

การศึกษาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ  
และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... 40071  
วัน, เดือน, ปี 24 0 0 2544

ปีการศึกษา 2543

b.....  
i.....

ได้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาที่ใช้

**Study of Thermoplastic Elastomer from Natural Rubber (NR)  
and High Density Polyethylene (HDPE)**



Mr. Chira Kien-U-Bol  
Miss Patchree Sriwong  
Mr. Pairote Boonpralok

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science  
Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
2000

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ  
และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

นักศึกษา

นายจิระ เขียนอบล  
นางสาวพัชรี ศรีวงษ์  
นายไพโรจน์ บุญประโกลก

ภาควิชา

เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด  
ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



หัวหน้าภาควิชาเคมี

.....

(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

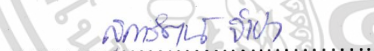
คณะกรรมการผู้ตรวจสอบโครงการพิเศษ



ประธานกรรมการ

.....

(ผศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์)



กรรมการ

(ดร.สุภารัตน์ จำปา)



กรรมการ

(ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด)



กรรมการ

(ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์)

ลิสต์ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก๊อปปี้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยาง  
ธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

นักศึกษา

นายจิระ เขียนอุบล รหัส 40052005  
นางสาวพัชรี ศรีวงษ์ รหัส 40052039  
นายไพโรจน์ บุญประโกลก รหัส 40052042

อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ

ผศ.ดร. อธิพิพล แจ่มชัด

อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษร่วม

ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขา

เคมีอุตสาหกรรม

พ.ศ.

2543

## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ (TPNR) ซึ่งเตรียมได้จากการเตรียมยางผสมสูตรโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $60^{\circ}\text{C}$  โดยมีกำมะถัน 1.5 2.0 และ 3.0 phr เป็นตัวทำให้เกิดการเชื่อมโยงแล้วนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในอัตราส่วน 50/50 60/40 และ 70/30 ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง 2 เทคนิคคือ การอัดขึ้นรูปและการฉีดขึ้นรูป จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้มาศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสถานะวิทยา จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของ TPNR มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางผสมสูตรมากขึ้น ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด จะมีค่าเพิ่มขึ้น จากศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ TPNR ที่เตรียมได้จะมี 2 ช่วงโดยช่วงอุณหภูมิที่  $375-400^{\circ}\text{C}$  และ  $460-480^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ยางผสมสูตรและ HDPE เกิดการสลายตัวตามลำดับ ส่วนการศึกษาด้วยเครื่อง DSC พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้นทำให้ช่วงการเกิดผลึกของ HDPE ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE ลดลง จากการศึกษาสถานะวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr ในอัตราส่วน 50/50 จะมีการกระจายตัวของวัฏภาค HDPE ในวัฏภาคของยางผสมสูตรที่ดี นอกจากนี้พบว่า การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปทำให้การกระจายตัวของวัฏภาค HDPE ดีกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป เนื่องจากมีแรงเฉือนสูงกว่า

<b>Special Project Title</b>	Study of Thermoplastic Elastomer from Natural Rubber (NR) and High Density Polyethylene (HDPE)		
<b>Student Names</b>	Mr. Chira Kien-U-Bol	<b>Student ID.</b>	40052005
	Miss Patcharee Sriwong		40052039
	Mr. Pairote Boonpralok		40052042
<b>Special Project Adviser</b>	Asst.Prof.Dr. Ittipol Jangchud		
<b>Special Project Co-Adviser</b>	Dr. Chonlada Ritvirulh		
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2000		

### Abstract

This research work was focused on preparation and property characterization of a Thermoplastic elastomer (TPE) made from natural rubber (NR) and high density polyethylene (HDPE). This blend, as known as the Thermoplastic Natural Rubber (TPNR), can be prepared by compounding the NR formula consisting of sulfur curative 1.5 phr 2.0 phr and 3.0 phr with a two-roll mill at the temperature below 60°C. Then the rubber compound was mixed with the HDPE at the NR/HDPE ratio of 50/50 60/40 and 70/30 by using a Brabender Plasticorder at 160°C and the roter speed of 80 rpm. The blends were then shaped by compression molding and injection molding techniques. Mechanical properties of the blend were then measured and found that the %elongation at break was increased as the rubber loading was increased. However, increasing of the rubber content caused tensile strength, modulus and hardness to decrease. The thermal properties of the blends were examined by TGA and DSC. From the TGA thermograms, two temperature steps were revealed at 375-400°C and 460-480°C which responded to the NR and HDPE decomposition respectively. The DSC results showed that the degree of crystallinity of the blends was decreased with increasing rubber loading due to the disruption of the HDPE crystallization by the NR phase. From SEM micrographs, they were revealed that the NR/HDPE 50/50 blends with sulfur of 1.5 phr had good HDPE dispersion in the NR phase. The blends prepared by injection molding technique also disclosed a better phase dispersion compared to those prepared by compression molding technique due to the high shear force.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คอยให้คำปรึกษา แนะนำตลอดการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษร่วม พร้อมคำปรึกษา และกำลังใจที่มีให้ตลอดเวลา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ และ ดร.สุภารัตน์ จำปา ที่กรุณาให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยีที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ บริษัทเอ็นเอส อีเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง DSC

ขอบคุณ เพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือเป็นกำลังใจและอยู่เป็นเพื่อนทำโครงการจนตึกคืน นอกจากนี้ยังมีผู้ที่มีได้กล่าวถึงอีกมากมายคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

นายจิระ เขียนอุบล

นางสาวพัชรี ศรีวงษ์

นายไพโรจน์ บุญประโหลก

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์	5
2.2 สมบัติและการประยุกต์ใช้งานอย่างธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก	7
2.3 วัตถุประสงค์ในการเตรียมยางผสมสูตร	8
2.4 หน้าที่ของสารเคมีต่าง ๆ	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	17
3.1 แผนการดำเนินการ	17
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์	18
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	19
3.4 วิธีการทดลอง	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	24
4.1 สมบัติเชิงกล	24
4.2 สมบัติทางความร้อน	33
4.3 สันฐานวิทยา	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48

### เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

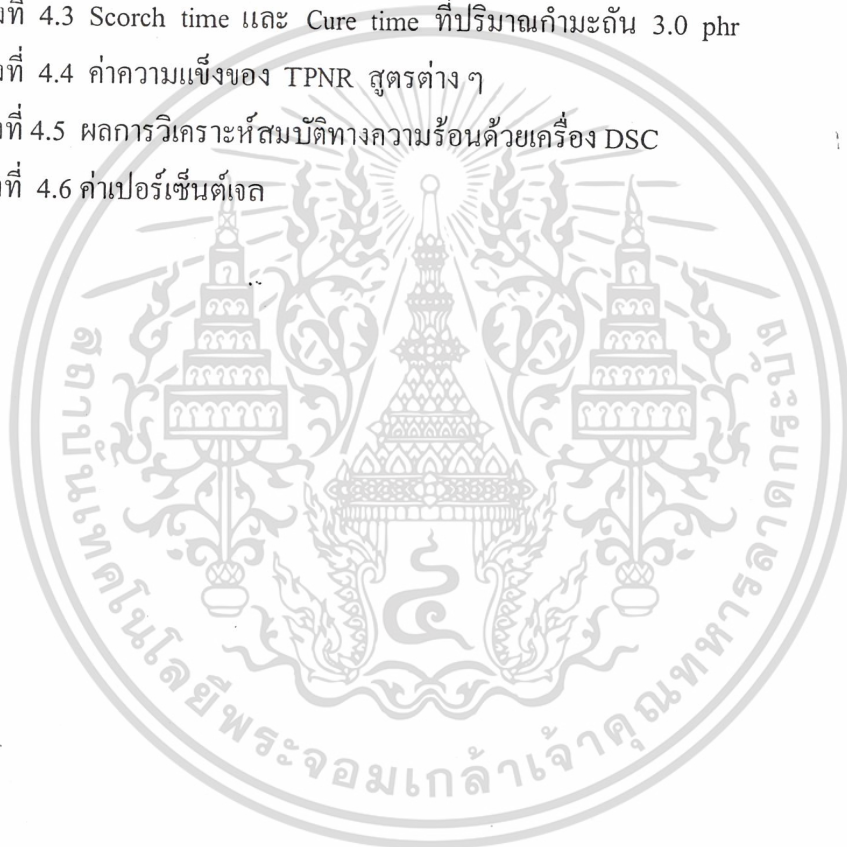
	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์	3
รูปที่ 2.2 แผนภาพการเปรียบเทียบกระบวนการขึ้นรูประหว่างเทอร์โมพลาสติก อิลาสโตเมอร์กับยางเทอร์โมเซต	6
รูปที่ 2.3 ช่วงความแข็งของยางเทอร์โมพลาสติก ยางชนิดต่างๆและพลาสติก	7
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับความเร็วรอบโรเตอร์ของ เครื่องบราเบนเดอร์ จากกระบวนการอัดขึ้นรูป	25
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับสูตรผสมจากกระบวนการ การฉีดขึ้นรูปที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที	26
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับความเร็ว รอบโรเตอร์ของเครื่องบราเบนเดอร์จากกระบวนการอัดขึ้นรูป	27
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด กับสูตรผสม ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป	28
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกหักกับความเร็วยรอบ โรเตอร์ของเครื่องบราเบนเดอร์ ขึ้นรูปจากกระบวนการอัดขึ้นรูป	29
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกหักกับสูตรผสม ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที ขึ้นรูปจาก กระบวนการฉีดขึ้นรูป	29
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสกับความเร็วยรอบโรเตอร์ของ เครื่องบราเบนเดอร์จากกระบวนการอัดขึ้นรูป	30
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสกับสูตรผสมที่ความเร็วรอบ โรเตอร์ 80 รอบต่อนาที ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป	31
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับความเร็วยรอบโรเตอร์เครื่องบราเบนเดอร์	32
รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	33
รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติผสมสูตร	34
รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีอัตราส่วน ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป	34
รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีอัตราส่วน ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป	35

สารบัญรูป ( ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกกับอัตราส่วนระหว่าง ยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	37
รูปที่ 4.15 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	39
รูปที่ 4.16 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	39
รูปที่ 4.17 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 70:30 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	40
รูปที่ 4.18 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 2.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	40
รูปที่ 4.19 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 2.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	41
รูปที่ 4.20 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 70:30 กำมะถัน 2.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	41
รูปที่ 4.21 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 3.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	42
รูปที่ 4.22 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 3.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	42
รูปที่ 4.23 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 70:30 กำมะถัน 3.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	43
รูปที่ 4.24 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	44
รูปที่ 4.25 Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)	44
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลและสูตรผสม	46

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สูตรพื้นฐานทั่วไปของผลิตภัณฑ์ยาง	9
ตารางที่ 3.1 สูตรที่ใช้ในการทดลองที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr	20
ตารางที่ 3.2 สูตรที่ใช้ในการทดลองที่ปริมาณกำมะถัน 2.0 phr	20
ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ในการทดลองที่ปริมาณกำมะถัน 3.0 phr	21
ตารางที่ 4.1 Scorch time และ Cure time ที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr	23
ตารางที่ 4.2 Scorch time และ Cure time ที่ปริมาณกำมะถัน 2.0 phr	24
ตารางที่ 4.3 Scorch time และ Cure time ที่ปริมาณกำมะถัน 3.0 phr	24
ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งของ TPNR สูตรต่างๆ	31
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC	36
ตารางที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์เจล	45



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาโดยมีการนำเทอร์โมพลาสติกผสมกับอีลาสโตเมอร์ในการผลิตพอลิเมอร์ผสม เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers, TPEs) ซึ่งเป็นกรนำเอาสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้าไว้ด้วยกัน และได้มีการนำเอาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เหมือนกับพอลิเมอร์ประเภทยาง และพลาสติกอื่นๆ พบว่าได้มีการนำมาใช้งานแทนยางวัลคาไนซ์กันอย่างมากมายสามารถนำไปใช้ทดแทนพอลิไวนิลคลอไรด์ หรือพลาสติกอื่น ๆ ที่มีความยืดหยุ่นไปจนถึงวัสดุที่มีความแข็ง เนื่องจากความสามารถในการผสมระหว่างเรซินเทอร์โมพลาสติกและอีลาสโตเมอร์ได้หลายชนิด อัตราส่วนต่าง ๆ ในการผสมให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแตกต่างกันไปตามความต้องการ นอกจากนี้กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์พบว่าจะไม่มีความยุ่งยาก และมีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่ายางเทอร์โมเซตมาก สามารถใช้กับเครื่องจักรในการผลิตเทอร์โมพลาสติกต่างๆ ได้โดยไม่ต้องเพิ่มขั้นตอนการวัลคาไนซ์ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และมีต้นทุนการผลิตต่ำ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่แตกต่างจากเทอร์โมพลาสติกและอีลาสโตเมอร์หรือยาง เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง นุ่มตัว ยืดหยุ่นได้ แต่แตกต่างจากยาง คือสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งคล้ายเทอร์โมพลาสติก จุดเชื่อมโยงในโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ สามารถยืดให้สายโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ติดกันเหมือนโครงร่างแหสามมิติในยาง แต่สามารถเปลี่ยนแบบย้อนกลับไปได้เมื่อให้ความร้อน[1,2] และกลับเข้ามารวมกันใหม่ได้เมื่อเย็นตัว จึงสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งเหมือนกับเทอร์โมพลาสติก ในกระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ สิ่งสำคัญที่ TPEs มีข้อได้เปรียบต่างจาก ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized Rubber) คือ ต้องการการผสมสูตรเพียงเล็กน้อยหรือไม่ต้องการการผสมสูตรก่อนนำไปใช้งาน เนื่องจาก TPEs ส่วนใหญ่พร้อมที่จะนำไปใช้งานได้ทันที ซึ่งป้องกันการแปรเปลี่ยนจากสาเหตุต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างแบทช์ (Batch) และยังช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการผสม มีปริมาณของผลผลิตที่ได้ต่อหน่วยดีกว่ายางวัลคาไนซ์ ของเสียที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ไม่เกิดฝุ่นควันที่มีพิษ ในกระบวนการผลิต TPEs ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับหน้าที่ที่ต้องการนำไปใช้งาน TPEs ที่สำคัญในปัจจุบันได้แก่

Polystyrene/Elastomer block copolymer, Polypropylene/Ethylene copolymer blends เทอร์โมพลาสติกของยางธรรมชาติ สามารถผลิตได้มากมายหลายสูตร โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติที่แตกต่างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างกันออกไป และให้คุณสมบัติเฉพาะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานประเภทต่างๆ ได้ดี การผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ของยางธรรมชาติยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ ซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ และยางธรรมชาติยังสามารถทำการผลิตได้ง่ายกว่ายางวัลคาไนซ์ โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการวัลคาไนซ์ ทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยที่คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงมากเกินไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (TPEs) จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
2. เพื่อศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้
3. เพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ให้มีสมบัติตามที่ต้องการ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
2. ศึกษาชนิดอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และสารตัวเติมต่างๆ ที่ใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ
3. ศึกษาชนิดและปริมาณของสารเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่เหมาะสม
4. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นการนำยางธรรมชาติซึ่งเป็นสินค้าส่งออกอันดับต้นๆ ของประเทศมาปรับปรุงสมบัติเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมทดแทนยางวัลคาไนซ์ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์
2. เพื่อเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ ซึ่งเดิมเป็นการส่งออกยางธรรมชาติในรูปร่างแผ่นรมควันซึ่งมีราคาถูก
3. เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใช้ใหม่ซึ่งเป็นการลดปริมาณขยะ

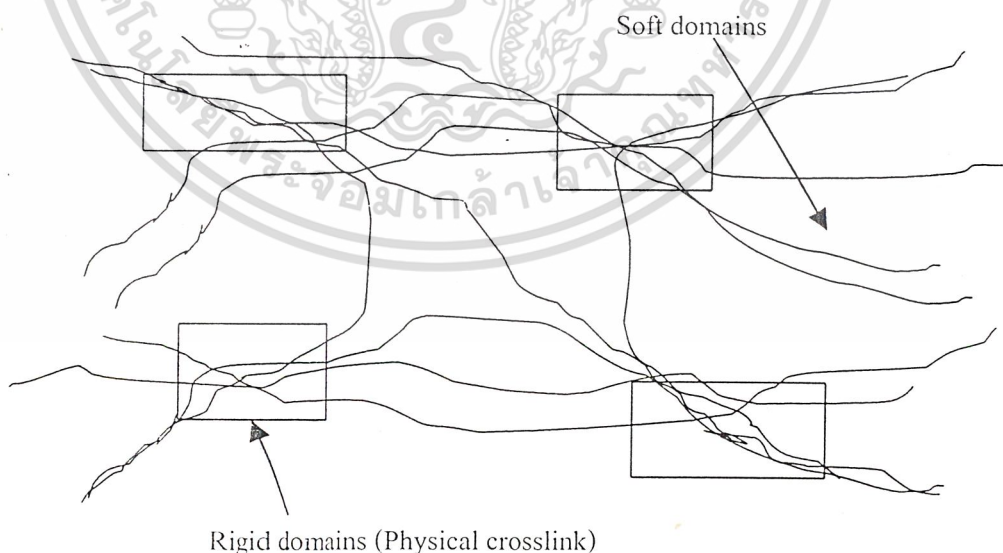
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer) เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะยืดหยุ่น นิ่มตัว คล้ายยาง สามารถขึ้นรูปและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เหมือนกับเทอร์โมพลาสติก

วิภาคของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ประกอบด้วยส่วนแข็ง (Hard thermoplastic segment) ซึ่งเป็นส่วนของเทอร์โมพลาสติกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ณ อุณหภูมิห้อง แต่สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน ส่วนแข็งมีความสำคัญในการสร้างบริเวณแข็ง (Rigid region) ที่ทำหน้าที่คล้ายกับเป็นการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink) และส่วนอ่อน (Soft rubbery segment) ซึ่งเป็นส่วนของยาง (ดังรูปที่ 2.1) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติก ( $T_m$ ) เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะหลอมเหลวและสามารถขึ้นรูปได้ และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของยางวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะมีความเปราะ (Brittle) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผ่าน  $T_m$  และ  $T_g$  จะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบย้อนกลับไปมาได้และสามารถเกิดขึ้นได้หลายครั้ง ด้วยเหตุนี้วัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จึงสามารถนำกลับมาขึ้นรูปได้ใหม่เหมือนกับเทอร์โมพลาสติก[1,3]



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [4]

การผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถทำได้โดยการผสมยางกับพลาสติกด้วยการผสมแบบง่าย ๆ (Simple blend) หรืออาจทำได้โดยการเชื่อมโยงในระหว่างการผสม (Dynamic vulcanization) ซึ่งเป็นการทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงในระหว่างที่ผสมกับพลาสติกหลอมเหลว โดยต้องทำในสถานะที่มีแรงเฉือนสูงและอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติกทำให้เกิดเป็นอนุภาคของยางขนาดเล็กที่กระจายอยู่ในเมตริกซ์ของเทอร์โมพลาสติก และมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้น การเชื่อมโยงดังกล่าวเป็นการเชื่อมโยงเพียงบางส่วน (Partially crosslinking) ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Permanent set)
- สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)
- การทนต่อการล้า (Fatigue resistance)
- เพิ่มการทนทานต่อของเหลวต่าง ๆ (Fluid resistance)
- เพิ่มความแข็งแรงในการหลอมเหลว (Melt strength)
- การใช้งานที่อุณหภูมิสูง (High temperature utilization)
- การเกิดการบวม (Die swelling) ในการอัดรีดแบบโพรไฟล์

การเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์และยางวัลคาไนซ์

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีข้อดีที่วัลคาไนซ์แล้วคือ

1. กระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ง่ายกว่ายางวัลคาไนซ์ เนื่องจากการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีขั้นตอนไม่มาก และใช้พลังงานน้อยกว่าการผลิตยางวัลคาไนซ์
2. เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปแต่ละรอบน้อยกว่ายางวัลคาไนซ์ เนื่องจากชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ต้องการเวลาในการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวเพียงสั้น ในขณะที่การผลิตยางวัลคาไนซ์จะต้องใช้เวลาที่นานกว่าในการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในแม่พิมพ์
3. วัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถนำมาขึ้นรูปได้โดยไม่จำเป็นต้องผสมกับวัสดุอื่นก่อน ในขณะที่การผลิตยางวัลคาไนซ์จะต้องมีการเติมสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง สารเพิ่มเสถียรภาพ สารช่วยผสม หรือสารตัวเติมต่าง ๆ
4. การผลิตยางวัลคาไนซ์มีเศษของเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่วนเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถนำเศษวัสดุ (Scrap) มาบดและนำมารีไซเคิลได้
5. เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีการคงรูปร่าง (Dimensional tolerances) มากกว่ายางวัลคาไนซ์

แต่อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานที่สำคัญคือ

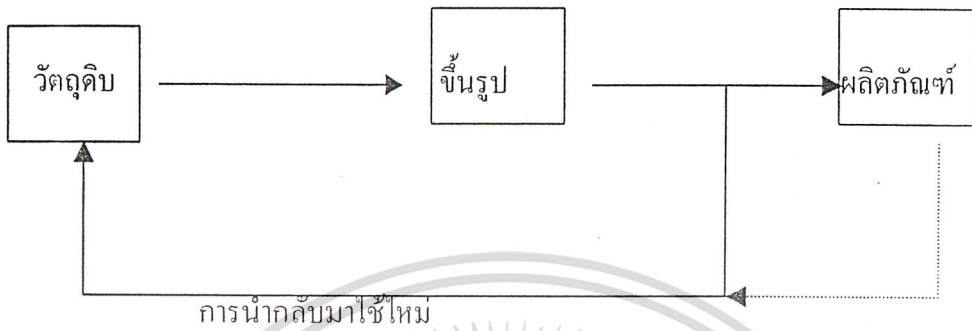
1. ในการขึ้นรูปวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ จะต้องมีการอบเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นจากความชื้น ในขณะที่การผลิตยางวัลคาไนซ์ไม่จำเป็นต้องมีการอบ
2. วัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของเทอร์โมพลาสติก ในขณะที่ยางวัลคาไนซ์จะไม่มีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิเกิดการเสียดสภาพโดยการเกิดไพโรไลซิสหรือออกซิเดชัน เนื่องจากไม่มีพฤติกรรมการหลอมเหลว (Melting behavior)

## 2.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [1]

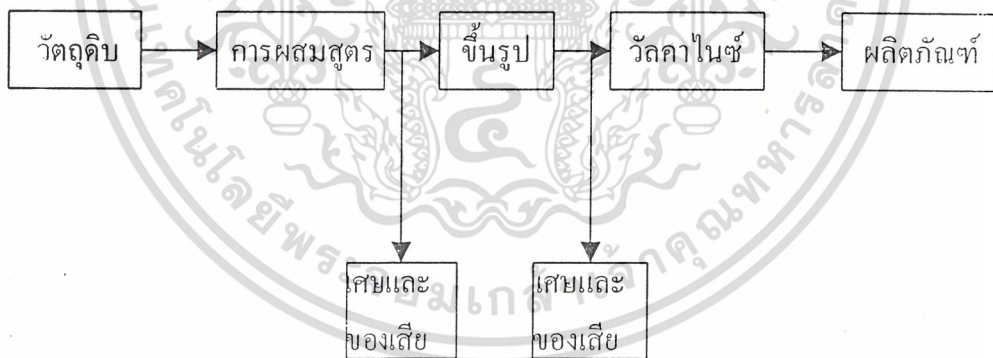
ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แบ่งออกตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาและทางเคมีที่แตกต่างกันดังนี้

1. โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymer) เช่น เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic Polyurethane) อิลาสโตเมอร์พอลิเอไมด์ (Elastomer polyamide) โคพอลิเอสเทอร์ (Copolyesters) สไตรีนิก บล็อก โคพอลิเมอร์ (Styrenic block copolymer)
2. ยางกับเทอร์โมพลาสติกที่ผสมกันแบบง่าย (Simple blend) พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากจะมีวัฏภาคแบบต่อเนื่อง (Continuous phase) และโดยส่วนใหญ่จะเป็นเทอร์โมพลาสติกเนื่องจากมีความหนืดต่ำกว่ายาง และพอลิเมอร์ที่เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ที่กระจายตัวอยู่จะมีวัฏภาคที่ไม่ต่อเนื่อง (Non-continuous phase)
3. Thermoplastic vulcanizates เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดนี้ได้จากเตรียมโดยวิธีการ ไดนามิกวัลคาไนเซชัน (Dynamic vulcanization) ต่างจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้จากวิธีผสมแบบง่ายซึ่งมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้นน้อยมากหรืออาจไม่มีเลย เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดนี้ มีการเชื่อมโยงมากกว่า จึงมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับยางวัลคาไนซ์มากกว่า

### กระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

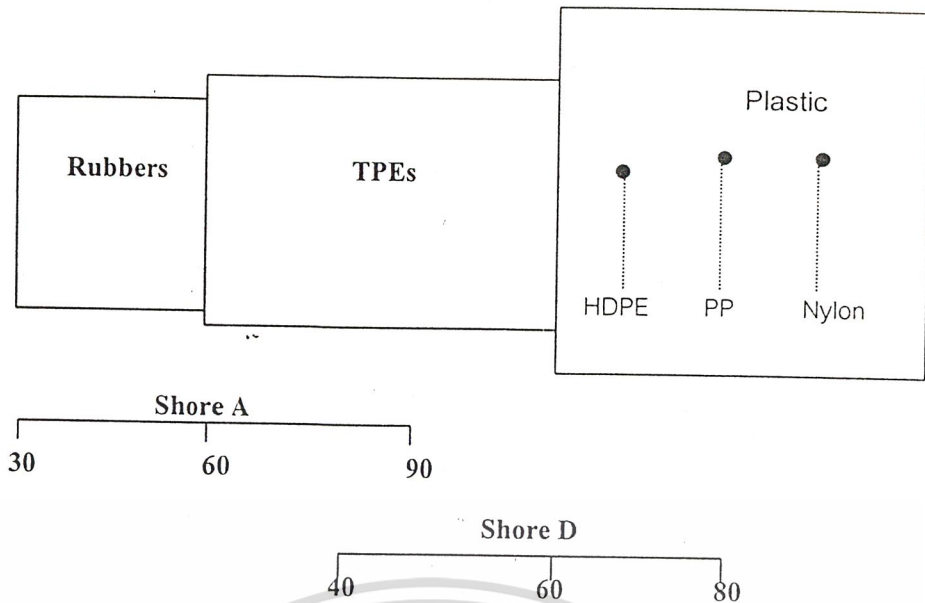


### กระบวนการขึ้นรูปยางเทอร์โมเซต



รูปที่ 2.2 แผนภาพการเปรียบเทียบกระบวนการขึ้นรูประหว่างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์กับยางเทอร์โมเซต [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงช่วงความแข็งของยางเทอร์โมพลาสติก ยางชนิดต่างๆ และพลาสติก [3]

## 2.2 สมบัติและการประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (TPNR) [3]

ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic natural rubber, TPNR) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทหนึ่ง ที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างยางและพลาสติก คือสามารถขึ้นรูปหรือทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปเช่นเดียวกับกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แต่มีคุณสมบัติพิเศษกว่าคือ มีคุณสมบัติยืดหยุ่นและโค้งงอ (Flexibility) มีการกระดอน (Resilience) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของยาง

ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุอื่นดังนี้

1. มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิยูรีเทน และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ
2. มีคุณสมบัติที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต พอลิเอทิลีน และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ
3. มีความทนทานต่อแรงกระแทกดีกว่าพอลิพรอพิลีน
4. มีความหนาแน่นต่ำกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิยูรีเทน
5. มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์
6. สามารถทนทานต่อน้ำและสารเคมีได้ดี

จากคุณสมบัติข้างต้นได้มีการนำเอายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ใช้ทดแทนยางวัลคาไนซ์ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องใช้ความยืดหยุ่นสูง
2. ใช้ทดแทนพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เอทิลีนไวนิลอะซิเตต พอลิยูรีเทน เป็นต้น
3. ใช้ในอุตสาหกรรมด้านใหม่ ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมรถยนต์พอลิโอเลฟิน

ถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์มีความยืดหยุ่นอยู่ในช่วงระหว่างยางและพลาสติกที่ใช้ในทางวิศวกรรม ซึ่งสามารถทำเป็นสูตรต่างๆเพื่อให้ได้ความแข็งและความเหนียวขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ที่ได้มีความแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 70 Shore A ถึง 70 Shore D โมดูลัสยืดหยุ่น (Flexural modulus) อยู่ในช่วงระหว่าง 1,000 ถึงมากกว่า 250,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยสามารถถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่นมาก หรือให้แข็งมาก แต่ยังคงมีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ดี และเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถขึ้นรูปได้เหมือนกับเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีกระบวนการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน เช่น การอัดรีด การอัดขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูป และการเป่าขึ้นรูป

-ใช้แทนยางที่มีสมบัติเชิงกลดี เช่น ใช้เคลือบล้อ แผ่นไดอะแฟรม ข้อต่อ อุปกรณ์กันกระแทก

-ใช้เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น ฉนวนหุ้มสายเคเบิลหรือสายไฟ

-ใช้เป็นอุปกรณ์รถยนต์ เช่น ข้อต่อ วัสดุหุ้มสายเบรก ที่ปิดถุงลมอัดอัตโนมัติ (Automatic air bag cover)

-ใช้เป็นวัสดุในการผลิตท่อที่ใช้ในอุตสาหกรรม

### 2.3 วัตถุดิบในการเตรียมยางผสมสูตร [6]

ปัจจุบันมีวัตถุดิบทั้งยางและสารเคมีต่างๆให้เลือกใช้เป็นจำนวนมากมาย ดังนั้น การเลือกใช้ยางและสารเคมีต่างๆให้เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ คือ

1. ความเข้าใจในกระบวนการที่เลือกใช้
2. ความเข้าใจในสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบที่ใช้
3. การที่เลือกใช้วัตถุดิบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตรงตามความต้องการ
4. ระบบการทำให้ยางคงรูปเพื่อการนำมาใช้ให้ได้ผลอย่างเต็มที่
5. วิธีการตรวจสอบขั้นตอนการผลิตและการทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้

การออกแบบสูตรส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางแต่ละชนิดนั้นมีหลักเกณฑ์สำคัญที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ต้องมีการเริ่มต้นของกระบวนการที่ถูกต้องและแม่นยำเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพตรงกับความต้องการ

2. ออกแบบสูตรที่ให้ผลผลิตในราคาที่ถูกต้องและความสะดวกในกระบวนการผลิต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. สมบัติที่ถูกต้องของผลิตภัณฑ์

โดยปกติการใช้ปริมาณสารต่างๆที่ใช้คิดเทียบเป็นสัดส่วนต่างๆต่อยาง 100 ส่วนเป็นเกณฑ์ (Based on a total of 100 parts of combinations of rubbers used ; phr = parts per hundred of rubbers)

โดยสูตรพื้นฐานทั่วไปของผลิตภัณฑ์ยางจึงประกอบด้วยสารต่างๆดังนี้

#### ตารางที่ 2.1 สูตรพื้นฐานทั่วไปของผลิตภัณฑ์ยาง [6]

สาร	ส่วน (phr)
ยาง (Rubbers)	100
กำมะถัน (Sulfur)	2.5 – 3.5
สารกระตุ้นสารเร่ง (Activator)	1 – 5
สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator)	0.5 – 1.5
สารเพิ่มเนื้อ (Filler)	ตามที่ต้องการ
สารตัดสายโซ่ โมเลกุลยาง (Peptizer)	5 – 10
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Antioxidant)	1 – 2

จากส่วนผสมของสารเคมีต่างๆตามสูตรพื้นฐานที่กล่าวข้างต้นนี้ เห็นว่าปริมาณการใช้สารแต่ละชนิดนั้น ไม่ได้จำกัดแน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต

## 2.4 หน้าทีของสารเคมีต่างๆ [6]

### 2.4.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubbers)

มีโครงสร้างสูตร โมเลกุลแบบ cis – 1,4 polyisoprene ที่เตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติ (Hevea latex) ซึ่งเป็นของเหลวที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยหรือก้อนของแข็งที่ลอยตัวอยู่อย่างเสถียร และมีปริมาณยางแห้ง (Dry rubbers content) ประมาณ 30 – 40 % นำมาเทกซ์มาเติมสารที่ช่วยทำให้ยางแข็งตัว จากนั้นมีการขึ้นรูปและผ่านลูกกลิ้งเพื่อทำให้ยางบางลงและเป็นแผ่น นำยางที่เตรียมได้เข้าอบควัน เพื่อให้ยางแห้งและช่วยทำให้ยางไม่ขึ้นรา ยางที่ได้จะมีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้างระหว่าง  $30 - 10^7$  g/mol สามารถตกผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ ( $\sim -25^{\circ}\text{C}$ ) หรือเมื่อมีการดึงยืด (Strain induced crystallization) ยางธรรมชาติจะมีความเด่นในสมบัติทางกายภาพ ซึ่งรวมทั้งด้านความทนทานต่อการสึกหรอ และความทนทานต่อ

อุณหภูมิต่ำ มีความยืดหยุ่นสูง แต่ไม่ทนต่อการเสียดสีสภาพเมื่อสัมผัสกับสารเคมีทางกล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Mechanochemical degradation) และง่ายต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของ  $O_2$  และ  $O_3$  ซึ่งทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้

#### 2.4.2 สารทำให้ยางคงรูป (Crosslink agents)

สารทำให้ยางคงรูปตัวแรกที่ค้นพบโดย Goodyear ในปีค.ศ. 1893 คือ กำมะถัน (Sulfur) ธาตุอื่นๆที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับกำมะถัน เช่น ซีลีเนียม และเทลลูเรียม และอนุพันธ์ของธาตุเหล่านี้ก็สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาของยางคงรูปได้เช่นเดียวกับกำมะถัน สำหรับธาตุที่กล่าวถึงเหล่านี้ใช้เมื่อมีความต้องการพิเศษ เช่น ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานต่อความร้อน เป็นต้น

ปฏิกิริยาของยางคงรูป หรือปฏิกิริยาวัลคาไนซ (Vulcanization) เป็นศัพท์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่ออธิบายถึงกระบวนการที่ยางมีปฏิกิริยากับสารเคมีโดยมีความร้อนร่วมด้วย ทำให้ยางเปลี่ยนจากสถานะที่ไม่คงรูปไปเป็นสถานะที่คงรูปซึ่งอยู่ในสถานะที่เรียกว่าคล้ายยาง “Rubbery or elastic state” คือมีความยืดหยุ่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ไออาร์ ยางเอสบีอาร์ และยางไนไตร์ทำปฏิกิริยากับกำมะถัน หรือสารประกอบที่ให้กำมะถัน และเกิดยางคงรูปได้ แต่ยางนีโอพรีนสามารถทำให้ยางคงรูปโดยใช้พวกโลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น

#### 2.4.3 สารเร่งให้คงรูป (Accelerators)

การใช้สารเร่งให้ยางคงรูปเพื่อลดเวลาที่ทำให้ยางคงรูปโดยการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของยางคงรูปให้เร็วขึ้น โดยปกติแล้วการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์นี้ด้วย

โดยทั่วไปแล้วยางสังเคราะห์ต้องการปริมาณสารเร่งให้ยางคงรูปมากและต้องการกำมะถันน้อยกว่ายางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางสังเคราะห์มีส่วนของโครงสร้างที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยา (Non - vulcanizable structure)

#### 2.4.4 สารกระตุ้นสารเร่ง (Activators)

สารนี้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนเมื่อเกิดปฏิกิริยากับสารเร่งให้ยางคงรูป ซึ่งเกิดการช่วยให้เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ยางคงรูปเร็วยิ่งขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นด้วย โดยทั่วไปสารกระตุ้นสารเร่งได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก (หรือกรดไขมันอื่น ๆ) กับยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ ยางไออาร์ ยางไอโออาร์

### 2.4.5 สารเพิ่มเนื้อ (Fillers)

สารเพิ่มเนื้อที่ใช้ผสมกับยางอาจแยกตามความสามารถของสารได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรก คือช่วยเพิ่มเนื้อ หรือเสริมความแข็งแรง (Reinforcing) ส่วนอีกประเภทหนึ่งไม่ช่วยเสริมความแข็งแรง (Non – reinforcing) ให้กับยาง และอาจแบ่งตามลักษณะของสารเป็นสารเพิ่มเนื้อชนิดมีสีดำคือ พวกรวมดำ (Carbon black) กับชนิดไม่มีสีดำ (Non – black filler)

สารเพิ่มเนื้อพวกสีดำมีจำหน่ายเป็นเกรดต่างๆตามความสามารถในการปรับปรุงสมบัติให้ยาง ตัวอย่างเช่น SAF (Super Abrasion Resistance) HAF (high Abrasion Resistance) FEF (Fast Extrusion Furnace) GPF (General Purpose Furnace) เป็นต้น

ส่วนสารเพิ่มเนื้อพวกไม่มีสีดำ ได้แก่ ไซนาเคลย์ (China clay) แป้งทาลคัม (Talc) เป็นต้น สารเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการผลิตเท่านั้นแต่ยังช่วยทำให้ยางผสมสารต่างๆแล้วมีความเรียบ (Smooth) ง่ายต่อการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องผ่านกระบวนการรีดคลึง (Calendering) เมื่อมีความต้องการสารเพิ่มเนื้อที่ไม่มีสีดำ และให้ความแข็งแรงกับยางด้วย ต้องใช้ซิลิกาช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพดี และสารนี้มีความจำเป็น โดยเฉพาะเมื่อใช้ยางสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามสารเพิ่มที่สามารถให้ความแข็งแรงได้ดีก็ยังคงเป็นประเภทสารเพิ่มเนื้อสีดำ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการผลิตยางล้อรถยนต์ อย่างไรก็ตามการจะเลือกใช้สารเพิ่มเนื้อ เพื่อช่วยให้เสริมความแข็งแรงกับยางนั้นขึ้นอยู่กับสีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการด้วย ในการเลือกใช้สารเพิ่มเนื้อนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อสภาพการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่อสารเคมีต่างๆ (Chemical resistance) สารพวกซิลิกา หรือซิลิเกต ไซนาเคลย์ มีความเหมาะสมในการใช้งานในสถานะที่เป็นกรดมากกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนพวกเบเรียมซัลเฟตเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับกรดมาก

### 2.4.6 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่สารที่ทำให้ยางนิ่ม โดยช่วยลดน้ำหนักโมเลกุลยาง (Peptizing agents) พวกทำให้ยางนิ่ม โดยช่วยหล่อลื่น โมเลกุลยาง (Plasticizers) พวกช่วยเพิ่มสมบัติการเหนียวติดกันของยาง (Tackifier) ช่วยลดปัญหายางติดเครื่องขณะบดผสมกับสารหล่อลื่น (Lubricants) สารช่วยในกระบวนการผลิตเหล่านี้มีส่วนสำคัญมาก ดังต่อไปนี้

1. ช่วยเร่งอัตราและควบคุมองศาการลดขนาดของสารพวกรวมดำในเนื้อยาง
2. ช่วยเพิ่มการแพร่กระจายของพวกสารเพิ่ม โดยเฉพาะพวกรวมดำในเนื้อยาง
3. ช่วยลดความหยุ่นตัวของยางที่ยังไม่ได้ผ่านปฏิกิริยาทำให้คงรูป
4. สามารถทำให้ยางมีความเหนียวติดกันเองดีขึ้น
5. อำนวยความสะดวกในระหว่างการผลิต โดยเฉพาะด้านการเตรียม blank ใส่ในแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดขนาดโมเลกุลยางธรรมชาติขณะบดด้วยเครื่องมือกล (Mastication) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ด้วยการเติมสารช่วยคือ Peptizing agents สารเคมีเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการลดน้ำหนักโมเลกุลยางขณะบดด้วยเครื่องมือกล ปกติแล้วไม่มีความจำเป็นต้องใช้สารช่วยฉีกขาดโมเลกุลยางกับยางพวก SBR CR หรือ EPDM สารช่วยลดน้ำหนักโมเลกุลยางหลายชนิดมีส่วนประกอบของ Oil soluble sulphonic acids

ในการที่ช่วยให้ผิวยางโดยเฉพาะพวก CR เรียบ ขณะที่ทำการผลิตควรใช้น้ำมันพวกไมเนอรอล หรือน้ำมันพืช บีโตรเลียมเฮลลี พาราฟิน หรือแว็กซ์ และปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับสมบัติขั้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์

สารช่วยหล่อลื่นโมเลกุลยางมักใช้กับยางต่างๆไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการสารเหล่านี้เป็นพวก Phthalates, Sebacates, Alizarates และ Organic phosphates เป็นต้น

#### 2.4.7 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Age resistors)

โดยทั่วไปยางมีขีดจำกัดในการต่อต้านการเสื่อมสภาพ ดังนั้นมีความจำเป็นต้องเพิ่มสารที่มีความสามารถป้องกันยางเสื่อมสภาพ ในสภาพการนำผลิตภัณฑ์ยางไปใช้งาน โอกาสที่ยางเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเกิดปฏิกิริยากับโอโซนเป็นไปได้เสมอ และผลจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ผิวยางแตก สูญเสียสมบัติทางกายภาพใช้งานไม่ได้ผล ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใส่สารพวกต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidants) สารพวกต่อต้านปฏิกิริยาของยางกับโอโซน (Antiozonants) ยางบางชนิด เช่น CR IIR หรือ EPDM ล้วนแต่เป็นยางที่มีคุณสมบัติทนทานต่อความเสื่อมสภาพแต่ในการใช้ยางเหล่านี้มีการแนะนำให้ใส่สารเคมีช่วยป้องกันยางเสื่อมสภาพด้วยเล็กน้อย

สารป้องกันยางเสื่อมสภาพที่ใช้กันสมัยเริ่มแรกนั้นเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ สารเริ่มแรกเป็นพวก Aromatic amines และ Phenols และปัจจุบันที่ยังคงใช้กันอยู่ปกติมักใช้สารป้องกันยางเสื่อมสภาพในปริมาณ 1 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน อย่างไรก็ตามปริมาณการใช้สารขึ้นอยู่กับความต้องการรวมทั้งพื้นฐานส่วนผสมของสูตรที่ใช้สาร Antioxidants บางชนิดมีความสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจำกัดเด่นเฉพาะการเสื่อมสภาพแบบใดแบบหนึ่ง เช่น สามารถต้านทานความร้อน หรือต้านทานการเกิดรอยแตกเนื่องจากการหักงอ (Flex cracking) หรือต้านทานสภาพอากาศทั่วไปซึ่งรวมทั้งการต่อต้านปฏิกิริยาของออกซิเจนและของโอโซน หรือแสงอุลตราไวโอเล็ต หรือความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น

ความเสื่อมสภาพของยางอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของโอโซนมีผลเสียหายรุนแรงมากกว่าผลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของออกซิเจน ปกติสารพวกต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันส่วนมากมีความสามารถต้านทานปฏิกิริยาเคมีของโอโซนบ้าง แต่ถ้าในสภาพที่มีโอโซนมาก (เช่น ในพื้นที่ที่มีแสง

เอกสารถิ่นอวกาศ) โอโซนรอบบริเวณของ Electrical discharge โกลด์บริเวณมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการเกิดประกายไฟ) ผลผลิตกันขั้วอย่างที่จำเป็นต้องมีส่วนผสมของสารพวกต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือพวกต่อต้านปฏิกิริยาของโอโซนร่วมอยู่ด้วย

#### 2.4.8 สารอื่นๆ

การใช้สารอื่นๆดังที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการในสมบัติพิเศษบางประการ

##### สายตัดโซ่โมเลกุลหรือเปปไทเซอร์ (Peptizers)

สารเหล่านี้จัดเป็นสารพวกช่วยในกระบวนการผลิตได้ สารนี้ทำหน้าที่ลดน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ (Chemical scission) ตัวอย่างสารพวกนี้ เช่น pepton 22 (Di (o-Benzamidophenyl)disulphide)

##### สารปรับความแข็ง (Stiffeners)

สารพวกช่วยให้ยางมีความแข็งนี้ใช้ช่วยปรับความแข็ง โดยเฉพาะกับยาง ที่มี Plasticity ต่ำ ปริมาณที่ใช้เพียงเล็กน้อย ตัวอย่างสารพวกนี้ได้แก่ พวก Dihydrazine sulphate ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงมาก จึงใช้ในปริมาณเพียง 1/4 - 1/8 เปอร์เซ็นต์

##### สารป้องกันการลุกติดไฟ (Frame - retardant)

สารพวกนี้ได้แก่ Chlorinated materials และซิลิเนียม (Si) อย่างไรก็ตามควรระมัดระวังในการใช้สารเหล่านี้เพราะเป็นสารพิษ

##### สารให้สีและผงสี (Colours and Pigment)

สารพวกทำให้เกิดสีต่างๆมีจำหน่ายพร้อมทั้งคำชี้แจงการใช้ ผลผลิตกันขั้วประเภทสีต่างๆ ควรจะใช้สาร Non - staining antioxidant เพื่อให้สีของยางสะอาดทำเป็นสีที่ต้องการได้ การใช้ Iithopone (ZnS / BaSo) หรือ Titanium oxide ช่วยให้ยางมีสีมันสดใสดีขึ้น

##### สารทำให้เกาะติด (Tackifiers)

สารพวกช่วยให้เกิดความเหนียวติดดีขึ้น ได้แก่พวก Wood resins, Coumarone resins, Pine tar เป็นต้น

### สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents)

เป็นสารที่ให้ก๊าซที่อุณหภูมิขณะที่ยางเกิดการคงรูป จึงทำใหยางเกิดเป็นฟองขึ้น สารนี้ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางพาราที่ต้องการให้เป็นรูพรุน สารที่ใช้เพื่อใหยางเป็นรูพรุน ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต (โดยมีกรดไขมันหรือกรดโอลิอิกมากพอ) ซึ่งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพวกสารอินทรีย์บางชนิดให้ก๊าซไนโตรเจน ส่วนพวกแอมโมเนียคาร์บอเนตชนิดเม็ด (Pellets) ให้ก๊าซแอมโมเนีย ขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นในยางนั้นควบคุมได้ด้วยชนิดของสารที่ให้ก๊าซและอัตราของการเกิดก๊าซ

### สารทำให้เกิดการเชื่อมต่อนของพันธะ (Bonding agents)

การใช้สารพวกนี้จำกัดเฉพาะงานบางอย่าง เช่นการใช้ Manganese หรือ Cobalt resinoleates เพื่อช่วยปรับปรุงการเชื่อมของยางกับแผ่นทองเหลืองหรือสังกะสี และใช้ Resorcinol formaldehyde / Latex เพื่อช่วยปรับปรุงการเชื่อมของยางติดกับเนื้อของ Rayon, Polyester เป็นต้น

### สารระงับกลิ่น (Deodorants)

เป็นสารที่ใช้เพื่อช่วยระงับกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งอาจใช้พวกสารอะโรมาติก พบว่าสารต่างๆมีหน้าที่เฉพาะตัว การเรียงลำดับสารในสูตรส่วนใหญ่เรียงตามลำดับการเติมลงในเครื่องบดผสม ทั้งนี้เพื่อความสะดวกของผู้บดผสมที่กำหนดลำดับการเติมสารระหว่างการบดผสม

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L. Pasaree และ Coran A.Y. [7] ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการติดตามการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาระหว่างที่ทำการผสม ในงานวิจัยได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 ทำการผสมโดยเครื่อง Brabender plasticorder ที่อุณหภูมิ 160 °C ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ทำการผสมและจับเวลาเพื่อเก็บตัวอย่างที่เวลาผสมต่างๆกัน ทดสอบสัณฐานวิทยาด้วย SEM โดยเตรียมพื้นผิวตัวอย่างด้วยอัลตราไมโครโทม (Ultramicrotome) ที่อุณหภูมิ -140 °C จากนั้นนำมาผ่านขั้นตอนที่แตกต่างกัน 3 วิธีดังนี้คือ

1. การย้อมสีด้วยไอของ OsO<sub>4</sub> เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และนำไปเคลือบด้วยคาร์บอน
2. การขจัดส่วนของยางธรรมชาติออกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 ชั่วโมงและนำไปเคลือบพื้นผิวด้วยแพลทินัมอัลลอยด์
3. การเชื่อม โยงส่วนของยางธรรมชาติโดยใช้ S<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> เป็นเวลา 60 นาที และขจัดกำมะถันที่มากเกินไปออกโดยการสกัดด้วยโทลูอีน จากนั้นขจัดส่วน HDPE โดยใช้ไซลีนที่เดือด และนำมาเคลือบด้วยแพลทินัมอัลลอยด์

ทำการผสมและจับเวลาเพื่อเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆพบว่าการใช้การย้อมสีด้วย OsO<sub>4</sub> สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาจากตัวอย่างได้อย่างชัดเจน เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยนี้

S. Valvic, M. Topic, M. Andreis, F. Ranogajec, and Z. Versli [8] ศึกษาการเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างพอลิสไตรีนและยางธรรมชาติ โดยเตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ (NR Latex) มีปริมาณยางแห้ง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมกับพอลิสไตรีนที่เป็นสารแขวนลอยในน้ำ โดยการผสมในสถานะของน้ำยางธรรมชาติช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น จากผลการทดลองพบว่าสัณฐานวิทยาของตัวอย่างจากการทดสอบด้วย TEM พบว่าอนุภาคของน้ำยางธรรมชาติมีขนาดระหว่าง 0.75 และ 1.5 ไมโครเมตร และอนุภาคพอลิสไตรีนระหว่าง 30 และ 70 นาโนเมตร และการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มีค่าลดลง

S. Al-malaika และ E.J. Amir [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะในกระบวนการผสมอัตราส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีนในอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อสมบัติการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิพรอพิลีน ในการทดลองมีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิระหว่าง  $160 - 180^{\circ}\text{C}$  และเวลา 5 - 11 นาที ขึ้นรูปพอลิเมอร์ในเครื่องอัดแบบร้อนที่  $180^{\circ}\text{C}$  ให้เป็นแผ่นที่มีความหนา 200 ไมโครเมตร หรือใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป อุณหภูมิของแม่พิมพ์  $60^{\circ}\text{C}$  ความดันในการฉีด 47 MPa ที่ความเร็วสกรู 50 รอบต่อนาที เวลาในการหล่อเย็น 16 วินาที ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มีค่าลดลง ที่อุณหภูมิระหว่าง  $160 - 180^{\circ}\text{C}$  และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ

A. Mousa, U.S. Ishaku, และ Z.A. Mohd Ishak [10] ศึกษาสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงแบบพลวัต (Dynamic crosslink) ของพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) กับยางธรรมชาติที่ถูกอีพอกซิไดซ์ (Epoxidised natural rubber, ENR) ในการทดลองมีการเตรียมโดยการผสม PVC ที่อยู่ในรูปของผงกับ ENR ในเครื่องบราเวนเดอร์ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที และใช้เวลาผสม 8 นาที จากนั้นเติมสารเชื่อมโยงกำมะถันและผสมต่อไปนี้ที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที จนค่าทอร์คมีค่าคงที่ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่เย็น ให้มีความหนา  $\sim 1$  มิลลิเมตร และนำแผ่นผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตัดและนำไปผสมอีกครั้งด้วยเครื่องบราเวนเดอร์ที่  $150^{\circ}\text{C}$  ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อน นำไปทดสอบการเชื่อมโยงด้วย Moving die rheometer (MDR 2000) จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงกำมะถันเพิ่มขึ้น ค่าทอร์คมีค่าสูงขึ้น

### สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงอยู่ในช่วง  $140 - 160^{\circ}\text{C}$
2. ทำให้ทราบถึงกระบวนการในการผสมยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติก
3. ทำให้ทราบถึงสภาวะและตัวแปรที่มีต่อกระบวนการการผสม
4. ทำให้ทราบถึงชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการผสมสูตรยางธรรมชาติ
5. เพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

## บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

### 3.1 แผนการศึกษา

โครงการพิเศษนี้จะศึกษาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยมีขอบเขตดังต่อไปนี้

**ตอนที่ 1** การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

1. ศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลว สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจาก Differential scanning calorimeter (DSC)
2. ศึกษาอุณหภูมิ ความเร็วรอบของเครื่องผสมแบบปิดและเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ผ่านเครื่องผสมแบบปิด

**ตอนที่ 2** การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร

1. ศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติผสมสูตร
2. ศึกษาสภาวะในแง่รูปของยางธรรมชาติผสมสูตรที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่อง Cure elastomer

**ตอนที่ 3** การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

1. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. ศึกษาอุณหภูมิ ความเร็วรอบ โรเตอร์ของเครื่องผสมแบบปิด เวลาที่ใช้ในการผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

**ตอนที่ 4** การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

1. กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Compression molding process)
2. กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process)

**ตอนที่ 5** การทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

1. การทดสอบการเชื่อมโยง มาตรฐาน ASTM D2084
2. การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) มาตรฐาน ASTM D638

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบความแข็ง (Hardness tests)                      มาตรฐาน ASTM D2240
- 3. การทดสอบสัณฐานวิทยา ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
- 4. การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Differential scanning calorimeter (DSC) และ Thermogravimetric analyser (TGA)

### 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

#### สารเคมี

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene) บริษัท บางกอกพอลิเอทิลีน จำกัด เกรด Injection ดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index) 13 กรัม / 10 นาที
3. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
4. กรดสเตียริก (Stearic acid)
5. กำมะถัน (Sulfur)
6. สารตัวเร่ง CBS (N - Cyclohexylbenzothiazole - 2 sulfonamide)
7. พอลิเอทิลีน แวกซ์ (PE wax)
8. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เออร์กานอกซ์ (Irganox)
9. ตัวทำละลาย ไทลีน ( Xylene)

#### อุปกรณ์

1. เครื่อง Brabender plasticorder บริษัท C. melchers & Coperation
2. เครื่อง Hakke rheomix
3. เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (2 - Roll Mill) บริษัท แลบทেকเอนจิเนียริง จำกัด
4. ตู้อบ (50 - 200 °C)
5. บริเวณที่เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
6. เครื่องบดพอลิเมอร์ (Grinding machine)
7. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine)
8. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น LP 20 บริษัท แลบทেকเอนจิเนียริง จำกัด
9. เครื่องตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบ
10. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) บริษัท LLOYD Model LR 30K จำกัด
11. เครื่องวัดการคงรูปของยาง (Curelaster) บริษัท Nichigo Shigi Model II F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เครื่องวัดการคงรูปของยาง (Curelaster) บริษัท Nichigo Shigi Model II F
12. เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)
13. เครื่อง Thermogravimetric analyser (TGA)
14. เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer type A and D) บริษัท Intro enterprise CO.,LTD
15. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) บริษัท Shimadzu จำกัด

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. การศึกษาสภาวะการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. การเตรียมยางผสมสูตร
3. การศึกษาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางธรรมชาติผสมสูตร
4. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้กัมมะถันเป็นสารเชื่อมโยง
5. การศึกษาการเชื่อมโยงของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง Curelaster
6. การทดสอบคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

### 3.4 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1. การศึกษาสภาวะการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

1. การศึกษาสภาวะการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

1.1 ชั่งน้ำหนักพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ประมาณ 6.0 – 7.0 มิลลิกรัม วางลงใน Aluminum pan

1.2 วางสารตัวอย่างลงทางด้านขวา และสารอ้างอิงลงทางด้านซ้ายของเตาเผา

1.3 ใช้สภาวะในการศึกษาที่มีอัตราการให้ความร้อนที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่  $10\text{ ml}/\text{min}$

1.4 ใช้อุณหภูมิการศึกษาตั้งแต่  $40 - 200^{\circ}\text{C}$

2. การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเมื่อเวลาคงที่ โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด

ตั้งสภาวะของเครื่อง Brabender ที่อุณหภูมิ  $140^{\circ}\text{C}$  ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 50 กรัม จับเวลาที่ทำให้ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลวหมด โดยสังเกตได้จากค่าทอร์คที่ลดลงมาอยู่ในระดับที่มีค่าคงที่ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 150°C และ 160°C ตามลำดับ

## ตอนที่ 2 การเตรียมยางผสมสูตร

1. ชั่งสารเคมีตามสูตรดังตารางที่ 3.1 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.1 ขางผสมสูตรที่ใช้ในการทดลองที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
Natural rubber	50	60	70
HDPE	50	40	30
ZnO	5	5	5
Stearic acid	2	2	2
Sulfur	1.5	1.5	1.5
PE wax	2	2	2
Irganox	1	1	1
CBS	1	1	1

ตารางที่ 3.2 ขางผสมสูตรที่ใช้ในการทดลองที่ปริมาณกำมะถัน 2.0 phr

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
Natural rubber	50	60	70
HDPE	50	40	30
ZnO	5	5	5
Stearic acid	2	2	2
Sulfur	2	2	2
PE wax	2	2	2
Irganox	1	1	1
CBS	1	1	1

ตารางที่ 3.3 ยางผสมสูตรที่ใช้ในการทดลองที่ปริมาณกำมะถัน 3.0 phr

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
Natural rubber	50	60	70
HDPE	50	40	30
ZnO	5	5	5
Stearic acid	2	2	2
Sulfur	3	3	3
PE wax	2	2	2
Irganox	1	1	1
CBS	1	1	1

2. บดยางด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 15 นาที และควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งไม่ให้สูงเกินกว่า 60 °C
3. ผสมสารเคมีต่างๆลงในยาง ยกเว้น กำมะถันและสารตัวเร่ง CBS ตัดยางบนลูกกลิ้งบดยางสลับซ้ายขวาประมาณ 8 นาที
4. เมื่อเวลาผ่านไป 8 นาทีเติม กำมะถันและสารตัวเร่ง CBS ลงในยาง ทำการบดผสมต่อไปจนกระทั่งยางมีความอ่อนตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 5 นาที
5. เมื่อผสมยางกับสารต่างๆเสร็จแล้ว ตัดยางไปตามความยาวของลูกกลิ้งและนำออก

ตอนที่ 3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในอัตราส่วนต่างๆโดยใช้กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง

1. หลังจากเตรียมยางผสมสูตรตามสูตรในตอน ที่ 2 แล้วนำไปทดสอบการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการคงรูปของยาง (Curelaster)
2. เตรียมยางธรรมชาติผสมสูตรข้าง ใใส่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงก่อนในเครื่องบราแทนเดอร์ที่ความเร็วโรเตอร์ 60 80 และ 100 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 160 °C จนพอลิเอทิลีนเกิดการหลอมเหลวหมดจากนั้นใส่ยางผสมสูตร โดยใช้เวลาในการผสมให้อยู่ในช่วงเวลาไม่เกิน Scorch time ที่ได้จากเครื่องวัดการคงรูปของยาง

3. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกประมาณ 5 กรัม เพื่อนำไปวัดการเชื่อมโยง ส่วนที่เหลือนำเอกละเอียดเป็นอนุภาคที่ละเอียดกว่าสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มาบดด้วยเครื่องบด (Grinder)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 4 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

1. กระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ขนาด 2 มิลลิเมตร ทำการ pre-heat พิมพ์ 5 นาที จากนั้นใช้เวลาในการอัดขึ้นรูป 5 นาที
2. กระบวนการฉีดขึ้นรูปโดยใช้สภาวะดังแสดงในภาคผนวก ก

ตอนที่ 5 การทดสอบคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

1. การทดสอบการเชื่อมโยง
2. การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) สภาวะที่ใช้ดังนี้

Load cell 30 kN

Test speed 100 mm/min

- การทดสอบความแข็ง (Hardness tests)

3. การทดสอบสมบัติทางความร้อน

- TGA

- ชั่งตัวอย่างประมาณ 10-20 กรัม

- อัตราการให้ความร้อน 20 °C / min

- ช่วงอุณหภูมิ 200-600 °C

4. การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา เตรียมตัวอย่างได้ดังนี้

- แช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว 10 นาที จากนั้นหักตัวอย่างพยายามอย่าให้รอยที่หักถูกสัมผัส

- นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีนเดือด อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 5 วินาที จากนั้นนำออกมาทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง SEM

5. การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เจล

การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เจล (%Gel) ทำโดยการเตรียมตัวอย่างขนาด 3 x 5 x 1 มิลลิเมตรแช่ชิ้นงานตัวอย่างในตัวทำละลายไซลีน (Xylene) เป็นเวลา 25 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างมาอบ โดยใช้เครื่องอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำมาคำนวณตามสูตร

$$\%Gel = (C_{\text{หลังอบ}}/C_{\text{ก่อนอบ}}) \times 100 \quad \text{เมื่อ } C \text{ คือ น้ำหนัก (กรัม)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการดำเนินงานโครงการงานวิจัยการศึกษาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ผลงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

การศึกษาปริมาณกำมะถันที่เหมาะสมที่ใช้ผสมสูตรในยางธรรมชาติด้วยเครื่อง Curelaster โดยใช้ปริมาณกำมะถัน 1.5 2.0 และ 3.0 phr เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 140-170 °C พบว่าที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr อุณหภูมิ 160 °C จะได้ Scorch time ( $t_2$ ) และ Cure time ( $t_{90}$ ) ที่เหมาะสมกล่าวคือมี Scorch time ประมาณ 2 นาที และ Cure time ประมาณ 3.5 นาที เนื่องจากที่สภาวะนี้ HDPE สามารถหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ทันเวลาและใช้เวลาในการขึ้นรูปพอเหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.1 Scorch time และ Cure time ที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr

Temperature (°C) \ Time (min)	Scorch time	Cure time
140	5.25	11.00
150	2.95	6.55
160	1.75	3.50
170	1.10	2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 Scorch time และ Cure time ที่ปริมาณกำมะถัน 2.0 phr

Time (min) / Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Scorch time	Cure time
140	4.15	13.20
150	2.20	6.50
160	1.20	3.75
170	0.90	1.60

ตารางที่ 4.3 Scorch time และ Cure time ที่ปริมาณกำมะถัน 3.0 phr

Time (min) / Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Scorch time	Cure time
140	3.45	9.00
150	1.95	6.20
160	1.10	4.00
170	0.90	2.30

#### 4.1 สมบัติเชิงกล

##### 4.1.1 ศึกษาความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องบราเนนเดอร์ที่เหมาะสม

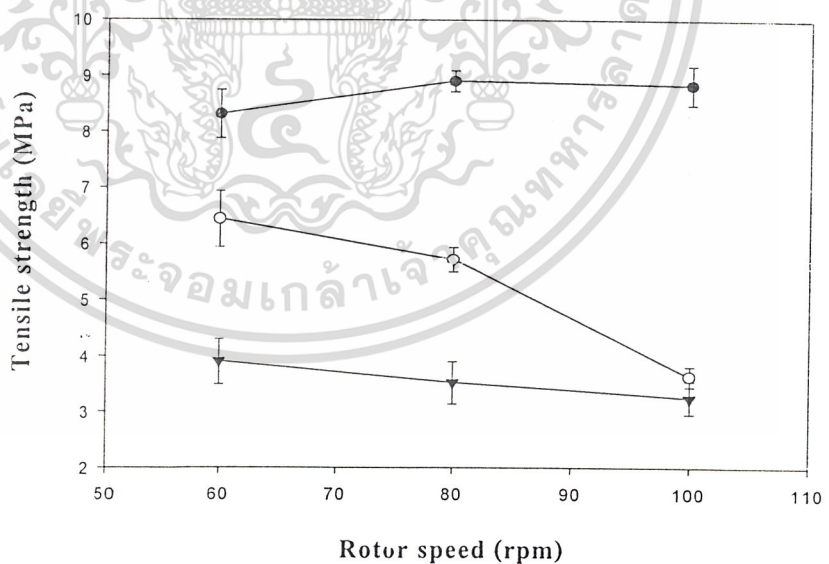
การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ด้วยเครื่องผสมแบบปิดหรือบราเนนเดอร์ (Bradenter) ที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ (Rotor speed) ตั้งแต่ 60 80 และ 100 รอบต่อนาที แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตร พบว่าสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีแนวโน้มที่สูงดังแสดงในรูปที่ 4.1 4.3 4.5 และ 4.7 เมื่อมีการใช้ความเร็วรอบโรเตอร์ที่ 80 รอบต่อนาที อธิบายได้ว่าที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาทีแรงเค้นเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นจากโรเตอร์ทำให้ยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงสามารถกระจายตัวเข้ากันได้ดี นอกจากนี้ความสามารถในการกระจายตัวยังแตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วนผสมที่ใช้ทำให้สมบัติเชิงกลของแต่ละส่วนผสมมีค่าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

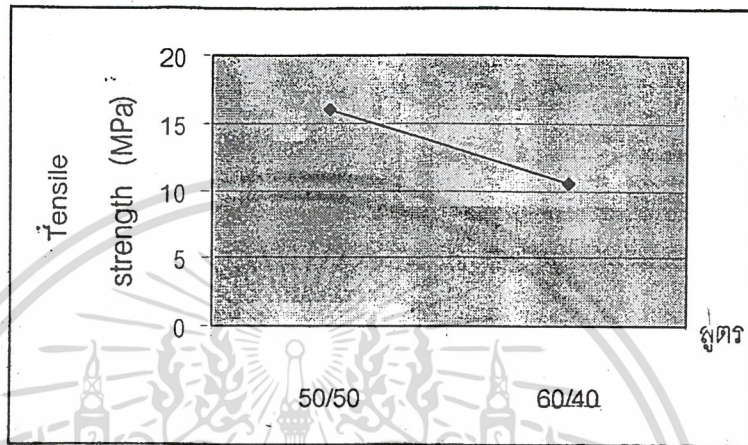
##### 4.1.2.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งคือค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สามารถหาได้จากการเขียนกราฟระหว่างค่าความเค้นดึง (Tensile stress) กับค่าความเครียด (Strain) ค่านี้แสดงถึงความทนทานของพอลิเมอร์ต่อแรงดึงขีด โดยดูได้จากจุดที่ให้ความเค้นสูงสุด (Maximum stress) จากการทดลองเมื่อควบคุมความเร็วรอบของเครื่องบราเบนเดอร์ให้คงที่ ที่ 80 รอบต่อนาที พบว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีปริมาณเพิ่มขึ้นตั้งอัตราส่วน 50:50 ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้นทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมากกว่าทำให้สามารถแสดงค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเนื่องจาก HDPE เป็นพลาสติกมีความสามารถในการรับแรงดึงหรือมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ายางธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุจำพวกยาง ที่มีการเชื่อมโยงเพียงบางส่วนมีความแข็งแรงต่ำกว่าดังนั้นการเพิ่มปริมาณอัตราส่วน HDPE ต่อยางธรรมชาติทำให้ความแข็งแรงของวัสดุโดยรวมสูงขึ้นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับความเร็วยรอบโรเตอร์ของเครื่องบราเบนเดอร์ขึ้นรูปจากกระบวนการอัดขึ้นรูป

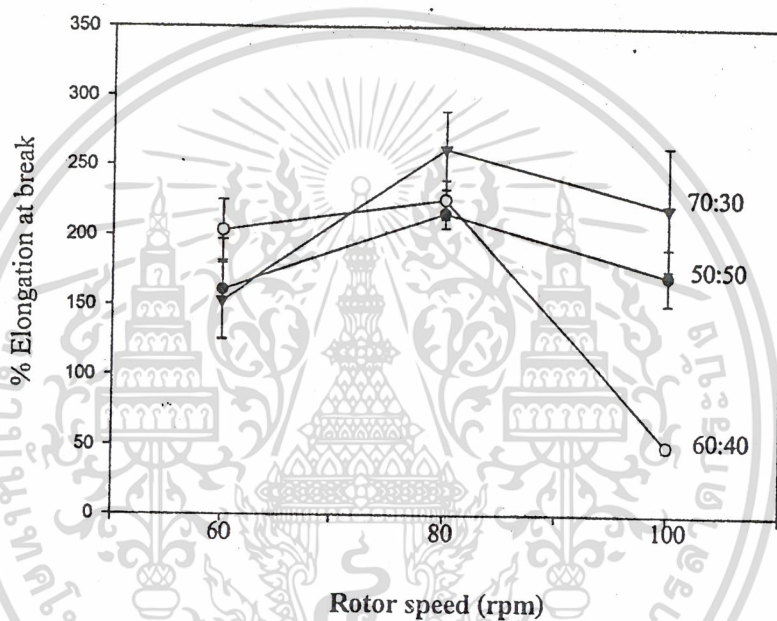
นอกจากในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปยังสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้ด้วยโดยสามารถขึ้นรูปได้ในสูตร 50/50 และ 60/40 แต่ในสูตร 70/30 ไม่สามารถฉีดขึ้นรูปได้



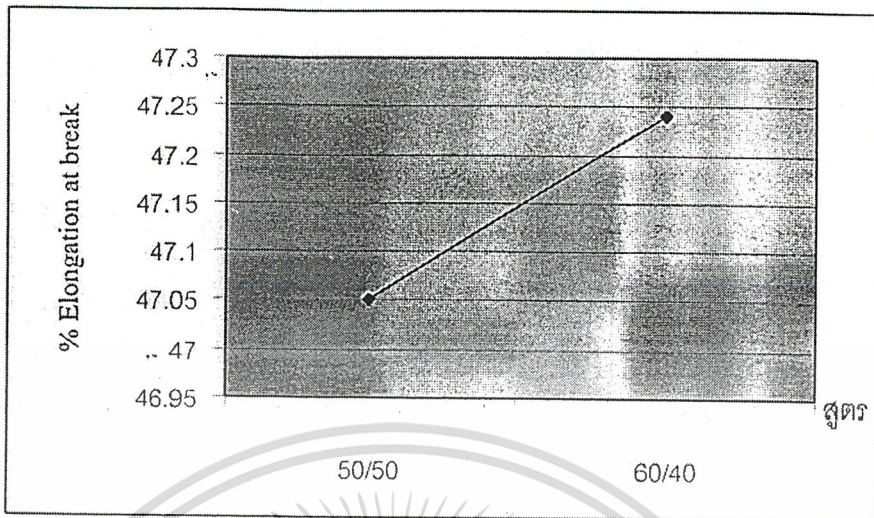
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับสูตรผสมขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที

#### 4.1.2.2 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)

จากการทดลองพบว่าเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางธรรมชาติทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสามารถแสดงลักษณะที่เหมือนยางที่มีการเชื่อมโยงโครงร่างแหสามมิติจึงถูกยืดได้ จึงเหมือนเพิ่มความสามารถในการยืดให้กับพอลิเมอร์ผสมทำให้เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



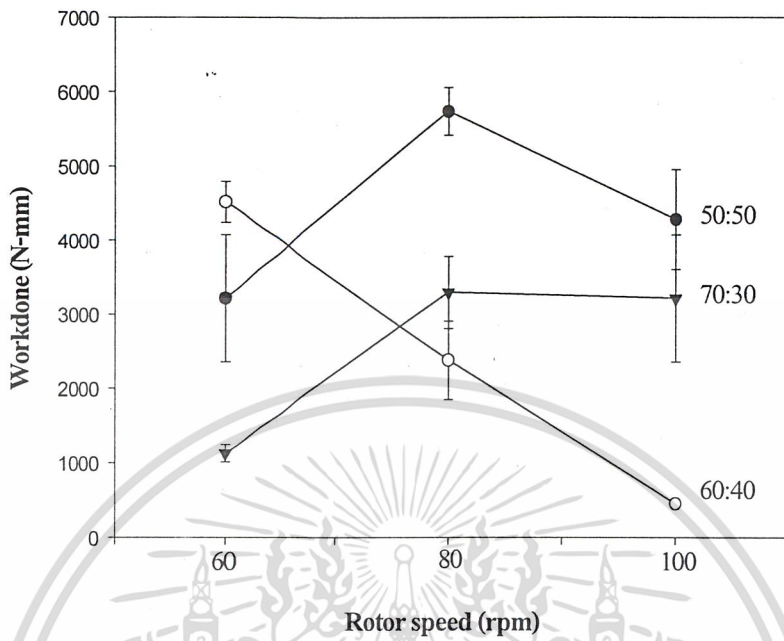
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด กับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องบราเวนเดอร์ขึ้นรูปจากกระบวนการอัดขึ้นรูป



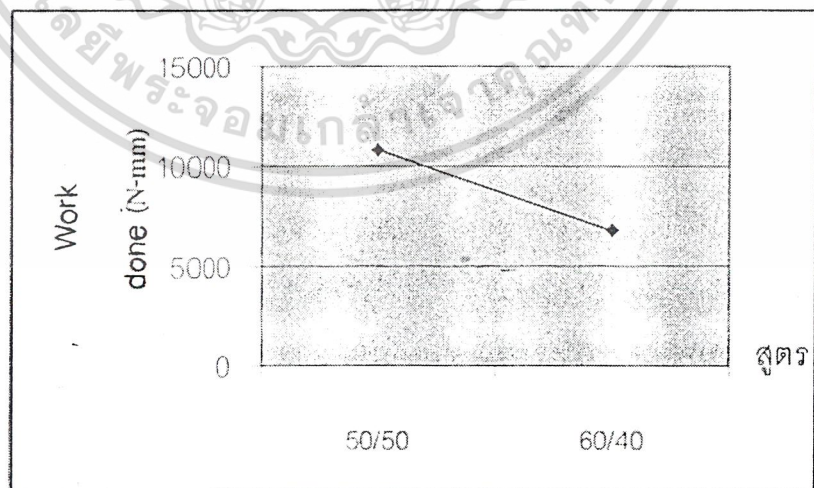
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด กับสูตรผสมที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

#### 4.1.2.3 พลังงานที่ทำให้แตกหัก (Work done)

จากการทดสอบสมบัติการดึงยืด (Tensile strength) พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) มีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการดึงยืดจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก (Work done) จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้นค่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงได้ว่าต้องใช้พลังงานจำนวนมากเพื่อดึงยืดวัสดุในการทำให้เกิดการแตกหักดังแสดงรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกหักกับสูตรผสมที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ของเครื่องบรบนเคอร์ขึ้นรูปจากกระบวนการอัดขึ้นรูป



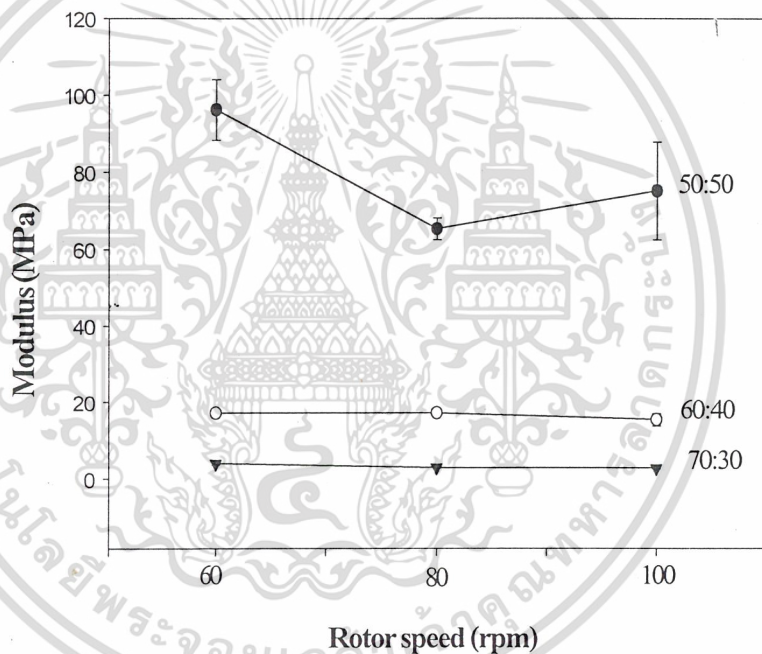
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ทำให้แตกหักกับสูตรผสมที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80

รอบต่อนาที ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

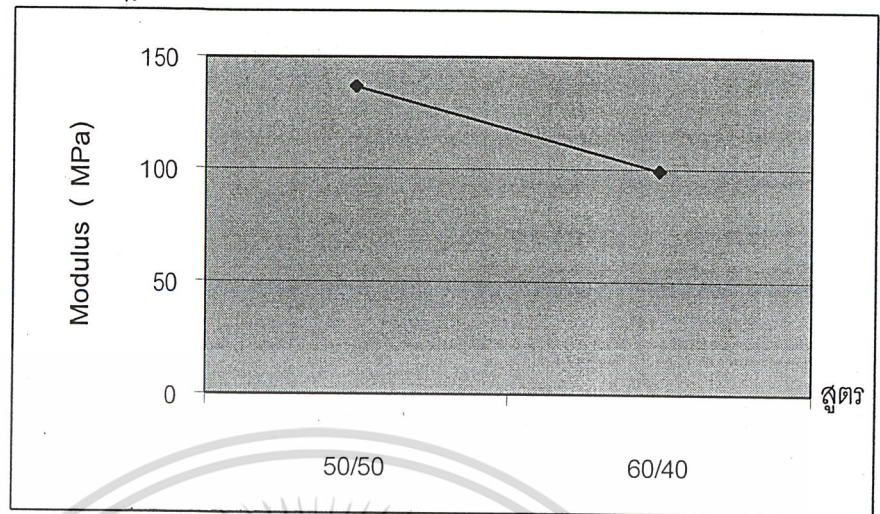
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.4 มอดุลัส (Modulus)

มอดุลัสเป็นค่าที่บอกความแข็งของพอลิเมอร์โดยหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีค่าลดลงมอดุลัสมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติมีมอดุลัสน้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ดังนั้นเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีค่าสูงขึ้น ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่ามอดุลัสสูงขึ้นดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับความเร็วรอบ โรเตอร์ของเครื่องบราเวนเดอร์ขึ้นรูปจากกระบวนการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับสูตรผสมที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที  
ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

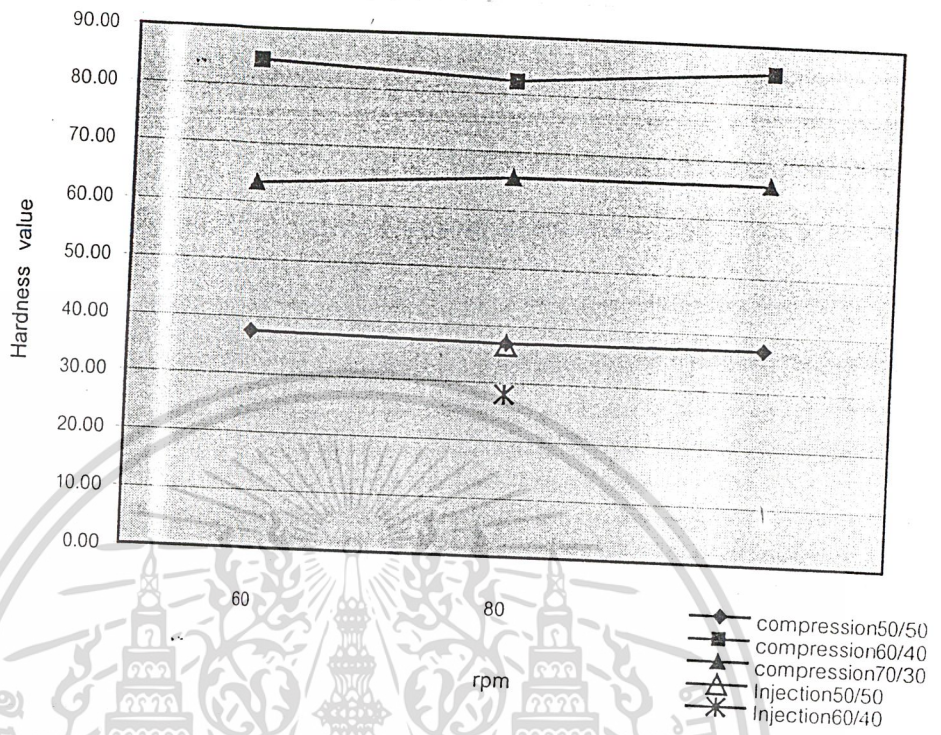
#### 4.1.3 ค่าความแข็ง (Hardness)

จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr และอัตราส่วนของ HDPE มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจาก HDPE เป็นส่วนแข็ง (Hardness region) แสดงได้ดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งของ TPNR สูตรต่างๆ

Compression		rpm		
สูตร	Shore	60	80	100
50/50	D	37.62	36.92	37.50
60/40	A	84.58	82.40	85.30
70/30	A	63.30	65.60	65.93
Injection		rpm		
สูตร	Shore	60	80	100
50/50	D	-	36.54	-
60/40	D	-	28.00	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



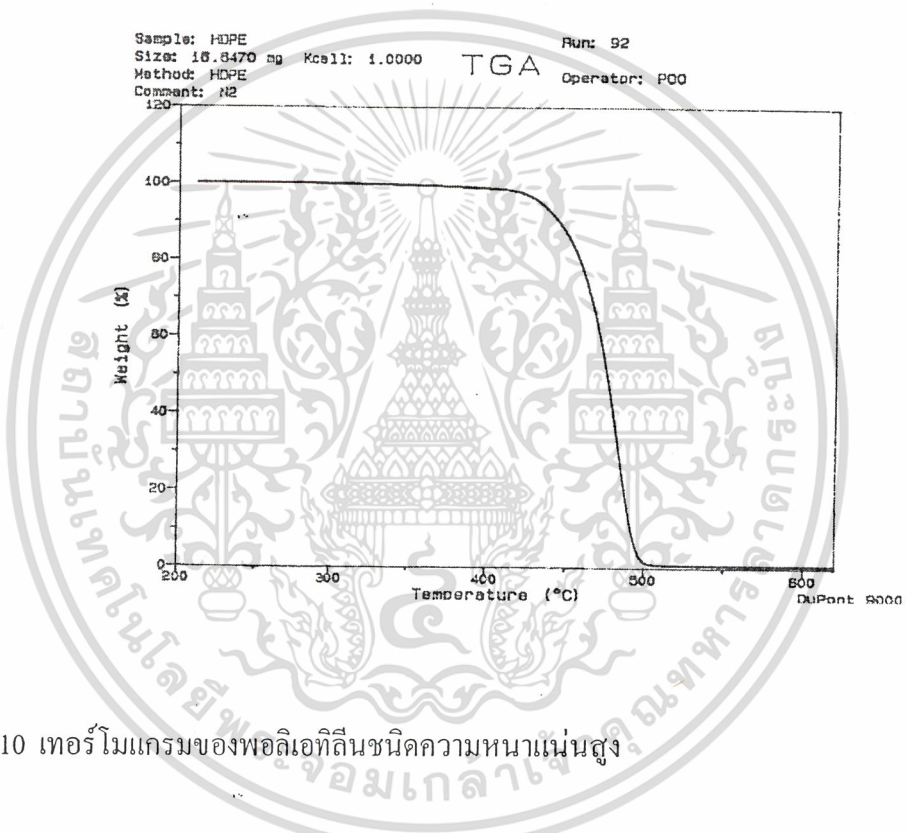
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับความเร็วยรอบ โรเตอร์เครื่องบราบนเคอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

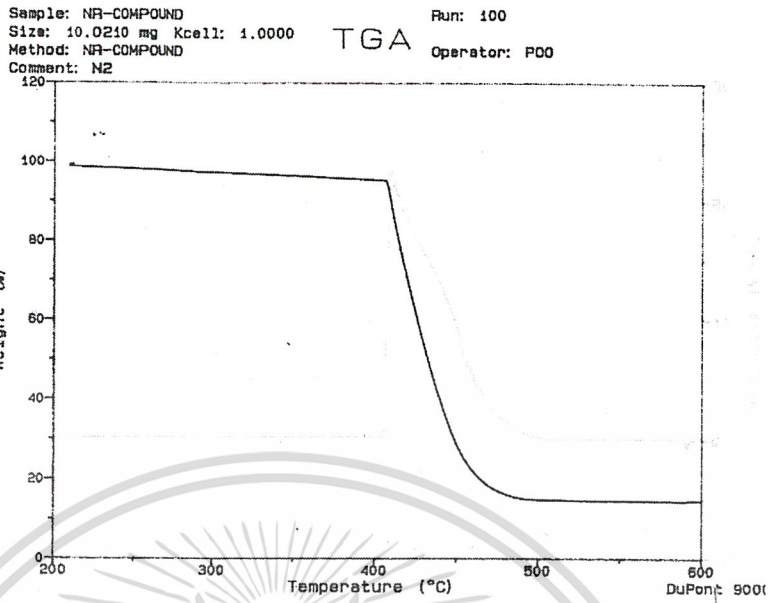
## 4.2 สมบัติทางความร้อน

### 4.2.1 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyser ( TGA )

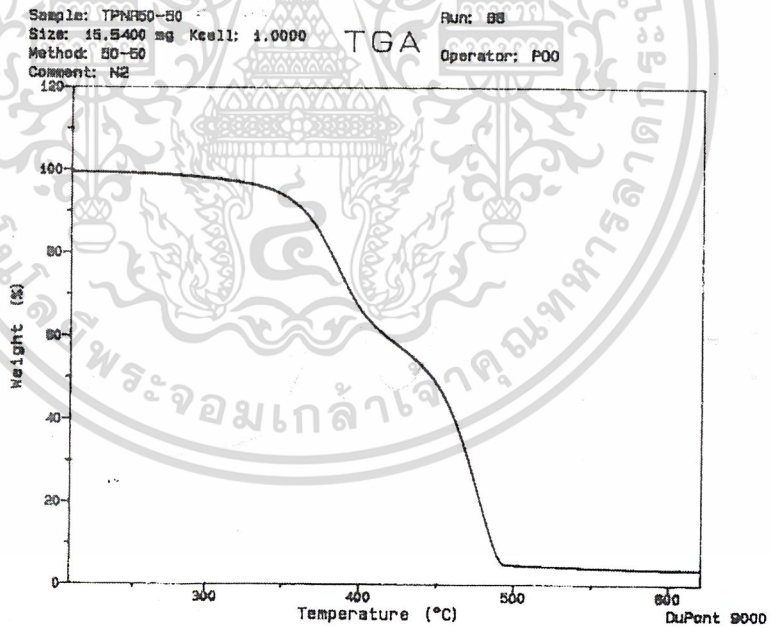
TGA เป็นวิธีการหนึ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์โดยหลักการอาศัยความร้อน (Thermal analysis) สามารถนำมาใช้ประโยชน์กันมากโดยเฉพาะการหาความเสถียรภาพต่อความร้อน (Thermal stability) และการหาค่าประกอบทางเคมี



รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

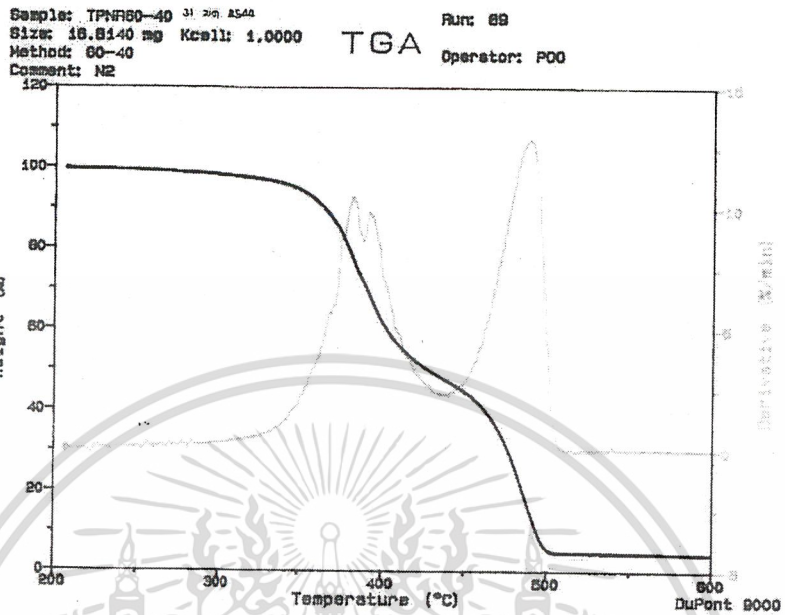


รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติผสมสูตร



รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีอัตราส่วนของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีอัตราส่วนของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

เครื่อง TGA (Thermogravimetric analyser) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะแสดงเทอร์โมแกรมของชิ้นงานที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเท่ากับ 50:50 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 ช่วงคือ ที่อุณหภูมิ 375 – 400 °C และ 460 - 480 °C โดยในช่วงแรกนั้นเป็นช่วงที่แสดงถึงอุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตรที่มีการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแหสามมิติ และช่วงที่สองเป็นช่วงอุณหภูมิที่แสดงถึงการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ซึ่งสามารถทราบได้จากเทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นเทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและยางธรรมชาติผสมสูตรที่เกิดการเชื่อมโยงตามลำดับ

#### 4.2.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter ( DSC )

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เพื่อเป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการหาอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวหรือความร้อนที่ใช้ในการเกิดผลึก ( $\Delta H$ ) และยังสามารถทราบถึงเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของวัสดุได้

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

Formula NR:HDPE	Molding techniques	Sulfur (phr)	$T_c$ ( $^{\circ}C$ )	$T_m$ ( $^{\circ}C$ )	$-\Delta H$ (J/g)	% Crystallinity at 100% HDPE*
50:50	Compression	1.5	108.27	127.67	98.36	67
60:40	Compression	1.5	108.27	128.00	63.94	55
50:50	Compression	2.0	108.27	128.00	90.33	62
60:40	Compression	2.0	108.93	127.30	78.83	67
70:30	Compression	2.0	108.93	126.75	52.60	60
50:50	Compression	3.0	107.93	129.00	108.7	74
60:40	Compression	3.0	107.93	128.67	77.45	66
70:30	Compression	3.0	108.60	126.67	45.20	51
50:50	Injection	1.5	108.93	128.00	97.77	67
60:40	Injection	1.5	108.27	127.00	71.15	61

\* เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE เมื่อเทียบเป็นปริมาณของ HDPE ที่ 100 กรัม

การคำนวณ % Crystallinity at 100 % HDPE

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f \times \left( \frac{100}{100 - \text{ปริมาณ NR}} \times 100 \right)}{\Delta H_f^0}$$

กำหนด  $\Delta H_f$  = เอนทาลปีของการตกผลึก (J/g)

$\Delta H_f^0$  = เอนทาลปีของการหลอมเหลวของ HDPE ที่มีความเป็นผลึก

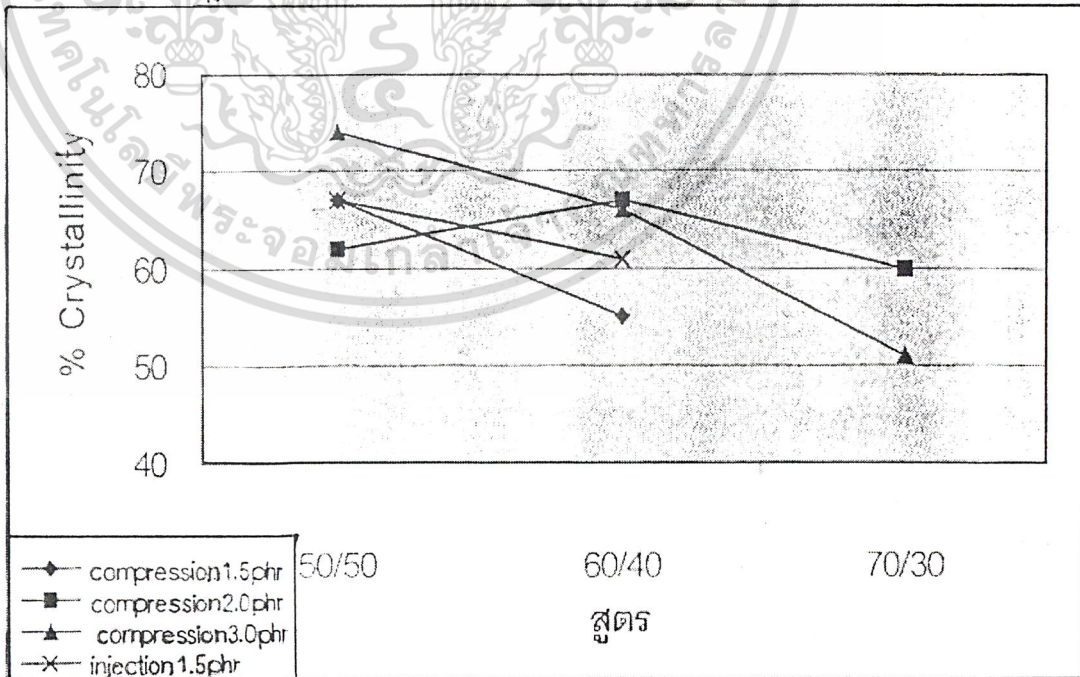
100%

$$= 293 \text{ (J/g) [11]}$$

ตัวอย่างการคำนวณ เช่นที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr อัตราส่วน 50/50 กระบวนการอัด

ขึ้นรูป

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{63.94}{293} \times \left( \frac{100}{100 - 60} \right) \times 100 = 55$$



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกกับอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ

และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิจัยเมื่อกำหนดปริมาณของกำมะถันให้เท่ากันในแต่ละสูตร พบว่าเมื่อปริมาณของยางมากขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าลดลง เนื่องจากวิฤภาคของยางจะไปแทรกตัวขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีน และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณกำมะถันแตกต่างกันที่ 1.5 และ 2.0 ส่วนในร้อยส่วนของยาง พบว่าในสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อพอลิเอทิลีนเท่ากับ 50:50 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงเมื่อปริมาณกำมะถันมีค่ามากขึ้น ส่วนในสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อพอลิเอทิลีนเท่ากับ 60:40 จะมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่อปริมาณกำมะถันมีค่ามากขึ้น และที่ปริมาณกำมะถัน 3.0 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ในสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อพอลิเอทิลีนเท่ากับ 50:50 จะมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงกว่าที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 และ 2.0 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เนื่องจากปริมาณกำมะถันที่มากขึ้นทำให้วิฤภาคของยางมีโอกาสเกิดการเชื่อมโยงกันมากขึ้นทำให้ไม่สามารถแทรกตัวขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีน จึงทำให้วิฤภาคของพอลิเอทิลีน ถูกแยกออกมาเกิดการตกผลึกได้ง่ายขึ้น

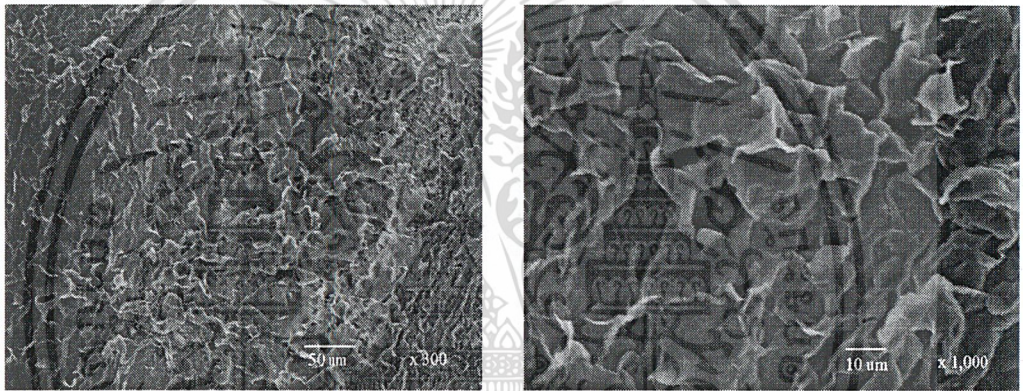


### 4.3 ลัทธิฐานวิทยา

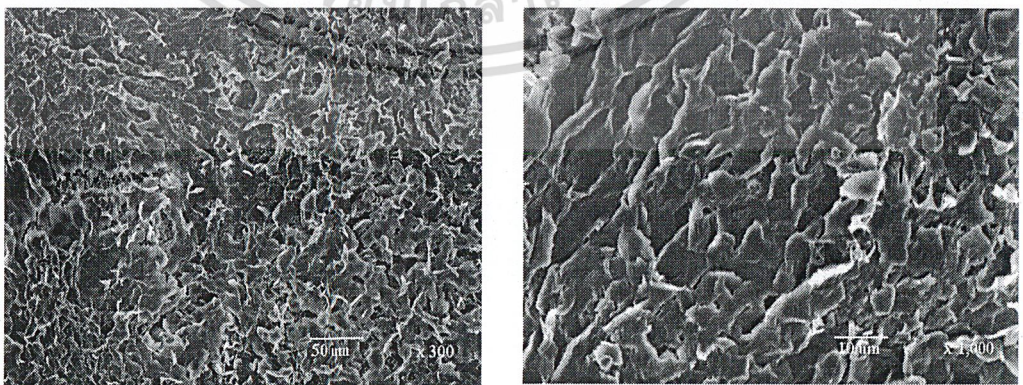
การศึกษาลักษณะทางลัทธิฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยการเตรียมชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการขึ้นรูปแบบ กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และ กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และศึกษาลัทธิฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

#### 4.3.1 ศึกษาลัทธิฐานวิทยาจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding)

##### 4.3.1.1 พิจารณาที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 ส่วนในร้อยละของยาง

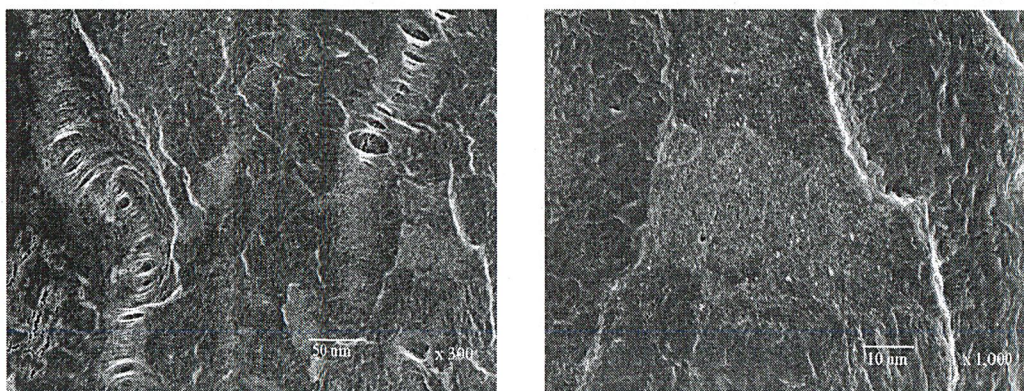


รูปที่ 4.15 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 1.5 phr กำลึงขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)



รูปที่ 4.16 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 1.5 phr กำลึงขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)

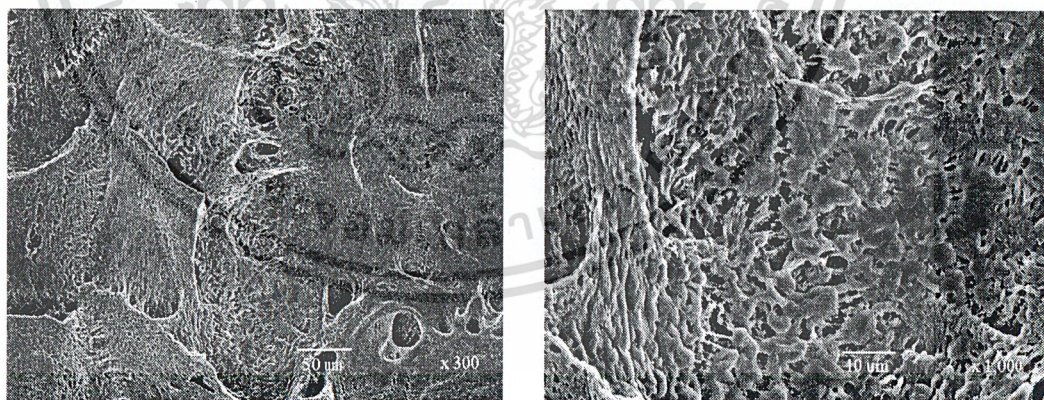
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



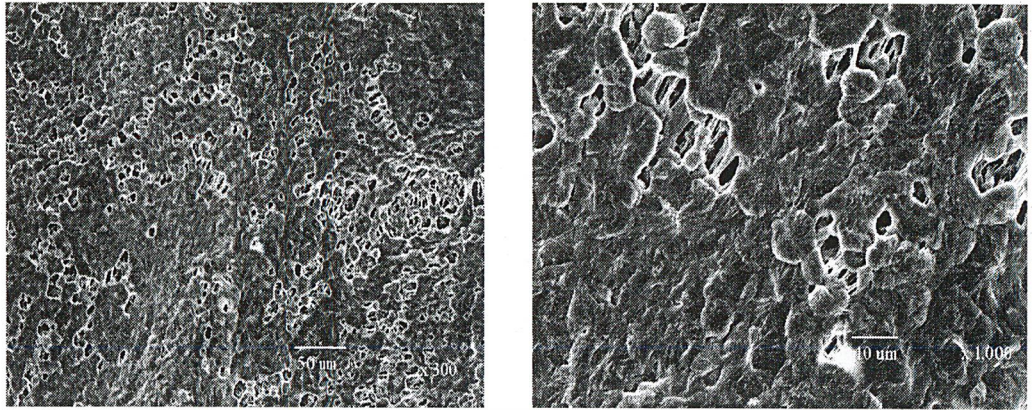
รูปที่ 4.17 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 70:30 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)

ปริมาณกำมะถัน 1.5 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ในสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ HDPE เท่ากับ 50:50 60:40 และ 70:30 จาก SEM micrograph กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าบริเวณที่เป็นสีดำ ซึ่งน่าจะเป็นบริเวณที่ HDPE กระจายตัวอยู่แต่ถูกสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีนจะเห็นว่าเมื่อปริมาณของ HDPE ลดลง ขนาดของบริเวณสีดำจะมีขนาดเล็กลง

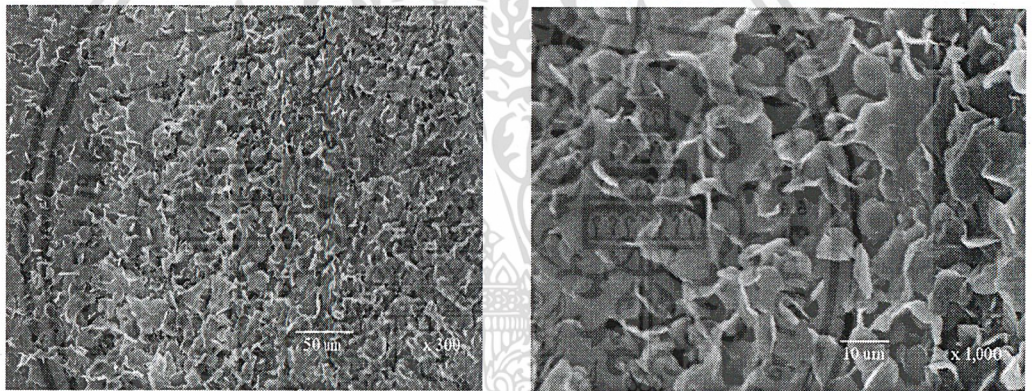
#### 4.3.1.2 พิจารณาที่ปริมาณกำมะถัน 2.0 ส่วนในร้อยส่วนของยาง



รูปที่ 4.18 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 2.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)



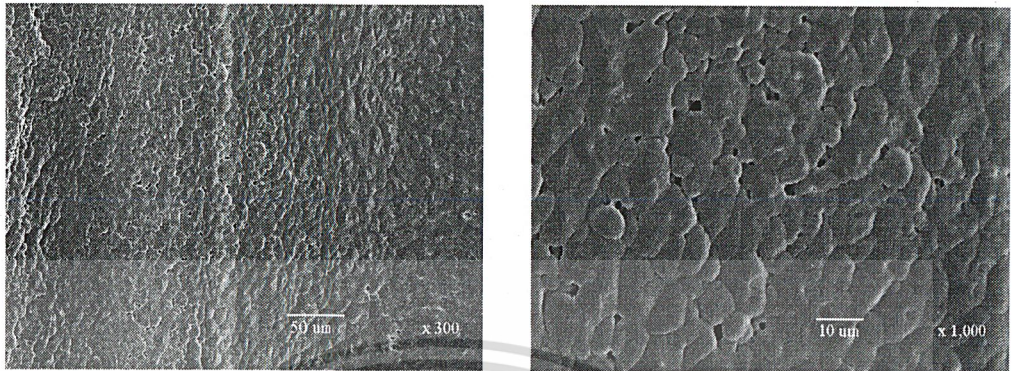
รูปที่ 4.19 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 2.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)



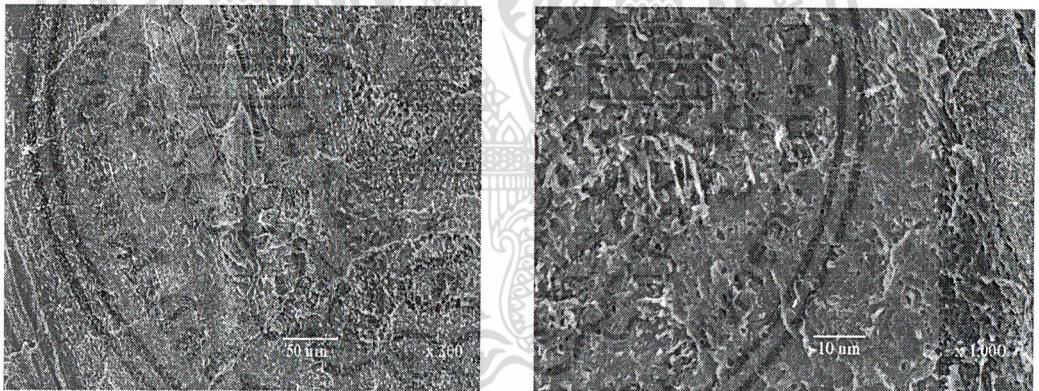
รูปที่ 4.20 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 70:30 กำมะถัน 2.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)

ปริมาณกำมะถัน 2.0 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ในสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ HDPE เท่ากับ 50:50 60:40 และ 70:30 จาก SEM micrograph กำลังขยาย 1000 เท่า ที่สูตร 50:50 การกระจายตัวของ HDPE จะเป็นแบบ Co – continuous แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 300 เท่าจะพบว่า การกระจายตัวโดยรวมจะเป็นแบบ Sea – Island เช่นเดียวกับสูตร 60:40 ซึ่งเป็นการกระจายตัวแบบ Sea – Island และในสูตร 70:30 ที่มีปริมาณ HDPE น้อยที่สุดจะเห็นว่าบริเวณที่เป็นรูสีดำจะมีขนาดเล็กมาก โดยส่วนมากจะเป็นวฏภาคของยางผสมสูตรที่มีการเชื่อมโยงเป็นร่างแหสามมิติ

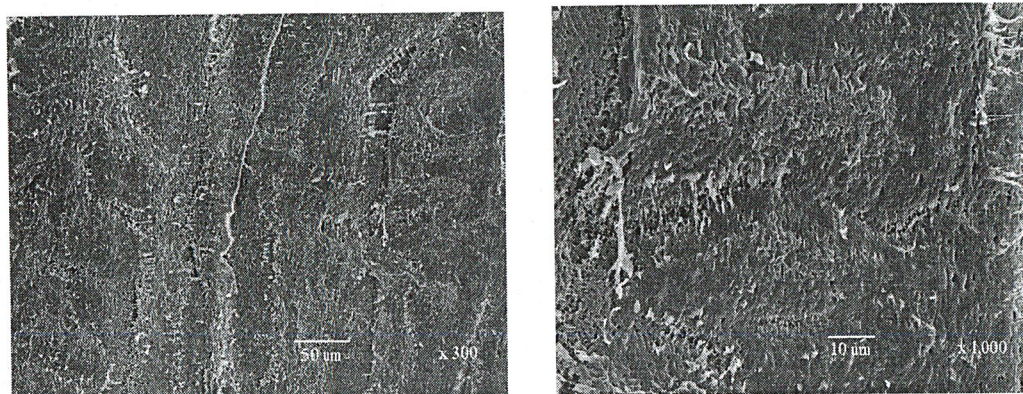
#### 4.3.1.3 พิจารณาที่ปริมาณกำมะถัน 3.0 ส่วนในร้อยละของยาง



รูปที่ 4.21 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 3.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)



รูปที่ 4.22 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 3.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)



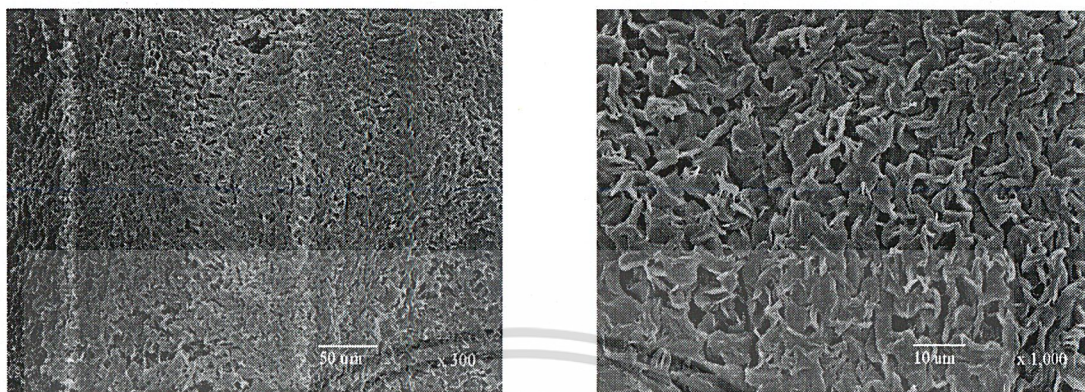
รูปที่ 4.23 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 70:30 กำมะถัน 3.0 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)

ปริมาณกำมะถัน 3.0 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ในสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ HDPE เท่ากับ 50:50 60:40 และ 70:30 จาก SEM micrograph กำลังขยาย 1000 เท่า และ 300 เท่า พบว่าการกระจายตัวของ HDPE เป็นแบบ Sea – Island โดยพิจารณาได้จากบริเวณรูสีดำที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวอยู่ทั่วไป เนื่องจากปริมาณกำมะถันที่มากขึ้นทำให้ยางผสมสูตรเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแหสามมิติได้มากขึ้น โอกาสในการแทรกตัวเข้าไปในวัฏภาคของยางผสมสูตรจึงเกิดได้ยากขึ้น

#### 4.3.1.4 พิจารณาที่สูตรเดียวกันแต่ปริมาณกำมะถันต่างกัน

พบว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติและ HDPE เดียวกัน เมื่อใส่ปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นจาก 1.5 phr 2.0 phr และ 3.0 phr ทำให้เกิดการกระจายตัวของ HDPE แย่งคือมีลักษณะการกระจายตัวจาก Co-continuous เปลี่ยนเป็น Sea-Island ทั้งนี้เนื่องจากยางผสมสูตรที่มีปริมาณกำมะถันมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติมากขึ้นตามลำดับ

### 4.3. ศึกษาพื้นฐานวิทยาจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)



รูปที่ 4.24 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 50:50 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)



รูปที่ 4.25 แสดง Scanning electron micrograph ของ NR:HDPE ในอัตราส่วน 60:40 กำมะถัน 1.5 phr กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปขวา) และ 300 เท่า (รูปซ้าย)

ปริมาณกำมะถัน 1.5 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ในสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ HDPE เท่ากับ 50:50 และ 60:40 จาก SEM micrograph กำลังขยาย 1000 เท่า และ 300 เท่า พบว่าการกระจายตัวของ HDPE ในวัฏภาคของยางจะกระจัดได้ดีมาก เนื่องจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจะเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวมากขึ้น จะเห็นได้จาก SEM micrograph ซึ่งมีขนาดของยางที่เกิดการเชื่อมโยงมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปจะมีขนาดของยางที่เกิดการเชื่อมโยงที่มีขนาดใหญ่

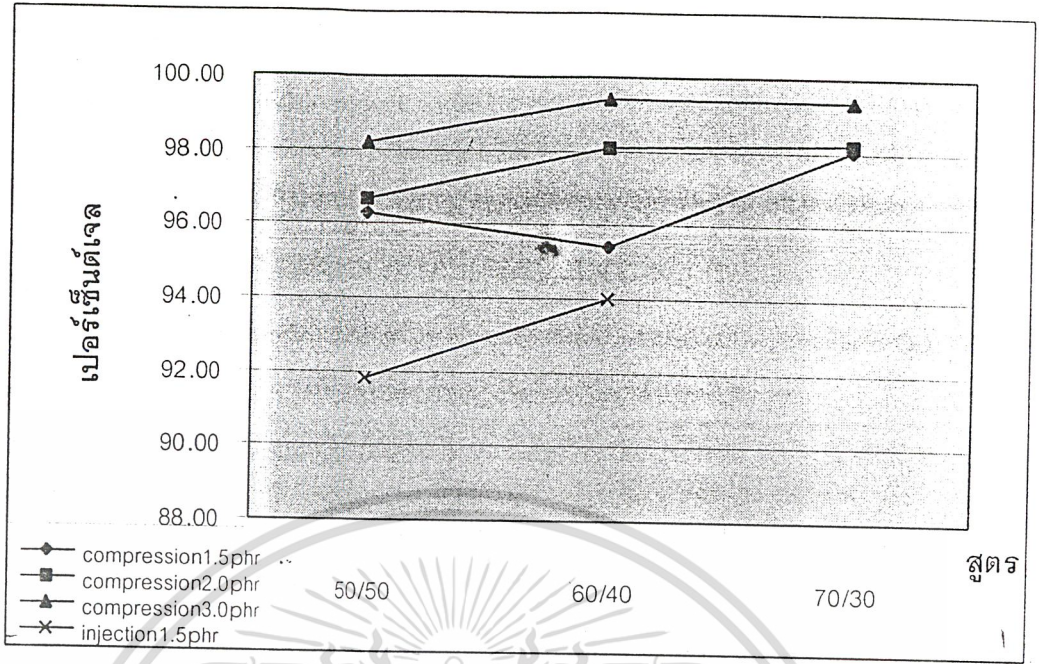
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เจล

จากงานวิจัยพบว่า เมื่อปริมาณกำมะถันมากขึ้นมีผลให้เปอร์เซ็นต์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นแสดงว่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (% Crosslink) ก็มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยส่วนที่สามารถละลายในตัวทำละลายไซลีนนั้นจะมีทั้งส่วนที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และส่วนที่เป็นยางที่ไม่เกิดการเชื่อมโยง แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่เตรียมได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่ปริมาณกำมะถันเท่ากันพบว่าตัวอย่างที่เตรียมได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจะมีเปอร์เซ็นต์เจลดำกว่าเนื่องจากในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจะใช้เวลาในการขึ้นรูปที่สั้นกว่าทำให้การเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางเกิดขึ้นได้น้อยกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เจล

ปริมาณกำมะถัน/ สูตร	น้ำหนักก่อน ( กรัม )	น้ำหนักหลังอบ ( กรัม )	Percent Gel
<b>Compression</b>			
1.5 phr 50/50	0.0108	0.0104	96.30
60/40	0.0109	0.0104	95.41
70/30	0.0204	0.0200	98.04
2.0 phr 50/50	0.0210	0.0203	96.67
60/40	0.0158	0.0155	98.10
70/30	0.0168	0.0165	98.21
3.0 phr 50/50	0.0165	0.0162	98.18
60/40	0.0170	0.0169	99.41
70/30	0.0159	0.0158	99.37
<b>Injection</b>			
1.5 phr 50/50	0.0110	0.0101	91.82
60/40	0.0117	0.0110	94.02



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจดและสูตรผสมที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr ความเร็วรอบโรเตอร์ 80 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการทดลองเตรียม TPNR ยางธรรมชาติผสมกับพลาสติก HDPE โดยศึกษาปริมาณอัตราส่วนผสมสารเชื่อมโยงแลสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการศึกษาถึงสภาวะในการคงรูปของยางธรรมชาติผสมสูตรจากเครื่อง Curelastomer พบว่าที่ปริมาณกำมะถัน 1.5 phr ที่อุณหภูมิ 160 °C จะได้ Scorch time ( $t_{90}$ ) และ Cure time ( $t_{90}$ ) ที่เหมาะสมคือมี Scorch time ประมาณ 2 นาที และ Cure time ประมาณ 3.5 นาที เนื่องจากที่สภาวะนี้ HDPE สามารถหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์และใช้เวลาในการขึ้นรูปพอเหมาะ

ผสม HDPE กับยางผสมสูตรที่ปริมาณกำมะถันต่าง ๆ คือ 1.5 phr แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการฉีดขึ้นรูปและเตรียมชิ้นงานเป็นรูปคัมเบลเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล จากงานวิจัยพบว่าตัวอย่างที่ทำการผสมที่ 80 rpm ให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัส (Modulus) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ที่เหมาะสมที่สุด และจากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัสและความแข็งมีค่าลดลง ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น

เปรียบเทียบกระบวนการขึ้นรูป อัตราส่วนระหว่างยางกับ HDPE และปริมาณกำมะถันที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPNR) ที่เตรียมได้ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปจะมีการกระจายตัวของวิภาคของยางและ HDPE สม่ำเสมอกว่าตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปและที่อัตราส่วนของยางกับ HDPE เท่ากับ 50/50 ที่มีปริมาณกำมะถัน 1.5 phr จะมีการกระจายตัวที่ดีที่สุด

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย Thermogravimetric Analyser จะพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ TPNR ที่เตรียมได้มี 2 ช่วง โดยช่วงแรกที่อุณหภูมิ 375-400 °C เป็นอุณหภูมิที่ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงแล้วเกิดการสลายตัว ส่วนที่ช่วงอุณหภูมิ 460-480 °C เป็นอุณหภูมิที่ HDPE เกิดการสลายตัว

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimeter พบว่าเมื่อกปริมาณยางมากขึ้นจะไปขัดขวางการเกิดผลึกของ HDPE ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลง

จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์เจล (%Gel) พบว่าเมื่อปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์เจลจะเพิ่มขึ้นหรือนั่นก็คือเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (%Crosslink) เพิ่มขึ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาถึงสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น เขม่าดำ (Carbon black)
2. ควรศึกษาถึงชนิดของสารเชื่อมโยงต่าง ๆ นอกเหนือจากกำมะถัน เช่น ไดคูมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP)
3. ควรศึกษาถึงการนำเอาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์กลับมาใช้ใหม่ (Recycle)
3. ควรศึกษาถึงสารตัวเติมต่าง ๆ ที่ช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตเช่น สารช่วยตัดสายโซ่โมเลกุล (Peptizers)
5. ควรศึกษาสารที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น สารช่วยผสม (Compatibilisers)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Charles A. Harper, "Handbook of Plastics, Elastomer and Composites", third edition
2. Ibrahim, A. and Dahlan, M., *J. Prog. Polym Sci.*, 23, 1998, 665-706
3. นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2537.
4. Brain P. Grady and Stuart L. Cooper, "Science and Technology of Rubber", 2 nd ed., 1994, 601-669
5. Ceran, Y., "Rubber Chemistry and Technology", 68, 1995, 351 – 375
6. วิจารณ์ ขจรไชยกุล กระบวนการผลิตยางพารา กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง ศูนย์วิจัยยาง สงขลา กรมวิชาการเกษตร 2530
7. Passaree, L. and Coren, Y., "Rubber chemistry and Technology", 71, 1998, 996 – 974
8. Valvic, S., Topic, M., Andreis, M., Ranogajec, F. and Versli, Z., "Rubber Chemistry and Technology", 66, 1993, 14 – 18
9. Al – Malaika, S. and Amir, E.J., *J. Nat. Rubb. Res.*, 2, 1986, 104 – 121
10. Mousa, A., Ishiaku, U.S. and Mohd Ishak, Z.A., "Plastic Rubber and Composites", 26, 1997, 331 – 335
11. "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", 4, 1986, 487

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## สถานะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding machine

## TIME PROGRAMING

DIE CLS/OPN TIME	:	40	MELTING TIME	:	200
SID-COR ACT TIME	:	0	DECOMPRS TIME	:	1
1 ST STG INJ TIME	:	20	COOLING TIME	:	200
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 TIME1	:	0
MELTING DLY TIME	:	10	SCW BWD TIME2	:	0
EJE BKD DLY TIME	:	0	ALARM TIME	:	500

## PRESSURE PROGRAMING

DIE CLSPRESR	:	30	DECOMP PRESR	:	20
CLS LOW PRESR	:	35	PLUNGER PRESR	:	20
CLS HI PRESR	:	40	EJECTOR PRESR	:	40
DIE OPN PRESR	:	45	SCW-IN PRESR	:	30
1 ST INJ PRESR	:	90	DIE ADJ PRESR	:	30
2 ND INJ PRESR	:	90			
3 RD INJ PRESR	:	90			
MELTING PRESR	:	50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PROGRAMING FLOW SPEED

RAPID CLS SPD	:	30	1 ST STG INJ SPD	:	100
HIGH CLS SPD	:	20	2 ND STG INJ SPD	:	100
CLAMPING SPD	:	15	3 RD STG INJ SPD	:	100
DIE OPN SLW1	:	5	MELTING SPD	:	40
RAPID OPN SPD	:	20	DECOMP SPD	:	20
DIE OPN SLW2	:	10	EJECTOR SPD	:	20
PLUNGER SPD	:	20	SCREW-IN SPD	:	0
DIE ADJ SPD	:	25	DIE CHANGE SPD	:	0

## PROGRAMING TEMPERATURES

PROGRAMED TEMP	CURRENT TEMP
NOZZLE	200
ZONE 1	190
ZONE 2	180
ZONE 3	0
ZONE 4	0
ZONE 5	0
ZONE 6	0

## PROGRAMME OPTIONS

DIE CLS SPD	:	1	1 = HI SPD	2 = FASTSPD	
PLUNGER SPD	:	2	1 = USE	2 = NO USE	
ROBOTS	:	2	1 = USE	2 = NO USE	
SCRW	:	2	1 = USE	2 = NO USE	
EJECTOR	:	1	1 = USE	2 = NO USE	3 = SLD-COR
SID-COR	:	2	1 = TIME	2 = TRAVEL	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้