

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์  
จากยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน

STUDY OF PARAMETERS AFFECTING PROPERTIES OF NATURAL  
RUBBER – POLYPROPYLENE THERMOPLASTIC ELASTOMERS



สุจิรา สารลึก

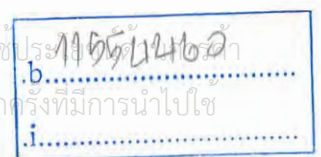
SUJIRA SARALUEK

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61027  
วันเดือนปี..... - 7 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2548

ISBN 974-15-1788-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**STUDY OF PARAMETERS AFFECTING PROPERTIES OF NATURAL  
RUBBER – POLYPROPYLENE THERMOPLASTIC ELASTOMERS**

**SUJIRA SARALUEK**

**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**

**2005**

**ISBN 974-15-1788-2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน
นักศึกษา	นางสาวสุจิรา สารล็ก
รหัสประจำตัว	45064401
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ปราณี ภิญโญชีพ ดร.ชลลดา ฤตวิรุพท์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และพอลิพรอพิลีน (PP) หรือ เรียกว่า ทีพีเอ็นอาร์ (Thermoplastic Natural Rubber, TPNR) โดยได้เลือกสูตรผสมระหว่าง NR/PP ที่อัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก TPNR สามารถเตรียมได้จากการนำยางธรรมชาติผสมสูตรใส่ในเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง แล้วนำมาผสมกับ PP ในเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 170 °C และความเร็วยรอบโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที ด้วยเทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) และการเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic vulcanization) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป และเน้นการศึกษาผลของดรชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) ของ PP ระหว่าง MFI 3.5 และ MFI 10 และปรับปรุงสมบัติของ TPNR โดยใช้สารเชื่อมโยงไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) สารตัดสายโซ่ และสารช่วยผสม คือยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenated Natural Rubber, HNR) โดยศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

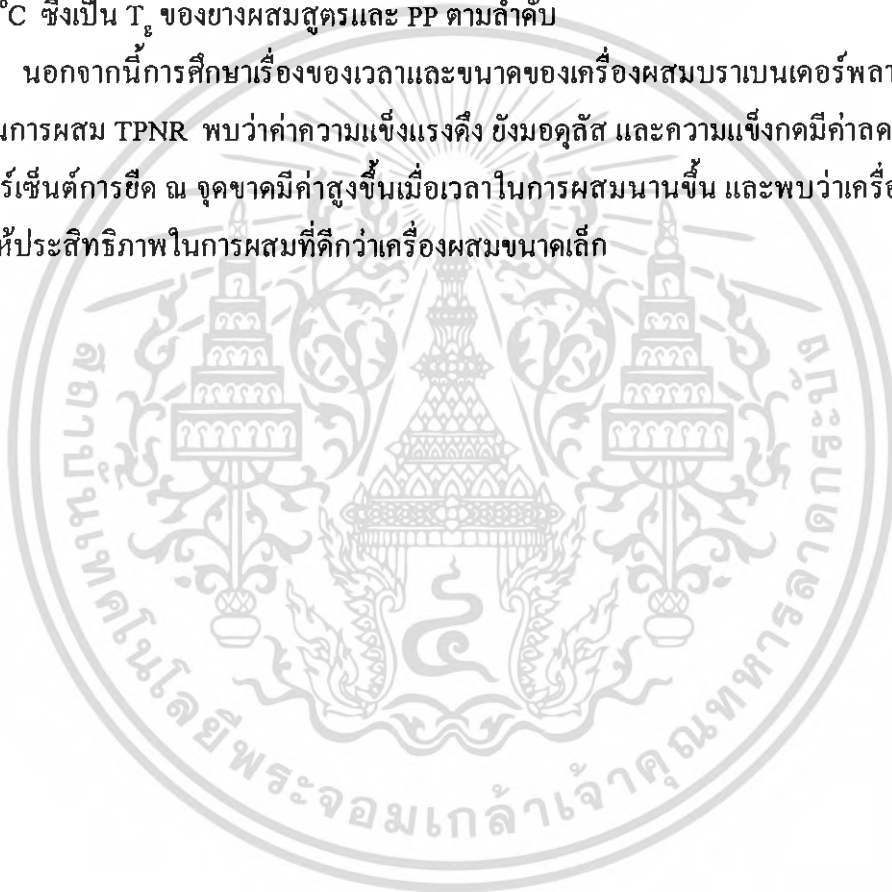
จากผลการทดลองพบว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 และมีปริมาณ DCP 0.3 phr เป็นสูตรผสมที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR จากนั้นนำไปศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตร โดยการใช้สารตัดสายโซ่ และผลของสารช่วยผสม HNR พบว่าการเติมสารตัดสายโซ่ทำให้สมบัติเชิงกลของ TPNR มีค่าลดลง จากการศึกษาผลของสารช่วยผสม HNR พบว่า HNR ที่ปริมาณ 1 และ 3 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึง ย้ยมอดูลัส และความแข็งกคมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น จากการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัณฐานวิทยาของ TPNR พบว่ามีการกระจายของ PP ใน TPNR ต่ำกว่า TPNR ที่ไม่มีการเติมของ HNR เมื่อนำ TPNR มาผ่านการขึ้นรูปใหม่ด้วยการฉีดขึ้นรูป ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลงแต่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ฉ จุดขาดสูงขึ้น

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter) พบว่าการเติมสารเชื่อม โยง และสารช่วยผสม HNR ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ลดลง และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer) พบว่าให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) สองค่า คือ ช่วงอุณหภูมิ  $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $10\text{-}20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็น  $T_g$  ของยางผสมสูตรและ PP ตามลำดับ

นอกจากนี้การศึกษาเรื่องของเวลาและขนาดของเครื่องผสมบราวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ที่ใช้ในการผสม TPNR พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ย้ยมอดูลัส และความแข็งกดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ฉ จุดขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการผสมนานขึ้น และพบว่าเครื่องผสมขนาดใหญ่ให้ประสิทธิภาพในการผสมที่ดีกว่าเครื่องผสมขนาดเล็ก



<b>Thesis Title</b>	Study of Parameters Affecting Properties of Natural Rubber - Polypropylene Thermoplastic Elastomers
<b>Student</b>	Miss Sujira Saraluek
<b>Student ID</b>	45064401
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud
<b>Co-Advisors</b>	Assoc.Prof.Dr.Pranee Phinyocheep Dr. Chonlada Ritvirulh

### ABSTRACT

This thesis involved preparation and property characterization of a thermoplastic elastomer (TPE) prepared from natural rubber (NR) and polypropylene (PP) so called "TPNR" (Thermoplastic Natural Rubber). The blend ratio of 60/40 (NR/PP weight ratio) was selected to study. TPNR was prepared by compounding the NR formula in a two roll mill and blended with PP in an internal mixer at 170 °C with a rotor speed of 50 rpm by using melt blending and dynamic vulcanization techniques. TPNR was shaped by injection molding technique. Factors affecting TPNR properties were investigated including effects of melt flow index (MFI) of PP (MFI 3.5 and MFI 10), amount of crosslinking agent (DCP), peptizer and hydrogenated natural rubber (HNR) as a compatibilizer. Properties of the TPNR were then characterized such as mechanical, physical, thermal and morphological properties. It was found that TPNR having optimum mechanical properties was prepared from PP MFI 3.5 with 0.3 phr DCP loading. It was revealed that mechanical properties of TPNR was decreased as peptizer loading was increased. However, by using the compatibilizer (HNR) in TPNR, tensile strength, Young's modulus and hardness were decreased, whereas %elongation at break was increased at HNR loading of 1 and 3 phr. SEM micrographs showed that PP dispersion in NR phase was improved when the

compatibilizer was included. However, recycled TPNR was found a slightly decrease in tensile strength, Young's modulus and hardness but %elongation at break was increased.

Thermal properties of the blends were examined by DSC and DMTA. The DSC results showed that the degree of crystallinity of the blends was decreased when DCP and HNR were used. The DMTA results showed that the TPNR had two  $T_g$  values at about  $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $10\text{-}20\text{ }^{\circ}\text{C}$  as  $T_g$  of NR and PP, respectively.

In addition, effects of mixing time and chamber volume of the brabender plasticorder were studied. It was revealed that tensile strength, Young's modulus and hardness were decreased but % elongation at break was increased when mixing time was increased. The mixer with the larger chamber had a higher mixing efficiency than the smaller one.



# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวข้องกับ  
ทางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ตลอดจนทุก ๆ สิ่งจาก รศ. ดร. อธิธิพล แจ่มชัด และ  
ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ปราณี ภิญโญชีพ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล  
อาจารย์ผู้ร่วมควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ให้การปรึกษา คำแนะนำช่วยแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ  
และให้ความอนุเคราะห์ HNR

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ผศ. ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ และ  
ดร. พงษ์ธร แซ่ฮุย อาจารย์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและ แก้ไข  
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประคิษฐ์ และคุณสุคใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน  
ทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและ  
สถาบันวิจัยบาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าง  
แผ่นรมควีน และทุนวิจัยสนับสนุนงานวิจัยบางส่วน

ขอขอบคุณ บริษัท ซีซีซี ค้าเคมีภัณฑ์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อพอลิพรอพทีน (P400S และ P600F)  
เพื่อใช้ในการงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทสยามมิชชาตินกรุ๊ป จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสารตัดสายโซ่ (Aktiplast<sup>®</sup> 8) เพื่อใช้  
ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง  
DMTA

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ พี่น้อง และเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกท่านที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนการ  
ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุคคลท่านอื่น ๆ ที่ให้ความกรุณา ช่วยเหลือ ซึ่งผู้เขียนมิได้กล่าวถึงอีก  
มากมาย ทางผู้เขียนขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุจิรา สารล็ก

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XII
สารบัญรูป.....	XIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer, TPEs).....	6
2.1.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....	7
2.1.2 บางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก.....	8
2.2 บางธรรมชาติ.....	10
2.3 สารเคมีสำหรับบาง.....	11
2.3.1 สารเชื่อมโยง.....	11
2.3.2 สารเร่งการเชื่อมโยง.....	15
2.3.3 สารกระตุ่น.....	17
2.3.4 สารตัวเติม.....	18
2.3.5 พลาสติกไซเซอร์.....	20
2.3.6 สารป้องกันบางเสื่อมสภาพ (Protective agents).....	22
2.3.6.1 สารแอนตี้ออกซิแดนท์.....	22
2.3.6.2 สารแอนตี้โอโซนแนนท์.....	23

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.7 สารเติมแต่งอื่น ๆ.....	23
2.4 พอลิพรอพิลีน.....	24
2.5 สารช่วยผสม.....	27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>36</b>
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	36
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์.....	37
3.3 วิธีการทดลอง.....	41
3.3.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการหลอมเหลว PP เพื่อเตรียม TPNR.....	41
3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตร.....	41
3.3.3 เตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก.....	43
3.4 การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้.....	44
3.4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR.....	44
3.4.2 ความแข็งแรง.....	45
3.4.3 ศึกษาพื้นฐานวิทยา.....	45
3.4.4 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	46
3.4.5 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA.....	46
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....</b>	<b>48</b>
4.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีน เพื่อเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก.....	48
4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีน.....	48
4.1.2 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีน.....	48
4.2 การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร.....	49
4.2.1 การศึกษาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการเตรียมยางผสมสูตร ด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Curelastometer).....	49

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR จากยางผสมสูตรที่เหมาะสม.....	50
4.2.2.1 การศึกษาปริมาณไดคิมิลเปอร์ออกไซด์และผลของ กรรมวิธีการไหลของพอลิพรอพิลีน.....	50
4.2.2.2 การศึกษาผลของความหนืดโดยการใช้สารตัดสายโซ่.....	55
4.2.3 การศึกษาสัมมูลฐานวิทยาของ TPNR จากยางผสมสูตรที่เหมาะสม.....	59
4.2.3.1 การศึกษาผลของปริมาณไดคิมิลเปอร์ออกไซด์และ ผลของกรรมวิธีการไหลของพอลิพรอพิลีน.....	61
4.2.3.2 การศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตร.....	62
4.2.4 การศึกษายางผสมสูตรที่เหมาะสมต่อสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DSC ของ TPNR .....	67
4.2.5 การศึกษายางผสมสูตรที่เหมาะสมต่อสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DMTA ของ TPNR จาก.....	68
4.3 การศึกษาผลของสารช่วยผสม.....	72
4.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR จากผลของสารช่วยผสม.....	73
4.3.2 การศึกษาสัมมูลฐานวิทยาของ TPNR จากผลของสารช่วยผสม.....	76
4.3.3 การศึกษาผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DSC ของ TPNR .....	78
4.3.4 การศึกษาผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DMTA ของ TPNR.....	78
4.4 การศึกษาผลของการรีไซเคิล TPNR.....	81
4.4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล.....	81
4.4.2 การศึกษาสัมมูลฐานวิทยาของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล.....	81
4.4.3 การศึกษาผลการรีไซเคิลต่อสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DSC ของ TPNR .....	85
4.4.4 การศึกษาผลของการรีไซเคิลต่อสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DMTA ของ TPNR .....	85
4.5 การศึกษาเวลาในการผสมและการใช้ของเครื่องผสมต่างกัน.....	87
4.5.1 การศึกษาผลของเวลาในการผสม TPNR.....	87

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5.1.1 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อ สมบัติเชิงกลของ TPNR .....	87
4.5.1.2 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อ สัณฐานวิทยาของ TPNR .....	90
4.5.1.3 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อ สมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของ TPNR .....	91
4.5.1.4 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อ สมบัติทางความร้อนด้วย DMTA ของ TPNR .....	91
4.5.2 การศึกษาผลของเครื่องผสมบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์.....	92
4.5.2.1 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อ สมบัติเชิงกลของ TPNR.....	92
4.5.2.2 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อ สัณฐานวิทยาของ TPNR .....	93
4.5.2.3 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อ สมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของ TPNR.....	95
4.5.2.4 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อ สมบัติทางความร้อนด้วย DMTA ของ TPNR .....	95
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>98</b>
5.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีน เพื่อเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก.....	98
5.2 การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร.....	98
5.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล.....	98
5.2.2 สัณฐานวิทยาของ TPNR.....	99
5.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC.....	99
5.2.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA.....	99
5.3 การศึกษาผลของสารช่วยผสม.....	99
5.4 การศึกษาการรีไซเคิลของ TPNR.....	100

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.5 การศึกษาผลของเวลาในการผสมและการใช้เครื่องผสมขนาดต่างกัน.....	100
5.5.1 การศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อ สมบัติเชิงกลของ TPNR.....	100
5.5.2 การศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อ สัณฐานวิทยาของ TPNR .....	100
5.5.3 ศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อสมบัติทางความร้อน ด้วย DSC ของ TPNR.....	101
5.5.4 ศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อสมบัติทางความร้อน ด้วย DMTA ของ TPNR .....	101
5.6 ข้อเสนอแนะ.....	101
เอกสารอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	111

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมบัติบางประการของพอลิพรอสลิน.....	39
3.2 ขางผสมสูตรที่ใช้ในการทดลอง.....	42
4.1 ค่า Scorch time และ Cure time ของขางผสมสูตรที่มีปริมาณ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 170 °C .....	50
4.2 ความหนืดของขางผสมสูตร.....	55
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ TPNR ด้วย DSC.....	67
4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA แสดงค่า $T_g$ และ $\tan \delta_{max}$ ของขางธรรมชาติ .....	69
4.5 สมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสมจากเครื่อง DSC.....	78
4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA แสดงค่า $T_g$ และ $\tan \delta_{max}$ ของขางธรรมชาติ ในการศึกษา TPNR ที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสม.....	79
4.7 สมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิลจากเครื่อง DSC.....	85
4.8 ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วย DMTA แสดงค่า $T_g$ และค่า $\tan \delta_{max}$ ของขางธรรมชาติและพอลิพรอสลิน จากการศึกษา TPNR ที่ผ่าน การขึ้นรูปใหม่.....	86
4.9 สมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่ใช้เวลาในการผสมต่าง ๆ จากเครื่อง DSC.....	91
4.10 ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วย DMTA แสดงค่า $T_g$ และค่า $\tan \delta_{max}$ ของขางธรรมชาติ จากการศึกษา TPNR ที่ใช้เวลาในการผสมต่าง ๆ .....	92
4.11 สมบัติเชิงกลของ TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ ที่ต่างกัน.....	93
4.12 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่ผสมจากเครื่องผสม ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ด้วยเครื่อง DSC.....	95
4.13 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA แสดงค่า $T_g$ และ $\tan \delta_{max}$ ของขางธรรมชาติ จากการศึกษาผลของ TPNR ที่ผสมจากเครื่องผสมขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ .....	96

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (TPEs).....	2
1.2 อัตรการเติบโตของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์และแนวโน้มการเติบโต ในอนาคตทั่วโลก ในช่วงปี พ.ศ. 2533 – 2549.....	2
2.1 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในสถานะของหลอมเหลว และสถานะของแข็ง.....	6
2.2 โครงสร้างเทอร์โมเซต และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	7
2.3 กระบวนการในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ และเทอร์โมเซต.....	8
2.4 ช่วงความแข็งกคของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	9
2.5 โครงสร้างขงธรรมชาติที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไอโซพรีน เป็นหน่วยซ้ำ ๆ กัน.....	10
2.6 กลไกการเชื่อมโยงขงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์.....	14
2.7 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยง แบบไม่ใช้สารเร่งการเชื่อมโยง และใช้สารเร่งการเชื่อมโยงรวมทั้งการ เชื่อมโยงในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ.....	16
2.8 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยง แบบใช้สารเร่งการเชื่อมโยง แบบเร็วขงขวด แบบธรรมดา และแบบช้า.....	17
2.9 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน.....	24
2.10 โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน.....	24
2.11 โครงสร้างของซินดีโอแทกติกพอลิพรอพิลีน.....	25
2.12 โครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน.....	25
2.13 ลักษณะพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและแบบกราฟท์ที่บริเวณพื้นผิว ระหว่างสองวัฏภาค (Interphase).....	27
2.14 ลักษณะการเกิดเชื่อมโยงแบบพลวัตของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	33
3.1 สรุปแผนผังการดำเนินการวิจัยในการศึกษาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ในงานวิจัยนี้.....	40
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคิงขง TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง และผลของครรชนิกการไหลขงพอลิพรอพิลีน.....	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยงและผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน.....	51
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยงและผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน.....	52
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยงและผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน.....	52
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง .....	53
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตร ที่มีกับค่าความหนืดมุนนี้ต่างกัน.....	57
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของ TPNR ที่เตรียมจาก ยางผสมสูตร ที่มีค่าความหนืดมุนนี้ต่างกัน.....	57
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตร ที่มีค่าความหนืดมุนนี้ต่างกัน.....	58
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตร ที่มีค่าความหนืดมุนนี้ต่างกัน.....	58
4.10 การทำปฏิกิริยาของออสเมียมเตตระออกไซด์ ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของยางที่ไม่อิ่มตัว.....	59
4.11 SEM-EDS micrographs แสดงธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวและแผนภาพ การกระจายตัวของธาตุนบนพื้นผิว.....	60
4.12 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 มีปริมาณ DCP 0.1 0.3 และ 0.5 phr ตามลำดับ และที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	63
4.13 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 10 มีปริมาณ DCP 0.1 0.3 และ 0.5 phr ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	64
4.14 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 และ 10 มีปริมาณ DCP 0.3 phr ที่กำลังขยาย 40 และ 300 เท่า.....	65
4.15 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP 0.3 phr MFI 3.5) ที่ยางผสมสูตรมีค่าความหนืดมุนนี้ต่าง ๆ กัน.....	66

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 ที่มีปริมาณ สารเชื่อมโยง (DCP) ต่างกัน.....	70
4.17 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 ซึ่งยางผสมสูตรที่มีค่าความหนืดมูนี้ต่างกัน.....	71
4.18 โครงสร้างของยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาการเติม ไฮโดรเจน (Hydrogenated Natural Rubber, HNR).....	72
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณยาง HNR.....	74
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับปริมาณยาง HNR.....	74
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของ TPNR กับปริมาณยาง HNR.....	75
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณยาง HNR.....	75
4.23 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP 0.3 phr MFI 3.5) ที่มีและ ไม่มีการเติมสารช่วยผสม (HNR) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 300 เท่า.....	77
4.24 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR (MFI ของพอลิพรอพิลีนเท่ากับ 3.5 กรัม/10นาท) ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม (HNR) 0-5 phr.....	80
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล.....	82
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล.....	82
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล.....	83
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล.....	83
4.29 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP=0.3 phr MFI 3.5) ที่มีและ ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่ กำลังขยาย 300 เท่า.....	84
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ของ TPNR ที่เวลาการผสมต่าง ๆ กัน.....	88
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของ TPNR ที่เวลาในการผสมต่าง ๆ กัน.....	88
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของ TPNR ที่เวลาการผสมต่าง ๆ.....	89
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR ที่เวลาการผสมต่าง ๆ.....	89
4.34 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP=0.3 phr MFI 3.5) ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	90

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP=0.3 phr MFI 3.5) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 300 เท่า.....	94
4.36 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR ที่เตรียมจากเครื่องผสมขนาดเล็กและขนาดใหญ่.....	97



## คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

DCP	ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์
DMTA	เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer)
DSC	Differential Scanning Calorimeter
ENR-3	ยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ 3 เปอร์เซ็นต์โมล
ENR-10	ยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ 10 เปอร์เซ็นต์โมล
EPDM	ยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์
HNR	ยางธรรมชาติที่มีการเติมไฮโดรเจน
IIR	ยางบิวทิล
LDPE	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
LNR	ยางธรรมชาติชนิดเหลว
MFI	ครรชนีการไหล (Melt Flow Index)
NR	ยางธรรมชาติ
PE-g-MA	พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์
PP	พอลิพรอพิลีน
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
$\tan \delta$	ความสามารถในการกระจายพลังงานต่อความสามารถในการสะสมพลังงาน
TPEs	เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์
TPNR	ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก
TPO	เทอร์โมพลาสติกพอลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์
TPV	เทอร์โมพลาสติกเชื่อมโยง
$T_g$	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
$T_m$	อุณหภูมิการหลอมเหลว
$t_{s2}$	เวลาในการเริ่มสูกตัวของยาง (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการคงรูปจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด

## คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

$t_{c(90)}$

เวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม (Cure time) คือ เวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการคงรูป 90 เปอร์เซ็นต์

ZnO

ซิงค์ออกไซด์



# บทที่ 1

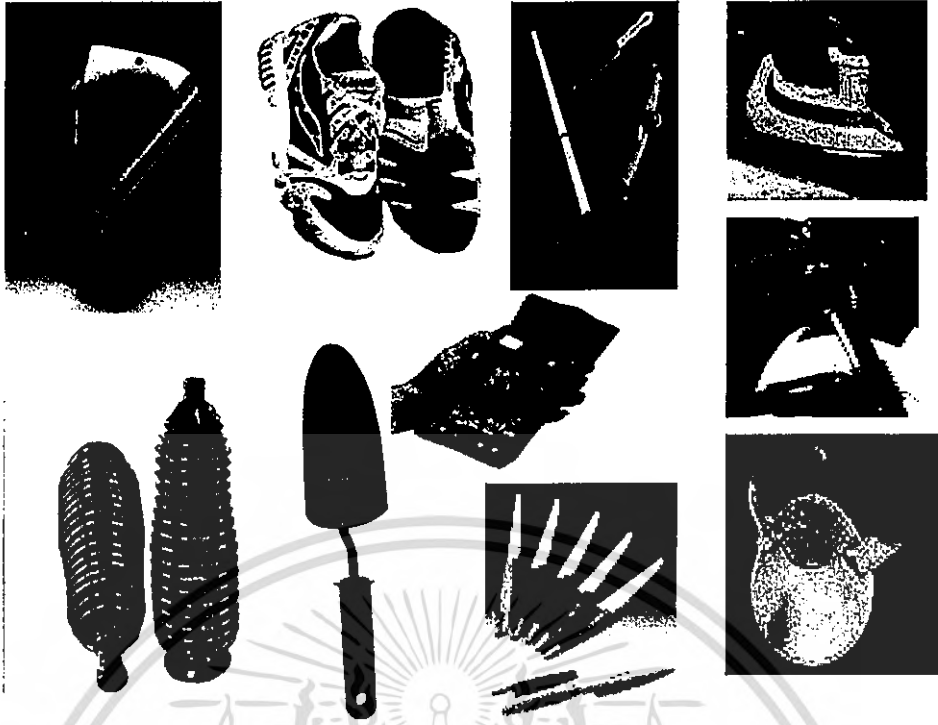
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

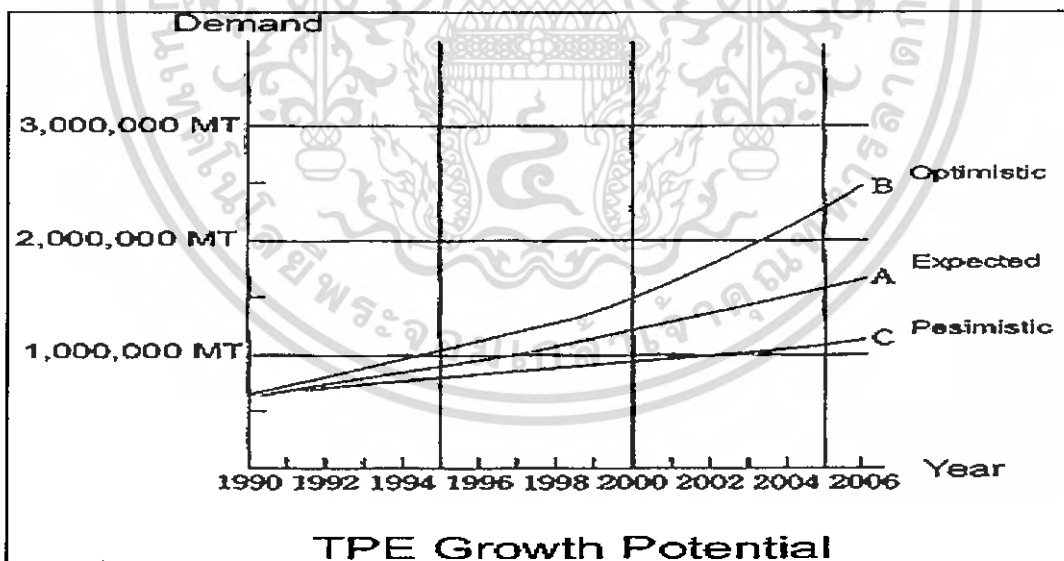
ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติและส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลกเป็นเวลานานหลายปีปริมาณการผลิตช่วงเดือนมกราคม – ตุลาคม ในปี พ.ศ. 2547 ประมาณ 2.86 ล้านตัน [1] แต่เกือบทั้งหมดเป็นการส่งออกยางในรูปของยางดิบ จากปริมาณความสามารถในการผลิตยางธรรมชาติที่มากของประเทศไทย ทำให้เกิดปัญหาราคายางตกต่ำ และล้นตลาด วิธีการหนึ่งที่เป็น การเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ คือการนำยางมาผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่า ให้กับยางดิบ ได้อย่างมาก

ในปัจจุบันมีการพัฒนาคุณภาพของยางมากขึ้น โดยเฉพาะมีการนำเทอร์โมพลาสติกผสมกับยางในการผลิตพอลิเมอร์ผสม เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers, TPEs) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นการรวมสมบัติของเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง (Rubbers) มาไว้ด้วยกัน และสามารถนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้ โดยการใช้เครื่องขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก เช่น เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) เครื่อง อีครีด (Extruder) และเครื่องเป่าขึ้นรูป (Blow molding machine) ได้ เป็นต้น เป็นที่ทราบกันดีว่ายาง สุกหรือยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ให้สมบัติที่ดี และสามารถนำไปใช้ ประโยชน์ได้แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุ ที่มีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ซึ่งเหมือนกับเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และสามารถกลับมาอยู่ใน สถานะของแข็งได้เมื่อเย็นตัวลง [2]

จากสมบัติดังกล่าวทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างมาก เช่น ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ รองเท้า และเครื่องใช้ เป็นต้น ดังรูปที่ 1.1 ในปัจจุบันอัตราการเติบโตผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ทั่วโลกคิดเป็น 7.5 % ต่อปี และคาดการณ์ปริมาณความต้องการสูงสุดในช่วงปี พ.ศ. 2549 มีปริมาณความต้องการสูงถึง 2.6 ล้านตัน [3] ดังรูปที่ 1.2 และจากปริมาณความต้องการเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปีนี้ จึงควรได้รับการสนับสนุนและพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ภายในประเทศ โดยเฉพาะการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากวัตถุดิบในประเทศในเชิงอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPEs) [3]



รูปที่ 1.2 อัตราการเติบโตของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และแนวโน้มการเติบโตในอนาคตทั่วโลก ในช่วงปี พ.ศ. 2533 – 2549 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อดีของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [5]

- เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถขึ้นรูปได้ง่าย
- กระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไม่ยุ่งยาก และมีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่ายางวัลคาไนซ์
- ลดเวลาในการขึ้นรูปเมื่อเทียบกับการผลิตยางวัลคาไนซ์
- สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ (Recycle)
- ใช้พลังงานน้อยเนื่องจากรอบเวลาในการผลิตน้อย และขึ้นรูปได้ง่าย
- ต้นทุนต่ำเนื่องจากสามารถใช้กับเครื่องมือในการผลิตเทอร์โมพลาสติกทั่วไป โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มขั้นตอนในการเชื่อมโยง (Vulcanization)
- ผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายตามต้องการ
- สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อน

### ข้อจำกัดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [5]

- ราคาแพง
- เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ใช้เครื่องมือขึ้นรูปเหมือนกับการผลิตเทอร์โมพลาสติก ส่วนในอุตสาหกรรมยางต้องมีอุปกรณ์เสริม
- ในการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ จะต้องมีการอบเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากความชื้น ในขณะที่อุตสาหกรรมยางไม่จำเป็นต้องมีการอบ
- เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีช่วงความแข็งกด (Hardness) ที่จำกัด
- เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีช่วงอุณหภูมิในการใช้งานที่ต่ำกว่าเทอร์โมเซต

ในปี พ.ศ. 2513 ได้ทำการผลิตเทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyolefin Elastomers, TPOs) เป็นพอลิเมอร์ผสมเชิงกลระหว่างพอลิโอเลฟินกับอีลาสโตเมอร์ พบว่ามีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่ไม่สามารถนำมาใช้แทนยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เพราะไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงและไม่สามารถทนทานต่อน้ำมัน ทำให้ไม่สามารถนำมาผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์รถยนต์ได้ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินไม่มีการเชื่อมโยงในวัฏภาคของอีลาสโตเมอร์ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic vulcanization) โดยเกิดการเชื่อมโยงในวัฏภาคของอีลาสโตเมอร์พร้อม ๆ กับการผสมกับเทอร์โมพลาสติก ในกระบวนการผสมต้องมีการให้แรงเฉือนที่มาก อุณหภูมิต้องสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติก และอุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงในวัฏภาคของอีลาสโตเมอร์ ซึ่งลักษณะการเชื่อมโยงแบบพลวัตทำให้เกิดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (Thermoplastic Vulcanizates, TPVs) [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) และพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) โดยเลือกอัตราส่วน NR/PP ที่ 60 : 40 ใช้เทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) และการเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic vulcanization) โดยใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นสารเชื่อมโยงในวัฏภาคของอิลาสโตเมอร์ พร้อมทั้งศึกษาผลของครรชนิกการไหล (Melt Flow Index, MFI) ของพอลิพรอพิลีน สารตัดสายโซ่ (Peptizer) และผลของสารช่วยผสม (Compatibilizer) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ของยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มแรงยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) โดยเน้นการศึกษาสมบัติและปริมาณการใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่เหมาะสม เพื่อนำไปสู่สมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Natural Rubber, TPNR) ที่ดีขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของครรชนิกการไหลของพอลิพรอพิลีน สารเชื่อมโยง สารตัดสายโซ่ และสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน
2. เพื่อศึกษาถึงสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และฐานฐานวิทยา เป็นต้น

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาผลของครรชนิกการไหลของพอลิพรอพิลีนระหว่าง MFI 3.5 กรัม/10นาที และ MFI 10 กรัม/10นาที
2. ศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยง (0.1 0.3 และ 0.5 phr) และสารช่วยผสม (1 3 และ 5 phr) ที่เหมาะสม
3. ศึกษาผลของความหนืดด้วยการเติมสารตัดสายโซ่
4. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้
5. ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เทียบกับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ยังไม่ผ่านการนำกลับมาใช้ใหม่
6. ศึกษาผลเวลาในการผสมและขนาดเครื่องผสม ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ทราบถึงวิธีการปรับปรุงและกระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติที่ดี
2. เพื่อสามารถเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ และส่งเสริมการใช้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ลดปัญหาการกำจัดขยะยางวัลคาไนซ์ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
3. ส่งเสริมการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในเชิงอุตสาหกรรมภายในประเทศ



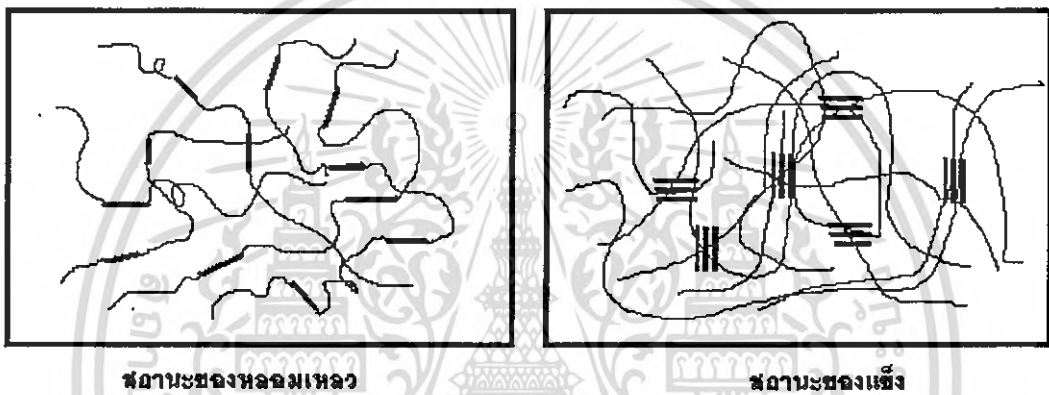
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer, TPEs) [7]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นการรวมสมบัติของเทอร์โมพลาสติกและยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์มาไว้ด้วยกัน เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีลักษณะคล้ายยาง นิ่มตัวยืดหยุ่นได้ แต่สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งคล้ายเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากสามารถหลอมกลายเป็นของหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและกลับมาสู่สถานะของแข็งเมื่อให้ความเย็น ดังรูปที่ 2.1



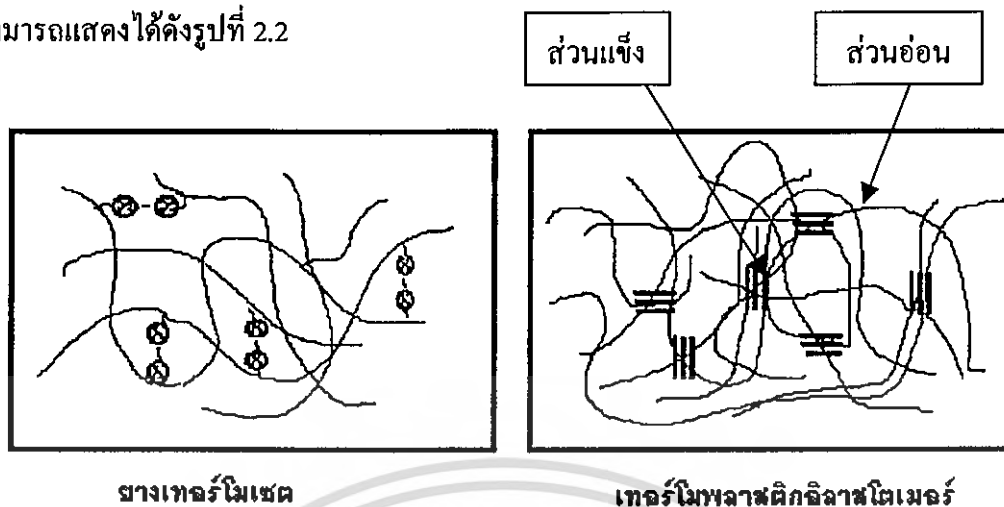
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในสถานะของหลอมเหลวและสถานะของแข็ง [3]

โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประกอบด้วยสองส่วนคือ

1. ส่วนแข็ง (Hard segment) ซึ่งเป็นส่วนของเทอร์โมพลาสติกที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิใช้งาน แต่สามารถเปลี่ยนเป็นของไหลได้เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิขึ้นรูป ส่วนของแข็งมีความสำคัญในการสร้างบริเวณแข็ง (Rigid region) ที่ทำหน้าที่คล้ายกับการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink)
2. ส่วนอ่อน (Soft segment) มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) คล้ายยาง มีอิสระในการเคลื่อนที่ได้มากกว่าส่วนแข็งและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ที่ต่ำ ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีความยืดหยุ่นคล้ายยาง มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างต่ำ

ส่วนแข็งทำหน้าที่เหมือนจุดเชื่อมโยงทางกายภาพ ยึดให้สายโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่นของส่วนอ่อนติดกันคล้ายโครงสร้างร่างแหสามมิติของยางที่มีการเชื่อมโยงด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือ

วัดคาบในเซชัน แต่โครงสร้างส่วนแข็งนี้สามารถเปลี่ยนแปลงย้อนกลับไปได้เมื่อให้ความร้อน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างเทอร์โมเซต และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [3]

### 2.1.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [7]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPEs) สามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyolefin Elastomers, TPOs) เป็นพอลิเมอร์ผสมเชิงกลระหว่างพอลิโอเลฟินกับอีลาสโตเมอร์ เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (PP) กับยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene-Propylene-Diene Monomer, EPDM)
2. เทอร์โมพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Poly (vinyl chloride) Elastomer) เป็นพอลิเมอร์ผสมของพอลิไวนิลคลอไรด์กับอีลาสโตเมอร์
3. เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyester Elastomer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกซึ่งประกอบด้วยส่วนแข็งและส่วนอ่อน โดยส่วนแข็งคือพอลิอัลคิลีนเทอร์พทาเลต และส่วนอ่อนคือพอลิอัลคิลีนอีเทอร์
4. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyurethane Elastomer) เป็นพอลิเมอร์แบบชั้นระหว่างไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับไดไอโซไซยานเนต ส่วนอ่อนเป็นแมคโครไกลคอล ซึ่งอาจเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ หรืออีเทอร์ก็ได้ สำหรับส่วนที่แข็งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของไกลคอลและไดไอโซไซยานเนต
5. เทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyamide Elastomer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีพอลิอีเทอร์สลับกับพอลิเอไมด์ ส่วนแข็งคือพอลิเอไมด์ และส่วนอ่อนเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์

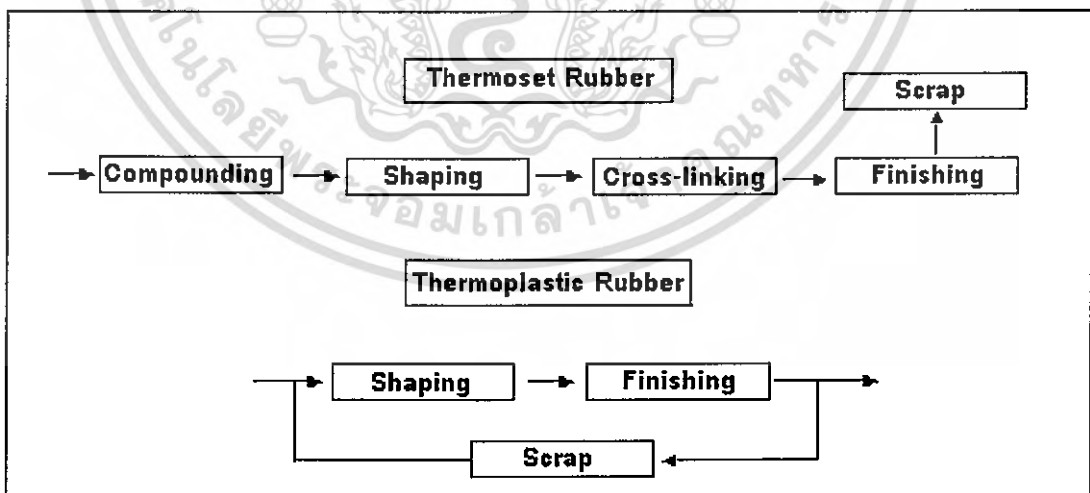
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เทอร์โมพลาสติกพอลิสไตรีน-ไดอีนอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Poly(styrene-diene) Elastomer) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีความหนืดหลอมเหลวสูงมาก ส่วนที่เป็นอิลาสโตเมอร์ คือ โมเลกุลที่มีพันธะคู่ ส่วนแข็งคือพอลิสไตรีน

### 2.1.2 ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

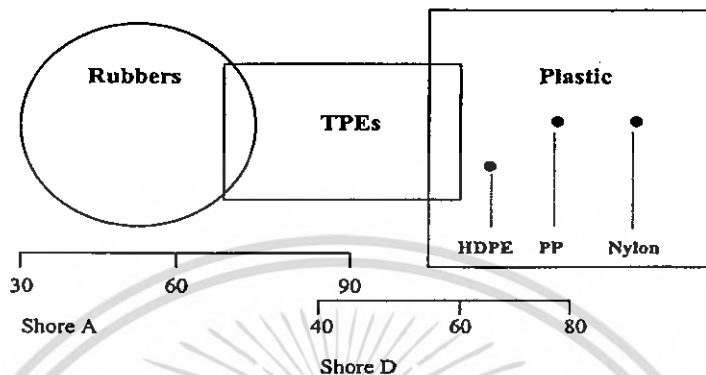
ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Natural Rubber, TPNR) เป็นวัสดุที่เกิดจากการผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับยางธรรมชาติ การพัฒนายางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกได้เริ่มจากการผสมยางเอทิลีน-พโรพิลีน-ไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene-Propylene-Diene Monomer, EPDM) กับเทอร์โมพลาสติก ต่อมาได้มีการพัฒนาผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโอเลฟิน ซึ่งมีเทอร์โมพลาสติกที่เหมาะสมจำนวนมาก จากงานวิจัยพบว่ามี การเตรียมและการประเมินคุณค่าของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกเริ่มในช่วงปี พ.ศ. 2503 ณ Malaysian Rubber Producers' Research Association (MRPRA) ในลอนดอน [8]

ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์อีกประเภทหนึ่งที่มีจุดเริ่มต้นมาจากความพยายามค้นคว้าหาวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติอยู่ระหว่างยางและพลาสติก คือ สามารถขึ้นรูปหรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ โดยใช้กระบวนการเช่นเดียวกับที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกทั่ว ๆ ไป เช่น การอัดรีด (Extrusion) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) ซึ่งกระบวนการในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์นั้นมีเพียงขั้นตอนเดียวเมื่อเทียบกับยางเทอร์โมเซตที่ใช้ในขั้นตอนในการขึ้นรูปหลายขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ และเทอร์โมเซต [9]

นอกจากนี้ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก มีสมบัติพิเศษคือมีสมบัติยืดหยุ่น และสามารถโค้งงอ (Flexibility) มีการกระดอนหรือดึงตัว (Resilience) ดี มีสมบัติเฉพาะตัวของยางเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าความแข็งแรงตกอยู่ในช่วงระหว่างยางกับพลาสติกซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ช่วงความแข็งกคของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [7]

ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุอื่นดังนี้ [7]

1. มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิยูรีเทน และพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ
2. มีความทนทานต่อแรงกระแทกดีกว่าพอลิพรอพิลีน
3. มีความหนาแน่นต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิยูรีเทน และมีราคาถูกกว่าพอลิยูรีเทน
4. มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่ายางเชื่อม โยง
5. สามารถทนทานต่อน้ำและสารเคมีได้ดี

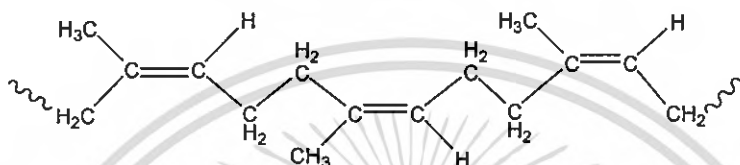
จากสมบัติข้างต้น จึงมีการนำยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ใช้ทดแทนยางเชื่อม โยงในผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องมีความยืดหยุ่นสูง และความแข็งแรงมาก
2. ใช้แทนพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น เช่น พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตด พอลิยูรีเทน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น
3. ใช้ในอุตสาหกรรมด้านใหม่ ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมรถยนต์
4. ใช้เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น ฉนวนหุ้มสายเคเบิลหรือไฟฟ้า
5. ใช้เป็นวัสดุในการผลิตท่อที่ใช้ในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ยางธรรมชาติ [10]

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) จัดเป็นอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) ซึ่งมีสมบัติยืดหยุ่น โดยจะยืดตัวออกเมื่อได้รับแรง และสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมเมื่อหยุดให้แรงกระทำ NR สายพันธุ์ฮีเวียบราซิลลิซิส (Hevea Braziliensis) เป็นสายพันธุ์ที่สำคัญที่สุด โครงสร้างโมเลกุลของ NR เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง ประกอบด้วย 2 ชาติ คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน ที่มีหน่วยซ้ำ ๆ กัน (Repeating unit) เป็น  $C_5H_8$  ที่มีการจัดเรียงตัวแบบซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene) ดังรูปที่ 2.5 โดยมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 50,000– 3,000,000 กรัม/โมล



รูปที่ 2.5 โครงสร้างยางธรรมชาติที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไอโซพรีนเป็นหน่วยซ้ำ ๆ กัน

การที่ยางเป็นวัสดุที่นิยมใช้ และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างมาก เนื่องจากยางมีสมบัติที่เด่นคือ

1. มีสมบัติการยืดหด (Elastic) และยืดหยุ่น (Flexible)
2. มีความเหนียว (Tough) และแข็งแรง
3. มีการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ
4. สามารถรับแรงดึงหรือแรงกดอัดได้สูง
5. สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างมากเมื่อได้รับแรง และกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง

เนื่องจากในผลิตภัณฑ์ยางมีองค์ประกอบหรือสูตรยาง (Compound formula) แตกต่างกันไป เช่น สารเชื่อม โยง (Vulcanizing agent) สารเร่งการเชื่อม โยง (Accelerators) สารกระตุ้น (Activator) สารตัวเติม (Filler) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ฯลฯ ชนิดและปริมาณของสารเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง นอกจากนี้ วิธีและสถานะการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เช่น อุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูป มีความสำคัญและมีผลต่อสมบัติของยางเช่นกัน

## 2.3 สารเคมีสำหรับยาง [10-11]

สารเคมีที่ผสมลงไปในช่วงเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วนี้ยังไม่อาจนำไปใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านั้นทำปฏิกิริยากับยางก่อน การให้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่า ยางไม่คงรูปหรือยางไม่เชื่อม โยง (Green compound หรือ Uncured rubber) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้วเรียกว่า ยางคงรูปหรือยางเชื่อม โยง (Cured compound หรือ Vulcanized rubber หรือ Cured rubber)

การผสมสารเคมีเข้าไปในช่วงเพื่อแก้ไขของยาง ซึ่งข้อเสียของยางคือ

1. ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก สมบัติเป็นพลาสติก คือความสามารถที่ยางพยายามรักษารูปร่างที่ได้เปลี่ยนไปตามแรงกระทำ ส่วนสมบัติเป็นอีลาสติก คือความสามารถที่ยางพยายามรักษารูปร่างเดิมก่อนที่เกิดการเปลี่ยนไปตามแรงกระทำ การที่ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติกนี้ ทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรง
2. ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก ที่อุณหภูมิต่ำยางแข็งกระด้างแตกหักได้ง่าย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางนิ่มไหลแปรรูปไป การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกทำให้ยางใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด
3. ยางมีความแข็งแรงต่ำ มีความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ
4. ยางมีราคาแพง การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้แต่เนื้อยางล้วน ๆ ทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ถ้าสามารถผสมสารราคาถูกลงไปได้จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง
5. ยางสามารถละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด

ในการใช้งานของยางจึงจำเป็นต้องผสมสารเคมีลงไปเพื่อแก้ไขเหล่านี้เพื่อให้ยางมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น ช่วยในการแปรรูป และเพื่อลดต้นทุนการผลิต

### 2.3.1 สารเชื่อมโยง

วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือการเชื่อมโยง (Crosslinking) เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่าง ๆ ของยางไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ถ้ายางไม่ผ่านการทำให้ยางสุกหรือวัลคาไนซ์ เพราะยางไม่แข็งตัว ไม่คงรูป ไหลได้เสียดสภาพ เหนียวติด (Sticky) ไม่สามารถรับแรงหรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างอย่างมากได้

ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ ต้องนำยางมาทำการเชื่อมโยงหรือการวัลคาไนเซชัน บางครั้งอาจเรียกว่า การทำให้ยางสุก (Curing) หรือทำให้ยางคงรูป การเชื่อมโยงสามารถทำได้โดยการผสมสารเคมี คือ “สารเชื่อมโยง” ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) เปอร์ออกไซด์ (Peroxides) หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งการเชื่อม โยง

(Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) ผสมเข้ากับยาง แล้วทำให้อนุมูลสูงภายหลังการขึ้นรูปเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อนุมูลสูงจะทำให้สารเชื่อม โยงต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เชื่อม โยง โครงสร้าง โมเลกุลของยาง เปลี่ยน โครงสร้างจากสายโซ่ตรงให้เป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติ มีเสถียรภาพของรูปร่างและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเชื่อม โยงทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนไปกล่าวคือ

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีค่ามอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ตีขึ้น
- มีฮิสเทอรีซิส (Hyseresis) ลดลง
- มีเซต (Set) หรือการเปลี่ยนแปลงขนาดถาวรเมื่อได้รับแรงลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างสูงขึ้น
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ทนต่อความร้อน แสงแดด และมีอายุการใช้งานนานขึ้น

#### การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Vulcanization)

สารเปอร์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดการเชื่อม โยงในยางได้ และมีความสำคัญมากสำหรับยางที่ไม่มีพันธะคู่ใน โมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน ยางอีพ็อกซ์ ยางยูรีเทน และยางอีวีเอ ในขณะที่เดียวกัน สารเปอร์ออกไซด์สามารถใช้กับยางพวกไดอีน (Diene) เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ และยางไนไตรล์ ทำให้ยางเหล่านี้สามารถทนต่อความร้อนได้ดี

วิธีการเชื่อม โยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อเด่นเหนือการเชื่อม โยงด้วยกำมะถัน คือ

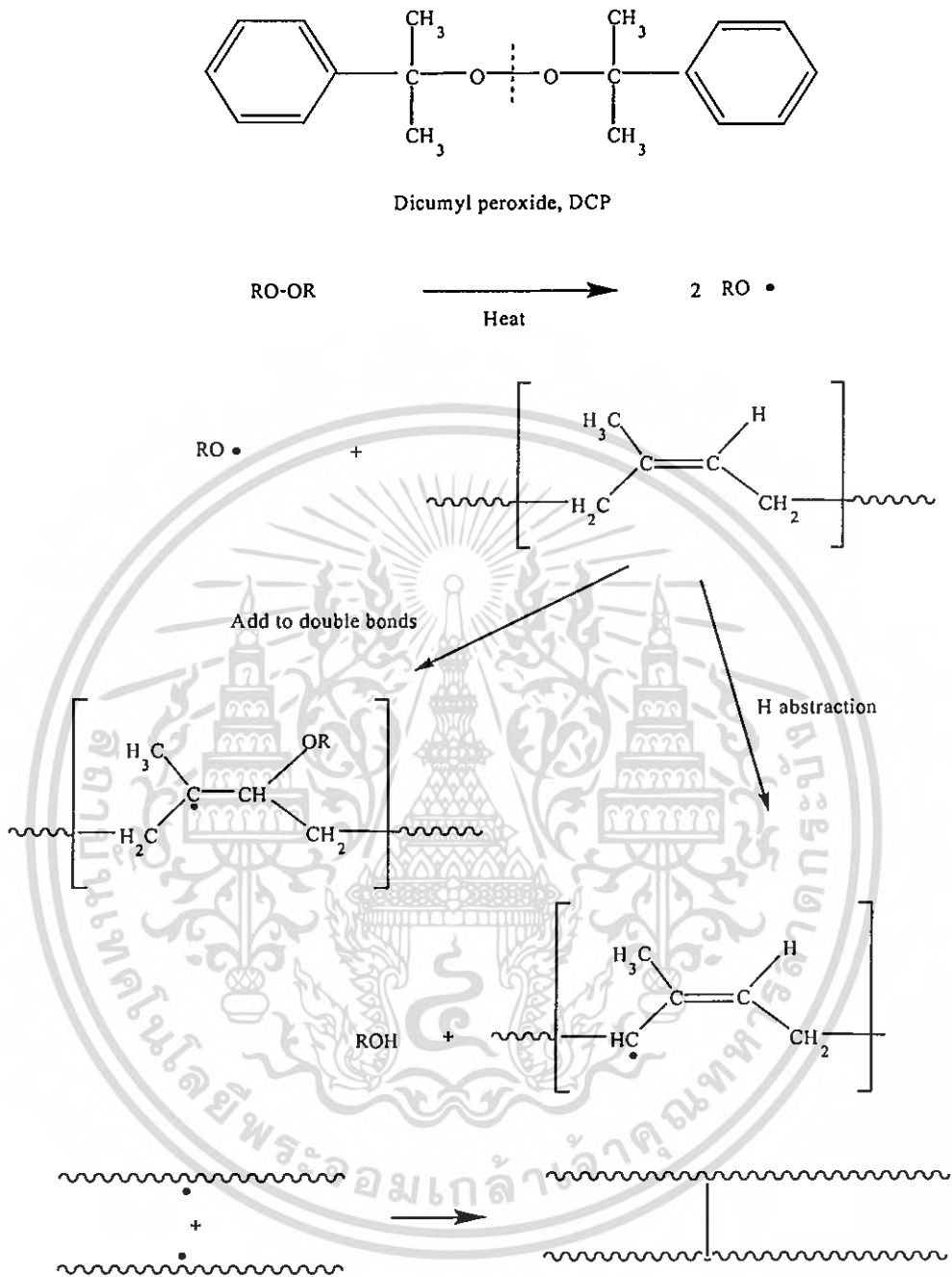
1. สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubber) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubber) นิยมใช้โดยเฉพาะกับยางอิ่มตัวที่ไม่มีฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อม โยง เช่น ยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPM) และยางซิลิโคน (Q)
2. ยางที่เชื่อม โยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties) ดีกว่า
3. ยางที่เชื่อม โยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวรหรือเซต (Set) น้อยกว่า
4. ยางที่เชื่อม โยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีกว่า
5. สามารถใช้เชื่อม โยงผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือยางขาว ไม่เป็นสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร มีการเปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV light discoloration) น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง จึงมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิก (C-S bonds และ S-S bonds ตามลำดับ) ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า อย่างไรก็ตาม ไรก็ตามการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการคือ

1. ในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์จะเกิดกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงปรารถนาของสารที่ปลดปล่อยออกมา เช่น อะซิโตนฟีโนน (Acetophenone) ในระหว่างเชื่อมโยงและในผลิตภัณฑ์ยาง
2. เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีอันตราย ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการใช้และการเก็บรักษา
3. สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเคมีต่างชนิดอื่นในยางมากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดและต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมียาง เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน (Oils) สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidants) เป็นต้น
4. ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยงยาง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cures) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนในบรรยากาศทำให้เกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคือยางเกิดการเสียดสภาพ สลายตัวเนื่องจากความร้อนนั่นเอง
5. ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) เกิดปฏิกิริยาเสียดสภาพ (Degradation) เมื่อเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสามารถเกิดเป็นอนุมูลของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radicals) ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า ( $\beta$ -scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสภาพของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อบกพร่องที่ไม่สามารถใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล (IIR)

## กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 2.6 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ [10]

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นจากปฏิกิริยาโฮโมไลติก-ดีคอมโพสิชัน (Homolytic decomposition) คือการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้เปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระอัลคอกซี (Alkoxy radicals,  $RO\cdot$ ) สองตัว ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.6 ในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เชื่อมโยงในยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(NR) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ (Polymer radicals หรือ Macro-radicals) จากนั้นเกิดการรวมตัวของอนุมูลอิสระที่อยู่ต่างสายโซ่เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงดังรูปที่ 2.6

นอกจากอนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาอย่างง่าย (เช่นที่ Allylic hydrogen) เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ เช่นเดียวกับในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางไม่อิ่มตัว การรวมกันของอนุมูลอิสระที่อยู่ต่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน

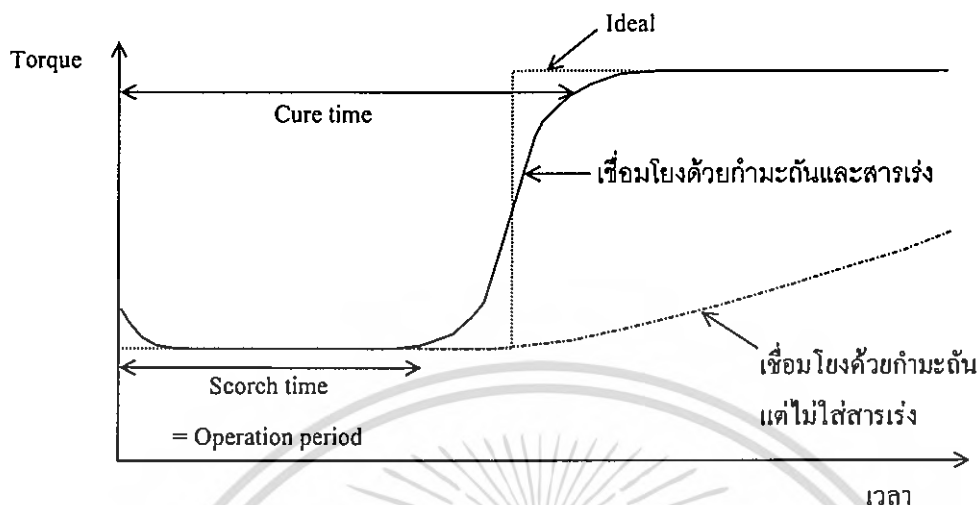
ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของเปอร์ออกไซด์ในยาง จำนวนของหมู่ฟังก์ชัน และไฮโดรเจนของโครงสร้างยางที่สามารถถูกจับด้วยอนุมูลอิสระ ปกติในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ปริมาณไม่เกิน 2-5 phr (ส่วนในร้อยส่วนของยาง) ที่อุณหภูมิเชื่อมโยงตั้งแต่ 150-250 °C การใช้อุณหภูมิสูงทำให้ใช้เวลาบ่มลดลงประมาณ 2.5 เท่าทุก 10 °C ที่เพิ่มขึ้น แต่เสี่ยงกับการเสียหายของยางและต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงมากเกินไปทำให้ใช้ยางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากเกินไป (Over-cure) ทำให้สมบัติบางประการลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ฯลฯ

### 2.3.2 สารเร่งการเชื่อมโยง

สารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerators) คือสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) สั้นลง การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันในปริมาณน้อยลง

รูปที่ 2.7 แสดงกราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลาที่ได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยง เช่น เครื่อง ODR (Oscillating disc rheometer) กราฟดังกล่าวสามารถใช้ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูป และเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ การทดสอบเริ่มต้นด้วยการใส่ยางผสมสูตรประกอบงานหมุนแล้วให้อุณหภูมิสูง (เท่ากับอุณหภูมิเชื่อมโยง เช่น 150 °C) และศึกษาแรงบิดของงานหมุนที่ใช้ทำให้เกิดการหมุนแกว่งไปมาที่มุมคงที่ (13 หรือ 5 องศา) เทียบกับเวลา จุดที่แรงบิดเริ่มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจุดที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงยางเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรงเป็นสายโซ่กิ่งหรือเกิดร่างแหสามมิติทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นจึงใช้แรงบิดงานหมุนเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถทราบเวลาเริ่มเกิดการเชื่อมโยง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) เวลานี้มีความสำคัญ เนื่องจากยางสามารถเคลื่อนที่ได้หรือไหลได้ก่อนถึงจุดนี้ เมื่อเวลาสกอร์ชผ่านไปยางเริ่มเชื่อมโยงไม่สามารถไหลได้สะดวก ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการการไหลของยางต้องทำให้เสร็จสิ้นก่อนเวลาสกอร์ช เช่น การฉีดขึ้นรูป

การอัดขึ้นรูป เป็นต้น เมื่อแรงบิดขึ้นสูงสุดและคงที่ ทำให้ทราบเวลาที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยง สมบูรณ์ หรือเวลาเชื่อมโยง



รูปที่ 2.7 กราฟการเชื่อม โยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อม โยงแบบไม่ใช้ สารเร่งการเชื่อม โยง และใช้สารเร่งการเชื่อม โยง รวมทั้งการเชื่อม โยงในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ [10]

**ชนิดของสารเร่งการเชื่อม โยง**

สารเร่งการเชื่อม โยงมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น เวลาเริ่มเกิดการเชื่อม โยงหรือเวลาสกอ์ช อัตราเร็วการเชื่อม โยง (Cure rate) เวลาเชื่อม โยงสมบูรณ์ ความสามารถในการละลายในยาง ความเป็นพิษ (Toxicity) เป็นต้น ดังนั้นการเลือกชนิดสารเร่งที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยางอาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าเป็นสารเร่งหลัก หรือ “สารเร่งปฐมภูมิ” (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าเรียกว่าเป็น “สารเร่งทุติยภูมิ” (Secondary accelerators) หรือคิกเกอร์ (Kickers) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนอร์จิสติก” (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อม โยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

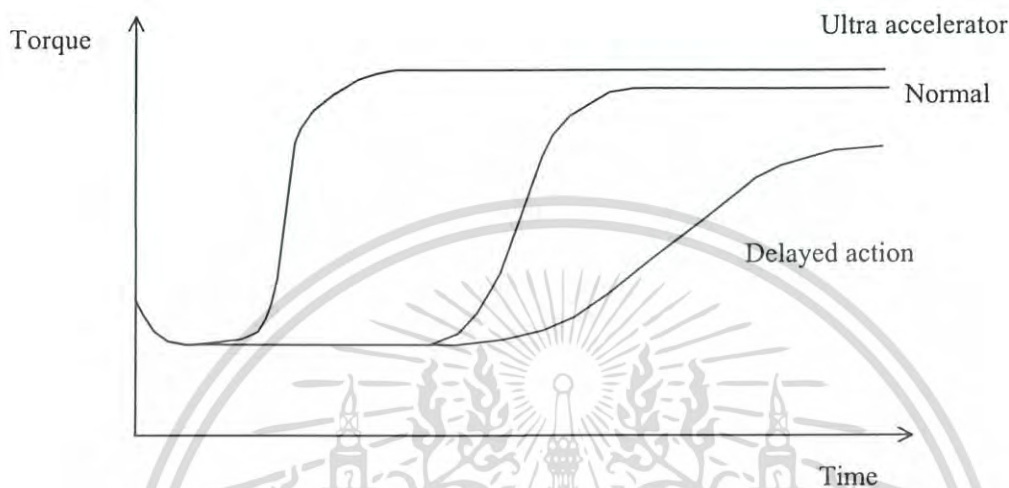
มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งสารเร่งการเชื่อม โยงเป็น 6 กลุ่มดังนี้

- กลุ่มที่ 1           ซัลฟิनाไมด์ (Sulfenamides)
- กลุ่มที่ 2           ไทเอโซล (Thiazoles)
- กลุ่มที่ 3           กัวนิดีน (Guanidines)
- กลุ่มที่ 4           ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)
- กลุ่มที่ 5           ไธยูเรม ไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มที่ 6 ไทยูเรียมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ทั้งนี้ยังมีสารเร่งการเชื่อมโยงอีกสองกลุ่มที่ไม่ได้รวมอยู่ด้วย เนื่องจากมีปริมาณการใช้ที่น้อย และมีความเป็นพิษ ได้แก่ อัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amines) และไทโอยูเรีย (Thioureas)



รูปที่ 2.8 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบใช้สารเร่งการเชื่อมโยง แบบเร็วยิ่งยวด แบบธรรมดา และแบบช้า [10]

2.3.3 สารกระตุ้น

สารกระตุ้น (Activator) คือสารที่ช่วยเสริมให้สารเร่งการเชื่อมโยงทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สารกระตุ้นอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่เป็นสารกระตุ้นที่สำคัญและนิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ส่วนตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide, PbO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) ก็มีความสำคัญบ้าง สารกระตุ้นที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญคือ พวกรีดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) กรดลอริก (Lauric acid) เป็นต้น

1. ซิงค์ออกไซด์

ในทางอุตสาหกรรมปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ คือ 2-4 phr ได้มีการศึกษาพบว่าการใช้ปริมาณ ZnO เกิน 4 phr มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกระตุ้นการเชื่อมโยง

นอกจากซิงค์ออกไซด์แล้ว โลหะออกไซด์ตัวอื่นก็อาจใช้เป็นสารกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ได้เช่นเดียวกัน จากการศึกษาพบว่าโลหะออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพพอที่จะเป็นสารกระตุ้นได้ในบางธรรมชาตินั้น สามารถเรียงลำดับความสามารถในการเป็นสารกระตุ้นเรียงจากมากไปหาน้อยได้

ตามลำดับ คือ ซิงค์ออกไซด์ แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide, CdO) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, Ca(OH)<sub>2</sub>) และแมกนีเซียมออกไซด์

โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้น ในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีอนุภาคขนาดเล็ก ก็สามารถลดขนาดการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งทำให้ได้ยางที่มีมอดูลัสสูง และได้ยางมีลักษณะโปร่งใส ปริมาณซิงค์ออกไซด์ถ้าใส่เกิน 1 phr ไม่สามารถละลายในยาง และทำให้ยางขาวขุ่นได้ ถ้าใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากกว่า 5 phr ขึ้นไป มักมีจุดมุ่งหมายอื่น นอกจากใช้เป็นสารกระตุ้น คือถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็กทำให้ยางมีมอดูลัสสูงขึ้น สามารถรักษารูปทรงขณะทำการเชื่อมยางในแม่แบบเปิดได้ (Open cure) นอกจากนั้นการใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณสูง ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางรวดเร็วขึ้นเหมาะแก่การทำยางหนา ๆ โดยเฉพาะการเชื่อมยางแบบใช้อากาศร้อน

## 2. กรดไขมัน

นอกจากซิงค์ออกไซด์แล้ว กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นสารกระตุ้นสำหรับสารเร่งการเชื่อมยางบางตัว โดยเฉพาะพวกไทอาโซล กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดอะดิพิกอิมิตัว ที่มีคาร์บอน 12-18 อะตอม ซึ่งประสิทธิภาพของสารกระตุ้นขึ้นกับความยาวโมเลกุล ดังนั้นถ้าโมเลกุลสั้น ๆ เช่น กรดคาโปรอิก (Caproic acid) (คาร์บอน 6 ตัว) มีผลในการกระตุ้นน้อยมาก แต่ถ้าโมเลกุลยาวขึ้นแล้วผลการกระตุ้นจะมีมากขึ้น เช่น กรดสเตียริก (คาร์บอน 18 ตัว) มีความสามารถในการกระตุ้นสูงกว่ากรดคาโปรอิก และกรดเบนซีนิก (Benhenic acid) (คาร์บอน 22 ตัว) จะมีความสามารถในการกระตุ้นมากกว่ากรดสเตียริก

กรดไขมันที่มีอยู่ในยางธรรมชาติมีปริมาณแตกต่างกันมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมยาง ดังนั้นโดยทั่ว ๆ ไปการผสมสารเคมีในยางธรรมชาติทุกครั้งมักใส่กรดสเตียริก ประมาณ 1-4 phr เพื่อลดอัตราการเชื่อมยางที่แตกต่างกัน

สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ “ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก” (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็น “ซิงค์สเตียเรต” (Zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายได้ในยาง และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมยาง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ions) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

### 2.3.4 สารตัวเติม

สารตัวเติม (Fillers) หมายถึงสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ไปในยาง ตัวอย่างเช่น เขม่าคาร์บอนดินเหนียว แมกนีเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น สารเหล่านี้ใส่ลงไปเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กันดังนี้

1. เพื่อลดต้นทุน โดยทั่วไปสารตัวเติมมีราคาถูกกว่ายาง จึงเป็นการลดต้นทุนการผลิตทำได้โดยเติมสารตัวเติมผสมลงไปกับยางนั้น
2. เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของยาง โดยทั่วไปการใส่สารตัวเติมเข้าไปในยางสามารถทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นและมอดูลัสสูงขึ้นด้วย ส่วนสมบัติอื่น ๆ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการสึกหรอ อาจเพิ่มหรือ ลดลงขึ้นกับชนิดของยางและชนิดของสารตัวเติม
3. เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต ในกระบวนการผลิตของยางถ้าไม่มีสารตัวเติมอาจทำให้กระบวนการผสมยางผสมสูตร และกระบวนการขึ้นรูปยุ่งยาก การเติมสารตัวเติมสามารถช่วยแก้ปัญหาได้
4. ลดการบวมตัวของยางในน้ำมัน ยางสามารถบวมตัวได้ดีในน้ำมัน แต่เมื่อใส่สารตัวเติมเข้าไปในยางทำให้การบวมตัวของยางในน้ำมันลดลง
5. เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า ยางบางชนิดเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ซึ่งอาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ถ้ามีประกายไฟฟ้าสถิตย์ในตัวยาง การใส่สารตัวเติมประเภทเขม่าดำลงไปในยางทำให้ยางมีสมบัติในการป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์หรือนำไฟฟ้าได้
6. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เนื่องจากการเติมสารตัวเติมประเภทเขม่าดำ สามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของยางได้ เนื่องจากเขม่าดำป้องกันแสงส่องผ่านเข้าไปในยาง ป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสงอุลตราไวโอเล็ต

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ [10]

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เขม่าดำหรือคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ดินขาว (Kaolin, Clay) ฯลฯ

ในทางอุตสาหกรรมยางสารตัวเติมที่นิยมมากที่สุดคือ เขม่าดำ เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูง ข้อจำกัดของการใช้เขม่าดำคือ ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีดำเท่านั้น จึงมีการใช้สารตัวเติมชนิดอื่น เช่น ซิลิกา ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีอื่น ดังนั้นนอกจากการแบ่งสารตัวเติมเป็นชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรงแล้ว ในวงการอุตสาหกรรมยางได้มีการแบ่งสารตัวเติมออกเป็นสองชนิด คือ

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

### 2.3.5 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) คือ สารเติมแต่งที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยางและยังช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ในบางครั้งพลาสติไซเซอร์มีชื่อเรียกแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน้าที่และปริมาณที่ใช้ เช่นถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr สามารถเรียกว่า สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือ ช่วยในการแปรรูป ช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปในยางกระทำง่ายขึ้น ถ้าใช้ปริมาณ 5-15 phr เรียกว่า เป็นสารทำให้นิ่ม (Softener) คือ ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มลงทั้งในขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์ และวัลคาไนซ์แล้ว และถ้าใช้เกิน 15 phr เรียกว่าเป็น Extender กรณีนี้ใส่เพื่อลดต้นทุน

#### หน้าที่ของพลาสติไซเซอร์

1. เพื่อช่วยในการแปรรูปยาง โดยปกติเมื่อนำสารตัวเติมใส่เข้าไปในยางทำให้ยางแข็งขึ้น แปรรูปได้ยากขึ้น เกิดความร้อนจากการบดขยี้ยาง การใส่พลาสติไซเซอร์เข้าไปทำให้ยางนิ่มตัวลง แปรรูปได้ง่ายขึ้น ลดความร้อนที่เกิดจากการบดขยี้ยาง และทำให้ยางไหลในแม่แบบได้ง่ายขึ้น
2. เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ยางที่ใส่พลาสติไซเซอร์เข้าไปนิ่มลง การที่ยางมีความแข็งลดลง ทำให้มี modulus ลดลง แรงยึด ฉ. จุดขาดของยางสูงขึ้น และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น
3. เพื่อลดต้นทุน เมื่อใส่พลาสติไซเซอร์ปริมาณมากลงไป ในยาง ปริมาตรของยางที่ผสมสารเคมีจะเพิ่มขึ้นทำให้ลดต้นทุนลงได้ นอกจากนี้การใส่สารตัวเติมลงไป ในยาง ปริมาณมาก ๆ ทำให้ยางแห้งจนไม่สามารถใส่สารตัวเติมลงไปได้อีก แต่ถ้าเติมพลาสติไซเซอร์เข้าไปช่วยให้สามารถใส่สารตัวเติมเพิ่มลงได้อีก ฉะนั้นจึงเป็นการลดต้นทุนลง
4. เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ พลาสติไซเซอร์ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำลงไป และสามารถขยายขอบเขตการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปได้อีก
5. เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง การใส่พลาสติไซเซอร์ลงไป ในยางทำให้ยางนิ่มลง ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการผสมยาง แปรรูปยาง รวมทั้งอุณหภูมิในการแปรรูปยางก็จะต่ำลงได้ การแตกโมเลกุลของยางอันเนื่องมาจากความร้อนก็ลดลงเช่นกัน
6. เพื่อใช้เป็นสารแทกทิไฟเออร์ (Tackifier) พลาสติไซเซอร์บางตัวมีผลทำให้ยางมีความสามารถในการติดกันได้ง่ายขึ้น

ประเภทของพลาสติกไซเซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะของการทำงาน คือ

### 1. สารช่วยให้นิ่มโดยทางเคมี (Chemical Plasticizer)

สารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณน้อยจะทำให้ยางนิ่มและลดเวลาของการบดขย้างลง สารเคมีดังกล่าวบางที่เรียก “เปปไทเซอร์” (Peptizer) สารเคมีเหล่านี้จะเป็นสารรับอนุมูลอิสระ (Radical acceptor) และช่วยให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันมีประสิทธิภาพ ปริมาณเปปไทเซอร์ที่ใส่ในยางประมาณ 1-3 phr ตัวอย่างของเปปไทเซอร์ได้แก่ กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรโร-ไทโอฟินอล (Pentachlorothiophenol)



R-R คือ โมเลกุลของยาง

ArSH คือ โมเลกุลของเมอร์แคปแทน (Mercaptan)

กรณีถ้าเป็นฟีนอลหรือไดซัลไฟด์แล้วปฏิกิริยาที่ (2), (3) จะเปลี่ยนเป็นดังนี้ถ้าเป็นฟีนอล



ถ้าเป็นไดซัลไฟด์



จากปฏิกิริยาดังกล่าวเห็นได้ว่า เปปไทเซอร์เหล่านี้ทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระของยางที่แตกออกเนื่องจากการบด ทำให้อนุมูลอิสระไม่สามารถกลับไปรวมตัวกันได้อีก โมเลกุลของยางจึงสั้นลง

### 2. สารช่วยให้นิ่มโดยทางกายภาพ (Physical Plasticizer)

พลาสติกไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Temperature glass transition,  $T_g$ ) ลดลง ทำให้วัสดุมีสมบัติความยืดหยุ่นเป็นยางดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันตัวขึ้น และสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) พลาสติกไซเซออร์ที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยางไม่แพร่ออกที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยาง ตัวอย่างพลาสติกไซเซออร์สำหรับยาง ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมัน (Oils) สารจำพวกเอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine) ฯลฯ

### 2.3.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agents)

ยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสภาพได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน การเสื่อมสภาพของยางเรียกว่า “Degradation” การเสื่อมสภาพของยางสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 6 แบบด้วยกัน คือ

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

ออกซิเจนและโอโซนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อมสลายของยาง โดยที่โลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยางเป็นตัวเร่งให้ยางเสื่อมเร็วขึ้น สารเคมีที่ช่วยป้องกันไม่ให้ยางเสื่อมสลายเรียก “แอนตี้ออกซิแดนท์” (Antioxidant)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น ไปจากเดิม จึงจำเป็นต้องมีสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนตี้ออกซิแดนท์ หรือสารแอนตี้โอโซน (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิด ทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวขึ้น

#### 2.3.6.1 สารแอนตี้ออกซิแดนท์

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ คือ สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) สารแอนตี้ออกซิแดนท์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวก ตามสูตรทางเคมี คือ

##### 1. สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์

สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์ของมันเป็นพวกอะโรมาติกเอมีน ทำให้ยางมีสีคล้ำและตกสี (Staining) และสารประกอบเอมีนและอนุพันธ์มีประสิทธิภาพสูงกว่าแอนตี้ออกซิแดนท์ที่มาจากฟีนอล

สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

1. Ketone-amine condensates
2. Aldehyde-amide condensates
3. Secondary aromatic amines

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์

สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดนี้เป็นที่น่าสนใจ เพราะไม่ตกสี (Non-staining) หรือตกสีน้อยมาก ทำให้ใช้กับยางสีได้ สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

1. Substituted phenol
2. Phenolic sulfides
3. Phenol-aldehyde condensate
4. Hydroquinone derivatives

### 2.3.6.2 สารแอนติโอโซนแนนท์

การยืดขางคั้งทิ้งไว้ในบรรยากาศ และพบว่าเกิดรอยแตกตั้งฉากกับแนวยืด ปรากฏการณ์ดังกล่าวพบว่าเป็นขึ้นเนื่องจากการกระทำของโอโซนต่อขาง แต่การยืดขางแล้วเกิดรอยแตกนี้จำเป็นต้องยืดให้เกินระยะหนึ่งจึงพบว่าเกิดรอยแตกขึ้น ความยาวยืดขางนั้นเรียกว่า "Threshold elongation" และถ้าความเข้มข้นของโอโซนมากขึ้นก็สามารถทำให้ขางเกิดรอยแตกได้เร็วขึ้นด้วย สารเคมีที่ใช้ป้องกันโอโซนเราเรียกว่า แอนติโอโซนแนนท์ ซึ่งสารเคมีชนิด พาราฟีนิลีน ไดเอมีน (p-phenylene diamine, PPD) เป็นแอนติโอโซนแนนท์ที่ดี สิ่งหนึ่งที่พึงสังเกตคือ ถึงแม้ว่าปริมาณของโอโซนในบรรยากาศมีน้อย คือประมาณ 1-10 ส่วนต่อร้อยล้านส่วน (pphm) ยังสามารถมีอิทธิพลทำให้ขางแตกได้ ในบรรยากาศของเมืองใหญ่และเมืองหลวงซึ่งมีการใช้รถยนต์มาก ทำให้ปริมาณของโอโซนมากขึ้นตาม

นอกจากการใช้สารเคมีพวกพาราฟีนิลีน ไดเอมีน ในการป้องกันโอโซนแล้ว ยังพบว่าขี้ผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax) ยังเป็นสารที่ใช้ป้องกันโอโซน โดยใส่เข้าไปในขางแล้วทำการวัลคาไนซ์ ถ้าปริมาณของขี้ผึ้งมากพอทำให้ซึมออกมาที่ผิว ขี้ผึ้งที่ซึมออกมาที่ผิวนี้นำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนกระทบกับผิวขาง ทำให้ขางมีความทนทานต่อโอโซนสูงขึ้น

### 2.3.7 สารเติมแต่งอื่น ๆ

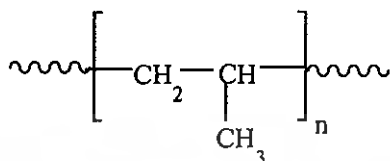
สารเติมแต่งอื่น ๆ นี้ ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องใช้สำหรับขางทั่วไป แต่บางครั้งใส่ลงไปในขางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ขางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารให้สี (Colorants) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) สารหน่วง (Retarders) เป็นต้น

1. สารให้สี เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ขางให้มีสีสวยงามตามต้องการ
2. สารหน่วง ทำให้เกิดการเชื่อม โขงช้าลง มีเวลานานเพียงพอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์
3. สารให้กลิ่น (Odorants) ทำให้ผลิตภัณฑ์ขางมีกลิ่นหอม หรือระงับกลิ่นของขางที่ไม่พึงปรารถนา
4. สารให้ฟอง ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน มีโครงสร้างแบบเซลล์ลูลาร์ (Cellular structure) เช่น ฟองน้ำยาง โฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติด (Tackiness) ที่ผิวหน้ายางให้เหนียวและยึดติดกับวัสดุอื่นหรือยางด้วยกันเอง ได้ดีขึ้น

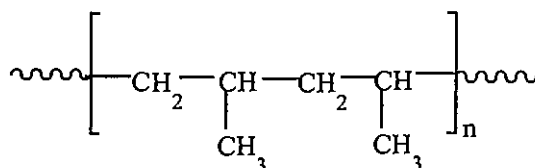
## 2.4 พอลิพรอพิลีน [12]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน

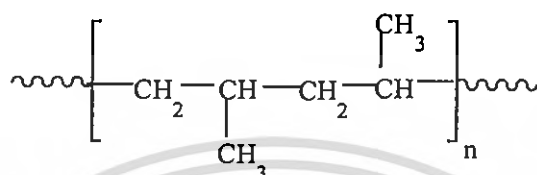
ในปี พ.ศ. 2497 แนคตา (Natta) ได้นำตัวเร่งที่ซีเกลอร์ (Ziegler) ค้นพบมาใช้ในการเตรียมพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) โดยปรับปรุงรูปแบบของตัวเร่ง และได้ PP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป ซึ่งมีผลทำให้สมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนที่มีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีน แต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่า และแข็งแรงกว่า ส่วนแบบอื่น ๆ เป็นอะแทกติกพอลิพรอพิลีนมีส่วนออสถฐานทำให้ความแข็งแรงน้อยลง โครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ของพอลิพรอพิลีนมีหมู่เมทิล (Methyl group) เกาะบนโซ่หลักของโมเลกุล (Main chain) PP สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลหลักได้แก่

1. ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันบนโซ่โมเลกุลหลัก ดังรูปที่ 2.10 ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูงส่งผลทำให้การตกผลึกดีที่สุด สังกะระห์ด้วยตัวเร่งของไทเทเนียม-ไตรคลอไรด์กับตัวเร่งร่วมของสารประกอบออร์กาโนอะลูมิเนียม เช่น ไดเอทิลอะลูมิเนียมคลอไรด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาแขวนลอยอยู่ในสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งช่วยส่งผ่านความร้อน อุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 50-80 องศาเซลเซียส และความดัน 25 บรรยากาศ



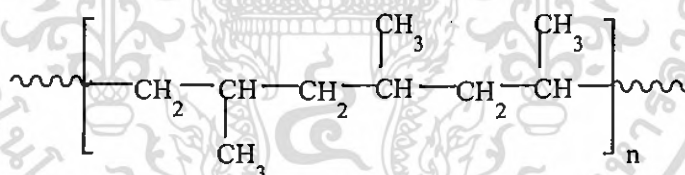
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน

2. ซินติโอแทกติกพอลิพรอพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลสลับกันบนโซ่โมเลกุลหลักอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลง มีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย ซินติโอแทกติกพอลิพรอพิลีนสังเคราะห์ได้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฮทเทอโรจีนีสซีเกลอร์เนตทาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน พอลิเมอร์ชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวต่ำและละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของซินติโอแทกติกพอลิพรอพิลีน

3. อะแทกติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุด สังเคราะห์จากกรดคลอริคและสารประกอบออร์กาโนเมทัลลิก แต่พอลิเมอร์นี้มีโซ่กิ่งมาก และมี  $T_g$  ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง คือ  $-20$  องศาเซลเซียส จึงไม่มีประโยชน์ในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน

#### สมบัติของพอลิพรอพิลีน

- ความหนาแน่นประมาณ 0.9 กรัม/ลบ.ซม
- มีน้ำหนักเบา
- จุดหลอมเหลวปานกลาง 130-170 องศาเซลเซียส
- ไม่ละลายในตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง
- มีความทนต่อการขีด และเบส
- เชื้อข่อยปฏิกิริยาเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความเป็นผลึกสูงทำให้มีสมบัติเชิงกลดี
- ละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส

#### ข้อดีของพอลิพรอพิลีน

- มีความเหนียว
- มีน้ำหนักเบา ราคาถูก
- สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยา
- ทนต่อสารเคมี เช่น กรดและเบส
- ดูดซึมน้ำต่ำ
- มีความโค้งงอดีเยี่ยม
- มีความเป็นผลึกสูงจึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี

#### ข้อด้อยของพอลิพรอพิลีน

- สลายตัวต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต
- ไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อม
- ติดไฟง่าย
- ละลายในตัวทำละลายที่มีคลอไรด์หรืออะโรมาติกเป็นองค์ประกอบ
- ขาดต่อการเชื่อมต่อนหรือประกอบ
- โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน

**พอลิพรอพิลีนที่มีจำหน่ายในทางการค้า ปัจจุบันมี 4 เกรด คือ [13]**

1. โพลิโพรพิลีน (Homopolymer) เป็นเกรดมาตรฐานทั่วไปมีองค์ประกอบง่าย ๆ คือ มอนอเมอร์ของพอลิพรอพิลีนมาต่อกัน โดยหมู่เมทิลที่อยู่บนโครงสร้างหลักอยู่ข้างเดียวกันของ อนุกรม มีสมบัติต่าง ๆ ของโพลิโพรพิลีน มักขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ใช้ทำฝาขวด กระจกเสริมฉนวน อุปกรณ์ทางการแพทย์ ของเด็กเล่น บรรจุภัณฑ์ภายในบ้าน รถยนต์ขนาดเล็ก พิล์ม เส้นใย และตาข่าย ผลิตภัณฑ์จากพอลิพรอพิลีนเสื่อมสภาพได้เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์เป็น เวลานานจึงต้องเคลือบสารเคลือบเพื่อป้องกันการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ พอลิพรอพิลีนมีลักษณะขุ่น แต่สามารถปรับปรุงให้มีลักษณะใส และมีสมบัติดีขึ้น โดยเติมตัวเหนียวทำให้เกิดผลึกทำให้ปริมาณ การตกผลึกดีขึ้น แต่ขนาดของสเฟียรูไลต์ลดลง

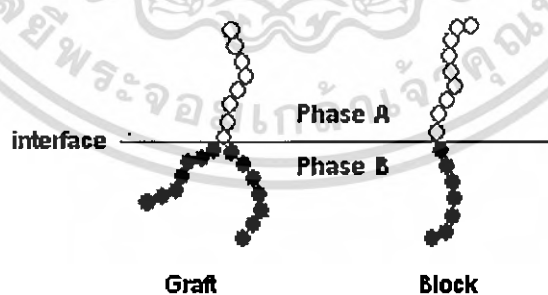
2. พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random copolymer) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีเอทิลีนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยเติมลงในสายโซ่ของพอลิพรอพิลีน การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มสามารถทำได้ง่ายคล้ายแบบโฮโมพอลิเมอร์ และนิยมนำมาผลิตเป็นฟิล์มบรรจุอาหาร และห่ออาหาร ได้ตามมาตรฐาน เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ ตัวเชื่อมความร้อน และสามารถรับและดูดซับแรงได้ดี จึงใช้เป็นผลิตภัณฑ์กันชนรถยนต์

3. พอลิเมอร์ร่วมชนิดทนแรงกระแทก (High impact copolymer) มีการเติมมอนอเมอร์ชนิดอื่นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมักเป็นเอทิลีนหรือยาง ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบในการสังเคราะห์ ต้องดูแลควบคุมสภาวะการทดลองให้เหมาะสม และคงที่เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ร่วมที่มีน้ำหนักโมเลกุล และองค์ประกอบตามต้องการ พบว่าพอลิเมอร์ร่วมที่ได้มีความทนทานต่อแรงกระแทกดีแม้จะทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นกระเป๋าเดินทาง ที่นั่งในรถ อุปกรณ์หล่อเย็น และเครื่องใช้ภายในบ้าน

4. อะแทกติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความสามารถในการยืดเกาะ ไม่นำไฟฟ้า นิยมใช้นำมาเป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล

## 2.5 สารช่วยผสม [14-15]

พอลิเมอร์ผสมส่วนมากมีสมบัติเชิงกลต่ำเนื่องจากความไม่สามารถผสมเข้ากันได้ (Incompatibility) และการแยกวัฏภาค (Phase separation) จึงมีการศึกษาเพื่อลดการแยกของวัฏภาค และเพิ่มการยึดติดที่พื้นผิว (Interfacial adhesion) ซึ่งคือการใช้สารช่วยผสม (Compatibilizer) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่เติมในพอลิเมอร์ผสม เช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก หรือแบบกราฟท์ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและแบบกราฟท์ ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interphase) [14]

สารช่วยผสม สามารถเพิ่มปริมาณความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) โดยความสามารถในการเข้ากันได้ หมายถึงความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการผสมกัน แต่ไม่ใช่ความสามารถในการละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blends) พอลิเมอร์ผสมส่วนมากเป็นแบบพอลิเมอร์ที่ไม่รวมเป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) จึงทำให้การเติมสารช่วยผสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ สารช่วยผสมมีผลต่อการผสมเข้ากันได้ดังนี้คือ

1. ลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค
2. มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป
3. สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดี

สารช่วยผสมลดการแยกของสองวัฏภาค และช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็กและทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความเข้ากันได้ดีขึ้นแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1. **Non-reactive Blending** คือการเติมสารช่วยผสมลงไปในพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตร โครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้ คือ พอลิเมอร์ร่วมแบบโคปอลิเมอร์แบบโคปอลิเมอร์แบบกราฟท์ หรือแบบส้อม ตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีนกับพิวทาไดอินแบบโคปอลิเมอร์เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน

2. **Reactive Blending** เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม เช่น พอลิเมอร์ผสมของพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเตอร์ หรืออาจเกิดการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ฟังก์ชันในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การกราฟท์พอลิเอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรือกรดอะคริลิก (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเอไมด์

**ยางธรรมชาติที่มีการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenated natural rubber)**

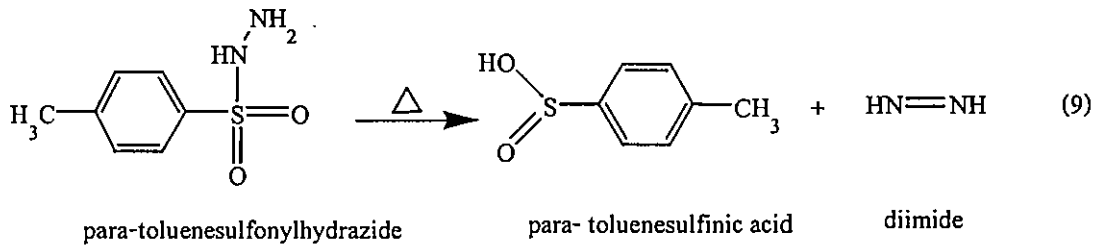
การไฮโดรเจนชันเป็นปฏิกิริยาการเติม โมเลกุลของไฮโดรเจนให้กับพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัวของคาร์บอน-คาร์บอนให้เป็นพันธะที่อิ่มตัวของคาร์บอน-คาร์บอน



ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนสามารถกระทำได้โดยใช้ไดอิมิด (Diimide) เป็นตัวเติมไฮโดรเจนให้กับพันธะคู่ของยางธรรมชาติโดยเป็นระบบที่ไม่ต้องใช้ตัวเร่ง สารไดอิมิดสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมได้จากการสลายตัวทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 110-160 องศาเซลเซียส ของพาราโทลูอินซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (TSH) หรือปฏิกิริยาระหว่างไฮดราซีนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Al-Malaika, S. และ Amir, E.J. [17] ได้ทำการศึกษาสภาวะในกระบวนการผสมที่มีผลต่อสมบัติการรับแรงดึง (Tensile Properties) ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และพอลิพรอพิลีน (PP) โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ชนิดของเครื่องผสม อุณหภูมิ (160-180 °C) เวลา (5-11 นาที) โดยใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยง รวมถึงกระบวนการขึ้นรูประหว่างเครื่องฉีดขึ้นรูปและเครื่องอัดขึ้นรูป พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PP ในอัตราส่วนการผสมระหว่าง NR/PP ทำให้ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเป็นการลดเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ในงานวิจัยเลือกทำการศึกษาที่อัตราส่วนของ NR/PP เท่ากับ 60/40 และพบว่า DCP ที่ปริมาณ 0.3 phr ภายใต้สภาวะการผสมที่เหมาะสมให้สมบัติความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุด ส่วนเครื่องผสมที่มีกำลังแรงเฉือนและให้ความสามารถในการบดผสมที่มาก (Buss-Ko Kneader) ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของสองวัสดุภาคดีขึ้น และมีสมบัติเชิงกลดีกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องผสมระบบปิดที่ใช้ในห้องทดลอง (Hampden-RAPRA torque rheometer) การนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ (Remolding) ทำให้ความเสถียรในการหลอมเหลว (Melt-stability) และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง การนำมาฉีดขึ้นรูปใหม่ (Reinjection) ทำให้สมบัติต่าง ๆ ลดลงมากเมื่อเทียบกับการอัดขึ้นรูปใหม่ (Recompression)

Ibrahim, A. และ Dahlan, M. [8] ได้ทำการศึกษาทางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (TPNR) ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และพอลิพรอพิลีน (PP) โดยเน้นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผสม และการปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยการใช้ยางธรรมชาติชนิดเหลว (Liquid Natural Rubber, LNR) จากการศึกษาพบว่า การผสม NR และ PP ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) อุณหภูมิที่  $180^{\circ}\text{C}$  และความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 50 รอบต่อนาที ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ NR ในอัตราส่วนการผสมของ NR/PP มากขึ้นทำให้ ความแข็งแรงดิ่งลดลง ในทางตรงกันข้ามให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น และพบว่า การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ TPNR ระหว่าง NR และ PP โดยการใช้ LNR ที่ปริมาณต่าง ๆ (5 % 10 % 13 % และ 17 %) พบว่าที่อัตราส่วนการผสม NR/PP เท่ากับ 67/34 และมีปริมาณ LNR เท่ากับ 10 % โดยน้ำหนักของยาง ให้ความแข็งแรงดิ่งและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สูงสุด เท่ากับ 4.3 MPa และ 870 % ตามลำดับ สมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก LNR เพิ่มความหนาแน่นการเชื่อมโยงให้กับ NR และในขณะเดียวกันเป็นการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างสองวัสดุ ลักษณะสัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมเมื่อทำการเติม LNR พบว่ามีวัสดุกระจายที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

Ismail, H. S. [18] ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ (NR) และพอลิพรอพิลีน (PP) (PP/NR) กับเศษยางที่เหลือจากอุตสาหกรรมผลิตลูกบอลลยาง (Recycle Rubber, RR) และพอลิพรอพิลีน (PP) (PP/RR) ในงานวิจัยได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PP กับ RR/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (20:80 30:70 40:60 50:50 และ 60:40) ทำการผสมในเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder) ที่อุณหภูมิในการผสม  $190^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบในการผสมเท่ากับ 80 รอบต่อนาที เวลาในการผสม 7 นาที ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป พบว่าค่าความแข็งแรงดิ่ง และมอดุลัส (Modulus) ของทั้ง NR/PP และ RR/PP มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มวัสดุของยางมากขึ้น RR/PP ให้ค่าความแข็งแรงดิ่ง และมอดุลัส มากกว่า NR/PP เนื่องจากในวัสดุของ RR มีการเชื่อมโยงในวัสดุของยางอนุภาคมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในวัสดุของ PP ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าผลของการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่ ใน NR/PP ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของทั้ง NR/PP และ RR/PP มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณวัสดุของยางมากขึ้น พบว่า NR/PP ให้ค่าสูงกว่า RR/PP เนื่องจากในวัสดุของ RR มีการเชื่อมโยงและมีสารประกอบอื่น ๆ เป็นสารเติมแต่งใน RR ซึ่งทำให้จำกัดความสามารถในการไหลและความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่

Chang, S.H. [19] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene-Propylene-Diene Monomer, EPDM) และ พอลิพรอพิลีน (PP) (EPDM/PP) โดยใช้ ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) เป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งเตรียมจากลักษณะการผสมที่แตกต่างกัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

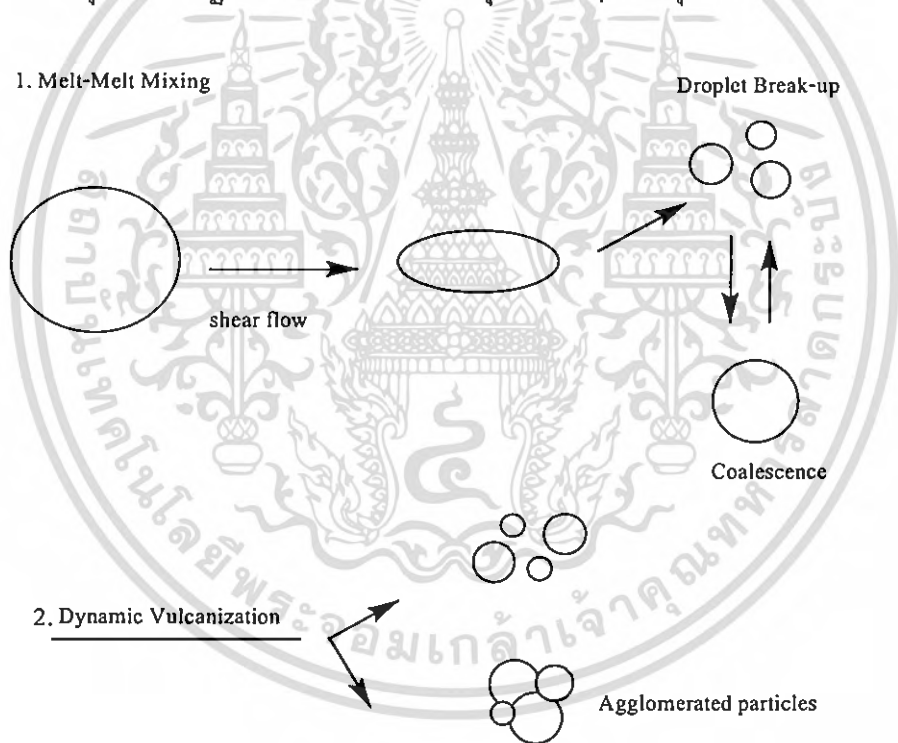
1. แบบ Blend-Cure โดยนำ EPDM ผสมกับ PP พร้อม ๆ กับเกิดการเชื่อม โขงในวัฏภาคของยางผสมในเครื่องผสมบราเวนเดอร์ 2. แบบ Cure-Blend โดยนำ EPDM ซึ่งมีการเชื่อม โขงด้วย DCP ก่อนที่จะนำมาผสมกับ PP ในเครื่องผสมบราเวนเดอร์ ทั้งสองระบบใช้อุณหภูมิในเครื่องผสมบราเวนเดอร์เท่ากับ  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  เวลาในการผสม 15 นาที ที่ความเร็วรอบของสกรูต่าง ๆ (20-80 รอบต่อ นาที) โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ EPDM/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (75:25 50:50 และ 25:75) พบว่าการเพิ่มปริมาณ DCP ทำให้เพิ่มแรงเฉือนในการผสม ในระบบ Blend-Cure ความหนืดของการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP ที่อัตราส่วนการผสมเท่ากับ 75/25 แต่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP ในอัตราส่วนการผสมเท่ากับ 25/75 เนื่องจากปริมาณเปอร์ออกไซด์ของ DCP ที่มากเกินไปในการใช้เชื่อม โขงในวัฏภาคของยางนั้น ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ในวัฏภาคของ PP ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงความหนืดจึงลดลงด้วยเช่นกัน ในระบบ Cure-Blend ที่อัตราส่วนการผสมต่าง ๆ พบว่าความหนืดของการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP ความหนืดของการหลอมเหลวลดลงเมื่อเพิ่มแรงเฉือน ในการผสม เนื่องจากแรงเฉือนทำให้เกิดการกระจายตัวของโดเมน ซึ่งคือส่วนของ EPDM ที่เกิดการเชื่อม โขงทำให้มีขนาดเล็กลงทั้งในกรณีของ Cure-Blend และ Blend-Cure อัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม EPDM/PP มากกว่า โสโมพอลิเมอร์พอลิพรอพิลีน เนื่องจากปริมาณเปอร์ออกไซด์ของ DCP ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ PP ลดลงเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น

Goharpey, F. และคณะ [20] ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาขณะเกิดการเชื่อม โขง (Stage of Cure, SOC) ในระหว่างกระบวนการผสมของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอินมोनอเมอร์ (EPDM) และพอลิพรอพิลีน (PP) (EPDM/PP) โดยเลือกทำการศึกษาที่อัตราส่วน 60/40 ใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อม โขง ผสมโดยในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิการผสมเท่ากับ  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  และความเร็วรอบสกรู 60 รอบต่อนาที โดยนำตัวอย่างออกจากเครื่องผสมระบบปิดระหว่างการผสม ณ ช่วงเวลาการผสมต่าง ๆ จากการศึกษพบว่าหลังจากนำตัวอย่างที่ยังไม่เกิดการเชื่อม โขงออกจากเครื่องผสมระบบปิด แล้วทำการแช่ลงในในโตรเจนเหลวทันที เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่นำมาทำให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่มีการแช่โดยในโตรเจนเหลว มีการกระจายตัวของวัฏภาคยางในวัฏภาคของ PP ในขณะที่ตัวอย่างที่ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องให้ลักษณะสัณฐานวิทยามีลักษณะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องร่วมกัน (Co-continuous) ดังนั้นควรเลือกศึกษาโดยการนำตัวอย่างทำให้เย็นโดยการใช้ในโตรเจนเหลวเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ทำการผสม เมื่อทำการเติมสารเชื่อม โขงพบว่าค่าทอร์ก หรือแรงบิด (Torque) ในระหว่างการผสมมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในวัฏภาคของยางเกิดการเชื่อม โขง และการเชื่อม โขงในวัฏภาคของยางเป็นการเพิ่มการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคยางและพอลิพรอพิลีน เนื่องจากความสามารถในการเปียก (Wetting) ระหว่างสองวัฏภาคมากขึ้น จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

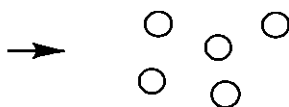
ศึกษาทำให้อธิบายลักษณะสัณฐานวิทยาในระหว่างเกิดการเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic vulcanization) สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คือ

1. เกิดการผสมแบบการหลอมเหลว (Melt-melt mixing) เมื่อวิภาคของยางได้รับความร้อนและแรงเฉือน ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ของวิภาคยางเกิดการแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก (Break up) แล้วอนุภาคเล็ก ๆ นั้นอาจเกิดการรวมตัวได้ (Coalescence) ในช่วงก่อนการเชื่อมโยง
2. เกิดกระบวนการเชื่อมโยงแบบพลวัต และสามารถเกิดการเกาะรวมตัวของอนุภาค (Agglomeration) และการแตกออก (Break up) ของอนุภาควิภาคยางเมื่อมีการเชื่อมโยงซ้ำ ๆ
3. กระบวนการเชื่อมโยงทำให้เพิ่มแรงยึดติดระหว่างวิภาค และแรงตึงพื้นผิว (Interfacial tension) ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแตกออกของอนุภาคของ วิภาคยาง
4. อนุภาคของวิภาคยางแตกออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ในที่สุด



3. Increase in surface tension of cured rubber particles leading to the agglomerates break down

4. Dispersion of the rubber particles



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเกิดเชื่อมโยงแบบพลวัตของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jacob, C. และคณะ [21] ได้ทำการเตรียมและศึกษาการนำยางเอทิลีน-พโรพิลีน-ไดอีนมอนอเมอร์ที่เหลือใช้ (Waste EPDM, W-EPDM) กลับมาใช้ใหม่ โดยนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่าง EPDM (Raw-EPDM, R-EPDM) และพอลิพรอพิลีน (PP) (EPDM/PP) ที่อัตราส่วน 70/30 โดยนำ W-EPDM มาแทนที่ปริมาณของ R-EPDM ในช่วงอัตราส่วน การผสม W-EPDM : R-EPDM เท่ากับ 0:100 ถึง 45:55 โดยเตรียมในเครื่องผสมบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบของสกรู 70 รอบต่อนาที และขึ้นรูปโดยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) พบว่าการเพิ่มปริมาณ W-EPDM แทนการใช้ R-EPDM ที่อัตราการแทนที่ต่ำ ๆ (10-30 phr ของ W-EPDM) พบว่าสมบัติเชิงกลดีขึ้นเนื่องจากผลของสารเชื่อมโยง แต่เมื่ออัตราการแทนที่ของ W-EPDM สูงขึ้นที่อัตราส่วน 45 phr พบว่าอัตราการแทนที่ของ W-EPDM ที่ปริมาณ 45 phr ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 249 % และ 6.1 MPa ตามลำดับ เป็นผลเนื่องจากสารตัวเติมที่มีอยู่ใน W-EPDM มากกว่าผลของการเชื่อม โยง และพบว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียม ได้สามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้โดยให้สมบัติเชิงกลลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับสมบัติเชิงกลจากการขึ้นรูปครั้งแรก

EI-Sabbagh, S.H. [22] ศึกษาความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทิลีน-พโรพิลีน-ไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) กรณีที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ และกรณีที่ไม่มีสารเติมสารช่วยผสม โดยทำการผสมในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ ที่อุณหภูมิในการผสม 150 °C ความเร็วรอบของสกรูในการผสมเท่ากับ 70 rpm เวลาในการผสม 5 นาที พอลิเมอร์ผสมมีกระบวนการปรับปรุง 2 แบบ คือ 1. การใช้รังสีแกมมา เป็นการให้พลังงานกับสายโซ่ของยาง เพื่อให้เกิดการเชื่อม โยงบริเวณวิภาคของยางธรรมชาติและวิภาค EPDM 2. การใช้สารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ คือ ยางเอทิลีน-พโรพิลีน-ไดอีนมอนอเมอร์ กราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (EPDM-g-maleic anhydride) ยางพอลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene rubber) ยางคลอรีน (Chlorinated rubber) คลอโรซัลโฟเนต โพลีเอทิลีน (Chlorosulfonated Polyethylene) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride)) พบว่าการใช้รังสีแกมมาทำให้เกิดการเชื่อม โยงพันธะเคมีเกิดขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ โดเมน (Domain phase) ทำให้มีความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างสองวิภาค ในขณะที่เดียวกันการใช้สารช่วยผสมสามารถลดแรงดึงพื้นผิวของ NR และ EPDM จากการศึกษาด้านฐานวิทยา (SEM) พบว่าเมื่อมีการเติมสารช่วยผสมทำให้ขนาดวิภาคของ EPDM ลดลง และกระจายตัวได้ดีในวิภาคของยาง และจากการศึกษาด้วยเครื่อง DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer) พบว่าการใช้ยางคลอรีนและคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เป็นสารช่วยผสมให้ค่า  $T_g$  ค่าเดียวคือ  $-48^{\circ}\text{C}$  และ  $-60^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

สุพิชญ์ ปัญญาวัฒนพงศ์ [23] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกระหว่างการผสมยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) ทำการเตรียมโดยการนำยางธรรมชาติผสมสูตรในเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นนำไปผสมกับ LDPE ในเครื่องผสมระบบปิดและนำไปผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปและ ถัดขึ้นรูปขึ้นงานตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ศึกษาสภาพในการผสม สัดส่วนของ NR/LDPE (50/50 60/40 และ 70/30) ผลของชนิดและปริมาณสารเชื่อมโยงซึ่งได้แก่ กำมะถันกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR และผลของสารช่วยผสมยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ (ENR) พบว่า TPNR ที่เตรียมโดยการใส่กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยงที่ปริมาณกำมะถัน 3 phr กับสารเร่งปฏิกิริยา CBS 0.5 phr เป็นสูตรผสมที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR และเมื่อศึกษาสภาพการเตรียมของ TPNR ในเครื่องผสมบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder) พบว่าที่อุณหภูมิ 150 °C และความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ 50 รอบต่อนาที เป็นสภาพการเตรียมที่เหมาะสม จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าลดลง เมื่อปริมาณสัดส่วนของ NR ใน TPNR เพิ่มขึ้น จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์เจล (%Gel) พบว่า %Gel มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วนของ NR เพิ่มขึ้น จากศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA พบว่า  $T_g$  ของ TPNR มีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วนของ NR ใน TPNR เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่า TPNR ที่เตรียมได้จากกระบวนการถีดขึ้นรูปมีกระจายตัวของ LDPE ใน TPNR ดึกว่า TPNR ที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป จากการศึกษาผลของ TPNR ที่เตรียมโดยใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าปริมาณ DCP 1 phr เป็นสูตรผสมที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR และจากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่นเปอร์เซ็นต์เจล สมบัติสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน พบว่ามีแนวโน้มไปทางเดียวกับระบบของกำมะถัน และจากการศึกษาผลของสารช่วยผสม ENR พบว่าเมื่อเติม ENR ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น และการเติม ENR-3 ให้สมบัติเชิงกลดีกว่า ENR-10

ปัทมา ผลโยธิน และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีผลต่อ TPNR ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติการใช้งานให้ดีขึ้น โดยการศึกษาปริมาณสารตัดสายโซ่ และสารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไคซ์ (ENR) และสารช่วยผสมร่วมระหว่างยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไคซ์ผสมกับพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ENR/PE-g-MA) จากการทดลองใช้อัตราส่วน NR กับ LDPE (NR/LDPE) 60/40 ในเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิการผสม 150 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที โดยใช้ ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) 0.5 phr เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าการใช้สารตัดสายโซ่ให้สมบัติเชิงกลลดลง และการใช้สารช่วยผสม ENR/PE-g-MA ให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ส่วน ENR เป็นสารช่วยผสมที่ให้สมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงกลดีที่สุด เมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิล ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเพียงเล็กน้อย จากลักษณะ  
 สัณฐานวิทยา (SEM) พบว่าเมื่อมีการเติมสารช่วยผสมทำให้การกระจายตัวของวัฏภาค LDPE ใน  
 วัฏภาคของยางผสมสูงขึ้น

วุฒิชัย ตรีศิตานันท์ และศรัณญา คัชมาตย์ [25] ได้ทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของ  
 สารช่วยผสมที่มีผลต่อ TPNR ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความ  
 หนาแน่นต่ำ (LDPE) เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติการใช้งานให้ดีขึ้น โดยการใช้สารช่วยผสมชนิด  
 ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมของเอทิลีนออกทีน (Ethylene octene copolymer, Engage<sup>®</sup> 8003)  
 และยางธรรมชาติชนิดเหลว (Liquid Natural Rubber, LNR) เป็นสารช่วยผสม จากการทดลองใช้  
 อัตราส่วนยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (NR/LDPE) 60/40 ในเครื่องผสม  
 ระบบปิด ที่อุณหภูมิการผสม 150 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที โดยใช้ DCP 0.5 phr  
 เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าการใช้ Engage<sup>®</sup> 8003 เป็นสารช่วยผสมทำให้ TPNR มีสมบัติเชิงกลเพิ่ม  
 ขึ้นเล็กน้อย และเมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิลทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อใช้  
 LNR เป็นสารช่วยผสมพบว่าไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติของ TPNR และเมื่อนำ TPNR มาผ่านการ  
 รีไซเคิลทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเพียงเล็กน้อย จากลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่าเมื่อมีการ  
 เติมสารช่วยผสมทำให้การกระจายตัวของวัฏภาค LDPE ในวัฏภาคของยางผสมสูงขึ้น

# บทที่ 3

## การดำเนินการวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินการ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR ระหว่าง NR และ PP

**ตอนที่ 1** ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการหลอมเหลว PP ที่มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 3.5 และ 10 กรัม/10 นาที (MFI 3.5 และ MFI 10)

1. ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหลอมเหลว PP ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)
2. ศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว PP ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder)

**ตอนที่ 2** การศึกษาผลของดัชนีการไหลของ PP ที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR ศึกษาผลของดัชนีการไหลของ PP ที่มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 3.5 และ 10 กรัม/10 นาที (MFI 3.5 และ MFI 10) ที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR

**ตอนที่ 3** การศึกษาการเตรียมยางสูตรผสม

1. ศึกษาปริมาณสารเชื่อม โยง (0.1 0.3 และ 0.5 phr) ที่เหมาะสมจากสมบัติของ TPNR ที่เตรียมได้
2. ศึกษาผลของความหนืดด้วยการเติมสารคัดสายโซ่ (ค่าความหนืดมูนนี่เท่ากับ 7 และ 14) เพื่อเตรียม TPNR

**ตอนที่ 4** ศึกษาผลจากการใช้สารช่วยผสม เพื่อเตรียม TPNR

งานวิจัยนี้เลือกใช้ยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเป็นสารช่วยผสม โดยเลือกศึกษาปริมาณสารช่วยผสม (1 3 และ 5 phr) ที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR

**ตอนที่ 5** การขึ้นรูป TPNR

ทำการขึ้นรูป TPNR ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

## ตอนที่ 6 การทดสอบสมบัติของ TPNR

1. การทดสอบสมบัติเชิงกล
  - I.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests)                      มาตรฐาน ASTM D638 [26]
  - I.2 การทดสอบความแข็งกด (Hardness tests)                      มาตรฐาน ASTM D2240 [27]
2. ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM
3. การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC
4. การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA

## ตอนที่ 7 การศึกษาสมบัติการนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล

นำ TPNR ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วไปบดและขึ้นรูปใหม่โดยการฉีดขึ้นรูปอีก 2 ครั้ง จากนั้นนำไปทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่นเดียวกับตอนที่ 6 เปรียบเทียบผลกับการขึ้นรูปครั้งแรก

## ตอนที่ 8 การศึกษาผลของเวลาในการผสมของ TPNR

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องผลของเวลาในการผสมที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR

## ตอนที่ 9 การศึกษาผลของเครื่องผสมบราเวนเคอร์พลาสติกอร์เคอร์

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องขนาดของเครื่องผสมบราเวนเคอร์พลาสติกอร์เคอร์ที่มีขนาดต่างกัน คือ ขนาดเล็กและขนาดใหญ่

## 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

### สารเคมี

1. ขางธรรมชาติชนิดแผ่นรมควันชั้นสอง (2-Grade Ribbed smoke sheet, RSS) จากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
2. พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) MFI=3.5 (P400S) และ MFI=10 (P600F) จากบริษัท CCC Chemical Commerce Co., Ltd. สมบัติแสดงดังตารางที่ 3.1
3. สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางชนิดสารประกอบฟีนอล (เออร์กานอกซ์, Irganox 1010) เกรดการค้า จากบริษัท Ceba Specialty Chemicals (Thailand) Ltd.
4. พอลิเอทิลีนแว็กซ์ (PE Wax) เกรดการค้า จากบริษัท P&M Associate Co., Ltd.
5. สารตัดสายโซ่ (Peptizer) Aktiplast<sup>®</sup> 8 เกรดการค้า จากบริษัท Rhein Chemie Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เกรควิเคราะห์ เปอร์เซ็นต์ปริมาณ เปอร์ออกไซด์ 98 % จากบริษัท Aldrich Co., Ltd.
7. สารช่วยผสมยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน จาก รศ.ดร.ปราณี ภิญญาชีพ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เปอร์เซ็นต์การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) 25%
8. ออสเมียมเตตระออกไซด์ (Osmium tetroxide, OsO<sub>4</sub>) เกรควิเคราะห์ จากบริษัท Becthai Co., Ltd.

### อุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) รุ่น FC 209 : จากบริษัท Bosco Engineering จำกัด
3. เครื่องบราเบนเคอร์พลาستيكอร์เคอร์ (Brabender Plasticorder) รุ่น PL2000 : จากบริษัท C. Melchers & Corporation และรุ่น Plasti-Corder Lab-Station : จากบริษัท Brabender
4. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 200 : จากบริษัท แลบทเคเอ็น-จิเนียร์ริง จำกัด
5. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection moulding machine) รุ่น Tti 220/80 Hitec : จากบริษัท Weltec Industrial Equipment จำกัด
6. เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Curelastometer<sup>®</sup>) รุ่น II F : จากบริษัท Nichigo Shigi จำกัด
7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR 30K : จากบริษัท Intro Llyod Instruments จำกัด
8. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester) ชนิด shore D จากบริษัท Intro Enterprise จำกัด
9. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC รุ่น DSC 50s : จากบริษัท Shimadzu Co., Ltd.
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM รุ่น LEO 1455VP : จากบริษัท LEO จำกัด
11. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA รุ่น DMTA-V : จากบริษัท Rheometric Scientific จำกัด และ รุ่น GABO : จากบริษัท Eplexor 25N จำกัด

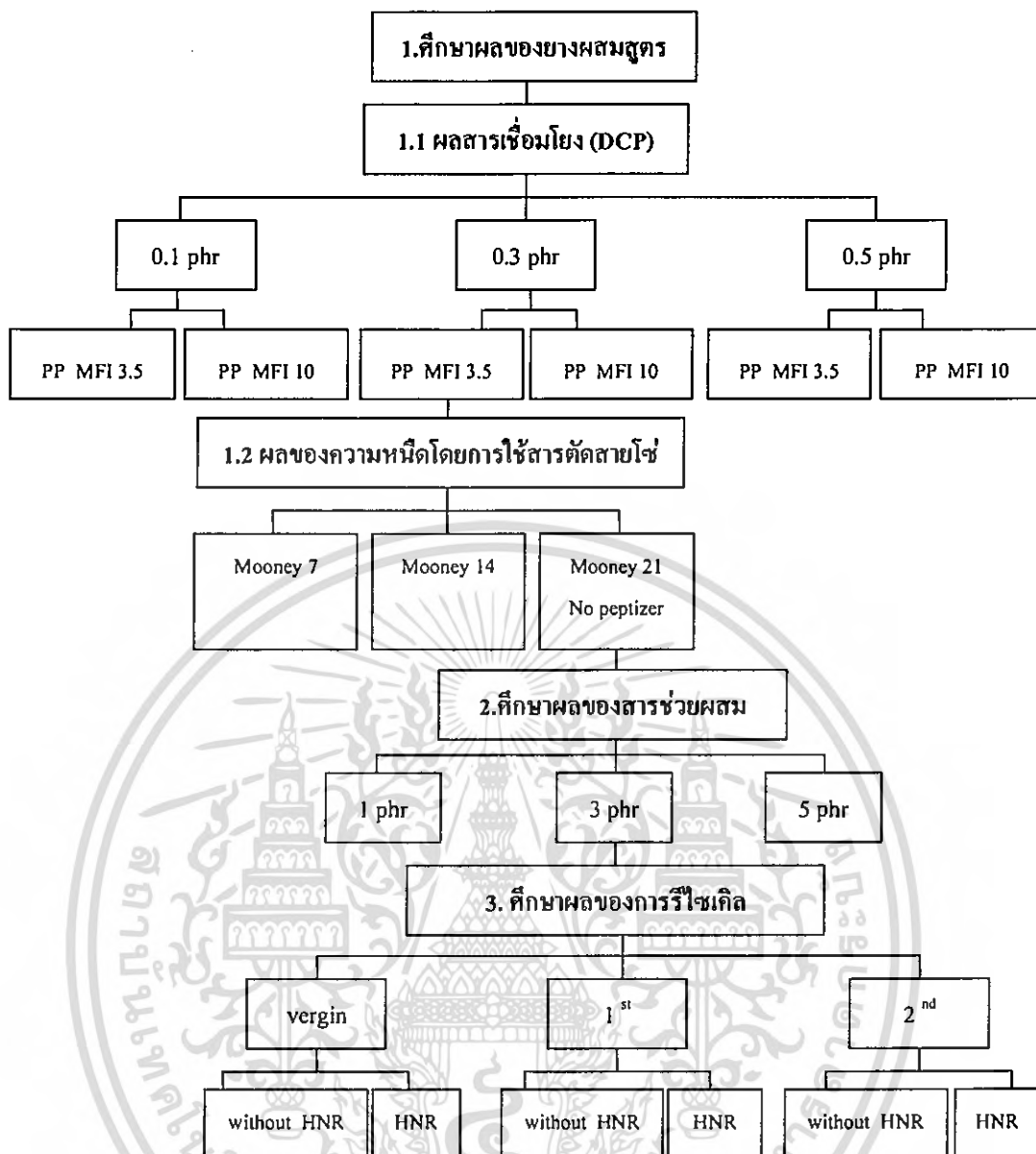
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีน**

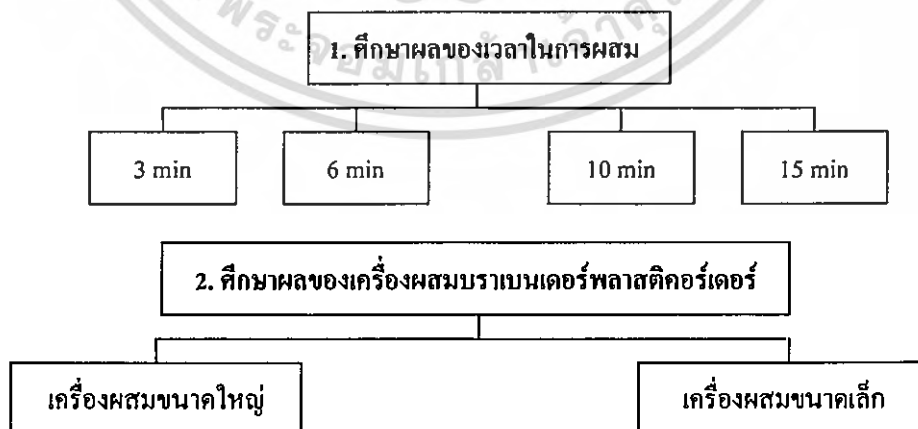
สมบัติ	หน่วย	ค่า		วิธีการทดลอง
ครรชนีการไหล (MFI) (Melt flow index)	กรัม/10 นาที	3.5	10	ASTM D 1238
ความหนาแน่น (Density)	กรัม/ลบ.ซม.	0.910	0.910	ASTM D 1505
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	กก./ตร.ซม.	350	250	ASTM D 638
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)	%	500	500	ASTM D 638
มอดุลัส โค้งงอ (Flexural modulus)	กก./ตร.ซม.	16,000	17,000	ASTM D 790
ความแข็งแรงกระแทก (Izod impact strength at 23 °C)	กก-ซม/ซม	4	2.5	ASTM D 256
ความแข็งกด (Rockwell hardness)	R scale	100	105	ASTM D 785
จุดอ่อนตัว (HDT) (Vicat softening point)	°C	155	155	ASTM D 1525

**หมายเหตุ** ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การศึกษาเพิ่มเติม (เลือก TPNR ที่เตรียมจาก PP- MFI 3.5 และมีปริมาณ DCP 0.3 phr ในการศึกษา)



รูปที่ 3.1 สรุปแผนผังการดำเนินการวิจัยในการศึกษา TPNR ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการหลอมเหลว PP เพื่อเตรียม TPNR

##### 1. ศึกษาหาอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PP โดยใช้เครื่อง DSC

ศึกษาหาอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PP MFI 3.5 และ MFI 10

1.1 นำ PP (MFI 3.5 และ MFI 10) มาชั่งน้ำหนักให้ได้ 5-10 มิลลิกรัม

1.2 ทำการศึกษาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน เป็น 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 200 °C

1.3 นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมผลึก ( $T_m$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

##### 2. ศึกษาหาเวลาในการหลอมเหลวของ PP MFI 3.5 และ MFI 10 ด้วยเครื่องบราเบน-เดอรัฟลาสติคอร์ดอร์

2.1 ชั่ง PP (MFI 3.5 และ MFI 10) ประมาณ 258 กรัม

2.2 นำมาใส่ลงในเครื่องผสมบราเบนเดอรัฟ Plasti-Corder Lab-Station : จากบริษัท Brabender

2.3 ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 170 °C ที่ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที นำผลที่ได้มาหาเวลาที่ทำให้ PP หลอมเหลว

#### 3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตร

การเตรียมยางแบ่งออกเป็น 3 ระบบด้วยกันคือ

ระบบที่ 1 ศึกษาการเตรียมยางผสมสูตรที่มีปริมาณ DCP ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.2

โดยทำการผสมทั้ง PP MFI 3.5 และ MFI 10 เลือกสูตรที่ได้นำมาทำในระบบที่ 2

ระบบที่ 2 ศึกษาการเตรียมยางผสมสูตรที่มีการเติมสารตัดสายโซ่ Aktiplast<sup>®</sup> 8

ระบบที่ 3 ศึกษาการเตรียมยางผสมสูตรที่มีการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเป็นสารช่วยผสม

### การเตรียมยางผสมสูตร

1. คัดยางและขี้สารเคมีต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.2 โดยเพิ่มน้ำหนักเพื่อให้ได้ยางผสมสูตรตามอัตราส่วนที่ต้องการ
2. ทำการผสมยางผสมสูตรเริ่มจากนำ NR มาทำการบดย่อย (Mastication) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง จนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้งทำการกรีดพับยางจนกระทั่งนมใช้เวลาประมาณ 10 นาที

### ตารางที่ 3.2 ยางผสมสูตรที่ใช้ในการทดลอง

สาร	อัตราส่วน โดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr)		
	ระบบที่ 1	ระบบที่ 2	ระบบที่ 3
Natural rubber	100	100	100
PE Wax	1	1	1
Irganox <sup>®</sup> 1010	1	1	1
DCP	0.1 0.3 และ 0.5	0.3	0.3
Peptizer	-	0.75	-
Compatibilizer (25 % Hydrogenation of NR)	-	-	1 3 และ 5

3. จากนั้นค่อย ๆ เติม PE Wax และ Irganox<sup>®</sup> 1010 ลงไประหว่างลูกกลิ้งแล้วทำการบดผสมโดยการกรีดและพับยาง (Cut-and-fold) เพื่อให้เกิดการผสมที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง ใช้เวลาประมาณ 10 นาที แล้วรีดยางออกมาเป็นแผ่นหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร

#### 3.1 กรณีที่มีการเติมสารคัดสายโซ่

##### 3.1.1 การเตรียมความหนืดของยางที่มีค่านูนนี้เท่ากับ 14

เติมสารคัดสายโซ่ก่อนการเติม PE Wax และ Irganox<sup>®</sup> 1010 ลงไประหว่างลูกกลิ้งแล้วทำการบดผสมโดยการกรีดและพับยาง เพื่อให้เกิดการผสมที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยางใช้เวลาประมาณ 10 นาที แล้วรีดยางออกมาเป็นแผ่นหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร

### 3.1.2 การเตรียมความหนืดของยางที่มีค่ามูนนี่เท่ากับ 7

เตรียมสารตัดสายโซ่ก่อนการเติม PE Wax และ Irganox<sup>®</sup> 1010 ลงไประหว่างลูกกึ่งแล้วทำการบดผสมโดยการกรีดและพับยาง เพื่อให้เกิดการผสมที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง ใช้เวลาประมาณ 20 นาที แล้วรีดยางออกมาเป็นแผ่นหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร

4. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่นแล้วนำไปวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมือนี้วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100 °C โดยหาค่าความหนืด ML 1+ 4 (100 °C) ของยางสูตรผสมก่อนการเชื่อมโยง

5. เตรียมสารเชื่อมโยงคือ DCP ลงไปในยาง ทำการบดผสมต่อไปจนยางมีความอ่อนตัวและสารมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

6. ปรับระยะห่างของลูกกึ่งให้ห่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร แล้วกรีดพับยางออกจากลูกกึ่ง ระวางอย่าให้พับติดกัน ได้ยางผสมสูตร

7. ตัดแผ่นยางผสมสูตรเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง ที่อุณหภูมิ 170 °C เพื่อหาเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{90}$ )

### 3.3.3 การเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

1. เตรียม TPNR ที่อัตราส่วนระหว่าง NR/PP เท่ากับ 60/40 โดยใส่ PP ประมาณ 20 กรัม ลงไปในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ รุ่น PL2000 : จากบริษัท C. Melchers & Corporation ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 170 °C จนกระทั่ง PP หลอมเหลวหมดเป็นเวลา 4 และ 3 นาที (MFI 3.5 และ MFI 10) ตามลำดับ แล้วจึงทำการใส่ยางผสมสูตรประมาณ 30 กรัม ผสมเป็นเวลา 3 นาที

#### 1.1 ในกรณีที่ต้องการศึกษาผลของสารช่วยผสม

เตรียม TPNR โดยการหลอมเหลว PP ก่อนในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ เมื่อ PP หลอมเหลวหมด จึงทำการใส่สารช่วยผสมและยางผสมสูตร แล้วทำการผสมเป็นเวลา 3 นาที

#### 1.2 ในกรณีศึกษาของผลเวลาในการผสม

หลอมเหลว PP ก่อนในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ เมื่อ PP หลอมเหลวหมด ใส่ยางผสมสูตรทำการผสมเป็นเวลา 3 นาที โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเวลาในการผสม ที่ 3 6 10 และ 15 นาที (เพิ่มเวลาในการผสมระหว่างยางผสมสูตรกับ PP เป็น 6 10 และ 15 นาที ตามลำดับ)

### 1.3 ในกรณีการศึกษาผลของเครื่องผสมบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์เพื่อเตรียม TPNR

หอลอมเหลว PP ก่อน ในเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ เมื่อ PP หอลอมเหลวหมด ใส่ยางผสมสูตรทำการผสมเป็นเวลา 3 นาที โดยเปรียบเทียบระหว่าง เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์สองขนาด คือ

1. ขนาดเล็ก จากบริษัท C. melchers & Corporation รุ่น PL2000 มีขนาดของห้องผสมเท่ากับ  $80 \text{ cm}^3$
2. ขนาดใหญ่ จากบริษัท Brabender รุ่น Plasti-Corder Lab-Station มีขนาดของห้องผสมเท่ากับ  $410 \text{ cm}^3$

2. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาทำการบดด้วยเครื่องบด เพื่อนำไปขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูป

### 3.4 การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

#### 3.4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR

สมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) และ โปรแกรม WINDAP<sup>®</sup> ในการคำนวณ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) กำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยึด	100	มิลลิเมตรต่อนาที
ความยาวเกจ หรือความยาวเริ่มต้น (Gauge length)	70	มิลลิเมตร
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	6	ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ความแข็งแรงดึง เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

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

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } F &= \text{แรงที่ใช้ในการดึง } \text{ณ จุดขาด (N)} \\ A &= \text{พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

2. ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด หาได้จากสมการ

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

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } L &= \text{ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน } \text{ณ จุดขาด (mm)} \\ L_0 &= \text{ความยาวเริ่มต้นก่อนการดึง } 70 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. ค่าความยืดหยุ่นของมอดุลัส (Modulus of elasticity) หรือ ยังมอดุลัส (Young's modulus) คืออัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดในช่วง Proportional limit หรือช่วงที่ความเค้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเครียด (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่)

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

### 3.4.2 ความแข็งกด

การทดสอบความแข็งกด เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2240 ในการทดสอบใช้มาตรฐาน shore D ลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีความเรียบมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 10 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการทดสอบ 3 ครั้งต่อหนึ่งชิ้นงานทดสอบ

### 3.4.3 ศึกษาพื้นฐานวิทยา

ศึกษาพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM โดยดูจากภาพตัดขวางและลักษณะพื้นผิวของ TPNR การเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน ทำได้ดังนี้

1. นำชิ้นงาน TPNR แซ่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวประมาณ 30 นาที เป็นการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) จากนั้นนำชิ้นงานเล็ก ๆ ที่เตรียมได้ นำมาวางในตู้ดูดควัน
2. เคลือบผิวหน้าของชิ้นงานด้วยไอของ OsO<sub>4</sub> โดยหยดสารละลาย OsO<sub>4</sub> (เข้มข้น 1% w/v) วันละหนึ่งหยด เป็นเวลา 7 วัน
3. นำชิ้นงานวางในตู้ดูดควันเป็นเวลา 7 วัน เพื่อปล่อยให้ไอของ OsO<sub>4</sub> ที่เหลืออยู่ระเหยออกไป แล้วนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปศึกษาด้วยเครื่อง SEM

### 3.4.5 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

โดยใช้สภาวะการทดลองดังนี้

ขนาดตัวอย่างประมาณ	5	มิลลิกรัม
อุณหภูมิ	50-200	องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate)	10	องศาเซลเซียส/นาที

นำมาหาค่าจุดหลอมเหลว ( $T_m$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของ PP ใน TPNR ที่เตรียมได้

คำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP ใน TPNR ที่อัตราส่วนการผสม NR/PP เท่ากับ 60/40 จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.4)$$

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f / 0.4}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (3.5)$$

$\Delta H_f$  = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีนตัวอย่าง (J/g)

$\Delta H_f^0$  = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีนที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 197 J/g [28]

### 3.4.6 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA

การเตรียมชิ้นงานจะนำตัวอย่างมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้วนำไปเข้าเครื่อง DMTA โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

- เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA รุ่น DMTA-V : จากบริษัท Rheometric Scientific จำกัด

ขนาดของชิ้นงานโดยประมาณ	6 x 25 x 2.5	มิลลิเมตร
รูปแบบในการทดสอบ	Single cantilever bending geometry	
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน (Frame)	Medium Frame	
ความถี่	1.6	เฮิร์ตส (Hz)
อุณหภูมิ	-100 ถึง 80	องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	3	องศาเซลเซียส/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA รุ่น GABO : จากบริษัท Eplexor 25N จำกัด

ขนาดของชิ้นงาน โดยประมาณ	6 x 25 x 2.5	มิลลิเมตร
รูปแบบในการทดสอบ	tension geometry	
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน (Frame)	Medium Frame	
ความถี่	10	เฮิร์ตส (Hz)
อุณหภูมิ	-100 ถึง 80	องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	3	องศาเซลเซียส/นาที

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

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

$$E'' = E^* \sin \delta \quad (3.7)$$

$$\tan \delta = E'' / E' \quad (3.8)$$

$E'$  = มอดุลัสสะสม (Storage modulus)

$E''$  = มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus)

$E^*$  = มอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)

$\tan \delta$  = ความสามารถในการกระจายพลังงานต่อความสามารถในการสะสมพลังงาน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการดำเนินงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิพรอพิลีน (PP) โดยเลือกอัตราส่วน NR/PP ที่ 60 : 40 ใช้เทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) และการเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic vulcanization) โดยศึกษาผลของครรชนิกการไหล (Melt Flow Index, MFI) ของ PP ระหว่าง MFI 3.5 กรัม/10นาทีก และ MFI 10 กรัม/10นาทีก (MFI 3.5 และ MFI 10) รวมถึงการศึกษาผลและปริมาณของสารเติมแต่งต่างๆ ได้แก่ ไดคิควิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) เป็นสารเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางธรรมชาติ Aktiplast<sup>®</sup> 8 เป็นสารตัดสายโซ่ และมีการใช้สารช่วยผสม ซึ่งได้จากปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนของยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มแรงยึดติดระหว่างวัฏภาค โดยได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ซึ่งผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีน เพื่อเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

ในการผสม NR กับ PP ซึ่งเป็น TPNR การผสมจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อ PP เกิดการหลอมเหลวสมบูรณ์ก่อนทำการผสม NR ดังนั้นในช่วงแรกของการศึกษา จึงเป็นการศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะที่ใช้ในการหลอมเหลวของ PP

##### 4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีน

การศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) ของ PP โดยใช้เครื่อง DSC จากผลการทดลองพบว่า PP MFI 3.5 และ MFI 10 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกที่ 159 °C และ 155 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงไว้ ดังภาคผนวก ข ในกระบวนการขึ้นรูปปกติจะทำให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของ PP ประมาณ 10-15 °C [8] ดังนั้นจึงนำ PP ไปหาเวลาในการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 170 °C เพื่อให้เกิดการหลอมเหลวของ PP ที่สมบูรณ์

##### 4.1.2 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีน

จากการศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว PP ที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที พบว่าเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว PP MFI 3.5 และ MFI 10 อยู่ในช่วง 4 และ 3 นาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงไว้ดังภาคผนวก ค ดังนั้นในขั้นตอนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสม PP กับยางผสมสูตรในเครื่องบราเบนเดอร์เริ่มจากการหลอมเหลว PP MFI 3.5 และ MFI 10 ใช้เวลา 4 และ 3 นาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นเวลาที่ PP สามารถเกิดการหลอมเหลวได้หมด แล้วจึงเติมยางผสมสูตร

## 4.2 การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร

จากการศึกษาสภาวะการหลอมเหลวของ PP ในช่วงแรก ทำให้ทราบอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวของ PP โดยนำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาปริมาณ DCP ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงในวัฏภาคของยาง พร้อมทั้งศึกษาผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 และ MFI 10 จากนั้นเลือก TPNR สูตรที่เหมาะสม นำมาศึกษาผลของความหนืดโดยการใช้สารตัดสายโซ่

### 4.2.1 การศึกษาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการเตรียมยางผสมสูตรด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Curelasterometer)

ในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีนเพื่อเตรียม TPNR ต้องทำการหลอมเหลว PP ก่อนทำการผสมยางผสมสูตร และสิ่งที่ต้องพิจารณาคือระยะเวลาในการผสม ซึ่งต้องผสมให้ PP และยางผสมสูตรเข้ากันได้ดีก่อนที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ ดังนั้นจำเป็นต้องหาระยะเวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time,  $t_{22}$ ) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{90}$ ) ด้วยเครื่อง Curelasterometer<sup>®</sup> ซึ่งเป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Rotorless curemeters) โดยศึกษาปริมาณ DCP อยู่ในช่วง 0.1-0.5 phr ที่อุณหภูมิ 170 °C จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ DCP มากขึ้น ทำให้ค่าเวลาการเชื่อมโยงมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 5 – 6 นาที แสดงดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ จะไม่มีการใช้สารเร่งการเชื่อมโยง ค่าเวลาการเชื่อมโยงจึงขึ้นกับค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ของเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงจึงไม่มีผลต่อค่าเวลาการเชื่อมโยง แต่จะขึ้นกับอุณหภูมิในการเชื่อมโยงมากกว่า จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ระยะเวลาในการคงรูปจึงใกล้เคียงกัน และจากการทดลองพบว่าไม่สามารถหาค่า  $t_{22}$  ได้ เนื่องจากเปอร์ออกไซด์เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวอย่างรวดเร็ว ไม่มีการชะลอการเริ่มต้นของปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ การเชื่อมโยงจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ไม่สามารถหาค่า  $t_{22}$  ได้ [25] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเวลาประมาณ 3 นาที ในการผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับยางผสมสูตร ซึ่งเป็นเวลา ก่อนที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแหสามมิติขึ้นอย่างสมบูรณ์

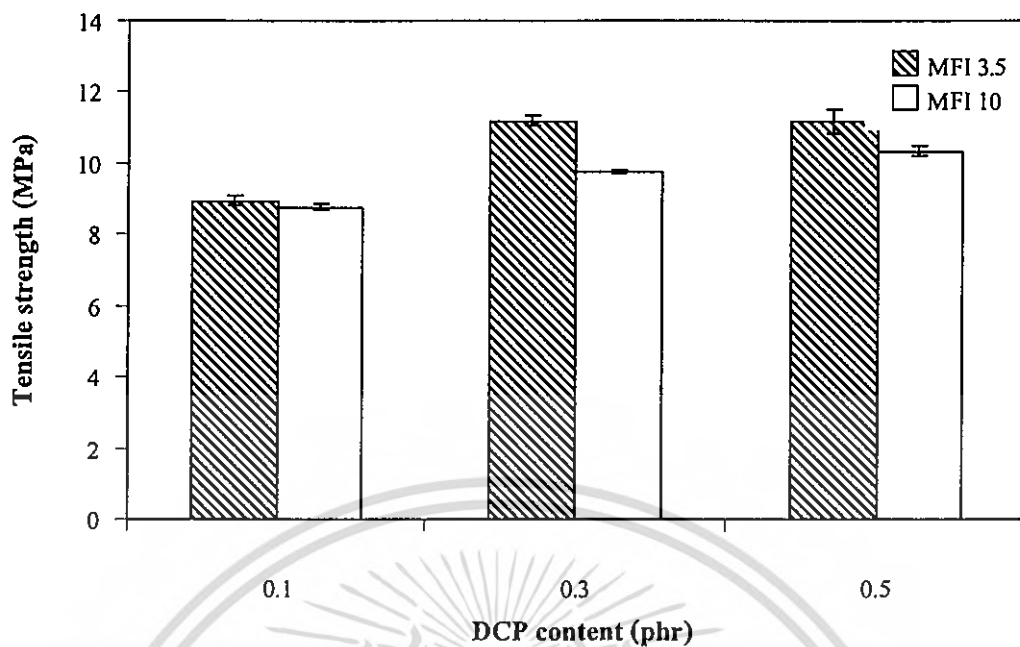
ตารางที่ 4.1 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรที่มีปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์  
ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 170 °C

ปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (phr)	เวลา (นาที)	
	Scorch time	Cure time
0.1	-	6.0
0.3	-	5.3
0.5	-	5.0

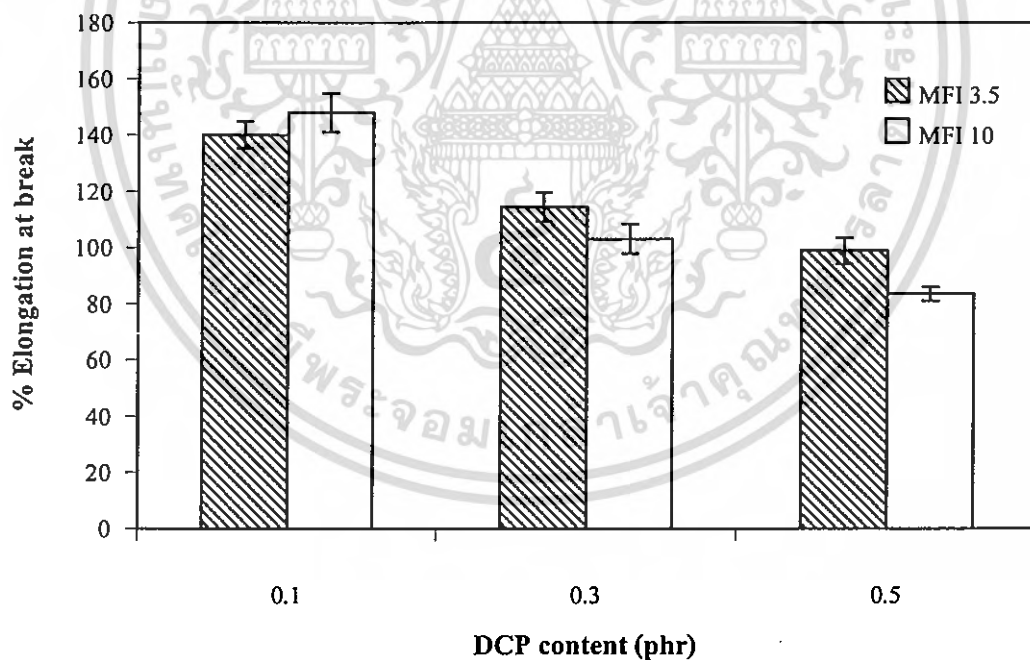
#### 4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR จากยางผสมสูตรที่เหมาะสม

##### 4.2.2.1 การศึกษาปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์และผลของดรรชนีการไหลของ พอลิพรอพิลีน

การเตรียม TPNR ด้วยเครื่องบราเวนเคอร์พลาสติกอร์เคอร์ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบ  
ในการผสม 50 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการผสมของ TPNR ระหว่าง NR และ PP 2 ชนิด คือ  
MFI 3.5 และ MFI 10 เป็นเวลาเท่ากับ 7 และ 6 นาที ตามลำดับ โดยได้ทำการศึกษายางผสมสูตรที่มี  
ปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์แตกต่างกันคือ 0.1 0.3 และ 0.5 phr โดยนำ TPNR ไปขึ้นรูปแล้ว  
ทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตร ดังผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.1-4.2

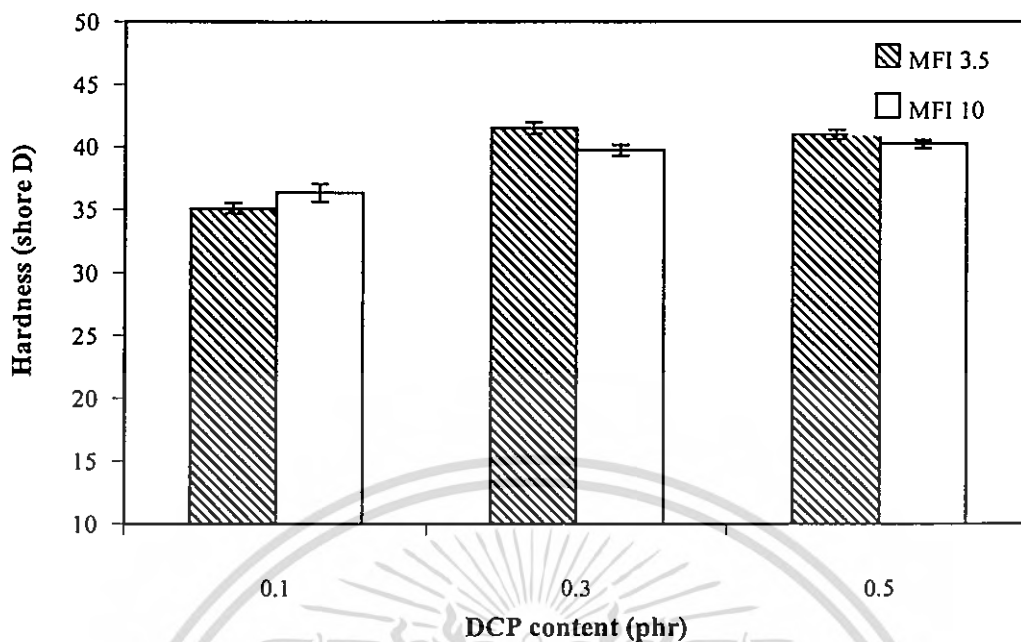


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยงและผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน

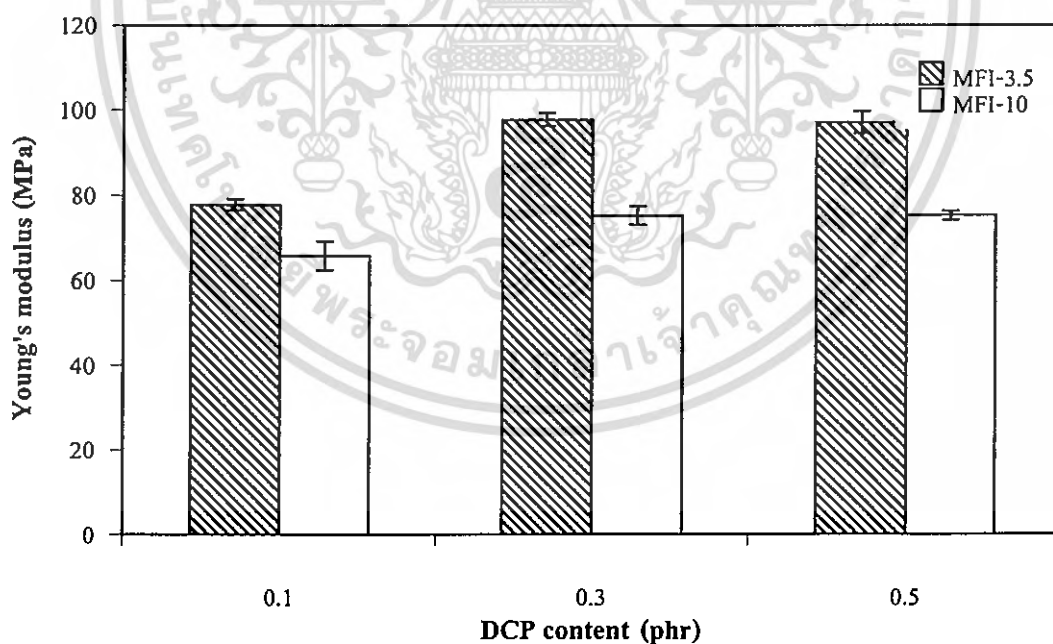


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยงและผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



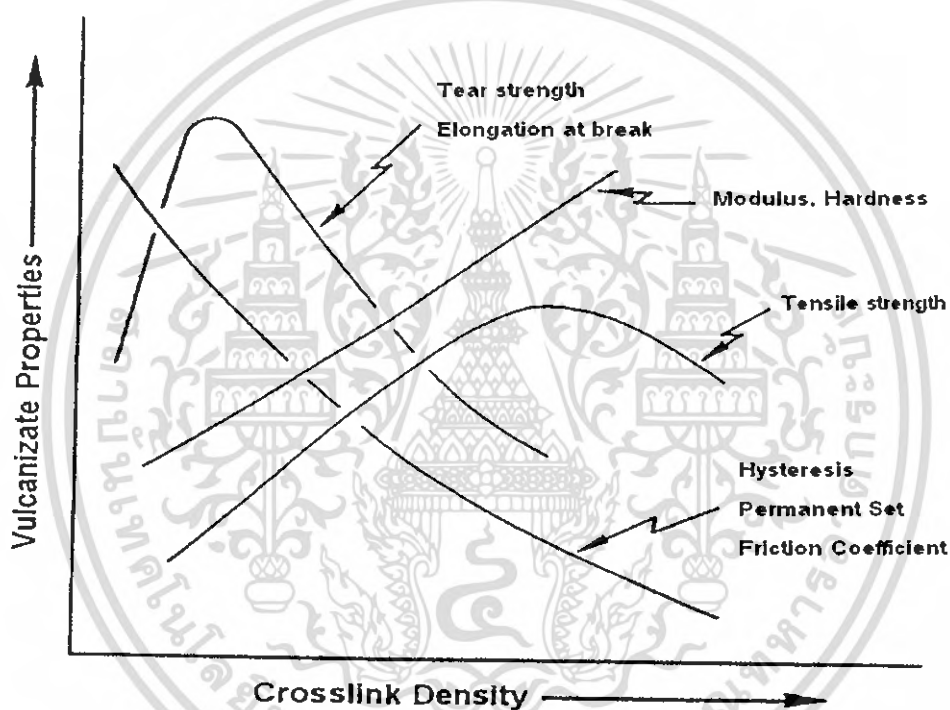
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยงและผลของดรรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus ของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยงและผลของดรรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) แสดงถึงความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุที่สามารถทนทานต่อการได้รับแรงก่อนที่จะเกิดการแตกหัก จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่าคงที่ ที่ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.3 และ 0.5 phr เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงทำให้เกิดการเชื่อมโยงในภูมิภาคยางเป็นโครงร่างแหสามมิติ ส่งผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density,  $\rho_c$ ) ของยางเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงจึงมีค่าสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ค่าหนึ่ง (Optimum point) จากนั้นจะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.5 เนื่องจากความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงมากขึ้นสายโซ่เคลื่อนที่อย่างจำกัดไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับเป็นผลให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำลงและแตกหักได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อม โยง (Crosslink density) ของยาง กับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [10]

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความสามารถในการดึงยืดของวัสดุก่อนที่จะเกิดการขาดอย่างถาวร จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) พบว่าการเพิ่มปริมาณ DCP ทำให้ความหนาแน่นเชื่อม โยง ( $\rho_c$ ) ของยางเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ค่าหนึ่ง จากนั้นจะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงมากขึ้น ยางจะเกิดพันธะเชื่อม โยงมากขึ้น ( $\rho_c$  เพิ่มขึ้น) ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่หลุดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกันยากขึ้นเมื่อได้รับแรง เนื่องจากไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับ ทำให้เปอร์เซ็นต์การบิด ณ จุดขาดมีค่าลดลง [10]

ค่าความแข็งกด (Hardness) เป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความแข็งที่ผิวชิ้นงานของวัสดุหรือ การต้านการยุบตัวเมื่อวัสดุได้รับแรงจากหัวกด (Indenter) จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความแข็งกดกับปริมาณ DCP พบว่าความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DCP เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ยากขึ้น ส่งผลให้ TPNR มีค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้น [10]

ค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) เป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุที่แสดงถึงความสามารถในการรับแรงต่อการเปลี่ยนรูปร่าง จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดุลัสกับปริมาณ สารเชื่อมโยง พบว่าค่ายังมอดุลัสมีแนวโน้มสอดคล้องไปทางเดียวกับค่าความแข็งกด กล่าวคือ เมื่อปริมาณ DCP เพิ่มมากขึ้น ค่ายังมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ DCP ทำให้เปลี่ยน โครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติมากขึ้น ( $\rho_c$  เพิ่มขึ้น) ทำให้โมเลกุล ของยางเคลื่อนที่ยากขึ้น ต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อทำให้ TPNR เปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงาน ส่งผลให้ TPNR มีค่ายังมอดุลัสเพิ่มขึ้น [10]

เมื่อพิจารณาผลจากการศึกษาผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน 2 เกรดที่มีครรชนี การไหล (MFI) ต่างกันคือ MFI 3.5 และ MFI 10 ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 มีแนวโน้มให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.4 เนื่องจาก PP ที่มีค่าครรชนีการไหลต่ำกว่าจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง สายโซ่ยาว และความหนืดมาก ทำให้แรงเสียดทานในระหว่างการผสมมีค่ามากขึ้น [29] ส่งผลให้ ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ระหว่าง NR และ PP คีขึ้น นอกจากนี้ PP MFI 3.5 มีปริมาณองศา ความเป็นผลึกสูงกว่า PP MFI 10 ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย เทคนิค DSC แสดงดังในตารางที่ 4.3 เนื่องจากคาดว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้ พอลิเมอร์มีหมู่ปลายสายโซ่ (Chain end) จำนวนมาก ซึ่งสามารถขัดขวางการเกิดผลึกของ พอลิเมอร์ [29] จากเหตุผลทั้งสองดังกล่าวทำให้ TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 จึงมีปริมาณผลึก และความแข็งแรงที่ดีกว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 10

จากการศึกษาผลของปริมาณ DCP และผลของครรชนีการไหลของ PP ระหว่าง MFI 3.5 และ MFI 10 พบว่า TPNR ที่มีปริมาณ DCP เท่ากับ 0.3 และ 0.5 phr ให้สมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน และมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า TPNR ที่มีปริมาณ DCP เท่ากับ 0.1 phr และเมื่อพิจารณาถึงผลของ ครรชนีการไหลของ PP ระหว่าง MFI 3.5 และ MFI 10 พบว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 ให้ สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 10 ดังนั้นจึงเลือก TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 และมีปริมาณ DCP เท่ากับ 0.3 phr เนื่องจากเป็นสูตรที่ให้ค่าความแข็งแรงดึง ยังมอดุลัส

และความแข็งกตที่สูง ในขณะที่เดียวกันให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ณ จุดขาด สูงกว่า TPNR ที่มีปริมาณ DCP 0.5 phr นำมาศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตรที่มีผลต่อสมบัติของ TPNR ต่อไป

#### 4.2.2.2 การศึกษาผลของความหนืดโดยการใช้สารตัดสายโซ่

ในการศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตรโดยการใช้สารตัดสายโซ่ ได้เลือกสูตรเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPNR) ระหว่างยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 ที่มีปริมาณสารเชื่อม โยง (DCP) 0.3 phr เนื่องจากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี

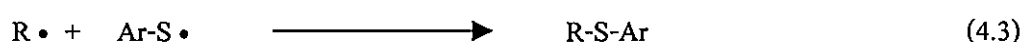
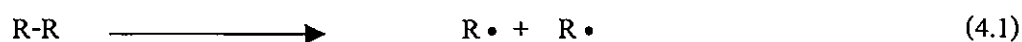
การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางผสมสูตร โดยการลดความหนืดของยางผสมสูตรด้วยการใช้สารตัดสายโซ่ (Aktiplast® 8) 0.75 phr และการเพิ่มเวลาในการบดย่อยยางเพื่อช่วยลดความหนืดของยางผสมสูตร ได้ผลการทดลองดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหนืดของยางผสมสูตร

ปริมาณสารตัดสายโซ่ (phr)	เวลาในการบดย่อยยาง (นาที)	ความหนืด ML 1+4 (100°C)
0	20	21 ± 1.0
0.75	20	14 ± 0.6
0.75	30	7 ± 0.3

จากการเติมสารตัดสายโซ่และการเพิ่มเวลาในการบดย่อยยาง ทำให้ความหนืดของยางผสมสูตรลดลง เนื่องจากการบดย่อยยางทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลยาง โดยเกิดอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นสารตัดสายโซ่จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นและช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง ดังแสดงในสมการที่ (4.1) – (4.3) [6]

ตัวอย่างการทำงานของเปปไทเซอร์

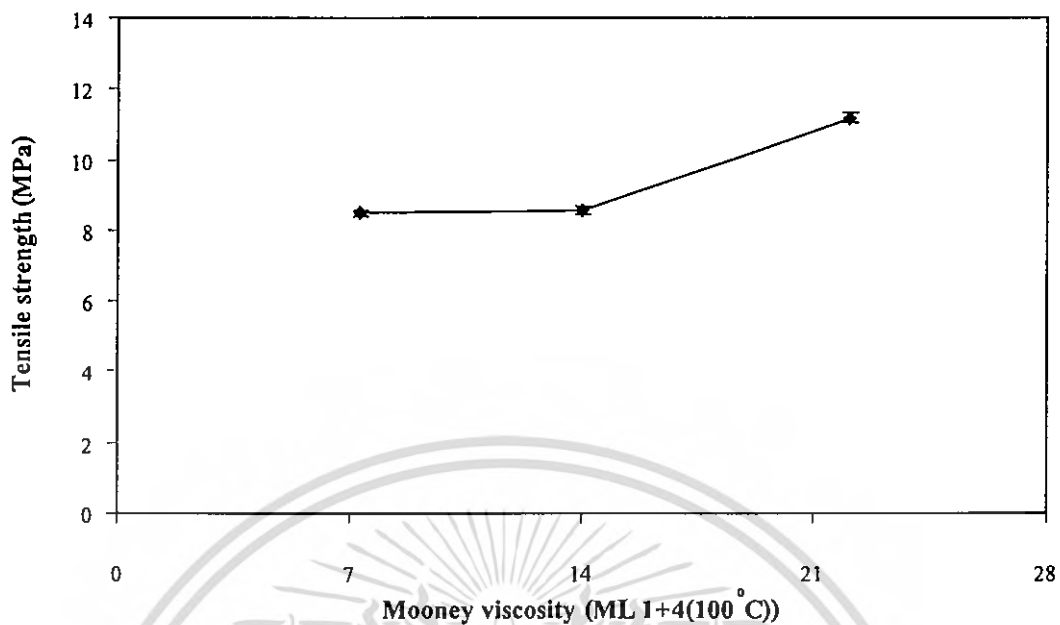


R-R คือ โมเลกุลของยาง

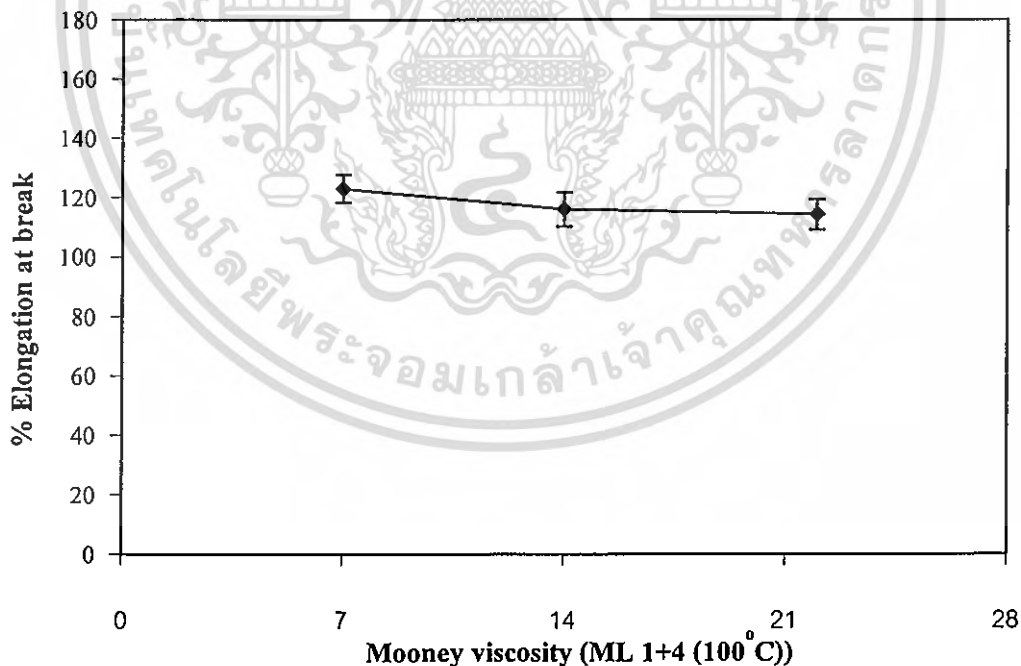
Ar-S-S-Ar คือ โมเลกุลของไดซัลไฟด์ (สารตัดสายโซ่)

จากรูปที่ 4.6-4.9 แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์กับค่าความหนืดมูนีของยางผสมสูตรต่าง ๆ พบว่าเมื่อความหนืดของยางผสมสูตรลดลง ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงยังมอดูลัส และความแข็งแกร่งมีค่าลดลง เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงของยางธรรมชาติ ทำให้การเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain entanglement) ลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การขีด ฉ ขูดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความหนืดของยางผสมสูตรลดลง เนื่องจากการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางมีค่าลดลง คาดว่าเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ได้รับแรงจากภายนอก สายโซ่พอลิเมอร์มีแนวโน้มที่จะจัดเรียงตัวตามแนวแรง (Alignment) ได้ง่ายขึ้น สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกัน ทำให้วัสดุมีความสามารถในการดึงขีดได้มากขึ้น ก่อนที่สายโซ่พอลิเมอร์จะหลุดออกจากกัน (Disentanglement) [30] เกิดการขาดและเสียสภาพอย่างถาวร



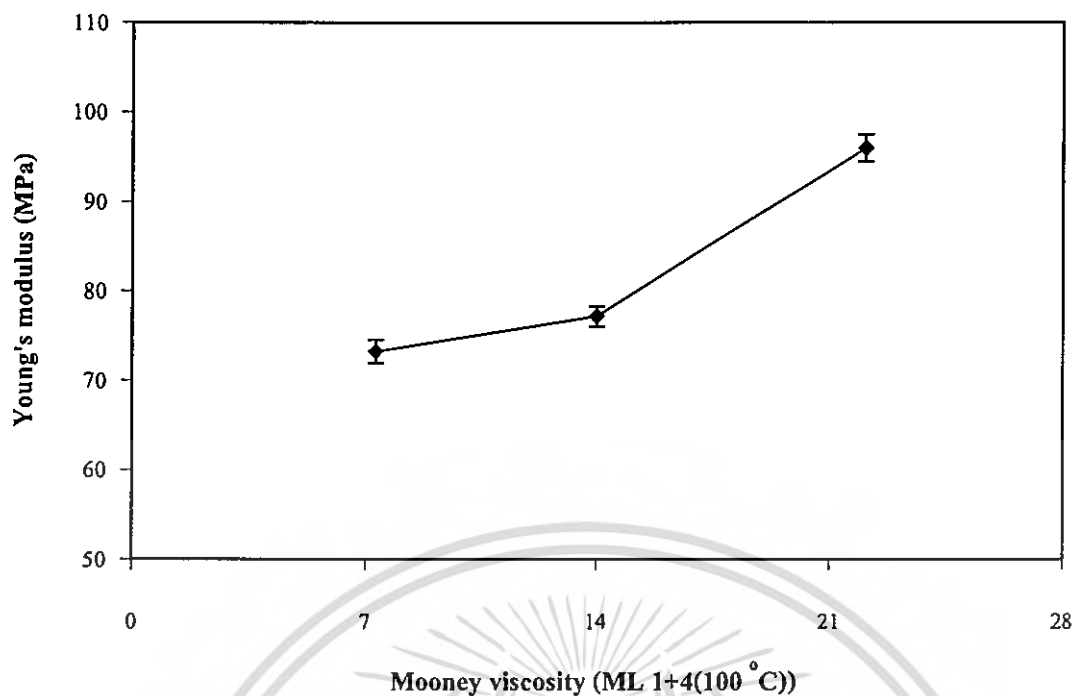


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตรที่มีกับค่าความหนืดมูนนี่ต่างกัน

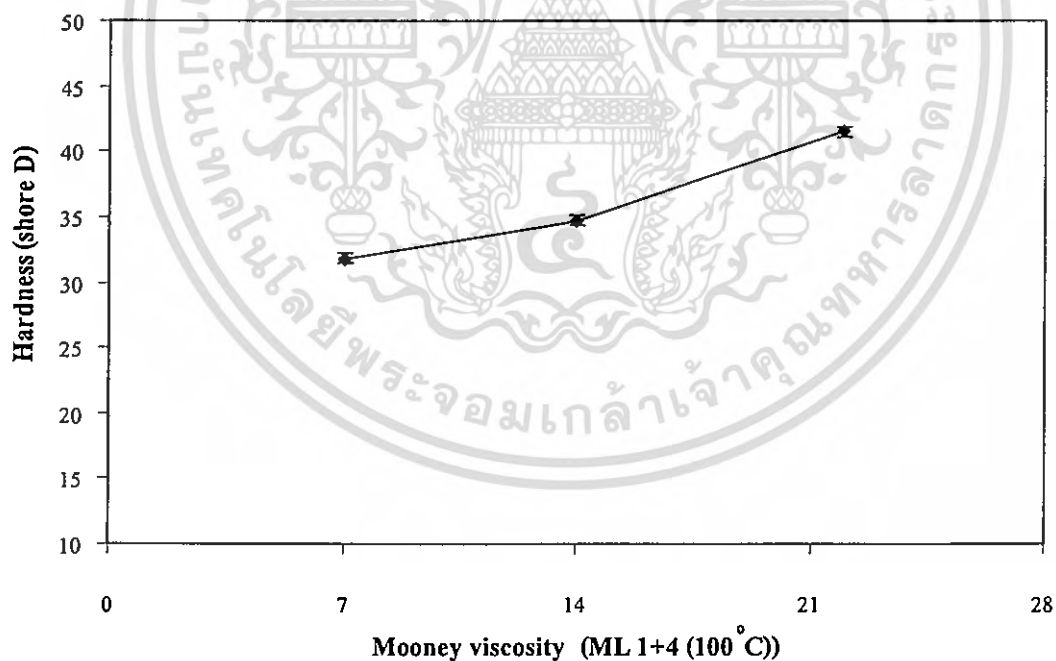


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตรที่มีค่าความหนืดมูนนี่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

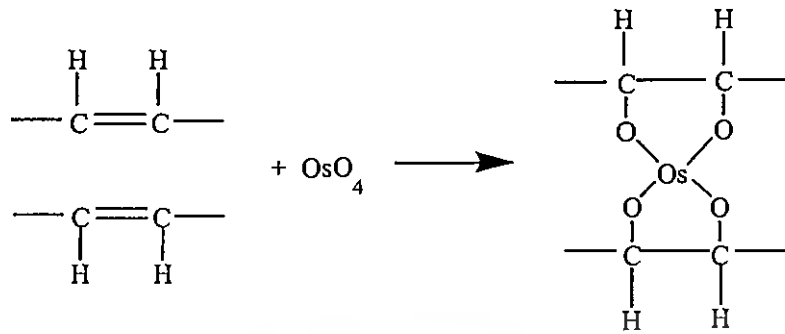


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus ของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตรที่มีค่าความหนืดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตรที่มีค่าความหนืดแตกต่างกัน

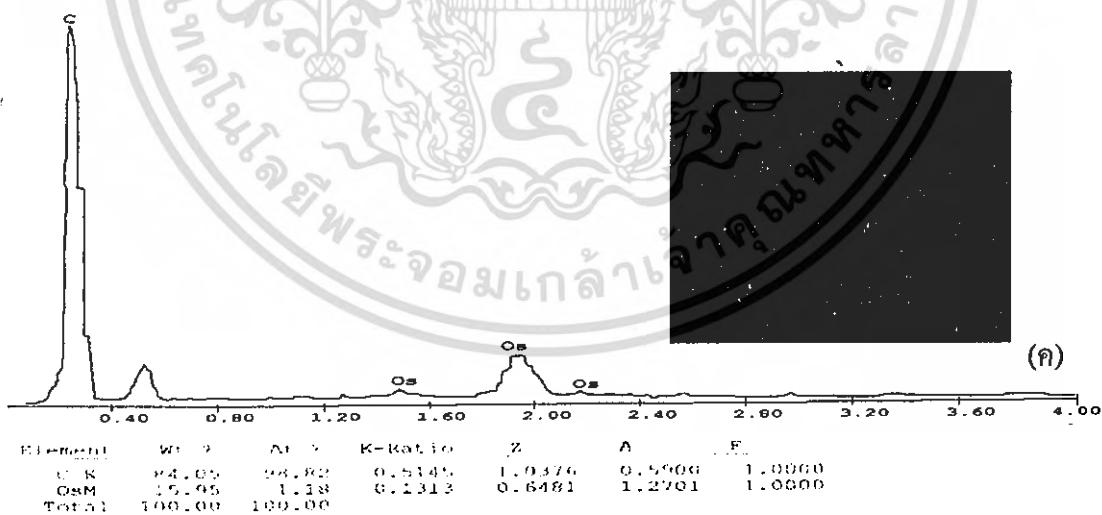
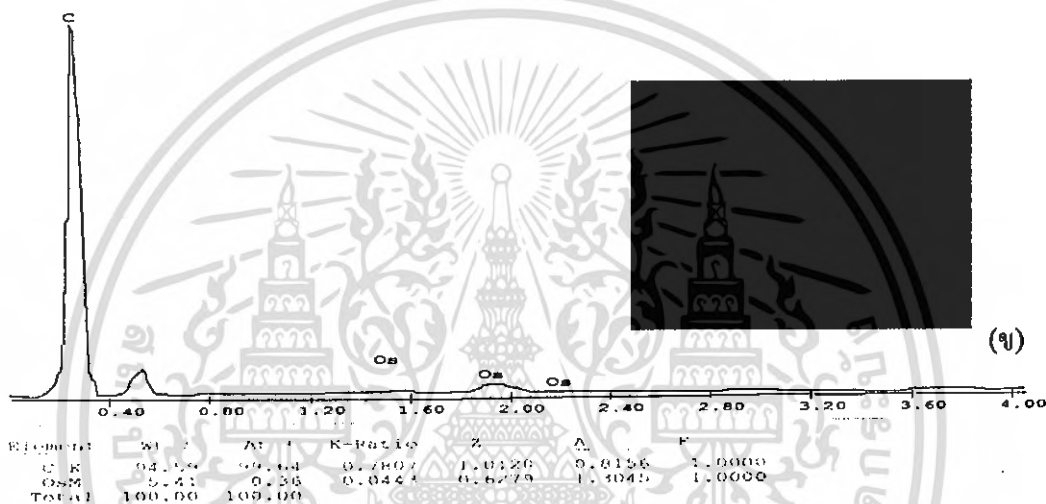
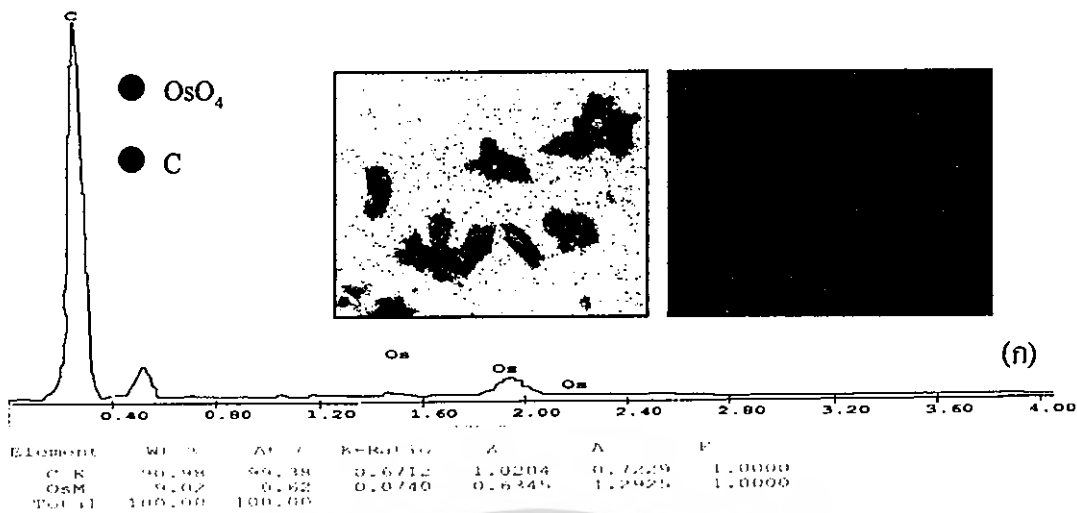
### 4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR จากยางผสมสูตรที่เหมาะสม



รูปที่ 4.10 การทำปฏิกิริยาของออสเมียมเตตระออกไซด์ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของยางที่ไม่อิ่มตัว [30]

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ด้วย SEM โดยการแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) แล้วทำการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) จากนั้นทำการเคลือบชิ้นงานที่ผ่านการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำด้วยออสเมียมเตตระออกไซด์ (Osmium tetroxide,  $\text{OsO}_4$ ) โดย  $\text{OsO}_4$  จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของยางแสดงดังรูปที่ 4.10 ทำให้สัณฐานวิทยาที่ได้จาก SEM โดยใช้สัญญาณอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Backscattered electron) ให้สัณฐานวิทยาของวัสดุของพอลิพรอพิลีนเป็นสีดำและวัสดุของยางเป็นสีขาว

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวและแผนภาพการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่าพิกหลักและแผนภาพการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบในชิ้นงาน TPNR มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนและ  $\text{OsO}_4$  ดังรูปที่ 4.11 (ก) และในส่วนวัสดุสีดำมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน ส่วนของวัสดุสีขาวมีองค์ประกอบหลักเป็น  $\text{OsO}_4$  ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าวัสดุสีดำเป็นวัสดุของพอลิพรอพิลีนและวัสดุสีขาวคือวัสดุของยาง



รูปที่ 4.11 SEM-EDS micrographs แสดงธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวและแผนภาพการกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิว

- ก) ชิ้นงาน TPNR
- ข) การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนบนชิ้นงาน TPNR
- ค) การวิเคราะห์ธาตุ OsO<sub>4</sub> บนชิ้นงาน TPNR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3.1 การศึกษาผลของปริมาณโคคิวมิลเปอร์ออกไซด์และผลของครรชนีการไหลของพอลิพรอพิลีน

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวแตกหักของ TPNR ระหว่าง NR และ PP MFI 3.5 และ MFI 10 ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงมากขึ้น ขนาดของวัฏภาค PP ซึ่งมีสีดำ (วัฏภาคกระจาย) มีขนาดเล็กลง และกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของยาง ซึ่งเป็นสีขาว เนื่องจากการเชื่อมโยงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเปลี่ยนจากโครงสร้างสายโซ่ตรง เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติมากขึ้น ความหนืดมีค่ามาก ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น PP จึงไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าจัดเรียงเกิดเป็นผลึกได้สมบูรณ์ [29] ดังนั้นการเชื่อมโยงทำให้ ขั้วขวางการรวมตัวของวัฏภาค PP ทำให้ปริมาณองศาความเป็นผลึกของ PP มีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม ปริมาณสารเชื่อมโยงมากขึ้น [31] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย เทคนิค DSC แสดงดังตารางที่ 4.3 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการกระจายตัวของวัฏภาค PP ในบางมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ

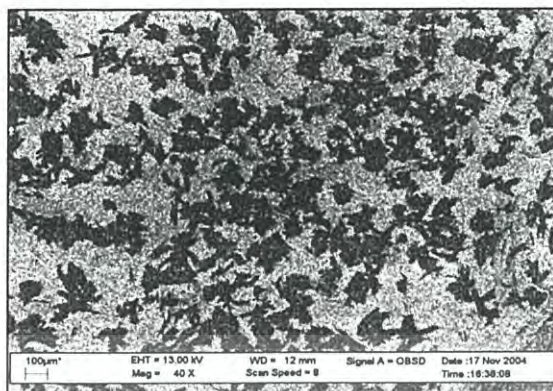
เมื่อพิจารณาถึงผลของครรชนีการไหลของ PP ระหว่าง MFI 3.5 และ MFI 10 พบว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 ให้สัณฐานวิทยาการกระจายตัวของวัฏภาค PP ดีกว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 10 เนื่องจากปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม คือ อัตราส่วน ระหว่างความหนืดของวัฏภาคกระจาย ( $\eta_2$ ) และวัฏภาคต่อเนื่อง ( $\eta_1$ ) (Viscosity ratio,  $\eta_2/\eta_1$ ) ซึ่ง ควรมีค่า  $\eta_2/\eta_1$  อยู่ในช่วง 0.8 - 1 [16] นั่นคือความหนืดของวัฏภาคกระจายและวัฏภาคต่อเนื่อง ควรมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะช่วยให้การผสมเข้ากันได้และการกระจายตัวของวัฏภาคดีขึ้น จากการ ทดลองนี้ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ถึงแม้ว่าจะผ่านการบดผสมยางแล้วก็ตาม คาดว่าความ หนืดของ NR ยังคงมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนืด PP MFI 3.5 และ MFI 10 กล่าวคือ PP ที่มีค่าครรชนีการไหลต่ำจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง ส่งผลให้มีความหนืดมาก ดังนั้น PP MFI 3.5 จึงน่าจะมีค่าความหนืดมากกว่า MFI 10 เป็นผลให้ PP MFI 3.5 มีความหนืดค่าใกล้เคียงกับความหนืด ของยางมากกว่า PP MFI 10 นอกจากนี้ความหนืดที่มากทำให้เกิดแรงเฉือนในระหว่างการผสม ระหว่าง NR และ PP มีค่าสูงขึ้น ทำให้ TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 มีความสามารถในการผสม เข้ากันได้ของวัฏภาคดีกว่า TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 10 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.14 แสดงสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวแตกหักของ TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 และ MFI 10 ตามลำดับ ที่มีปริมาณ DCP 0.3 phr และเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วย  $\text{OsO}_4$  ที่กำลังขยาย 40 และ 300 เท่า พบว่าวัฏภาคของ PP มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ คือมีขนาดของโดเมนที่ ขนาดใหญ่และเล็กกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของยาง และมีบางส่วนของวัฏภาค PP ที่มีการ กระจายตัวที่ดีในวัฏภาคของยางแสดงดังรูปที่ 4.14 (ข) และ 4.14 (ง)

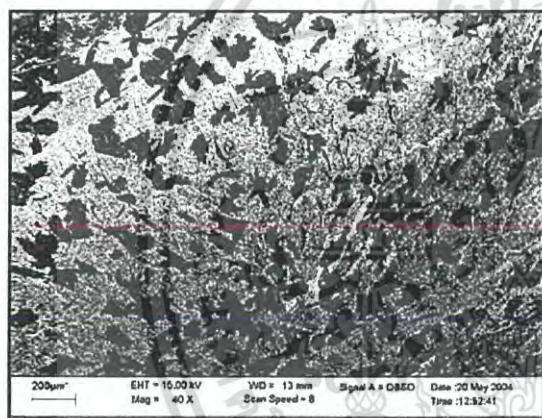
#### 4.2.3.2 การศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตร

จากรูปที่ 4.15 แสดงสัมฐานวิทยาที่พื้นผิวแตกหักของ TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 เคลือบผิวหน้าด้วย  $OsO_4$  ในสูตรของยางผสมสูตรที่มีความหนืดมุนี (ML1+4 (100°C)) เท่ากับ 21 14 และ 7 และมีปริมาณสารเชื่อม โยง (DCP) 0.3 phr ที่กำลังขบ 40 และ 300 เท่า พบว่าเมื่อความหนืดของยางผสมสูตรลดลงทำให้การกระจายตัวของ PP ในวัฏภาคของยางดีขึ้น เนื่องจาก NR มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ PP MFI 3.5 การเติมสารตัดสายโซ่และการใช้เวลาในการบดผสมยางเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ยางธรรมชาติ ส่งผลให้ค่าความหนืดของยางมีค่าลดลง ทำให้ความแตกต่างระหว่างความหนืดของ PP และ NR มีค่าน้อยลง การกระจายตัวของ PP ในวัฏภาคของยางดีขึ้น แต่พบว่ายังมีบางส่วนของวัฏภาค PP ที่เกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน แต่อย่างไรก็ตามมีขนาดเล็กลงมากเมื่อเทียบกับ TPNR ที่ยังไม่มีเติมสารตัดสายโซ่

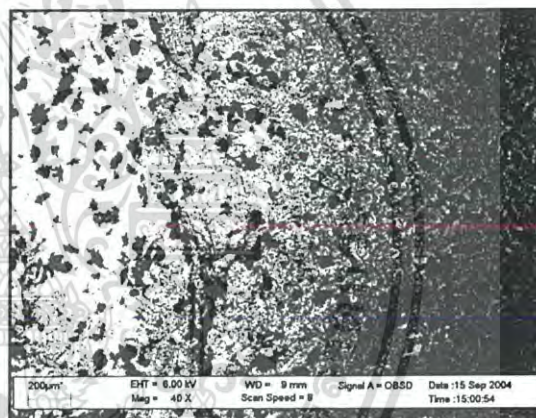




ก) TPNR / DCP 0.1 phr / MFI 3.5



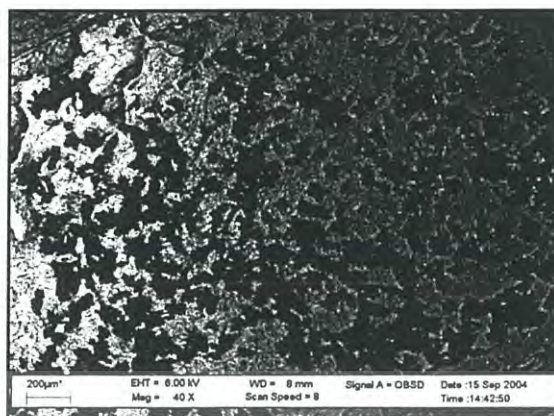
ข) TPNR / DCP 0.3 phr / MFI 3.5



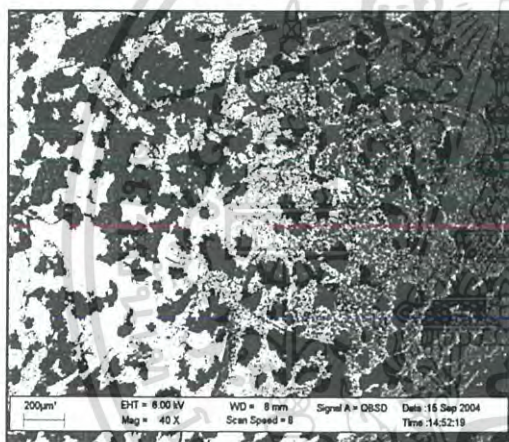
ค) TPNR / DCP 0.5 phr / MFI 3.5

รูปที่ 4.12 SEM micrographs แสดงลักษณะของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 มีปริมาณ DCP 0.1 0.3 และ 0.5 phr ตามลำดับ และที่กำลัขชาย 40 เท่า

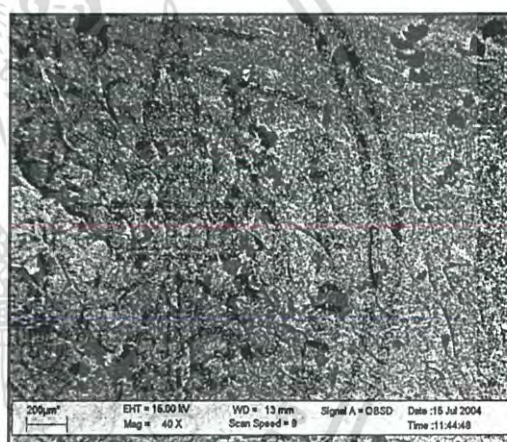
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) TPNR / DCP 0.1 phr / MFI 10



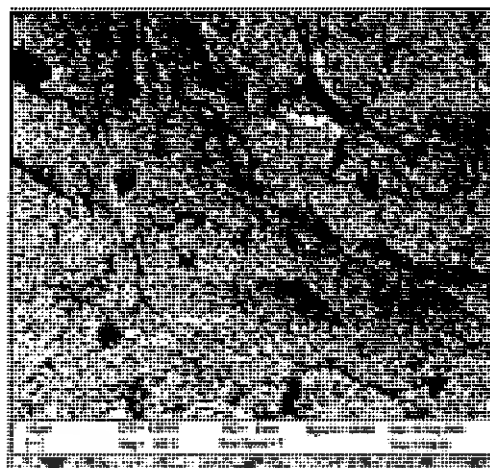
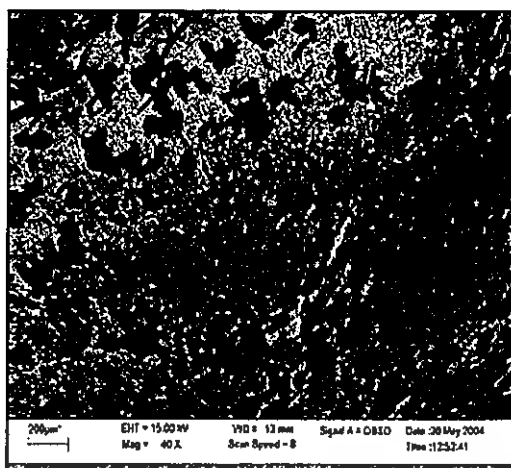
ข) TPNR / DCP 0.3 phr / MFI 10



ค) TPNR / DCP 0.5 phr / MFI 10

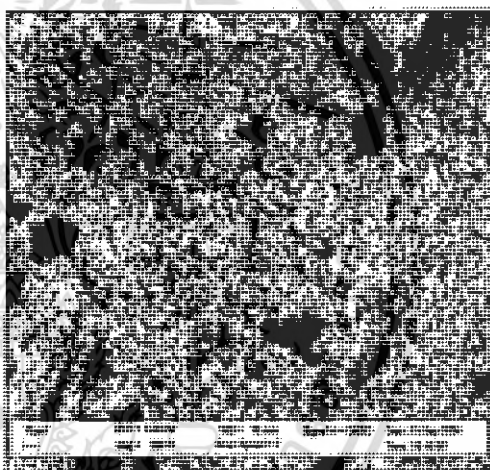
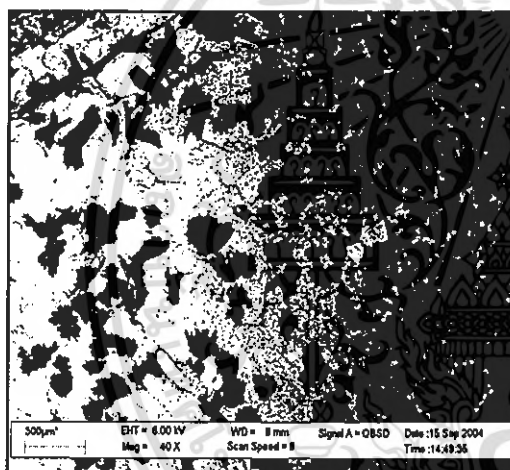
รูปที่ 4.13 SEM micrographs แสดงลักษณะฐานวิทยาของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 10 มีปริมาณ DCP 0.1 0.3 และ 0.5 phr ตามลำดับที่กำลังขยาย 40 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5 (40 เท่า)

ข) TPNR/ DCP 0.3 phr / MFI 3.5 (300 เท่า)

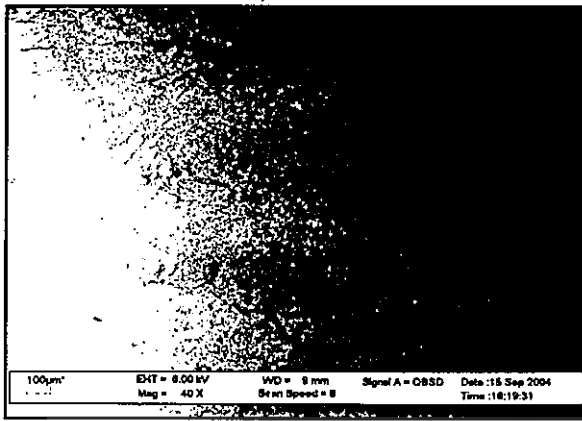


ค) TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 10 (40 เท่า)

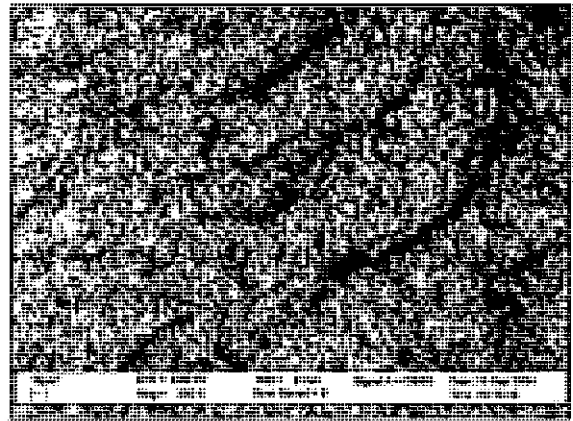
ง) TPNR/ DCP 0.3 phr / MFI 10 (300 เท่า)

รูปที่ 4.14 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 และ 10 มีปริมาณ DCP 0.3 phr ที่กำลังขยาย 40 และ 300 เท่า

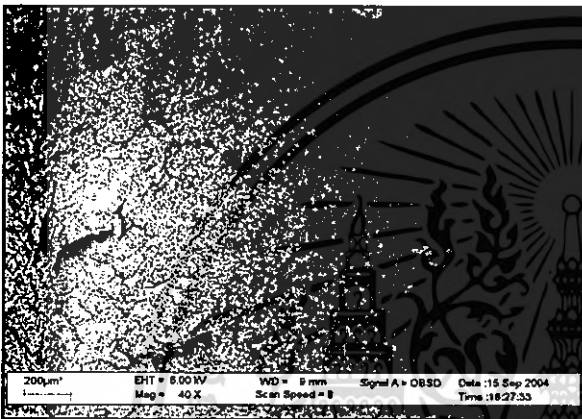
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



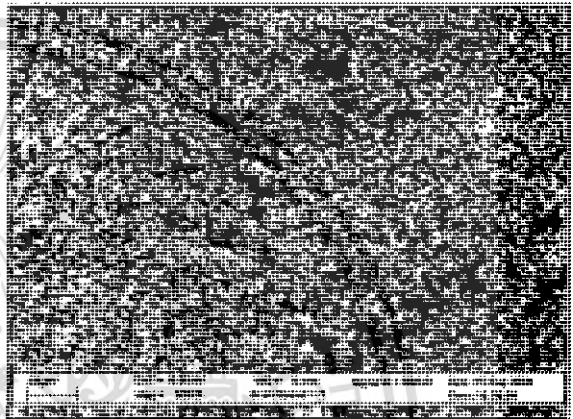
ก) Mooney 7 (40 เท่า)



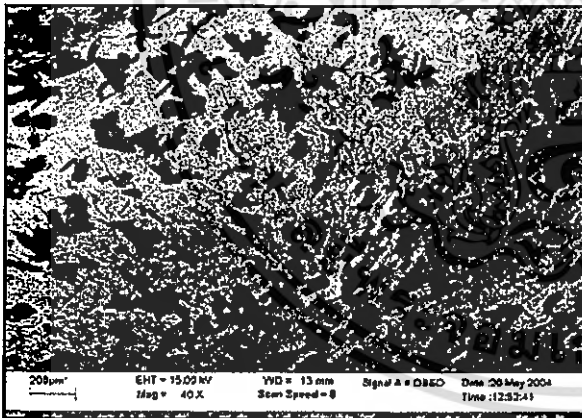
ข) Mooney 7 (300 เท่า)



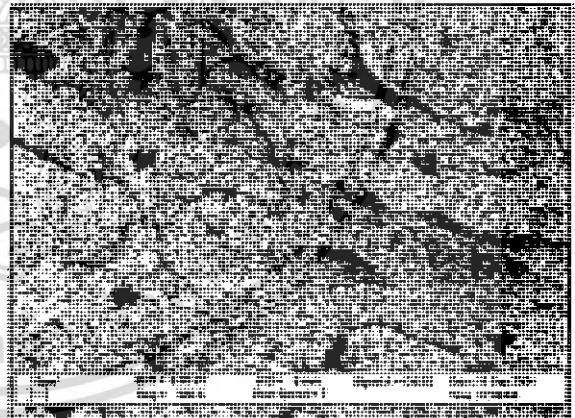
ค) Mooney 14 (40 เท่า)



ง) Mooney 14 (300 เท่า)



จ) Mooney 21/no peptizer (40 เท่า)



ฉ) Mooney 21/no peptizer (300 เท่า)

รูปที่ 4.15 SEM micrographs แสดงลักษณะ วิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP 0.3 phr MFI 3.5) ที่ยางผสมสูตรมีค่าความหนืดมุนนี้ต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 การศึกษาทางผสมสูตรที่เหมาะสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ TPNR

DSC เป็นเทคนิคหนึ่งของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน ซึ่งสามารถใช้หาอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) ทำให้สามารถทราบถึงเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของวัสดุได้

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ TPNR ด้วย DSC

สารตัวอย่าง	$T_m$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	% Crystallinity
PP (MFI 3.5)	160	132.1	67
PP (MFI 10)	155	113.2	57
TPNR/ DCP 0.1 phr/ MFI 3.5	158	49.4	63
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5	158	48.0	61
TPNR/ DCP 0.5 phr/ MFI 3.5	158	45.6	58
TPNR/ DCP 0.1 phr/ MFI 10	154	42.2	54
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 10	154	41.2	52
TPNR/ DCP 0.5 phr/ MFI 10	155	40.3	51
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ peptizer 0 phr/ mooney=21	158	48.0	61
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ peptizer 0.75 phr / mooney=14	158	46.3	59
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ peptizer 0.75 phr/ mooney=7	158	46.2	59

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 พบว่า PP MFI 3.5 มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงกว่า PP MFI 10 เนื่องจาก PP MFI 3.5 มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า มีสายโซ่พอลิเมอร์ยาว คาดว่ามีความสามารถในการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบในผลึกพอลิเมอร์ดีกว่า PP ที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้น นอกจากนี้คาดว่ายังเป็นผลเนื่องมาจาก พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้พอลิเมอร์มีหมู่ปลายสายโซ่ (Chain ends) จำนวนมาก ซึ่งสามารถขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ [29] เมื่อทำการเตรียม TPNR ที่ได้จากการผสมระหว่าง NR และ PP โดยใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของ DCP เนื่องจากการเชื่อมโยงทำให้สายโซ่ของยางเปลี่ยนจากโครงสร้างสายโซ่ตรงเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติมากขึ้น ความหนืดมีค่ามาก ทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ พอลิเมอร์จึงไม่สามารถเคลื่อนที่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเรียงเกิดเป็นผลึกได้สมบูรณ์ ทำให้ปริมาณผลึกของ PP ใน TPNR มีค่าลดลง [29] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาการเค็มสารตัดสายโซ่ลงใน TPNR ทำให้ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของวัฏภาคดีขึ้น มีการกระจายตัวของ PP ที่มีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ไม่มีการเค็มสารตัดสายโซ่ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยจะส่งผลต่อความสามารถในการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PP ไม่มากนัก ทำให้ปริมาณของสาคาความเป็นผลึกจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย

#### 4.2.5 การศึกษาทางผสมสูตรที่เหมาะสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ของ TPNR

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกล โดยเป็นการหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ซึ่งอาจหาได้จากจุดสูงสุดของพีก  $\tan \delta_{\max}$  โดยค่า  $\tan \delta_{\max}$  เป็นอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียและค่ามอดุลัสสะสม (Loss modulus/ Storage modulus,  $E''/E'$ ) ดังนั้นความแข็งแรง (Stiffness) และสมบัติการกระดอนตัวเนื่องจากการสั่นสะเทือนของวัสดุ สามารถอธิบายได้จากค่าของ  $E'$ ,  $E''$  และ  $\tan \delta_{\max}$  [32]

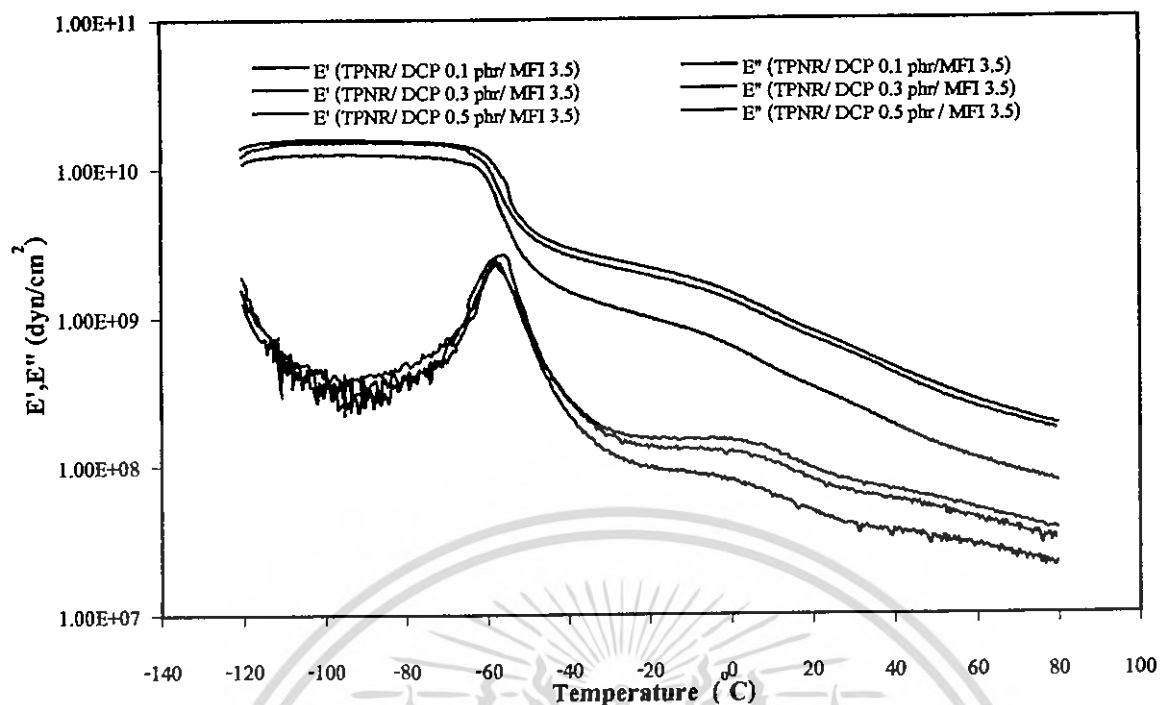
จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ของ TPNR ระหว่าง NR และ PP ที่อัตราส่วนเท่ากับ 60/40 (NR/PP) ได้ค่า  $T_g$  สองค่า ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16 ที่ ช่วงอุณหภูมิประมาณ  $-54^\circ\text{C}$  เป็น  $T_g$  ของ NR และที่อุณหภูมิ  $10 - 20^\circ\text{C}$  เป็น  $T_g$  ของ PP

จากรูปที่ 4.16 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E'$  และ  $E''$  ของ TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงต่าง ๆ กับอุณหภูมิ พบว่าค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus,  $E'$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อปริมาณของสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น โดยค่า  $\tan \delta_{\max}$  เป็นอัตราส่วนระหว่าง ค่ามอดุลัสสูญเสียและค่ามอดุลัสสะสม ( $E''/E'$ ) ทำให้ค่า  $\tan \delta_{\max}$  จึงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.16 (ข) เนื่องจากปริมาณ DCP ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางเพิ่มมากขึ้น การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง ทำให้ค่า  $T_g$  ของยางมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ การเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้ TPNR มีความสามารถในการรับแรงได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกล

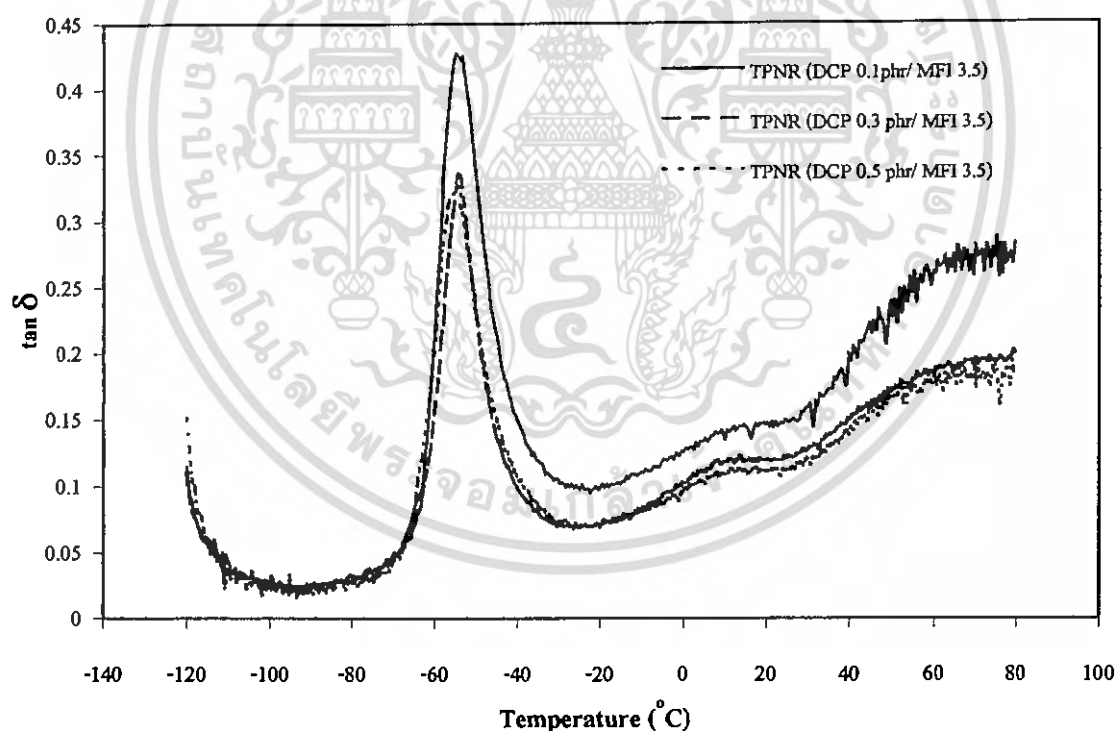
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA แสดงค่า  $T_g$  และ  $\tan \delta_{\max}$  ของยางธรรมชาติ

สารตัวอย่าง	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta_{\max}$
TPNR/ DCP 0.1 phr/ MFI-3.5	-55.3	0.43
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5	-54.5	0.33
TPNR/ DCP 0.5 phr/ MFI-3.5	-54.0	0.32
TPNR/ DCP 0.1 phr/ MFI-10	-55.9	0.43
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-10	-53.4	0.37
TPNR/ DCP 0.5 phr/ MFI-10	-53.3	0.32
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5/ peptizer 0 phr/ mooney = 21	-54.5	0.33
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5/ peptizer 0.75 phr/ mooney = 14	-54.8	0.34
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5/ peptizer 0.75 phr/ mooney = 7	-54.0	0.39

จากการศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตร พบว่าการเติมสารตัดสายโซ่และการเพิ่มเวลาในการบดข่อยยาง ทำให้ค่า  $T_g$  ของยางไม่เปลี่ยนแปลงมากนักและให้ค่ามอดูลัสสะสมลดลง ทำให้ค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากการเติมสารตัดสายโซ่และการเพิ่มเวลาในการบดข่อยยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ NR ลดลง และลดการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่ของยาง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์รับแรงได้น้อยลง สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ส่งผลให้ TPNR มีความสามารถในการถ่ายเทแรงได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกล คือทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น



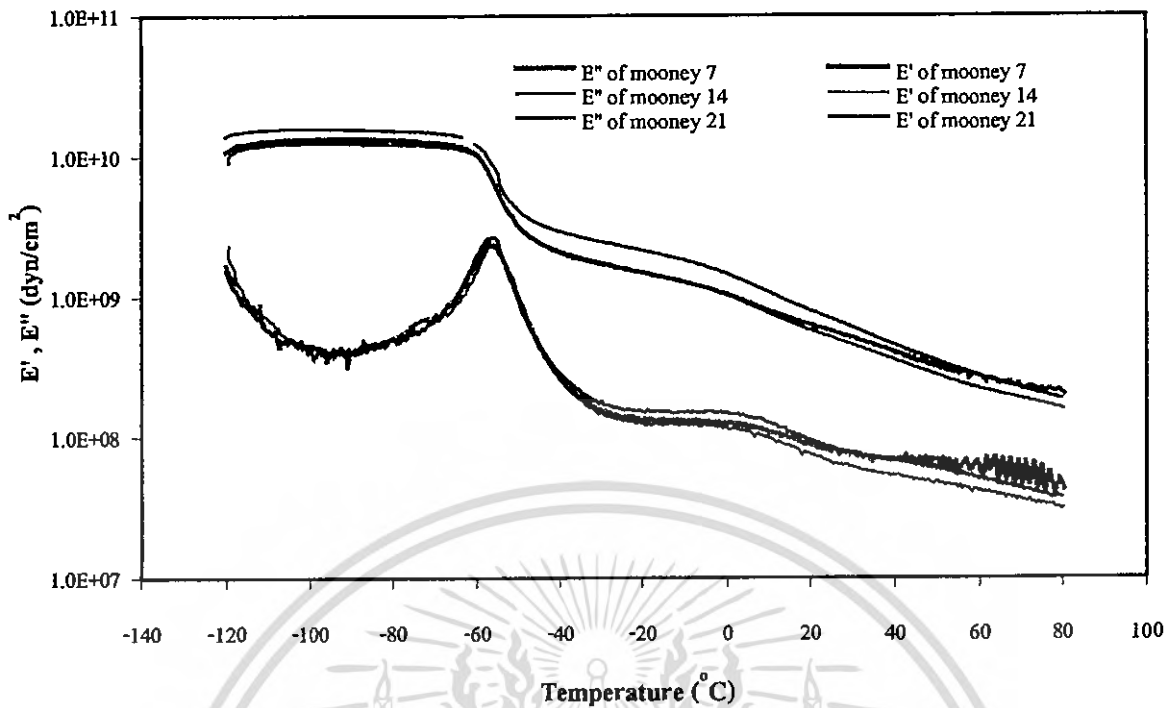
ก) ค่า  $E'$  และ  $E''$  ของ TPNR/MFI 3.5/DCP 0.1 0.3 และ 0.5 phr



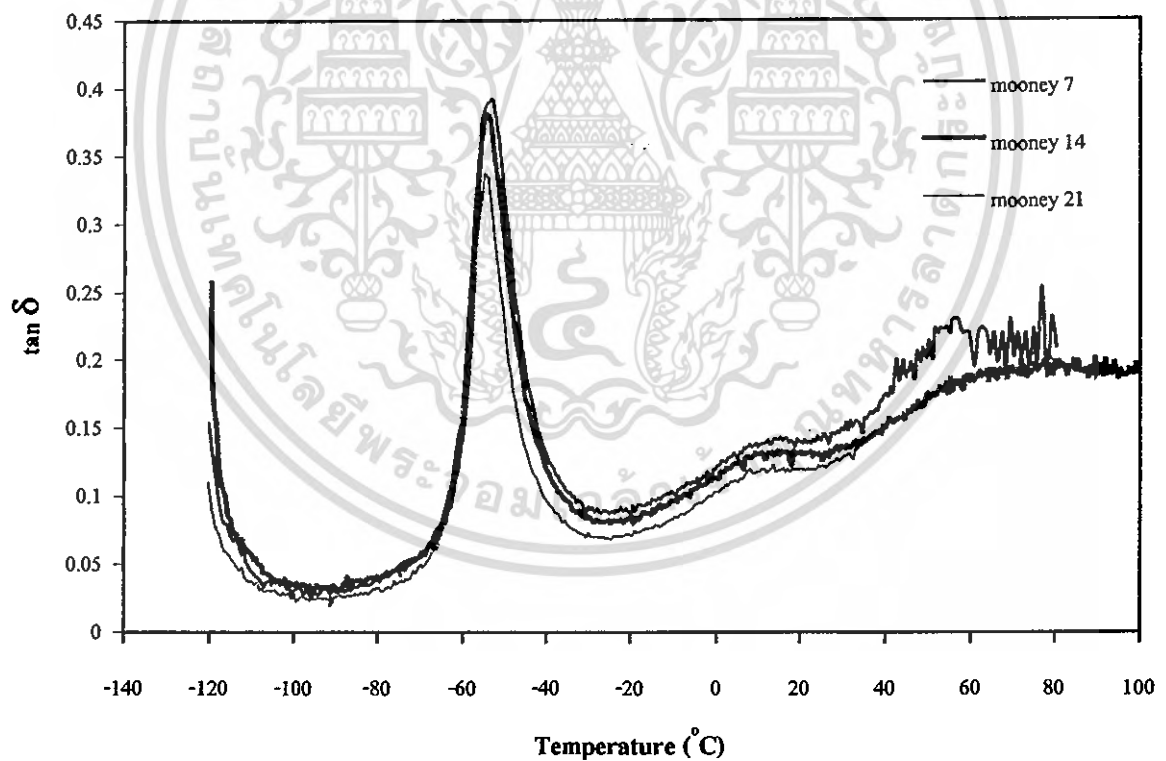
ข) ค่า  $\tan \delta$  ของ TPNR/MFI 3.5/DCP 0.1 0.3 และ 0.5 phr

รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ค่า  $E'$  และ  $E''$  ของ TPNR/ MFI 3.5 ที่ค่าความหนืดมูนนี่ของข่างต่าง ๆ



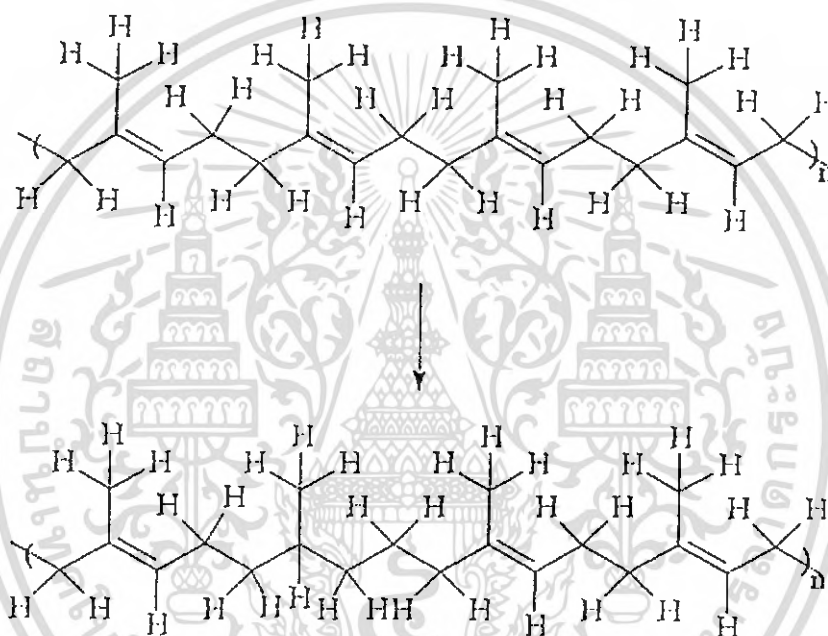
ข) ค่า  $\tan \delta$  ของ TPNR/ MFI 3.5 ที่ค่าความหนืดมูนนี่ของข่างต่าง ๆ

รูปที่ 4.17 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน MFI 3.5 ซึ่งข่างผสมสูตรที่มีค่าความหนืดมูนนี่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การศึกษาผลของสารช่วยผสม

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenated Natural Rubber, HNR) เป็นสารช่วยผสม โดยมีเปอร์เซ็นต์การเติมไฮโดรเจน (% Hydrogenation) 25 % ทำให้ยาง HNR ยังคงมีโครงสร้างที่เป็นพันธะคู่อยู่มาก ซึ่งสามารถเกิดการเกี่ยวพันได้ดีในวิภาคของยาง นอกจากนี้โครงสร้างของยาง HNR มีลักษณะคล้ายยาง เอทิลีน-พโรพิลีน (Ethylene-Propylene-Rubber, EPR) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ทำให้โครงสร้างบางส่วนของยาง HNR เหมือนกับ PP ซึ่งคาดว่าจะสามารถเกิดการเกี่ยวพันได้ดีในวิภาคของ PP อาจทำให้สมบัติการยึดติดและความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของสองวิภาคดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของ TPNR ดีขึ้น



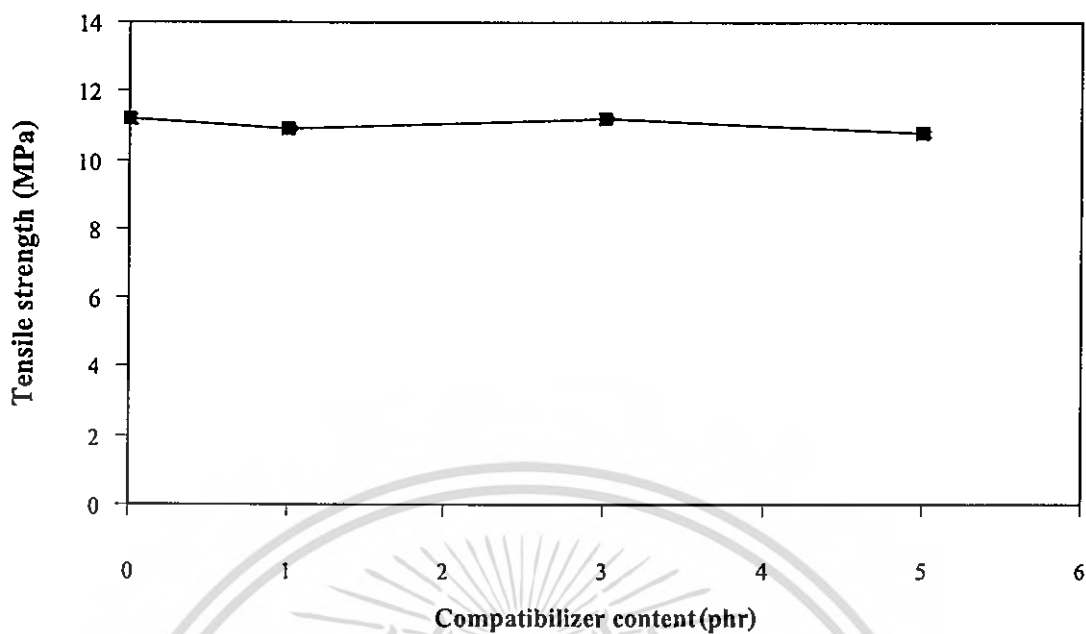
รูปที่ 4.18 โครงสร้างของยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenated Natural Rubber, HNR) [15]

การศึกษาผลของสารช่วยผสมนี้ ได้เลือก TPNR ที่ได้จากการผสมระหว่าง NR และ PP MFI 3.5 ที่อัตราส่วน 60/40 (NR/PP) โดยมีปริมาณ DCP 0.3 phr และใช้ยาง HNR เป็นสารช่วยผสม ผสมด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที โดยการหลอมเหลว PP MFI 3.5 เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นเติมยาง HNR แล้วจึงเติมยางผสมสูตรทำการผสมเป็นเวลา 3 นาที รวมเวลาในการผสม 7 นาที นำไปขึ้นรูปแล้วทดสอบสมบัติเชิงกล

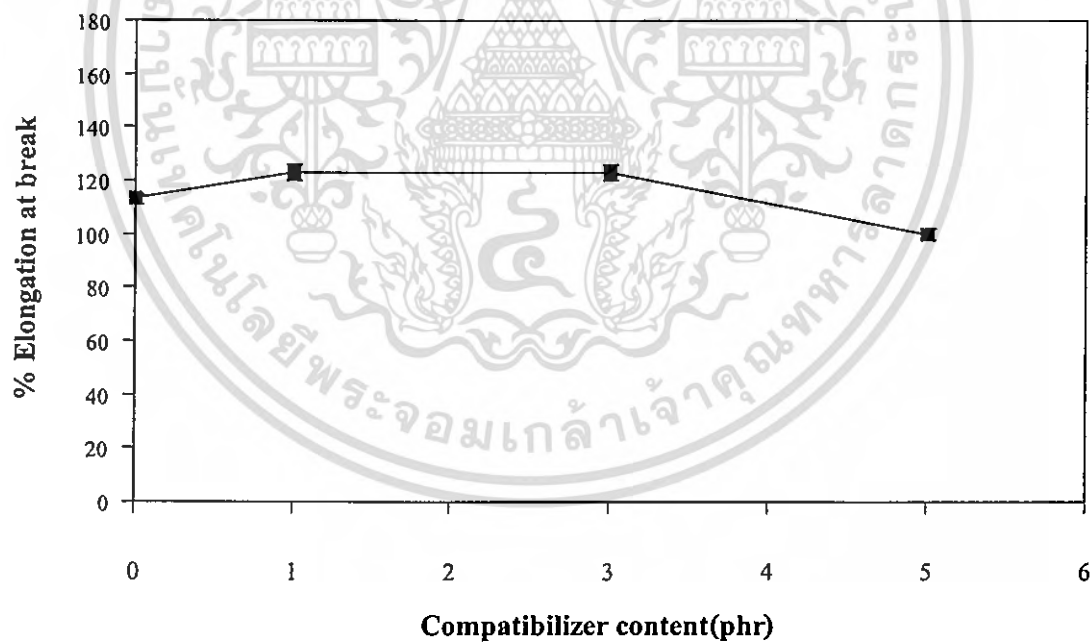
#### 4.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR จากผลของสารช่วยผสม

จากรูปที่ 4.19-4.22 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง HNR ทำให้ความแข็งแรงดึง มีค่าค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ค่าความแข็งแรง และยังมีมอดุลัส มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากการเติมยาง HNR จะเข้าไปกระจายตัวอยู่ระหว่างภูมิภาคของยางและ PP ทำให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับภูมิภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ทำให้การผสมเข้ากันได้ระหว่าง NR และ PP ดีขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากสมบัติของยาง HNR ที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง ทำให้ TPNR มีค่าความแข็งแรงลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณยาง HNR ที่ 5 phr พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงมากและน้อยกว่าสูตรไม่เติมสารช่วยผสม เนื่องจากสารช่วยผสมส่วนใหญ่จะกระจายตัวอยู่ระหว่างภูมิภาค (Interphase) ของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อปริมาณสารช่วยผสมที่มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถกระจายตัวอยู่ระหว่างภูมิภาคยางและพลาสติกได้ กลายเป็นพอลิเมอร์ผสมสามชนิด (Ternary blend) และแยกภูมิภาคกัน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง



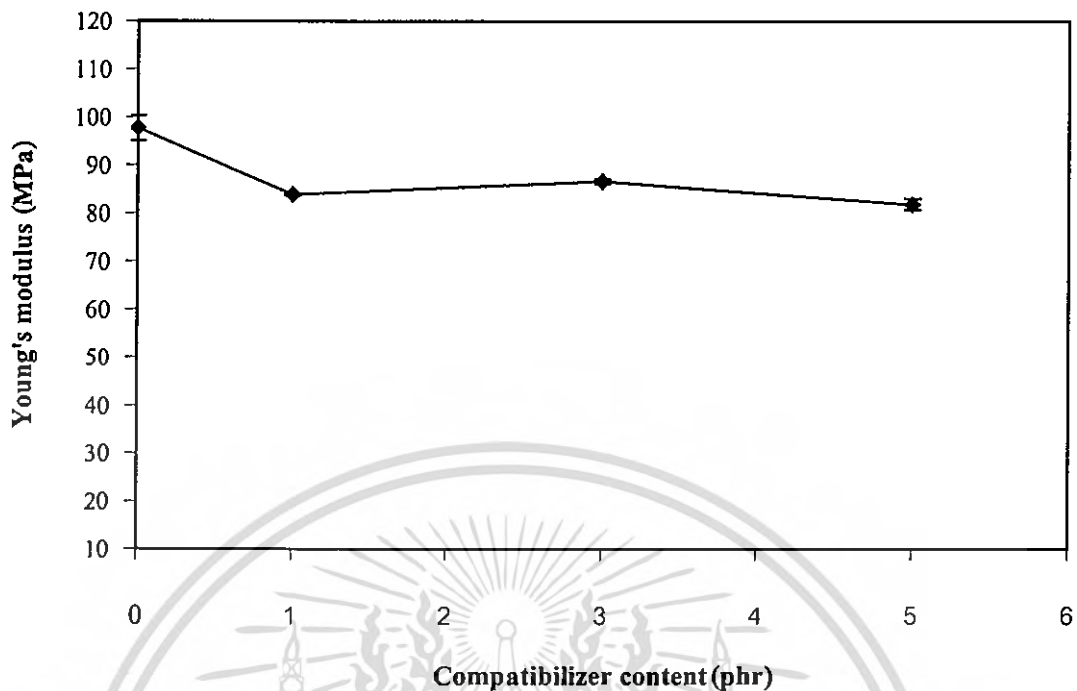


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณของ HNR

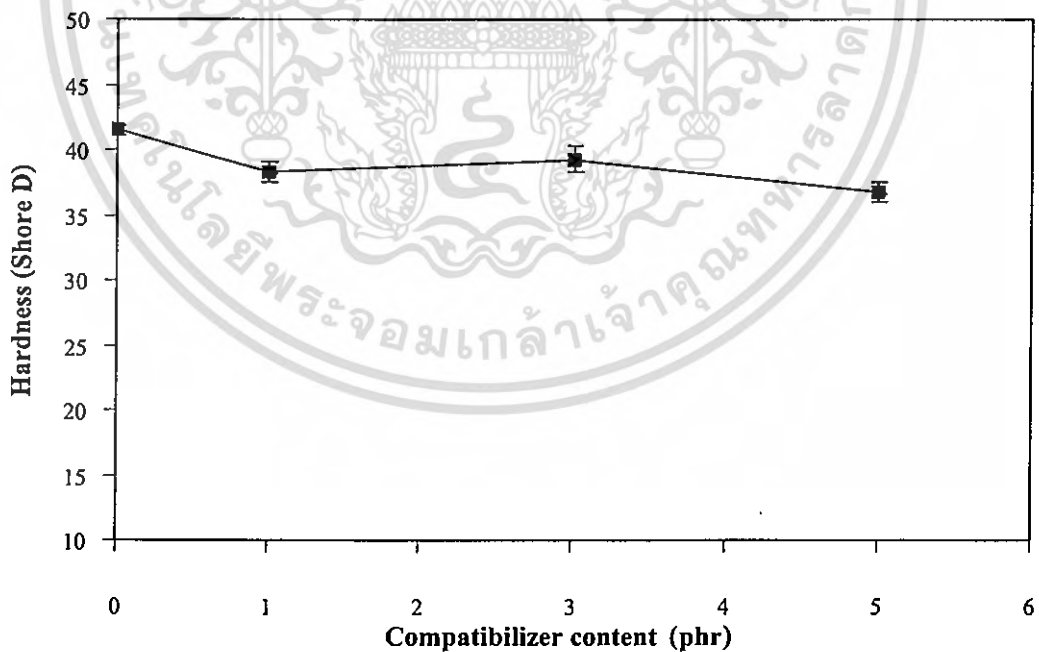


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับปริมาณของ HNR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การยึด 100 % ของ TPNR กับ ปริมาณยาง HNR



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณยาง HNR

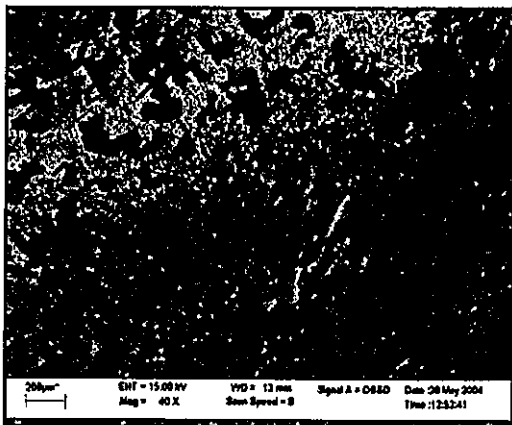
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR จากผลของสารช่วยผสม

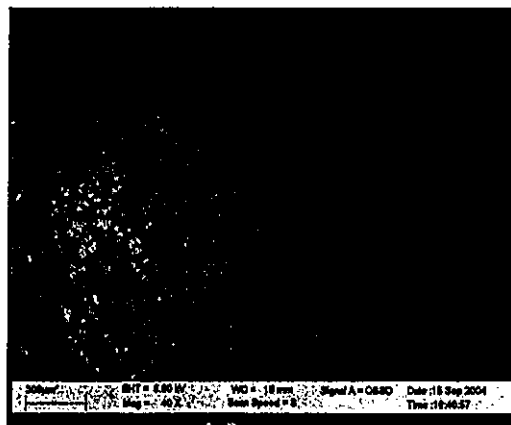
การศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เพื่อศึกษาผลของสารช่วยผสม (HNR) โดยทำการเคลือบชิ้นงานที่ผ่านการแตกหักที่อุณหภูมิค่าด้วย  $O_2O_4$  และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR

จากรูปที่ 4.23 แสดงสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวแตกหักของ TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 มีปริมาณสารช่วยผสม (HNR) 0 1 3 และ 5 phr ที่กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าภูมิภาค PP (สีดำ) มีการกระจายตัวอยู่ในภูมิภาคของยาง (สีขาว) โดยมีขนาดเล็กลงมาก เมื่อเทียบกับ TPNR ที่ไม่มีการเติม HNR ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 (จ) ซึ่งแสดงสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวแตกหักของ TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr กำลังขยาย 300 เท่า พบว่าขนาดของภูมิภาค PP มีขนาดเล็ก เนื่องจาก HNR กระจายตัวและเกี่ยวพันอยู่ระหว่างภูมิภาค ส่งผลให้ลดแรงดึงพื้นผิว (Interfacial tension) ระหว่างภูมิภาค ทำให้การกระจายตัวของภูมิภาค PP ดีขึ้น ทำให้มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม





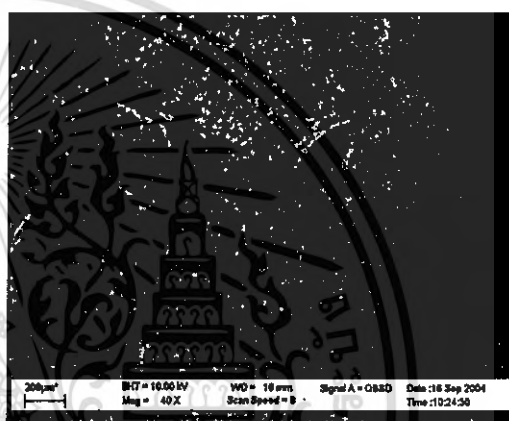
ก) no compatibilizer(40 เท่า)



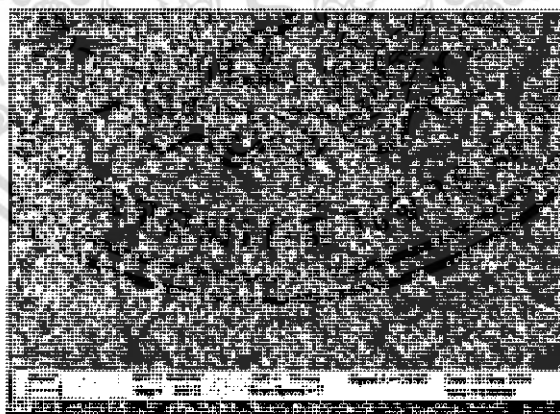
ข) compatibilizer 1 phr (40 เท่า)



ค) compatibilizer 3 phr (40 เท่า)



ง) compatibilizer 5 phr (40 เท่า)



จ) compatibilizer 3 phr (300 เท่า)

รูปที่ 4.23 SEM micrographs แสดงลักษณะฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 ,DCP 0.3 phr, MFI 3.5) ที่มีและไม่มีสารเติมสารช่วยผสม (HNR) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การศึกษาผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ TPNR การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยการหาอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) ซึ่งสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของวัสดุได้

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสมจากเครื่อง DSC

สารตัวอย่าง	$T_m$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	% Crystallinity
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5	158	48.0	61
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 1 phr	158	47.9	61
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 3 phr	158	46.1	58
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 5 phr	158	43.7	55

จากผลการทดลองตารางที่ 4.5 พบว่า TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสม (HNR) มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิพรอพิลีน ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักที่ปริมาณ HNR 1 และ 3 phr แต่เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจะลดลงเมื่อปริมาณของ HNR มากขึ้น เนื่องจากคาดว่าของ HNR เข้าไปกระจายตัวอยู่ระหว่างวัฏภาคของ NR และ PP ทำให้มีความเข้ากันได้ของ PP และ NR ดีขึ้น แต่ปริมาณของ HNR ที่มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถกระจายตัวอยู่ระหว่างวัฏภาคยางและพลาสติกได้ กลายเป็นพอลิเมอร์ผสมสามชนิด และแยกวัฏภาคกัน ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้พอลิพรอพิลีนมีโอกาสการจัดเรียงตัวได้ยากขึ้น การเกิดผลึกจึงมีค่าลดลง

#### 4.3.4 การศึกษาผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ของ TPNR

การศึกษาศมบัติทางความร้อนด้วย DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer) เพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta_{max}$  ของยาง

จากรูปที่ 4.24 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E'$  และ  $E''$  ของ TPNR ที่ปริมาณสารช่วยผสม (HNR) ต่าง ๆ กับอุณหภูมิ พบว่าค่ามอดุลัสสะสมและมอดุลัสสูญเสียมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมของ HNR และพบว่าค่า  $\tan \delta_{max}$  ของยางมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ HNR ดังรูปที่ 4.24 (ข) เนื่องจากโครงสร้างของยาง HNR มีลักษณะคล้ายยางธรรมชาติและมีสมบัติยืดหยุ่น คาดว่าการเพิ่มปริมาณของ HNR ทำให้เพิ่มสัดส่วนของวัฏภาคยางเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า  $\tan \delta_{max}$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6

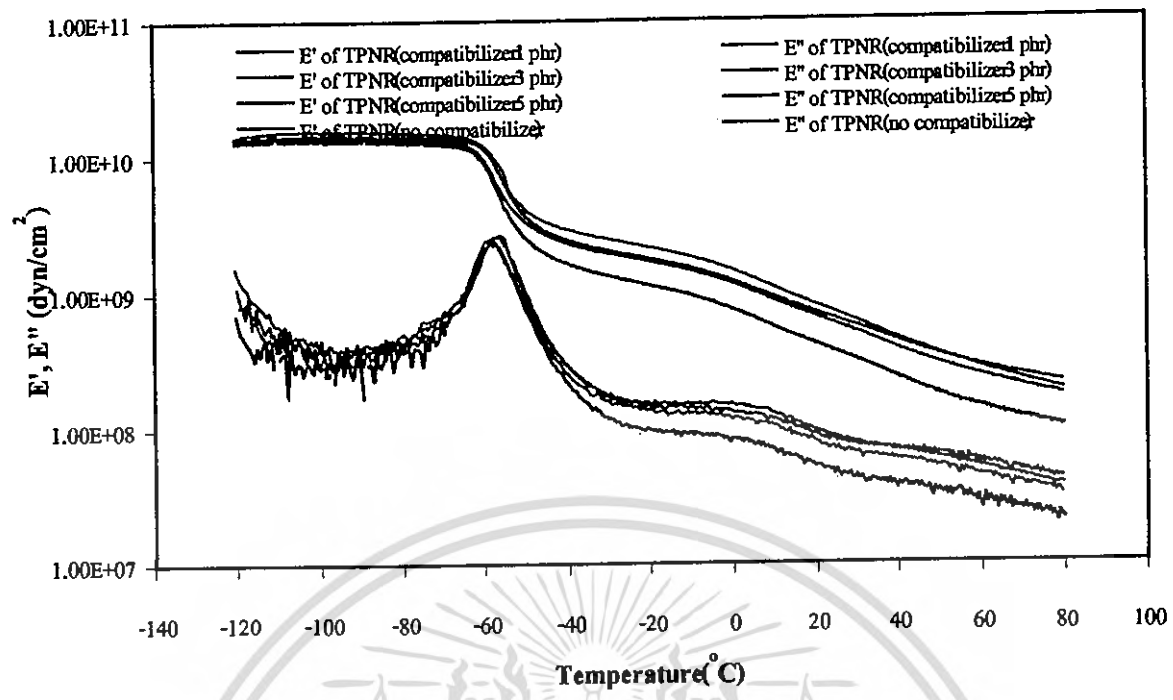
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA แสดงค่า  $T_g$  และ  $\tan \delta_{max}$  ของยางธรรมชาติ ในการศึกษา TPNR ที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสม

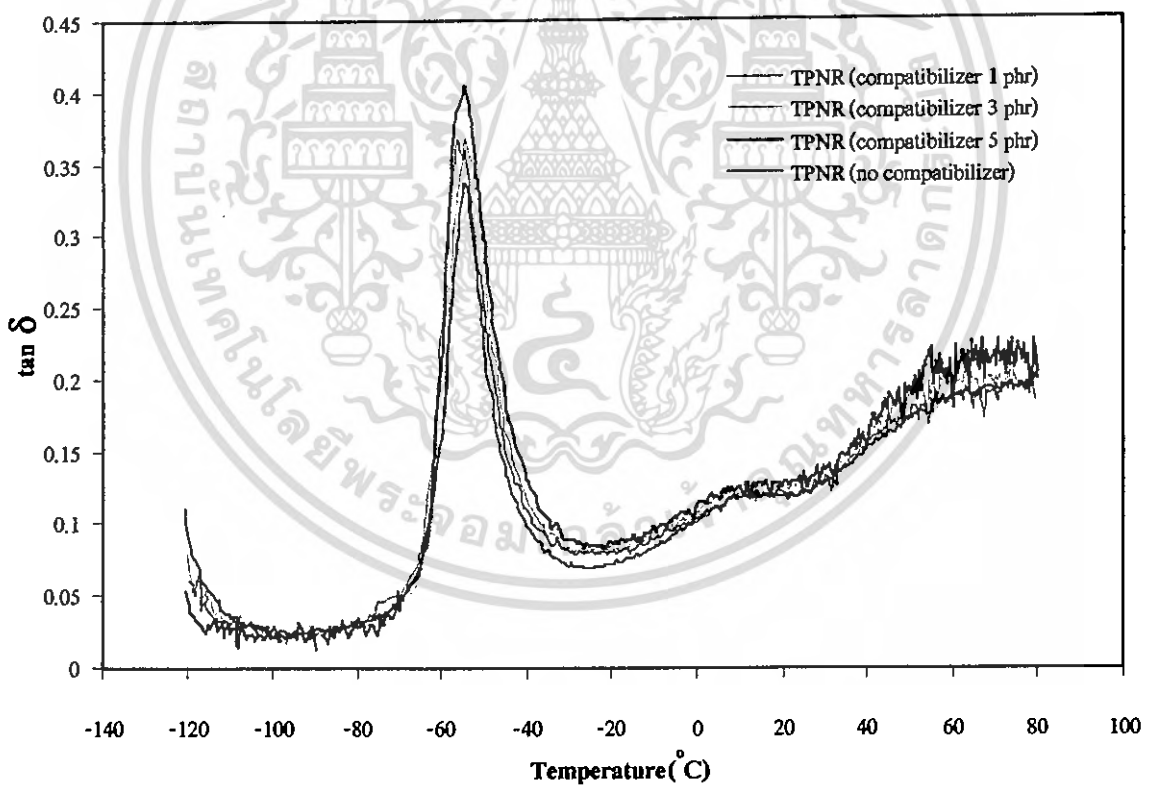
สารตัวอย่าง	$T_g$ (°C)	$\tan \delta_{max}$
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5	-54.5	0.33
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 1 phr	-54.6	0.36
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 3 phr	-54.5	0.37
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 5 phr	-54.6	0.40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ค่า E' และ E'' ของ TPNR/ MFI 3.5/ compatibilizer ที่ปริมาณ 0-5 phr



ข) ค่า tan delta ของ TPNR/ MFI 3.5/ compatibilizer ที่ปริมาณ 0-5 phr

รูปที่ 4.24 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR (MFI ของพอลิพรอพิลีนเท่ากับ 3.5 กรัม/10นาที่) ที่ไม่มีและมีการเติมสารช่วยผสม (HNR) 0-5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การศึกษาผลของการรีไซเคิล TPNR

การศึกษาผลของการรีไซเคิล TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 มีปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) 0.3 phr โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสม (HNR 3 phr) และสูตรที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม นำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ (Recycle) โดยการนำ TPNR ที่ผ่านการขึ้นรูปครั้งแรก นำมาบดด้วยเครื่องบด (Grinder) และนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่อีก 2 ครั้ง

##### 4.4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล

จากรูปที่ 4.25-4.28 แสดงสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งกมมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 10%) ในขณะที่ค่าขึงมอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจาก TPNR ได้รับความร้อนและแรงเฉือนในขณะที่ขึ้นรูป ทำให้การกระจายตัวและการผสมระหว่างสองวัฏภาคดีขึ้น ทำให้เพิ่มการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค นอกจากนี้ความร้อนและแรงเฉือนทำให้โครงสร้างร่างแหสามมิติของสายโซ่ขางบางส่วนขาดและสั้นลง ทำให้เมื่อได้รับแรงจากภายนอกสายโซ่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายแรงได้ดีขึ้น สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและปัดออกได้มากขึ้นก่อนที่จะเกิดการขาดอย่างฉับพลัน จากเหตุผลทั้งสองดังกล่าวทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาผลของสารช่วยผสมที่มีผลต่อการรีไซเคิล พบว่า TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสม เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากคาดว่าขาง HNR ที่ไปกระจายตัวระหว่างวัฏภาคช่วยลดแรงดึงพื้นผิวระหว่างวัฏภาค ทำให้มีความเสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูปอีกทั้งช่วยลดการรวมตัว (Coalescence) ของวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ทำให้มีการกระจายตัวของวัฏภาค PP ที่ดี [14] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาชั้นฐานวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้คาดว่า การได้รับความร้อนและแรงเฉือนในขณะที่ขึ้นรูป อาจทำให้ขาง HNR กระจายตัวและเกิดการเกี่ยวพันกับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสมได้ดียิ่งขึ้น

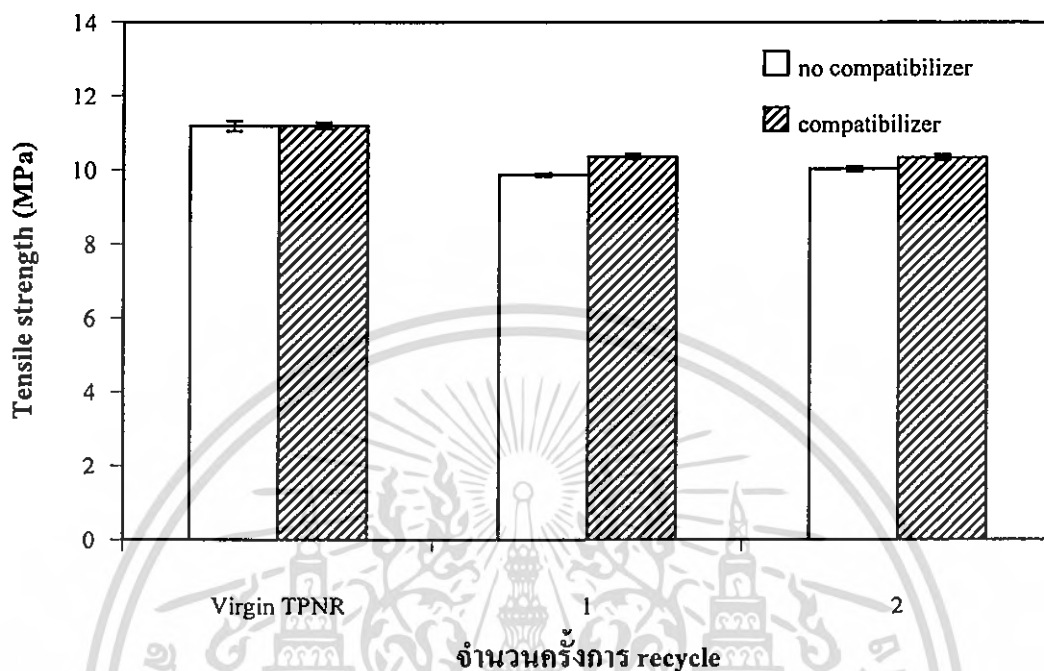
##### 4.4.2 การศึกษาชั้นฐานวิทยาศาสตร์ของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล

การศึกษาชั้นฐานวิทยาศาสตร์ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพื่อศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ของ TPNR โดยทำการเคลือบชิ้นงานที่ผ่านการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำด้วย  $\text{OsO}_4$  และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการศึกษาชั้นฐานวิทยาศาสตร์ของ TPNR

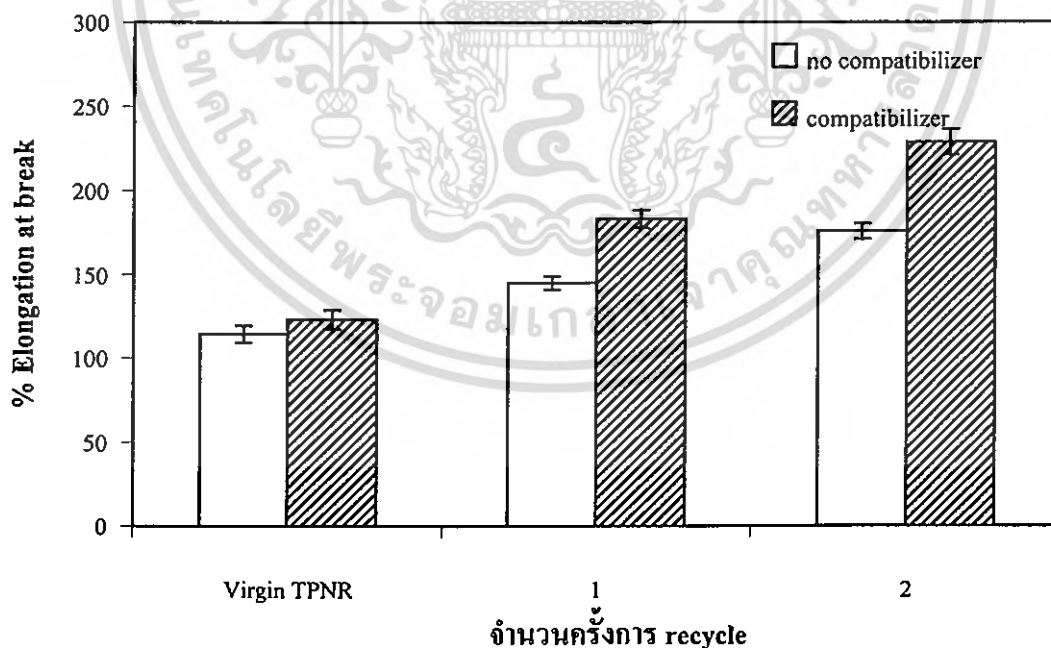
จากรูปที่ 4.29 แสดงชั้นฐานวิทยาศาสตร์ของ TPNR ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล โดย TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 มีปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) 0.3 phr ที่มีการเติมขาง HNR และสูตรที่ไม่มีการเติมขาง HNR กำลังขยาย 300 เท่า พบว่าขนาดของวัฏภาค PP มีขนาดเล็กลงและมีการกระจายตัวในวัฏภาคของขางดีขึ้นเมื่อผ่านการรีไซเคิล เนื่องจากการได้รับความร้อนและแรงเฉือนทำให้การกระจายตัวของวัฏภาคดีขึ้น เมื่อพิจารณา TPNR ที่มีการเติมขาง HNR และผ่านการรีไซเคิล พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุภาค PP มีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากยาง HNR ช่วยให้การกระจายตัวของวัสดุภาค PP ดีขึ้นและมีความเสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

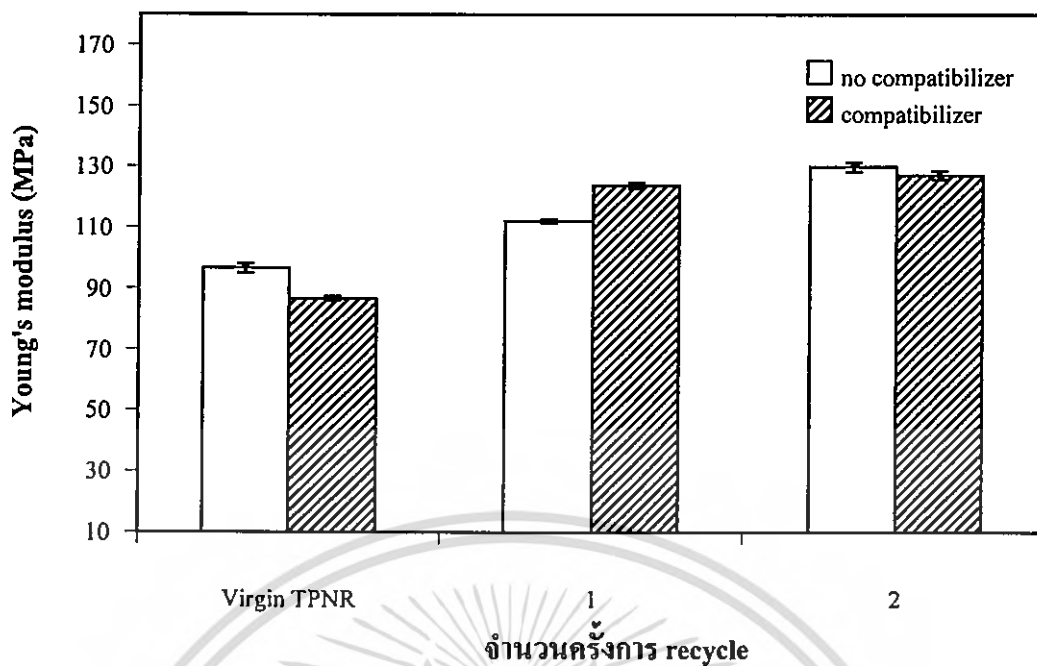


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล

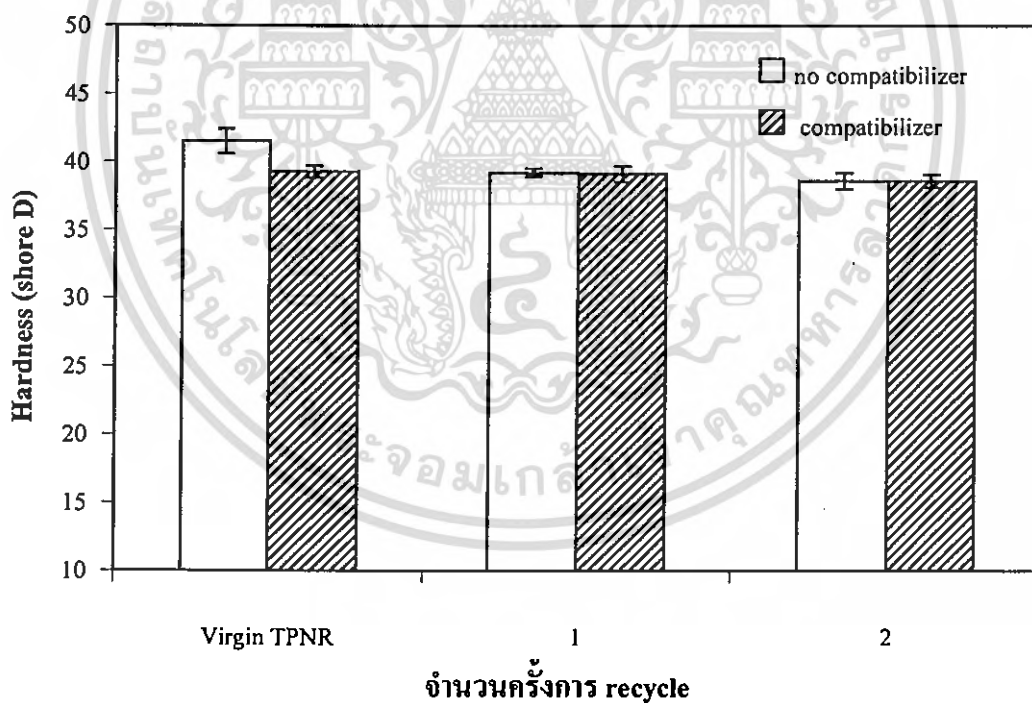


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

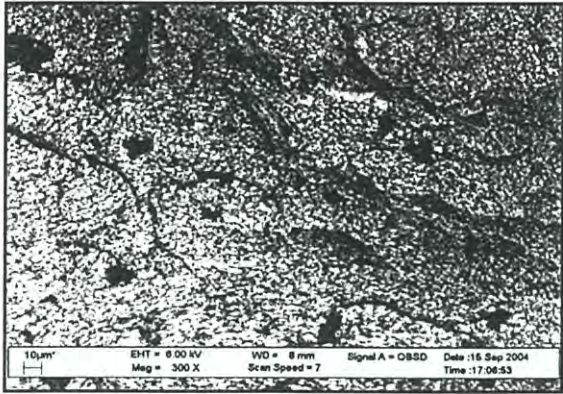


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่เปอร์เซ็นต์การยืด 100% ของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล

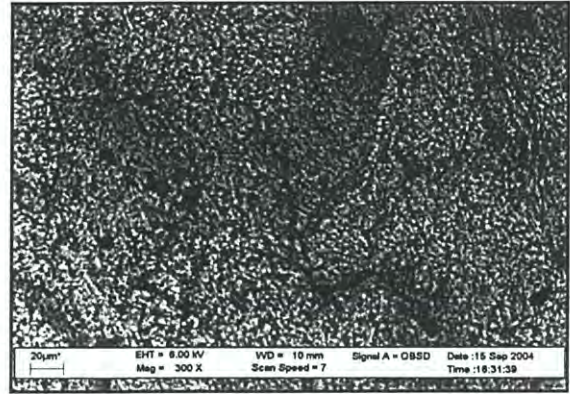


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล

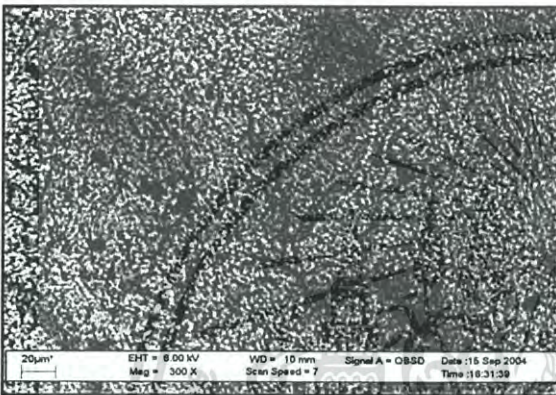
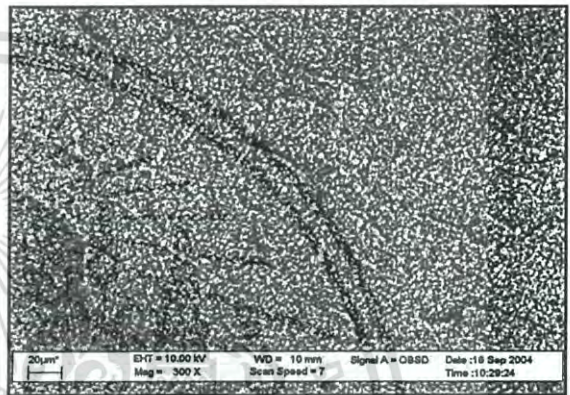
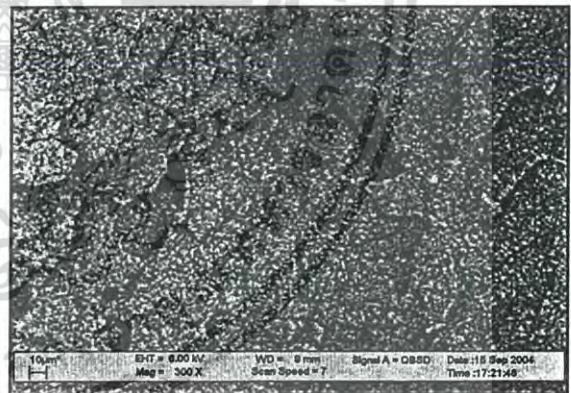
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) TPNR



ง) TPNR/ compatibilizer 3 phr

ข) 1<sup>st</sup> recycled TPNRจ) 1<sup>st</sup> recycled TPNR/ compatibilizer 3 phrค) 2<sup>nd</sup> recycled TPNRฉ) 2<sup>nd</sup> recycled TPNR/ compatibilizer 3 phr

รูปที่ 4.29 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP=0.3 phr MFI 3.5) ที่มีและไม่มีสารเติมสารช่วยผสม ที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่ กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 การศึกษาผลการรีไซเคิลต่อสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ TPNR

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

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิลจากเครื่อง DSC

สารตัวอย่าง	$T_m$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	% Crystallinity
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5	158	48.0	61
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5 (1 <sup>st</sup> Recycled)	158	47.7	61
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5 (2 <sup>nd</sup> Recycled)	158	46.0	58
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 3 phr	158	46.1	59
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 3 phr (1 <sup>st</sup> Recycled)	159	46.9	59
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ compatibilizer 3 phr (2 <sup>nd</sup> Recycled)	158	46.4	59

ผลจากการนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิล พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงเมื่อผ่านการรีไซเคิลมากขึ้น เนื่องจากการได้รับความร้อนและแรงเฉือน ทำให้สายโซ่ PP เกิดการกระจายตัวในวัฏภาคของยางได้ดีขึ้น สายโซ่ PP จึงมีโอกาสนในการจัดเรียงตัวได้น้อยลง ทำให้เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกลดลง แต่เมื่อพิจารณา TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสมและผ่านการรีไซเคิล พบว่าให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกไม่แตกต่างกัน เนื่องจากสารช่วยผสมช่วยให้การกระจายตัวของวัฏภาค PP และมีความเสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูปคืออยู่แล้ว ทำให้ไม่ส่งผลต่อค่าองศาความเป็นผลึก

#### 4.4.4 การศึกษาผลการรีไซเคิลต่อสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA ของ TPNR

การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA เพื่อศึกษา TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล โดยการหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta_{max}$  ของยาง และ PP

จากผลการทดลองตารางที่ 4.8 แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta_{max}$  ของ TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล โดยทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA รุ่น GABO บริษัท Eplexor 25N ที่ความถี่ 10 Hz อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส/นาที พบว่าค่า  $T_g$  ของยางและ PP เคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น เนื่องจากการผสมเข้ากันได้ของวัฏภาคที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.29 ทำให้การยึดติดระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิฤภาคของยางและ PP มากขึ้น สายโซ่จึงเคลื่อนที่ได้น้อยลง ส่งผลให้ค่า  $T_g$  ของยางมีค่าสูงขึ้น ส่วนค่า  $T_g$  ของ PP มีค่าลดลง เนื่องจากการกระจายตัวของ PP ในวิฤภาคของยางเกิดได้ดี ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PP มีการจัดเรียงตัวกันได้ยากขึ้น การเกิดผลึกจึงมีค่าลดลง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PP สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นและให้ค่า  $T_g$  ของ PP มีค่าลดลง [31]

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วย DMTA แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางธรรมชาติ และพอลิพรอพิลีน จากการศึกษา TPNR ที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่

สารตัวอย่าง	ยางธรรมชาติ		พอลิพรอพิลีน	
	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta_{\max}$	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta_{\max}$
TPNR / DCP 0.3 phr/ MFI-3.5 (virgin)	-51.7	0.29	21.5	0.10
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5 (2 <sup>nd</sup> recycled)	-48.0	0.33	18.5	0.12
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5/ HNR 3 phr (virgin)	-50.3	0.29	16.8	0.11
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI-3.5/ HNR 3 phr (2 <sup>nd</sup> recycled)	-49.3	0.30	17.9	0.13

เมื่อพิจารณาผลของสารช่วยผสม (HNR) 3 phr พบว่าเติมยาง HNR ทำให้  $T_g$  ของยางและ PP เคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น โดย  $T_g$  ของยางมีค่าสูงขึ้นในขณะที่  $T_g$  ของ PP มีค่าลดลง เนื่องจากคาดว่ายาง HNR เข้าไปกระจายตัวและเกิดการเกี่ยวพันกับวิฤภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ทำให้การผสมเข้ากันได้และสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวิฤภาคดีขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ TPNR มีสถานะวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการรีไซเคิลทำให้ TPNR มีค่า  $T_g$  ของยางและ PP ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมและผ่านการรีไซเคิล

## 4.5 การศึกษาเวลาในการผสมและการใช้ของเครื่องผสมต่างกัน

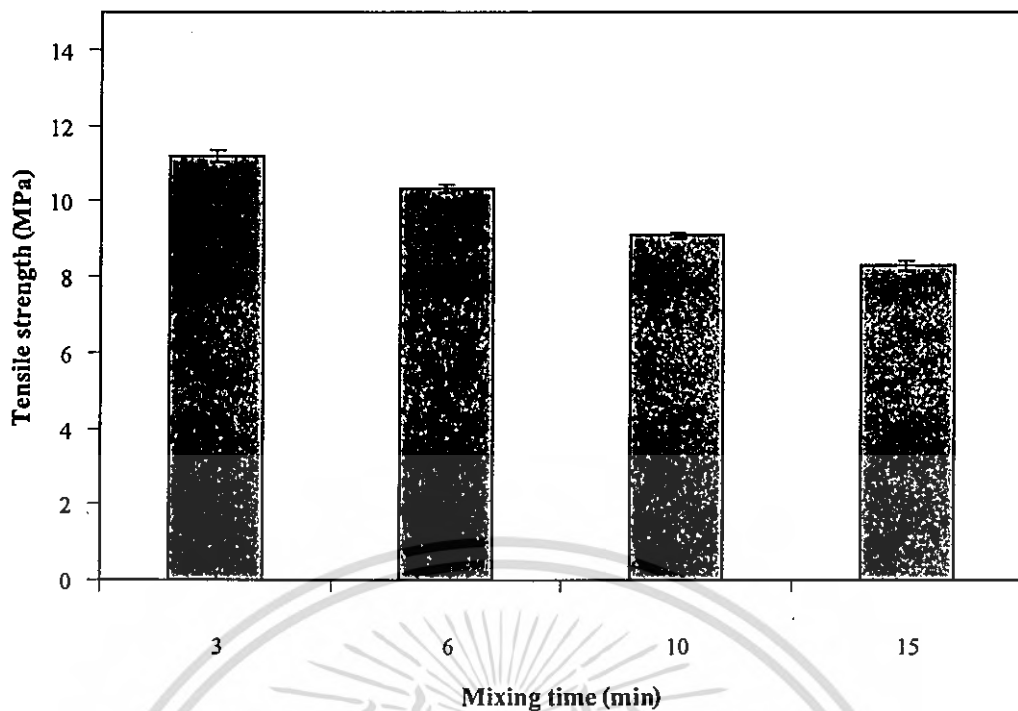
จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า ลักษณะพื้นฐานวิทยาของ TPNR มีการกระจายตัวของ ภูมิภาคกระจาย (PP) ที่ไม่สม่ำเสมอและมีโดเมนที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ TPNR มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการผสมระหว่าง NR และ PP รวมถึงการศึกษาการใช้เครื่องผสมบราเวนเคอร์พลาสติคอร์เคอร์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่

### 4.5.1 การศึกษาผลของเวลาในการผสม TPNR

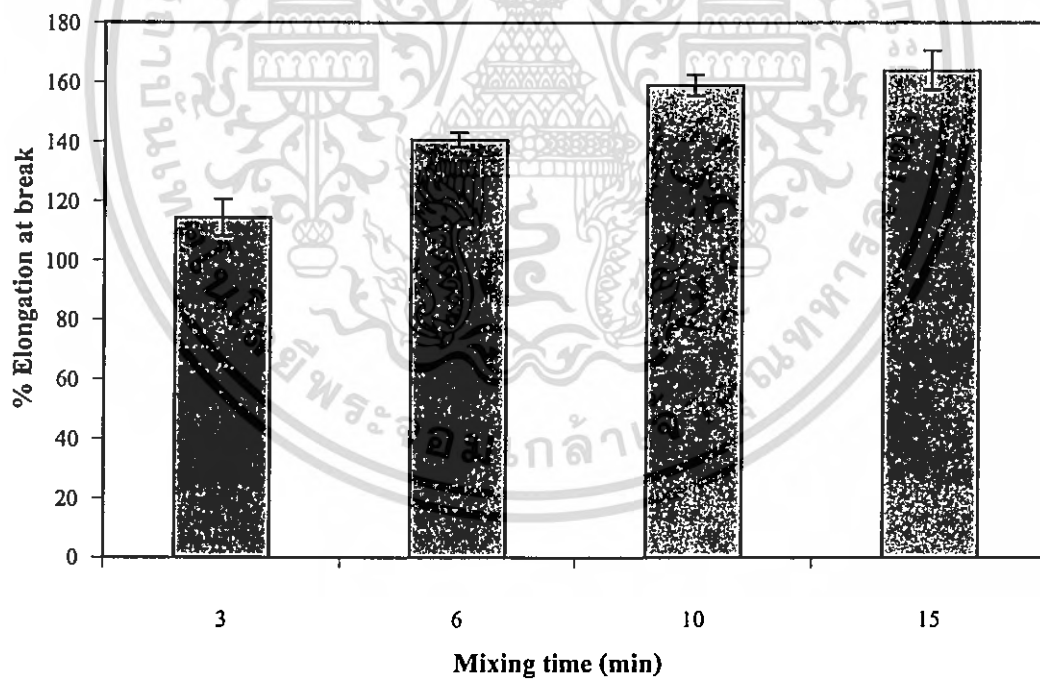
การศึกษาผลของเวลาในการผสมระหว่าง NR และ PP ได้เลือกศึกษาจาก TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 มีปริมาณสารเชื่อม โยง (DCP) 0.3 phr ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบสกรู 50 รอบต่อนาที โดยทำการหลอมเหลว PP ในเครื่องบราเวนเคอร์พลาสติคอร์เคอร์เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นทำการผสมขงกับ PP ที่เวลาผสมต่าง ๆ ที่ 3 6 10 และ 15 นาที

#### 4.5.1.1 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อสมบัติเชิงกลของ TPNR

จากรูป 4.30-4.33 แสดงสมบัติเชิงกลของ TPNR กับเวลาในการผสมต่าง ๆ (3 6 10 และ 15 นาที) พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ย้มนอคูลัส และความแข็งกด มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแรงเค้นเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นจากความเร็วของโรเตอร์ คาดว่าทำให้สายโซ่โครงสร้างร่างแหสามมิติของยางธรรมชาติบางส่วนขาดและสั้นลง ส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง ทำให้สมบัติเชิงกลดังกล่าวลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การบิด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเค้นเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นจากความเร็วของโรเตอร์ทำให้การผสมเข้ากันได้ของยางและ PP ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น [23] ทำให้เพิ่มการยึดติดระหว่างภูมิภาคดีขึ้น และเนื่องจากการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์บางส่วนนั้น ทำให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและยึดออกได้มากขึ้นก่อนที่จะเกิดการเสียสภาพอย่างถาวร จากเหตุผลทั้งสองดังกล่าวให้ค่าเปอร์เซ็นต์การบิด ณ จุดขาดมีค่ามากขึ้น

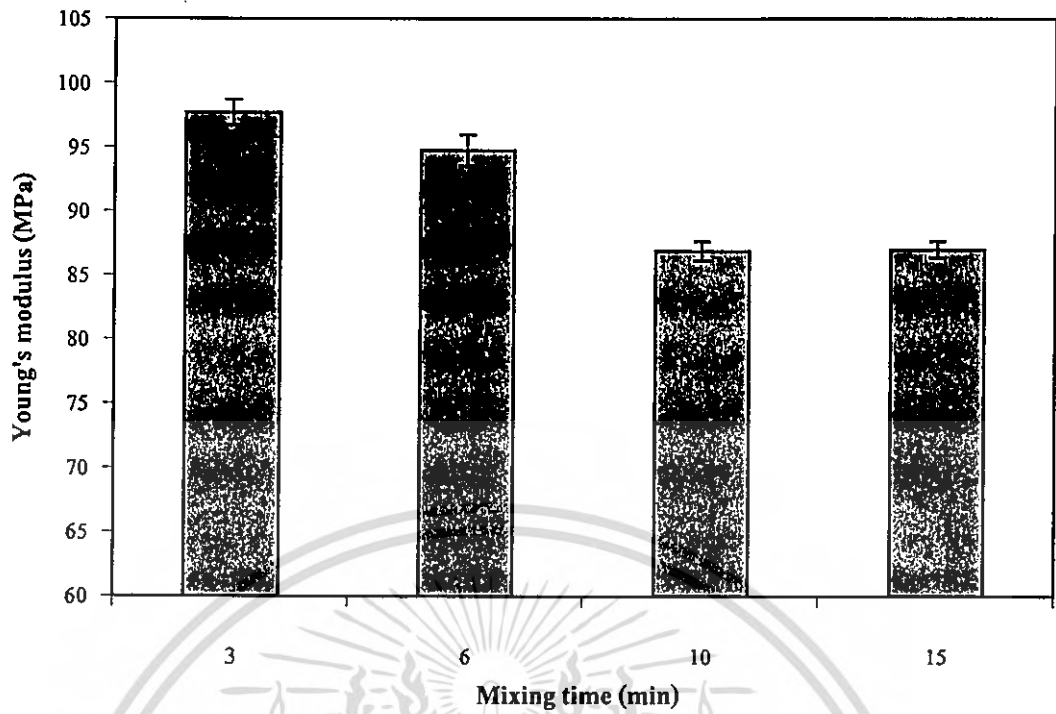


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR ที่เวลาการผสมต่าง ๆ กัน

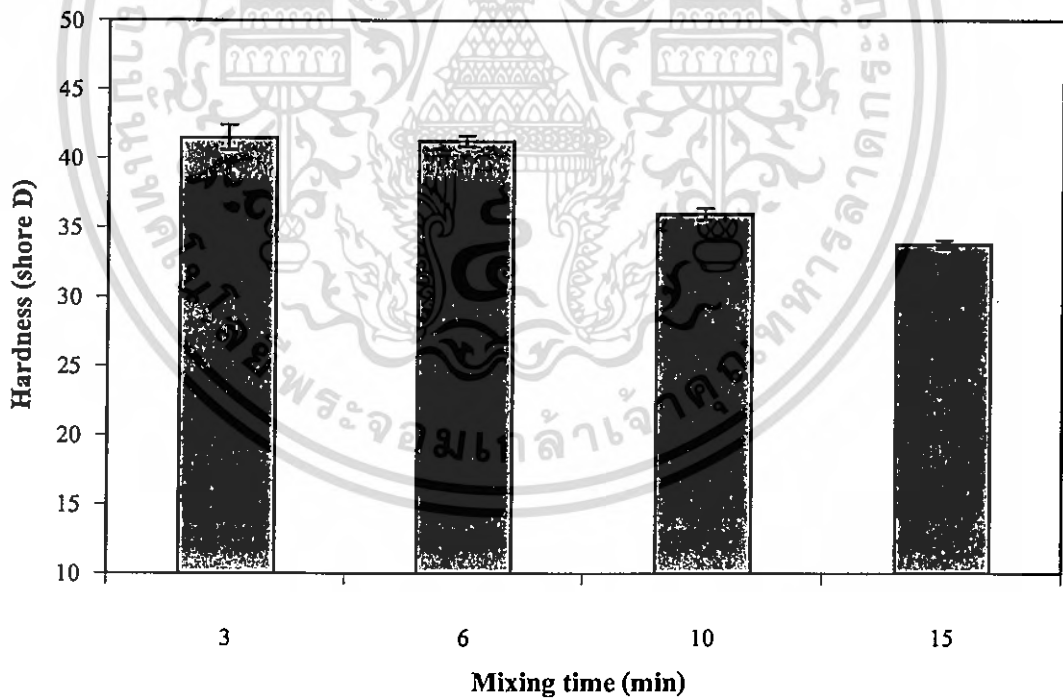


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPNR ที่เวลาในการผสมต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus ของ TPNR ที่เวลาการผสมต่าง ๆ

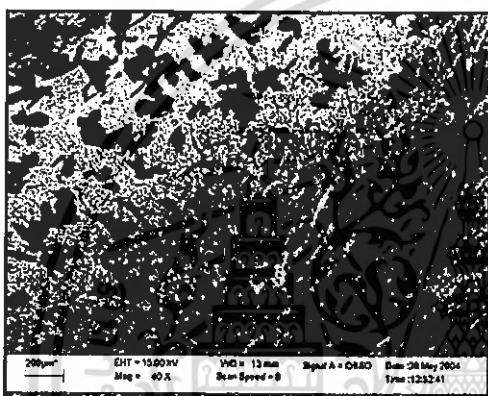


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR ที่เวลาการผสมต่าง ๆ

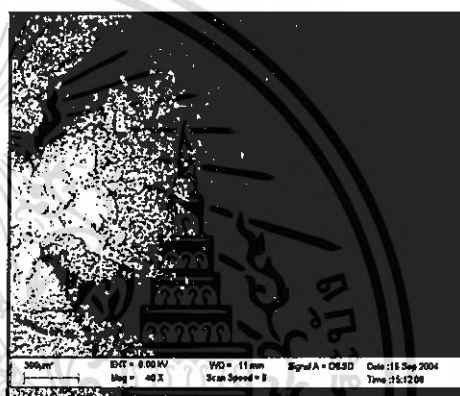
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.1.2 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อสัณฐานวิทยาของ TPNR

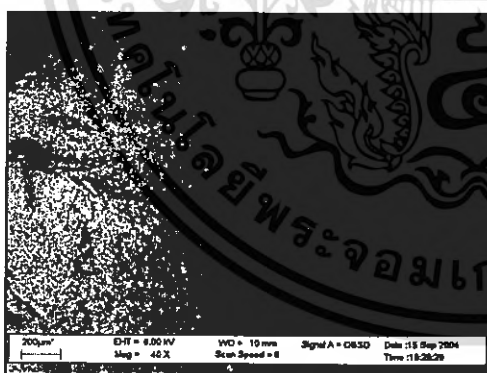
การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ในการศึกษาผลของเวลาในการผสมระหว่าง NR และ PP MFI 3.5 ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.3 phr โดยทำการเคลือบชิ้นงานที่ผ่านการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำโดยการใช้  $\text{OsO}_4$  และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR จากรูปที่ 4.34 แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เวลาในการผสมต่าง ๆ (3 6 10 และ 15 นาที) กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าขนาดของวัฏภาค PP (สีดำ) มีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของยาง (สีขาว) เมื่อเพิ่มปริมาณเวลาในการผสมมากขึ้น เนื่องจากในการผสมระหว่าง NR และ PP ได้รับความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการผสมเป็นเวลานาน ทำให้การผสมระหว่างสองวัฏภาคดีขึ้น



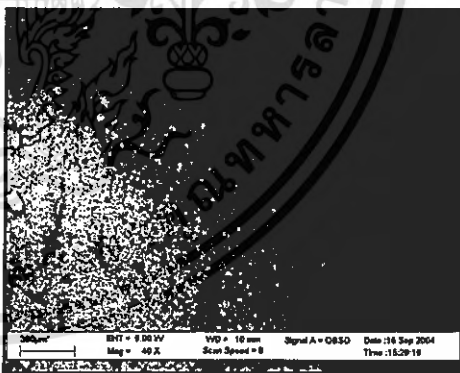
ก) TPNR mix 3 min



ข) TPNR mix 6 min



ค) TPNR mix 10 min



ง) TPNR mix 15 min

รูปที่ 4.34 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP=0.3 phr MFI 3.5) ที่กำลังขยาย 40 เท่า

#### 4.5.1.3 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของ

##### TPNR

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC สามารถหาอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) ซึ่งสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ TPNR โดยได้ศึกษาจาก TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) เท่ากับ 0.3 phr ที่ผ่านการผสมระหว่าง NR และ PP ที่เวลาต่าง ๆ (3 6 10 และ 15 นาที)

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่ใช้เวลาในการผสมต่าง ๆ จากเครื่อง DSC

สารตัวอย่าง	$T_m$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	% Crystallinity
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 3 min	158	48.0	61
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 6 min	158	48.7	62
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 10 min	158	46.6	59
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 15 min	159	43.4	55

จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ TPNR ที่ผ่านการผสมระหว่าง NR และ PP ที่เวลาต่าง ๆ (3 6 10 และ 15 นาที) พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวมีค่าคงที่และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลงมาก ที่เวลาในการผสม 15 นาที เนื่องจากระยะเวลาในการได้รับความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างผสมในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์เป็นระยะเวลาที่มากขึ้นทำให้การกระจายตัวของสองวัฏภาคดีขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.34 และคาดว่าสายโซ่บางส่วนขาดและสั้นลง ทำให้ความสามารถในการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PP ลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลง

#### 4.5.1.4 การศึกษาผลของเวลาในการผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA

##### ของ TPNR

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกล โดยเป็นการหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta_{max}$  ของยางซึ่งสามารถบอกถึงความกระดอนตัวและเปรียบเทียบการเชื่อมโยงได้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนเชิงกลด้วย DMTA แสดงค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางธรรมชาติ จากการศึกษา TPNR ที่ใช้เวลาในการผสมต่าง ๆ

สารตัวอย่าง	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta_{\max}$
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 3 min	-54.5	0.33
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 6 min	-54.3	0.31
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 10 min	-51.3	0.32
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ mixed 15 min	-51.6	0.37

จากตารางที่ 4.10 แสดงค่า  $\tan \delta_{\max}$  และ  $T_g$  ของ NR จากการศึกษผลของเวลาในการผสม พบว่าค่า  $T_g$  และค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการผสมนานขึ้น เนื่องจากการได้รับความร้อนและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น ทำให้การผสมเข้ากันได้ของวัฏภาคดีขึ้น ขนาดของวัฏภาคพอลิพรอพิลีนมีขนาดเล็กลง ดังรูปที่ 4.34 ทำให้เพิ่มการยึดติดระหว่างวัฏภาคมากขึ้น การเคลื่อนที่ของสายโซ่ยางมากขึ้น ส่งผลให้  $T_g$  มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การกระจายตัวของวัฏภาคที่มีขนาดเล็กส่งผลให้ลดแรงดึงพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial tension) ขึ้นงานจึงแตกหักได้ยากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกล ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

#### 4.5.2 การศึกษาผลของเครื่องผสมบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์

นอกจากการศึกษผลของเวลาในการผสมแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องผสมบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ขนาดใหญ่จากบริษัท Brabender รุ่น Plasti-Corder Lab-Station มีขนาดของห้องผสม (Chamber) เท่ากับ  $410 \text{ cm}^3$  และเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ขนาดเล็ก จากบริษัท C. melchers & Corporation รุ่น PL2000 มีขนาดของห้องผสมเท่ากับ  $81 \text{ cm}^3$  โดยมีทำการผสมระหว่าง NR และ PP MFI 3.5 ที่อุณหภูมิ  $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบเท่ากับ 50 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการผสมระหว่าง PP และ NR เท่ากันคือ 3 นาที

##### 4.5.2.1 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อสมบัติเชิงกลของ TPNR

จากการศึกษาผลของเครื่องผสมพบว่าสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่ได้จากการผสมของเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่มีขนาดใหญ่ให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งกมมีค่าลดลง แต่ค่ายังมอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ผสมจากเครื่องผสมที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.11 เนื่องจากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR พบว่า TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมขนาดใหญ่มีการกระจายตัวของวัฏภาค

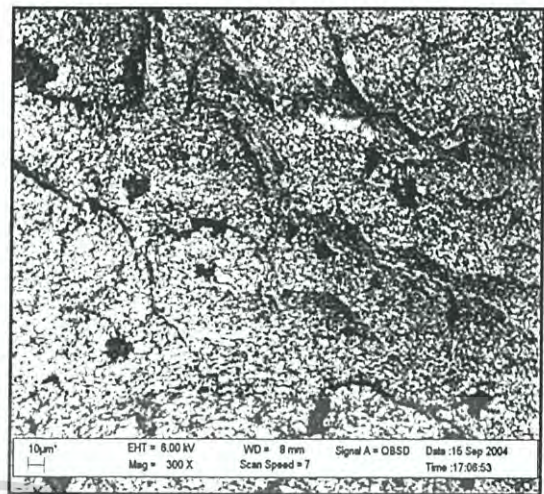
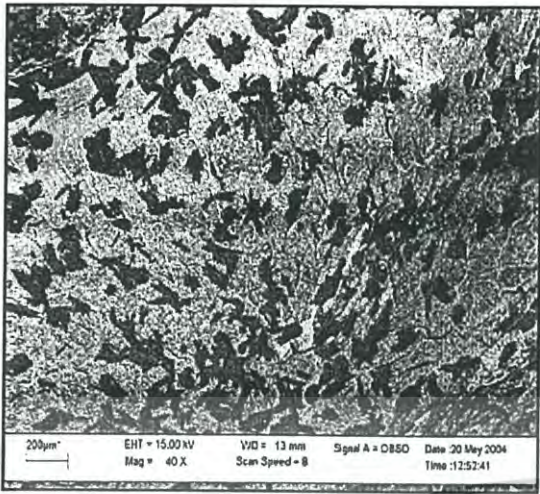
PP (วัฏภาคกระจาย) ที่ดีและมีขนาดเล็กกว่า TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.35 แสดงว่าเครื่องผสมขนาดใหญ่มีอัตราแรงเฉือนที่สูงกว่าเครื่องผสมที่มีขนาดเล็ก ทำให้ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ระหว่าง NR และ PP ดีขึ้น นอกจากนี้คาดว่าอัตราแรงเฉือนที่สูงทำให้สายโซ่บางส่วนขาดและสั้นลง ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจึงมีค่าสูงขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งกมมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของ TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่แตกต่างกัน

เครื่องผสม	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Hardness (Shore D)	Young's modulus (MPa)
ขนาดเล็ก	11.2 ± 0.1	114.4 ± 5.14	41.5 ± 0.9	96.6 ± 1.5
ขนาดใหญ่	9.3 ± 0.1	150.0 ± 3.05	37.5 ± 0.6	100 ± 3.3

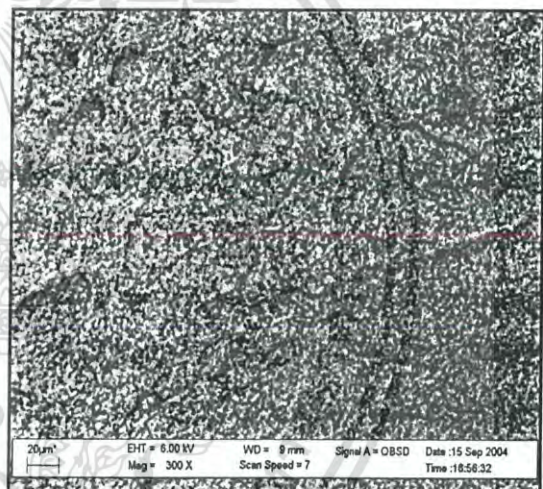
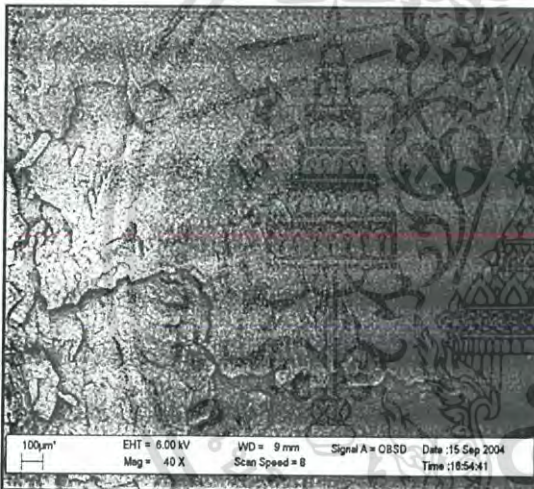
#### 4.5.2.2 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อสัณฐานวิทยาของ TPNR

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ในการศึกษาผลของเครื่องผสม บราเวนเดอร์-พลาสติกอร์เดอร์ ที่ใช้ในการผสมระหว่าง NR และ PP MFI 3.5 มีปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.3 phr โดยทำการเคลือบชิ้นงานที่ผ่านการแตกหักที่อุณหภูมิค่าโดยการใช้  $OsO_4$  และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR จากรูปที่ 4.35 แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่ได้จากการผสมของเครื่องผสมต่าง ๆ กำลังขยาย 40 และ 300 เท่า พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่ได้จากการผสมของเครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่มีการกระจายตัวของวัฏภาค PP (วัฏภาคกระจาย) ที่ดีและมีขนาดเล็กกว่า TPNR ที่ได้จากการผสมของเครื่องผสมขนาดเล็ก แสดงว่าเครื่องผสมขนาดใหญ่ให้กำลังแรงเฉือนที่สูงกว่าเครื่องผสมขนาดเล็ก



ก) TPNR จากเครื่องผสมขนาดเล็ก (40 เตา)

ข) TPNR จากเครื่องผสมขนาดเล็ก (300 เตา)



ค) TPNR จากเครื่องผสมขนาดใหญ่ (40 เตา)

ง) TPNR จากเครื่องผสมขนาดใหญ่ (300 เตา)

รูปที่ 4.35 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/PP = 60/40 DCP=0.3 phr MFI 3.5) ที่กำลังขยาย 40 เตา และ 300 เตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2.3 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของ

##### TPNR

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC สามารถหาอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) ซึ่งสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ TPNR โดยได้ศึกษาจาก TPNR ที่เตรียมจาก PP MFI 3.5 ที่มีปริมาณสารเชื่อม โยง (DCP) เท่ากับ 0.3 phr

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ TPNR ที่ผสมจากเครื่องผสมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ด้วยเครื่อง DSC

สารตัวอย่าง	$T_m$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	% Crystallinity
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ จากเครื่องผสมขนาดเล็ก	158	48.0	61
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ จากเครื่องผสมขนาดใหญ่	158	46.0	58

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ TPNR ที่ผ่านการผสมจากเครื่องผสมต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวมีค่าคงที่ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากแรงเฉือนทำให้กระจายตัวของสองวิภาคคิซีนและมีขนาดของวิภาค PP ที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ความสามารถในการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PP ลดลง ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลง

#### 4.5.2.4 การศึกษาผลของเครื่องผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA ของ

##### TPNR

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกล โดยเป็นการหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta_{max}$  ของยางซึ่งสามารถบอกถึงความกระดอนตัวและเปรียบเทียบการเชื่อม โยงได้

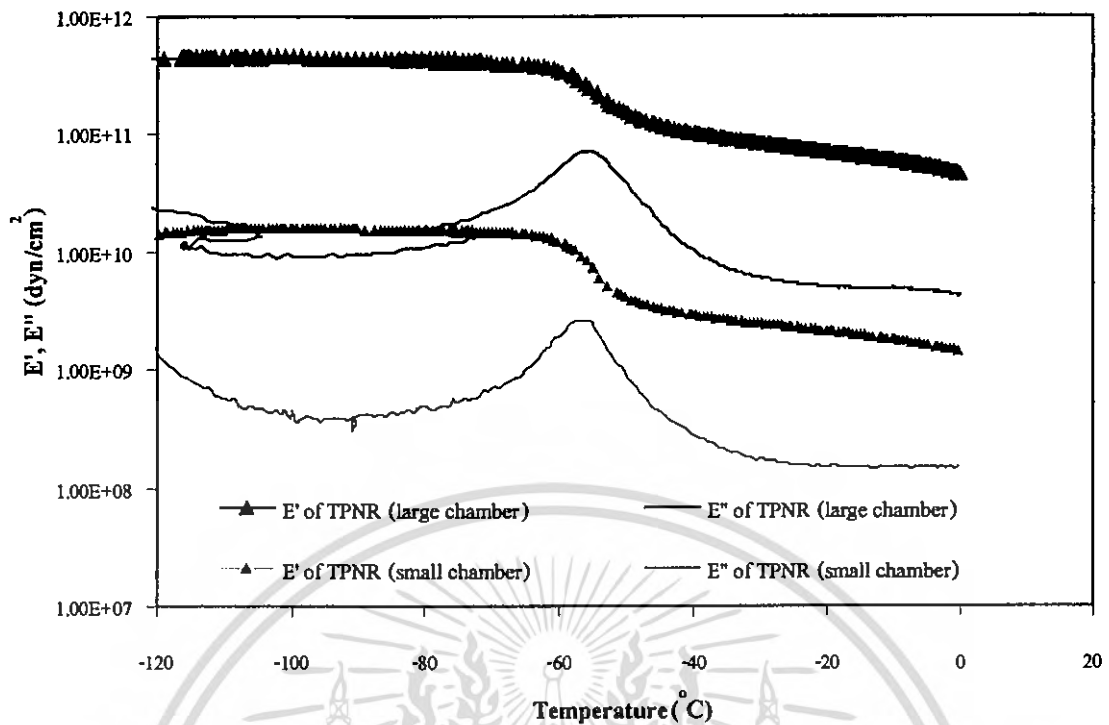
จากตารางที่ 4.13 แสดงค่า  $\tan \delta_{max}$  และ  $T_g$  ของยางธรรมชาติ ที่ได้จากการผสมของเครื่องผสมต่าง ๆ กัน พบว่าค่า  $T_g$  ของยางมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ TPNR ที่ผสมจากเครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่ ให้ค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียมีค่ามากกว่าเครื่องผสมขนาดเล็ก และอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่ามอดูลัสสูญเสียและค่ามอดูลัสสะสมของเครื่องผสมขนาดใหญ่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

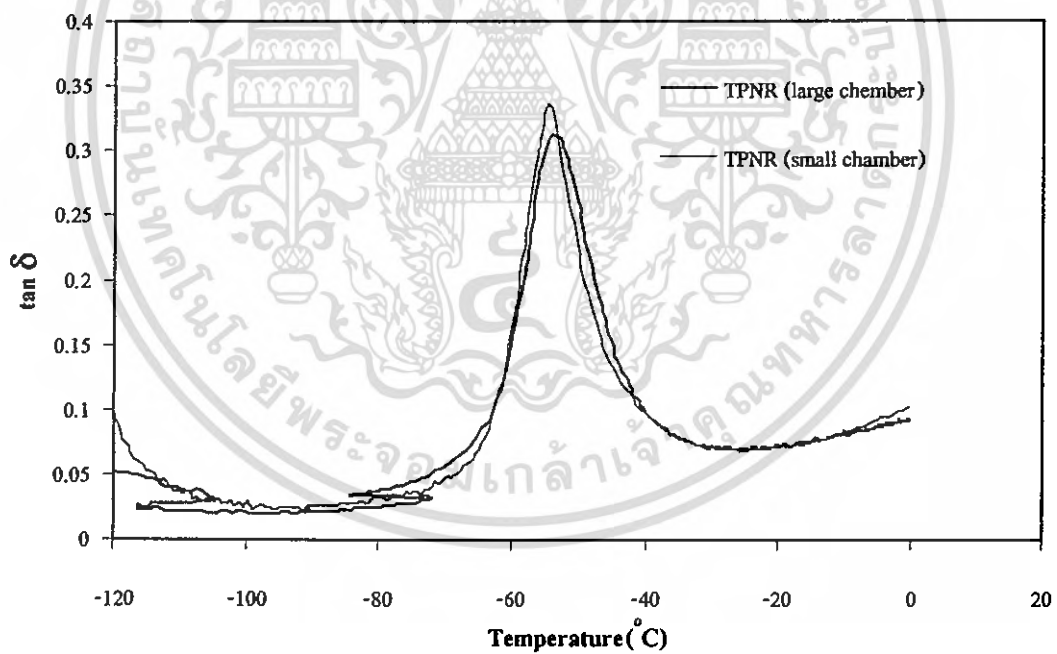
แนวโน้มนำสูงกว่าเครื่องผสมขนาดเล็ก จึงทำให้ค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.36 เนื่องจากเครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่ ให้อำนาจแรงเฉือนและความร้อนที่มากทำให้มีการกระจายตัวของสองวัฏภาคดีขึ้น และการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ลดแรงดึงที่พื้นผิว ดังนั้น TPNR ที่ได้จากการผสมจากเครื่องผสมขนาดใหญ่ จึงมีความสามารถในการรับแรงและกระจายแรงได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาชั้นฐานวิทยาและสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA แสดงค่า  $T_g$  และ  $\tan \delta_{\max}$  ของยางธรรมชาติ จากการศึกษาคผลของ TPNR ที่ผสมจากเครื่องผสมขนาดเล็กและขนาดใหญ่

สารตัวอย่าง	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\tan \delta_{\max}$
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ เครื่องผสมขนาดใหญ่	-53.9	0.31
TPNR/ DCP 0.3 phr/ MFI 3.5/ เครื่องผสมขนาดเล็ก	-54.5	0.33



ก) ค่า  $E'$  และ  $E''$  ของ TPNR/ MFI 3.5/ DCP 0.3 phr ที่เตรียมจากเครื่องผสมขนาดเล็กและขนาดใหญ่



ข) ค่า  $\tan \delta$  ของ TPNR ที่เตรียมจากเครื่องผสมขนาดเล็กและขนาดใหญ่

รูปที่ 4.36 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR ที่เตรียมจากเครื่องผสมขนาดเล็กและขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการหลอมเหลวพอลิพรอพิลีนเพื่อเตรียมยาง- ธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลว PP ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ได้เลือกศึกษาในช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 170 °C

ศึกษาเวลาในการหลอมเหลว PP โดยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ PP ที่มีค่า  
ดรชนีการไหลเท่ากับ 3.5 กรัม/ 10 นาที และ 10 กรัม/ 10 นาทีใช้เวลาเท่ากับ 4 และ 3 นาที ตาม  
ลำดับ

#### 5.2 การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร

ได้ศึกษาปริมาณไดคิมิตเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยง พร้อมทั้งศึกษาผลของ  
ดรชนีการไหลของ PP และรวมทั้งศึกษาผลของความหนืดโดยการใช้สารตัดสายโซ่

##### 5.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

- การศึกษาปริมาณไดคิมิตเปอร์ออกไซด์ (DCP) ที่เหมาะสมในการเตรียมยางผสมสูตร  
จากสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เตรียมจากยางผสมสูตรที่มีปริมาณ DCP แตกต่างกันคือ 0.1,  
0.3 และ 0.5 phr แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าที่ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.3 phr ให้สมบัติ  
เชิงกลโดยรวมดีที่สุด

จากการศึกษาผลของดรชนีการไหลของ PP ที่มีผลต่อสมบัติของ TPNR พบว่า TPNR ที่  
เตรียมจาก PP ที่มีดรชนีการไหลเท่ากับ 3.5 กรัม/ 10 นาที ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่า PP ที่มี  
ดรชนีการไหลเท่ากับ 10 กรัม/ 10 นาที

##### - การศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตร

จากการศึกษาผลของความหนืดด้วยการใช้สารตัดสายโซ่และการเพิ่มเวลาในการบดย่อย  
ยาง เพื่อใช้ในการปรับความหนืดของยางผสมสูตรที่เหมาะสม พบว่าการเติมสารตัดสายโซ่และการ  
เพิ่มเวลาในการบดย่อยยาง ทำให้ความหนืดของยางลดลงและ TPNR ที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกล  
ลดลง

### 5.2.2 สัณฐานวิทยาของ TPNR

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ด้วยเครื่อง SEM พบว่าขนาดของภูมิภาค PP ที่กระจายตัวอยู่ในภูมิภาคของยาง มีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณ DCP มากขึ้น และเมื่อความหนืดของยางผสมสูตรลดลงทำให้การกระจายตัวของภูมิภาค PP ในภูมิภาคของยางดีขึ้น และมีขนาดของภูมิภาค PP เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ไม่มีการเติมสารตัดสายโซ่

### 5.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ DCP เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณการเชื่อมโยงขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PP และจากการศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตรพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อความหนืดของยางผสมสูตรลดลง

### 5.2.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA พบว่าให้ค่า  $T_g$  สองค่า คือ  $T_g$  ช่วงของยาง คือที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ  $-54^\circ\text{C}$  และช่วง  $T_g$  ของ PP คือที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ  $10-20^\circ\text{C}$  โดยค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงขวางมากขึ้น ในขณะที่การศึกษาผลของความหนืดของยางผสมสูตรพบว่าค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางมีค่าสูงขึ้นเมื่อความหนืดของยางลดลง

## 5.3 การศึกษาผลของสารช่วยผสม

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสม (1, 3 และ 5 phr) พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ค่าความแข็งกดและข้มอดูล์สมีค่าลดลงเล็กน้อย ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด  $\epsilon$  จุดขาดมีค่าสูงขึ้น แต่สมบัติดังกล่าวลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 5 phr

สัณฐานวิทยาของ TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่าสัณฐานวิทยาของ PP มีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีขึ้นในภูมิภาคของยางเมื่อเทียบกับ TPNR ที่ไม่มีการเติมยาง HNR

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลงมาก ที่ปริมาณสารช่วยผสม 5 phr เนื่องจากสารช่วยผสมที่มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถกระจายตัวอยู่ระหว่างภูมิภาคยางและพลาสติกได้ กลายเป็นพอลิเมอร์ผสมสามชนิด (Terpolymer blend) และแยกภูมิภาคกัน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด  $\epsilon$  จุดขาดมีค่าลดลง

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA พบว่าค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของยางมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของยาง HNR มากขึ้น

## 5.4 การศึกษาการรีไซเคิลของ TPNR

ผลการรีไซเคิลของ TPNR พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งกด มีค่าลดลงเล็กน้อย (น้อยกว่า 10 %) แต่ให้ค่ายังมอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น เมื่อ TPNR ที่มีการเติมสารช่วยและผ่านการรีไซเคิลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่า TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิลและไม่มีการเติมสารช่วยผสม

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิลได้รับความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้น ทำให้ขนาดของภูมิภาค PP มีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในภูมิภาคของยาง

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PP มีค่าลดลงเมื่อผ่านการรีไซเคิล แต่ TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสม เมื่อผ่านการรีไซเคิลจะไม่ส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมากนัก

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA พบว่าค่า  $T_g$  ของ NR และ PP มีการเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้น และให้ค่า  $\tan \delta_{max}$  มีค่าเพิ่มขึ้น

## 5.5 การศึกษาผลของเวลาในการผสมและการใช้เครื่องผสมขนาดต่างกัน

จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า สมบัติเชิงกลของ TPNR มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการผสมระหว่าง NR และ PP รวมถึงการศึกษาการใช้เครื่องผสมบราวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ขนาดเล็กและใหญ่

### 5.5.1 การศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อสมบัติเชิงกลของ TPNR

พบว่าเมื่อเวลาในการผสมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง ยังมอดูลัส และความแข็งกดมีค่าลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาขนาดของเครื่องผสมพบว่า TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมขนาดใหญ่ให้ค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งกดมีค่าลดลง แต่ค่ายังมอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่เตรียมจากเครื่องผสมขนาดเล็ก เนื่องจากการได้รับความร้อนและแรงเฉือนที่มากทำให้การกระจายตัวเข้ากัน ได้ของภูมิภาคดีขึ้น เป็นผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น

### 5.5.2 การศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อสัณฐานวิทยาของ TPNR

พบว่าเมื่อเวลาในการผสมมากขึ้นขนาดของภูมิภาค PP มีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีขึ้น เนื่องจากการได้รับความร้อนและแรงเฉือนในขณะที่ผสมนานขึ้น ทำให้ขนาดของภูมิภาคเล็กลง

จากการศึกษาผลของเครื่องผสมพบว่า TPNR ที่ผ่านการผสมจากเครื่องผสมขนาดใหญ่ขนาดของภูมิภาค PP มีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในภูมิภาคของยางเมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ได้จากเครื่องผสมขนาดเล็ก เนื่องจากให้กำลังแรงเฉือนที่มีค่าสูงกว่า

### 5.5.3 ศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของ TPNR

จากการศึกษาผลของเวลาและขนาดของเครื่องผสม พบว่าการได้รับความร้อนและแรงเฉือนที่มากขึ้นทำให้การกระจายตัวของ PP คีซันและมีปริมาณความเป็นผลึกลดลง

### 5.5.4 ศึกษาผลของเวลาและขนาดเครื่องผสมต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA ของ TPNR

การศึกษาเวลาในการผสมพบว่า ค่า  $\tan \delta_{\max}$  และ  $T_g$  ของยางมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการผสมนานขึ้น เนื่องจากเกิดการได้รับความร้อนและแรงเฉือนที่มากขึ้น ทำให้การผสมเข้ากันได้ของวัฏภาคคีซัน และจากการศึกษาขนาดของเครื่องผสมพบว่า TPNR จากเครื่องผสมขนาดใหญ่ให้ค่า  $\tan \delta_{\max}$  มีค่าลดลงในขณะที่ค่า  $T_g$  ของยางมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ TPNR ที่ผสมจากเครื่องผสมขนาดเล็ก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องผสมที่ให้กำลังแรงเฉือนที่มากจะให้ประสิทธิภาพในการผสมที่ดี และระยะเวลาในการผสมควรไม่นานจนเกินไป เพราะจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพได้

## 5.6 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาถึงชนิดของสารช่วยผสมชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างวัฏภาค
2. การศึกษาสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติมเช่น สมบัติความทนทานต่อการขีดถู และสมบัติความสามารถในการกักอัด เป็นต้น
3. การศึกษาสมบัติการไหล และความสามารถในการขึ้นรูปอื่นๆ ของ TPNR ที่เตรียมได้

## เอกสารอ้างอิง

1. IRSG Rubber Industry Report. 2004. "World Rubber Industry Statistics." **The Rubber.** 12(5) : 92.
2. Maurice, M. 1995. **Rubber Technology.** 3<sup>th</sup> ed. USA : R.R Donnelly & sen.
3. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). 2546. การสัมมนาเรื่อง **Thermoplastic Elastomers for Applications.** กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เอกสารอัดสำเนา.
4. Santoprene. 2004. **Advanced Elastomer Systems Applications.** [online]. Available : <http://www.santoprene/applications.com>.
5. Walker, B.W. 1979. **Handbook of Thermoplastic Elastomer.** 2<sup>nd</sup> ed. New York : Van Nostrand Reinhold.
6. Abdou-Sabet, S. Puydak, R.C. and Rader, C.P. 1996. "Dynamically Vulcanized Thermoplastic Elastomers." **Rubber Chemistry And Technology.** 69(6) : 476-496.
7. นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล. 2537. **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
8. Ibrahim, A. and Dahlan, M. 1998. "Thermoplastic Natural Rubber Blends". **Progress Polymer Science.** 23(4) : 665-706.
9. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2541. **การออกสูตรยางและกระบวนการผลิต.** กรุงเทพฯ : ส่วนอุตสาหกรรมของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.
10. อธิพิศ แจ้งชัด. 2542. **เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
11. พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. **สารเคมีสำหรับยาง.** ปัตตานี : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
12. Joseph, C.S. 1996. **Polymeric Material Encyclopedia.** Vol. 9. New York : Boca Raton: C.R.C Press.
13. Nationalpark. 2547. **พอลิพรอฟิลีน.** [Online]. Available : <http://www.nationalpark.go.th/biocom>.
14. ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2543. "พอลิเมอร์ผสม." **วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง.** 10(1). 14-17.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. วิไลรัตน์ เมืองแก้ว และ สุมาลี ขอบอินทร์. 2544. “ไฮโดรเจนชั้นของยางไอโซพรีน”. โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
16. Paul, D.R. 1972. *Polymer Blends*. Vol. 2. London : Academic Press, .INC.
17. Al-Malaika, S. and Amir, E.J. 1986. “Thermoplastic Elastomers I. Effect of Processing Variable on Tensile Properties of Natural Rubber/Polypropylene Blends.” *Journal Natural Ruber Resource*. 1(2) : 104-121.
18. Ismail, H. S. 2002. “Thermoplastic Elastomers Based on Polypropylene/ Natural Rubber and Polypropylene/Recycle Rubber Blends.” *Polymer Testing*. 21(6) : 389-395.
19. Chang, S.H. 1986. “Structure and Properties of Dynamically Cured EPDM/PP Blends.” *Journal of Applied Polymer Science*. 32(8) : 6281-6297.
20. Goharpey, F. Katbab, A. A. and Nazockdast, H. 2001. “Mechanism of Morphology Development in Dynamically Cured EPDM/PP TPEs. I. Effects of State of Cure.” *Journal of Applied Polymer Science*. 81(10) : 2531-2544.
21. Jacob, C. De, P.P. Bhowmick, A.K. and De, S.K. 2001. “Recycling of EPDM Waste. II. Replacement of Virgin Rubber by Ground EPDM Vulcanizate in EPDM/PP Thermoplastic Elastomeric Composition.” *Journal of Applied Polymer Science*. 82(13) : 3304-3312.
22. El-Sabbagh, S.H. 2003. “Compatibility Study of Natural Rubber and Ethylene-Polypropylene -Diene Rubber blends.” *Journal of Applied Polymer Science*. 90(22) : 1-11.
23. สุพิชญ์ ปัญญาวิพนพงศ์. 2545. เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
24. ปัทมา ผลโยธิน ฉัฐนันท์ นิมยังดี และสุรีย์พร กุลตั้งกิจเสรี. 2544. “อิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยางธรรมชาติ”. โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
25. วุฒิชัย ตรียศิลาพันธ์ และ ศรีัญญา ศัชมาตย์. 2545. “ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้พอลิเมอร์ร่วม

ของเอทีลีน-ออกทีน และยางธรรมชาติชนิดเหลวเป็นสารช่วยผสม”. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

26. ASTM D 638 Committee on Standard. 1993. **Standard Test Methods for Tensile Properties of Rubber (Matrix)**. Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
27. ASTM D 2240 Committee on Standard. 1993. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastic and Electrical Insulating Materials**. Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
28. Jacqueline, I.K. 1986. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. New York : John Wiley & Sons.
29. อธิธิพล แจ่มชัด. 2543. **เอกสารประกอบการสอนฟิสิกส์พอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
30. Sawyer, L.C. and Grubb, D.T. 1996. **Polymer Microscopy**. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford : Alden Press.
31. Varghese, S. Alex, R. and Kuriakose, B. 2004. “Natural Rubber-Isotactic Polypropylene Thermoplastic Blends.” **Journal of Applied Polymer Science**. 92(4) : 2063-2068.
32. ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. 2545. **การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

## ภาคผนวก ก

สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding machine

### PROGRAMING TIME

DIE CLS/OPN TIME	:	40	MELTING TIME	:	200
SID-COR ACT TIME	:	20	DECOMPRS TIME	:	1
1 ST STG INJ TIME	:	20	COOLING TIME	:	150
2 ND STG INJ TIME	:	15	EJECTOR COUNT	:	1
3 RD STG INJ TIME	:	10	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	:	50	DECOMP PRESR	:	20
CLS LOW PRESR	:	35	PLUNGER PRESR	:	20
CLS HI PRESR	:	33	EJECTOR PRESR	:	40
DIE OPN PRESR	:	41	SCW-IN PRESR	:	30
1 ST INJ PRESR	:	75	DIE ADJ PRESR	:	30
2 ND INJ PRESR	:	70			
3 RD INJ PRESR	:	65			
MELTING PRESR	:	50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### PROGRAMING FLOW SPEED

RAPID CLS SPD	:	30	1 ST STG INJ SPD	:	50
HIGH CLS SPD	:	20	2 ND STG INJ SPD	:	50
CLAMPING SPD	:	15	3 RD STG INJ SPD	:	50
DIE OPN SLW1	:	5	MELTING SPD	:	60
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

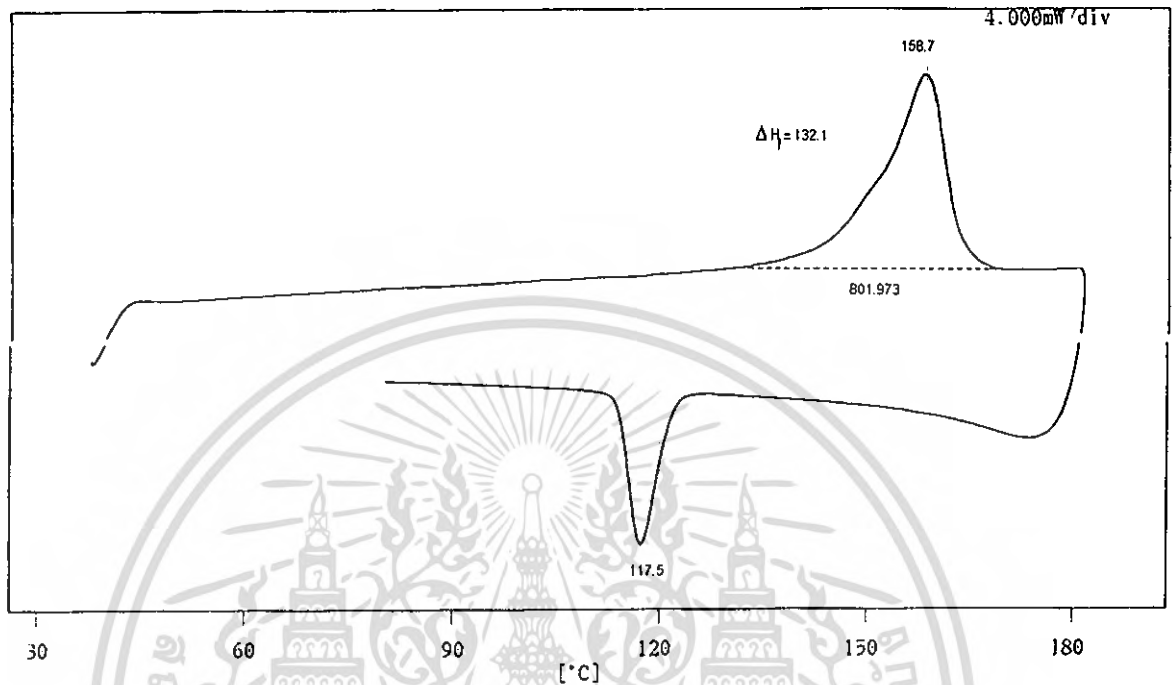
### PROGRAMING TEMPERATURES

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

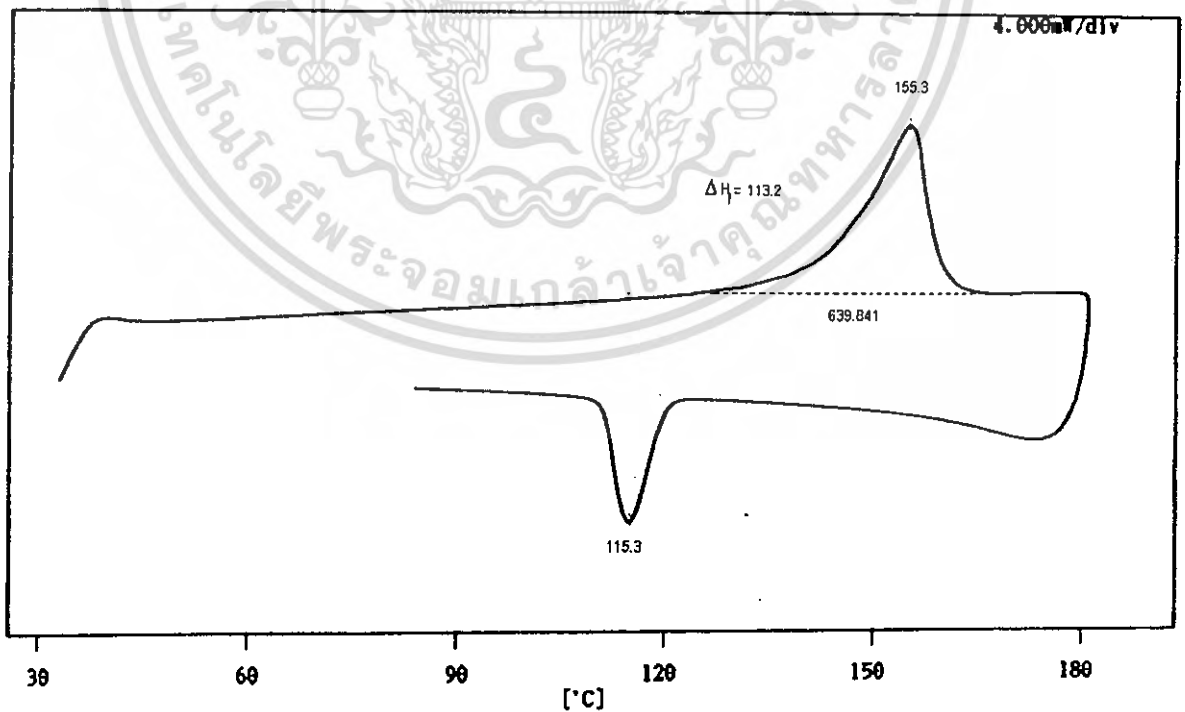
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

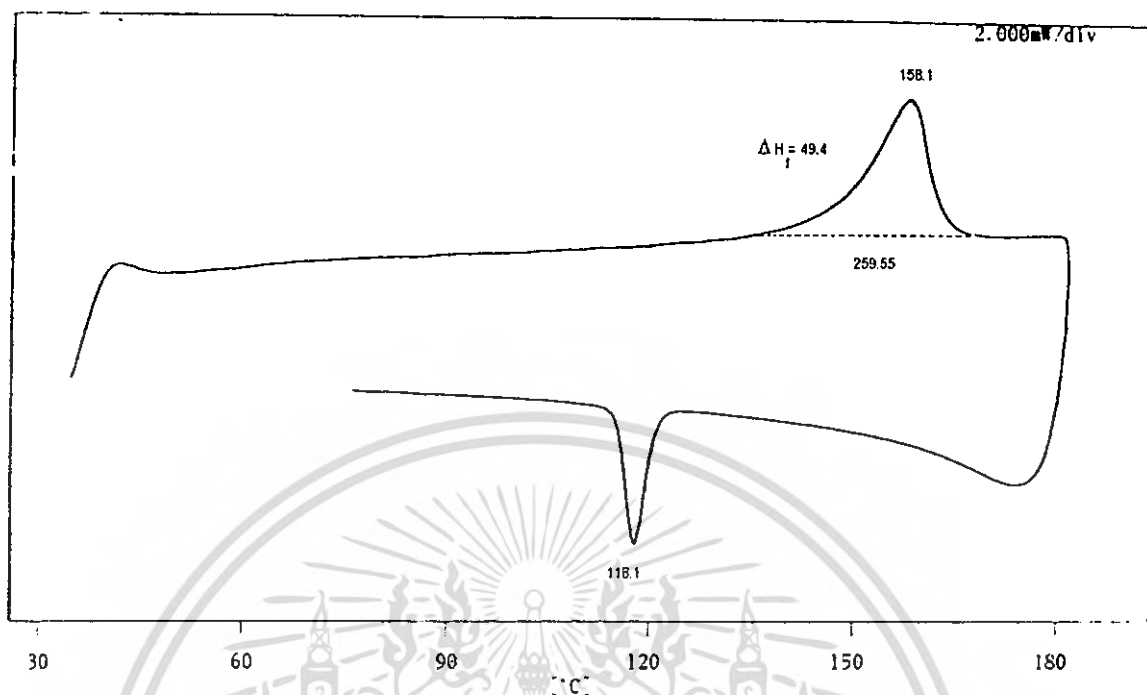


รูปที่ ข.1 เทอร์โมแกรม DSC ของพอลิพรอพิลีน (MFI 3.5 g/10min)

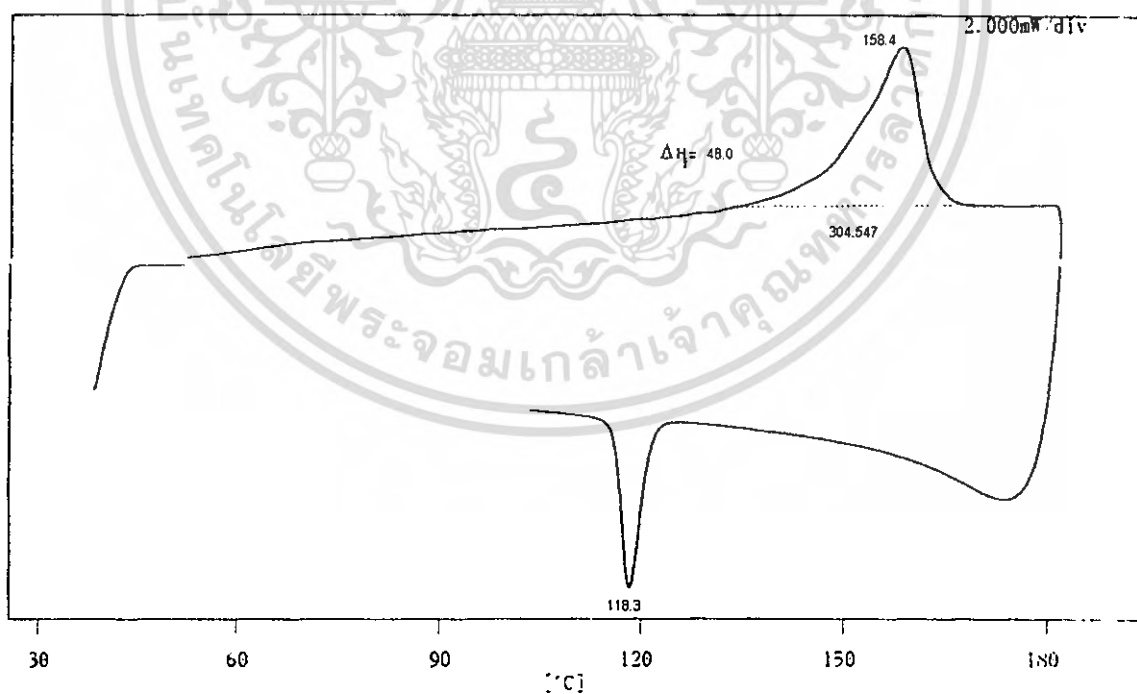


รูปที่ ข.2 เทอร์โมแกรม DSC ของพอลิพรอพิลีน (MFI 10 g/10min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

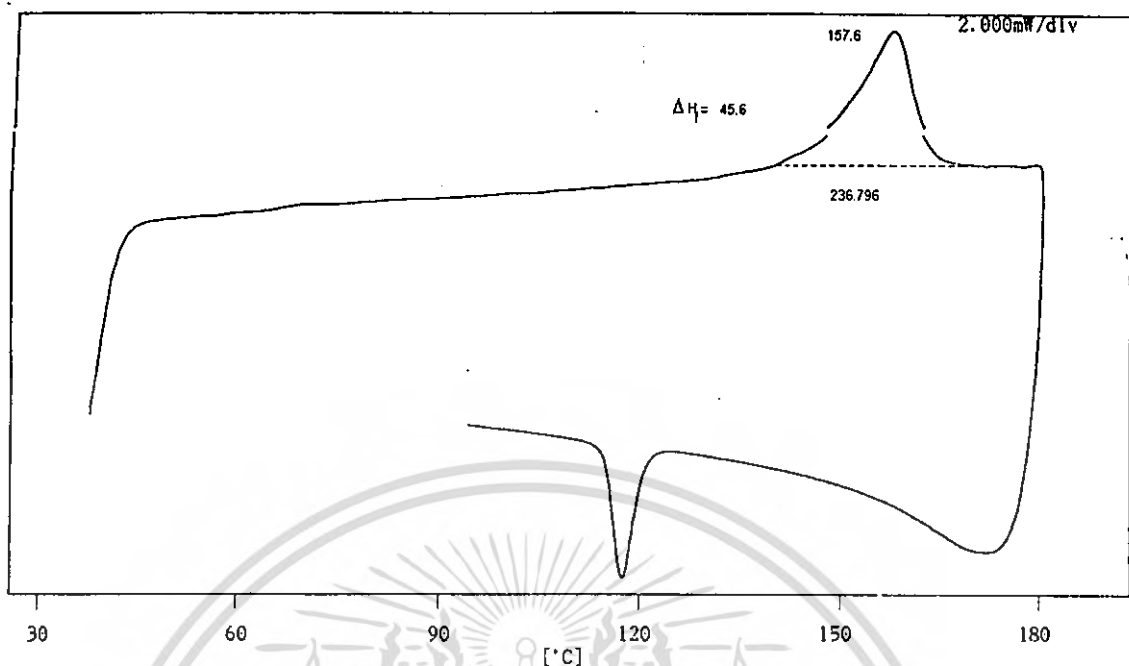


รูปที่ ข.3 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR (DCP 0.1 phr / MFI 3.5)

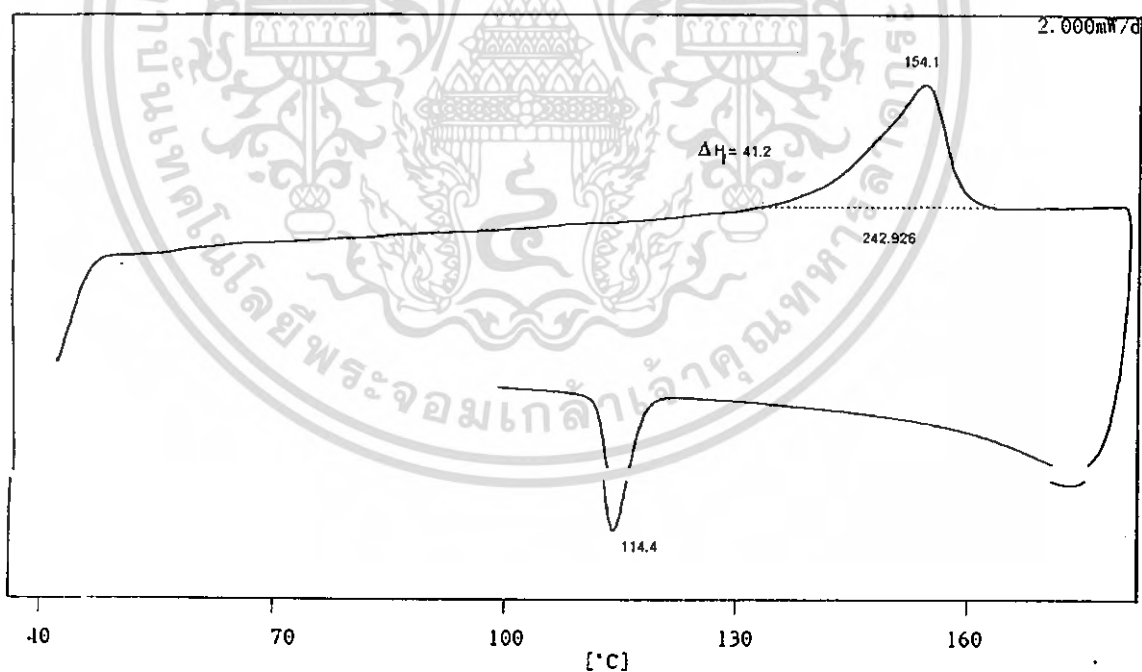


รูปที่ ข.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR (DCP 0.3 phr / MFI 3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR (DCP 0.5 phr / MFI 3.5)

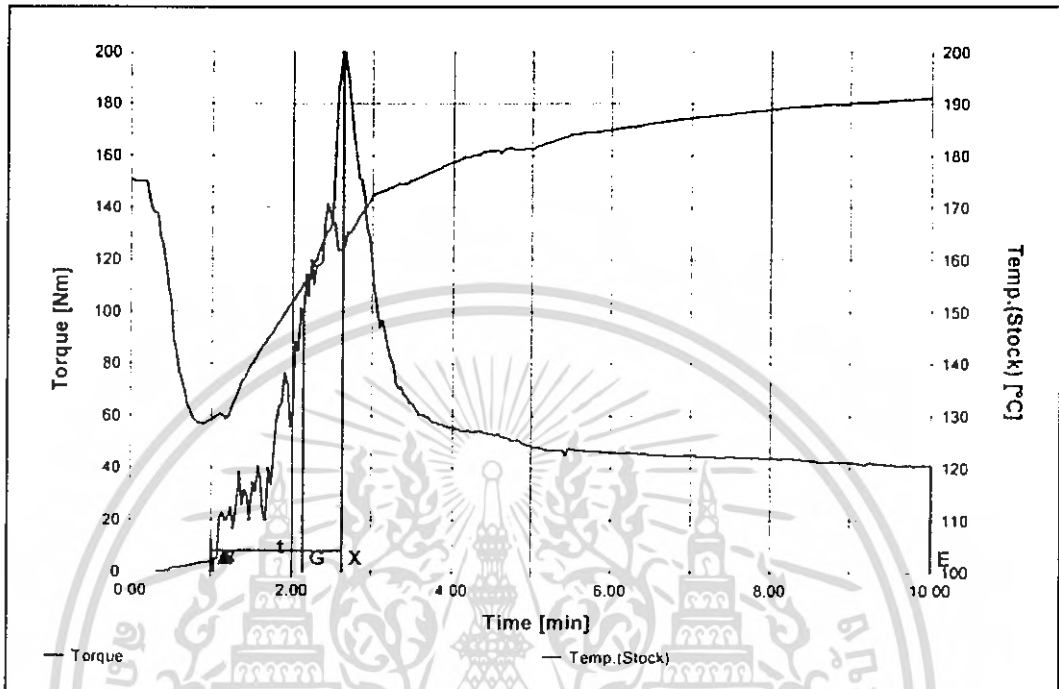


รูปที่ ข.6 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR (DCP 0.3 phr / MFI 10)

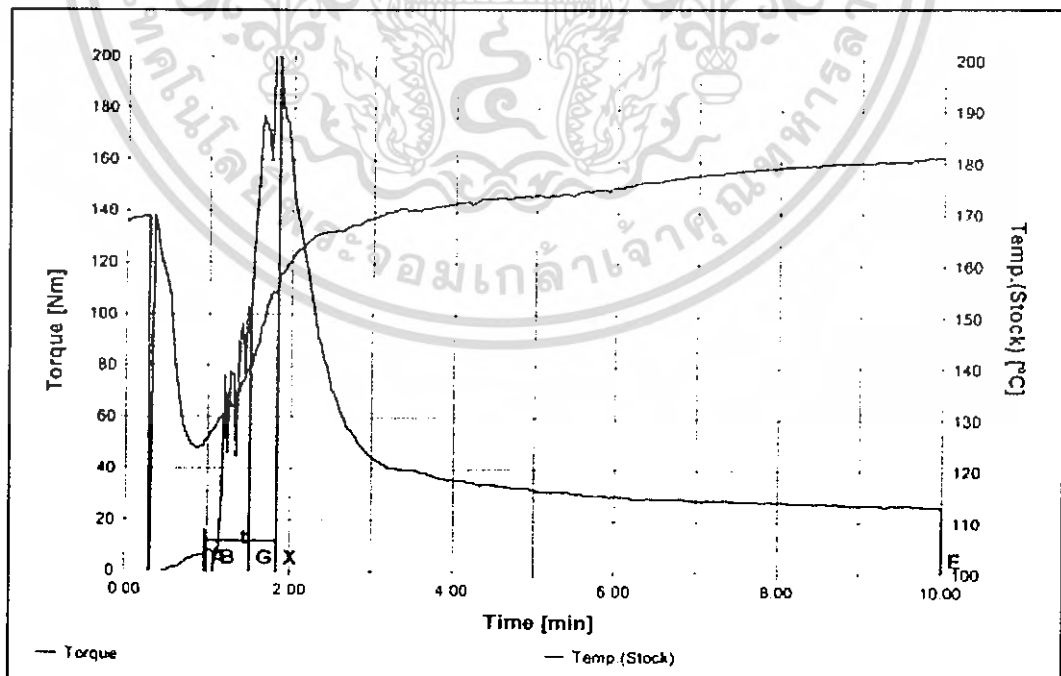
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

การหาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์



รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรมของพอลิพรอพิลีน (MFI 3.5 g/10 นาที)



รูปที่ ค.2 เทอร์โมแกรมของพอลิพรอพิลีน (MFI 10 g/10 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	สุจิรา สารลี้ก
วันเกิด	26 มกราคม พ.ศ. 2523
สถานที่เกิด	ร้อยเอ็ด ประเทศไทย
การศึกษา	-ระดับมัธยมต้นจาก โรงเรียนเซนต์โยเซฟระยอง พ.ศ. 2534-2538 -ระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนระยองวิทยาคม พ.ศ. 2538-2541 -ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมี) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา พ.ศ. 2541-2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้