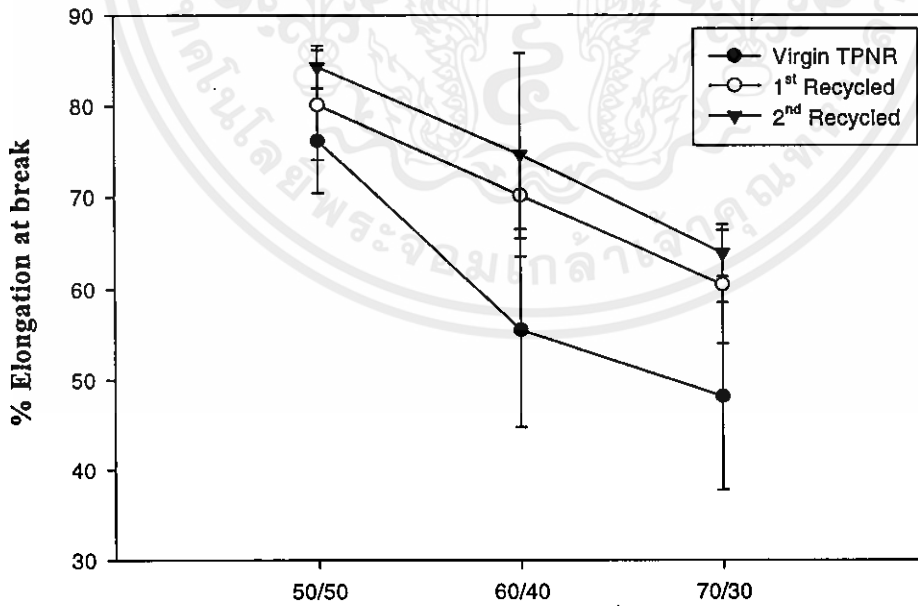
จากการทดลองสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงกดมีค่าลดลง เนื่องจาก LDPE เป็นพลาสติก มีความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุจำพวกยางที่มีการเชื่อมโยงเพียงบางส่วนมีความแข็งแรงดึงต่ำกว่า ดังนั้นการลดปริมาณอัตราส่วนของ LDPE ต่อยางธรรมชาติทำให้ความแข็งแรงดึงของวัสดุโดยรวมลดลง ดังรูปที่ 4.5 และ 4.8-4.9

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักของ TPNR มีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปใช้เวลาในการฉีดขึ้นรูปที่เร็ว ทำให้วัฏภาคของยางยังไม่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแหสามมิติสมบูรณ์

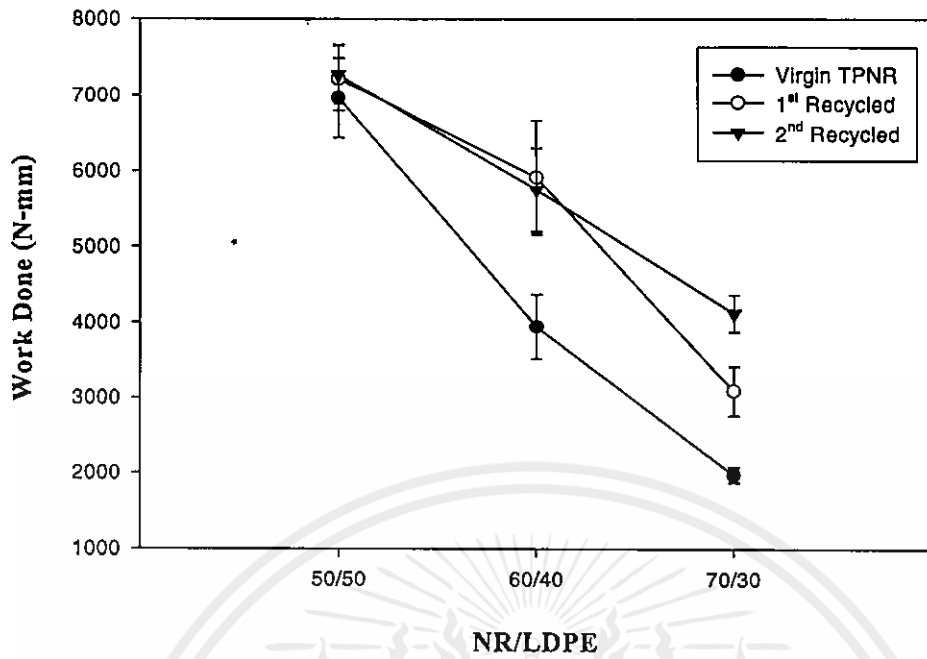
จากผลการทดลองของการรีไซเคิล พบว่า TPNR ที่เตรียมได้มีแนวโน้มของสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปครั้งแรกใช้เวลาในการฉีดขึ้นรูปที่เร็ว ทำให้วัฏภาคของยางยังไม่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแหสามมิติอย่างสมบูรณ์ เมื่อทำการรีไซเคิล ทำให้ของผสมได้รับความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้น และวัฏภาคของยางเกิดการเชื่อมโยงโครงร่างแหสามมิติมากขึ้น วัสดุจึงมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ดังรูปที่ 4.5 –4.9



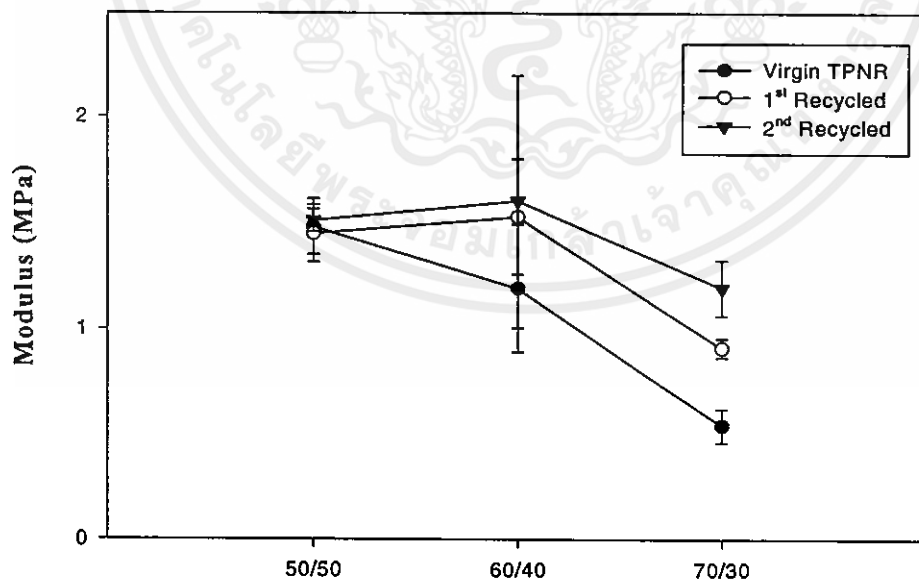
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป

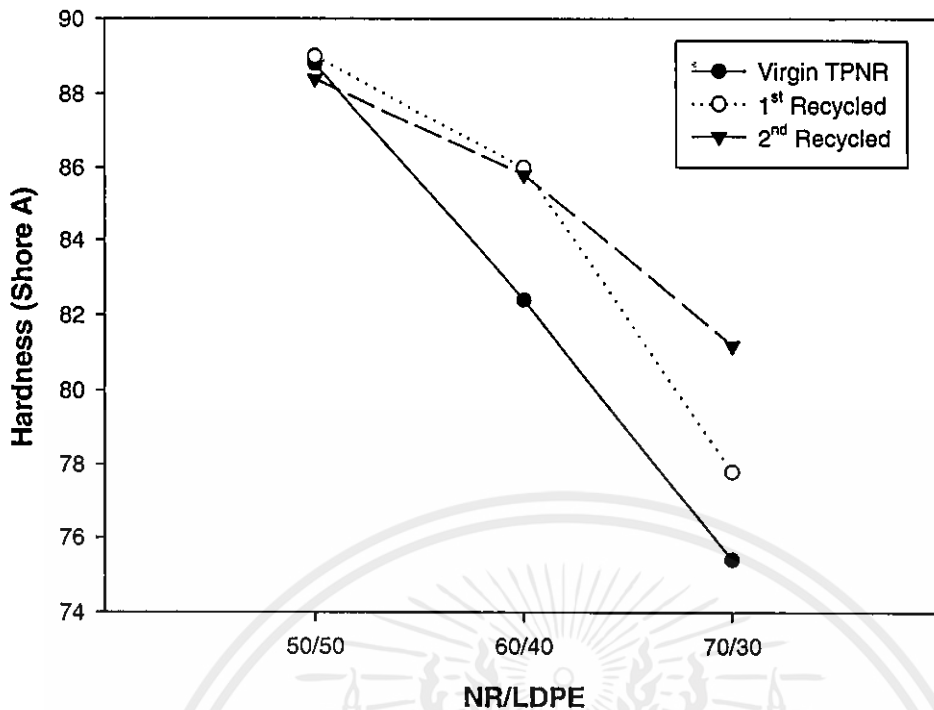


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างงานที่ทำให้แตกหักของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

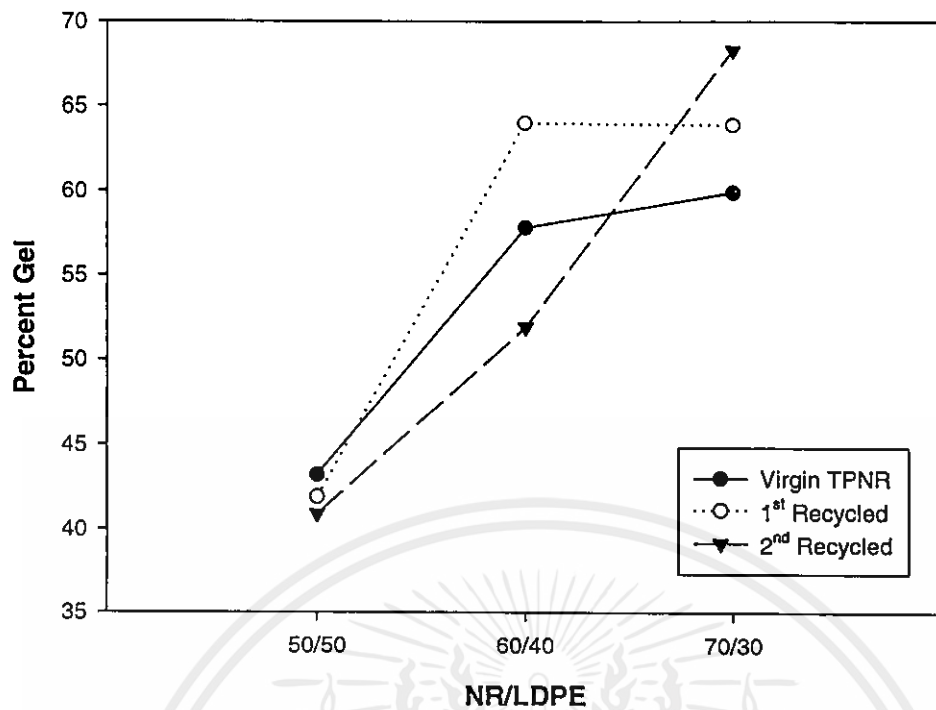


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป

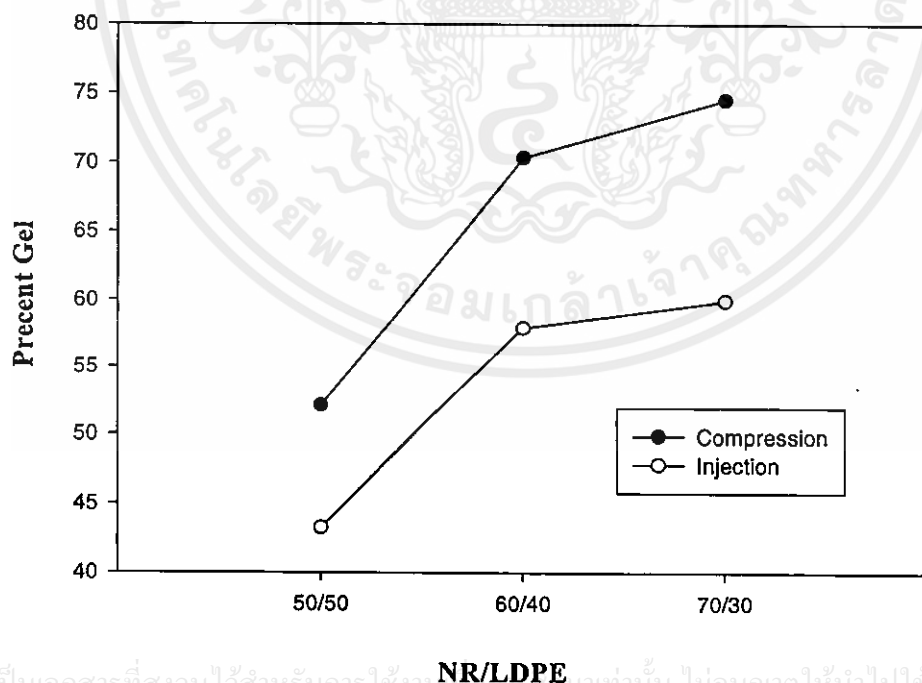
#### 4.1.5 เปอร์เซ็นต์เจล (%Gel)

เปอร์เซ็นต์เจล คือ การหาเปอร์เซ็นต์ของวัฏภาคยางที่เกิดการเชื่อมโยง ทำโดยการแช่ชิ้นงานในไซลีนร้อน โดยส่วนที่สามารถละลายในตัวทำละลายไซลีน คือ ส่วนที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และส่วนของยางที่ไม่เกิดการเชื่อมโยง จากผลการทดลองเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR (รูปที่ 4.10-4.11) เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น พบว่ามีผลให้เปอร์เซ็นต์เจลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมโยงของวัฏภาคยางมากขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์เจลที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป และกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์เจลต่ำกว่า เนื่องจากในกระบวนการฉีดขึ้นรูปใช้เวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่าทำให้การเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางเกิดขึ้นได้น้อยกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป

เมื่อพิจารณาถึงผลของรีไซเคิลในแต่ละสูตร พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก TPNR ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปซ้ำทำให้การเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางเกิดขึ้นได้มากขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสมบัติเชิงกล กล่าวคือ เมื่อทำการรีไซเคิลบ่อยครั้งขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือนและวัสดุได้รับความร้อนมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับอัตราส่วนผสมของ NR/LDPE โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR และอัตราส่วนของ NR/LDPE โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูป

#### 4.1.6 สัณฐานวิทยาของ TPNR

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ TPNR ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยการเตรียมชิ้นงานที่ความเร็วรอบ 50 rpm แล้วผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) ที่ทำการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) โดยการแช่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)

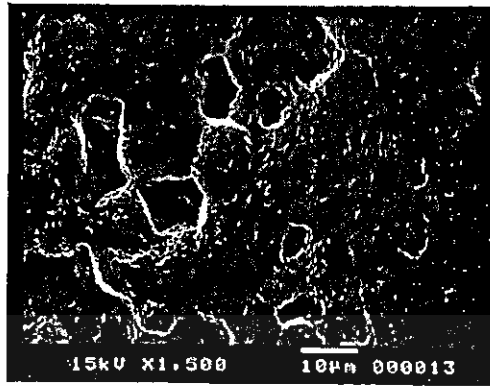
##### 4.1.6.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานจากกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding)

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ทำการสกัดวัฏภาคของ LDPE ออกจากวัฏภาคของยางที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) โดยใช้ตัวทำละลายไซลีน (Xylene) เป็นตัวสกัด ซึ่งจากสัณฐานวิทยาที่ได้จาก SEM บริเวณที่เป็นช่องว่างสีดำ คือบริเวณที่เคยมี LDPE (วัฏภาคกระจาย) ซึ่งถูกสกัดออกจากวัฏภาคของยาง

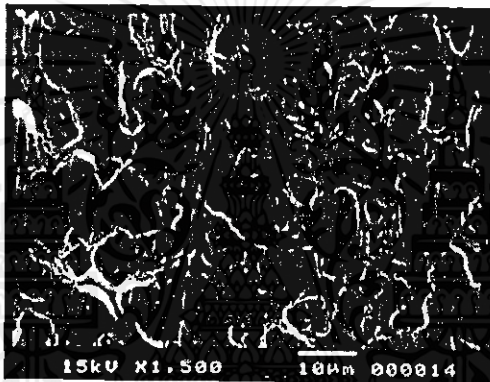
จากรูปที่ 4.12 แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวแตกหักของ NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีนในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 จากกระบวนการอัดขึ้นรูป กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าในสูตรผสมที่มี LDPE น้อยลง เป็นผลให้วัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กลง แต่การกระจายตัวของ LDPE ในวัฏภาคยางทั้ง 3 สูตรยังไม่มี

##### 4.1.6.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding)

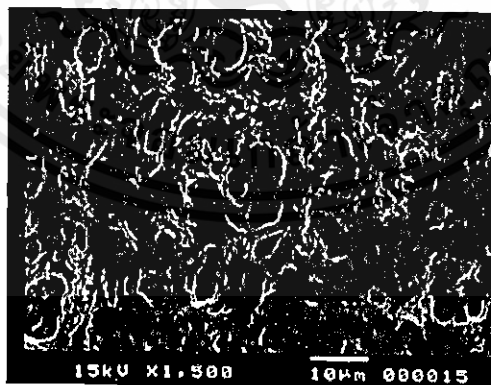
จากรูปที่ 4.13-4.15 แสดงสัณฐานวิทยาของ NR/LDPE ในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 ที่ทำการฉีดขึ้นรูปครั้งแรก และที่ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าที่อัตราส่วนของ LDPE ในสูตรผสมลดลง เป็นผลทำให้ขนาด LDPE ที่เป็นวัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กลง ซึ่งมีลักษณะสัณฐานวิทยาล้ายกับของ TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป และจากการเปรียบเทียบขนาดและลักษณะการกระจายตัวของ LDPE ที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป และกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่าสัณฐานวิทยาที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป กลุ่มก้อน LDPE ที่กระจายในวัฏภาคของยางมีขนาดเล็กและการกระจายตัวดีกว่า เนื่องจาก TPNR ที่เตรียมผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้รับแรงเฉือนในระหว่างการขึ้นรูป ทำให้มีการกระจายตัวของ LDPE ดีกว่า ผลของสัณฐานวิทยาจากการรีไซเคิลในแต่ละสูตร พบว่าการกระจายตัวของ LDPE มีขนาดและลักษณะการกระจายตัวในวัฏภาคยางที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



(ก) NR/LDPE (50/50)



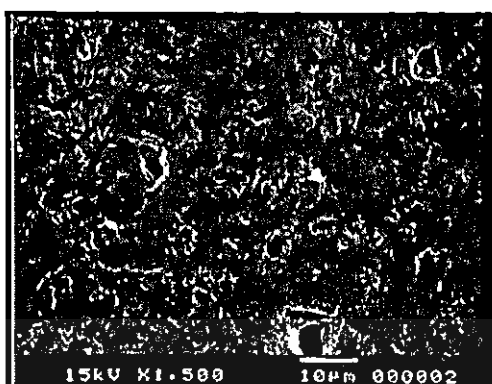
(ข) NR/LDPE (60/40)



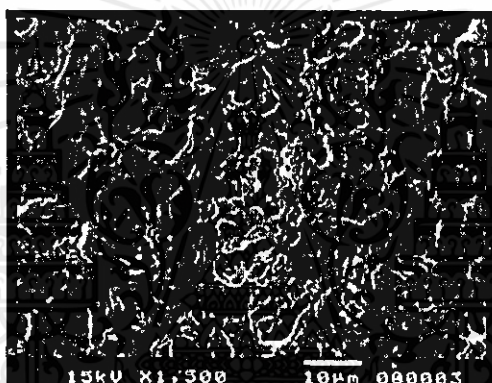
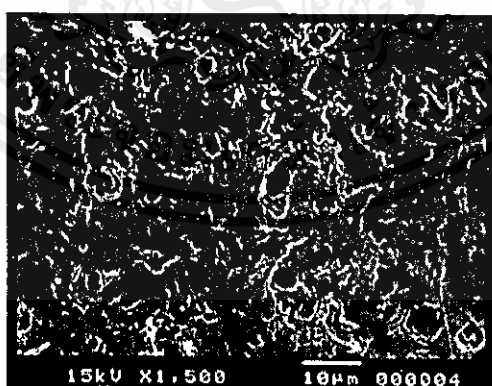
(ค) NR/LDPE (70/30)

รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาพื้นผิวแตกหักของ NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีนในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 จากกระบวนการอัดขึ้นรูป กำลังขยาย 1500 เท่า

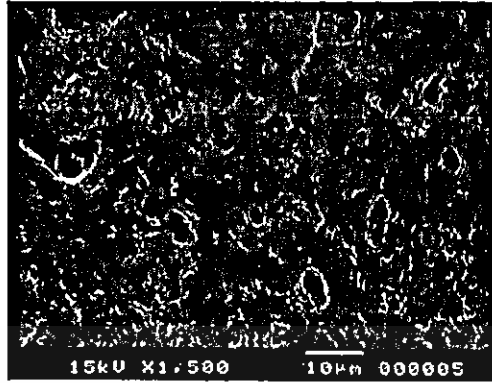
(ก) NR/LDPE (50/50) (ข) NR/LDPE (60/40) (ค) NR/LDPE (70/30)



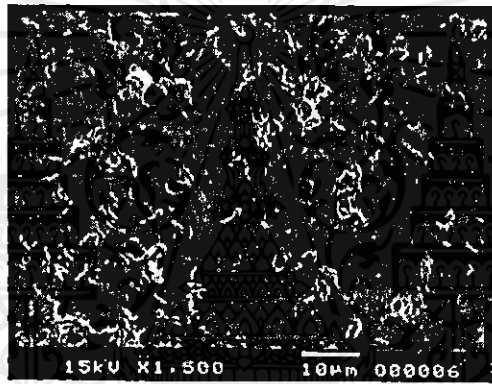
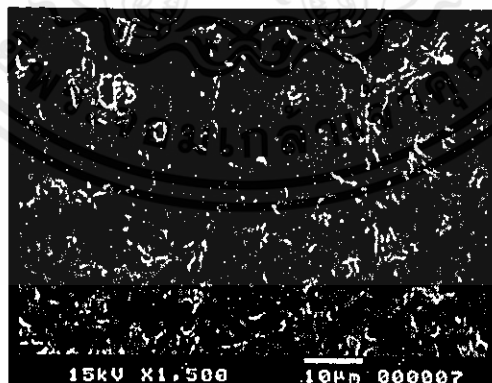
(ก) NR/LDPE (50/50) Virgin

(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (50/50)(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (50/50).

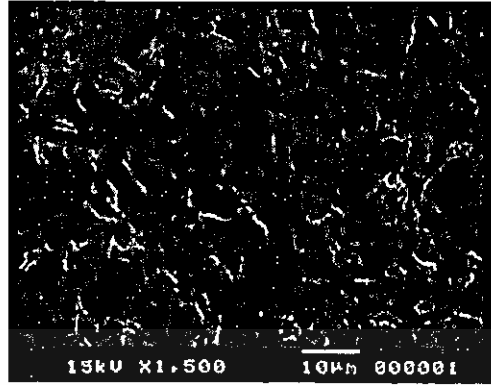
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.13** ลักษณะของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน  
 ในอัตราส่วน 50/50 (ก) การฉีกครั้งแรก (ข) ฉีกซ้ำครั้งที่ 1 และ  
 (ค) ฉีกซ้ำครั้งที่ 2



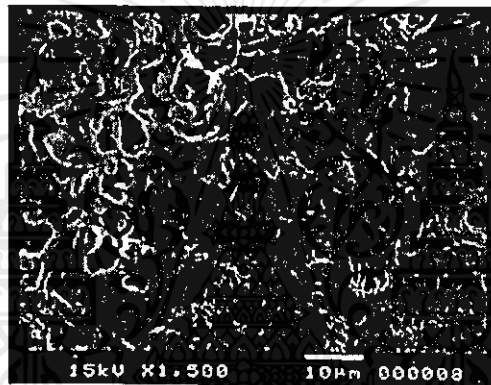
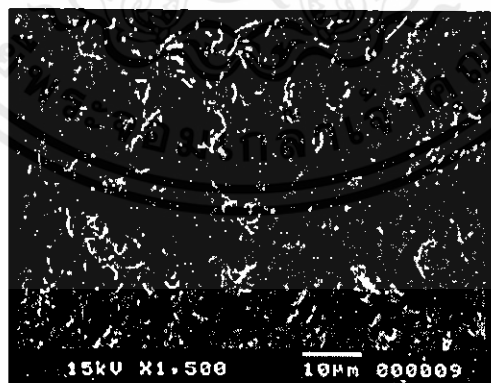
(ก) NR/LDPE (60/40) Virgin

(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (60/40)(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (60/40)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.14** สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน  
 ในอัตราส่วน 60/40 (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ  
 (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2



(n) NR/LDPE (70/30) Virgin

(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (70/30)(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (70/30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.15** สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน  
 ในอัตราส่วน 70/30 (ก) การฉีกขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ  
 (ค) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2

#### 4.1.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA

การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyser) เพื่อทำการทดสอบหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของยาง ซึ่งหาได้จากจุดสูงสุดของพีก  $\tan \delta$  ( $\tan \delta$ ) โดยค่า  $\tan \delta$  แสดงถึงความสามารถในการกระจายพลังงานของวัสดุ วัสดุที่มีค่า  $\tan \delta$  ต่ำ คือ วัสดุที่มีความสามารถในการเก็บพลังงาน (Storage modulus) ดี และมีค่าการกระจายพลังงาน (Loss modulus) ที่ได้รับออกไปน้อย

จากผลการทดลองตารางที่ 4.6 แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ของ TPNR จากการศึกษาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA ของ TPNR พบว่า ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ของ TPNR เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น ทำให้ TPNR มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงมากขึ้น เป็นผลให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้ค่า  $\tan \delta$  เพิ่มขึ้น และเนื่องจากมีการเชื่อมโยงมากขึ้นทำให้สายโซ่ของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนที่สายโซ่ จึงทำให้ค่า  $T_g$  สูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนเชิงกลของ TPNR จากเครื่อง DMTA

	$T_g$ (°C)	$\tan \delta$
NR	-43.2	1.697
NR/LDPE (50/50)	-46.0	0.271
NR/LDPE (60/40)	-44.5	0.357
NR/LDPE (70/30)	-42.0	0.511

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษา TPNR ที่เตรียมได้โดยใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ เป็นสารเชื่อมโยง

### 4.2.1 การศึกษาอย่างผสมสูตรที่เหมาะสม

#### 4.2.1.1 การศึกษาปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) ที่เหมาะสม

ทำการศึกษาปริมาณ DCP ที่ใช้ผสมสูตรในยางธรรมชาติด้วยเครื่อง Curelaster โดยศึกษาปริมาณ DCP อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5-2 phr ซึ่งทำการศึกษาอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 140-160 °C จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อมีปริมาณของ DCP เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า Scorch time มีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณ DCP คงที่ โดยใช้ในอุณหภูมิระหว่าง 140-160 °C พบว่าค่า Scorch time และ Cure time ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากสารเชื่อมโยง DCP มีการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้มาก เมื่อมีปริมาณหรือใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับยางได้มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาก่อนการคงรูป (Scorch time) ลดลง และระยะเวลาในการคงรูป (Cure time) สั้นลง (ตารางที่ 4.7-4.10) ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนสารเชื่อมโยงกำมะถัน

จากการเปรียบเทียบระบบ TPNR ที่เชื่อมโยงด้วย DCP และกำมะถัน พบว่า Scorch time มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ Cure time นานกว่า เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีอัตราการเชื่อมโยงน้อยกว่า [9] ใช้เวลานานกว่าการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ทั้งนี้เนื่องจากในระบบที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ ไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) เหมือนในกรณีเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ซึ่งมี CBS เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ทำให้การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ใช้เวลานานกว่าในการเกิดปฏิกิริยาจนสิ้นสุดเพื่อให้ได้การเชื่อมโยงที่สมบูรณ์

จากผลการทดลองเราสามารถเลือกอย่างผสมสูตรที่มีปริมาณ DCP 1.0 phr อุณหภูมิ 150°C ทำให้ได้ยางเชื่อมโยง มีค่า Scorch time ประมาณ 3.00 นาที ซึ่งน่าจะทำให้ LDPE สามารถเกิดการผสมรวมกับยาง ก่อนที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยง ซึ่งสอดคล้องกับ Scorch time ที่ใช้ในการทดลองหัวข้อที่ 4.1 และ Cure time ประมาณ 19.4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 0.5 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Time (min)	
	Scorch time	Cure time
140	4.0	21.3
150	2.5	21.0
160	2.0	16.0

ตารางที่ 4.8 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 1.0 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Time (min)	
	Scorch time	Cure time
140	3.4	21.1
150	3.0	19.4
160	2.1	14.1

ตารางที่ 4.9 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 1.5 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Time (min)	
	Scorch time	Cure time
140	2.4	22.4
150	2.3	20.2
160	1.3	12.1

ตารางที่ 4.10 ค่า Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 2.0 phr

Vulcanising Temperature (°C)	Time (min)	
	Scorch time	Cure time
140	1.5	20.3
150	1.4	19.1
160	1.1	11.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยการหาอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) ซึ่งสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของวัสดุได้

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางความร้อนของ TPNR จากเครื่อง DSC

Sample	$T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H_f$ (J/g)	% Crystallinity
Low density polyethylene	107.5	94.2	32
NR/LDPE (50/50)+DCP 1.0 phr (Compression)	107.7	25.3	17
NR/LDPE (50/50)+DCP 1.0 phr (Injection)	107.5	27.3	19

จากผลการทดลองตารางที่ 4.11 พบว่า TPNR มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LDPE ลดลงเมื่อเทียบกับ LDPE บริสุทธิ์ เนื่องจาก TPNR มียางธรรมชาติเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ LDPE ทำให้ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ LDPE และพบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมากกว่าที่เตรียมจากกระบวนการอัดขึ้นรูปเล็กน้อย เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปมีแรงเฉือนจากการฉีด และความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์สูงกว่า อาจทำให้ LDPE เกิดการจัดเรียงตัวตามแนวแรงมากกว่า ทำให้มีความเป็นผลึกสูงกว่า

### 4.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR

การเตรียม TPNR จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ผลการศึกษาอัตราส่วนของ TPNR จากกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่าเมื่ออัตราส่วนยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกุดมีค่าลดลง เนื่องจาก LDPE ที่เป็นพลาสติกมีความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุจำพวกยางที่มีการเชื่อมโยงเพียงบางส่วน ดังนั้นการลดปริมาณอัตราส่วนของ LDPE ต่อยางธรรมชาติทำให้ความแข็งแรงดึงของวัสดุโดยรวมลดลง ดังรูปที่ 4.16 และ 4.19-4.20

เมื่อเปรียบเทียบผลการเตรียม TPNR ระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปกับกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกุดสูงกว่า เนื่องจาก TPNR ที่เตรียมผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้รับความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการขึ้นรูปสูงกว่า ทำให้ความหนืดของ LDPE และ NR มีความแตกต่างกันน้อยลง และจากผลการศึกษาสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.22-4.25) พบว่าสัณฐานวิทยาจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป มีการกระจายตัวของ LDPE ที่ดีกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป ทำให้การผสมระหว่างพลาสติกกับยางมีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น ซึ่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น อีกทั้งผลของ DSC พบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีความเป็นผลึกมากกว่าเล็กน้อย

จากการวิเคราะห์เคิลของ TPNR โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปซ้ำ พบว่าค่าความแข็งแรงกุดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ในอัตราส่วนของยางกับพลาสติกที่ 50/50 ซึ่งอาจเกิดจากการเสียดสีของ TPNR บางส่วน ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลมากกว่าผลของการเชื่อมโยงของวัฏภาคยาง แต่ TPNR ที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณอัตราส่วนของยางที่เพิ่มขึ้นมีผลให้เกิดการเชื่อมโยงของวัฏภาคยางมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักของ TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางธรรมชาติทำให้ TPNR ที่เตรียมได้แสดงลักษณะที่เหมือนยางที่มีการเชื่อมโยงโครงร่างแหสามมิติ จึงมีผลให้ TPNR มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเพิ่มขึ้น

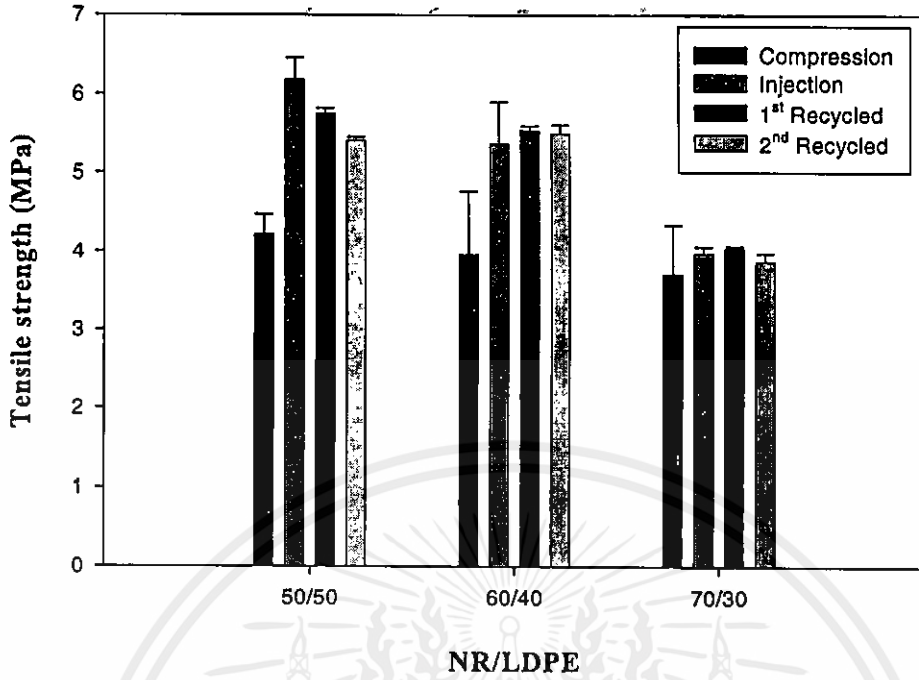
เมื่อเปรียบเทียบผลการเตรียม TPNR จากกระบวนการอัดขึ้นรูปกับกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่า

งานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักน้อยกว่า เนื่องจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ใช้เวลาในการขึ้นรูปที่เร็วกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป ทำให้วัฏภาคของยางยังไม่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแหสามมิติอย่างสมบูรณ์ และผลการทดลองจากการฉีดขึ้นรูปทำให้ค่าของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมโยงในยางเพิ่มขึ้นเมื่อมีผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปนานขึ้น

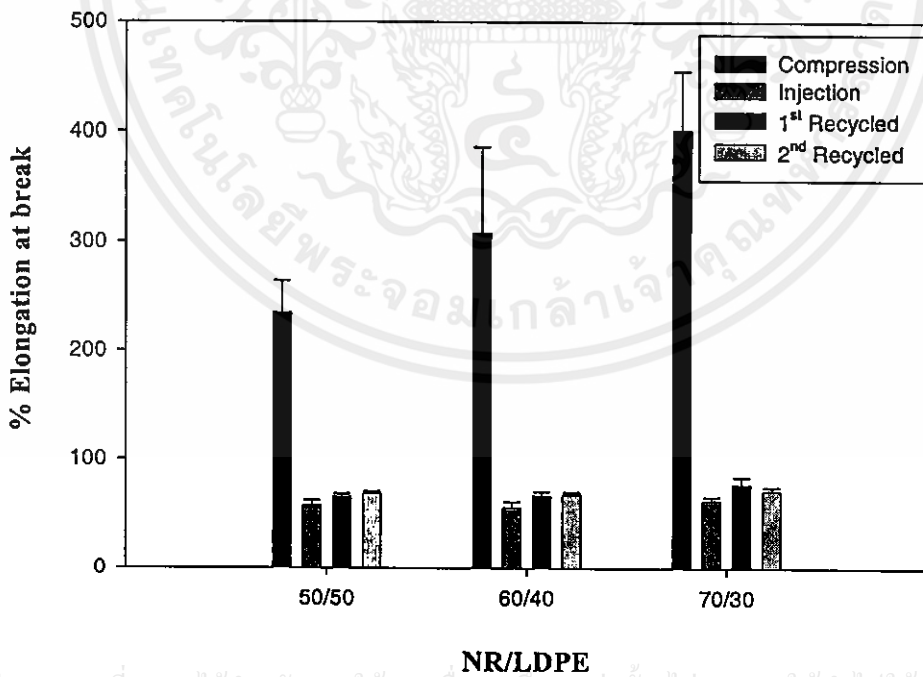
จากผลการทดลองข้างต้นเราสามารถสรุปได้ว่า TPNR ที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่า TPNR ที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป

#### 4.2.4 เปอร์เซ็นต์เจล (%Gel)

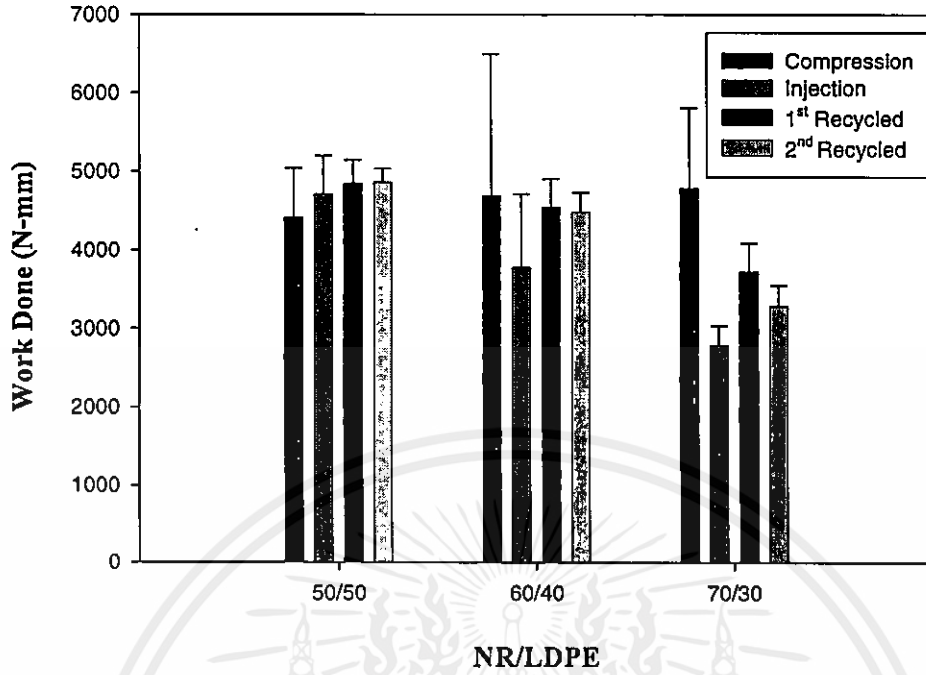
การศึกษาเปอร์เซ็นต์เจลโดยแช่ในโซลันร้อน สามารถละลายวัฏภาคของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและวัฏภาคของยางที่ไม่เกิดการเชื่อมโยง จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนของยางมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์เจลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีอัตราส่วนของยางมากขึ้น ทำให้วัฏภาคของยางเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น และเมื่อพิจารณา TPNR ที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูปพบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์เจลต่ำกว่า เนื่องจากในกระบวนการฉีดขึ้นรูปใช้เวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่าทำให้การเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางเกิดขึ้นได้น้อยกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป ดังผลในรูปที่ 4.21



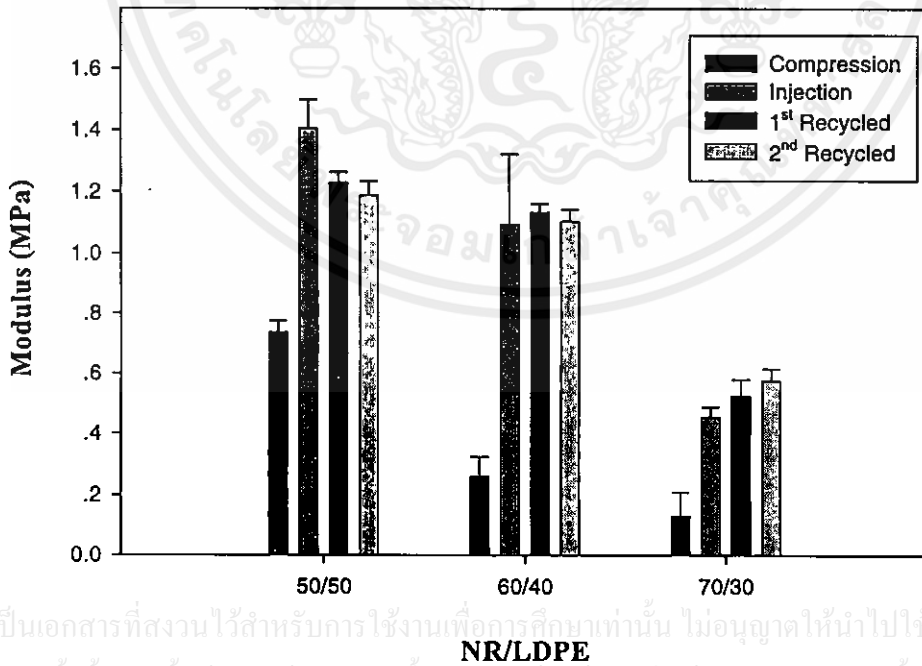
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE

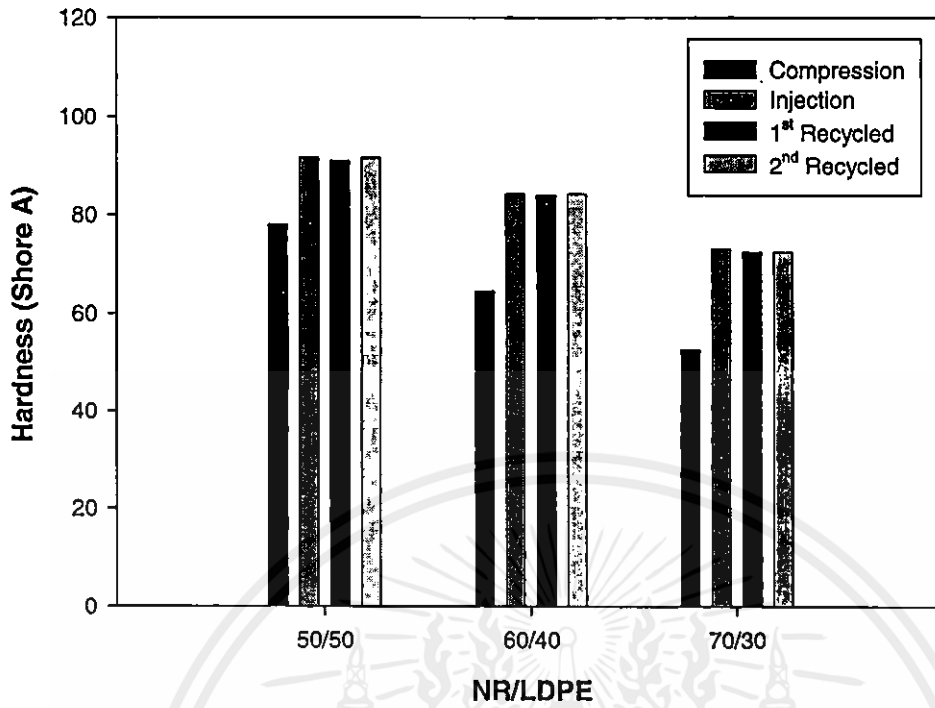


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างงานที่ทำให้แตกของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE

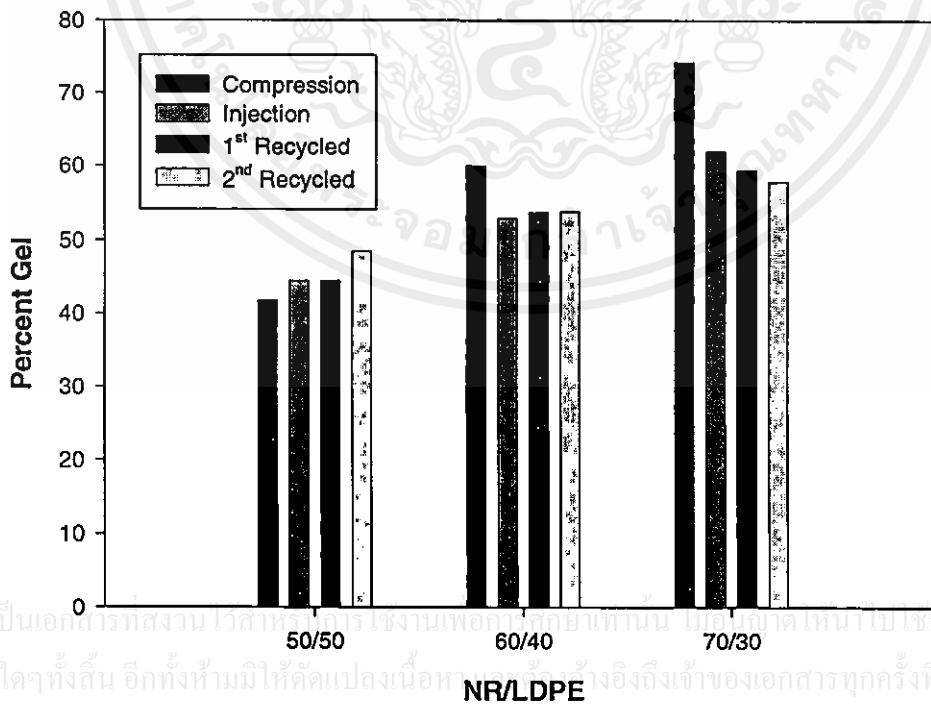


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับอัตราส่วนของ NR/LDPE

## 4.2.5 สัณฐานวิทยาของ TPNR

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ โดยการเตรียมชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการขึ้นรูปจากกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding)

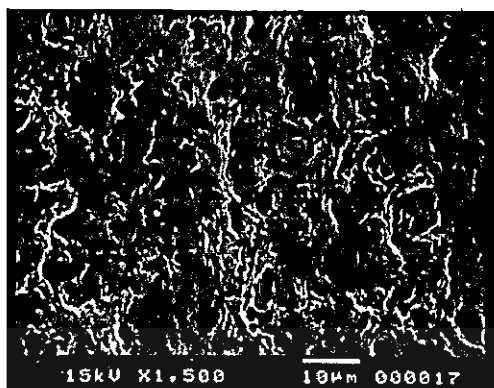
### 4.2.5.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding)

จากรูปที่ 4.22 แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวแตกหักของ NR/LDPE จากกระบวนการอัดขึ้นรูปสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าการกระจายตัวของ LDPE มากขึ้น เมื่อมีอัตราส่วนของ LDPE ในสูตรผสมเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของ LDPE ในทั้ง 3 สูตรผสมมีช่วงการกระจายตัวของขนาดที่กว้าง

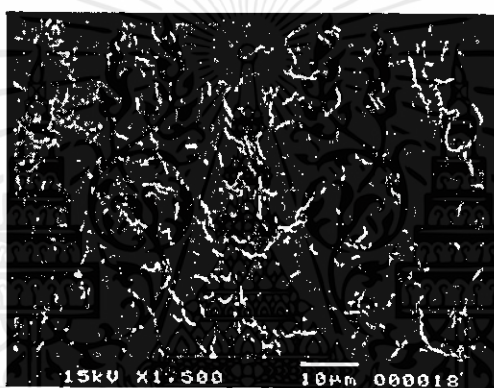
### 4.2.5.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection moulding)

จากรูปที่ 4.23-4.25 แสดงสัณฐานวิทยาของ NR/LDPE จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าในการฉีดขึ้นรูปครั้งแรก LDPE มีการกระจายตัวดีขึ้นและมีขนาดเล็กลง เมื่อมีอัตราส่วนของ LDPE ในสูตรผสมน้อยลง และจากการเปรียบเทียบขนาดและลักษณะการกระจายตัวของ LDPE ที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่าสัณฐานวิทยาที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป LDPE มีขนาดเล็กกว่าและการกระจายตัวดีกว่า เนื่องจากในกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้รับความร้อนและแรงเฉือนมากกว่า ทำให้การผสมเกิดขึ้นได้ดี

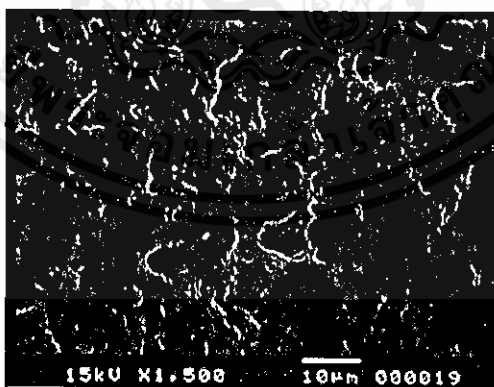
ผลของสัณฐานวิทยาจากการฉีดขึ้นรูปซ้ำในแต่ละสูตร พบว่าการกระจายตัวของ LDPE ไม่แตกต่างกันเมื่อมีการฉีดขึ้นรูปซ้ำ



(ก) NR/LDPE (50/50)



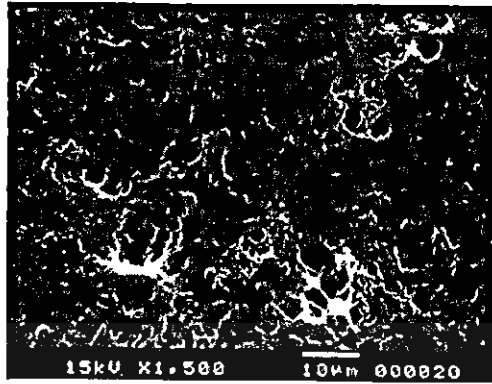
(ข) NR/LDPE (60/40)



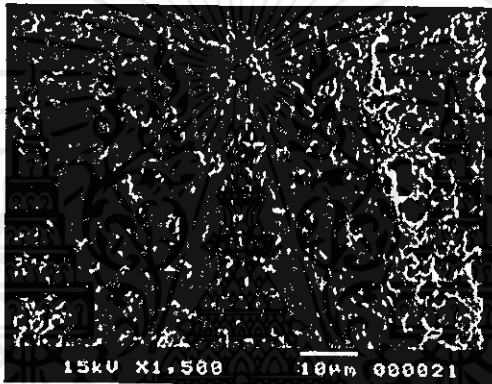
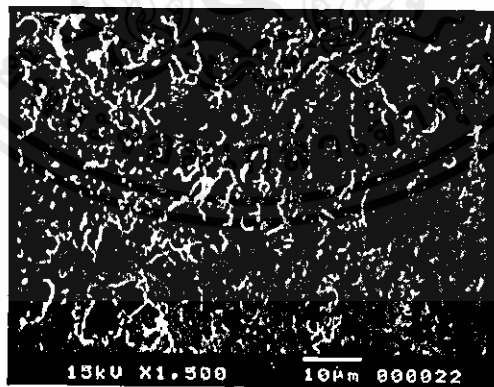
(ค) NR/LDPE (70/30)

รูปที่ 4.22 ลักษณะวิทยาพื้นผิวแตกหักของ NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในสูตร 50/50 60/40 และ 70/30 จากกระบวนการอัดขึ้นรูป กำลังขยาย 1500 เท่า

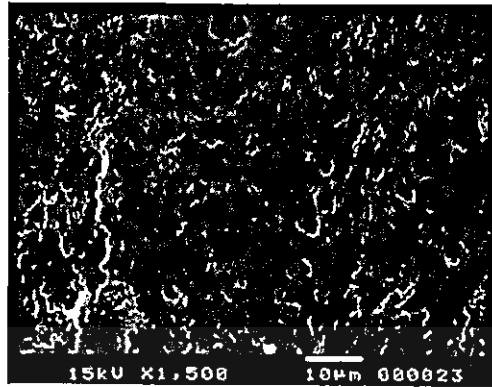
(ก) NR/LDPE (50/50) (ข) NR/LDPE (60/40) (ค) NR/LDPE (70/30)



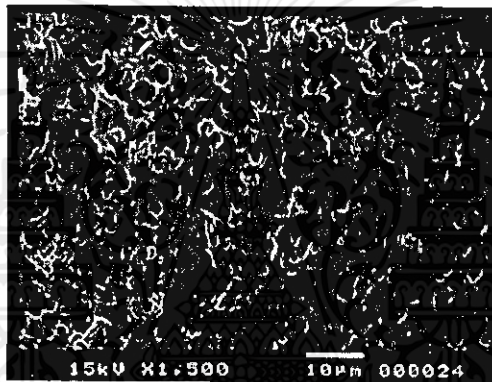
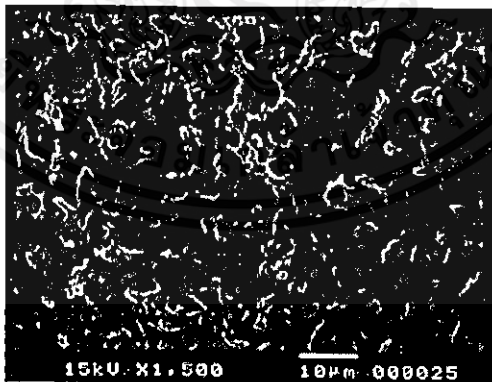
(ก) NR/LDPE (50/50) Virgin

(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (50/50)(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (50/50)

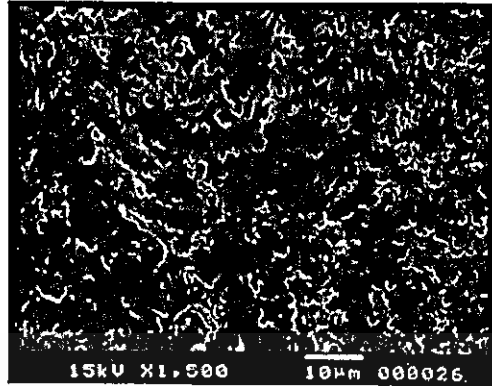
รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 50/50 (ก) การฉีกขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2



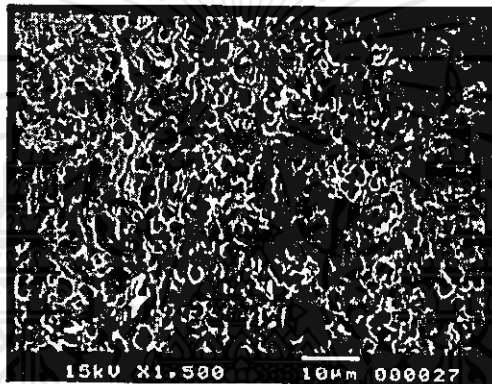
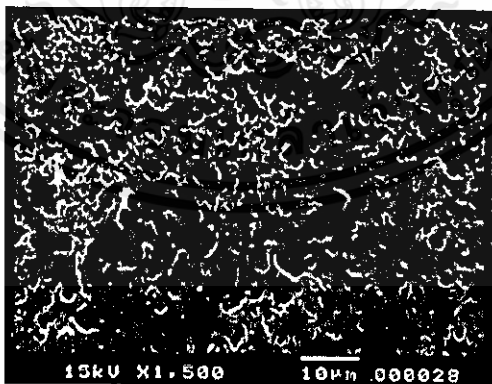
(ก) NR/LDPE (60/40) Virgin

(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (60/40)(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (60/40)

รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน  
 ในอัตราส่วน 60/40 (ก) การฉีดขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ  
 (ค) ฉีดขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2



(ก) NR/LDPE (70/30) Virgin

(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (70/30)(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (70/30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.25** สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน  
 ในอัตราส่วน 70/30 (ก) การฉีกขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ  
 (ค) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2

#### 4.2.6 การศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีผลต่อ TPNR

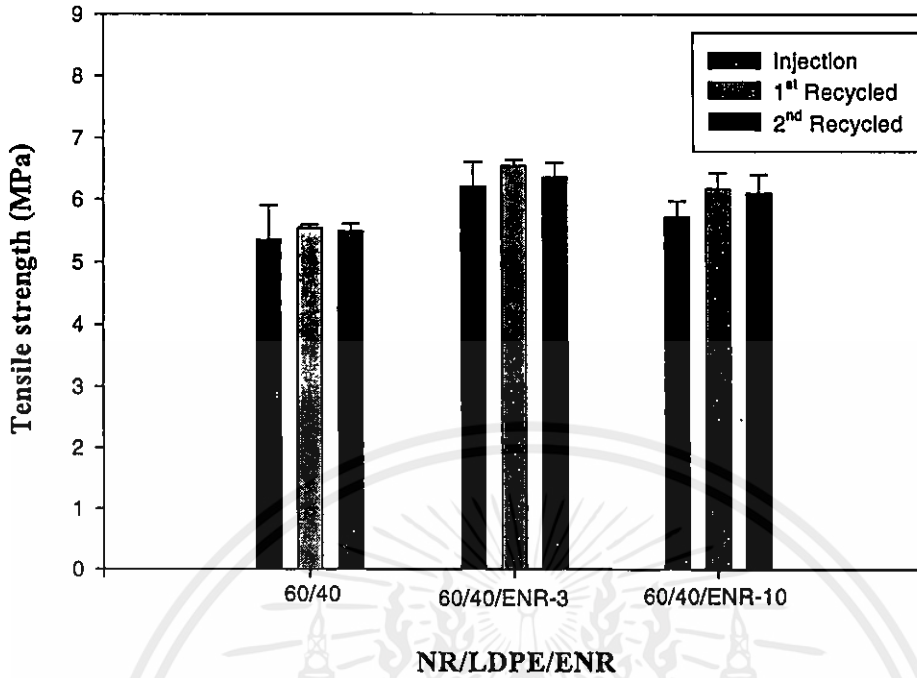
จากการศึกษา TPNR ที่เตรียมโดยใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยงในช่วงแรก ทำให้ทราบสมบัติต่างๆ โดยรวมของ TPNR ที่ได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนของยางธรรมชาติ (NR) ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) 60/40 ให้สมบัติต่างๆ โดยรวมที่ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนผสมนี้ในการศึกษาอิทธิพลของการใช้สารช่วยผสม (Compatibilisers) ซึ่งสารช่วยผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Epoxidised Natural Rubber (ENR) โดย ENR ที่ใช้ในการทดลองมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ ENR-3 กับ ENR-10 ซึ่งคือ ENR ที่มีหมู่อีพอกซี 3 และ 10 เปอร์เซ็นต์โมลตามลำดับ และทำการผสมด้วยปริมาณ 5 phr ในสูตรผสม

จากรูปที่ 4.26-4.29 เป็นการศึกษสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก ENR เข้าไปผสมกับยางธรรมชาติ ทำให้ลดความหนืดของยางธรรมชาติ ช่วยให้ยางธรรมชาติผสมกับพลาสติกดีขึ้น และในขณะที่ผสมเกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ (Peroxide free radical) หรือหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxyl group) บนสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งอนุมูลอิสระนี้สามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) กับ ENR ที่วงอีพอกไซด์ (Epoxide ring) ได้ ทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น [15]

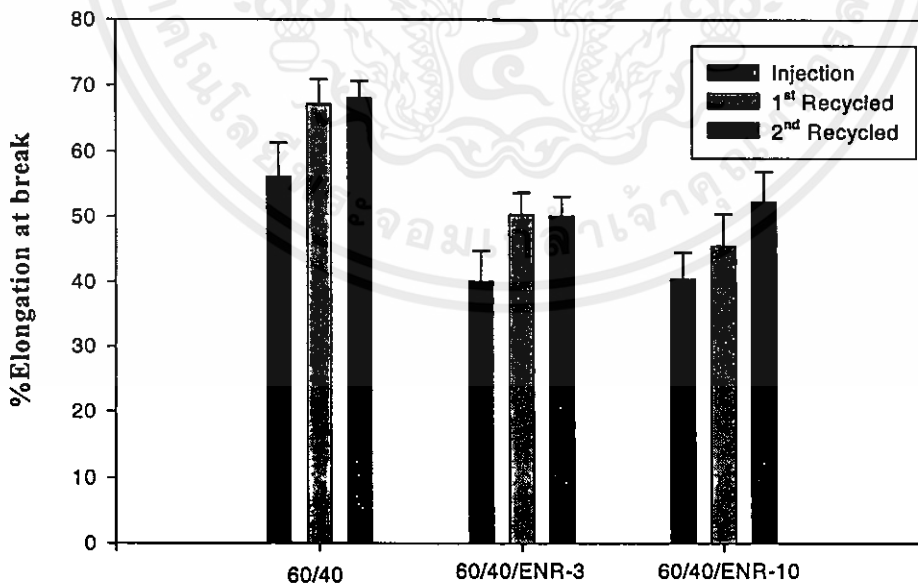
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักของ TPNR มีค่าลดลงเมื่อเติมสารช่วยผสม ENR เนื่องจาก ENR มีส่วนของหมู่อีพอกซี (Epoxy group) ที่มีขั้ว เมื่อเติมในปริมาณมาก และในระบบมี DCP ซึ่งอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงของหมู่อีพอกซีใน ENR กับวัฏภาคยางหรือพลาสติกได้ ทำให้เกิดพันธะ (C-O) แทนพันธะ (C-C) จึงอาจเป็นผลให้ TPNR ที่มีการเติม ENR สามารถรับและกระจายพลังงานได้น้อยลง ทำให้ เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบระหว่าง TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR-3 และ ENR-10 จากผลการทดลองพบว่า TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR-3 ให้สมบัติเชิงกลดีกว่า เนื่องจาก ENR-10 ที่ผสมลงไป ใน TPNR มีความเข้มข้นมากกว่า ENR-3 อาจทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของ ENR เนื่องจากส่วนที่มีขั้ว ทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกับวัฏภาคยางและพลาสติก [27]

ผลการรีไซเคิลของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR พบว่า สมบัติเชิงกลของ TPNR ทั้งค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พลังงานที่ทำให้แตกหัก และมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก TPNR ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้รับความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้น ทำให้ LDPE มีการกระจายดีขึ้น เป็นลักษณะคล้ายกับ LDPE เข้าไปเสริมแรงใน TPNR ซึ่งสอดคล้องกับผลของสัณฐานวิทยาที่ได้ (รูปที่ 4.32-4.33) ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

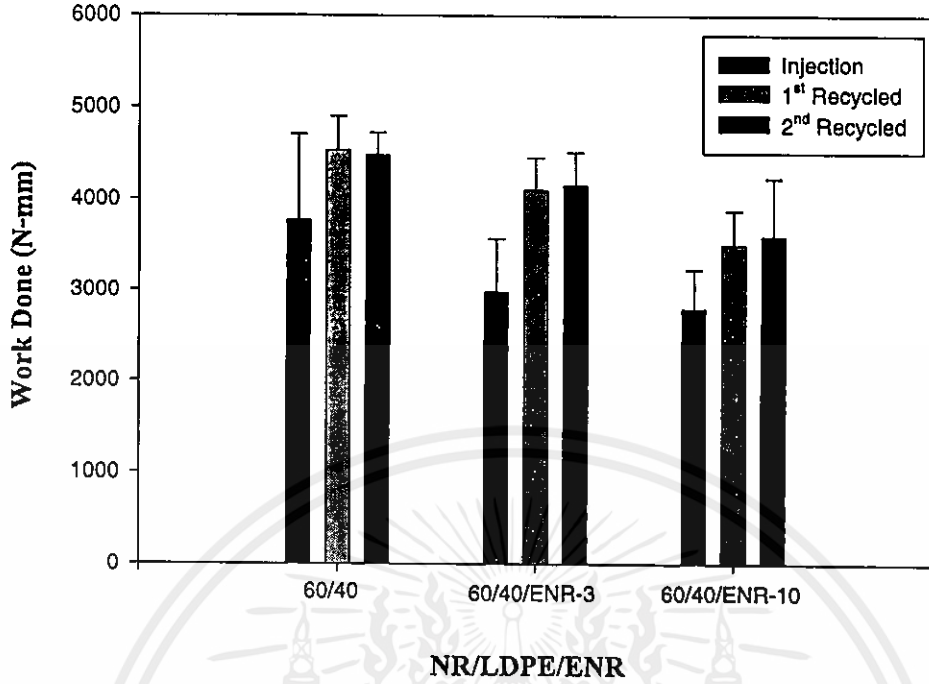


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr

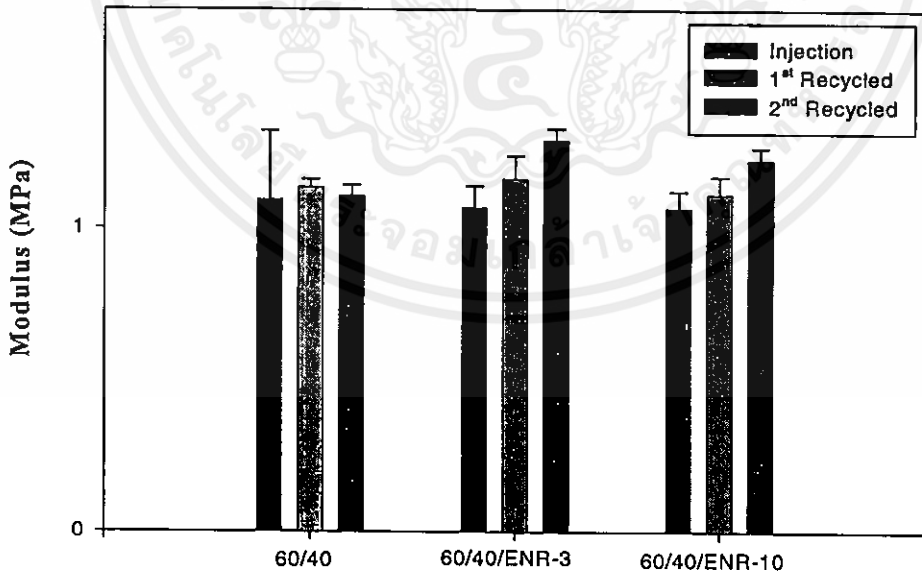


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างงานที่ทำให้แตกหักของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr



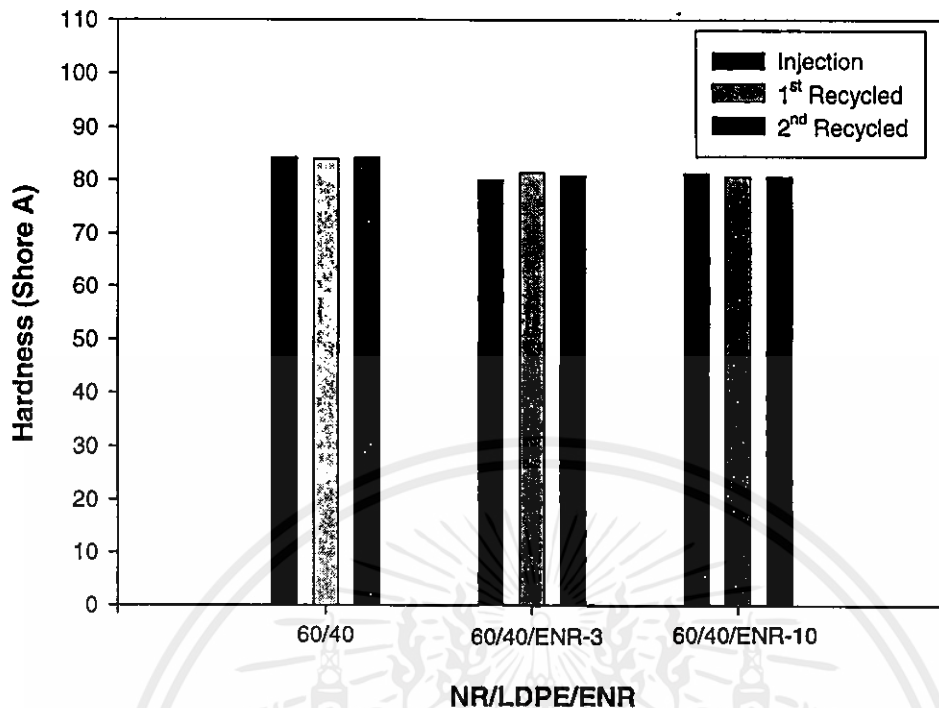
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr

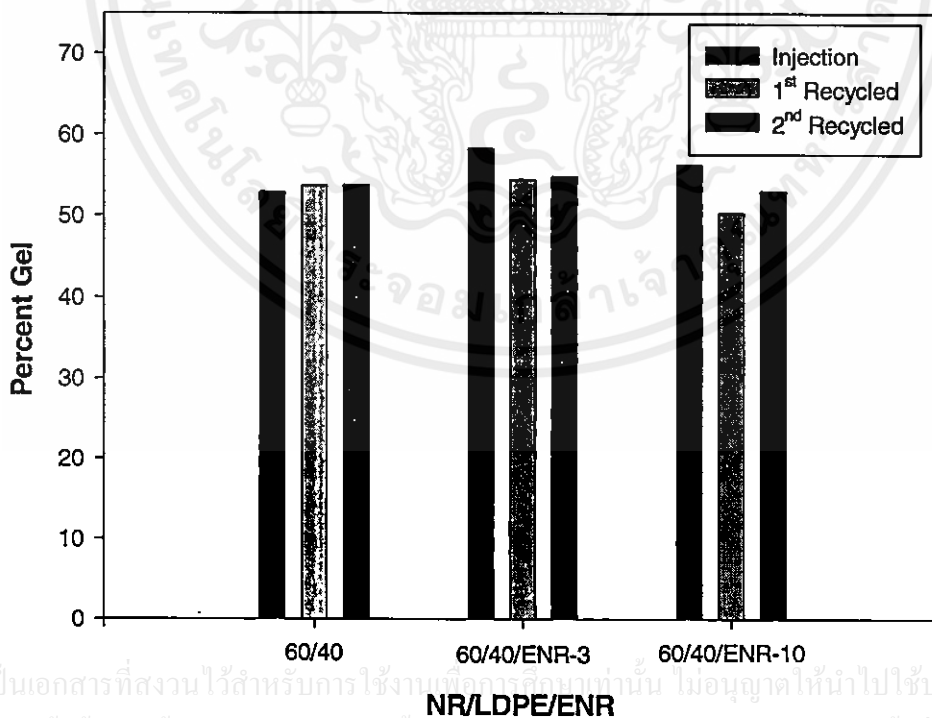
จากผลการทดลองค่าความแข็งแรงกดของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR พบว่า ค่าความแข็งแรงกดมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเติมสารช่วยผสม ENR ทั้งนี้เนื่องจาก ENR เข้าไปผสมกับวัฏภาคยาง ทำให้วัฏภาคยางมีความหนืดลดลง จึงผสมรวมกับ LDPE ได้ดีขึ้น เป็นผลให้เกิดการเชื่อมโยงของหมู่อีพอกซีกับ LDPE หรือ NR ด้วยพันธะ (C-O) ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะน้อยกว่าพันธะ (C-C) ซึ่งเกิดจาก DCP ทำให้ค่าความแข็งแรงกดลดลง และเมื่อพิจารณาถึงผลของการรีไซเคิลในฉุดขึ้นรูปซ้ำของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR พบว่า ค่าความแข็งแรงกดมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR-3 และ ENR-10 พบว่า ผลการเติมสารช่วยผสม ENR ทั้งสองชนิดใน TPNR มีค่าความแข็งแรงกดใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.30

จากผลการทดลองเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์เจลมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเชื่อมโยงของหมู่อีพอกซีกับ LDPE หรือ NR จึงทำให้เปอร์เซ็นต์เจลเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงผลของการรีไซเคิลในการฉุดขึ้นรูปซ้ำของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์เจลลดลง เนื่องจากเมื่อทำการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น ทำให้ได้รับความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้น อาจทำให้เกิดการเสียดสภาพ (Degradtion) จากการเชื่อมโยงด้วยพันธะ (C-O) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าการเชื่อมโยงด้วยพันธะ (C-C) ทำให้เปอร์เซ็นต์เจลมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งอาจจะไม่สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกดและมอดุลัสที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการรีไซเคิล สันนิษฐานได้ว่าอาจเนื่องมาจากลักษณะของสัณฐานวิทยาของวัฏภาคยางที่หนาแน่นและ LDPE มีขนาดเล็ก (รูป 4.32-4.33) ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมากกว่าผลของเปอร์เซ็นต์เจล

จากรูปที่ 4.32-4.33 แสดงสัณฐานวิทยาของ NR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสม ENR-3 และ ENR-10 จากกระบวนการฉุดขึ้นรูป สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในสูตร 60/40 กำลังขยาย 1500 เท่า โดยใช้เทคนิค SEM จากผลการทดลองพบว่า สัณฐานวิทยาของวัฏภาคของยางมีลักษณะที่หนาแน่นและ LDPE มีขนาดเล็กกว่า เมื่อเทียบกับ TPNR ที่ไม่เติม ENR (รูปที่ 4.24) เนื่องจากการเชื่อมโยงที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเติม ENR



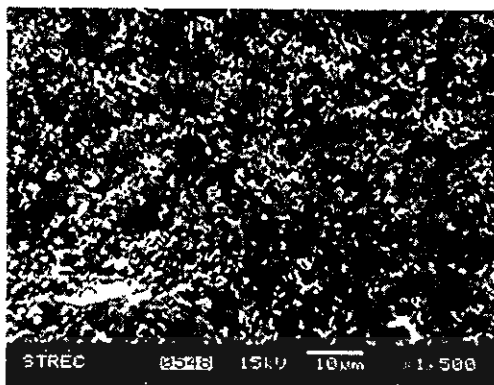
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr



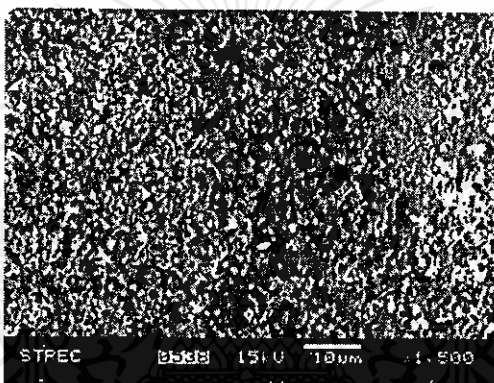
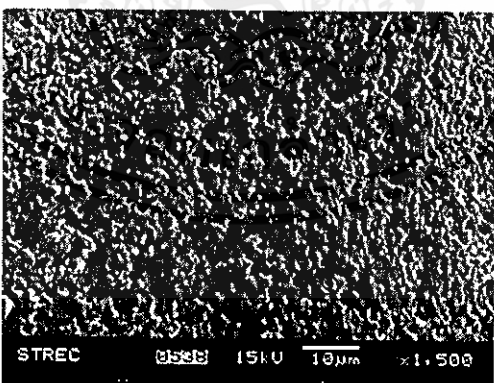
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม ENR 5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

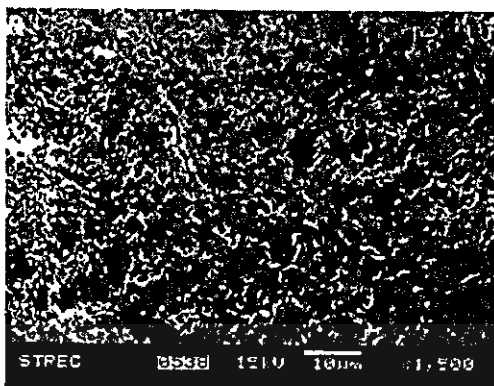
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



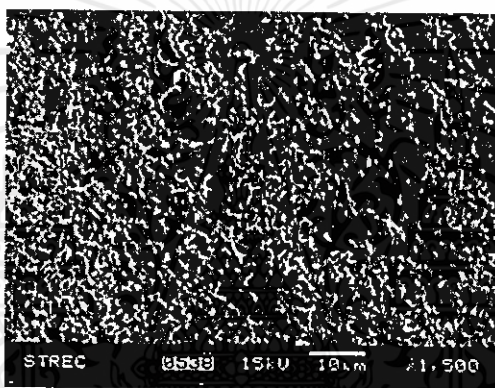
(n) NR/LDPE (60/40) Virgin+ENR-3

(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (60/40) +ENR-3(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (60/40) +ENR-3

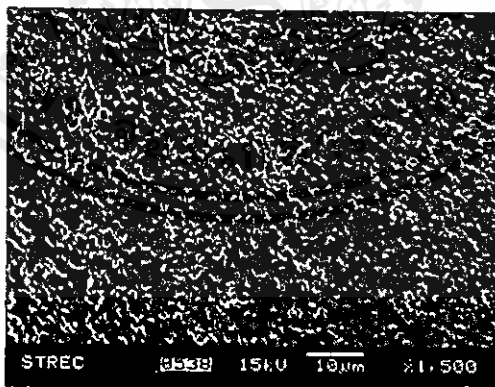
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.32** สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน  
 ในอัตราส่วน 60/40 ที่เติมสารช่วยผสม ENR-3 (a) การฉีกขึ้นรูปครั้งแรก  
 (b) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (c) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2



(ก) NR/LDPE (60/40) Virgin+ENR-10



(ข) 1<sup>st</sup> recycled NR/LDPE (60/40) +ENR-10



(ค) 2<sup>nd</sup> recycled NR/LDPE (60/40) +ENR-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...  
รูปที่ 4.33 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหัก NR/LDPE สกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน ในอัตราส่วน 60/40 ที่เติมสารช่วยผสม ENR-10 (ก) การฉีกขึ้นรูปครั้งแรก (ข) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 1 และ (ค) ฉีกขึ้นรูปซ้ำครั้งที่ 2

#### 4.2.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA

การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyser) เพื่อทำการทดสอบหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของยาง จากผลการทดลองตารางที่ 4.12 พบว่าค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ของ TPNR เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น ทำให้ TPNR มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงมากขึ้น เป็นผลให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้ค่า  $\tan \delta$  เพิ่มขึ้น และเนื่องจากมีการเชื่อมโยงมากขึ้นทำให้สายโซ่ของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนที่สายโซ่ จึงทำให้ค่า  $T_g$  สูงขึ้น

และเมื่อศึกษาผลของ TPNR เมื่อมีการเติมสารช่วยผสม ENR พบว่า  $\tan \delta$  ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า  $T_g$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมโยงมากขึ้นทำให้สายโซ่ของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนที่สายโซ่ จึงทำให้ค่า  $T_g$  สูงขึ้น

ตารางที่ 4.12 สมบัติทางความร้อนเชิงกลของ TPNR จากเครื่อง DMTA

	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$\tan \delta$
NR	-50.8	1.200
NR/LDPE (50/50)	-53.9	0.267
NR/LDPE (60/40)	-51.2	0.319
NR/LDPE (60/40)+ENR-3	-49.1	0.371
NR/LDPE (60/40)+ENR-10	-47.3	0.378
NR/LDPE (70/30)	-50.3	0.488

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 การศึกษา TPNR ที่เตรียมโดยใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง

#### 5.1.1 การศึกษาสภาวะในการเตรียม TPNR

- เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE ด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ คือ ประมาณ 2 นาที ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$
- ยางผสมสูตรที่ใช้ในการผสม คือ ที่ปริมาณกำมะถัน 3 phr และสารเร่งปฏิกิริยา CBS 0.5 phr
- ทำการผสม LDPE กับยางผสมสูตรด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ เป็น เวลาประมาณ 3 นาที โดยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$

#### 5.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR

จากการศึกษาอัตราส่วนของ TPNR เมื่ออัตราส่วนของ NR เพิ่มขึ้น พบว่าสมบัติเชิงกลของค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกดมีค่าลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และงานที่ทำให้วัสดุแตกหักของ TPNR มีค่าเพิ่มในกระบวนการอัดขึ้นรูป แต่ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและงานที่ทำให้วัสดุแตกหักกลับลดลง

ศึกษาการรีไซเคิลของ TPNR ที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่า TPNR ที่เตรียมได้มีแนวโน้มของสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

#### 5.1.3 เปอร์เซนต์เจล (%Gel)

จากการศึกษาเปอร์เซนต์เจลของ TPNR เมื่ออัตราส่วนของ NR เพิ่มขึ้น พบว่ามีผลให้เปอร์เซนต์เจลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมโยงของวัฏภาคยางมากขึ้น และ TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีเปอร์เซนต์เจลต่ำกว่า

#### 5.1.4 สัณฐานวิทยาของ TPNR

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ TPNR ด้วย SEM พบว่า สัณฐานวิทยาที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ทำให้ LDPE มีขนาดของเล็กและการกระจายตัวดีกว่าในกระบวนการอัดขึ้นรูป

ผลของสัณฐานวิทยาจากการฉีดขึ้นรูปซ้ำในแต่ละสูตร พบว่าการกระจายตัวของ LDPE มีขนาดและลักษณะการกระจายตัวในวัฏภาคยางที่คล้ายๆ กันในแต่ละสูตร

#### 5.1.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA พบว่า ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  ของ TPNR เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติใน TPNR เพิ่มขึ้น

## 5.2 การศึกษา TPNR ที่เตรียมได้โดยใช้ไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ เป็นสารเชื่อมโยง

### 5.2.1 การศึกษาหาทางผสมสูตรที่เหมาะสม

- ยางผสมสูตรที่ใช้ในการผสม คือ มีปริมาณ DCP 1.0 phr อุณหภูมิ 150°C ส่วนสถานะและขั้นตอนในการผสมเหมือนกับระบบกำมะถัน

### 5.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงของ TPNR

จากการศึกษาอัตราส่วนของ TPNR จากกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าเมื่ออัตราส่วน NR เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสและความแข็งกดมีค่าลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่างานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลการเตรียม TPNR พบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่า ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่างานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักมีค่าน้อยกว่า TPNR ที่เตรียมจากกระบวนการอัดขึ้นรูป

จากการรีไซเคิลของ TPNR พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนของยางเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่างานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเพิ่มขึ้น

การศึกษาเปอร์เซ็นต์เจล พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ NR มากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์เจลมีค่าเพิ่มขึ้น และ TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์เจลต่ำกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป

### 5.2.3 การศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีผลต่อ TPNR

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัส มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักมีค่าลดลง เมื่อเติมสารช่วยผสม ENR

ผลการรีไซเคิล พบว่า สมบัติเชิงกลของ TPNR ทั้งค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด งานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก และมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ผลของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR-3 และ ENR-10 พบว่า TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR-3 ให้สมบัติเชิงกลดีกว่า

จากผลเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์เจลมีค่าเพิ่มขึ้น และผลของการรีไซเคิล พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์เจลลดลง

สัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เติมสารช่วยผสม ENR พบว่า สัณฐานวิทยาของวัฏภาคยางมีลักษณะที่หนาแน่นและ LDPE มีขนาดเล็กกว่า เมื่อเทียบกับ TPNR ที่ไม่เติม ENR

#### 5.2.4 การศึกษาสมบัติความร้อนด้วย DMTA

การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ NR เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta$  เพิ่มขึ้น และผลของ TPNR เมื่อมีการเติมสารช่วยผสม ENR พบว่า  $\tan \delta$  มีค่าใกล้เคียงกันแต่ค่า  $T_g$  เพิ่มขึ้น

#### 5.2.5 การเปรียบเทียบของทั้ง 2 ระบบ

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า TPNR ที่ได้จากระบบของ DCP ให้สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพดีกว่าระบบก้ำมะกัน แต่ทั้งนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน เนื่องจากในทั้ง 2 ระบบมีการใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงไม่เท่ากัน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ที่ช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิต เช่น สารช่วยตัดสายโซ่โมเลกุล (Peptisers) และสารช่วยผสมอื่นๆ
2. ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืดของแต่ละวัฏภาค ที่มีผลต่อสมบัติของ TPNR
3. ศึกษาสมบัติการไหล และความสามารถในการขึ้นรูปอื่นๆ ของ TPNR ที่เตรียมได้

## เอกสารอ้างอิง

1. วราภรณ์ ขจรไชยกูล การออกสูตรยางและกระบวนการผลิต ส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร 2541.
2. อธิพิล แจ่มชัด เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542.
3. Harper, C.A., Handbook of Plastics, Elastomer, and Composites, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw Hill Book CO., New York, 1998.
4. นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2537.
5. ณัฐศิริ ศรีสิทธิพันธุ์กุล และ สุชีวิน สังกะมิลินท์ "การจำแนกลักษณะของการผสมเข้ากันได้ของ ไนลอน-6 อะครีโลไนไตรล บิวทาไดอีนสไตรีน และพอลิโพลิฟีนที่ใช้แล้ว" โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.
6. Fox, D.W. and Allen, R.B., High Performance and Composite Encyclopedia, John Wiley & Sons, New York, 1991.
7. Hamid, H.S. and Atiquillah, M., "Role of Blending in Polyethylene Recycling." *J.M.S.-Rev.Macromol.Chem.Phys.*, Vol. 35,1995, pp. 495-515.
8. Legge, N.R., Holden,G. and Schropder,H.E., Thermoplastic Elastomers, Carl Hanser Verlag, New York, 1987.
9. อธิพิล แจ่มชัด เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542.
10. Peter, A.C., PDL Handbook Series, The Rubber Formulary, Noyes Publicatons, New York, 1992.
11. เจริญ นาคะสุวรรณค์ กระบวนการแปรรูปพลาสติก ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี 2540.
12. Philip, K.F., Rubber Processing and Production Origination, Butler & Tanner, New York and London. 1985, pp. 50-51.
13. Joseph, C.S., editor, Polymeric Material Encyclopedia, Vol. 8, Boca Raton : CRC Press, New York,1994.
14. Charles, E.C., Polymer Chemistry, 4<sup>th</sup> ed., Marcel Dekker, Inc., New York, 1996.

เอกสารนี้เป็นของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่สามารถนำออกนอกมหาวิทยาลัยได้

15. บัณฑิต ผลโยธิน ญัฐนันท์ นิมยงค์ และสุรียพร กุลตั้งกิจเสรี "อิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยางธรรมชาติ" โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544.
16. วรณี สุรางค์โสภณ "การศึกษาเพื่อพัฒนายางเทอร์โมพลาสติกจากยางธรรมชาติผสมพลาสติก" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล 2534.
17. กฤตย์ แสงทอง "การศึกษาการผสมแบบเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีน" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล 2538.
18. Al-Malaika, S. and Amir, E.J., "Thermoplastic Elastomers I. Effect of Processing Variable on Tensile Properties of Natural Rubber/Polypropylene Blends." *J.Nat.Rubb.Res.*, Vol. 1, No. 2,1986, pp. 104-121.
19. Yin, J., Qin, C., and Huang, B., "Compatibilization of Natural Rubber/Polyethylene Blends by Polyethylene-b-Polyisoprene Diblock Copolymers", *Polymer.*, Vol. 31,1990, pp. 663-667.
20. Dahlam, H.M. Zaman, M.D.K. and Ibrahim, A. " Liquid Natural Rubber (LNR) as a Compatibilizer in NR/LLDPE Blends", *J.Appl.Polym.Sci.*, Vol. 78, 2000, pp. 1776-1782.
21. Mousa, A., Ishiaku, U.S. and Mohd Ishuk, Z.A., *Plastics Rubber and Composites*, Vol. 26,1997, pp. 331-335.
22. ASTM D 638 Committee on Standard. Standard Test Methods for Tensile Properties of Rubber (Matrix). Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1993.
23. ASTM D 2240 Committee on Standard. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastic and Electrical Insulating Materials. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1993.
24. ASTM D 3616 Committee on Standard. Standard Test Methods for Tensile Properties of Rubber (Matrix). Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1993.
25. Jacqueline, I.K., *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1986.

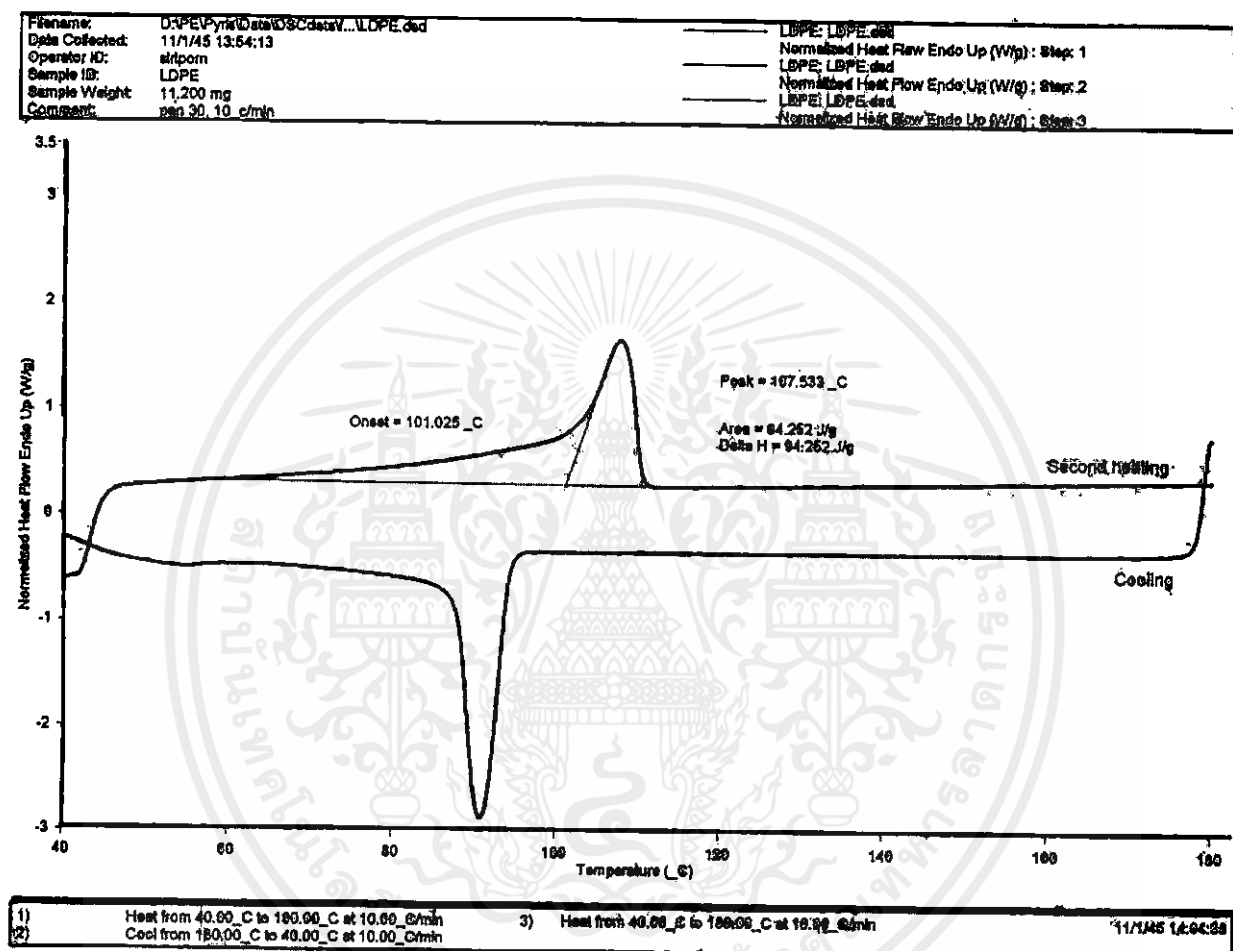
26. Jesse, E., *Plastic Additives and Modifiers Handbook*, Chapman & Hall, London, 1996, pp. 858.
27. Poh, B.T. and Khok, G.K., "Tensile Property of Epoxidized Natural Rubber/Natural Rubber Blends", *Polym.-Plat. Technol. Eng.*, Vol. 39, No. 1, 2000, pp. 151-161.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

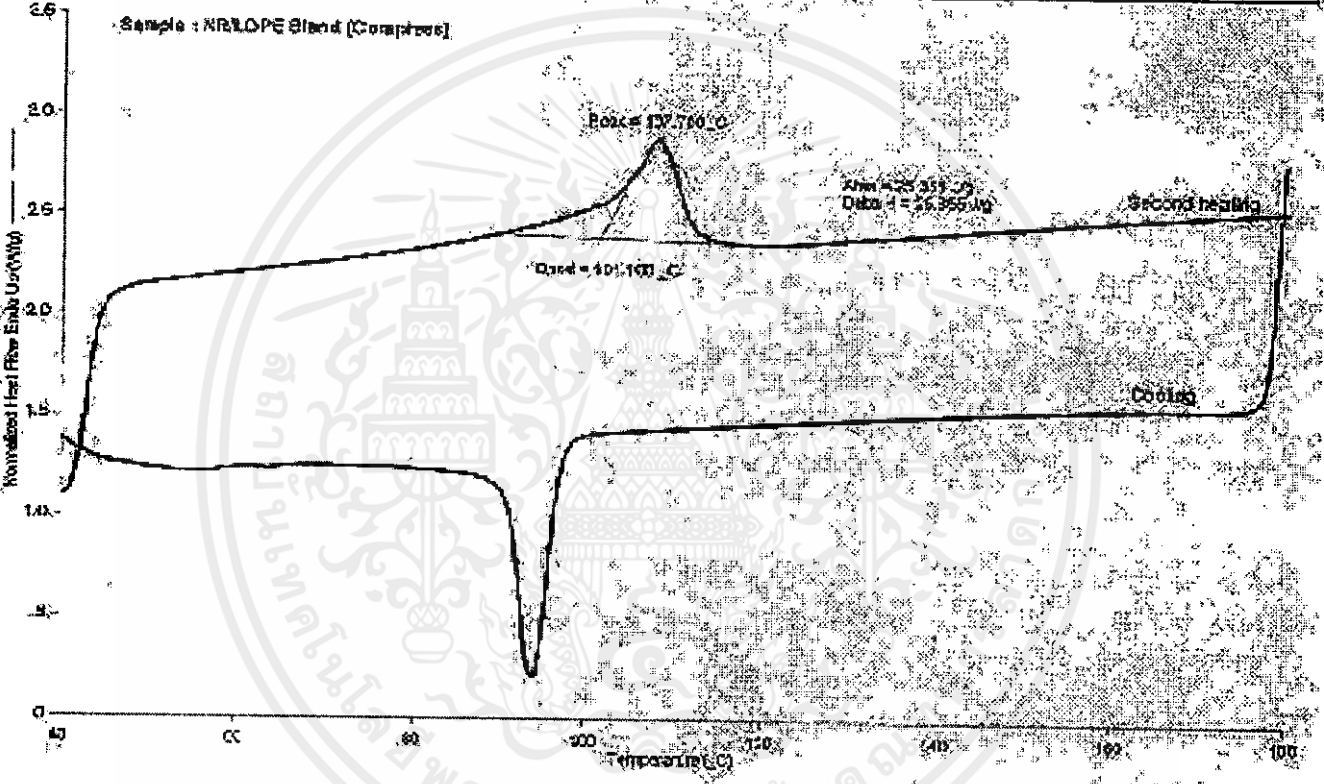
## ภาคผนวก ก กราฟสมบัติทางความร้อนจากเครื่อง DSC



รูปที่ ก.1 กราฟจากเครื่อง DSC ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

File Name: D:\TPNR\งานวิจัย\TPNR_2019\TPNR_001	LDPE - HFC compressed
Date Collected: 22/04/16 14:33:01	Normalized Heat Flow Endo (J/g) : Run 2
Operator ID: d1p01	LDPE - HFC compressed.dwg
Sample ID: LDPE - HFC	Normalized Heat Flow Endo (J/g) : Run 3
Container: gas 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100	

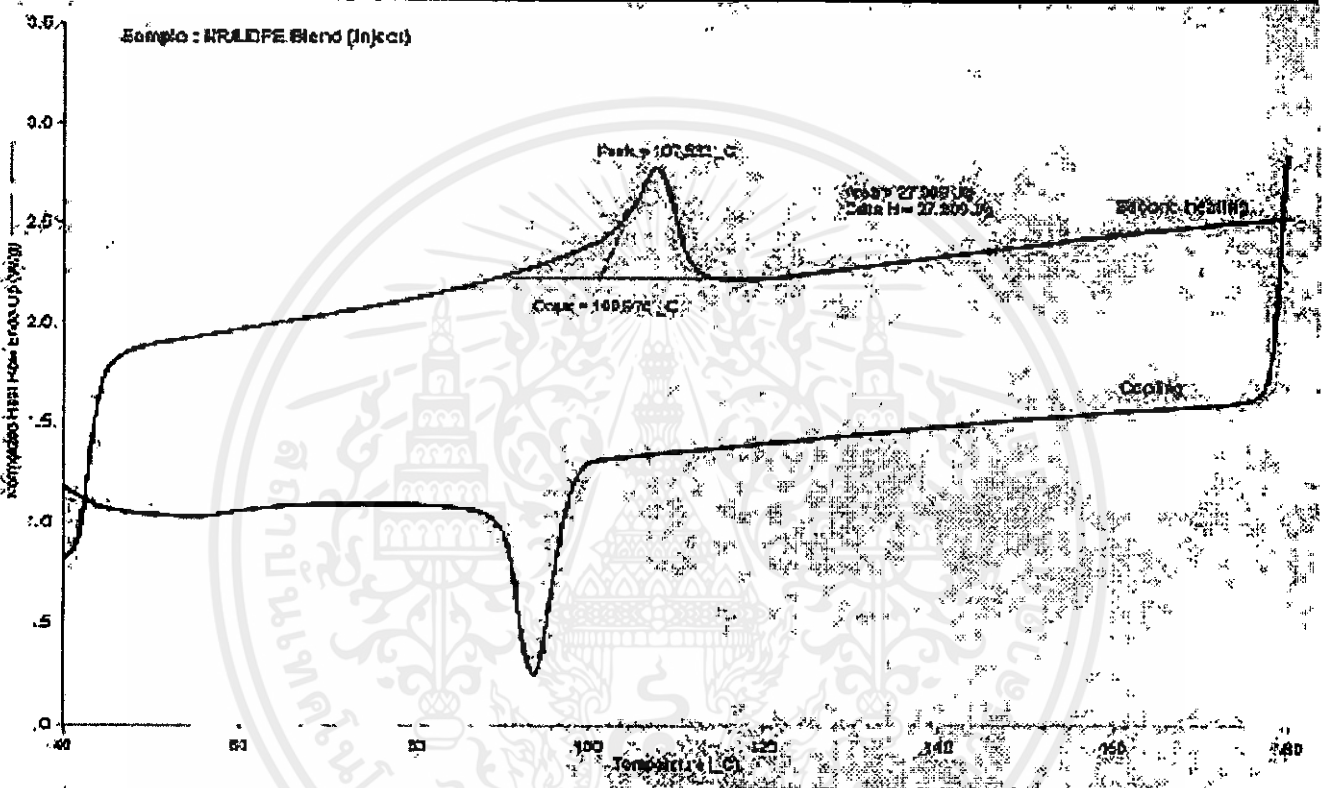


1) Initial temp 40.00 C to 40.00 C at 10.00 C/min	2) Heating 40.00 C to 150.00 C at 10.00 C/min
3) Cool from 135.00 C to 40.00 C at 10.00 C/min	

รูปที่ ก.2 กราฟจากเครื่อง DSC ของ TPNR ระบบ DCP จากเครื่องอัดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

File Name:	D:\EP\งานวิจัย\2562\25620206_1\1000000	Cell:	100
Date Acquired:	22/04/2023 13:43:13	Mod:	Mod 2
Operator ID:	airboom	Flow Rate:	10.000000
Sample ID:	LOPE - ml	Flow Rate:	10.000000
Comment:	pa1 50, 0.0/min	Mod:	Mod 2



1)	Heat flow = 0.00°C to 150.00°C at 10.00°C/min	Heat flow = 150.00°C to 180.00°C at 10.00°C/min	100.00°C
2)	Cool flow = 180.00°C to 40.00°C at 10.00°C/min		

รูปที่ ก.3 กราฟจากเครื่อง DSC ของ TPNR ระบบ DCP จากเครื่องฉีดขึ้นรูป

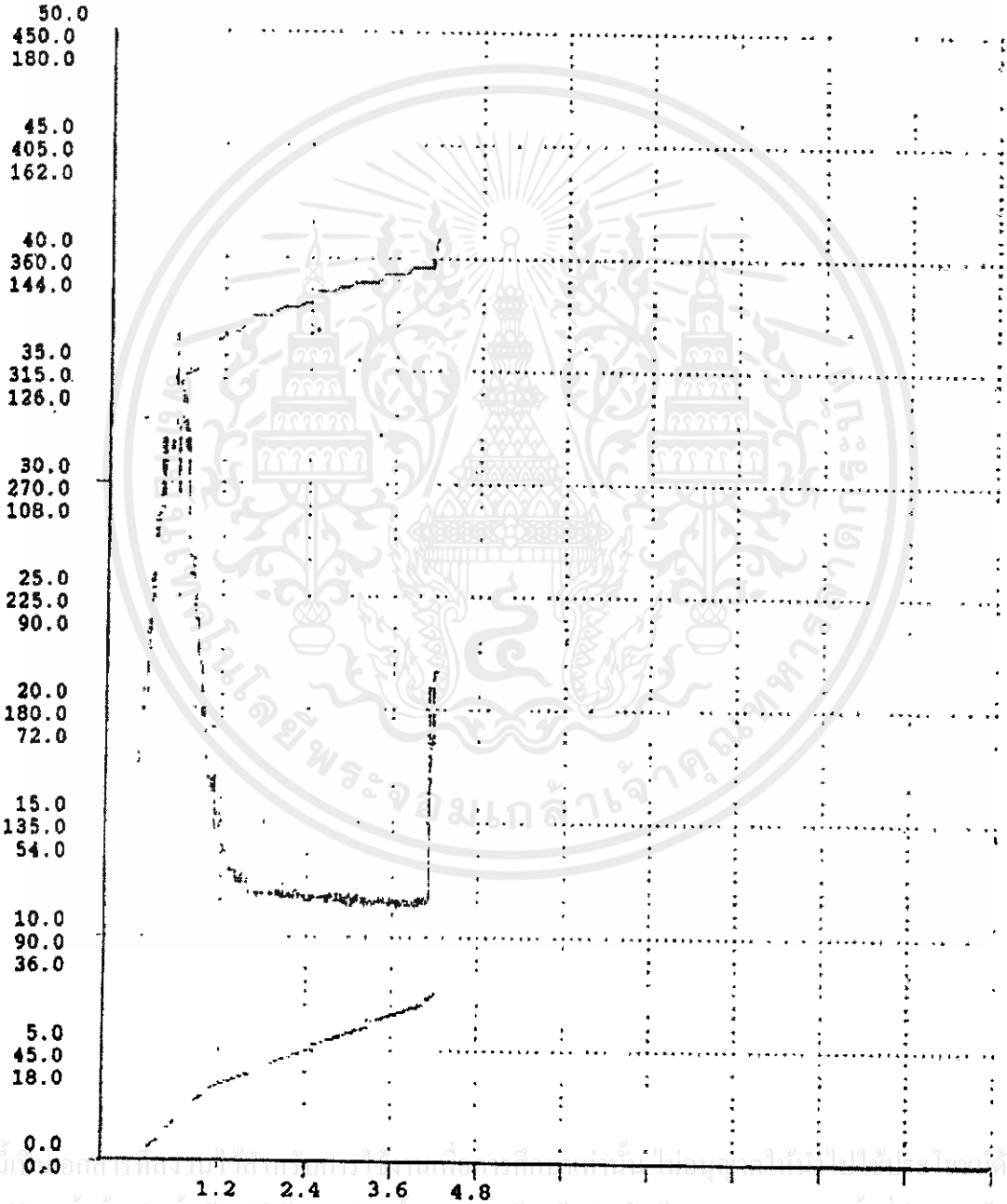
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข กราฟจากเครื่อง Brabender Plasicoder

OTITLE: LDPE140

condition 50

FILE NAME: LDPE140  
TQ: 0-50 [Nm]  
TTQ: 0-450 [Nmmin]  
T2: 0-180 [C]

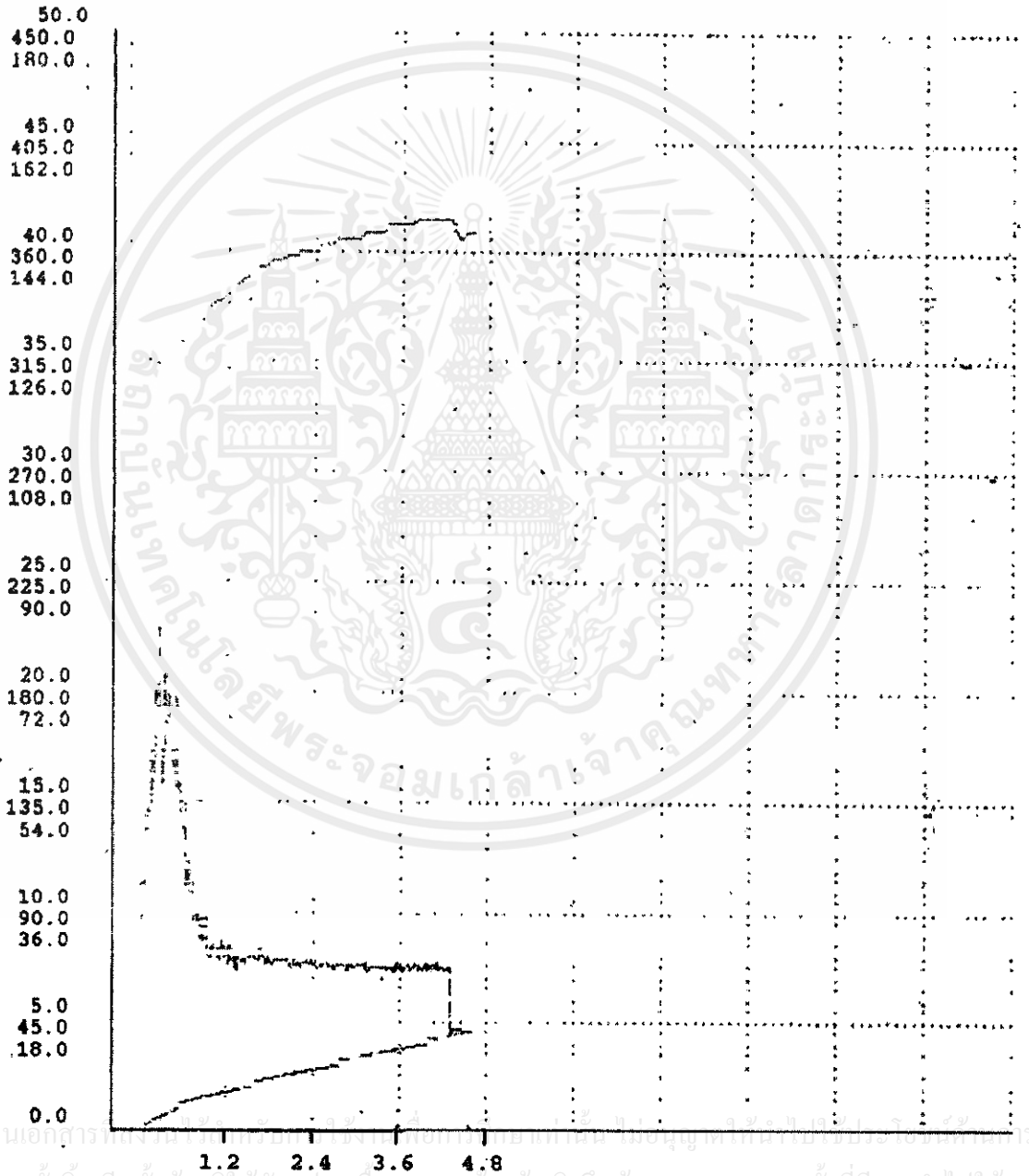


รูปที่ ข.1 กราฟจากเครื่อง Brabender Plasicoder ของ LDPE ที่อุณหภูมิ 140 °C

TITLE: LDPE150

condition 50

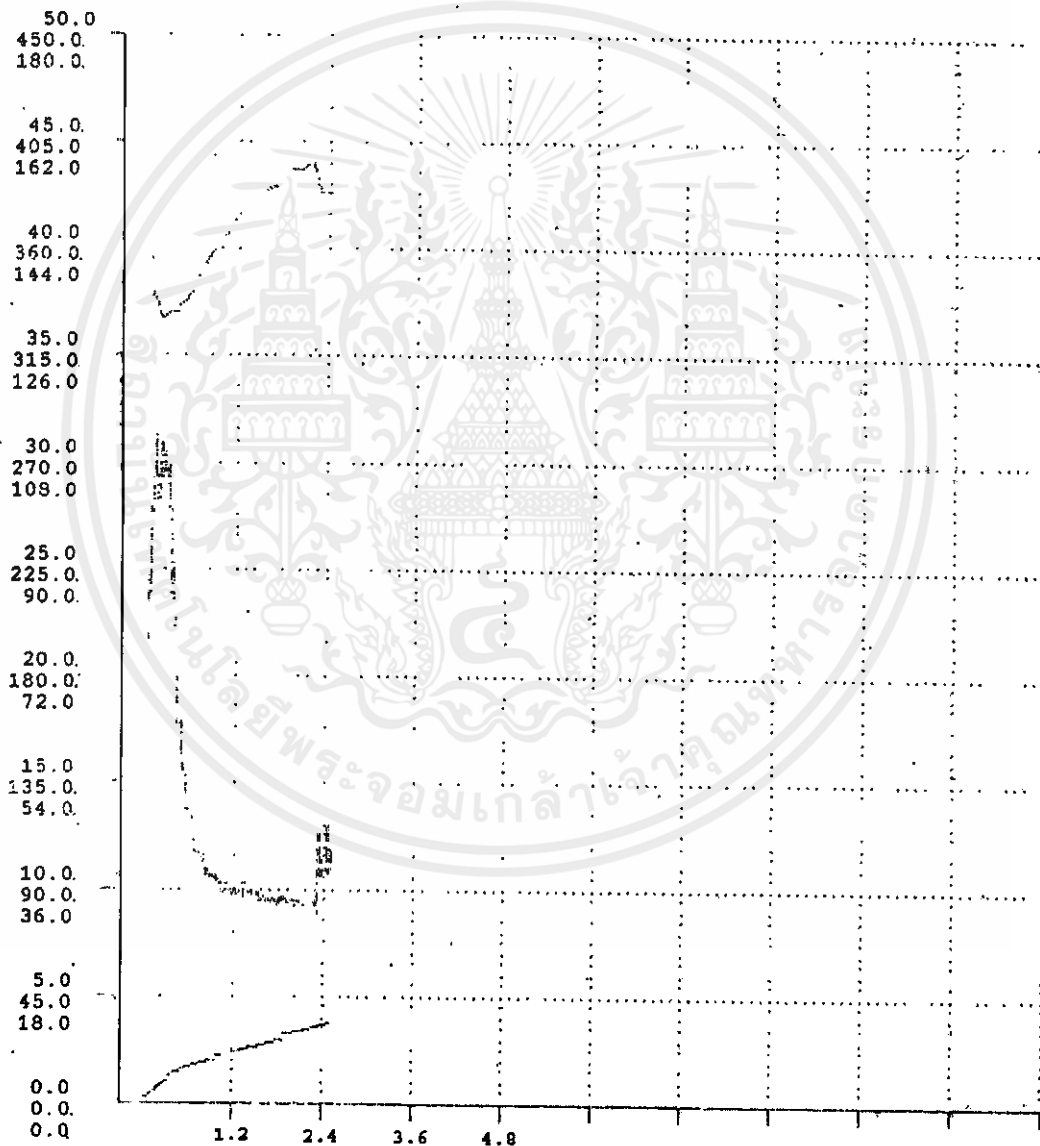
FILE NAME: LDPE150  
TQ: 0-50 [Nm]  
TTQ: 0-450 [Nmmin]  
T2: 0-180 [C]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเผยแพร่เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ๓.2 กราฟจากเครื่อง Brabender Plasicoder ของ LDPE ที่อุณหภูมิ 150 °C

TITLE: LDPE160  
condition 50  
FILE NAME: LDPE160  
TQ: 0-50 [Nm]  
TTQ: 0-450 [Nmmin]  
T2: 0-180 [C]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.3 กราฟจากเครื่อง Brabender Plasicoder ของ LDPE ที่อุณหภูมิ 160 °C

ภาคผนวก ค สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection moulding machine

PROGRAMING TIME

DIE CLS/OPN TIME	:	50	MELTING TIME	:	150
SID-COR ACT TIME	:	0	DECOMPRS TIME	:	1
1 ST STG INJ TIME	:	25	COOLING TIME	:	150
2 ND STG INJ TIME	:	20	EJECTOR COUNT	:	1
3 RD STG INJ TIME	:	15	SCW FWD TIME	:	0
EJECT FWD DLY TIME	:	0	SCW BWD TIME 1	:	0
MELTING DLY TIME	:	10	SCW BWD TIME 2	:	0
EJE BKD DLY TIME	:	0	ALARM TIME	:	500

PROGRAMING PRESSURE

DIE CLSPRESR	:	30	DECOMP PRESR	:	20
CLS LOW PRESR	:	35	PLUNGER PRESR	:	20
CLS HI PRESR	:	30	EJECTOR PRESR	:	40
DIE OPN PRESR	:	30	SCW-IN PRESR	:	30
1 ST INJ PRESR	:	70	DIE ADJ PRESR	:	30
2 ND INJ PRESR	:	70			
3 RD INJ PRESR	:	70			
MELTING PRESR	:	50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### PROGRAMING FLOW SPEED

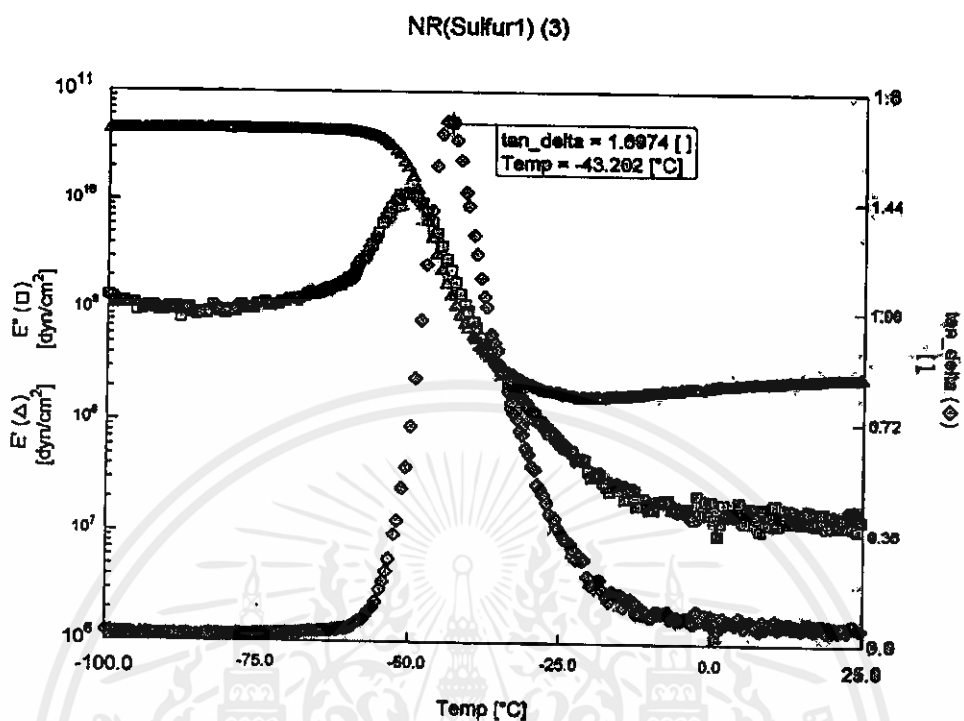
RAPID CLS SPD	:	30	1 ST STG INJ SPD	:	80
HIGH CLS SPD	:	20	2 ND STG INJ SPD	:	80
CLAMPING SPD	:	15	3 RD STG INJ SPD	:	80
DIE OPN SLW1	:	5	MELTING SPD	:	40
RAPID OPN SPD	:	20	DECOMP SPD	:	20
DIE OPN SLW2	:	10	EJECTOR SPD	:	20
PLUNGER SPD	:	20	SCREW-IN SPD	:	0
DIE ADJ SPD	:	25	DIE CHANGE SPD	:	0

### PROGRAMING TEMPERATURES

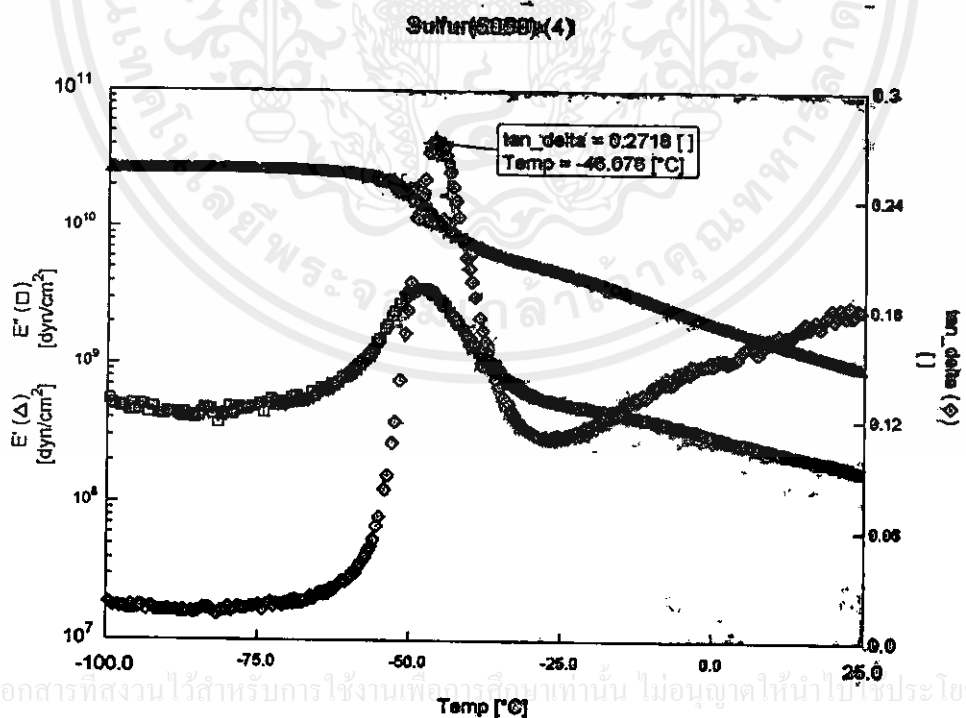
PROGRAMED TEMP	CURRENT TEMP
NOZZLE	190
ZONE 1	180
ZONE 2	170
ZONE 3	0
ZONE 4	0
ZONE 5	0
ZONE 6	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR



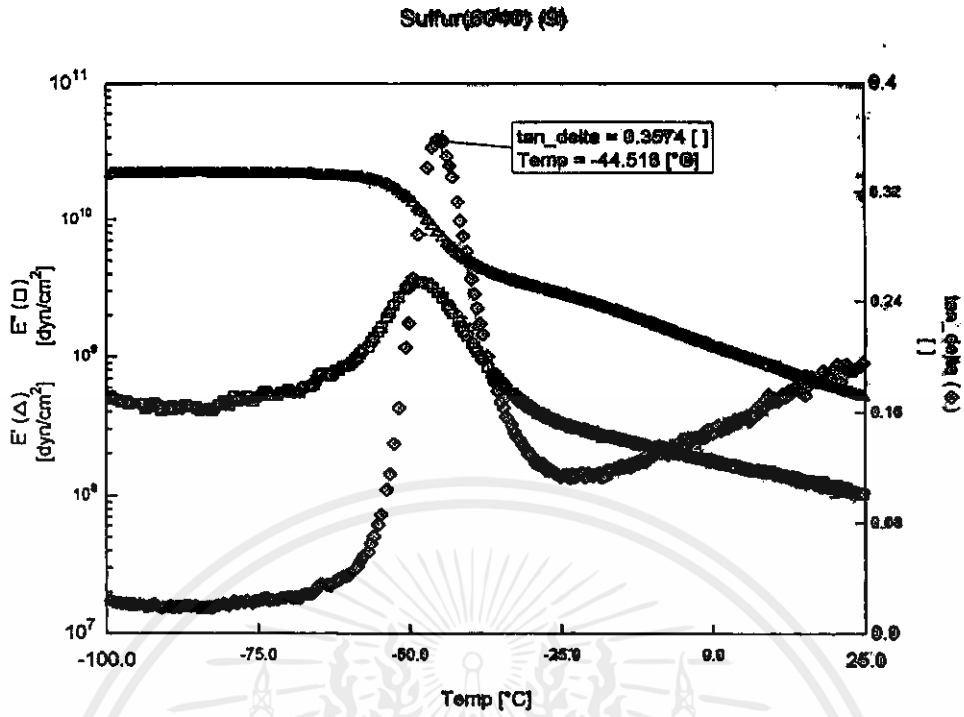
รูปที่ ง.1 กราฟจากเครื่อง DMTA ของยางผสมสูตร ที่ใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง



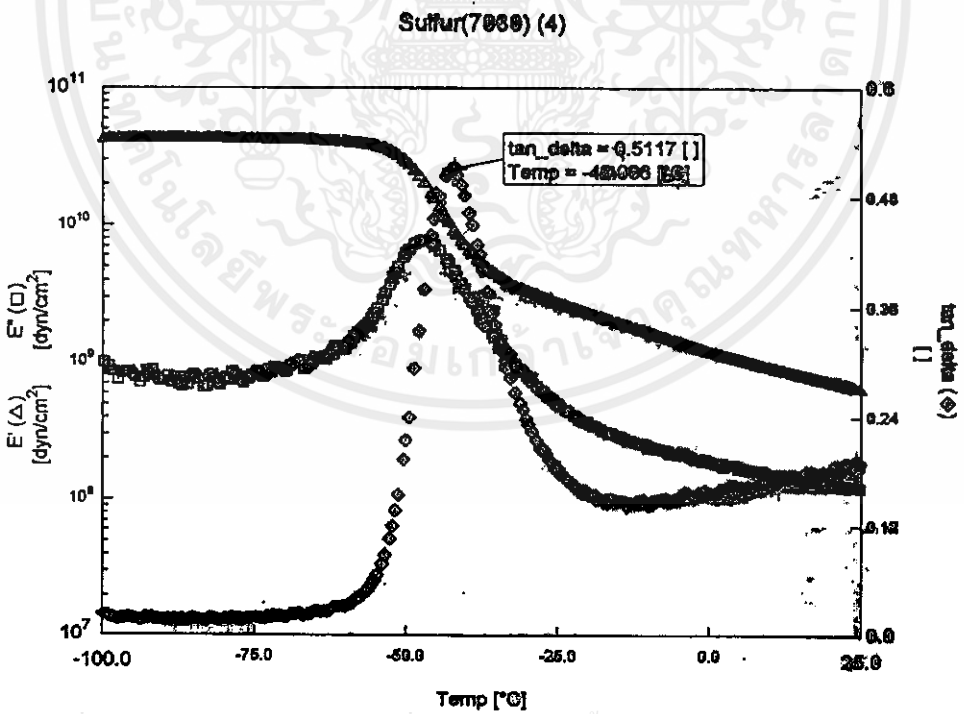
รูปที่ ง.2 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 50:50 ที่ใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

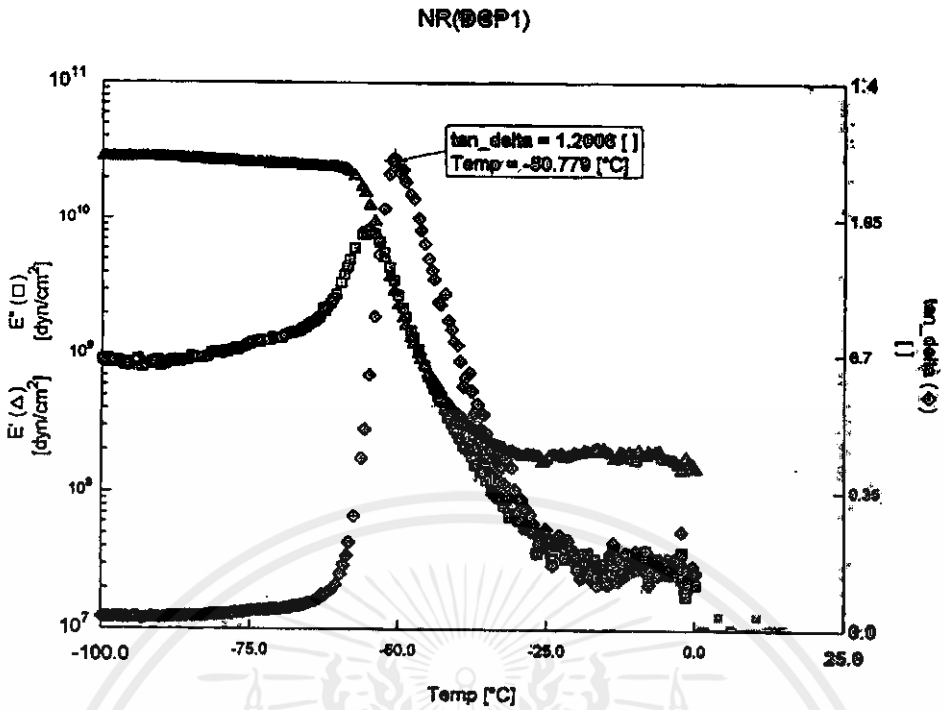


รูปที่ ๓.3 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 60:40 ที่ใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง



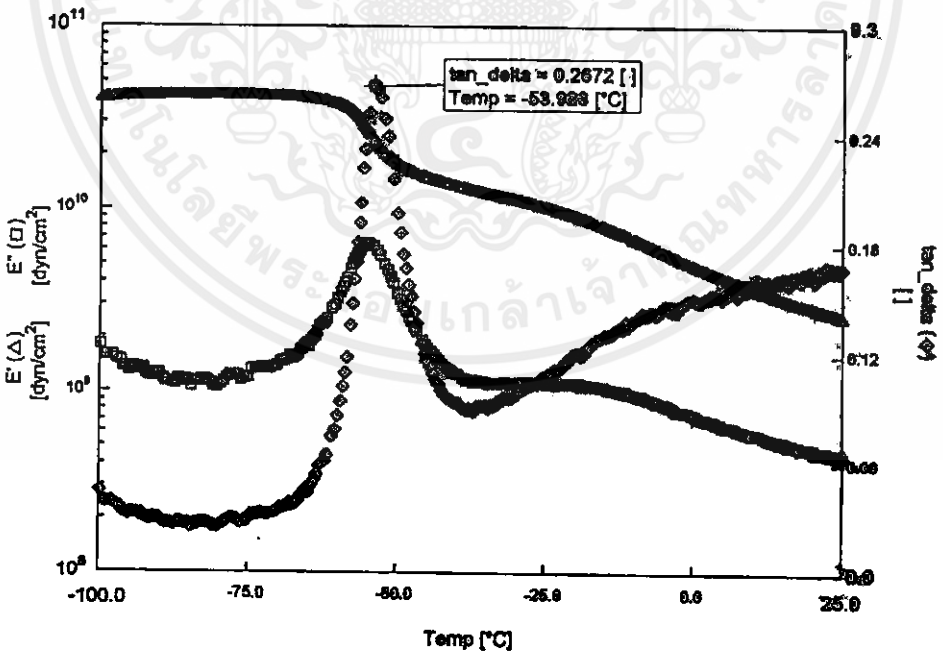
รูปที่ ๓.4 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 70:30 ที่ใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.5 กราฟจากเครื่อง DMTA ของยางผสมสูตรที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง

DCP(5050) (10)

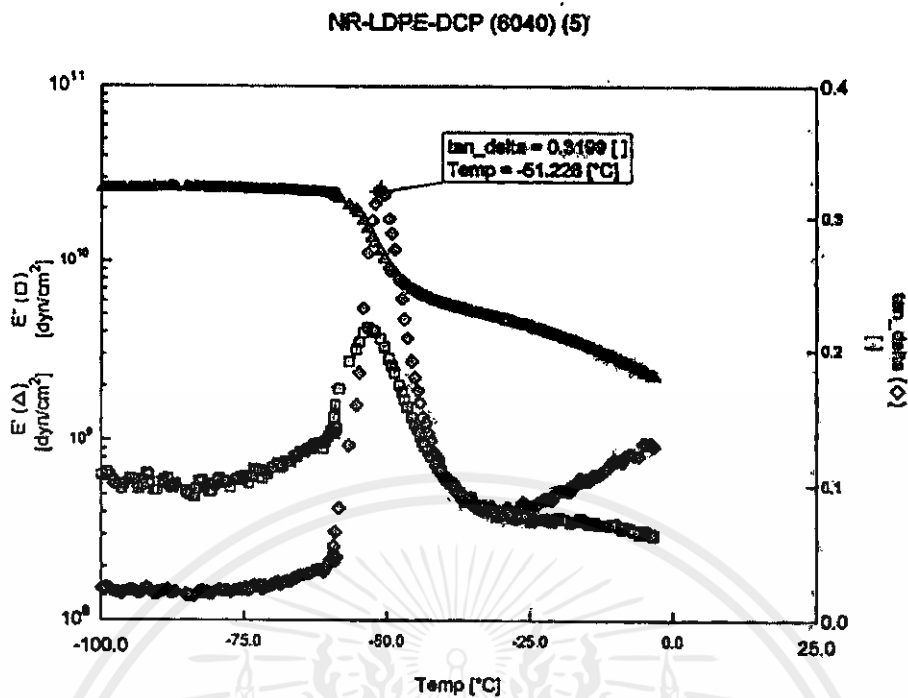


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

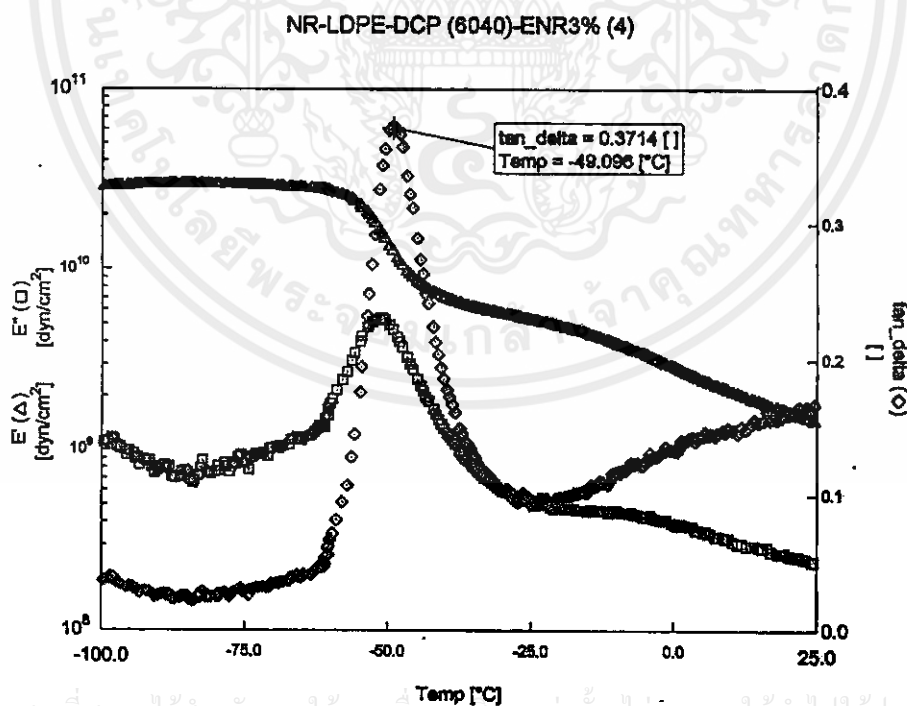
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ๓.6 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 50:50

ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง

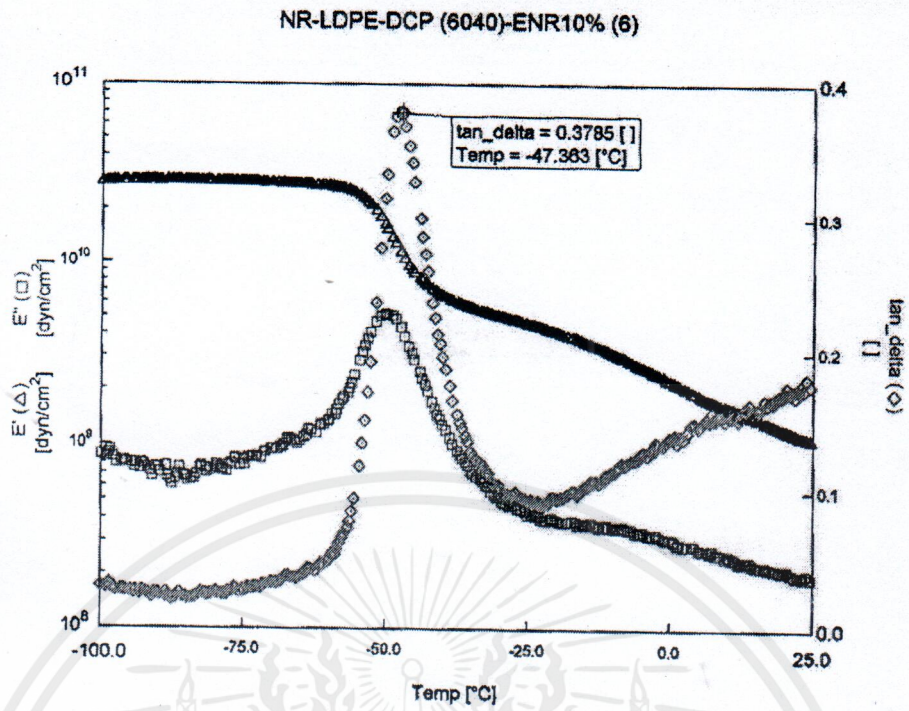


รูปที่ ๗.7 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 60:40 ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง

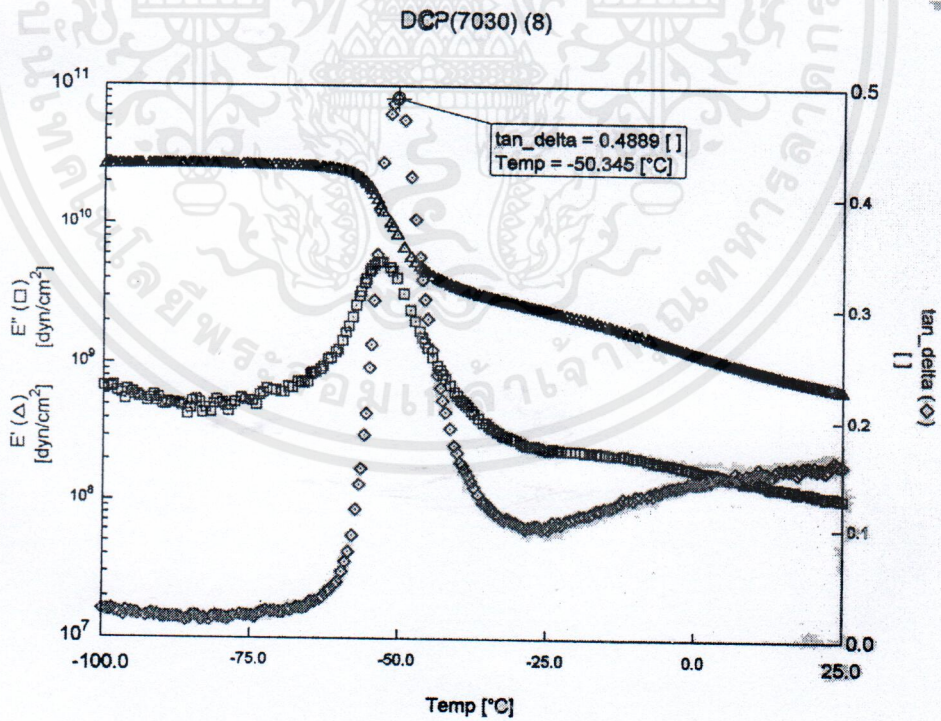


รูปที่ ๗.8 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 60:40 ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง เมื่อเติมสารช่วยผสม ENR-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.9 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 60:40 ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง เมื่อเติมสารช่วยผสม ENR-10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้เป็นของโรงเรียนพระปริยัติธรรม แผนกธรรม และบาลี มหาวิทยาลัยมหามกุฏราชวิทยาลัย วิทยาเขตมหานครราชบุรี

รูปที่ ง.10 กราฟจากเครื่อง DMTA ของ TPNR ที่อัตราส่วน NR/LDPE เท่ากับ 70:30 ที่ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ สุพิชญ์ ปัญญาวัฒน์พงศ์
- วันเกิด 8 มกราคม พ.ศ. 2519
- สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
- การศึกษา - ระดับมัธยมจากโรงเรียนพระโขนงพิทยาลัย พ.ศ. 2535-2537  
 - ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2538-2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้