

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์อย่างธรรมชาติมาลีเอต  
กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์  
Preparation of Thermoplastic Elastomer based on Maleated Natural Rubber and  
Poly(methyl methacrylate) Blends by Dynamic Vulcanization Process

สุวิมล ศิริวงศ์  
Suwimon Siriwong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Polymer Technology  
Prince of Songkla University

2549

ISBN 974-11-5101-2

ISBN 978-974-11-5101-1

๑ ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ TSI 891 ๖๗๔ ๒๕๕๐ พ. ๒

lib Key 298275

๑.๑.๒๕.๒๕๕๑

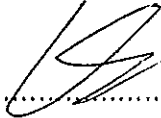
ชื่อวิทยานิพนธ์            การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ  
    มาลีเซตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบ  
    ไดนามิกส์

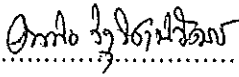
ผู้เขียน                        นางสาวสุวิมล ศิริวงศ์


สาขาวิชา                    เทคโนโลยีพอลิเมอร์


คณะกรรมการที่ปรึกษา

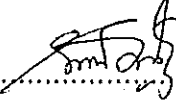
คณะกรรมการสอบ

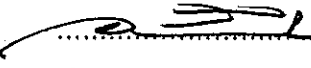
 .....ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญ นาคะสรรค์)

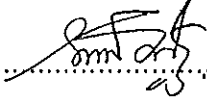
 .....ประธานกรรมการ  
 (อาจารย์ ดร.อดิษฐ์ รุ่งวิชานิวัฒน์)

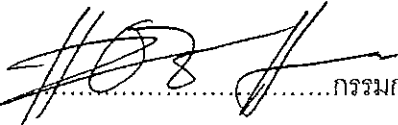
 .....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีตัน แกสมาน)


 .....ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญ นาคะสรรค์)

 .....กรรมการ  
 (อาจารย์ ดร.กรรณิการ์ สหกะโร)

 .....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีตัน แกสมาน)

 .....กรรมการ  
 (อาจารย์ ดร.กรรณิการ์ สหกะโร)

 .....กรรมการ  
 (อาจารย์ ดร.แอาแซ แวนหะมะ)

 .....กรรมการ  
 (อาจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง)

ชื่อวิทยานิพนธ์            การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด้อยางธรรมชาติ  
   มาลีเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบ  
   ไดนามิกส์

ผู้เขียน                        นางสาวสุวิมล    ศิริวงศ์

สาขาวิชา                    เทคโนโลยีพอลิเมอร์

ปีการศึกษา                 2549

#### บทคัดย่อ

การเตรียมยางธรรมชาติมาลีเอตโดยเตรียมในสภาวะหลอมในเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคเคอร์ที่อุณหภูมิ 145 °C และทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอตด้วยระบบกำมะถันแบบปกติแสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จากนั้นนำยางธรรมชาติมาลีเอตที่ผสมสารวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติมาเบลนดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อุณหภูมิ 160 °C อัตราส่วนต่างๆ คือ 40/60, 50/50 และ 60/40 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดและการทนทานต่อน้ำมัน (น้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ) ลดลงตามปริมาณการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลท นอกจากนี้เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ไปหลอมแล้วฉีดขึ้นรูปใหม่ 5 ครั้งพบว่าสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าใกล้เคียงกันมาก

Thesis Title           Preparation of Thermoplastic Elastomer based on Maleated  
Natural Rubber and Poly(methyl methacrylate) Blends by  
Dynamic Vulcanization Process

Author                 Miss. Suwimon Siriwong

Major Program        Polymer Technology

Academic Year        2006

#### ABSTRACT

Preparation of Maleated Natural Rubber (MNR) was performed in a brabender plasticorder, in a molten stage at a mixing temperature of 145°C. Furthermore, a use of conventional sulfur vulcanizing system gave the MNR vulcanizates with the best physical and mechanical properties. The MNR compounded with conventional sulfur vulcanized system were then blended with Polymethylmethacrylate (PMMA) in order to prepare thermoplastic vulcanizates (TPVs) at a mixing temperature of 160°. The blending ratios of 40/60, 50/50 and 60/40 MNR/PMMA TPVs were investigated. Tensile strength and hardness increased with increasing the PMMA content. Whereas, elongation at break and oil resistance in diesel and engine oils decreased. Moreover, the properties of TPVs after 5 times reprocessing showed similar tensile properties.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาและช่วยเหลือจาก  
รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญ นาคะสรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อาทิตย์ชั้น แกสมาน และอาจารย์  
ดร. กรรณิการ์ สหกะโร เป็นกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และช่วยตรวจทาน แก้ไขในการเขียน  
วิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านในภาควิชา  
เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจ ผู้วิจัย  
ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ทุกท่านที่อำนวยความสะดวก  
และความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยแห่งชาติ (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนในการ  
วิจัย "เมธีวิจัย สกว." โดยมี รศ.ดร.เจริญ นาคะสรรค์ เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อ  
วิทยานิพนธ์ โดยมี รศ.ดร.เจริญ นาคะสรรค์ เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย

ขอขอบคุณแผนกวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง  
กราด

คุณค่าและประโยชน์ใดๆ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นสิ่งบูชา  
พระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน ที่ให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจ และให้  
การอบรมสั่งสอนแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สุวิมล ศิริวงศ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
ABSTRACT.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง.....	(10)
รายการรูป.....	(13)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ยางธรรมชาติ.....	4
2.1.1 โครงสร้างทางเคมี.....	4
2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์.....	6
2.2 การกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติ.....	9
2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของพอลิเมอรั.....	13
2.4 ระบบวัลคาไนซ์.....	15
2.4.1 การวัลคาไนเซชันโดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์.....	16
2.4.2 การวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถันระบบปกติ.....	17
2.4.3 การวัลคาไนเซชันโดยใช้ระบบอีวี และเคมีอีวี.....	19
2.4.4 การวัลคาไนเซชันด้วยระบบฟีนอลิก.....	19
2.4.5 การวัลคาไนเซชันโดยใช้โลหะออกไซด์.....	20
2.4.6 การวัลคาไนเซชันโดยใช้ไทโอยูเรีย.....	21
2.5 พอลิเมทิลเมทาคริเลท.....	21
2.6 พอลิเมอรัเบลนด์.....	27
2.7 ความไม่เข้ากันของการเบลนด์.....	28
2.8 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	41
3.1 วัสดุ.....	41
3.2 อุปกรณ์.....	43
3.3 วิธีการวิจัย.....	52
3.3.1 การเตรียมและการวิเคราะห์ยางธรรมชาติมาลีเอต.....	52
3.3.2 การศึกษาระบบการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติมาลีเอต.....	54
3.3.2.1 การวัลคาไนเซชันโดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์.....	54
3.3.2.2 การวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถัน.....	55
3.3.2.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์.....	56
3.3.2.4 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติมาลีเอต.....	57
3.3.3 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA.....	60
3.3.4 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์.....	61
3.3.4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเตรียมด้วยเครื่องเอ็กซ์ทูดกับเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติกอร์เดอร์.....	61
3.3.4.2 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	64
3.3.4.3 ความสามารถในการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	65
3.3.4.4 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์กับพอลิเมทิลเมทาครีเลท โดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์.....	66
3.3.4.4.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Deofflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	66
3.3.4.4.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	66
3.3.4.4.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	68

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	71
4.1 การเตรียมยางธรรมชาติมาลีเอต.....	71
4.2 การศึกษากระบวนการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติมาลีเอต.....	79
4.2.1 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์.....	79
4.2.2 สมบัติของยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคโคเดอร์.....	83
4.3 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA.....	93
4.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA โดยใช้ MNR ที่เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทราuder.....	93
4.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA โดยใช้ MNR ที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคโคเดอร์.....	99
4.4 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์...	101
4.4.1 เปรียบเทียบสมบัติของ TPVs จากการเตรียมด้วยเครื่องเอ็กซ์ทราuder กับบราเบนเดอร์พลาสติคโคเดอร์.....	101
4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของเทอร์โม พลาสติกวัลคาไนซ์ .....	105
4.4.2.1 สมบัติทางรีโอโลยี.....	105
4.4.2.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	109
4.4.2.3 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	111
4.4.2.4 ความต้านทานต่อตัวทำลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	112
4.4.2.5 สมบัติเชิงความร้อน.....	114
4.4.2.6 ความสามารถในการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	117
4.4.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ มาลีเอตกับพอลิเมทิลเมทาครีเลทโดยใช้สารช่วยในการแปรรูปชนิด ต่างๆ.....	121
4.4.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	121
4.4.3.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	128



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	135
5. สรุปผลการวิจัย.....	146
5.1 สรุป.....	146
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป.....	151
บรรณานุกรม.....	152
ประวัติผู้เขียน.....	157

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงถึงปริมาณการผลิตยางธรรมชาติของประเทศต่างๆ ในปี 2003 – 2005 .....	4
2.2 การจำแนกระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน.....	19
2.3 แสดงความสามารถของพอลิเมทิลเมทาคริเลทในการทนทานต่อสารเคมี ชนิดต่างๆ .....	23
2.4 แสดงตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์ ของสไตรีน.....	29
2.5 แสดงตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ ชนิดหลายบล็อกที่มีผลึก.....	31
2.6 ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ประเภทกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ เทอร์โมพลาสติกบนโมเลกุลอิลาสโตเมอร์.....	33
3.1 สูตรการวัลคาไนเซชันโดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์.....	55
3.2 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของการวัลคาไนเซชันโดยใช้ ระบบเปอร์ออกไซด์.....	55
3.3 สูตรการวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถัน.....	56
3.4 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของการวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถัน.....	56
3.5 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลีเอต ที่คอมปาวด์ด้วยระบบกำมะถันปกติ.....	62
3.6 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของยางธรรมชาติมาลีเอตที่คอม ปาวด์ด้วยระบบกำมะถันปกติ.....	62
3.7 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	64
3.8 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	65
3.9 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	67
3.10 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ .....	68

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.11 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป วิธีที่ 1.....	68
3.12 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป วิธีที่ 2.....	69
3.13 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป วิธีที่ 3 และ 4.....	69
4.1 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่แสดงในช่วงเลขคลื่นต่างๆ ของยางธรรมชาติมาลิเอต .....	71
4.2 อัตราส่วนการดูดกลืนของการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตโดย ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr โดยวิธีการต่างๆ .....	73
4.3 ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนที่ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ต่าง ๆ.....	75
4.4 ปริมาณเจลของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากการใช้มาลิอิก แอนไฮไดรด์ปริมาณต่างๆ .....	78
4.5 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตระบบต่างๆ.....	81
4.6 โมดูลัสของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ.....	86
4.7 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	98
4.8 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	124
4.9 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	126

## รายการรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ..... 5
2.2	ปฏิกิริยาการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเหลว..... 10
2.3	กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของหมู่เอสเทอร์ของออกซีอัลคิลซินนามาเทบนโมเลกุลยางธรรมชาติมาลิต..... 11
2.4	ปฏิกิริยาการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ..... 12
2.5	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการไตเตรตยางธรรมชาติมาลิต ด้วย KOH..... 14
2.6	ลักษณะของกราฟการวัดคาโนเซชันที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้จากการใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน ตามมาตรฐาน ASTM D2084..... 16
2.7	โมเลกุลของยางธรรมชาติเมื่อวัดคาโนเซชันด้วยกัมมะถัน..... 17
2.8	แสดงอิทธิพลของปริมาณกัมมะถันต่อความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยึดตัวของยาง..... 18
2.9	การวัดคาโนเซชันยางที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกโดยใช้โลหะออกไซด์..... 20
2.10	การเปลี่ยนแปลงสัญญาณวิทยาในองค์ประกอบของ A-B-A block copolymer ..... 30
2.11	สัญญาณวิทยาของบล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดหลายบล็อกที่มีผลึก..... 32
2.12	โครงสร้างของไอโอโนเมอร์ยางธรรมชาติซิงค์ซัลไฟนด์..... 34
2.13	สัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์พลาสติกกับอีลาสโตเมอร์..... 35
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนืดของสององค์ประกอบกับอัตราส่วนในการผสม..... 36
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการละลายกับขนาดอนุภาค..... 37
2.16	สัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ..... 37
2.17	รูปแบบการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยระบบต่าง ๆ (a) ระบบกัมมะถัน (b) ระบบผสม และ (c) ระบบเปอร์ออกไซด์ ..... 40

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 เครื่องเอ็กซ์ทราดแบบสกรูเดี่ยว.....	44
3.2 เครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอเดอร์ .....	44
3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์.....	45
3.4 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ยี่ห้อโรซาน.....	46
3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง.....	46
3.6 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน.....	47
3.7 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง.....	47
3.8 เครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก .....	48
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	48
3.10 เครื่อง Thermogravimetric Analysis .....	49
3.11 เครื่องอัดน้ำ.....	49
3.12 เครื่องวัดความแข็งแบบ Durometer (Shore A).....	50
3.13 เครื่องวัดความหนา .....	50
3.14 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์.....	51
3.15 เครื่องบดพลาสติก.....	51
3.16 (ก) เครื่องตัดขึ้นทดสอบ	
(ข) ด้ายตัดขึ้นทดสอบรูปดัมเบลสำหรับทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความสามารถในการคืนตัว	
(ค) ด้ายตัดขึ้นทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด.....	52
3.17 ลักษณะของน้ำที่ใช้ทดสอบความสามารถในการแปรรูปโดยการอัดน้ำ.....	65
4.1 ตัวอย่างสเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมจากการ ใช้เครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอเดอร์และใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ 10 phr .....	72
4.2 ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนของการเตรียมยางธรรมชาติมาลีเอต 10 phr .....	74
4.3 ปริมาณเจล (%) ของยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ็กซ์ทราดเดอร์ และเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอเดอร์ ที่การใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ 10 phr....	74

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิลในรูปแบบต่างๆ (ที่เลขคลื่น 1784, 1736 และ 1710 $\text{cm}^{-1}$ ) ต่อพันธะพันธะ -C-H ที่ต่อกับ C=C ของ cis-1,4-polyisoprene (ที่เลขคลื่น 835 $\text{cm}^{-1}$ ) ที่ระดับการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ...	76
4.5 กลไกที่เป็นไปได้ของการกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ.....	77
4.6 ปริมาณเจลของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่ใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ.....	78
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมจากเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุนของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่คอมปาวด์ด้วยระบบต่างๆ .....	80
4.8 ค่าผลต่างของทอร์ก ( $M_H - M_L$ ) ของการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิกเอตด้วยระบบต่างๆ.....	81
4.9 ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์และเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ของการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิกเอตด้วยระบบต่างๆ.....	82
4.10 อัตราการวัลคาไนซ์ของการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิกเอตด้วยระบบต่างๆ.....	83
4.11 ความสัมพันธ์ของ Stress-Strain Curve ของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ.....	84
4.12 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ.....	85
4.13 ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ.....	86
4.14 โมดูลัสของยางธรรมชาติมาลิกเอตระบบต่างๆ เมื่อดึงที่ 100, 200, 300, 400 และ 500%.....	87
4.15 ค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ.....	88
4.16 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ.....	89
4.17 ความแข็งของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ.....	90
4.18 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ ก่อนและหลังการบ่มเร่ง.....	91

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ร้อยละของการเปลี่ยนไปของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง หลังจากการปมเร่งของยางธรรมชาติมาลีเอตที่วัลคาไนซ์ด้วย ระบบต่างๆ.....	91
4.20 ปริมาณการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติมาลีเอตที่วัลคาไนซ์ ด้วยระบบต่างๆ.....	92
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเชื่อมกับอัตราเชื่อมของ เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ.....	93
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชื่อมกับอัตราเชื่อมของ เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ.....	94
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเชื่อมกับยางธรรมชาติ มาลีเอตในพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราเชื่อมคงที่ต่างๆ.....	95
4.24 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ MNR/PMMA ที่อัตราส่วน 50/50 .....	96
4.25 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนด์ MNR/PMMA ที่อัตราส่วน การเบลนด์ต่างๆ เปรียบเทียบกับ PMMA และ MNR .....	97
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติมาลีเอตในพอลิเมอร์เบลนด์ .....	98
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเชื่อมกับอัตราเชื่อมของเทอร์โม พลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ.....	99
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชื่อมกับอัตราเชื่อมของเทอร์โม พลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ.....	100
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเชื่อมกับปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอต ในพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราเชื่อมคงที่ต่างๆ.....	101

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบกำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA= 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทрудและเครื่องบราเบนด์ พลาสติกคอร์เดอร์.....	102
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบกำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA= 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทрудและเครื่องบราเบนด์ พลาสติกคอร์เดอร์.....	102
4.32 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจาก ระบบกำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA= 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทрудและเครื่องบราเบนด์ พลาสติกคอร์เดอร์.....	103
4.33 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากระบบกำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทрудและเครื่องบราเบนด์ พลาสติกคอร์เดอร์.....	103
4.34 เปรียบเทียบค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ระบบกำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 เมื่อใช้เครื่อง เอ็กซ์ทрудและเครื่องบราเบนด์พลาสติกคอร์เดอร์.....	104
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โม พลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 40/60 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	105
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โม พลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 50/50 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	106
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โม พลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 60/40 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	106



รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 40/60 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	107
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 50/50 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	108
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 60/40 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	108
4.41 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	109
4.42 ความสามารถในการยึดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	110
4.43 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ.....	111
4.44 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันดีเซลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ ด้วยอัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA เป็น 40/60, 50/50 และ 60/40 .....	112
4.45 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ ด้วยอัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA เป็น 40/60, 50/50 และ 60/40 .....	113
4.46 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ .....	114
4.47 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน.....	115
4.48 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบผสม.....	115

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ .....	116
4.50 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันที่อัตรา ส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ.....	116
4.51 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบผสมระหว่างกัมมะถัน และเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ.....	117
4.52 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสยางธรรมชาติ มาลิเอตด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ .....	118
4.53 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติ มาลิเอตด้วยกัมมะถันระบบปกติ.....	118
4.54 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติ มาลิเอตด้วยระบบผสม .....	118
4.55 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสยางธรรมชาติ มาลิเอตด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ .....	119
4.56 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติ มาลิเอตด้วยกัมมะถันระบบปกติ.....	120
4.57 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติ มาลิเอตด้วยระบบผสม.....	120
4.58 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	121
4.59 เปรียบเทียบความหนืดเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	122

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.60 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่อง บราเวนเดอร์ พลาสติคเคเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสาร ช่วยในการแปรรูป).....	123
4.61 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติคเคเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	123
4.62 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ และเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติคเคเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	125
4.63 ค่าความสามารถในการยืดขนาดของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่อง บราเวนเดอร์ พลาสติคเคเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสาร ช่วยในการแปรรูป).....	125
4.64 ค่าความสามารถในการยืดขนาดของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่อง เอ็กซ์ทรูดเดอร์และเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติคเคเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	126
4.65 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์และเครื่อง บราเวนเดอร์ พลาสติคเคเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสาร ช่วยในการแปรรูป).....	127
4.66 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติคเคเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	128
4.67 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ .....	129

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.68 เปรียบเทียบความหนืดเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ .....	129
4.69 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอเดอร์ (ใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป) .....	130
4.70 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอเดอร์ (ใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป) .....	130
4.71 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	131
4.72 ค่าความสามารถในการยืดขนาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอเดอร์ (ใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป) .....	132
4.73 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการยืดขนาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	133
4.74 เปรียบเทียบความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	134
4.75 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	135
4.76 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเตรียมวิธีที่ 1-4 .....	136
4.77 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ .....	137
4.78 เปรียบเทียบความหนืดเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ .....	137
4.79 เปรียบเทียบความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	138
4.80 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารช่วยในการแปรรูปต่างชนิดกัน.....	139

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.81 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเนนเดอร์ พลาสติกคอคเคอร์ (ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	140
4.82 เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โม พลาสติกวัลคาไนซ์ .....	140
4.83 เปรียบเทียบความสามารถในการยืดขนาดของ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์.....	141
4.84 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่ใช้สารช่วยในการแปรรูปต่างชนิดกัน.....	141
4.85 ความสามารถในการยืดขนาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่ใช้สารช่วยในการแปรรูปต่างชนิดกัน.....	142
4.86 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติก วัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่อง บราเนนเดอร์ พลาสติกคอคเคอร์ (ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป).....	143
4.87 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	143
4.88 ความสามารถในการยืดขนาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	144
4.89 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป.....	145

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE) เป็นวัสดุที่น่าสนใจและได้รับการวิจัยพัฒนามาก เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีสมบัติการแปรรูป (Processing properties) เหมือนอีลาสโตเมอร์ที่แปรรูปด้วยกระบวนการแบบดั้งเดิม (Conventional process) หลายประการ กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสมบัติและการประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่เป็นยางแต่ใช้กระบวนการและเครื่องแปรรูปของพลาสติก เนื่องจากไม่มีขั้นตอนวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ในขณะที่ทำการขึ้นรูปจึงไม่จำเป็นต้องทำการคอมพาวด์ (Compounding) ทำให้ลดเวลาในการแปรรูป นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาแปรรูปใหม่ได้หลังจากผ่านการแปรรูปมาแล้ว (Reprocess ability)

ในปัจจุบันการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีหลายวิธี เช่น การเตรียมในรูปบล็อกโคพอลิเมอร์ การเตรียมโดยใช้สารไอโซโนเมอร์ การเตรียมโดยเบลนด์พอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่า 2 ชนิดเข้าด้วยกัน เป็นต้น วิธีการเตรียม TPE ที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือการเบลนด์พอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยจะเน้นการใช้ยางสังเคราะห์ เช่น ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) ยางเอทิลีนโพรพิลีน (Ethylene propylene rubber, EPR) และยางอีพีดีเอ็ม (Ethylene-propylene-diene rubber, EPDM) เป็นต้น เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ หรือเทอร์โมพลาสติกยางธรรมชาติ (Thermoplastic natural rubber, TPNR) สามารถเตรียมได้โดยการผสมยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) พอลิเมทิลเมทาคริเลท [Poly(methyl methacrylate), PMMA] และพอลิไวนิลคลอไรด์ [Poly(vinyl chloride), PVC] เป็นต้น

งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลท โดยนำยางธรรมชาติมาดัดแปลงโมเลกุลให้เป็นยางธรรมชาติมาลิเอตเสียก่อนแล้วจึงทำการเบลนด์ จากนั้นทำการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ให้ได้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic vulcanizate, TPV) กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับมาลิกแอนไฮไดรด์มีสมบัติที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากหมู่มาลิกแอนไฮไดรด์ทำให้โมเลกุลยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อการเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ โดยเฉพาะโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้สามารถที่จะนำไปทำการผสมเข้ากับพอลิเมอร์ต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้หลากหลาย

ยิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อนำมาเบลนด์กับพอลิเมทาคริลเลท ซึ่งมีความเป็นขั้วเหมือนกันจะทำให้สามารถเข้ากันได้ดี ถ้าหากสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ในเฟสของพอลิเมทาคริลเลทซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่องได้ และถ้าสามารถหาวิธีการและสารเคมีที่เหมาะสมในการทำการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ได้ก็จะได้ TPV ชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรง มีสมบัติเชิงฟิสิกส์ สมบัติเชิงเคมี สมบัติการไหล และความทนต่อน้ำมันดีขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต
- 1.2.2 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติมาลิเอตเบลนด์กับพอลิเมทาคริลเลท
- 1.2.3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ และระบบผสม
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ สมบัติเชิงเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติการไหลและฐานฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้
- 1.2.5 เพื่อทดสอบความสามารถในการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยใช้กระบวนการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก คือ การฉีดเข้าน้ำ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 เตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตและทดสอบปริมาณการกราฟต์
- 1.3.2 เตรียม TPE และ TPV จากการเบลนด์ MNR/PMMA ในอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ และแปรปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงฟิสิกส์ และฐานฐานวิทยา
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์แบบสเตติก ได้แก่ อัตราการวัลคาไนซ์ ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง และวัดความแข็ง
- 1.3.5 ศึกษากระบวนการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบใช้กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ และระบบผสม
- 1.3.6 ศึกษาความสามารถในการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผลิตได้โดยใช้กระบวนการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก คือ กระบวนการฉีด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เทคโนโลยีการเตรียมยางธรรมชาติมาลิตेटในสภาวะหลอม
- 1.4.2 ได้เทคโนโลยีในการผลิตและการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติมาลิตेटเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริลเลท
- 1.4.3 ทราบสภาวะและเทคนิคที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกซ์ของการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบต่างๆ
- 1.4.4 ทราบสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้แก่ สมบัติเชิงฟิสิกส์ สมบัติเชิงเคมี สมบัติการไหล และความทนต่อน้ำมัน
- 1.4.5 สามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สู่อุตสาหกรรม
- 1.4.6 นำไปสู่การพัฒนาความก้าวหน้าเชิงวิชาการในสาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ โดยเฉพาะการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ชนิดใหม่จากยางธรรมชาติ
- 1.4.7 ส่งเสริมการใช้งานยางธรรมชาติซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรหลักอย่างหนึ่งของประเทศ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

2.1.1 โครงสร้างทางเคมี

ยางธรรมชาติได้จากต้นยางพาราฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) ซึ่งนิยมปลูกมากในแถบเอเชีย

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงปริมาณการผลิตยางธรรมชาติของประเทศต่างๆ ในปี 2003 - 2005

	NR Production (Thousands of metric tons)		
	2003	2004	2005 <sup>(a)</sup>
Brazil	94	98	101
Guatemala	49	60	63
Other Latin America	23	29	29
Cameroon	59	56	56
Ivory Coast	127	142	143
Ghana	12	12	12
Liberia	110	117	118
Nigeria	38	40	41
D.R. of Congo	8	10	10
Other Africa	7	7	7
Bangladesh	5	5	5
Cambodia	46	47	48
China	480	486	491
India	707	743	747
Indonesia	1792	2066	2151
Malaysia	986	1169	1109
Myanmar	36	36	39
Papua New Guinea	4	4	4
Philippines	84	80	81
Sri Lanka	92	94	95
Thailand	2876	2959	2889
Vietnam	380	415	421
Total World <sup>(b)</sup>	7990	8620	8567

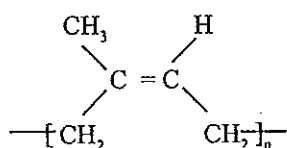
(a) Moving Annual Total to July 2005

(b) Including statistical discrepancies

ที่มา : IRSG Rubber Industry Report, Vol. 4, No. 11-12 July-August 2005. อ้างโดย The Rubber International Magazine, Vol. 7, No. 10 October 2005.

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าปริมาณการผลิตยางธรรมชาติมีเพิ่มมากขึ้นทุกปี ประเทศไทยนับเป็นประเทศที่ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก รองลงมาคืออินโดนีเซีย และมาเลเซีย (IRSG Rubber Industry Report, Vol. 4, No. 11-12 July-August 2005. อ้างโดย The Rubber International Magazine, Vol. 7, No. 10 October 2005.)

เมื่อกรีดเปลือกไม้ของต้นยางจะได้น้ำยาง (Latex) ซึ่งเป็นอนุภาคยางแขวนลอยในน้ำ องค์ประกอบโดยน้ำหนักของน้ำยางทั่วไปคือ อนุภาคยางหรือยางไฮโดรคาร์บอน 35%, ของแข็งที่ไม่ใช่ตัวยาง (โปรตีน ไขมัน และเกลืออนินทรีย์อื่นๆ) 5%, น้ำ 60% (ชัยวัฒน์, 2526) เมื่อใส่กรดในน้ำยางจะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน รีดให้เป็นแผ่น ตากให้แห้งด้วยอากาศร้อนจะได้ยางแผ่นซึ่งเรียกว่ายางแผ่น



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีสูตรโมเลกุลเป็น cis-1,4-polyisoprene ดังโครงสร้างโมเลกุลที่แสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 จนถึงประมาณ 15,000 (พรพรรณ, 2540) ยางธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 – 3,000,000 และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1,300,000 มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Tg) ต่ำถึง  $-73^{\circ}\text{C}$  (ชัยวัฒน์, 2526) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.934 ที่  $20^{\circ}\text{C}$  และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดรรชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215 - 1.5238 ที่  $20^{\circ}\text{C}$  (Hofmann, 1989)

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติ คือ

1. ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
2. มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้ด้วยการกำมะถัน สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่ายซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยางธรรมชาติ
3. มีสายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้

4. ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้สามารถเกิดผลึกได้เมื่อยืด จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง และทำให้มีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (green strength) สูง และความเหนียวติดกัน (tack) ดี

5. มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องนำยางไปบดเพื่อให้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

## 2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

### 2.1.2.1 ความแข็ง (Hardness)

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งต่างๆ กันได้ ตั้งแต่นิ่มมาก (เช่น 30-50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งของยางอีโบนต์ (มากกว่า 98 IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมหรือปริมาณกำมะถัน โดยช่วงของการใช้กำมะถันปริมาณ 10-20 phr จะให้ยางที่มีความแข็งคล้ายหนัง (leather like) เหมาะสำหรับงานกระเบื้องยางปูพื้น และยางลูกกลิ้ง การใช้กำมะถันปริมาณ 30-50 phr ทำให้ได้ยางอีโบนต์

### 2.1.2.2 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความเป็นระเบียบสูง ทำให้สามารถตกผลึกได้เมื่อดึง (strain induced crystallization) ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (gum vulcanizate) สามารถคอมปาวด์ให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงถึงประมาณ 30 MPa ซึ่งสมบัตินี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นิ่ม และแข็งแรงได้ เช่น การทำถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย สายยางยืด และยางรัด เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งแรงในตัวเองสูง จึงทำให้สามารถใช้สารตัวเติมราคาถูก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือดินขาว สำหรับในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น และยางรองขาเก้าอี้ ซึ่งจากการที่ยางธรรมชาติสามารถใช้สารตัวเติมราคาถูกได้ ทำให้ยางธรรมชาติได้เปรียบกว่ายางชนิดอื่นๆ ในด้านต้นทุนการผลิต การใช้สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาแพง เช่น เขม่าดำ และซิลิกา จะใช้ต่อเมื่อต้องการความแข็งแรงสูงเท่านั้น เช่น ทำดอกยางรถยนต์ พื้นและเส้นรองเท้าคุณภาพสูง ยางหุ้มสายพานลำเลียงที่ใช้ลำเลียงสารที่ทำให้ยางมีความสึกหรอสูง เช่น แร่ โลหะ หรือกรวด เป็นต้น

### 2.1.2.3 ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)

ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมจะสามารถยืดได้สูงถึงประมาณ 1000 % ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม และตามระดับของความ

เข้มข้นของพันธะเชื่อมโยง การมีสมบัติด้านการยืดสูงทำให้สามารถใช้อย่างธรรมชาติในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของและลูกโป่ง เป็นต้น

#### 2.1.2.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการตกผลึกได้ดีในขณะถูกดึง จึงทำให้มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง) ยกเว้นยางพอลิยูรีเทนที่เชื่อมโยงพันธะด้วยไฮโซไซยานเนต และความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพร่วมด้วย

#### 2.1.2.5 ความสามารถในการกระด้างตัวและฮิสเทอริซิส (Elastic rebound resilience and Hysteresis)

ยางธรรมชาติมีความกระด้างตัวสูงกว่ายางอื่นๆ ยกเว้นยางบิวทาไดอีนเท่านั้น ความกระด้างตัวของยางธรรมชาติสูงถึงร้อยละ 70 เมื่อไม่มีสารตัวเติมอยู่ด้วย และการกระด้างตัวจะลดลงตามการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม การกระด้างตัวสูงแสดงว่ายางธรรมชาติจะไม่สะสมพลังงานไว้ในโมเลกุลเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ความร้อนสะสมในยางธรรมชาติน้อยกว่ายางชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงเหมาะสมในการใช้ทำดอกยางรถบรรทุก ซึ่งมีความหนามาก การถ่ายเทความร้อนยาก ซึ่งต้องเลือกใช้อย่างที่สะสมความร้อนต่ำ การกระด้างตัวสูงและฮิสเทอริซิสต่ำของยางธรรมชาติ สามารถทำให้ลดลงได้โดยการผสมสารตัวเติม ดังนั้นจึงทำให้สามารถเตรียมผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติให้มีสมบัติความกระด้างตัวในระดับต่างๆ กันได้

#### 2.1.2.6 การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

คุณสมบัติเด่นอีกอย่างหนึ่งของยางธรรมชาติ คือ การที่มีความสามารถในการยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) มีค่าประมาณ  $-73$  °C ดังนั้นจึงทำให้มีความเป็นยางได้ แม้อุณหภูมิต่ำเหนือกว่ายางชนิดอื่นๆ ยกเว้นยางบิวทาไดอีนและยางซิลิโคน เท่านั้น การใช้งานยางที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ได้ในเวลาสั้นๆ แต่ถ้าเป็นเวลานาน เช่น มากกว่า 1-2 วัน โมเลกุลยางจะเรียงตัวกันเกิดผลึกได้ โดยอัตราการเกิดผลึกมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำ  $-26$  °C (พหุพหุ, 2540) นอกจากนั้นการผสมน้ำมันลงในยางธรรมชาติ จะทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำไปจากเดิมได้อีก

ส่วนใหญ่การใช้งานของยางธรรมชาติจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $-70$  ถึง  $70$  °C โดยที่ยางจะแข็งตัวเมื่อเย็นจนไม่สามารถยืดได้ และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไปค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะต่ำลง

#### 2.1.2.7 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยาในโมเลกุลยางธรรมชาติจะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้กัมมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ แต่พันธะคู่ก็เป็นจุดอ่อนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

และไอโซน ทำให้เกิดพันธะที่มีพลังงานพันธะต่ำ (C-O และ O-O) เกิดการขาดของโมเลกุลได้ง่าย จึงทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง นอกจากนี้การที่ยางธรรมชาติมีหมู่เมทิล (methyl,  $-CH_3$ ) เป็นหมู่แทนที่ ซึ่งเป็นหมู่ที่ให้อิเล็กตรอนกับพันธะคู่ อยู่ในตำแหน่งที่ติดกับคาร์บอนที่มีพันธะคู่ ทำให้ยางธรรมชาติถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ดังนั้นยางธรรมชาติจึงไม่เหมาะกับงานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง และมีไอโซนอยู่ด้วย เพื่อให้จะได้ยางธรรมชาติวัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อการเสื่อมดีขึ้นจึงมีการผสมสารกันเสื่อม (แอนติออกซิแดนท์) และใช้สารตัวเร่งประเภทโรอาซิล โดยให้เกิดการวัลคาไนซ์โดยใช้ระยะเวลาสั้นที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพก็ตาม ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติก็ยังไม่ดีเท่าอย่างสังเคราะห์

#### 2.1.2.8 ความทนทานต่อความร้อน (Heat resistance)

การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัด การใช้งานในสภาวะที่รุนแรงที่มีผลต่อการเสื่อมของยาง ยางธรรมชาติจึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลาานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นยางบาง ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และจะไม่ใช้ยางธรรมชาติในกรณีที่ต้องยึดยางในบรรยากาศที่มีไอโซนอยู่ด้วย แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้จะมีการผสมสารแอนติออกซิแดนท์และแอนติโอโซแนนท์ (รวมทั้งซีฟี่ง) ซึ่งใช้เป็นสารช่วยป้องกันยางธรรมชาติเสื่อม การทำให้ยางธรรมชาติทนทานต่อความร้อนดีขึ้นจะต้องทำทั้ง 3 วิธีพร้อมๆ กันคือ ระบบและวิธีวัลคาไนซ์ ระบบสารตัวเติม และระบบแอนติออกซิแดนท์ โดยระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวี เปอร์ออกไซด์ หรือยูรีเทน จะให้ความทนทานต่อความร้อนดีขึ้น รวมทั้งควรวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำลง นอกจากนี้การใช้สารตัวเติมซิลิกาจะทำให้ยางทนทานต่อความร้อนมากขึ้น และการใช้สารแอนติออกซิแดนท์ผสมบางชนิด จะทำให้ยางธรรมชาติทนทานต่อความร้อนได้นานขึ้น (พรพรรณ, 2540)

#### 2.1.2.9 ความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance)

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการสึกหรอดีพอใช้ แต่ยังคงด้อยกว่ายาง SBR (Styrene Butadiene Rubber) เล็กน้อย ยางธรรมชาติจัดอยู่ในกลุ่มยางที่มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง

#### 2.1.2.10 ความเป็นฉนวนไฟฟ้า

ยางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงมากถึง  $10^{15}$  ohm.cm เหมาะสำหรับการทำงานผลิตภัณฑ์ที่เป็นฉนวนไฟฟ้า

#### 2.1.2.11 ความทนทานต่อสารเคมี

ยางธรรมชาติเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอนจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่มีความทนทานได้ดีต่อของเหลวที่มีขี้ผึ้ง เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ ยางธรรมชาติทนต่อกรดหรือด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกเข้มข้น และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น

### 2.1.2.12 ความสามารถในการติด (Tack)

ยางธรรมชาติมีสมบัติติดกันเองได้ดี ทำให้สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่มีหลายชิ้นส่วนประกอบกันได้ดี เช่น ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ (บุญธรรม, 2530)

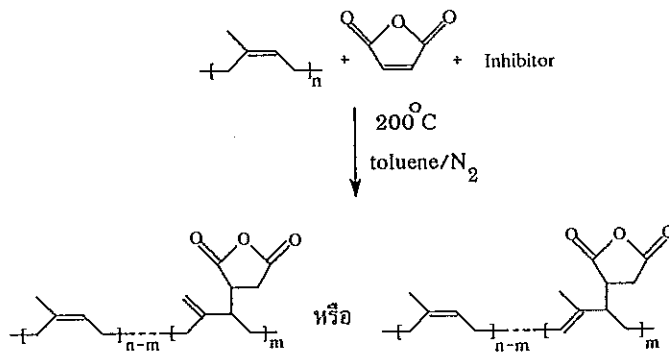
## 2.2 การกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติ (Grafted of maleic anhydride on natural rubber molecules)

ยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์แล้วจะมีสมบัติเชิงกล (mechanical strength) สมบัติด้านการกระด้างตัว (resilience) ความยืดหยุ่น (elasticity) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion resistance) ความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature resistance) และมีสมบัติพลวัตเชิงกล (dynamic mechanical properties) ที่ดีมาก ดังนั้นจึงมีการนำยางธรรมชาติไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ฯลฯ แต่ยางธรรมชาติมีสมบัติด้อยหลายประการ เช่น สมบัติหลังการปมเร่ง (aging properties) สมบัติการลื่นไถล (wet grip properties) และความต้านทานต่อลมฟ้าอากาศ (weathering resistance) จึงนิยมดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติเพื่อแก้ไขข้อด้อยเหล่านี้ โดยอาจทำการดัดแปลงโมเลกุลได้ทั้งในสถานะน้ำยาง (latex state) สถานะสารละลาย (solution state) และในสถานะหลอม (molten state) การดัดแปลงทางเคมีของโมเลกุลยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก (Gelling and Porter, 1988) คือ การดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติโดยการจัดเรียงพันธะเคมีใหม่ (Modification by bond rearrangement) การดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติโดยเพิ่มหมู่เคมีบนโมเลกุล (Attachment of new chemical groups) และการดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาการกราฟต์ (Modification by grafting reaction)

การดัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ เริ่มมีตั้งแต่ช่วงปี 1930-1939 โดยเป็นการทำปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติทั้งในสถานะสารละลาย สถานะยางแห้ง และสถานะน้ำยาง แต่วิธีการทำปฏิกิริยาการกราฟต์โคพอลิเมอร์ในสถานะน้ำยางเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิธีการเตรียม การสังเคราะห์ และสมบัติของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับอะคริโลไนไตรล์ เมทิลเมทาคริเลท เมทิลไวนิลคีโตน สไตรีน คาโปรแลคโตน และ พอลิเอทิลีนโดยใช้ระบบตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ (Hammer *et al.*, 1957 อ้างโดย Hashim *et al.*, 2002)

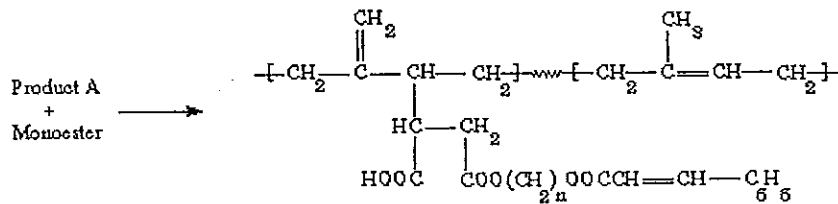
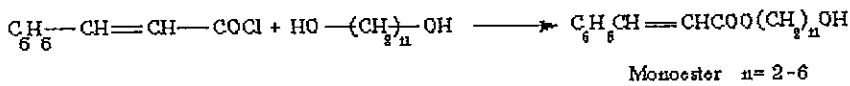
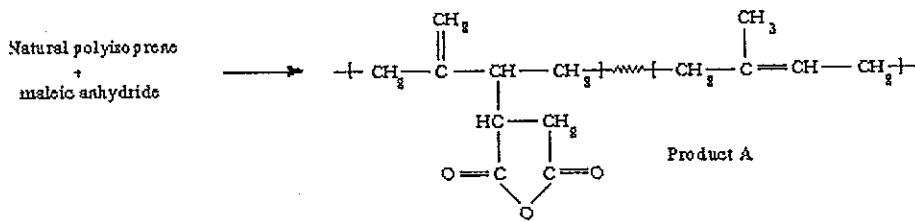
การศึกษาการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับมาลิกแอนไฮไดรด์มีอย่างกว้างขวางซึ่งเป็นการทำให้หมู่มาลิกแอนไฮไดรด์เกาะติดลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติทำให้ยางมีความเป็นขั้ว (Polar) มากขึ้น จึงมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ โดยเฉพาะโมเลกุลที่มีขั้ว สามารถยึดติดกับวัสดุได้ดีเป็นประโยชน์ด้านการปรับปรุงการติด

ประสานของวัสดุ ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางยิ่งขึ้น การทำกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างมาลิกแอนไฮไดรด์กับยางธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะใช้ยางเหลว (Liquid natural rubber, LNR) เป็นสารตั้งต้น เช่น Phinyocheep (1995) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเหลว หลังจากนั้นจึงนำยางธรรมชาติมาลิกเอตที่ได้มาทำปฏิกิริยากับสารพวกแอลกอฮอล์ที่ไวต่อแสง (photoreactive alcohols) เช่น 2-hydroxyethyl acrylate (HEA) และ 2-hydroxyethyl cinnamate (HEC) ทำให้วงแหวนเปิดออกเป็นเอสเทอร์ของซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (succinic anhydride) ได้ยางธรรมชาติเหลวที่สามารถเชื่อมโยงได้ด้วยแสง ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเหลว (Phinyocheep, 1995)

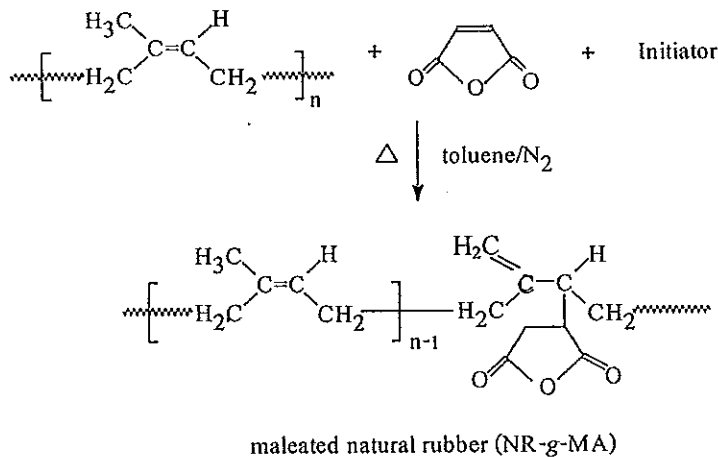
Visconte *et al.* (1991) ได้ศึกษาผลของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่มีหมู่อะลิฟาติกเกาะอยู่ในโครงสร้างต่อสมบัติความไวต่อแสง (Photosensitivity) โดยนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์กับมาลิกแอนไฮไดรด์ นำยางธรรมชาติมาลิกเอตที่ได้ ไปทำปฏิกิริยาเปิดวงแหวน (Ring opening) ก่อนจะควบแน่น (Condensation) กับหมู่เอสเทอร์ของออกซีอัลคิลซินนามเอต (Oxyalkylcinnamate ester) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของหมู่เอสเทอร์ของออกซีอัลคิลซินนาเมท บนโมเลกุลยางธรรมชาติมาลีเอต (Visconte *et al.*, 1991)

Nakason *et al.* (2004) ได้ศึกษาการกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติในสภาวะสารละลาย โดยได้ทดสอบปริมาณการเกาะติดโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) โดยใช้อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น (1784 + 1854)  $\text{cm}^{-1}$  / 835  $\text{cm}^{-1}$  และใช้เทคนิคการไตเตรตกรด-เบส พบว่าปริมาณการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์ อุณหภูมิ และ เวลา ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ได้ทดสอบค่า  $T_g$  ซึ่งพบว่า  $T_g$  ของยางธรรมชาติมาลีเอตมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ในปฏิกิริยา ปฏิกิริยาการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 2.4





รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ (Nakason *et al.*, 2004)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์ลงบนโมเลกุลยางธรรมชาติในสภาวะหลอม เช่น อภิชัย (2539) ศึกษาการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติในสภาวะหลอม ที่อุณหภูมิระหว่าง 145-165 °C พบว่าปฏิกิริยาการกราฟต์เกิดขึ้นได้ทั้งกรณีที่มีและไม่มีเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา โดยการกราฟต์ที่ใช้เปอร์ออกไซด์จะทำให้มีอัตราการเกาะติดดีกว่า แต่ทำให้มีปริมาณเจลเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ชาฮีมีง (2544) ศึกษาการดัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาติ (ใช้ยางแผ่นผึ่งแห้ง, ADS) ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ในสภาวะหลอม ที่อุณหภูมิ 135 °C ทำการทดลอง ภายใต้บรรยากาศปกติและบรรยากาศไนโตรเจน พบว่าภายใต้การทดลองทั้งสองสภาวะให้ปริมาณการเกาะติดของหมู่แอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่มากขึ้น

Nakason *et al.* (2001) ได้เตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตจากปฏิกิริยาการกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์กับยางธรรมชาติ (ใช้ยางแท่งชนิด STR 5L) ในสภาวะหลอม แล้วนำยางธรรมชาติมาลิเอตที่ฟลเอนด์กับแป้งมันสำปะหลัง และใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างการเบลนด์ยางธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลัง พบว่าการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติมาลิเอตและแป้งมันสำปะหลัง ทำให้ค่าความหนืดมูนี และเส้นโค้งการไหลเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้ Nakason *et al.* (2002) ได้ศึกษาการกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ (ยางแผ่นผึ่งแห้ง, ADS) แล้วนำยางธรรมชาติมาลิเอตดังกล่าวมาเบลนด์กับยาง ADS (MNR-ADS/ADS) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากยาง STR 5L เบลนด์กับยาง STR 5L (MNR-STR 5L /STR 5L) ทดสอบสมบัติการไหล พบว่า MNR-ADS/ADS ให้ค่า

ความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนสูงกว่า MNR-STR 5L/STR 5L และยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมจาก MNR-ADS มีอันตรกิริยาที่ต่ำกว่า ยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมจาก MNR-STR 5L

จีตีไซยัดะห์ (2547) ได้ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติมาลีเอต (MNR) จากยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นผึ่งแห้งในสภาวะหลอมที่อุณหภูมิ 145 °C โดยใช้มาลีอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ปริมาณ 4, 6, 8, 10 และ 12 phr วิเคราะห์หาปริมาณการเกาะติดของ MA บนโมเลกุลยางธรรมชาติโดยเทคนิค FTIR และการไตเตรต พบว่าปริมาณการเกาะติดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ MA ที่ใช้ในปฏิกิริยา และปริมาณเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบสมบัติทางรีโอโลยี พบว่าความหนืดของยาง MNR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MA

การเตรียมยางธรรมชาติมาลีเอตในสภาวะหลอม แล้วนำไปทำรีเอกทีฟเบลนด์กับเทอร์โมพลาสติกที่มีสภาพขี้ ศึกษาโดย Nakason *et al.* (2006) โดยได้นำยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมได้เบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท พบว่าการใช้ยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมโดยใช้มาลีอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณมากขึ้น จะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เบลนด์มากขึ้น นอกจากนี้จีตีไซยัดะห์ (2547) ได้ศึกษายางธรรมชาติมาลีเอต (MNR) ที่เตรียมโดยการใช้นาอีอิกแอนไฮไดรด์ 8 phr เตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยเบลนด์กับพอลิโพรไพลีน (PP) ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ ทำการเปรียบเทียบเทคนิคการเบลนด์แบบต่างๆ และแปรอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ที่อัตราส่วน MNR/PP เท่ากับ 60/40 และใช้ไดเมทิลลอลฟีนิลอลิเกรซิน (phenolic modified polypropylene, Ph-PP) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูปที่ดีที่สุด เมื่อศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ พบว่าการใช้ระบบผสม ให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏ ความหนืดเฉือนปรากฏ และความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ในขณะที่การใช้ระบบก้ำมะถันปกติจะให้ความสามารถในการยืดจนขาด และความสามารถในการคืนรูปที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้น้ำมันร่วมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะช่วยลดพลังงานในการบดผสมและทำให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น ในขณะเดียวกันก็ยังสามารถรักษาสมบัติต่างๆไว้ได้ เมื่อทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติมาลีเอตและพอลิโพรไพลีนสามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้แม้ว่าผ่านการหลอมใหม่ถึง 3 รอบ

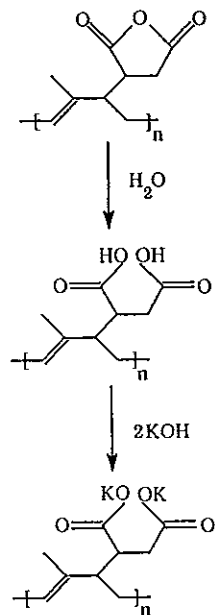
### 2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณมาลีอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของพอลิเมอร์

ยางธรรมชาติมาลีเอตที่จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณมาลีอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติต้องนำมากำจัดมาลีอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาออกไปก่อน โดยการนำไปรี

พอลิเมอร์กับโทลูอีน แล้วตกตะกอนใหม่อีกครั้งด้วยอะซิโตน จากนั้นจึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบแบบลดความดัน เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการกราฟต์ ซึ่งมีวิธีที่นิยมใช้ อยู่ 2 วิธี คือ การไตเตรตกรด-เบส (Acid-base titration) และ การใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

### 2.3.1 การไตเตรตกรด-เบส

การไตเตรตกรด-เบสเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่เกิดจากการไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) หมู่ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (succinic anhydride) โดยการไตเตรตสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Garcia-Martinez *et al.* (1999) ใช้ตัวอย่าง 1 กรัม รีฟลักซ์ด้วยตัวทำละลายผสมระหว่าง water / xylene / n-butanol (6.6/60/33.3) ปริมาตรทั้งหมด 150 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วไตเตรตทันทีขณะร้อนด้วย 0.05N ethanolic KOH ใช้ Bromothymol blue เป็นอินดิเคเตอร์, Slavovs *et al.*, 2000 อ้างโดย ซีตีไซยัตะห์ (2547) ใช้ตัวอย่าง 1 กรัม รีฟลักซ์ด้วยโทลูอีน 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 0.2 มิลลิลิตร รีฟลักซ์ต่ออีก 1 ชั่วโมง แล้วไตเตรตทันทีขณะร้อนด้วย 0.025N KOH ที่ละลายใน Methanol / Benzyl alcohol (สัดส่วน 1/9) และใช้ 1% Phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการไตเตรตแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการไตเตรตยางธรรมชาติมาลีเอต ด้วย KOH (Slavovs *et al.*, 2000)

### 2.3.2 การใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)

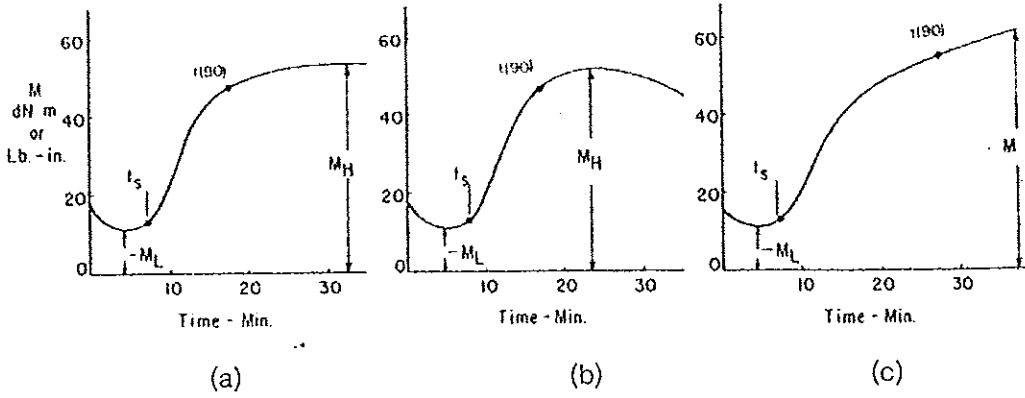
เมื่อโมเลกุลของสารอินทรีย์ดูดกลืนพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 0.8-100  $\mu\text{m}$ ) รังสีนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานของการสั่นของโมเลกุล (Energy of molecular vibrations) รังสีที่ถูกดูดกลืนมีค่าที่แน่นอน (Quantized) ส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะมีตำแหน่งการดูดกลืนเฉพาะตัว ซึ่งโดยทั่วไปการบอกตำแหน่งการดูดกลืนเป็นเลขคลื่น มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  โดยความเข้มของแถบการดูดกลืน จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันนั้นๆ ในสารตัวอย่าง ซึ่งสเปกตรัมอินฟราเรดโดยทั่วไปจะบันทึกในช่วงเลขคลื่น 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  เทคนิค FT-IR มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ด้วย

การวิเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของมาลิกิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลที่มาจากซัคซินิคแอนไฮไดรด์ และฟังก์ชันเฉพาะของพอลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่หลัก เช่น เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) 1864 แสดงการสั่นยืดแบบไม่สมมาตรของ C=O ของวงแหวนแอนไฮไดรด์, 1784 แสดงการสั่นยืดแบบสมมาตรของ C=O ของวงแหวนแอนไฮไดรด์, 1736 แสดงหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์จากการแตกตัวของมาลิกิกแอนไฮไดรด์, 1710 แสดงหมู่คาร์บอนิลของกรดจากการแตกตัวของมาลิกิกแอนไฮไดรด์, 835 แสดงค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ C-H out-of-plane bending ของพันธะ C-H ที่เกาะอยู่กับ C=C ใน cis-1,4-polyisoprene ของยางธรรมชาติ เป็นต้น

### 2.4 ระบบวัลคาไนซ์

การวัลคาไนซ์ คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ที่อยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งแรงมากขึ้นโดยการใช้สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุล ซึ่งเรียกว่าเกิด crosslink ตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สำหรับการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาตินั้น สารที่นิยมใช้วัลคาไนซ์จะเป็นกำมะถัน, สารที่ให้กำมะถัน (sulphur donor), เปอร์ออกไซด์ และอาจใช้สารอื่นๆ เช่น จิงค์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น

เมื่อนำยางมาคอมปาวด์โดยผสมสารเคมี ชนิดต่างๆ มาทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (Oscillating Disk Rheometer, ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D2084 ลักษณะของกราฟการวัลคาไนซ์ชัน (cure curve) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้จะมีลักษณะเป็น 3 แบบ คือ



$M_H$  คือ ค่าทอร์กสูงสุดที่เกิดจากการเชื่อมระหว่างยางกับโรเตอร์ (maximum torque)

$M_L$  คือ ค่าทอร์กต่ำสุดที่เกิดจากการเชื่อมระหว่างยางกับโรเตอร์ (minimum torque)

$t_{90}$  คือ เวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) โดยจะคิดจากเวลาที่ยางมีค่าโมดูลัส 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าโมดูลัสสูงสุด

$t_{s1}$  คือ ช่วงเวลาที่ยังสามารถทำการแปรรูปยางคอมปาวด์ได้ (scorch time) ซึ่งหลังจากนั้นยางจะเริ่มเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลมากขึ้นทำให้ไม่สามารถทำการแปรรูปได้

(a) คือ การวัลคาไนซ์ที่ค่าทอร์กสุดท้ายเข้าสู่สมดุล (equilibrium)

(b) คือ ค่าทอร์กช่วงหลังลดลงเมื่อเวลาการทดสอบนานขึ้น เรียกว่าเกิดการรีเวอร์ชัน (reversion)

(c) คือ ค่าทอร์กช่วงหลังเพิ่มขึ้นตามเวลาการทดสอบ เรียกว่าเกิดการมาชชิง (marching)

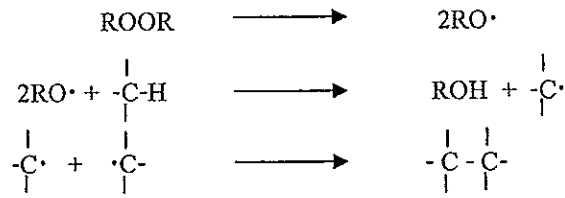
รูปที่ 2.6 ลักษณะของกราฟการวัลคาไนซ์ (cure curve) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้จากการใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (Oscillating Disk Rheometer, ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D2084

#### 2.4.1 การวัลคาไนซ์โดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์

ระบบเปอร์ออกไซด์เป็นระบบที่นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง เนื่องจากเป็นระบบที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติการทนต่อการบ่มเร่งด้วย

ความร้อน (heat aging) การยุบตัวของยางหลังจากที่ได้เอาแรงกดออกแล้ว (compression set) ดีมาก

ปฏิกิริยาการเกิดการเชื่อมโยงเขียนได้ดังนี้

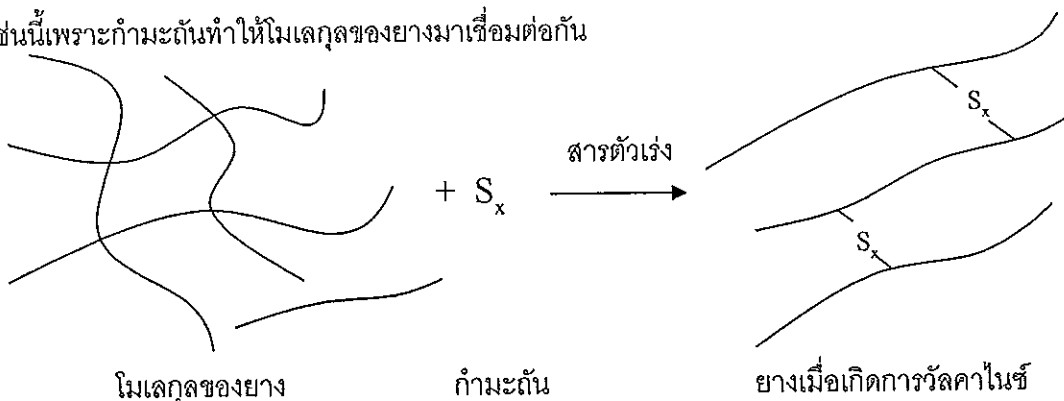


จากปฏิกิริยาจะเห็นว่าเมื่อเปอร์ออกไซด์แตกตัว จะให้อนุมูลอิสระซึ่งเป็นตัวไปดึงไฮโดรเจนอะตอมจากยางทำให้เกิดยางที่เป็นอนุมูลอิสระขึ้น และยางที่เป็นอนุมูลอิสระจะมารวมกันเกิดการเชื่อมโยงขึ้น

ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของสารเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นเมื่อสารเปอร์ออกไซด์สลายตัว ดังนั้นในการแปรรูปจะต้องมีอุณหภูมิให้สารเปอร์ออกไซด์สลายตัวก่อนกำหนด นั่นคือควรแปรรูปหรือผสมยางที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของสารเปอร์ออกไซด์ หรือเลือกสารเปอร์ออกไซด์ที่มีความเสถียรสูง ในการทดลองนี้เลือกใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์เนื่องจากมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง (สูงกว่า 135°C) ซึ่งไม่แตกตัวเมื่อผสมยางและมีอุณหภูมิน้อยกว่าอุณหภูมิการแปรรูป (160°C)

### 2.4.2 การวัลคาไนซ์ในเซชันโดยใช้กำมะถันระบบปกติ (Conventional Sulphur Vulcanization System)

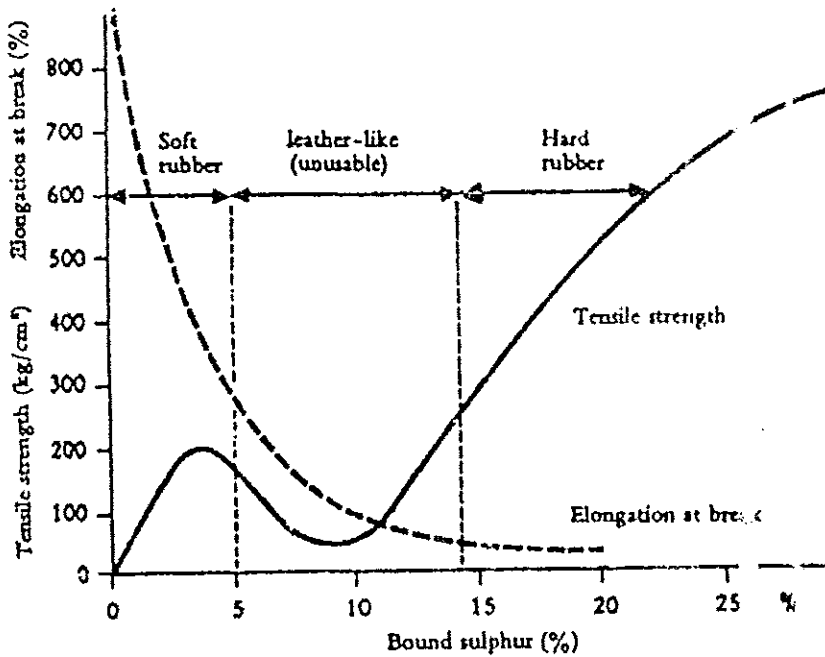
เมื่อนำกำมะถันผสมกับยางแล้วนำมาให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อนไม่หลอม เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน



รูปที่ 2.7 โมเลกุลของยางธรรมชาติเมื่อวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

การเกิดการวัลคาไนซ์ของยางจะทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้น ดังนั้นการหลอมเมื่อถูกความร้อน หรือแข็งตัวเมื่อเย็นจะเป็นไปได้ยาก รวมทั้งการละลายในตัวทำละลายก็เป็นไปได้ยาก แต่จะเป็นแค่การบวมพองเท่านั้น การใช้กำมะถันในยางถ้ายิ่งเพิ่มปริมาณมากขึ้นการเชื่อมโยงก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และสมบัติของยางเช่นความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength), ความแข็ง (hardness), โมดูลัส (modulus), ค่าความสามารถในการยืดจนขาด (elongation at break) และสมบัติอื่นๆ ของยาง ก็เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเชื่อมโยงด้วย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่

2.8



รูปที่ 2.8 แสดงอิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวของยาง (พรพวรรณ, 2540)

เมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันในการวัลคาไนซ์ จะเห็นได้ว่าปริมาณกำมะถันตั้งแต่ 0-5 ส่วน จะทำให้ยางมีสภาพยืดหยุ่น ปริมาณ 5-15 ส่วน จะทำให้ยางมีลักษณะยืดเล็กน้อยคล้ายหนัง แต่ถ้าปริมาณยางตั้งแต่ 15 ส่วนขึ้นไปจะทำให้ยางแข็งมากเรียกอีโบไนต์ (ebonite)

#### 2.4.3 การวัลคาไนเซชันโดยใช้ระบบอีวี (Efficient vulcanization system, EV) และเซมิอีวี (Semi-efficient vulcanization system, semi-EV)

ระบบอีวีคือระบบวัลคาไนเซชันที่มีการเพิ่มอัตราส่วนของสารตัวเร่งต่อกำมะถันให้สูงขึ้น การใช้อัตราส่วนระหว่างกำมะถันกับสารตัวเร่งนั้น เป็นตัวกำหนดว่าระบบการวัลคาไนเซชันนั้นจะเป็นแบบปกติหรือแบบอีวี ถ้าหากอัตราส่วนระหว่างกำมะถันกับสารตัวเร่งมีปริมาณอยู่ระหว่างระบบปกติกับระบบอีวีก็จัดเป็นระบบเซมิอีวี ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งของทั้ง 3 ระบบแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

ระบบการวัลคาไนซ์	กำมะถัน (phr)	สารตัวเร่ง (phr)
ปกติ	2.0 – 3.5	1.0 – 0.4
เซมิอีวี	1.0 - 1.7	2.5 – 1.0
อีวี	0.3 - 0.8	6.0 – 2.5

ระบบอีวีและเซมิอีวีมักจะใช้ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงความต้านทานต่อการเสื่อมของยาง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมทั้งใช้ในกรณีที่ต้องการลดการคงรูปของยางหลังจากการกด (compression set) แต่ยางที่มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมเนื่องจากการออกซิเดชันและมีค่าความคงรูปของยางหลังจากการกดต่ำที่สุดนั้นจะเป็นยางที่ได้จากระบบวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ แต่ในบางครั้งเราจะไม่ใช้เปอร์ออกไซด์เนื่องจากเหตุผลหลายประการ เช่น แปรรูปยางได้น้อยแบบ มีกลิ่น และสมบัติของยางที่ได้ตอนต้นไม่ดี รวมทั้งยางที่ใช้เปอร์ออกไซด์จะมีราคาสูง ดังนั้นบางครั้งจึงจำเป็นต้องใช้ระบบอีวีหรือเซมิอีวีแทน

นอกจากนี้ในยางที่ใช้ระบบอีวี จะพบว่ายางที่ได้มีสมบัติการทนความร้อนและความคงรูปของยางหลังจากการกดดีกว่ายางที่ใช้กำมะถันระบบปกติ ส่วนสมบัติเชิงกลทั่วไป เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดตัว โมดูลัส ความทนทานต่อการสึกหรอ ความทนทานต่อการหักงอของยางที่ใช้ระบบอีวีไม่ดีเท่ากับยางที่ใช้กำมะถันระบบปกติ

#### 2.4.4 การวัลคาไนเซชันด้วยระบบฟีนอลิก

ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยฟีนอลิกจะมีสมบัติด้านความต้านทานต่อไฮโดรเจน สมบัติด้านการยุบตัวของยางหลังจากที่เอาแรงกดออกแล้ว (Compression set) และสมบัติด้านความทนทานต่อการหักงอ (flexing properties) ดีมาก นอกจากนี้ยังมีค่าโมดูลัสที่สูงและค่าความต้านทาน

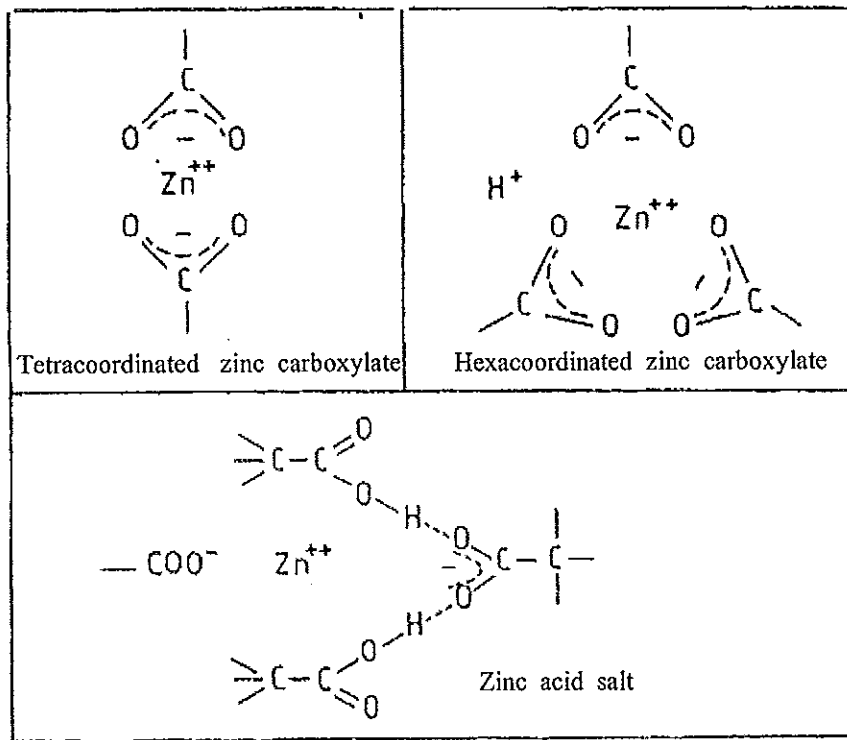


ต่อแรงดึงหลังจากการบ่มแรงด้วยความร้อนดี แต่จะมีค่าความสามารถในการยืดตัว (Elongation) และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำ ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงด้วย

2.4.5 การวัลคาไนเซชันโดยใช้โลหะออกไซด์

ระบบการวัลคาไนเซชันโดยใช้โลหะออกไซด์นั้นนิยมใช้กับยางที่มีหมู่คาร์บอกซิเลต ซึ่งทำให้สมบัติของยางคอมปาวด์ที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อนสูง นอกจากนี้เมื่อการวัลคาไนเซชันถูกกระตุ้นด้วยกรดสเตรียริก จะเกิดปฏิกิริยาของเอสเทอร์ขึ้น ดังนั้นกรดสเตรียริกจะทำหน้าที่กระตุ้นอัตราการวัลคาไนเซชัน ทำให้ลดช่วงเวลาของการสกอช และทำให้ค่าทอร์คที่จุดสูงสุดมีค่าสูงขึ้น ประโยชน์ของระบบการวัลคาไนเซชันแบบนี้ คือ สามารถทำให้เกิดพันธะของ C-C ขึ้นหลังจากการวัลคาไนเซชัน ซึ่งส่งผลทำให้โครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์มีความเสถียรต่อความร้อนสูงขึ้น

เมื่อคอมปาวด์ยางที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกอยู่ในโครงสร้างด้วย ZnO จะเกิดการก่อดังกันของโครงสร้างเป็นดังนี้



รูปที่ 2.9 การวัลคาไนเซชันยางที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกโดยใช้โลหะออกไซด์ (Mandal, 2000)

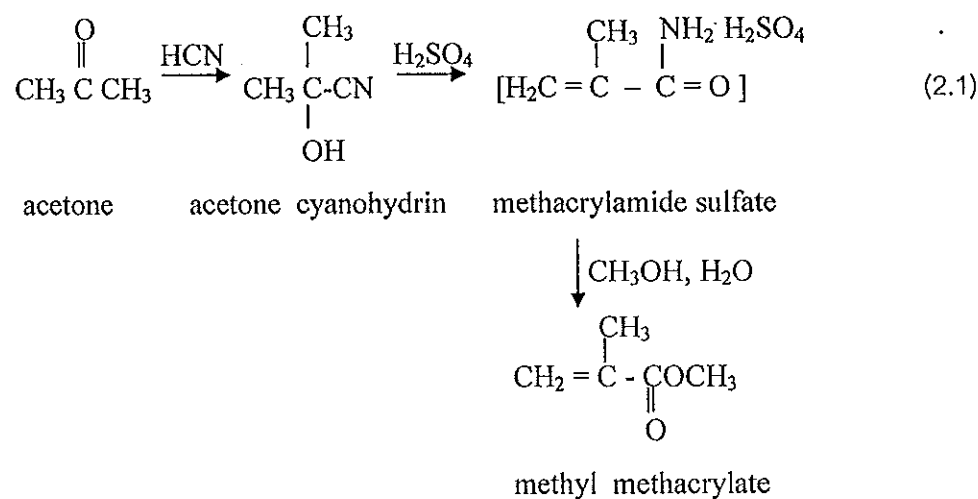
#### 2.4.6 การวัลคาไนเซชันโดยใช้ไทโอยูเรีย (Thiourea Cures)

ระบบการวัลคาไนเซชันโดยใช้ไทโอยูเรียนั้นนิยมใช้กับยางสังเคราะห์พวก Halobutyl rubber เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างของพอลิเมอร์ ข้อดีของการวัลคาไนเซชันด้วยไทโอยูเรียนี้คือจะทำให้ค่าความต้านทานต่อโอโซนดี

#### 2.5 พอลิเมทิลเมทาคริเลท [Poly(methyl methacrylate)]

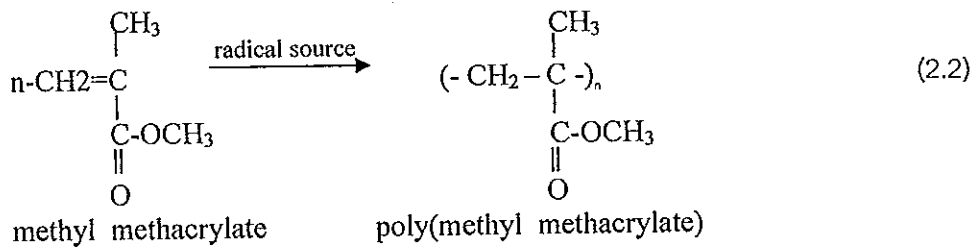
อุตสาหกรรมเริ่มผลิตพอลิเมทิลเมทาคริเลท (PMMA) ในเชิงการค้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2477 พอลิเมอร์นี้จัดเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) เป็นพลาสติกโปร่งใส ไม่มีสี มีความว่องไวต่อความชื้น และมีค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูง ทนทานต่อแรงอัดและดินฟ้าอากาศดีกว่าพอลิสไตรีน จึงมีความสำคัญและมีประโยชน์มากต่อการนำไปใช้งาน พอลิเมทิลเมทาคริเลทมีชื่อเรียกทางการค้า เช่น Plexiglas, Lucite และ Acrylite

กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์มีหลายขั้นตอน เริ่มด้วยการใช้อะซิโตนเป็นวัตถุดิบ แล้วเปลี่ยนอะซิโตนเป็นอะซิโตนไฮยาโนไฮดริน โดยใช้กรดไฮโดรไซยานิก (HCN) จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 100 °C แล้วผ่านสารที่เกิดขึ้นลงไปยังสารละลายเมทานอลที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย จะได้เมทิลเมทาคริเลท ดังสมการ 2.1



เมทิลเมทาคริเลทที่เตรียมได้จากวิธีนี้จะมีสถานะเป็นของเหลวไม่มีสี และมีจุดเดือด 100.5 °C

การพอลิเมอไรเซชันพอลิเมทิลเมทาคริเลทในอุตสาหกรรมทำได้โดยการเตรียมพอลิเมอร์นี้โดยกลไกแบบฟรีเรดิคัล ซึ่งมีได้หลายวิธี เช่น แบบบัลค์ แบบสารละลาย แบบแขวนลอย และแบบอิมัลชัน แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่แบบบัลค์ ดังสมการ 2.2



พอลิเมทิลเมทาคริเลทที่เตรียมโดยกลไกแบบฟรีเรดิคัลทั่วไปมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงและอสัณฐาน มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Tg) 105°C และจุดหลอมตัวสูงกว่า 200°C สมบัติพิเศษประการหนึ่งของพอลิเมออร์นี้คือไม่มีสีและใสเหมือนแก้ว นอกจากนี้แล้วยังแข็งแรงกว่าและทนทานต่อดินฟ้าอากาศได้ดีกว่าพอลิสไตรีน แต่สามารถทนทานต่อการสึกหรอได้ไม่ดีเท่าแก้ว

พอลิเมทิลเมทาคริเลทละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด ได้แก่ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีนและโทลูอีน คลอริเนตเตดไฮโดรคาร์บอน เช่น คลอโรฟอร์ม และสารจำพวกเอสเทอร์ เช่น เอทิลอะซิเตต ส่วนสารละลายบางชนิดเช่น แอลกอฮอล์และเอมีน ถึงแม้จะไม่ละลายพอลิเมออร์แต่ทำให้พอลิเมออร์นี้เกิดรอยแตกได้

นอกจากพอลิเมทิลเมทาคริเลทจะสามารถทนทานต่อน้ำและสารละลายอินทรีย์ทั่วไปได้เป็นอย่างดีแล้ว ยังทนทานต่อกรดอ่อน เบสอ่อน และปฏิกิริยาซาปอนนิฟิเคชัน (saponification) ความสามารถในการทนทานต่อสารเคมีต่างๆ ของพอลิเมทิลเมทาคริเลทแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงความสามารถของพอลิเมทิลเมทาคริเลทในการทนทานต่อสารเคมีชนิดต่างๆ  
(Polymer Engineering Center)

Chemical environment	Chemical resistance of PMMA
1,4-dioxane	-
1-nonanol	+
2-amino-2,2-diphenyl acetic acid	-
acetaldehyde, aq.	-
acetic acid, 10%	0
acetic acid, 95%	-
acetone	-
ammonia salts of mineral acids, 10%	+
ammonia, liq.	+
aniline	-
aromatics, aromatic hydrocarbonates	-
barium salts of mineral acid, 8%	+
benzene	-
benzoic acid, aq	+
benzylidene aldehyde	-
boric acid, aq.	+
brandy	+
bromine vapour	-
butanol	0
butter	+
butyl acetates	-
butyric acid, aq.	-
calcium chloride, aq.	+
carbon disulfide	-
carbon monoxide	+
caustic soda solution, aq.	+
chlorine, liq.	-
chloroform	-
chloro sulfonic acid	-
chloroacetic acid, aq.	-
chloromethanes	-
chromic acid, aq. 10%	-
chromic acid, aq. 1%	0
citrus fruits	+
citric acid, aq.	+
concrete	+
cresols	-
cycloalkanes	+
dibutyl phthalate	-
diethylene glycol	+
dimethyl ether	-
dioctyl phthalate	-
engine oils, 60 °C	+ +
ethanol	+

Chemical environment	Chemical resistance of PMMA
ethyl acetate	-
ethyl chloride	-
ethylene chlorohydrine	-
fats and waxes	0
formic acid	+
fuels (diesel)	+
fuels (four-star petrol)	-
galvanic solutions	+
gear lubrication oils	+
glycol, aq.	+
HCFC (hydrochlorofluorocarbons)	-
helium	+
heptane	+
hydrochloric acid, aq.	+
hydrogen	+
hydrogen chloride	-
hydrogen peroxide, aq.	+
hydrogen sulfide	+
impregnating oils	+
iod solution for disinfection	+
isopropanol, isopropyl alcohol, aq.	0
lactic acid, aq.	0
lubricating greases (rolling bearing gra.)	+
lubricating greases (silicone oil)	+
lubricating oils	+
lubricating oils, engine oils	+
lubricating oils, gear oils	+
magnesium salts	+
manganese salts, aq.	+
mercury	+
methanol	-
milk	+
mineral oil	+
mix acid	-
molds	+
nitric acid, aq. 2%	+
nitric acid, aq. 50%	-
nitrogen gases, (200 atm)	+
nitrogen oxides	+
noble gases (argon, helium, neon)	+
oil (animals, plants)	0
oxalic acid	+
oxygen	+
petroleum	+
phenol	-
phosphorus acid	+
plasticizers, softeners	+
polyester resins	+
potassium chloride, aq.	+

Chemical environment	Chemical resistance of PMMA
potassium dichromate	+
potassium nitrate, aq.	+
potassium permanganate, aq.	+
sea water, ocean water	+
soap	+
soda ash, aq.	+
sodium hydrogencarbonate, aq.	+
sodium hydrogensulfate, aq.	+
sodium hypochlorite, aq.	+
sodium salts	+
stearates	+
stearic acid	+
sulfur	+
sulfur dioxide	+
sulfuric acid, con.	-
sulfuric acid, aq.	+
sulfurous acid	0
sweat	+
toluene	-
trichloro methane	-
turpentine, oil	0
urea, aq.	+
uric acid	+
urine	+
washing leaches, 14% 60°C	+
water	+
waste water	+
waxe	+
yeasts and molasses	+
zinc	+
zinc chloride	+

- + Resistance  
 0 Limited resistance  
 - Not resistance

พอลิเมทิลเมทาคริเลทที่มีสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อความร้อนดีมาก นอกจากนี้ยังมีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าปานกลาง เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยหมู่  $-\text{C}(\text{O})_{\text{OC}_2\text{H}_5}$  ซึ่งเป็นหมู่ที่มีสภาพขั้ว เนื่องจากมีสมบัติความโปร่งใส จึงนำไปย้อมสีได้ง่ายจึงสามารถใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบของเครื่องไฟฟ้า มากกว่ากึ่งหนึ่งใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ เช่น พลาสติกหุ้มไฟหน้า ไฟท้าย ไฟเลี้ยว หน้าปัดเข็มไมล์ ประโยชน์การใช้งานอื่นๆ เช่น ป้ายโฆษณา สัญลักษณ์จราจร ทำเลนส์ หน้าปัดนาฬิกา และ เครื่องประดับนานาชนิด เป็นต้น

มีการศึกษาวิจัยการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลทอย่างแพร่หลาย เช่น การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ (อัศวพงษ์, 2546) พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึง อัตราการวัลคาไนเซชัน ความแข็ง ความทนต่อตัวทำละลายและอุณหภูมิการสลายตัวจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่เพิ่มขึ้นและความสามารถในการยืดลดลง อนุภาคของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของพอลิเมทิลเมทาคริเลทก็มีขนาดเล็กลง การศึกษาระบบวัลคาไนเซชันพบว่าระบบก้ำมะกั้นให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดสูงสุด และมีขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติอิพอกไซด์กระจายตัวอยู่ในเฟสของพอลิเมทิลเมทาคริเลทใหญ่ที่สุด ระบบเปอร์ออกไซด์มีความทนต่อตัวทำละลายและอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด

วรวรรณ (2547) ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ พบว่าค่าทอร์กการผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์และปริมาณเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ และจากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ทำให้อนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลทมีขนาดเล็กและกระจายตัวในเฟสยางในลักษณะที่สม่ำเสมอมากขึ้น ส่วนเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ พบว่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์และปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลทในพอลิเมอร์เบลนด์ ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาด การบวมพองในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะมีแนวโน้มลดลง และจากสัณฐานวิทยาพบว่าอนุภาคยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มมีขนาดอนุภาคเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ นอกจากนี้พบว่าความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือน และความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในการเบลนด์ ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลง

อมร (2547) ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท พบว่าความทนทานต่อตัวทำละลายน้ำมันดีเซลจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในการเบลนด์ และพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์เมื่อเพิ่มปริมาณโมโนเมอร์ที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์จะทำให้อนุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่กระจายตัวในเฟสของยางมีขนาดอนุภาคเล็กลงและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น

อนุรักษ์ (2547) ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง ค่าการบวมพองในสารผสมระหว่างน้ำมันเบนซินกับโทลูอีนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในการเบลนด์ แต่ค่าความสามารถในการยืด ค่าการบวมพองในน้ำมันดีเซล น้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ กลับมีแนวโน้มลดลง

ญาณินี (2547) ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในสภาวะลาเท็กซ์พบว่าค่าความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลทในพอลิเมอร์เบลนด์ นอกจากนี้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าโมดูลัสที่ 100, 200 และ 300 % , ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด, ความแข็ง และการเสียรูปถาวรเนื่องจากการกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลท ในขณะที่ความสามารถในการยืด และร้อยละการบวมพองมีค่าลดลง

## 2.6 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blends)

พอลิเมอร์เบลนด์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยให้มีความสามารถในการใช้งานและการแปรรูปกว้างขึ้น การเบลนด์พอลิเมอร์เป็นการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมเข้ากัน เพื่อปรับปรุงสมบัติซึ่งไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ได้จึงมีสมบัติเด่นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อน สมบัติที่ได้จากการเบลนด์ เช่น พอลิเมอร์มีทั้งความแข็งแรง (strength) และความเหนียว (toughness) , หรือพอลิเมอร์มีสมบัติร่วมกันระหว่างความแข็งแรงกับความต้านทานต่อตัวทำละลาย (solvent resistance) ฯลฯ นอกจากนี้พอลิเมอร์เบลนด์ยังมีความสามารถในการแปรรูป (processability) ทนต่อความร้อน ทนต่อสารเคมี ทนต่อสภาวะอากาศ ทนต่อการกระแทกและการดึง นอกจากนี้ยังสามารถทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติคงที่ (product uniformity) และยังมีการเปลี่ยนแปลงสูตรการผลิตที่เร็วขึ้น ทำให้อัตราผลิตสูงขึ้น (high productivity)



การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (compatibility) ของการเบลนด์เป็นหลัก กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการผสมแล้วเข้ากันได้ดี ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ไม่ดี จะส่งผลเสียต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน โดยแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ทำให้พอลิเมอร์ที่เกิดการแตกหัก (Crack) ได้ง่าย มีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาเบลนด์ นอกจากนี้ยังอาจทำให้ตัวทำละลายแพร่เข้าไปในระบบได้ง่ายเนื่องจากการมีช่องว่างมากกว่าปริมาตรอิสระ (Free volume) ของพอลิเมอร์เดิมแต่ละตัว (Holden, 2000)

## 2.7 ความไม่เข้ากันของการเบลนด์

การเบลนด์พอลิเมอร์ให้ได้สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ดี จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ทั้งคู่ด้วย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการที่เกี่ยวข้องกับความไม่เข้ากัน คือ

1. ความไม่เข้ากันทางความหนืด (Viscosity incompatibility) ถ้าความหนืดของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่จะผสมกันเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน พอลิเมอร์เบลนด์จะมีความเข้ากันได้ดีตั้งแต่ขั้นตอนการผสม แต่หากทั้งสองพอลิเมอร์มีความหนืดที่แตกต่างกัน จะเข้ากันได้ไม่ดี ซึ่งอาจปรับปรุงได้โดยการปรับความหนืดของพอลิเมอร์ด้วยการใช้น้ำมัน หรือสารตัวเติมในปริมาณที่เหมาะสม

2. ความไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic incompatibility) การพิจารณาความเข้ากันของการผสม มักพิจารณาถึงสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic miscibility) กล่าวคือพอลิเมอร์จะเกิดการผสมเข้ากันได้ เมื่อค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy,  $\Delta G_m$ ) ของการผสมมีค่าเป็นลบ เนื่องจากผลลัพท์ของค่าเอนโทรปี (Entropy,  $\Delta S_m$ ) และเอนทัลปี (Enthalpy,  $\Delta H_m$ ) ของการผสม การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระของกิบส์ของการผสมแสดงดังสมการที่ 2.4

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad (2.4)$$

ถ้าค่าพลังงานอิสระของกิบส์  $\Delta G_m$  ของการผสมเป็นบวกที่อุณหภูมิการผสม พอลิเมอร์สองชนิดที่นำมาผสมกันจะเกิดการแยกเฟส ดังนั้นการผสมที่เข้ากันได้ค่า  $\Delta G_m$  จะต้องเป็นลบ แสดงว่าของผสมที่คายพลังงาน ( $\Delta H_m < 0$ ) จะเกิดการผสมเข้ากันได้ แต่ถ้าเป็นของผสมที่ดูดพลังงานจะผสมเข้ากันได้ที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น (Holden, 2000)

3. ความไม่เข้ากันทางอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate incompatibility) ในการเบลนด์ระหว่างอีลาสโตเมอร์กับอีลาสโตเมอร์ การที่อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ไม่เท่ากัน เป็นผลมาจาก

การที่พอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน และความสามารถในการกระจายตัวของสารเคมีในพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะสารตัวเร่ง และสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ทำให้ลดความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ แต่สามารถปรับปรุงสมบัติข้อนี้ได้ โดยการใช้อัตราส่วนของสารวัลคาไนซ์และสารตัวเร่งในปริมาณที่เหมาะสม หรือทำให้พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งเกิดการวัลคาไนซ์แล้วบางส่วนก่อนที่จะนำมาเบลนด์ (Duryodhan, 2002)

## 2.8 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers, TPEs)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ คือ วัสดุที่มีสมบัติเป็นยางที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใช้งาน แต่สามารถแปรรูปได้ด้วยกระบวนการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก องค์ประกอบหลักประกอบด้วย เฟสแข็ง (hard phase) ซึ่งมักจะเป็นเฟสของเทอร์โมพลาสติก และเฟสนิ่ม (soft phase) ซึ่งเป็นเฟสของอิลาสโตเมอร์ เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 7 ประเภท (Holden, 2000) ได้แก่

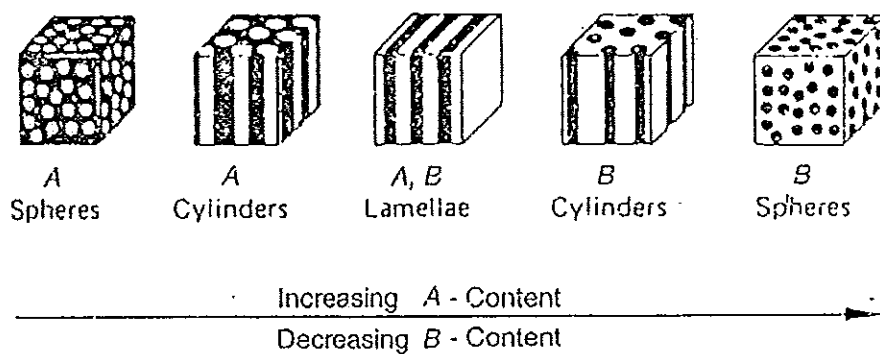
1. บล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน (Styrenic block copolymers) โครงสร้างประกอบด้วย บล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน (polystyrene segment) และ ส่วนของอิลาสโตเมอร์ (Elastomer segment) โดยทั้งสองส่วนนี้จะไม่เข้ากัน (incompatibility) ทำให้เกิดการแยกเฟส การเตรียม บล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีนใช้วิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบแอนไอออนิกและคาร์โบแคตไอออนิก ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในกลุ่มนี้แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน (Holden, 2000)

Hard segment, <i>H</i>	Soft or Elastomeric Segment, <i>E</i>	Structure <sup>a</sup>
Polystyrene	Polybutadiene and polyisoprene	T, B
Polystyrene	Poly(ethylene-co-butylene and Poly(ethylene-co-propylene)	T
Polystyrene & Substitute Polystyrenes	Polyisobutylene	T, B
Poly( $\alpha$ -methyl-styrene)	Polybutadiene, polyisoprene	T
Poly( $\alpha$ -methyl-styrene)	Poly(propylene sulfide)	T
Polystyrene	Polydimethylsiloxane	T, M
Poly( $\alpha$ -methyl-styrene)	Polydimethylsiloxane	M

<sup>a</sup> T = Triblock, *H-E-H*, B = Branched, (*H-E*)<sub>n</sub>X, M = Multiblock, *H-E-H-E-H*...

สัณฐานวิทยาของบล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเฟสแข็งของพอลิสไตรีน/เฟสนิ่มของอีลาสโตเมอร์ (hard polystyrene phase/softer elastomer phase) กล่าวคือ ถ้าอัตราส่วนของ A/B เพิ่มขึ้น สัณฐานวิทยาจะเปลี่ยนจากการกระจายตัวแบบทรงกลมของ A (sphere A) ในเฟสต่อเนื่องของ B (continuous phase B) เป็นการกระจายตัวแบบแท่งของ A (rod A) ในเฟสต่อเนื่องของ B และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน A/B ต่อไปจะได้โครงสร้างของ A และ B แบบซ้อนกันเป็นชั้นๆ (lamellae) หรือเกิดการกระจายตัวแบบเฟสต่อเนื่อง (Co-continuous phase) แต่ถ้าเพิ่มอัตราส่วน A จนถึงปริมาณหนึ่งจะเกิดการกลับเฟสขึ้น กล่าวคืออนุภาคของ B จะกระจายตัวในเฟสต่อเนื่องของ A แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาในองค์ประกอบของ A-B-A block copolymer (Holden, 2000)

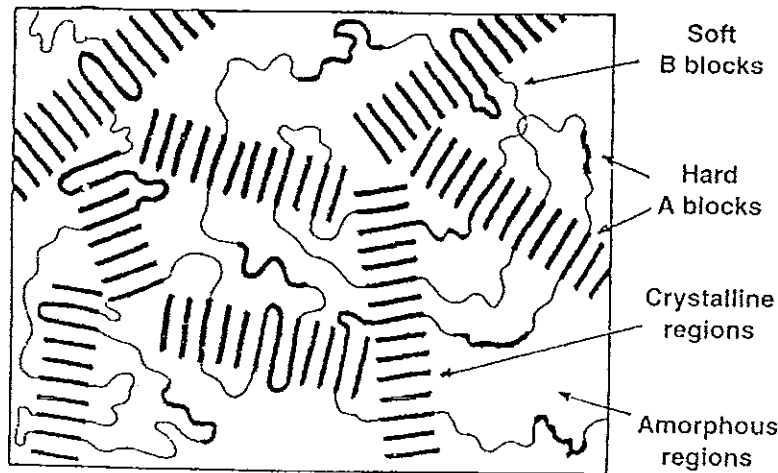
2. บล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดหลายบล็อกที่มีผลึก (Crystalline multi-block copolymers) โครงสร้างประกอบด้วยบล็อกโคพอลิเมอร์หลายบล็อก (multi-block  $(H-E)_n$  copolymer) กล่าวคือ มีส่วนแข็ง (hard segment, H) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถเกิดผลึกได้ (crystalline thermoplastics) และส่วนนิ่ม (soft segment, E) เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานหรืออีลาสโตเมอร์ โดยทั่วไปส่วนแข็งจะมีโครงสร้างของหน่วยที่ซ้ำกันมีความสม่ำเสมอตลอดความยาวของสายโซ่ และพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนนิ่มจะไม่มี ความสม่ำเสมอของโครงสร้างหน่วยที่ซ้ำกันจึงไม่เกิดผลึก ดังนั้น ส่วนแข็งจะมีอุณหภูมิหลอมผลึก (crystalline melting temperature,  $T_m$ ) สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่การมีอุณหภูมิหลอมผลึกสูงเกินไปจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการแปรรูป ในขณะที่ส่วนนิ่มจะมีโครงสร้างของหน่วยที่ซ้ำกันเป็นแบบสุ่ม จึงมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในกลุ่มนี้แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดหลายบล็อกที่มีผลึก (Holden, 2000)

Hard segment, <i>H</i>	Soft or Elastomeric segment, <i>E</i>	Structure <sup>a</sup>
Polyurethane	Polyester & Polyether	M
Polyamide	Polyester & Polyether	M
Polyethylene	Poly(ethylene-co-butylene) and Poly(ethylene-co-propylene)	T
Polypropylene (isotactic)	Poly( $\alpha$ -olefins)	X
Poly( $\beta$ -hydroxyalkanoates)	Poly( $\beta$ -hydroxyalkanoates)	M
Polycarbonate	Polydimethylsiloxane	M
Poly( $\epsilon$ -caprolactam), Nylon-6	Polydimethylsiloxane	T
Poly(methyl methacrylate)	Poly(alkyl acrylates)	T, B
Polysulfone	Polydimethylsiloxane	M
Polypropylene (isotactic)	Polypropylene (atactic)	X

<sup>a</sup> T=Triblock, *H-E-H*; B=Branched, (*H-E*)<sub>n</sub>X; M=Multiblock, *H-E-H-E-H-.....*; X=Mixed structure, including multiblock

สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดหลายบล็อกที่มีผลึกแสดงดังรูปที่ 2.11 กล่าวคือ มีโครงสร้างของส่วนแข็งที่สามารถเกิดผลึกได้ (hard crystalline segment) กระจายตัวแบบต่อซึ่งกันและกันกับเฟสอิลาสโตเมอร์ นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดนี้มีลักษณะพิเศษคือ อาจจะมีส่วนแข็งที่ไม่ได้จัดเรียงตัวเป็นผลึกกระจายตัวในส่วนนิ่ม ที่อุณหภูมิห้องส่วนที่เป็นผลึกจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงทางกายภาพโดยรวบปลายสายโซ่ส่วนกลางของอิลาสโตเมอร์เข้าด้วยกันเป็นโครงร่างแหสามมิติ ซึ่งในบางครั้งจะมีรูปแบบคล้ายกับการเชื่อมโยงของบล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน โดยทั้งสองกรณีส่วนที่แข็งจะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อวัสดุได้รับความร้อนและละลายจนพอลิเมอร์สามารถไหลได้ และเมื่อให้ความเย็น ส่วนที่แข็งก็จะแข็งตัวและมีการเชื่อมโยงดังเดิม



รูปที่ 2.11 สันฐานวิทยาของบล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดหลายบล็อกที่มีผลึก (Holden, 2000)

3. บล็อกโคพอลิเมอร์อื่นๆ (Miscellaneous block copolymers) เป็นกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เฟสนิ่มและเฟสแข็งมีลักษณะทางเคมีใกล้เคียงกัน เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดนี้จะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ เช่น polycarbonate/polyester (Goldberge, 1964; Perry *et al.*, 1965 อ้างโดย Holden, 2000) และ poly(silphenylenesiloxane)/poly(dimethyl siloxane) (Merker *et al.*, 1964 อ้างโดย Holden, 2000) ซึ่ง poly(silphenylenesiloxane)/poly(dimethyl siloxane) นี้โครงสร้างจะประกอบด้วยบล็อกโคพอลิเมอร์กับพอลิไซลอกเซนที่เป็นส่วนของอิลาสโตเมอร์ซึ่งจะทำให้ได้สมบัติด้านความทนทานต่อความร้อนดี นอกจากนี้สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิไซลอกเซนกับพอลิอีเทอร์อีไมด์ซึ่งจะมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนดีกว่าได้แต่จะมีราคาสูงมาก บล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดนี้จะนำไปใช้ในงานเฉพาะด้าน เช่น งานหุ้มสายไฟ (Mihalich, 1989 อ้างโดย Holden, 2000) ซึ่งถ้าเกิดการเผาไหม้ ก็จะทำให้เกิดควันน้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากโคพอลิเมอร์ของพอลิไซลอกเซนกับไนลอน 6 จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อความร้อนได้ (Lovinger *et al.*, 1993 อ้างโดย Holden, 2000)

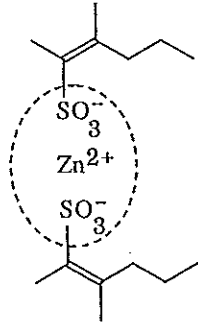
4. กราฟต์โคพอลิเมอร์ของเทอร์โมพลาสติกบนโมเลกุลอิลาสโตเมอร์ (Hard polymer/elastomer graft copolymers) เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีการกราฟต์โมเลกุลที่เป็นส่วนแข็งบนโครงสร้างของอิลาสโตเมอร์ซึ่งเป็นสายโซ่หลัก บางครั้งเรียกว่าโครงสร้างหวี (comb structure) โดยถ้าน้ำหนักโมเลกุลของส่วนแข็งมีค่าสูงเพียงพอ ก็จะทำให้เกิดการแยกเฟส ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงร่างคล้ายกับของบล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน (S-I-S และ S-

B-S เป็นต้น) ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงทางกายภาพ ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในกลุ่มนี้

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ประเภทกราฟต์โคพอลิเมอร์ของเทอร์โมพลาสติกบนโมเลกุลอิลาสโตเมอร์ (Holden, 2000)

Hard Pendant Segment, <i>H</i>	Soft or Elastomeric Backbone Segment, <i>E</i>
Polystyrene & Poly( $\alpha$ -methyl styrene)	Polybutadiene
Polyindene	Polybutadiene
Polystyrene & Poly( $\alpha$ -methyl styrene)	Poly(ethylene-co-propylene)
Polyindene	Polyisobutylene
Polystyrene & Poly( $\alpha$ -methyl styrene)	Polyisobutylene
Poly(phenylene ether)	Polyisobutylene
Poly(para chlorostyrene)	Polyisobutylene
Polystyrene	Chlorosulfonated polyethylene
Poly( $\alpha$ -methyl styrene)	Polychloroprene
Polystyrene	Poly(butyl or ethyl-co-butyl) acrylates
Poly(methylmethacrylate)	Polybutylacrylate
Polypivalolactone	Poly(ethylene-co-propylene)
Polypoalolactone	Polyisobutylene

5. ไอไอโนเมอร์ (Ionomer) เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่เกลือโลหะในโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลปริมาณเล็กน้อย เช่นหมู่เกลือโลหะของโซเดียม (Na), แคลเซียม (Ca) และสังกะสี (Zn) เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากหมู่เกลือหรือคู่อิออนบนโมเลกุลพอลิเมอร์มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกันทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพ (physical crosslinking) ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวประเภทนี้เรียกว่า แรงยึดเหนี่ยวไอออนิก (ionic interaction) ผลของการเชื่อมโยงของแรงนี้จะทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีความแข็งแรงเทียบเท่ากับอิลาสโตเมอร์ที่มีการวัลคาไนซ์ และเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า ไอไอโนเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของไอโอโนเมอร์ยางธรรมชาติซิงค์ซัลโฟเนต (zinc sulphonated natural rubber ionomer) (Xavier, 2002)

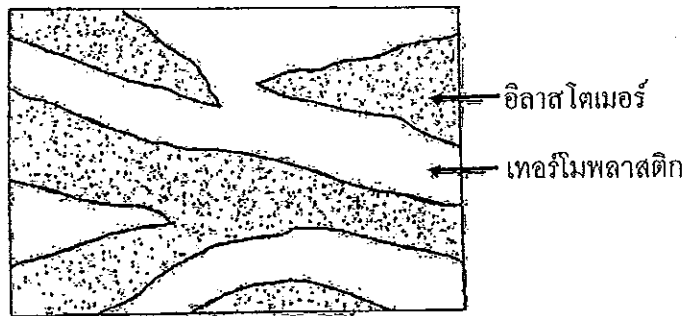
6. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีสัณฐานวิทยาแบบเปลือกหุ้ม (Polymer with core-shell morphologies) มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์แบบหลายองค์ประกอบ (multi-component polymers) และเป็นอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็กมาก โดยมีส่วนของพอลิเมอร์แกนกลาง (core) ที่แตกต่างกับบริเวณเปลือกหุ้ม (shell) พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถเตรียมโดยวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน เช่น มีส่วนแกนกลางแข็ง (rigid core) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของสไตรีนกับอะครีโลไนไตรล์ และส่วนเปลือกหุ้มนิ่ม (elastomeric shell) ซึ่งเป็นพอลิวิทิลอะครีเลต (Falk and Van (1984) (อ้างโดย Holden, 2000)) หรืออาจจะมีลักษณะตรงข้ามก็ได้คือ มีเปลือกหุ้มแข็ง (rigid shell) และมีแกนกลางนิ่ม (elastomeric core) นอกจากนี้ถ้าอีลาสโตเมอร์ที่เป็นเปลือกหุ้มสามารถเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกจะสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงความทนทานแรงกระแทก (impact modifier) สำหรับเทอร์โมพลาสติกได้ และสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในส่วนของอีลาสโตเมอร์ในขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

7. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์พลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ (Hard polymer/elastomer combinations)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ชนิดนี้เตรียมจากการเบลนด์พลาสติกกับอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

7.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์แบบปกติ (simple blends) ทำการเบลนด์โดยนำพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์มาผสมเข้าด้วยกันในเครื่องมือที่มีแรงเฉือนสูง ทำให้เกิดลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปแบบของการแยกเฟส กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกและอีลาสโตเมอร์กระจายตัวเป็นเฟสต่อเนื่องกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายเซลล์ฟองน้ำแบบเปิด (open cell foam) นั่นคือมีเฟสหนึ่งเป็นฟองน้ำและอีกเฟสหนึ่งเป็นฟองอากาศรวมกันเป็นสองเฟส แสดงลักษณะดังรูปที่ 2.13 เรียกลักษณะแบบนี้ว่า โครงสร้างแบบเฟส

ต่อเนื่อง (Co-continuous structure) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบสามมิติ ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงจากเฟสต่อเนื่องที่แข็ง (Continuous hard phase) และมีความยืดหยุ่น (Flexibility) จากเฟสต่อเนื่องที่นิ่ม (Continuous soft phase) เนื่องจากทั้งสองเฟสไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงกัน แต่สามารถเกิดการไหลได้ แต่หากเฟสของพอลิเมอร์แข็งมีมากกว่าเฟสพอลิเมอร์นิ่มมาก ความแข็งแรงของพอลิเมอร์จะได้รับอิทธิพลจากพอลิเมอร์แข็งเป็นส่วนใหญ่ ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีเฟสของอีลาสโตเมอร์มากกว่าเฟสของเทอร์โมพลาสติกมากจะมีลักษณะตรงกันข้าม กล่าวคือเป็นเฟสพอลิเมอร์ที่แข็งกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของอีลาสโตเมอร์ ซึ่งสมบัติของอีลาสโตเมอร์จะเด่นกว่าคือนิ่มและยืดหยุ่น แต่จะมีความแข็งแรงน้อย

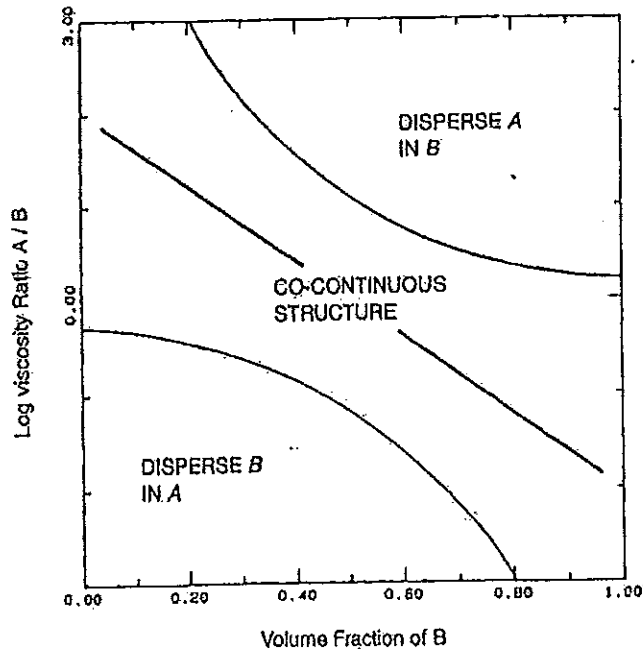


รูปที่ 2.13 สันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์พลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ (Holden, 2000)

จากโครงสร้างนี้ พบว่าพอลิเมอร์ที่จะนำมาเบลนด์เพื่อผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะต้องมีปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ

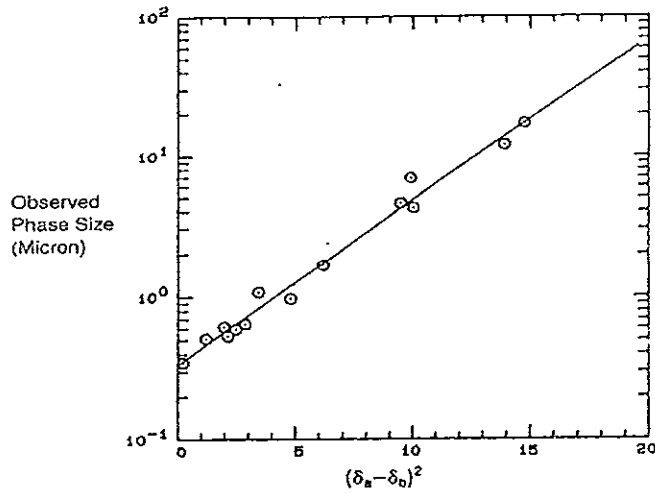
1. ความหนืดของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดต้องเข้ากันได้ที่อุณหภูมิและอัตราเฉือนของการผสม ซึ่งที่อัตราเฉือนต่ำๆ สามารถใช้เครื่องแปรรูปยาง เช่น เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ส่วนที่อัตราเฉือนสูงๆ สามารถใช้เครื่องแปรรูปพลาสติก เช่น เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งพบว่าการที่จะได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีโครงสร้างแบบเฟสต่อเนื่องจะต้องใช้ความหนืดและอัตราส่วนการเบลนด์ที่เหมาะสม





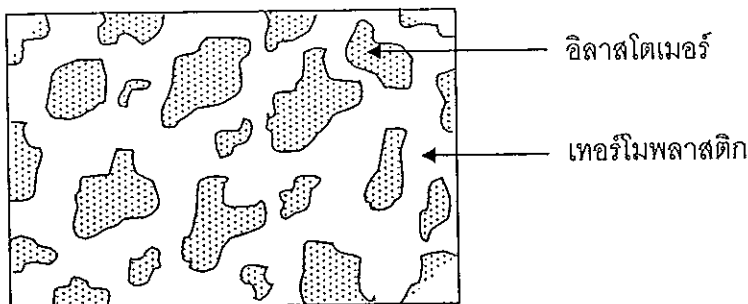
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนืดของสององค์ประกอบกับอัตราส่วนในการผสม (Holden, 2000)

2. ความเข้ากันได้ของการเบลนด์ พิจารณาจากความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการละลาย (solubility parameter) ถ้าคู่พอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน จะทำให้เกิดการกระจายตัวที่มีเฟสเล็กกว่า (finer dispersion) แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างสไตรีนกับโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนบิวทิลีน (S-EB-S) พบว่าขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการละลายระหว่างโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนบิวทิลีน (ethylene-butylene copolymer) กับสไตรีน ซึ่งถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าความสามารถในการละลายต่างกันมาก เช่น พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีขั้ว ในขณะที่พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งไม่มีขั้วก็จะมีโอกาสเกิดเป็นเฟสขนาดใหญ่ ซึ่งมีการยึดเหนี่ยว (adhesion) ระหว่างเฟสต่ำ



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการละลายกับขนาดอนุภาค (Holden, 2000)

7.2 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ เรียกว่าวัสดุในกลุ่มนี้ว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (thermoplastic vulcanizate, TPV) หรือไดนามิกวัลคาไนซ์ (dynamic vulcanizate, DV) เป็นการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ แล้วทำให้ส่วนของอีลาสโตเมอร์เกิดพันธะเชื่อมโยงในระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ขณะทำการบดผสม เรียกว่าเป็นการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ (dynamic vulcanization) ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีลักษณะโครงสร้างต่างจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ปกติ คือ โครงสร้างประกอบด้วยอนุภาคอีลาสโตเมอร์วัลคาไนซ์ที่กระจายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ ในเฟสเทอร์โมพลาสติก ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Holden, 2000)

การวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ เป็นการวัลคาไนซ์ให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างกระบวนการผสม ซึ่งทำภายใต้แรงเฉือนสูงและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะทำให้เฟสพลาสติกหลอม และเฟสของอีลาสโตเมอร์กระจายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กในเฟสต่อเนื่องของพลาสติก ในขณะที่เดียวกันก็เกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้นในเฟสของอีลาสโตเมอร์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปแปรรูปด้วยเครื่องแปรรูปพลาสติก และสามารถนำมาผ่านกระบวนการรีไซเคิล (recycling process) ได้

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ สามารถทำได้ทั้งกระบวนการแปรรูปแบบแบบ (batch process) โดยทั่วไปใช้เครื่องบดผสมแบบปิด (internal mixer) หรือกระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง (continuous process) โดยเครื่องเอ็กซ์ทูด ซึ่งอุณหภูมิการบดผสมต้องสูงพอที่จะหลอมเทอร์โมพลาสติกและวัลคาไนซ์เฟสของอีลาสโตเมอร์ในระหว่างการบดผสม และเมื่อเกิดการวัลคาไนซ์ความหนืดของอีลาสโตเมอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงจุดที่ความหนืดระหว่างเฟสอีลาสโตเมอร์กับเฟสพลาสติกต่างกัน (mismatch) จึงเป็นสาเหตุให้เฟสของอีลาสโตเมอร์เกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ในเฟสของพลาสติก และเกิดการวัลคาไนซ์ต่อเนื่อง โดยต้องมีการให้แรงเฉือนจนกระทั่งเกิดการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ มิฉะนั้นจะทำให้อนุภาคอีลาสโตเมอร์กลับมารวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) โดยทั่วไปสามารถติดตามการวัลคาไนซ์ในระหว่างการบดผสมได้จากทอร์กของการบดผสม (mixing torque) หรือพลังงานการบดผสม (mixing energy) และหลังจากค่าทอร์กหรือพลังงานของการบดผสมขึ้นสูงสุดแล้ว ทำการบดผสมต่อไปอีกได้ เพื่อปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปของพอลิเมอร์เบลนด์ หลังจากนั้นจึงนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้ออกจากเครื่องบดผสม ทำเป็นเม็ดแล้วนำไปฉีดขึ้นรูป

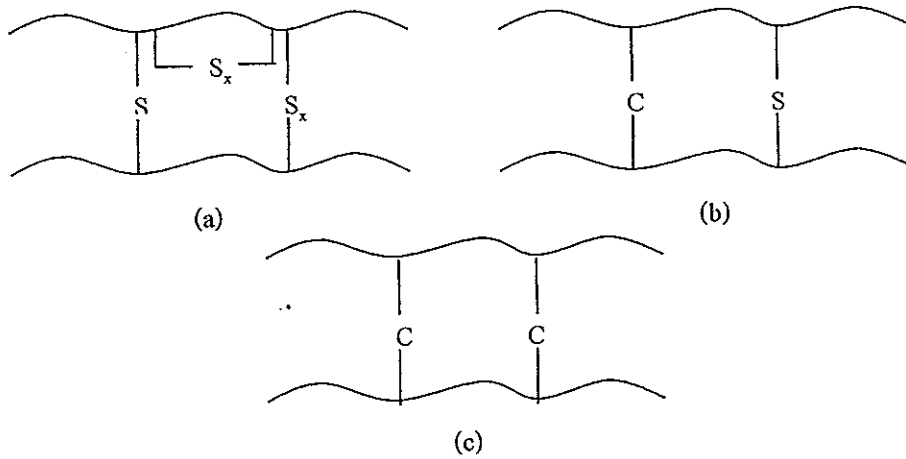
การวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์เริ่มเป็นที่สนใจในเชิงพาณิชย์ เมื่อมีการจดสิทธิบัตรการผลิตซานโตพรีน (Santoprene<sup>®</sup> thermoplastic elastomer) ซึ่งเป็นการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ของการเบลนด์ยางโอลิฟิน (ยางอีพีดีเอ็ม) กับพอลิโอลิฟิน (พอลิโพรไพลีน) ซึ่งถ้าอนุภาคยางมีขนาดเล็กเพียงพอและเกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์ (fully vulcanized) สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะดีขึ้น กล่าวคือ การบิดรูปอย่างถาวรมีค่าลดลง สมบัติเชิงกลดีขึ้น สมบัติด้านความต้านทานต่อของเหลว เช่น น้ำมันร้อน ดีขึ้น การใช้งานที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น มีความสม่ำเสมอของลักษณะวิทยาในขณะหลอมดีขึ้น ความแข็งแรงขณะหลอม (melt strength) ดีขึ้น สามารถแปรรูปด้วยกระบวนการของเทอร์โมพลาสติกได้ง่ายขึ้น ฯลฯ

มีการศึกษาวิจัยเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ โดยใช้กระบวนการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์อย่างแพร่หลาย เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ของอีลาสโตเมอร์ในระหว่างการบดผสมในสถานะหลอม เช่น การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางไนไตรล์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (George *et al.*, 2000) โดยใช้โคควิมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารวัลคาไนซ์ พบว่า ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยึดจน

ขาด และความหนืดเหนียวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไดคิมิลเปอร์ออกไซด์ Mehrabzadeh and Delfah (2000) ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางไนไตรล์กับพอลิเอไมด์ 6 พบว่า ที่อัตราส่วนการเบลนด์ NBR/PA6 เท่ากับ 60/40 เป็นอัตราส่วนการเบลนด์ที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ และการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ความแข็งแรง การบวมพองในน้ำมัน การผิวดูอย่างถาวร และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

Oderkerk and Groeninckx (2002) ได้ปรับปรุงสมบัติของการเบลนด์ระหว่างยางอีพีดีเอ็มกับไนลอน 6 โดยใช้ยางอีพีดีเอ็มที่มีการดัดแปลงโมเลกุลด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ และทำการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ในเครื่องเอ็กซ์ทรูดขนาดเล็ก พบว่าการใช้ยางอีพีดีเอ็มที่มีการดัดแปลงโมเลกุลและการทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในเฟสยางในระหว่างการบดผสมในสภาวะหลอม ทำให้เกิดการกระจายตัวของเฟสยางในเฟสพลาสติกและเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ด้วย

การศึกษาการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์โดยการแปรระบบการวัลคาไนซ์นั้นก็ป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่น่าสนใจ เพื่อศึกษาระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมซึ่งจะส่งผลให้ได้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยระบบที่มีการศึกษากันอย่างมากคือ ระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม เช่น การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางไนไตรล์เบลนด์กับพอลิโพรไฟลีน (George *et al.*, 1999) และกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (George *et al.*, 2000) ยางธรรมชาติเบลนด์กับพอลิสไตรีน (Asaletha *et al.*, 1999) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์เบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท (Nakason *et al.*, 2005) พบว่าในระหว่างเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ อนุภาคยางจะเกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็กในเฟสต่อเนื่องของเทอร์โมพลาสติกเฟส โดยมีการเรียงขนาดอนุภาคตามลำดับคือ ระบบเปอร์ออกไซด์ < ระบบผสม < ระบบกำมะถัน และมีรูปแบบการเชื่อมโยงโมเลกุลในระบบต่าง ๆ เสนอโดย George *et al.* 2000) แสดงดังรูปที่ 2.17 นั่นคือระบบเปอร์ออกไซด์จะมีการเชื่อมโยงโมเลกุลผ่านพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C linkage) ในขณะที่ระบบกำมะถันจะมีการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (C-S-C linkage) ซึ่งเป็นพันธะที่ค่อนข้างอ่อนที่อุณหภูมิสูง ส่วนการวัลคาไนซ์ด้วยระบบผสมจะมีการเชื่อมโยงโมเลกุลทั้งพันธะคาร์บอน-คาร์บอน และเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน



รูปที่ 2.17 รูปแบบการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยระบบต่าง ๆ (a) ระบบก้ำมะถัน (b) ระบบผสม และ (c) ระบบเปอร์ออกไซด์ (George *et al.*, 2000)

Asaletha *et al.*, (1999) เสนอรูปแบบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน (NR/PS) โดยทำการแปรระบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ ระบบเปอร์ออกไซด์ ระบบก้ำมะถัน และระบบผสม พบว่าการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะช่วยปรับปรุงสัณฐานวิทยาของระบบ กล่าวคือ เกิดการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กของอีลาสโตเมอร์ในเฟสเทอร์โมพลาสติกโดยมีการเรียงขนาดอนุภาคตามลำดับ ดังนี้ ระบบเปอร์ออกไซด์ < ระบบผสม < ระบบก้ำมะถัน

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของพอลิเอไมด์ โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ เช่น Mehrabzadeh and Delfan (2000) ศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์และปริมาณสารวัลคาไนซ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ของยางไนไตรล์กับพอลิเอไมด์ 6 (NBR/PA6) โดยการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ ให้ระบบการวัลคาไนซ์แบบฟีนอลิกเรซิน, ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบก้ำมะถัน พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ของ NBR/PA6 ที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 เป็นอัตราส่วนการเบลนด์ที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ และการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง การบวมพองในน้ำมัน การผิกรูปถาวร และ ความทนทานต่ออุณหภูมิสูง และพบว่าที่อัตราส่วน 60/40 เฟสยางจะกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ในเฟสต่อเนื่องของพอลิเอไมด์ 6

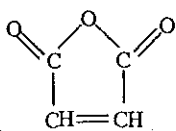
### บทที่ 3

#### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

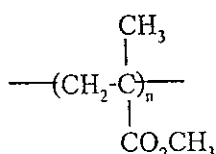
#### 3.1 วัสดุ

3.1.1 ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air Dried sheet, ADS) ใช้สำหรับเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต  
ผลิตโดยสหกรณ์บ้านควนป็นเต จ.พัทลุง จำกัด

3.1.2 มาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride,  $C_4H_2O_3$ ) ใช้สำหรับเตรียมยางธรรมชาติมา  
ลิเอต เป็นชนิด AR-grade มีความบริสุทธิ์ 98.0 % เป็นเกล็ดสีขาวขุ่น จุดหลอมเหลว  
อยู่ในช่วง  $52-54\text{ }^{\circ}\text{C}$  จุดเดือด  $202\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความถ่วงจำเพาะ (ของแข็ง) 1.43 ผลิตโดย  
บริษัท Riedel-de Haen, Seelze ประเทศเยอรมัน มีสูตรโครงสร้างคือ



3.1.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลท [Poly(methyl methacrylate)] เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ใน  
การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยการเบลนด์กับยางธรรมชาติมาลิเอต มีชื่อ  
ทางการค้าคือ Crystallite เกรด MD ลักษณะเป็นเม็ดใส มีค่า Transmittance เท่ากับ  
93% มีความถ่วงจำเพาะ 1.19 ดัชนีการไหล  $14\text{ g}/10\text{ นาที}$  ความต้านทานต่อแรงดึง  
 $670\text{ kg}/\text{cm}^2$  ความสามารถในการยืดจนขาด 4 % ผลิตโดยบริษัท Diapolyacrylate Co.,  
Ltd. ประเทศไทย มีสูตรโครงสร้างคือ



3.1.4 อะซิโตน (Acetone) ใช้สกัดเฟสพอลิเมทิลเมทาคริเลทออกจากชิ้นงานเทอร์โม  
พลาสติก อีลาสโตเมอร์เพื่อทดสอบสัณฐานวิทยา มีน้ำหนักโมเลกุล  $58.08\text{ g}/\text{mol}$   
ความบริสุทธิ์ 99.5 % จุดเดือดประมาณ  $56.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ผลิตโดย Labscan Asia Co., Ltd.  
ประเทศไอร์แลนด์

3.1.5 โทลูอีน (Toluene) ใช้เป็นตัวทำละลายยางธรรมชาติมาลิเอต มีน้ำหนักโมเลกุล  $92.14\text{ g}/\text{mol}$   
ความบริสุทธิ์ 99.5 % จุดเดือดประมาณ  $110.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีความหนาแน่น  $0.867\text{ กรัม}$   
ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia Co., Ltd. ประเทศไอร์แลนด์

- 3.1.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ใช้เป็นสารกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอต มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความหนาแน่น 5.57 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ผลิตโดยบริษัท Global Chemical Co., Ltd. ประเทศไทย
- 3.1.7 กำมะถัน (Sulphur) ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอต มีสูตรทางเคมี คือ  $S_8$  มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลือง มีความหนาแน่น 2.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ผลิตโดยบริษัท Siam Chemical public Co., Ltd ประเทศไทย
- 3.1.8 เอ็นเทอเทียร์บิวทิว-2-เบนโซไทอาซีนิล ซัลฟีนามิด (N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide, TBBS) ใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลีเอต มีจุดหลอมเหลว  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  ผลิตโดยบริษัท Bayer Co., Ltd. ประเทศเยอรมัน
- 3.1.9 กรดสเตียริก (Stearic acid) ใช้เป็นสารกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอต มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 0.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical Co., Ltd. ประเทศไทย
- 3.1.10 ไตรอัลลิลไซยานูเรต (Triallyl cyanurate, TAC) มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี ใช้เป็นสารร่วมในการวัลคาไนซ์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์ สูตรโมเลกุล คือ  $C_{12}H_{16}N_3O_3$  มีจุดหลอมเหลว  $26-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  น้ำหนักโมเลกุล 249.27 g/mol ผลิตโดยบริษัท Fluka Chemika ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 3.1.11 ดีโอ โฟล เอส (Deoflow S) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวอมน้ำตาล มีส่วนประกอบของเกลือแคลเซียมของกรดไขมันอิ่มตัว และเอไมด์ มีความหนาแน่นประมาณ 0.8-0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ใช้เป็นสารช่วยในการแปรรูป เป็นสารที่ช่วยทำให้สารเคมีกระจายตัวในยางได้ดี และทำให้ยางมีผิวเรียบลื่น ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยางรถยนต์ อุตสาหกรรมรองเท้า เป็นต้น สาร Deoflow S นี้ผลิตโดยบริษัท D.O.G. Deutsche Oelfabrik ประเทศเยอรมัน
- 3.1.12 Spindle Oil มีลักษณะเป็นของเหลว ความถ่วงจำเพาะ 0.76-0.79 ใช้เป็นสารช่วยในการแปรรูปในกลุ่ม paraffinic ใช้เป็นสารทำให้ยางมีผิวเรียบลื่น ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical Company ประเทศไทย
- 3.1.13 Dioctyl Phthalate (DOP) หรือ Di (2-ethylhexyl) phthalate มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{24}H_{38}O_4$  เป็นของเหลว (น้ำมัน) จุดเยือกแข็ง  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความถ่วงจำเพาะ 0.986 เป็นสารเติมแต่งสำหรับพลาสติก โดยทำหน้าที่เป็น plasticizer ทำให้เนื้อพลาสติกมีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นได้ดี และเหนียวมากขึ้น ส่วนใหญ่ใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับ

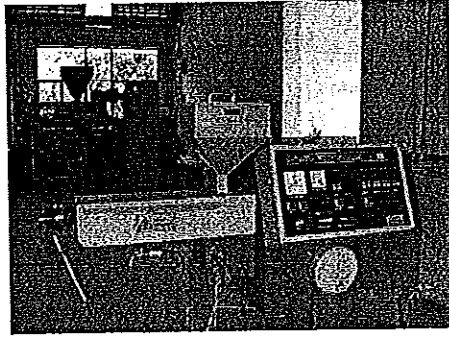
พลาสติกชนิดพีวีซี (Polyvinyl chloride) ผลิตโดยบริษัท Eltachim GmbH ประเทศเยอรมัน

- 3.1.14 Dimethylol phenolic resin (SP - 1045) มีปริมาณของหมู่เมทิลลอล (methylol) ประมาณ 8-11% มีค่าจุดหลอมเหลวที่ทดสอบด้วยหลอดคาปิลลารี (Melting Point, Capillary) 140-150<sup>o</sup>F ค่าความถ่วงจำเพาะ 1.4 ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของการเบลนด์พลาสติกกับยาง สามารถใช้ประโยชน์ในงานอื่นได้ เช่น ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ (Resin cure system) ซึ่งสามารถทำให้เกิดพันธะเคมีของสารยึดจับกับโมเลกุลของ methylol ผลิตโดยบริษัท Schenectacy International, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.15 วิงสเตย์แอล (Wingstay L) เป็นสารเคมีในกลุ่มฟีนอลโมเลกุลใหญ่ที่มีหมู่แทนที่หลายหมู่ (Polymeric sterically hindered phenol) ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมจากการออกซิเดชั่น (Antioxidant) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 1.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ผลิตโดยบริษัท Eliokem. Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.16 ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นอะโรมาติกเปอร์ออกไซด์ ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอต มีอุณหภูมิการแตกตัวของอนุมูลอิสระสูงกว่า 135<sup>o</sup>C ผลิตโดยบริษัท Wuzhou International Co., Ltd. ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน
- 3.1.17 สแตนนัสไดคลอไรด์ (Stannous Dichloride, SnCl<sub>2</sub>) ใช้เป็นสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอตด้วยระบบฟีนอลิก ผลิตโดยบริษัท Asia Pacific Chemicals Limited ประเทศจีน
- 3.1.18 น้ำมันดีเซล ใช้สำหรับทดสอบความทนทานต่อตัวทำลายของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ผลิตโดยบริษัทปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย
- 3.1.19 น้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ ใช้สำหรับทดสอบความทนทานต่อตัวทำลายของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ผลิตโดยบริษัทปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย

## 3.2 อุปกรณ์

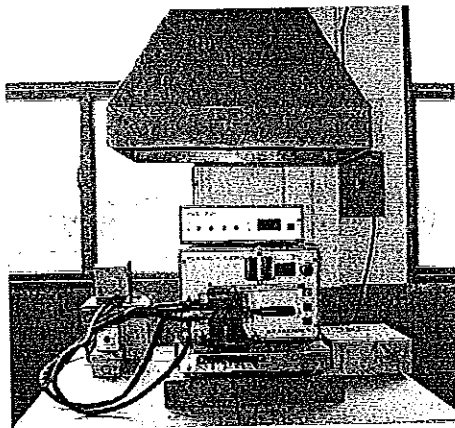
3.2.1 เครื่องเอ็กสทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) เป็นเครื่องรุ่น 2525J ผลิตโดยบริษัท Betol Machinery Limited ประเทศอังกฤษ ซึ่งมีความยาวสกรูเป็น 25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูเท่ากับ 25 มิลลิเมตร) ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติมาลีเอต ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูป 3.1





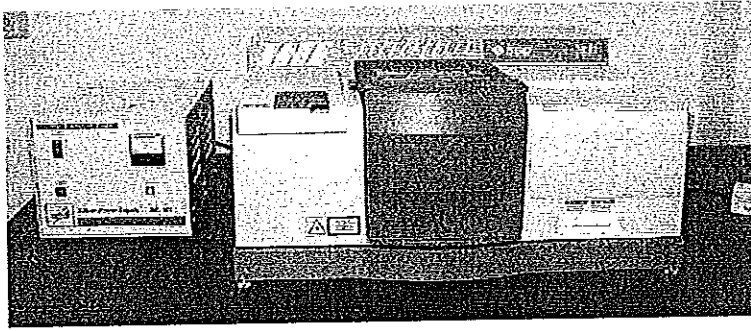
รูปที่ 3.1 เครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบสกรูเดียว

3.2.2 เครื่องผสมแบบปิดขนาดเล็กรุ่น PLE 331 ประกอบด้วยโรเตอร์ 2 ตัว มีปริมาตรความจุของห้องผสมเท่ากับ  $80 \text{ cm}^3$  สามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์และอุณหภูมิขณะผสมได้ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องผสม (Plasti-Corder PLE 331) เครื่องผลิตน้ำมันร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิห้องผสมซึ่งควบคุมความร้อนด้วย thermostat ตัวเครื่องจะเชื่อมต่อกับ Data acquisition system เพื่อวัดค่าทอร์กและอุณหภูมิของการผสม ผลิตโดยบริษัท Brabender Ohg Duisburg ประเทศเยอรมัน เป็นเครื่องมือสำหรับบดผสมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ และเครื่องบราเบนเดอร์จัดเป็นอุปกรณ์ประเภท Torque Rheometer โดยเครื่องจะบันทึกกราฟที่แสดงลักษณะตามการเปลี่ยนแปลงของการผสมที่สำคัญ 2 ปริมาณ คือ กราฟระหว่างทอร์กกับเวลา และกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.2



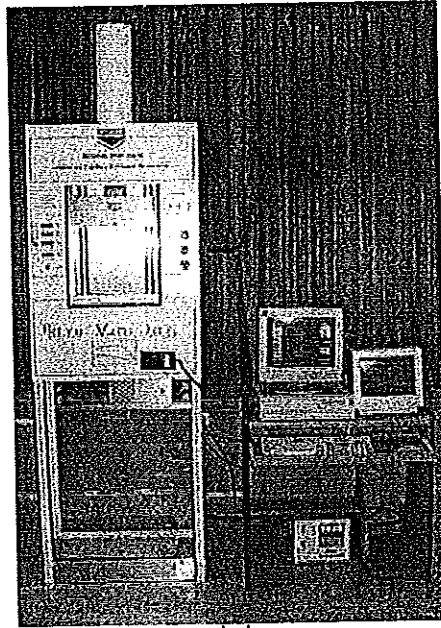
รูปที่ 3.2 เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder)

3.2.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) เป็นเครื่องรุ่น Omnic ESP Magna-IR 560 Spectrometer, Nicolet ผลิตโดยบริษัท Nicolet Instrument Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสารเคมี โดยอาศัยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูป 3.3



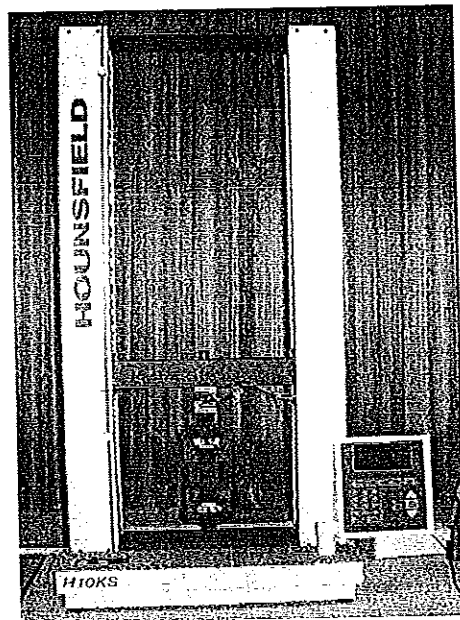
รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.2.4 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี (Capillary Rheometer) เป็นเครื่องวิเคราะห์สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอม ผลิตโดยบริษัท Rosand Precision Ltd. ประเทศอังกฤษ มีส่วนประกอบหลัก คือ กระจบอกโลหะ ซึ่งห่อหุ้มด้วยตัวให้ความร้อน 3 ชุด ซึ่งสามารถตั้งโปรแกรมได้ที่บริเวณตรงกลางของกระจบอกจะมีการเจาะรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร จำนวน 1 รู ให้มีความยาวตลอดแนวของกระจบอก ส่วนปลายกระจบอกจะมีร่องเกลียวที่สามารถติดตั้งหัวตายได้ ส่วนบนของเครื่องมีส่วนประกอบหลัก คือ ระบบขับเคลื่อนลูกสูบกดพอลิเมอร์หลอมด้วยอัตราเร็วที่กำหนดไว้ ในหน่วย  $\text{cm/min}$  นอกจากนี้ความเร็วในการทดลองจะแปรผันโดยตรงกับอัตราเฉือนที่ใช้ในการทำให้พอลิเมอร์หลอมไหล ในการทดลองนี้ใช้ตายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และมีความยาว 32 มิลลิเมตร โดยกำหนดค่าอัตราการเฉือนอยู่ในช่วง  $5-1600\text{ s}^{-1}$  ใช้อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.4



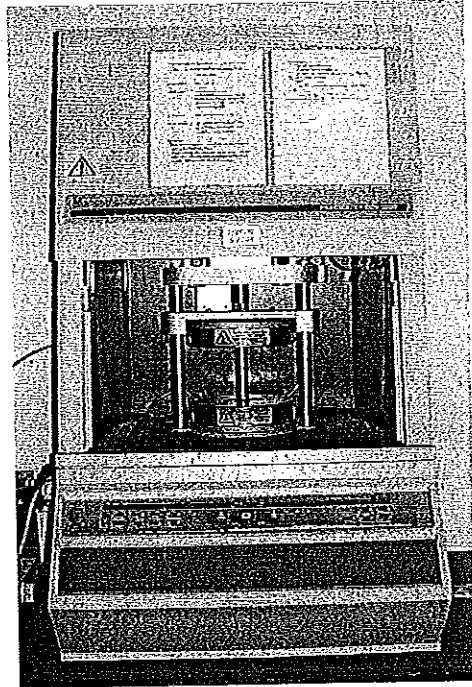
รูปที่ 3.4 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ยี่ห้อโรซาน (Rosand Capillary Rheometer)

3.2.5 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensometer) เป็นเครื่องยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10KS ผลิตโดยบริษัท Hounsfield Test Equipment ประเทศอังกฤษ เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงกดหรือแรงดึง สามารถรับแรงได้สูงสุด 10 kN มี load cell ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากค่าแรงที่ได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นค่าแรงดึงหรือแรงกดในหน่วยนิวตัน สามารถตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.01 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.5



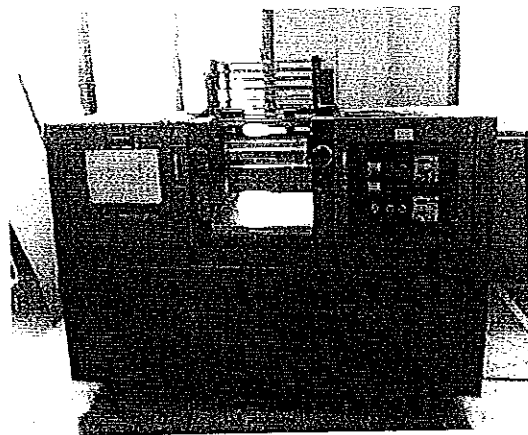
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensometer)

3.2.6 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (Oscillating Disk Rheometer) เป็นเครื่องรุ่น ODR-2000 ผลิตโดยบริษัท Monsanto ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นเครื่องสำหรับทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง (Cure characteristics) ใช้จานโลหะแบบ Biconical Disk ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3996 นิ้ว การหมุนของจานใช้มอเตอร์แกว่งกลับไปมาด้วยมุมบิด 1 องศา ความถี่ 1.7 Hz ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.6



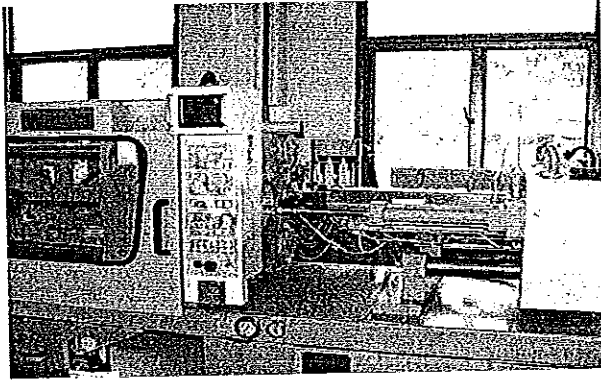
รูปที่ 3.6 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน

3.2.7 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เป็นเครื่องใช้สำหรับบดผสมยางกับสารเคมี ประกอบ ด้วยลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว มีอัตราส่วนระหว่างความเร็วผิวของลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1 : 1.05 สามารถตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งได้ ผลิตโดย หจก. ชัยเจริญการช่าง ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.7



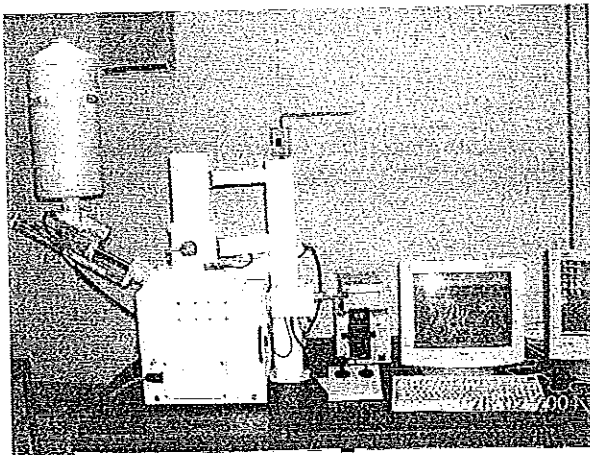
รูปที่ 3.7 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง

3.2.8 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) เป็นเครื่องรุ่น TII-90F ขนาด 90 ตัน ผลิตโดย บริษัท Welltec Machinery LTD ประเทศฮ่องกง ใช้สำหรับเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกล ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.8



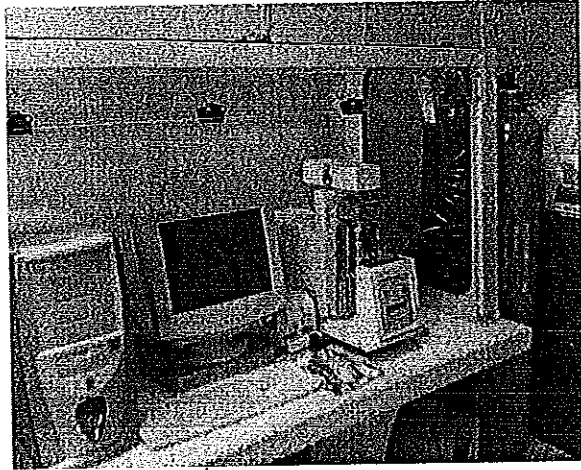
รูปที่ 3.8 เครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก (Plastic Injection Moulding Machine)

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเครื่องยี่ห้อ Leo รุ่น 1450 VP ประเทศอังกฤษ ส่วนประกอบของเครื่องประกอบด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ระบบเลนส์ (Electro Magnetic Lens) หัวดักจับสัญญาณ (Signal Detectors) และส่วนแสดงภาพจอคอมพิวเตอร์ใช้ศึกษาสมบัติด้านสัณฐานวิทยาเพื่อดูการกระจายตัวของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์เบลนด์ ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.9



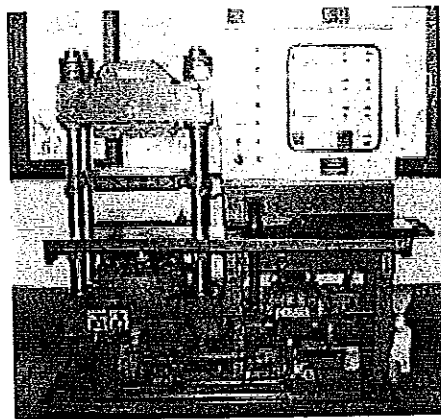
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.10 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA-50 ผลิตโดยบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น เป็นเครื่องชนิดนอนไอโซเทอร์มัล TGA ใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ ซึ่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลาในบรรยากาศที่ควบคุมได้ โดยวัสดุจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไอระเหยได้ เทคนิคนี้สามารถใช้วิเคราะห์หาได้ทั้งวัสดุที่มีสารตัวเดิม และไม่มีสารตัวเดิม ความสามารถของเครื่อง TGA เป็นการใช้เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเนื่องจากความร้อนอันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน การสลายตัว ออกซิเดชัน และการระเหย รายละเอียดของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.10



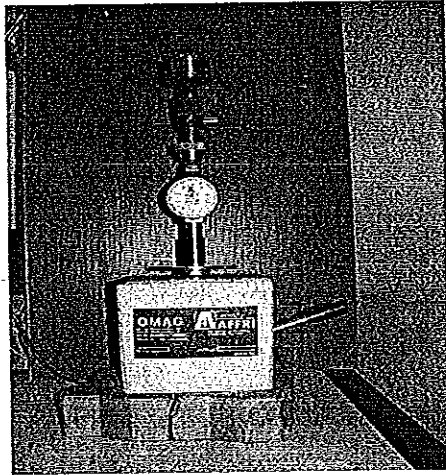
รูปที่ 3.10 เครื่อง Thermogravimetric Analysis

3.2.11 เครื่องอัดน้ำ (Compression moulding) เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นทดสอบยางวัลคาไนซ์ โดยการอัดเข้าแบบพิมพ์ ผลิตโดย บริษัทชัยเจริญการช่าง กรุงเทพฯ ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องอัดน้ำ

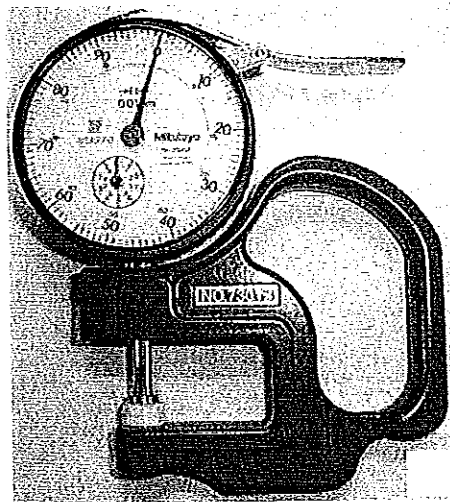
3.2.12 เครื่องวัดความแข็ง (Shore A) เป็นเครื่องวัดความแข็งแบบชอร์ดีวโรมิเตอร์ (Shore durometer) ยี่ห้อ AFFRI ประเทศอิตาลี ใช้วัดความแข็งของชิ้นทดสอบ ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความแข็งแบบ Durometer (Shore A)

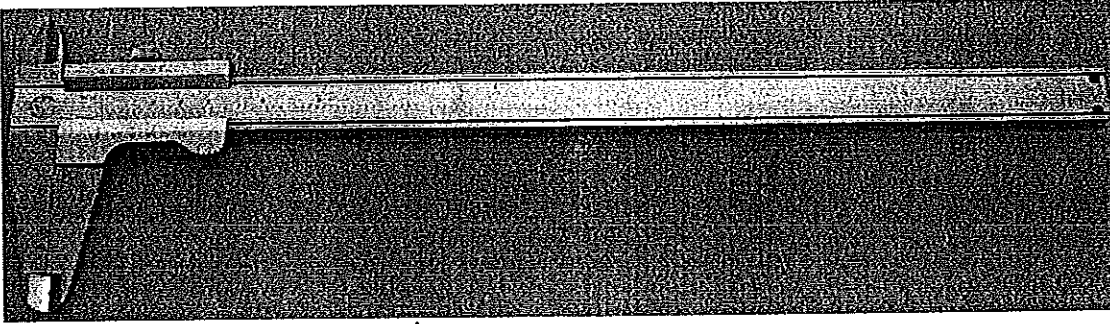
3.2.13 เครื่องวัดความหนา ใช้สำหรับวัดความหนาของชิ้นทดสอบ

3.2.13.1 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ยี่ห้อ Mitutoyo ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ใช้วัดความหนาของชิ้นทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.13



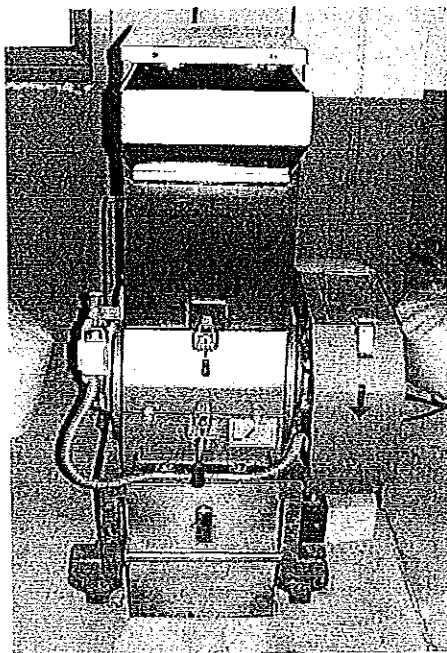
รูปที่ 3.13 เครื่องวัดความหนา (Micrometer)

3.2.13.2 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ยี่ห้อ Kanon ใช้วัดความหนาของชิ้นทดสอบ Compression Set ผลิตในประเทศญี่ปุ่น ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร ลักษณะเครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

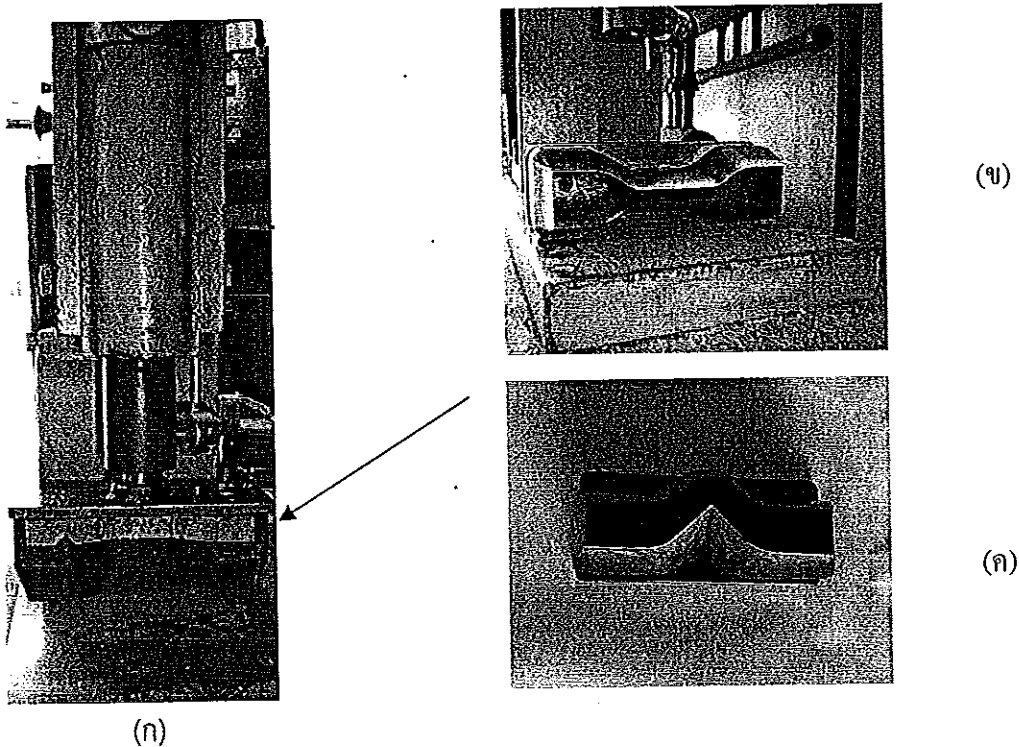
3.2.14 เครื่องบดพลาสติก ใช้สำหรับบดพลาสติกให้เป็นเม็ดขนาดเล็ก ผลิตโดยบริษัท Bosco engineering ประเทศไทย กำลังบด 5 แรงม้า ความเร็ว 1,441 รอบต่อนาที ลักษณะของ เครื่องแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องบดพลาสติก

3.2.15 เครื่องตัดชิ้นทดสอบ ใช้สำหรับตัดแผ่นยางที่ได้จากการอัดบ่าให้เป็นชิ้นทดสอบ สำหรับทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนตัว (รูป 3.16 ข) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (รูป 3.16 ค)





รูปที่ 3.16 (ก) เครื่องตัดขึ้นทดสอบ

- (ข) ดายตัดขึ้นทดสอบรูปดัมเบลสำหรับทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง  
ความสามารถในการยืดขนาด และความสามารถในการคืนตัว
- (ค) ดายตัดขึ้นทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

### 3.3 วิธีกรวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตโดยทำปฏิกิริยาในสภาวะหลอมโดยใช้เทคนิคการเตรียม 2 เทคนิค คือ เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กสทรูดแบบสกรูเดี่ยวและเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์ พลาสติกอร์เดอร์

#### 3.3.1 การเตรียมและการวิเคราะห์ยางธรรมชาติมาลิเอต

##### 3.3.1.1 การเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยเครื่องเอ็กสทรูดแบบสกรูเดี่ยว

ทดลองเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตในสภาวะหลอม (Molten state) โดยใช้เครื่องเอ็กสทรูดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) ซึ่งเป็นเครื่องที่มีความยาวสกรูเป็น 25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูเท่ากับ 25 มิลลิเมตร) เริ่มต้นโดยการนำยางแผ่นผึ่งแห้งอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กสทรูด แล้วผสมมาลิเอต

แอนไฮไดรต์ปริมาณ 10 phr ที่อุณหภูมิ 145 °C ความเร็วรอบสกรูในการเอ็กซ์ทรูด 15 รอบต่อ  
นาที่ ขั้นตอนแรกทำการทดลองเพื่อศึกษาหาวิธีการที่ให้ระดับการกราฟของมาลิกแอนไฮไดรต์สูง  
ที่สุด โดยแปรวิธีการ 3 วิธี คือ

- วิธีที่ 1. ป้อนยางแผ่นผึ่งแห้งที่อบแห้งแล้วและตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 3 เซนติเมตรพร้อมๆ  
กับการเติมมาลิกแอนไฮไดรต์ลงในเครื่องเอ็กซ์ทรูด หลังจากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปผ่านการ  
เอ็กซ์ทรูดอีก 1 รอบ
- วิธีที่ 2. ผสมยางแผ่นผึ่งแห้งที่อบแห้งกับมาลิกแอนไฮไดรต์ด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งที่  
อุณหภูมิห้อง แล้วนำยางที่ได้ไปผ่านการเอ็กซ์ทรูด 2 รอบ
- วิธีที่ 3. เอ็กซ์ทรูดยางแผ่นผึ่งแห้งที่อบแห้งก่อน 1 รอบแล้วผสมมาลิกแอนไฮไดรต์บนเครื่อง  
บดยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปผ่านการเอ็กซ์ทรูดอีก 2  
รอบ

หลังจากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ  
โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วเลือกวิธีการที่สามารถเตรียมยาง  
ธรรมชาติมาลิกเอตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ได้ปริมาณการเกาะติดดีที่สุดมาเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอต  
โดยการแปรปริมาณมาลิกแอนไฮไดรต์ที่ปริมาณต่างๆ คือ 6, 8, 10, 12 และ 14 phr

### 3.3.1.2 การเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอตด้วยเครื่องผสมแบบปิดบราเบนเดอร์ พลาส ติคอร์เดอร์

นำยางธรรมชาติ (ADS) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24  
ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นออกมาตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 1 นิ้ว นำมาบดด้วยเครื่องผสมบราเบน  
เดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที ใช้  
fill factor เท่ากับ 0.8 โดยบดยางเป็นเวลา 1 นาที แล้วเติมมาลิกแอนไฮไดรต์ปริมาณ 10 phr ซึ่งเป็น  
ปริมาณที่เลือกใช้จากการทดลองด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดซ์แบบสกรูเดี่ยว แล้วบดต่ออีก 7 นาที จากนั้น  
นำยางออกมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (ซีตีไซยี้ดะห์, 2547)

### 3.3.1.3 การวิเคราะห์การเกาะติดของหมู่ซัคซินิกแอนไฮไดรต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ และปริมาณเจล

#### 3.3.1.3.1 การวิเคราะห์การเกาะติดของหมู่ซัคซินิกแอนไฮไดรต์บนโมเลกุลยาง ธรรมชาติ

ซึ่งวัสดุที่เตรียมได้ปริมาณ 1.50 กรัม ละลายในโทลูอีน 50 มิลลิลิตร จากนั้นรีฟลักซ์ที่  
อุณหภูมิ 110 °C ซึ่งเป็นจุดเดือดของโทลูอีนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วกรองแยกส่วนที่ละลายและ

แอนไฮไดรด์ปริมาณ 10 phr ที่อุณหภูมิ 145 °C ความเร็วรอบสกรูในการเอ็กซ์ทรูด 15 รอบต่อนาที ขั้นตอนแรกทำการทดลองเพื่อศึกษาหาวิธีการที่ให้ระดับการกราฟของมาลิกแอนไฮไดรด์สูงที่สุด โดยแปรวิธีการ 3 วิธี คือ

- วิธีที่ 1. ป้อนยางแผ่นผึ่งแห้งที่อบแห้งแล้วและตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 3 เซนติเมตรพร้อมๆ กับการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์ลงในเครื่องเอ็กซ์ทรูด หลังจากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปผ่านการเอ็กซ์ทรูดอีก 1 รอบ
- วิธีที่ 2. ผสมยางแผ่นผึ่งแห้งที่อบแห้งกับมาลิกแอนไฮไดรด์ด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำยางที่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทรูด 2 รอบ
- วิธีที่ 3. เอ็กซ์ทรูดยางแผ่นผึ่งแห้งที่อบแห้งก่อน 1 รอบแล้วผสมมาลิกแอนไฮไดรด์บนเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำวัสดุที่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทรูดอีก 2 รอบ

หลังจากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ โดยให้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วเลือกวิธีการที่สามารถเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ได้ปริมาณการเกาะติดดีที่สุดมาเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอต โดยการแปรปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณต่างๆ คือ 6, 8, 10, 12 และ 14 phr

### 3.3.1.2 การเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอตด้วยเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์ดเดอร์

นำยางธรรมชาติ (ADS) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นออกมามาตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 1 นิ้ว นำมาบดด้วยเครื่องผสมบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์ดเดอร์ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที ใช้ fill factor เท่ากับ 0.8 โดยบดยางเป็นเวลา 1 นาที แล้วเติมมาลิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 10 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่เลือกใช้จากการทดลองด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว แล้วบดต่ออีก 7 นาที จากนั้นนำยางออกมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (ซีตีไซยัดะห์, 2547)

### 3.3.1.3 การวิเคราะห์การเกาะติดของหมู่ซัลฟิเนตแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติและปริมาณเจล

#### 3.3.1.3.1 การวิเคราะห์การเกาะติดของหมู่ซัลฟิเนตแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

ชั่งวัสดุที่เตรียมได้ปริมาณ 1.50 กรัม ละลายในโทลูอีน 50 มิลลิลิตร จากนั้นรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 110°C ซึ่งเป็นจุดเดือดของโทลูอีนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วกรองแยกส่วนที่ละลายและ

ตารางที่ 3.1 สูตรการวัลคาไนเซชันโดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์

สารเคมี	ปริมาณ(phr)
MNR	100
Stearic acid	1
ZnO	5
TAC	2
DCP	1

ตารางที่ 3.2 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของการวัลคาไนเซชันโดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์

สารเคมี	เวลาในการบด
	(นาที)
MNR	2
Stearic acid	2
ZnO	3
TAC	5
DCP	4

นำยางธรรมชาติมาลิเอดที่เตรียมโดยการใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr มาคอมปาวด์โดยใช้สารเคมีในตารางที่ 3.1 แล้วบดผสมโดยใช้เวลาตามตารางที่ 3.2 จากนั้นวางทิ้งไว้ 1 คืน แล้วทดสอบสมบัติการวัลคาไนเซชันโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุนที่ 160°C เป็นเวลา 60 นาที ใช้มุมการบิดของโรเตอร์ 1 องศา ตามมาตรฐาน ASTM D2084-98 (2000)

### 3.3.2.2 การวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถัน

ในการทดลองนี้ได้ออกสูตรการวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถันออกเป็น 3 ระบบ คือ กำมะถันระบบปกติ (Conventional Sulphur Vulcanization System, C.V. system) ระบบเซมิอีวี (Semi-efficient vulcanization system, semi-EV system) และระบบอีวี (Efficient vulcanization system, EV system) ซึ่งมีปริมาณการใช้สารตัวเร่งและกำมะถันที่แตกต่างกันเพื่อหาสูตรการวัลคาไนเซชันที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัสดุที่เตรียมได้ สูตรต่างๆ และเวลาในการผสมในเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้องแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 สูตรการวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถัน

สารเคมี	ปริมาณ (phr)		
	กำมะถันระบบปกติ	ระบบเทมิอีวี	ระบบอีวี
MNR	100	100	100
Stearic acid	0.5	0.5	0.5
ZnO	6	6	6
Wingstay L	0.5	0.5	0.5
TBBS	1	1.5	3
Sulfur	3.5	1.5	0.5

ตารางที่ 3.4 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของการวัลคาไนเซชันโดยใช้กำมะถัน

สารเคมี	เวลาในการบด (นาที)
MNR	2
Stearic acid	2
ZnO	3
Wingstay L	2
TBBS	3
Sulfur	4

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมโดยใช้สารเคมีในตารางที่ 3.3 และบดผสมโดยใช้เวลาตามตารางที่ 3.4 ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุนที่  $160^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 60 นาที ให้มุมการบิดของโรเตอร์ 1 องศา

### 3.3.2.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

นำยางคอมปาวด์มาทำการทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 ตามวิธีในมาตรฐาน ASTM D2084-95 (2000) ที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  จานโลหะมีมุมบิด 1 องศา หาค่าแรงบิดต่ำสุดที่เกิดจากการเฉือนระหว่างยางกับจานโลหะ (minimum torque ( $M_L$ ), dN-m) แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากการเฉือนระหว่างยางกับจานโลหะ (maximum torque ( $M_H$ ), dN-m) หาช่วงเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้หรือเวลาสกอช (scorch time ( $t_s$ ), min) หาเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time ( $t'_{90}$ ), min) ซึ่งเป็นเวลาที่

ยางมีค่าแรงบิดเป็น  $M_t + 90(M_H - M_L)/100$  และหาดัชนีความเร็วในการวัลคาไนซ์ (cure rate index (CRI),  $\text{min}^{-1}$ ) คำนวณตามสมการ

$$\text{Cure rate index, CRI} = \frac{100}{\text{Cure time-Scorch time}} \quad (2)$$

### 3.3.2.4 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติมาลีเอต

#### 3.3.2.4.1 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติมาลีเอต

เมื่อได้ผลการทดลองจากข้อ 3.3.2 แล้วทำการเลือกระบบที่มีค่าทอร์กสูงสุด (Maximum Torque) สูงมา 4 ระบบ เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล โดยนำยางคอมปาวด์ไปอัดเข้าที่อุณหภูมิ  $160^\circ\text{C}$  แล้วหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength), ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break), ความสามารถในการคืนตัว (Tension set), การคงรูปของยางหลังจากการกด (Compression set), ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) โดยมีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

#### (1) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

นำยางคอมปาวด์สูตรต่าง ๆ ที่อัดเข้าแล้วไปตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ขนาดความยาว 115 มิลลิเมตร กว้าง  $6.0 \pm 0.4$  มิลลิเมตร หนา 1.5-3 มิลลิเมตร (ตามมาตรฐาน ASTM D412) ซีดเส้น 2 เส้นที่ส่วนกลางของชิ้นทดสอบห่างกัน 2 เซนติเมตร วัดความหนาชิ้นทดสอบ 3 จุด และนำค่ากลางไปคิดคำนวณค่าต่าง ๆ นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer ที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ดึงชิ้นทดสอบจนขาด อ่านค่าแรงดึงที่จุดขาดมาคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึง ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นทดสอบ และใช้ค่ากลางในการรายงานผล

$$\text{Tensile strength} = F/A \quad (3)$$

เมื่อ  $F$  = แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นทดสอบจนขาด (N)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ( $\text{mm}^2$ )

## (2) ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)

การทดสอบจะทำการทดสอบเหมือนการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามข้อ (1) ค่าที่ได้จะวัดโดยการอ่านระยะที่ขึ้นทดสอบสามารถยืดจนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการยืดจนขาด

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times (L-L_0)/L_0 \quad (4)$$

เมื่อ  $L$  = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีด 2 เส้นของชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (cm)

$L_0$  = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีด 2 เส้นของชิ้นทดสอบก่อนยืด (2.0 cm)

## (3) ความสามารถในการคืนตัว (Tension Set)

นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer โดยยืด 100 % ทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นวางไว้ที่อุณหภูมิห้องอีก 10 นาที แล้ววัดความยาวระหว่างเส้นที่ขีด 2 เส้นที่เปลี่ยนไปจากเดิม ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นทดสอบ และใช้ค่ากลางในการรายงานผล

$$\text{Tension set (\%)} = 100 \times (L-L_0)/L_0 \quad (5)$$

เมื่อ  $L$  = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีด 2 เส้นของชิ้นทดสอบหลังจากยืดไว้ 10 นาที (cm)

$L_0$  = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีด 2 เส้นของชิ้นทดสอบก่อนยืด (cm)

## (4) การคงรูปของยางหลังจากการกด (Compression Set)

นำชิ้นทดสอบจากการอัดเข้าที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง  $29.0 \pm 0.5$  มิลลิเมตร และหนา  $12.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร (ตามมาตรฐาน ASTM D395) การทดสอบจะต้องตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 16 ชั่วโมงหลังจากการวัลคาไนซ์ ทำการทดสอบโดยกดยางลงไปในระยะ 25% ของความหนาเดิม ที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  โดยมีระยะเวลาการทดสอบ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเอาออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้ววัดความหนาที่เปลี่ยนไปจากเดิม การคำนวณค่าการยุบตัวของยางหลังจากที่ได้เอาแรงกดออก จะอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิมดังสูตร

$$\text{Compression set} = (t_0 - t_1)/(t_0 - t_n) \times 100 \quad (6)$$

- เมื่อ  $t_0$  เป็นความหนาเดิมก่อนการทดสอบ (mm)  
 $t_t$  เป็นความหนาภายหลังอบด้วยความร้อน (mm)  
 $t_n$  เป็นความหนาของแผ่นกัน (mm)

#### (5) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ใช้ตัวอย่างทดสอบที่ตัดมาจากตาย B ซึ่งเป็นแบบมุมตาม ASTM D624 นำขึ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer ที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ดึงขึ้นทดสอบจนขาด การทดสอบนี้เป็นการรวมกันระหว่างการที่ย่างเริ่มฉีกขาดและการขยายตัวของรอยฉีก ในขณะทดสอบที่ดึงยางอยู่นั้นความเครียดจะสะสมที่ตรงปลายมุม จนกระทั่งสูงพอที่จะทำให้เกิดรอยฉีกตรงปลายมุม และต่อมาความเครียดดังกล่าวจะทำให้รอยฉีกขยายตัวออกไป แต่ในการวัด เราจะไม่สามารถแยกแรงออกได้ว่าแรงใดทำให้เกิดการฉีก และแรงใดที่ทำให้รอยฉีกขยายตัว เพราะทั้งสองอย่างนี้เกิดต่อเนื่องกันไปอย่างรวดเร็วมาก ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดคำนวณได้จากค่ากลางของแรงดังกล่าวหารด้วยความหนาของแผ่นยาง

$$\text{Tear strength} = \frac{F}{d} \quad (7)$$

- เมื่อ F เป็นค่าแรงสูงสุดที่ขึ้นทดสอบฉีกขาดออกจากกัน, (N)  
 d เป็นความหนาของชิ้นทดสอบ, (mm)

#### (6) ความแข็ง (Hardness, Shore A)

นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ Durometer ประเภท Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยชิ้นทดสอบจะต้องหนาไม่ต่ำกว่า 8 มิลลิเมตร และไม่เกิน 10 มิลลิเมตร การวัดจะต้องกดให้เป็นสัมผัสกับหน้ายางโดยตลอด อาจจะใช้มือกด หรือน้ำหนักกดก็ได้ให้ทำการวัด 3-5 จุด และใช้ค่ากลางในการรายงานค่าความแข็งของยางตัวอย่าง

#### 3.3.2.4.2 ความทนทานต่อการบ่มเร่ง (Aging resistance)

นำยางตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงไปอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในเตาอบที่มีอากาศร้อนไหลผ่าน เมื่ออบยางครบกำหนดแล้ว ต้องตั้งยางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง และไม่เกิน 96 ชั่วโมงก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติที่ได้ (ASTM D573)



สมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่งแสดงถึงสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นร้อยละของสมบัติเดิมโดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\text{ความทนทานต่อการบ่มเร่ง} = \frac{A-O}{O} \times 100 \quad (8)$$

โดยที่ O คือ สมบัติของยางก่อนอบ

A คือ สมบัติของยางหลังอบ

### 3.3.2.4.3 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density)

นำตัวอย่างมาทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลายในตัวทำละลายโทลูอีน โดยนำยางวัลคาไนซ์หนัก 0.8 กรัม แช่ในโทลูอีนปริมาตร 80 มิลลิลิตร แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องมืดเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่พองตัวมาชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ตาม Flory-Rehner equation

$$\rho_c = -\frac{1}{2V_s} \frac{\ln(1-V_r) + V_r + X(V_r)^2}{V_r^{1/3} - \frac{V_r}{2}} \quad (9)$$

เมื่อ  $\rho_c$  = the crosslink density (mol/m<sup>3</sup>)

$V_s$  = the molar volume of toluene (1.069 x 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/mol)

$V_r$  = the fraction of rubber in the swollen gel

X = the interaction parameter (0.39 for gum NR)

$$V_r = \frac{W_1/D}{(W_1/D) + [(W_e - W_1)/D_e]} \quad (10)$$

เมื่อ  $V_r$  เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของยางวัลคาไนซ์ที่พองตัว

$W_1$  เป็นน้ำหนักของยางวัลคาไนซ์ที่ทดสอบ (กรัม)

$W_e$  เป็นน้ำหนักของยางวัลคาไนซ์ที่พองตัวจนสมดุล (กรัม)

D เป็นความหนาแน่นของยางวัลคาไนซ์ (กรัม/ลบ.ซม.)

$D_e$  เป็นความหนาแน่นของโทลูอีน (0.867 กรัม/ลบ.ซม.)

### 3.3.3 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA

นำยางธรรมชาติมาลีโอเตที่เตรียมจากการใช้มาลีโอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr ในเครื่องเอ็กซ์ทราuder และเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติกคอเดอร์มาเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท (PMMA) เกรด MD ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติมาลีโอเต/พอลิเมทิลเมทาคริเลท เท่ากับ 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80

โดยผสมในเครื่องแบบปิดบราเบนเดอร์พลาสติกคอเดอร์ ที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  แล้วศึกษาสมบัติดังต่อไปนี้

### 3.3.3.1 การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

นำตัวอย่างที่ตัดหรือบดเป็นชิ้นละเอียดแล้วด้วยเครื่องบดพลาสติก หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารีที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  องศาเซลเซียส โดยใช้ด้ายที่มีความยาว  $32$  มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2$  มิลลิเมตร มุมไหลเข้า  $90$  องศา และตั้งค่าอัตราเฉือนในช่วง  $5-1600\text{ s}^{-1}$

### 3.3.3.2 การศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

ทดสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของ PMMA ในยางธรรมชาติมาลิเอตในพอลิเมอร์เบลนด์ทำโดยการนำชิ้นทดสอบแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นหักชิ้นทดสอบเพื่อเปิดผิวหน้าใหม่ แล้วนำมาสกัดเอาเฟสของพอลิเมทิลเมทาคริเลทออกด้วย อะซิโตน ปริมาณ  $50$  มิลลิลิตร เป็นเวลา  $24$  ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $24$  ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายออก แล้วเคลือบผิวหน้าใหม่ด้วยทองคำ จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย  $1,000$  เท่า

### 3.3.3.3 สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมแกรวิเมทริก

นำพอลิเมอร์เบลนด์ประมาณ  $10$  มิลลิกรัม บรรจุลงในเซลล์พลาตินัม แล้วนำไปวางในตำแหน่งวางเซลล์ของเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) โดยการทดสอบกระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$

## 3.3.4 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์

### 3.3.4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเตรียมด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดกับเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกคอเดอร์

ในการทดลองต่อไปได้ทำการทดสอบเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) กับเครื่องผสมแบบปิดบราเบนเดอร์ พลาสติกคอเดอร์ (Brabender Plasticorder) โดยใช้สูตรตามตารางที่ 3.5 มาบดผสมโดยใช้ลำดับการใส่สารเคมีและเวลาในการบดผสมดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่คอมปาวด์ด้วยระบบกำมะถันปกติ

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติมาลิเอต	100
Deoflow S	20
Stearic acid	0.5
ZnO	6
Wingstay L	0.5
TBBS	1
sulfur	3.5

ตารางที่ 3.6 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่คอมปาวด์ด้วยระบบกำมะถันปกติ

สารเคมี	ลำดับการผสม	เวลาในการบด (นาที)
ยางธรรมชาติมาลิเอต	1	2
Deoflow S	2	5
Stearic acid	3	2
ZnO	4	3
Wingstay L	5	2
TBBS	6	2
sulfur	7	3

หลังจากนำยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทрудแบบสกรูเดี่ยวและใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr มาบดผสมกับสารเคมีในตารางที่ 3.5 และใช้เวลาในการบดผสมดังตารางที่ 3.6 แล้วนำไปเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทрудแบบสกรูเดียวกับเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์ พลาสติกอร์เตอร์ ที่สัดส่วนยางมาลิเอตคอมปาวด์ต่อพอลิเมทิลเมทาคริเลทเท่ากับ 60/40 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางรีโอโลยี ชีตขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก ทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็ง

### 3.3.4.1.1 การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ตัดหรืออบเป็นชิ้นละเอียดแล้วด้วยเครื่องบดพลาสติก ไปทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารีที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.3.1

### 3.3.4.1.2 การเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้บดให้เป็นเม็ดเล็กๆ ด้วยเครื่องบดพลาสติกแล้วไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดเทอร์โมพลาสติก (Injection molding) เพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบล โดยใช้อุณหภูมิการฉีด 200 °C

### 3.3.4.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

นำชิ้นตัวอย่างที่ได้จากหัวข้อ 3.3.4.1.2 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำ Conditioning หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D412-98a (2000) กล่าวคือ ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 (ข้อ 1 และ ข้อ 2)

### 3.3.4.1.4 การทดสอบความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งแบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 (ข้อ 6)

### 3.3.4.1.5 การทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance)

นำตัวอย่างมาทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลายในตัวทำละลายน้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ โดยการทดสอบการบวมพอง (swelling test) จะทำตามมาตรฐาน ASTM D 471 (2000) นำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีความกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักชิ้นทดสอบละเอียด 0.0001 กรัมแช่ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ปิดภาชนะให้มิดชิด ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 120 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นทดสอบออกมาชั่งน้ำหนักซึ่งเป็อนที่ผิวภายนอกออกและนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมพอง

$$\text{Swelling (\%)} = \frac{W_s - W_0}{W_0} \times 100$$

เมื่อ  $W_s$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากแช่ในตัวทำละลาย (กรัม)

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนการแช่ในตัวทำละลาย (กรัม)

### 3.3.4.2 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

พิจารณาผลการทดลองข้างต้น เลือกใช้เครื่องมือที่ใช้ในการเบลนด์ที่ให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ชนิดที่ดีที่สุด มาทำการทดลองต่อไปโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ระบบ คือ การวัลคาไนซ์โดยใช้ระบบกำมะถันปกติ ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม โดยใช้อัตราส่วนการเบลนด์ของยางธรรมชาติมาลีเอตคอมปาวด์และพอลิเมทิลเมทาคริเลทเท่ากับ 40/60, 50/50 และ 60/40 มาทำการทดลองตามสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 3.7 และเวลาในการบดผสมดังตารางที่ 3.8 แล้วศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางรีโอโลยีเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.3.1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 (ข้อ 1 และ ข้อ 2) ความแข็งเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 (ข้อ 6) การทนต่อน้ำมันดังหัวข้อ 3.3.4.1.5 สมบัติเชิงความร้อนดังหัวข้อ 3.3.3.3 และศึกษาเรื่องความสามารถในการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังหัวข้อ 3.3.4.3

ตารางที่ 3.7 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

สารเคมี	ปริมาณสารเคมี (phr)		
	ระบบ เปอร์ออกไซด์	ระบบ กำมะถันปกติ	ระบบผสม
MNR	100	100	100
Deoflow S	20	20	20
Stearic acid	1	0.5	0.5
ZnO	5	6	6
Wingstay L	-	0.5	0.5
TBBS	-	1	1
Sulfur	-	3.5	3.5
TAC	2	-	2
DCP	1	-	1

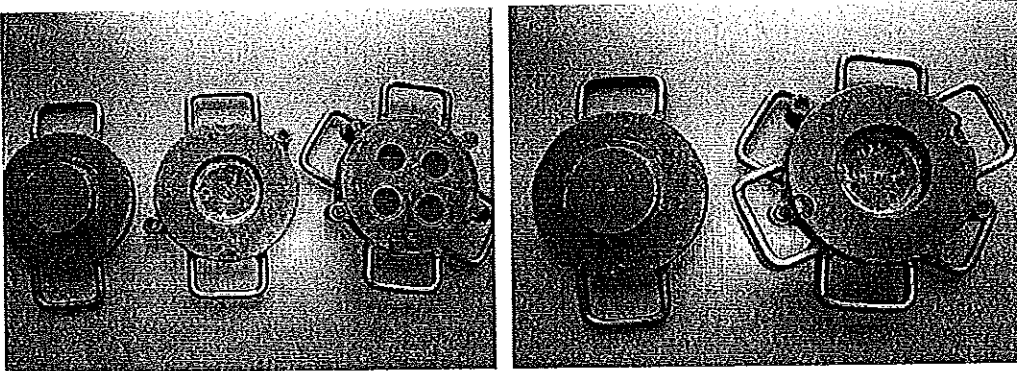
ตารางที่ 3.8 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

สารเคมี	ลำดับการผสม	เวลาในการบด (นาที)
MNR	1	2
Deoflow S	2	5
Stearic acid	3	2
ZnO	4	3
Wingstay L	5	2
TBBS	6	2
Sulfur	7	3
TAC	8	5
DCP	9	4

### 3.3.4.3 ความสามารถในการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

#### (1) ความสามารถในการแปรรูปด้วยการอัดเบ้า

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากการบดผสมยางคอมปาวด์ตามสูตรต่างๆ กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่อัตราส่วน 40/60 50/50 และ 60/40 ไปตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปอัดเบ้าแบบส่งผ่าน (Transfer mold) ที่อุณหภูมิ 200 °C เพื่อทดสอบความสามารถในการแปรรูป



รูปที่ 3.17 ลักษณะของเบ้าที่ใช้ทดสอบความสามารถในการแปรรูปโดยการอัดเบ้า

#### (2) ความสามารถในการแปรรูปด้วยการฉีดเข้าเบ้า

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากการบดผสมยางคอมปาวด์ตามสูตรต่างๆ กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่อัตราส่วน 40/60, 50/50 และ 60/40 ไปตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในการแปรรูปด้วยการฉีดเข้าเบ้าที่อุณหภูมิ 200 °C

3.3.4.4 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท โดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยแปรชนิดของสารช่วยในการแปรรูป 3 ชนิด คือ Deoflow S, Spindle Oil และ DOP

3.3.4.4.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นำยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์คอมปาวด์ตามสูตรที่ 2 ในตารางที่ 3.7 และเวลาในการบดผสมดังตารางที่ 3.8 แล้วบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์ ในอัตราส่วน 60/40 ที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที จากนั้นตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติกนำไปทดสอบปริโอโลยีเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.3.1 แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ็กซ์ทруд จากนั้นศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อนำกลับมาหลอมใหม่ (Recycle ability) โดยนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปแปรรูปด้วยการฉีดเข้าแก้ว 5 ครั้ง โดยเก็บตัวอย่างขึ้นทดสอบรูปดัมเบลทุกครั้งของการแปรรูปมาทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 ข้อ (1) และข้อ (2) และนำค่ากลางที่ได้ซึ่งเป็นค่าของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องบราเนนเดอร์ไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ็กซ์ทруд

นอกจากนี้นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบค่าความแข็งแรงแบบ Shore A เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 ข้อ (6) แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ็กซ์ทруд และทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance) โดยใช้ตัวทำละลายคือน้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.4.1.5

3.3.4.4.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นำยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์คอมปาวด์ตามสูตรที่ 2 ในตารางที่ 3.7 แต่เปลี่ยนจากการใช้ Deoflow S มาเป็น Spindle Oil แต่เนื่องจาก Spindle oil เป็นของเหลวและสามารถผสมเข้ากับยางได้ยากอีกทั้งยังติดลูกกึ่งขณะทำการผสมอีกด้วย จึงเลือกใช้เพียง 10 phr (ดังตารางที่ 3.9) และเวลาในการบดผสมดังตารางที่ 3.10 แล้วบด

ผสมกับพอลิเมทิลเมทาครีเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ ในอัตราส่วน 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที จากนั้นตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก นำไปทดสอบรีโอโลยีเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.3.1 แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการใช้ Deoflow S

จากนั้นศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อนำกลับมาหลอมใหม่ (Recycle ability) โดยนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปแปรรูปด้วยการฉีดเข้าเบา 5 ครั้ง โดยเก็บตัวอย่างขึ้นทดสอบรูปดัมเบลทุกครั้งของการแปรรูปมาทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 ข้อ (1) และข้อ (2) และนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติมาลิเอตที่คอมปาวด์โดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นอกจากนี้นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบค่าความแข็งแบบ Shore A และทดสอบความความต้านทานต่อตัวทำละลาย โดยใช้ตัวทำละลายคือ น้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 ข้อ (6) และ 3.3.4.1.5 ตามลำดับ แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าของยางธรรมชาติมาลิเอตที่คอมปาวด์โดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

ตารางที่ 3.9 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
MNR	100
Spindle Oil	10
stearic acid	0.5
Zinc oxide	6
Wingstay L	0.5
TBBS	1
Sulfur	3.5



ตารางที่ 3.10 เวลาที่ใช้ในการบดผสมสารเคมีต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

สารเคมี	ลำดับการผสม	เวลาในการบด
MNR	1	2
Spindle Oil	2	5
stearic acid	3	2
Zinc oxide	4	3
Wingstay L	5	2
TBBS	6	2
Sulfur	7	3

#### 3.3.4.4.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นำยางธรรมชาติมาลิเอดที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอเคอร์คอปาวด์ตามสูตรที่ 2 ในตารางที่ 3.7 แต่เปลี่ยนจากการใช้ Deoflow S มาเป็น DOP 20 phr แล้วบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเนนเดอร์พลาสติกคอเคอร์คอปาวด์ ในอัตราส่วน 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที โดยทดลองเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ 4 วิธี

วิธีที่ 1 มีลำดับการคอปาวด์ยางธรรมชาติมาลิเอดก่อนนำไปเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังตารางที่ 3.11 จากนั้นนำมาเบลนด์กับ PMMA ที่อัตราส่วน 60/40

ตารางที่ 3.11 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป วิธีที่ 1

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ลำดับการผสม
MNR	100	1
stearic acid	0.5	3
Zinc oxide	6	4
Wingstay L	0.5	5
TBBS	1	6
Sulfur	3.5	7
DOP	20	2

วิธีที่ 2 มีลำดับการคอมปาวด์ยางธรรมชาติมาลิเอตก่อนนำไปเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังตารางที่ 3.12 จากนั้นนำมาเบลนด์กับ PMMA ที่อัตราส่วน 60/40

ตารางที่ 3.12 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป วิธีที่ 2

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ลำดับการผสม
MNR	100	1
stearic acid	0.5	2
Zinc oxide	6	3
Wingstay L	0.5	4
TBBS	1	6
Sulfur	3.5	7
DOP	20	5

วิธีที่ 3 มีลำดับการคอมปาวด์ยางธรรมชาติมาลิเอตก่อนนำไปเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังตารางที่ 3.13 จากนั้นนำมาเบลนด์กับ PMMA ที่อัตราส่วน 60/40 โดยผสม DOP 20 phr เข้าไปขณะทำการเบลนด์

ตารางที่ 3.13 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป วิธีที่ 3 และ 4

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ลำดับการผสม
MNR	100	1
stearic acid	0.5	2
Zinc oxide	6	3
Wingstay L	0.5	4
TBBS	1	5
Sulfur	3.5	6

วิธีที่ 4 บดผสมกับ PMMA กับ DOP จากนั้นบดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปเบลนด์กับยางคอมปาวด์แบบเดียวกับวิธีที่ 3

จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้ไปตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก นำไปทดสอบบรีโอโลยี ความแข็ง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.3.1, 3.3.2.4.1 (ข้อ 6) และ 3.3.2.4.1 ข้อ (1) และข้อ (2) ตามลำดับ แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นอกจากนี้นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบค่าความแข็งแบบ Shore A และทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย โดยใช้ตัวทำละลายคือ น้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.4.1.5 แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าของยางธรรมชาติมาลิเอตที่คอมปาวด์โดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

จากนั้นเลือกสารช่วยในการแปรรูปและวิธีการผสมที่ดีที่สุดจากการทดลองข้างต้นไปบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ ในอัตราส่วน 40/60 50/50 และ 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 200°C แล้วทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2.4.1 ข้อ (1) และข้อ (2) และทดสอบค่าความแข็งเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 3.3.2.4.1 (ข้อ 6)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต

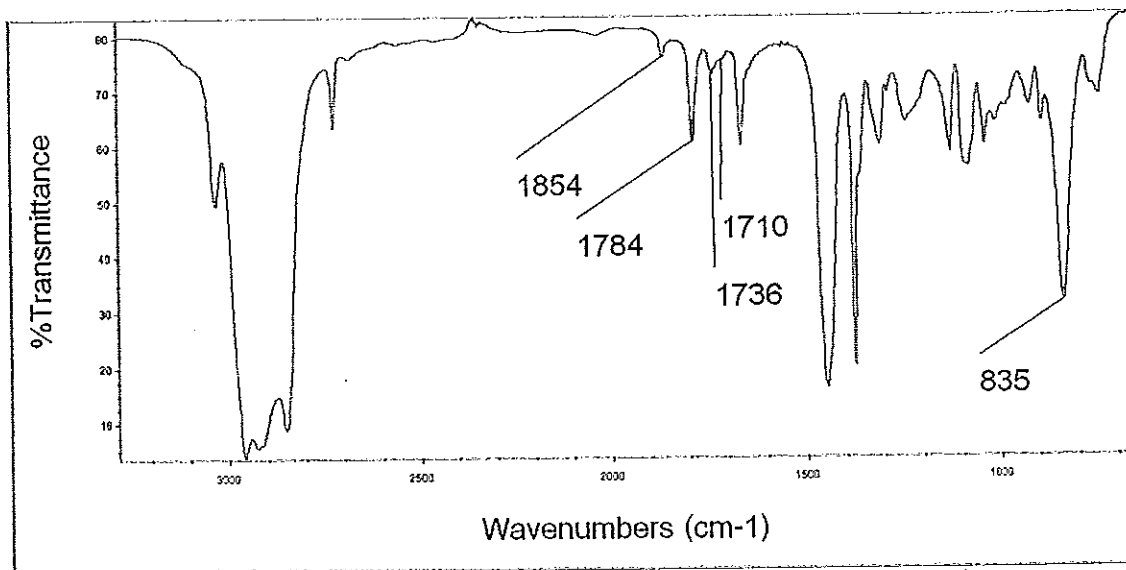
ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตโดยใช้ 2 เทคนิค คือ เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทрудแบบสกรูเดี่ยวซึ่งทำโดยการป้อนยางผ่านสกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความเร็วรอบสกรู 15 รอบต่อนาทีและเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ซึ่งมีความจุของห้องผสม 80 cm<sup>3</sup> ใช้ความเร็วของโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 145 °C

4.1.1 การวิเคราะห์การเกาะติดของหมู่ซัคซินิคแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ

ทดลองเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตในสภาวะหลอม (Molten state) โดยกระบวนการเอ็กซ์ทрудและเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ หลังจากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) ได้สเปคตรัมอินฟราเรดแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่ามี การเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่แสดงในช่วงเลขคลื่นต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่แสดงในช่วงเลขคลื่นต่าง ๆ ของยางธรรมชาติมาลิเอต

เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	หมู่ฟังก์ชัน
1854	การสั่นยืดแบบไม่สมมาตรของ C=O ของวงแหวนซัคซินิคแอนไฮไดรด์
1784	การสั่นยืดแบบสมมาตรของ C=O ของวงแหวนซัคซินิคแอนไฮไดรด์
1736	หมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์จากการแตกตัวของวงแหวนมาลิอิกแอนไฮไดรด์
1710	หมู่คาร์บอนิลของกรด จากการแตกตัวของวงแหวนมาลิอิกแอนไฮไดรด์
835	C-H out-of-plane bending ของพันธะ -CH ที่ต่อกับ C = C ใน cis-1,4-polyisoprene



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างสเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากการใช้เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคเคอร์และใช้ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr

จากสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่า มีวงแหวนซัคซินิคแอนไฮไดรด์ที่เกาะบนโมเลกุลยางธรรมชาติมี 2 ชนิด คือ วงแหวนที่อยู่ในรูปวงแหวนที่ยังไม่แตกตัว (สังเกตจากพีคที่เลขคลื่น 1854 และ 1784  $\text{cm}^{-1}$ ) และอนุพันธ์การแตกตัว เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของวงแหวนชนิดนี้กับความชื้นในอากาศได้กรดซัคซินิคและเอสเทอร์ ซึ่งพบพีคหมู่คาร์บอนิลของกรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1710  $\text{cm}^{-1}$  และพีคของหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ที่เลขคลื่น 1736  $\text{cm}^{-1}$

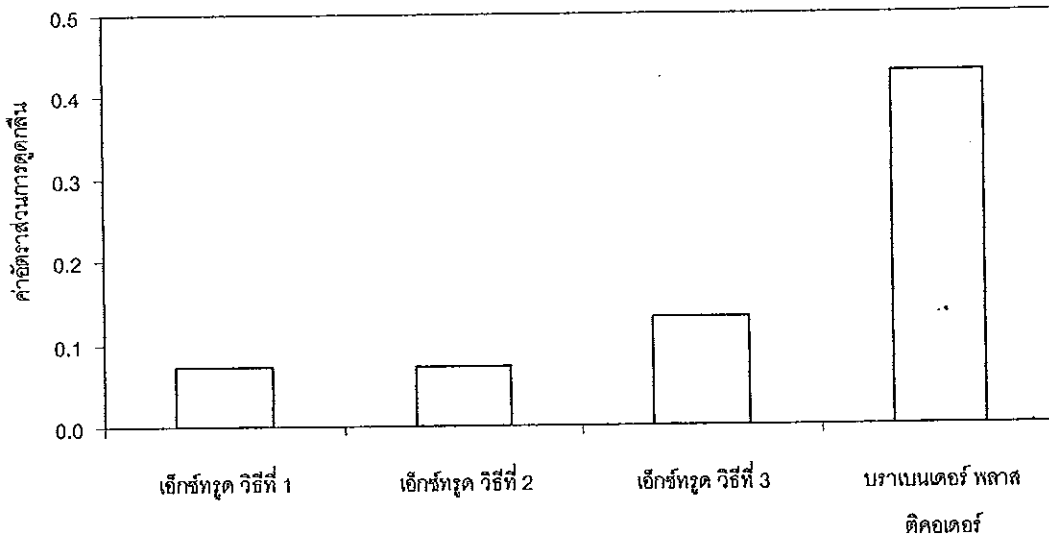
คำนวณหาปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติได้จากอัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio) ของแสงอินฟราเรดของหมู่คาร์บอนิล C=O ในรูปแบบต่างๆ (ที่เลขคลื่น 1854, 1784, 1736 และ 1710  $\text{cm}^{-1}$ ) ต่อการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ C-H out-of-plane bending ของพันธะ -C-H ที่ต่อกับ C=C ของ cis-1,4-polyisoprene ที่เลขคลื่น 835  $\text{cm}^{-1}$  (ในรูป 4.1) ได้ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 พบว่าการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทูดวิธีการเตรียมวิธีที่ 3 มีค่าอัตราส่วนการดูดกลืนสูงที่สุด แสดงว่ามีปริมาณหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติสูงที่สุด จึงมีหมู่ซัคซินิคแอนไฮไดรด์เกาะบนโมเลกุลยางธรรมชาติสูงที่สุด ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทูดแบบสกรูเดี่ยวคือวิธีการที่ 3 กล่าวคือ การเอ็กซ์ทูดยางธรรมชาติ 1 รอบ ก่อนผสมมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนเครื่องบดยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) ที่อุณหภูมิห้องแล้วนำมาเอ็กซ์ทูดต่อที่ 145°C ที่ความเร็วรอบสกรู 15 rpm จำนวน 2 รอบ รวมระยะเวลาที่ย่างอยู่ในเครื่องเอ็กซ์ทูดประมาณ 8 นาที 20 วินาที

นอกจากนี้ยังพบว่า การเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคเคเตอร์ สามารถเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตได้ปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติได้มากกว่ากระบวนการเอ็กซ์ทรูด อาจเนื่องมาจากการผสมมาลิอิกแอนไฮไดรด์ของกระบวนการเอ็กซ์ทรูดมีการผสมในเครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นกระบวนการผสมที่ทำในระบบเปิด ดังนั้น อาจทำให้ความชื้นในอากาศและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ มีผลต่อการแตกตัวของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ให้กลายเป็นหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ (ที่เลขคลื่น  $1736\text{ cm}^{-1}$ ) และหมู่คาร์บอนิลของกรด (ที่เลขคลื่น  $1710\text{ cm}^{-1}$ ) มากขึ้น ทำให้หมู่ที่แสดงถึงการสั่นยึดแบบสมมาตรของ  $\text{C}=\text{O}$  ของวงแหวนแอนไฮไดรด์ที่ต้องการลดน้อยลงบ่งบอกว่าการเกาะติดน้อยกว่า นอกจากนี้ อาจเนื่องมาจากการผสมในเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคเคเตอร์ให้อุณหภูมิที่คงที่ยาวนานกว่ากรณีเอ็กซ์ทรูด จึงทำให้ปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติได้มากกว่ากระบวนการเอ็กซ์ทรูด

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนการดูดกลืนของการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตโดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr โดยวิธีการต่างๆ

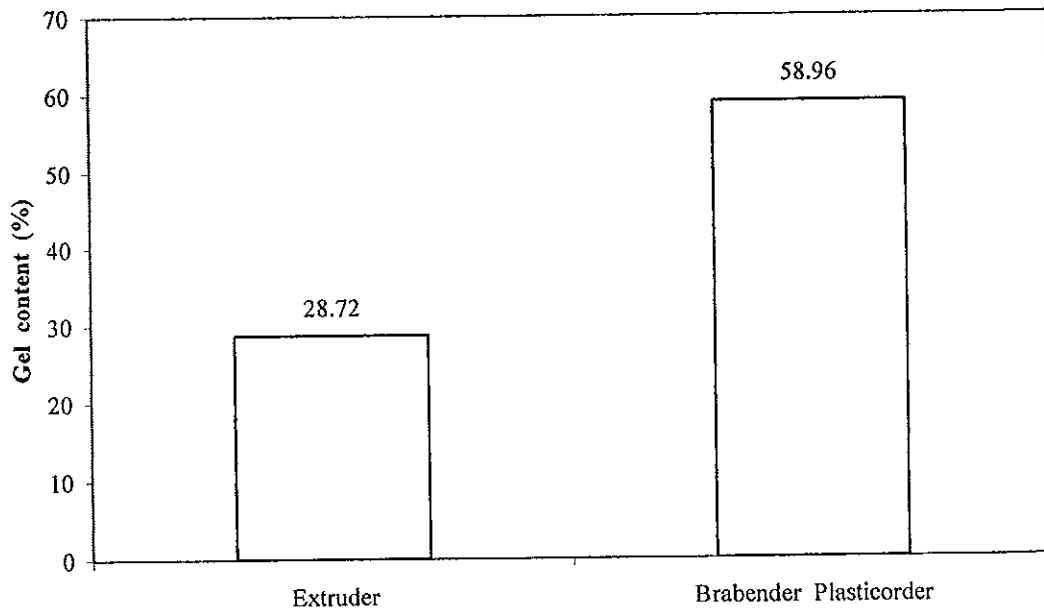
วิธีการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต	อัตราส่วนการดูดกลืน ( $1854+1784 +1736+1710/835$ )
การเอ็กซ์ทรูดวิธีที่ 1	0.0714
การเอ็กซ์ทรูดวิธีที่ 2	0.0730
การเอ็กซ์ทรูดวิธีที่ 3	0.1314
บราเบนเดอร์ พลาสติคเคเตอร์	0.4278

จากตารางที่ 4.2 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตกับค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่น  $1854+1784+1736+1710$  ต่อ  $835\text{ cm}^{-1}$  ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนของการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต 10 phr

นอกจากนี้เมื่อนำยางธรรมชาติมาลิเอตซึ่งใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr ที่เตรียมจากการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดวิธีที่ 3 (วิธีที่มีค่าอัตราส่วนการดูดกลืนสูงที่สุด) และยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคคอร์ดเดอร์มาวิเคราะห์หาปริมาณการเจล หรือส่วนของโมเลกุลยางที่เกิดการเชื่อมโยง (cross-linked structure) ซึ่งไม่ละลายในตัวทำละลาย ได้ผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ปริมาณเจล (%) ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์และเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคคอร์ดเดอร์ ที่การใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr

จากรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณเจลของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมด้วยเครื่องบราเบนเดอร์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูด เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ ทำให้โอกาสที่หมู่ที่มีขั้วจากส่วนของซัคซินิคแอนไฮไดรด์หรืออนุพันธ์จากการแตกตัวเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล แล้วทำให้สมบัติด้านการละลายและสมบัติเชิงฟิสิกส์เปลี่ยนไป ดังนั้น เมื่อปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดเจลของยางธรรมชาติมาลิเอตก็เพิ่มขึ้นด้วย จึงเลือกเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดซึ่งจะใช้แปรปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อไป

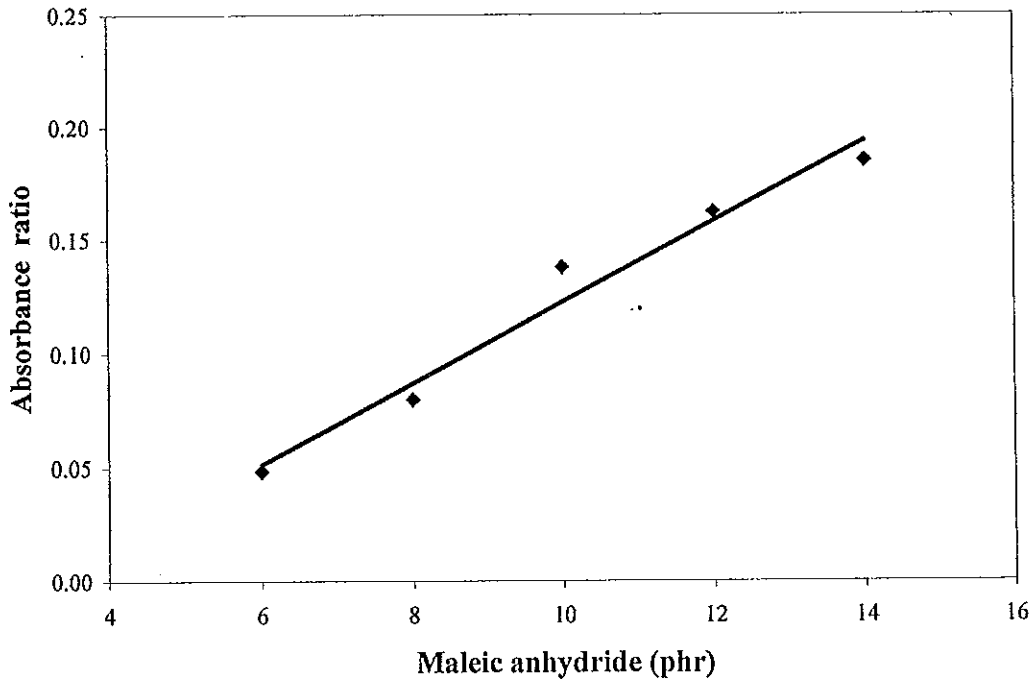
เมื่อนำวิธีที่ 3 ของการเตรียมยางมาลิเอตโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดมาแปรปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณต่างๆ คือ 6, 8, 10, 12 และ 14 phr แล้วทดสอบหาปริมาณการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนที่ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ

ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (phr)	อัตราส่วนการดูดกลืน $(1784+1735+1710)/835$
6	0.0483
8	0.0798
10	0.1377
12	0.1621
14	0.1847

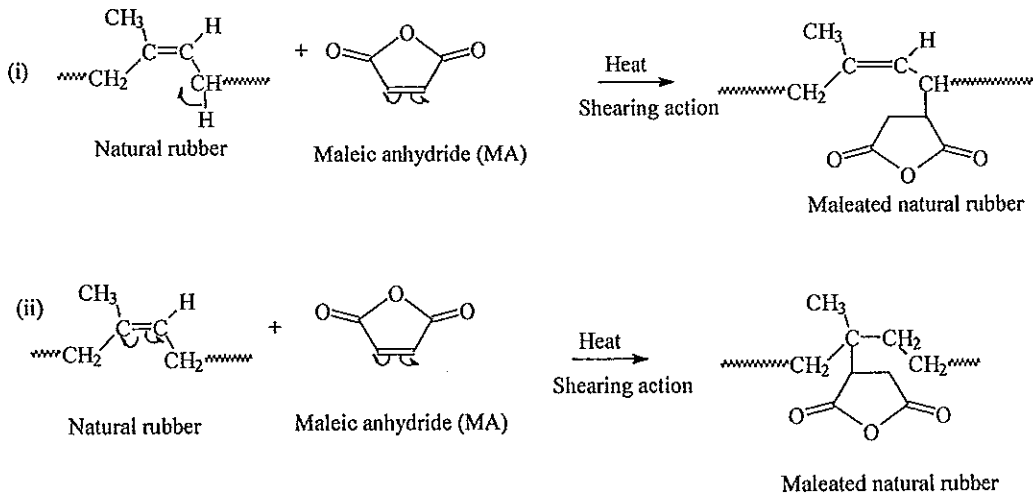
จากตารางที่ 4.3 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กับค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่น  $1854+1784+1736+1710$  ต่อ  $835 \text{ cm}^{-1}$  ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4



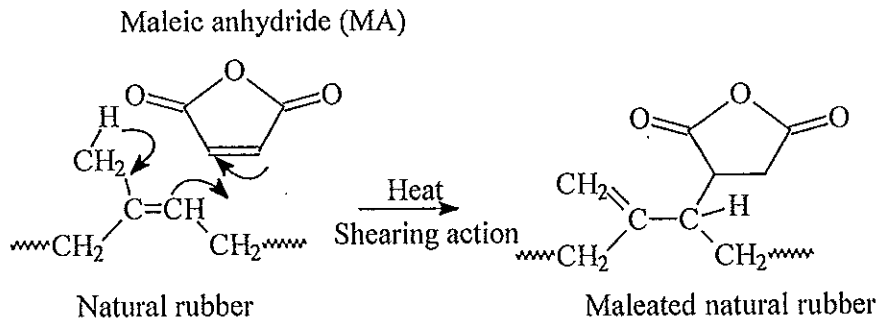


รูปที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิลในรูปแบบต่างๆ (ที่เลขคลื่น 1854, 1784, 1736 และ 1710  $\text{cm}^{-1}$ ) ต่อพันธะพันธะ  $\text{-C-H}$  ที่ต่อกับ  $\text{C=C}$  ของ cis-1,4-polyisoprene (ที่เลขคลื่น 835  $\text{cm}^{-1}$ ) ที่ระดับการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ 6 phr จะมีค่าอัตราส่วนการดูดกลืนต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ในช่วง 8-14 phr พบว่าค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีปริมาณ  $\text{C=O}$  ของวงแหวนซัคซินิคแอนไฮไดรด์ในโครงสร้างมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการที่โมเลกุลยางธรรมชาติมีตำแหน่งที่ว่างไว้ออกการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่หากมีสภาวะที่อุณหภูมิและการเขย่าที่สูงเพียงพอ จะทำให้โมเลกุลมาลิกแอนไฮไดรด์เข้าไปเกาะติดบนโมเลกุลยางธรรมชาติ และเมื่อมีการใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์มากขึ้นโอกาสที่มาลิกแอนไฮไดรด์สามารถเข้าไปเกาะติดบนโมเลกุลของยางธรรมชาตีก็นับมากขึ้น กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของยางธรรมชาติกับมาลิกแอนไฮไดรด์มีโอกาสเกิดได้ 2 แบบ คือ กลไกแบบอนุมูลอิสระ และ Diel-Alder reaction ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.5



## A: Free radical mechanism



## B: Diels-Alder reaction

รูปที่ 4.5 กลไกที่เป็นไปได้ของการกราฟต์มาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ (Nakason *et al.*, 2006)

จากรูปที่ 4.5 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ในขณะเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอต ประกอบด้วย การเกิดปฏิกิริยาแทนที่ (Diels-Alder reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก ขณะทำการบดผสมยางธรรมชาติและมาลิกแอนไฮไดรด์ และการเกิดปฏิกิริยาจากอนุมูลอิสระ (Free radical mechanism) ที่เกิดจากพันธะคู่และคาร์บอนในตำแหน่งอัลไลลิก (allylic carbon atom) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน และแรงเฉือนขณะเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอต

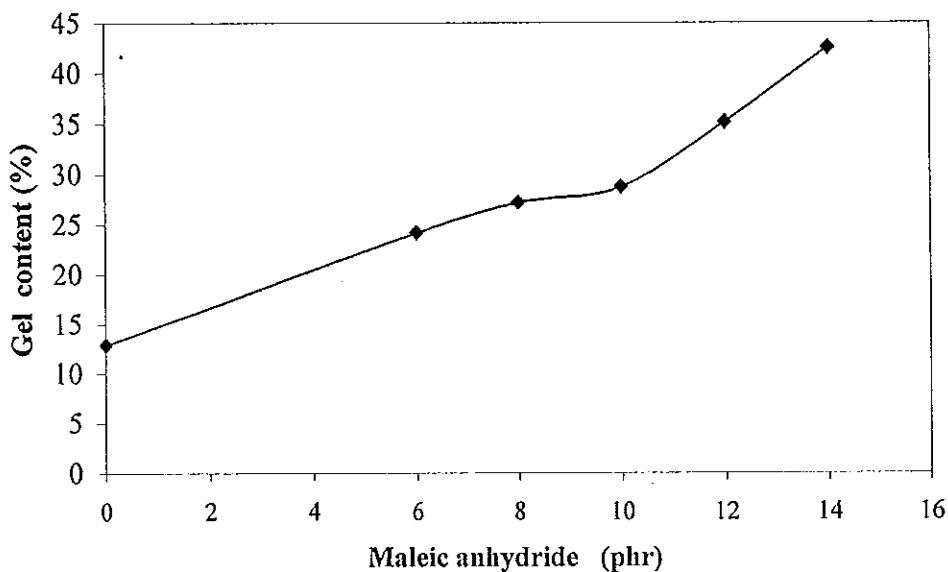
ส่วนปริมาณเจลของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่เตรียมจากการใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ต่าง ๆ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ ทำให้โอกาสที่หมู่ที่มีขั้วจากส่วนของซัคซินิคแอนไฮไดรด์หรืออนุพันธ์เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลทำให้เกิด

พันธะการเชื่อมโยงแบบอ่อนๆ แล้วทำให้สมบัติด้านการละลายและสมบัติเชิงฟิสิกส์เปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อปริมาณการเกาะติดของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดเจลของยางธรรมชาติมาลิกเอตก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 ปริมาณเจลของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่เตรียมจากการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ปริมาณต่างๆ

ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ (phr)	ปริมาณเจล (%)
0	12.87
6	24.15
8	27.19
10	28.72
12	35.12
14	42.48

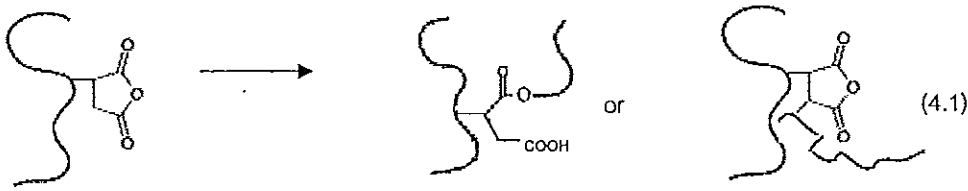
จากตารางที่ 4.4 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กับปริมาณเจลได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6



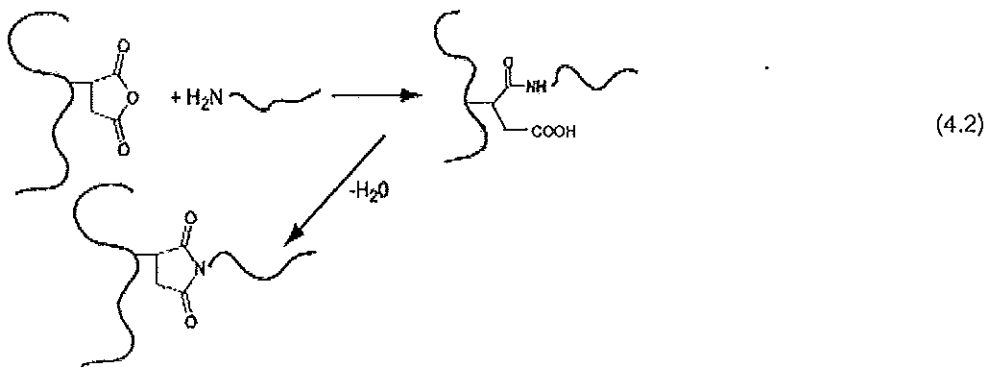
รูปที่ 4.6 ปริมาณเจลของยางธรรมชาติมาลิกเอตที่ใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ในการเตรียมยางธรรมชาติมาลิกเอต ทำให้เพิ่มปริมาณเจล (Gel content) เนื่องจากหมู่คีโตนแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บน

โมเลกุลยางธรรมชาติสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ เช่น โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลโดยการเปิดและไม่เปิดวงแหวนของวงแหวนซัคซินิคแอนไฮไดรด์ ดังปฏิกิริยาที่ 4.1



จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 และ 4.6 พบว่าการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 10 phr ได้ยางธรรมชาติมาลิกเอทที่มีปริมาณการเกาะติดในปริมาณสูง และมีปริมาณการเจลที่ไม่สูง (~ 29%) การใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณที่สูงกว่านี้ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เนื่องจากหมู่ซัคซินิคแอนไฮไดรด์ที่เกาะบนโมเลกุลยางเป็นส่วนโมเลกุลที่มีความเครียด (Strain) สูง พร้อมทั้งจะแตกออกเนื่องจากการทำปฏิกิริยาหรืออันตรกิริยากับสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารประกอบเอมีน (Adhesion Promoters Center, 2004) ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเอไมด์ ซึ่งจะทำให้ยางธรรมชาติมาลิกเอทมีสมบัติเปลี่ยนไป ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 4.2



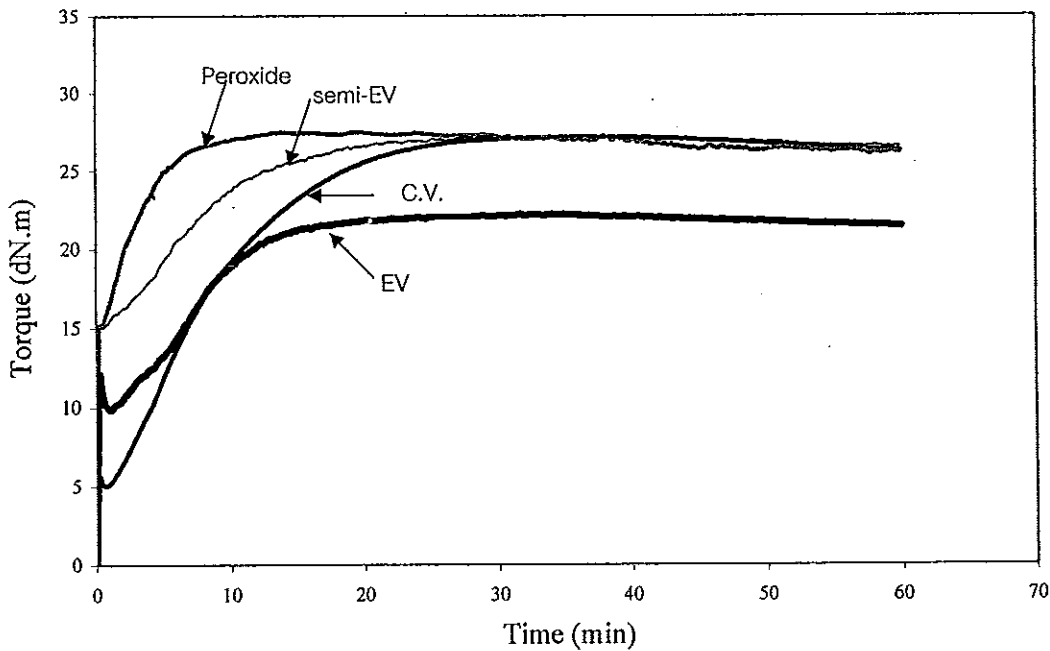
#### 4.2 การศึกษาระบบการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติมาลิกเอท

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติมาลิกเอท โดยนำยางธรรมชาติมาลิกเอทที่เตรียมจากการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ 10 phr ซึ่งเตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์ดอร์ มาคอมปาวด์โดยแปรชนิดของระบบการวัลคาไนซ์ 4 ระบบ ได้แก่ ระบบเปอร์ออกไซด์ ระบบกำมะถันปริมาณปกติ ระบบเซมิอีวี และระบบอีวี

##### 4.2.1 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

นำยางธรรมชาติมาลิกเอทที่ใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ 10 phr จากการเตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์มาคอมปาวด์ตามวิธี 3.3.2 โดยแปรชนิดของระบบการวัลคาไนซ์ 4 ระบบ ได้แก่ ระบบเปอร์

ออกไซด์, ระบบกำมะถันปริมาณปกติ, ระบบเซมิอีวี และระบบอีวี แล้วนำไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ ด้วยเครื่อง ODR 2000 ได้ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการผสมดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมจากเครื่องวิโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุนของยางธรรมชาติมาลิเอตที่คอมปาวด์ด้วยระบบต่างๆ

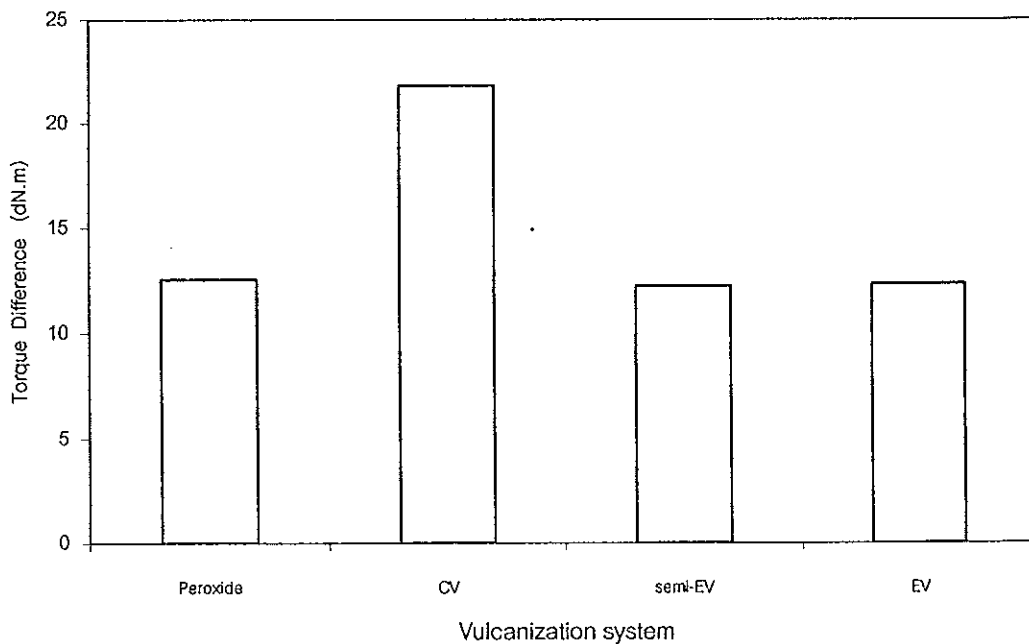
จากรูปที่ 4.7 พบว่าลักษณะกราฟการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิเอตทุกระบบเป็นการวัลคาไนซ์ที่ค่าทอร์กสุดท้ายเข้าสู่สมดุล (equilibrium) นอกจากนี้พบว่าระบบเปอร์ออกไซด์ ระบบกำมะถันปริมาณปกติ และระบบเซมิอีวี ให้ค่าทอร์กสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน และสูงกว่าระบบอีวี

เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในรูปที่ 4.7 มาคำนวณหาค่าทอร์กสูงสุด (Maximum Torque,  $M_H$ ) ทอร์กต่ำสุด (Minimum Torque,  $M_L$ ) ผลต่างของทอร์ก ( $M_H - M_L$ ) เวลาที่ยังสามารถแปรรูปได้ (scorch time) เวลาวัลคาไนซ์ (cure time) และอัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate index) ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลีเอตระบบต่างๆ

Properties	Vulcanization system			
	Peroxide	Conventional	Semi-EV	EV
Max. Torque, dN-m	27.69	27.13	27.24	22.17
Min. Torque, dN-m	15.13	5.32	15.02	9.83
$M_H - M_L$ , dN-m	12.56	21.81	12.22	12.34
Scorch time, min.	0.86	1.88	1:73	2.29
Cure time, min.	8.08	18.44	16.84	11.71
Cure rate index, $\text{min}^{-1}$	13.85	6.04	6.62	10.62

จากตารางที่ 4.5 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุดกับระบบการวัลคาไนซ์ได้ดังรูปที่ 4.8

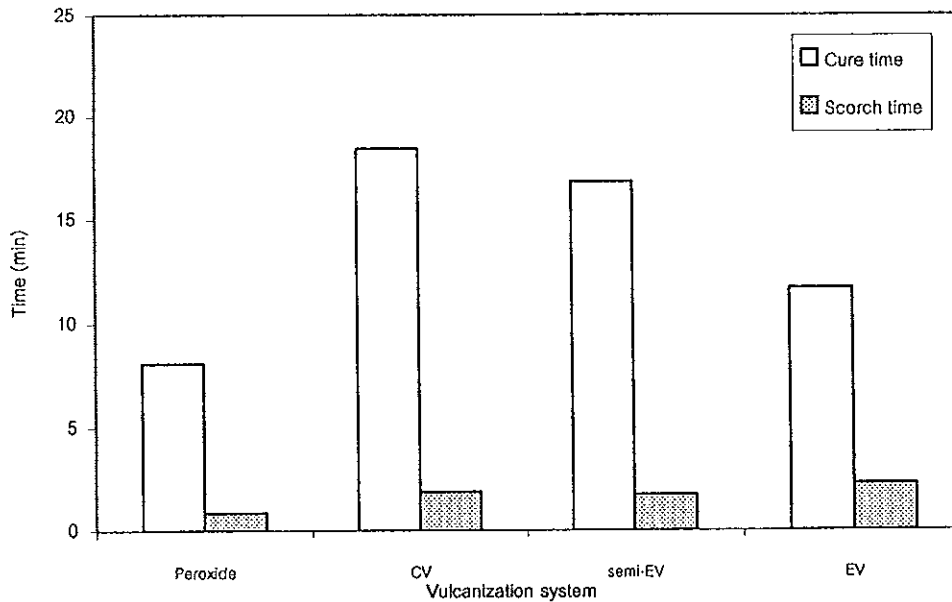


รูปที่ 4.8 ค่าผลต่างของทอร์ก ( $M_H - M_L$ ) ของการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอตด้วยระบบต่างๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 พบว่าผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดกับค่าทอร์กต่ำสุดของยางธรรมชาติมาลีเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปริมาณปกติมีค่าสูงกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ เซมิอีวี และอีวี ตามลำดับ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดกับค่าทอร์กต่ำสุดเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับหรือปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง กล่าวคือ เมื่อเริ่มเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง ค่าทอร์กจะเพิ่มขึ้นตาม

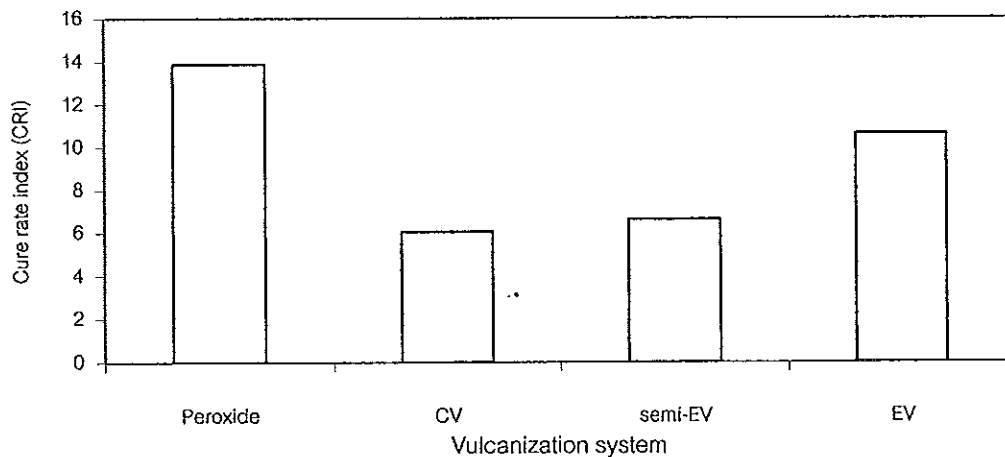
ปริมาณการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่าทอร์กถึงจุดสูงสุดหรือจุดคงที่ จึงถือว่าเป็นจุดที่เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลยางสูงสุดด้วย ซึ่งยางที่มีปริมาณการเชื่อมโยงมากกว่าจะมีค่าทอร์กสูงสุดมากกว่าด้วย

จากตารางที่ 4.5 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ยังสามารถแปรรูปได้อย่างปลอดภัยกับระบบการวัลคาไนซ์ได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (Cure time) และเวลาที่ยังสามารถแปรรูปได้อย่างปลอดภัย (Scorch time) ของการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลีเอตด้วยระบบต่างๆ

จากตารางที่ 4.5 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการวัลคาไนซ์กับระบบการวัลคาไนซ์ได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 อัตราการวัลคาไนซ์ของการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบต่างๆ

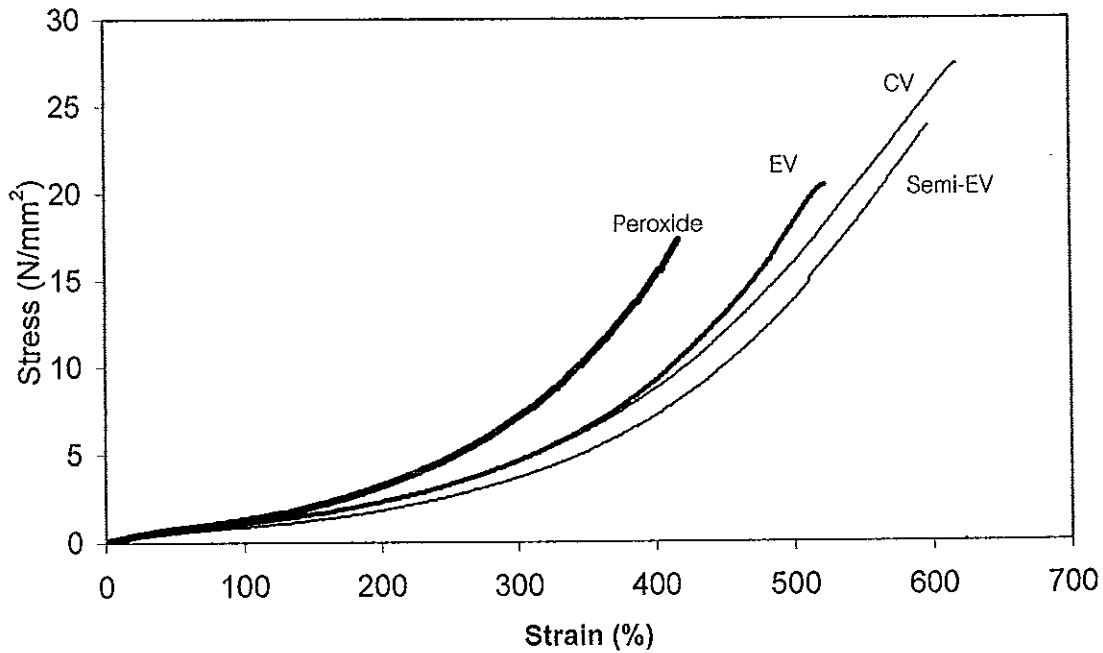
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (scorch time) ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ พบว่าระบบเปอร์ออกไซด์ให้ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้น้อยที่สุด ส่วนยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติและเคมีอีวีจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนระบบอีวีมีระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ยาวนานที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ พบว่าระบบกำมะถันปริมาณปกติจะต้องใช้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์นานที่สุด และมีอัตราการวัลคาไนซ์ต่ำสุด รองลงมาคือระบบเคมีอีวี อีวี และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.10) ดังนั้นการใช้ระบบกำมะถันปริมาณปกติในการวัลคาไนซ์ น่าจะเหมาะสมที่สุดในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิเอต เนื่องจากให้ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้นาน มีค่าเวลาสกอชที่ไม่สั้นเกินไป ทำให้เหมาะสมที่จะเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ กล่าวคือ สามารถเบลนด์เข้ากับพลาสติกให้เข้ากันได้ในช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ซึ่งจะทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลดี นอกจากนี้การมีค่าผลต่างของทอริก ( $M_n - M_w$ ) ที่มากของระบบกำมะถันปริมาณปกติจะทำให้การเชื่อมโยงของโมเลกุลสูง ส่งผลในทางบวกกับสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

#### 4.2.2 สมบัติของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอเดอร์

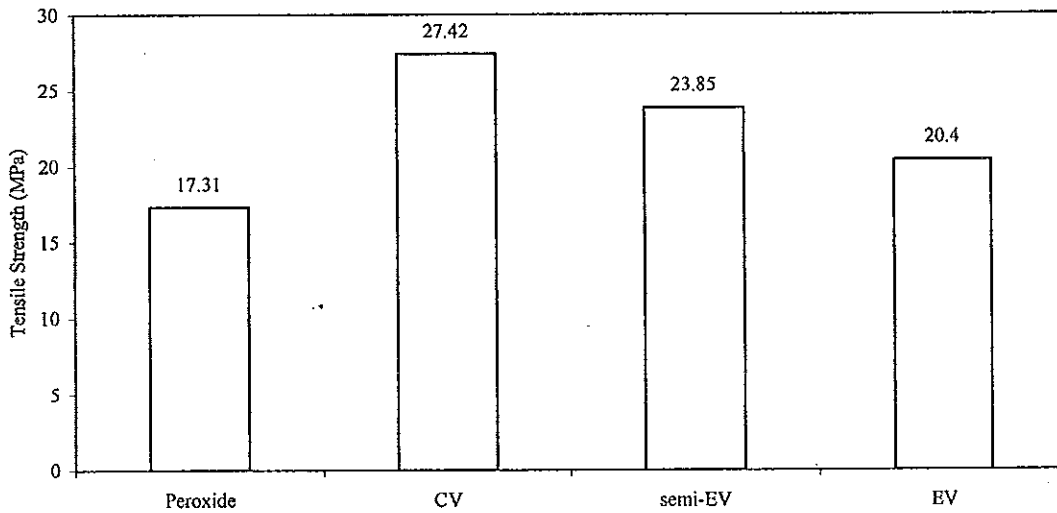
ในการทดลองนี้ได้นำยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยการใส่มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr ซึ่งเตรียมด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอเดอร์มาคอมปาวด์โดยแปรชนิดของระบบการวัลคาไนซ์ 4



ระบบ ได้แก่ ระบบเปอร์ออกไซด์ (สูตรที่ 3 ใช้ DCP 1 phr) ระบบกำมะถันปริมาณปกติ ระบบเซมิอีวี และระบบอีวี แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยนำยางคอมปาวด์ไปอัดเบ้าที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  แล้วนำไปหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ความสามารถในการยืดตัว, ความสามารถในการคืนตัว (Tension set), ค่าการยุบตัวของยางหลังจากเอาแรงกดออก (Compression set), ความต้านทานต่อการฉีกขาด, ความแข็ง และความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ได้ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดแสดงดังในรูปที่ 4.11 และความต้านทานต่อแรงดึงแสดงดังในรูปที่ 4.12



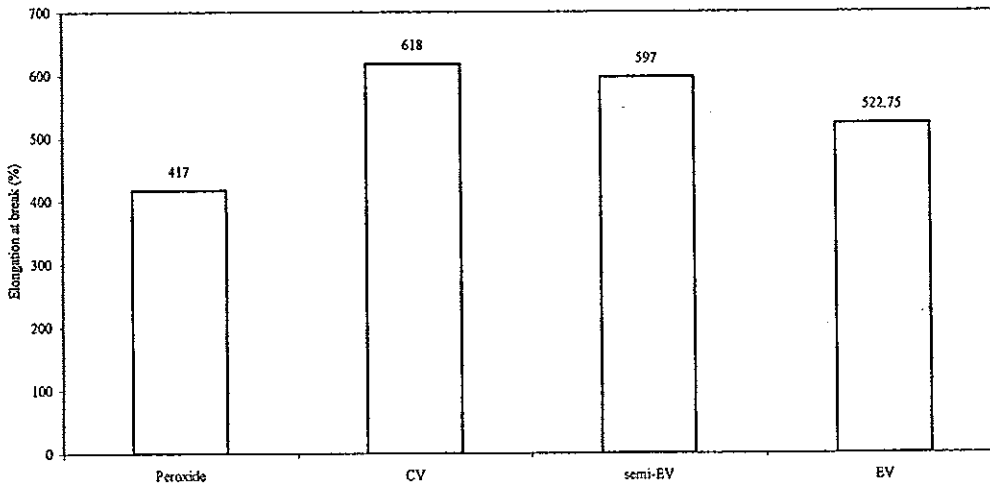
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของ Stress-Strain Curve ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ



รูปที่ 4.12 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปริมาณปกติให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด รองลงมาคือ เซมิอีวี อีวี และเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากระบบอีวีเป็นระบบที่มีการใช้กำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมาก ซึ่งจะทำให้กำมะถันที่เชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก โดยแต่ละพันธะเชื่อมโยงของ C-S<sub>x</sub>-C จะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น (Monosulphidic และ Disulphidic crosslink) ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยกว่าการใช้กำมะถันปริมาณปกติ และระบบเซมิอีวี ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีพันธะที่เป็นพันธะ C-C นั้นถึงแม้ว่าจะเป็นพันธะที่มีพลังงานการสลายพันธะที่สูงแต่สายโซ่ที่เกิดขึ้นมีความยาวพันธะที่น้อยกว่า ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้และไม่เกิดการตกผลึกเมื่อดึง ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงน้อยกว่าระบบที่ใช้กำมะถัน

เมื่อนำยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ ทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการยืด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 พบว่าการวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติจะมีค่าความสามารถในการยืดสูงที่สุด รองลงมาคือระบบเซมิอีวี อีวี และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบปกติจะสามารถทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติเกิดพันธะที่ยาวได้มากกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมีพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ซึ่งมีความยืดหยุ่นของพันธะมากกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ที่เป็นพันธะ C-C เมื่อดึงสามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้ดีกว่า ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการยืดของระบบกำมะถันดีกว่า



รูปที่ 4.13 ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติจะมีค่าความสามารถในการยืดที่สูงที่สุด รองลงมาคือระบบเคมีอีวี อีวี และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบปกติจะมีโอกาสการหมุนของพันธะในสายโซ่ที่มีพันธะ C-S<sub>x</sub>-C มากกว่าสายโซ่ของระบบเปอร์ออกไซด์ที่เป็นพันธะ C-C ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการยืดของระบบกำมะถันดีกว่า

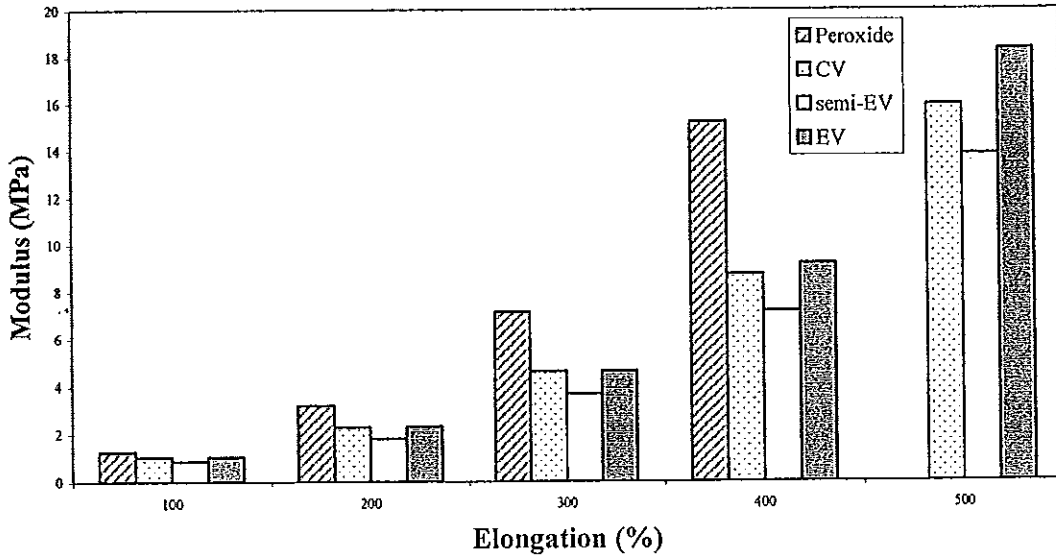
จากรูปที่ 4.11 เมื่อนำค่าแรงที่ระดับร้อยละในการดึงขึ้นทดสอบต่างๆ มาหาค่าโมดูลัสของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 โมดูลัสของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

Vulcanization System	Moduli (MPa)				
	100%	200%	300%	400%	500%
Peroxide	1.27	3.19	7.15	15.25	-
CV	1.04	2.29	4.63	8.75	15.96
semi-EV	0.86	1.80	3.67	7.19	13.85
EV	1.06	2.32	4.64	9.22	18.31

\*Elongation of rubber specimen

จากตารางที่ 4.6 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสกับร้อยละในการดึงขึ้นทดสอบได้ดังรูปที่ 4.14

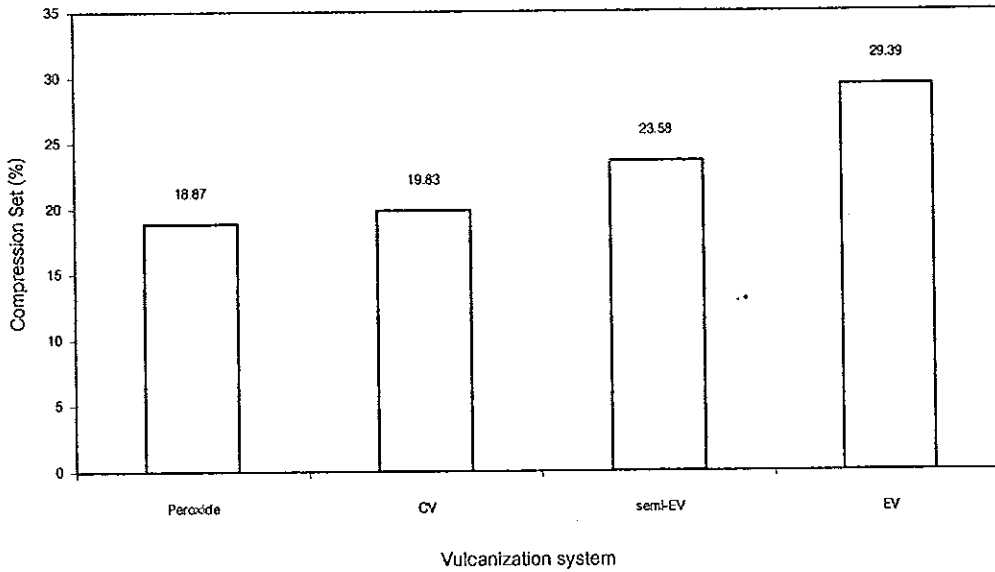


รูปที่ 4.14 โมดูลัสของยางธรรมชาติมาลิเอตระบบต่างๆ เมื่อดึงที่ 100, 200, 300, 400 และ 500%

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.14 พบว่ายางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ให้ค่าโมดูลัสสูงสุดในทุกระดับการยืด สอดคล้องกับ Stress-Strain Curve ในรูปที่ 4.11 แสดงว่าขณะยืดนั้นยางธรรมชาติมาลิเอตระบบเปอร์ออกไซด์มีความเครียดมากกว่าระบบอื่นๆ ทำให้ต้องใช้แรงมากกว่าในการดึงยางระบบเปอร์ออกไซด์นี้ให้ยืดเท่ากับระบบที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

เมื่อนำยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ ยืดทิ้งไว้ที่ 100 % เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทดสอบความสามารถในการคืนตัว ได้ค่าความสามารถในการคืนตัวของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ แทบไม่แตกต่างกัน และมีค่าน้อยมาก กล่าวคือทุกสูตรให้ค่าความสามารถในการคืนตัวอยู่ในช่วง 0-0.5% หรือ 0-1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีเนื่องจากยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์สามารถหดตัวกลับคืนรูปร่างเดิมได้หมด

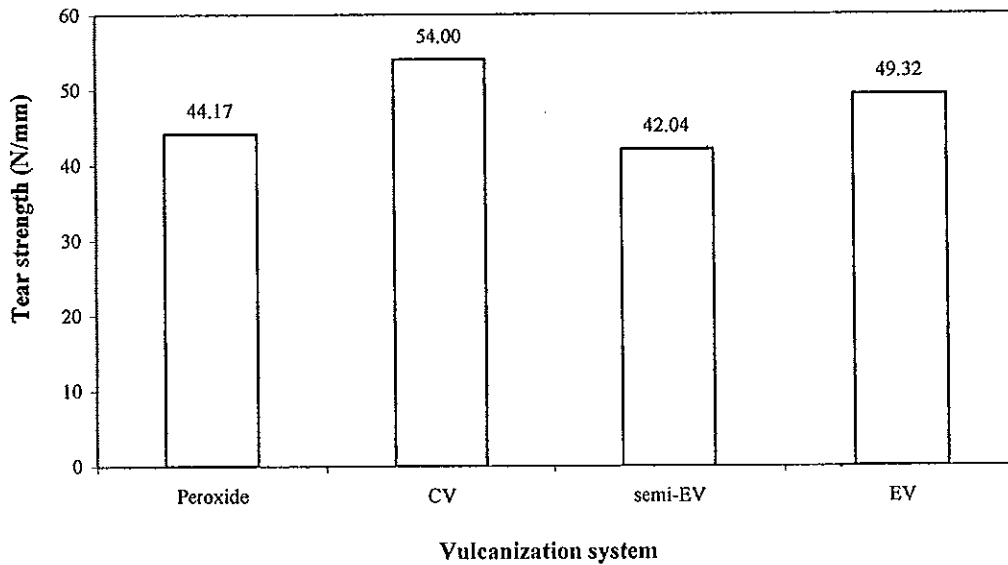
เมื่อนำยางคอมปาวด์อัดเข้าที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM D395 แล้วนำขึ้นทดสอบไปทดสอบค่าการครู่ปของยางหลังจากการกดได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบว่าทุกระบบวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอต จะให้ค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดที่ต่ำ อาจเนื่องมาจากยางมีการเชื่อมโยงกันภายในโมเลกุลมาก นอกจากนี้ยังพบว่าระบบเปอร์ออกไซด์ให้ค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดที่ต่ำกว่าระบบกำมะถัน เนื่องจากระบบเปอร์ออกไซด์สามารถทนทานต่อความร้อนได้ดีกว่าระบบกำมะถัน เป็นผลมาจากพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลยางสูง (พลังงานสลายพันธะ 84 kcal (Oaklands Corporate Center, 2002)) ในขณะที่พลังงานสลายพันธะของคาร์บอน-กำมะถันมีเพียง 49 kcal (Oaklands Corporate Center, 2002)) จึงทนความร้อนได้ดีกว่า จึงสามารถรักษารูปร่างเดิมได้ ส่วนระบบกำมะถันพบว่ามีระบบกำมะถันแบบปกติมีค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดดีกว่าระบบเซมิ-อีวีและอีวี ตามลำดับ เนื่องจากระบบอีวีเป็นระบบที่มีการใช้กำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยงของ C-S<sub>x</sub>-C จึงมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น ทำให้สมบัติดีดกกว่าการใช้กำมะถันปริมาณปกติ และระบบเซมิอีวี เนื่องจากระบบที่มีกำมะถันมากนั้นโครงสร้างที่เชื่อมกันเป็นพันธะ polysulphidic เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงมีพันธะที่ยาวกว่า ทำให้พันธะมีความยืดหยุ่นสูงกว่าระบบอื่นๆ ส่งผลให้กำมะถันแบบปกติมีค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดดีกว่าระบบเซมิ-อีวีและอีวี ตามลำดับ

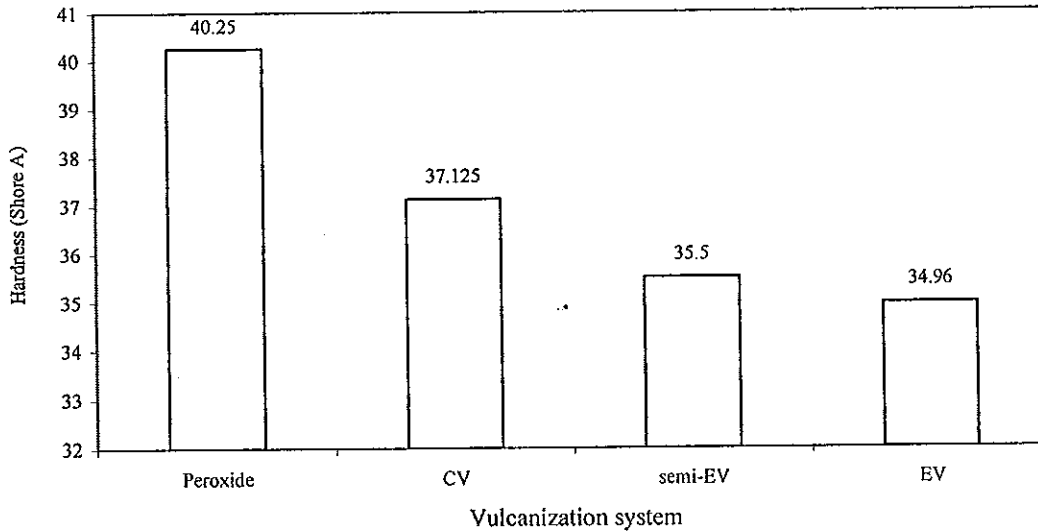
เมื่อนำยางคอมปาวด์อัดน้ำแล้วไปตัดด้วยตาย B (ตาม ASTM D624) นำขึ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer ที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ดึงขึ้นทดสอบจนขาด แล้วนำค่าแรงสูงสุดที่ขึ้นทดสอบชักขาดออกจากคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการชักขาดได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 พบว่าการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบกำมะถันปกติจะให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมากที่สุด รองลงมาคือ อีวี เปอร์ออกไซด์ และเคมี-อีวี ตามลำดับ การที่ระบบกำมะถันปริมาณปกติให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมากที่สุด อาจจะเนื่องมาจากยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปริมาณปกติมีปริมาณการเชื่อมโยงสูงและมีความแข็งแรงของพันธะที่มากกว่าระบบอื่นๆ ทำให้ยางทนต่อความเครียดสะสมที่ตรงปลายมุมได้มาก ส่งผลให้ต้องใช้แรงในการทำให้เกิดรอยฉีกตรงปลายมุม และทำให้รอยฉีกขยายตัวออกไปมากกว่าระบบอื่นๆ

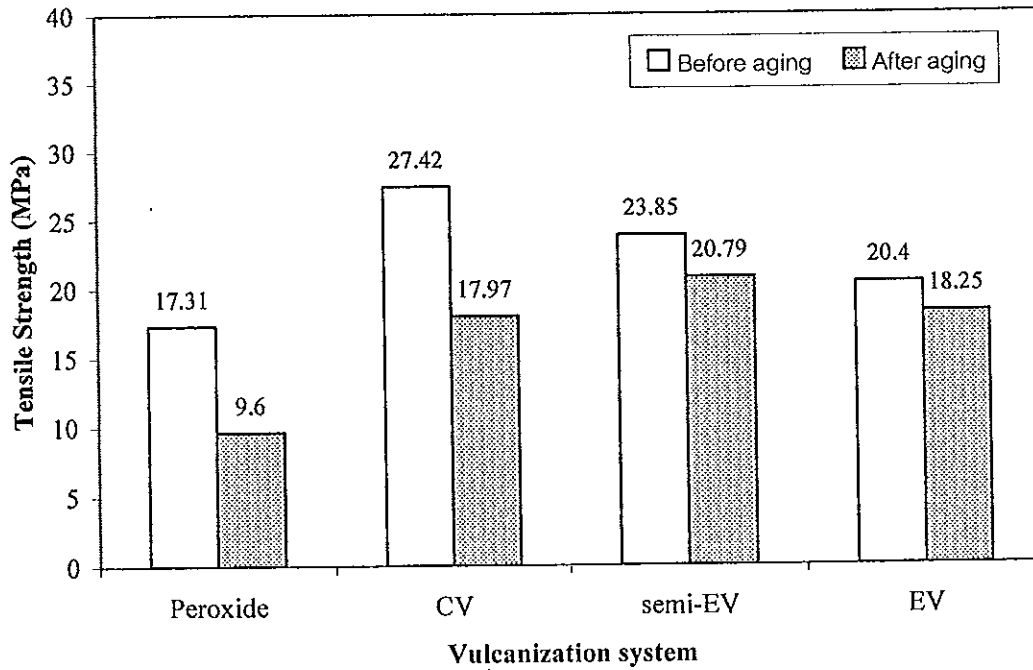
เมื่อนำยางคอมปาวด์อัดเข้าและนำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ Durometer ประเภท Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ได้ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.17



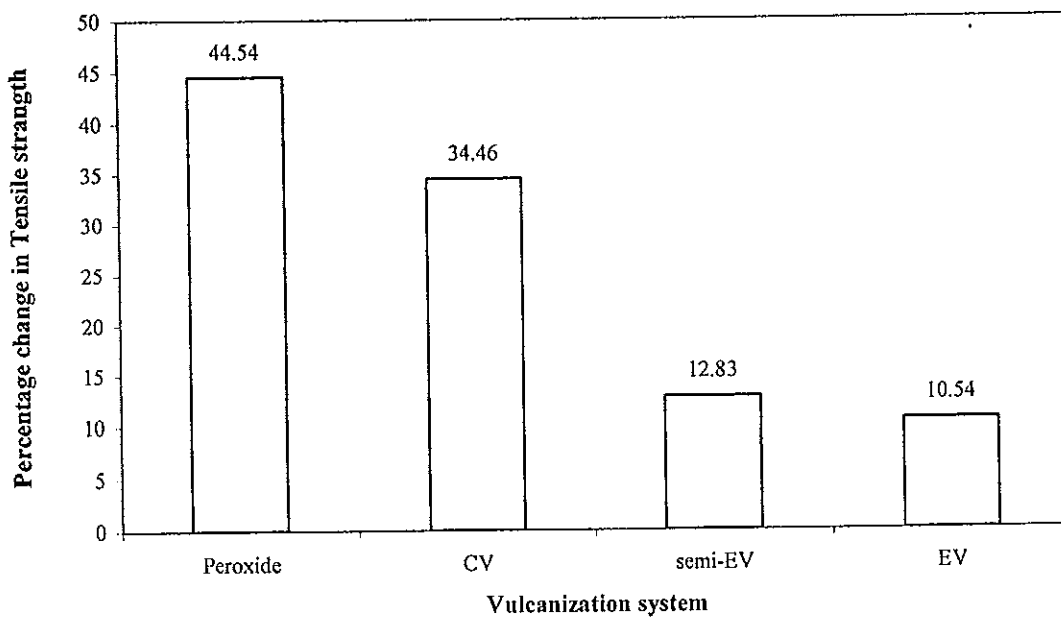
รูปที่ 4.17 ความแข็ง (Shore A) ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.17 พบว่าความแข็งของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีค่าสูงกว่าระบบกำมะถันปกติ เซมิ-ซีวี และอีวี ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีความแข็งแรงของพันธะที่มากกว่าระบบอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลยางสูง (พลังงานสลายพันธะ 84 kcal (Oaklands Corporate Center, 2002)) ทำให้อย่างมีความแข็งมากกว่าระบบอื่น

นำยางตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงไปอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในเตาอบที่มีอากาศร้อนไหลผ่าน ตั้งยางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงเทียบกับค่าที่ได้ก่อนอบ (รูปที่ 4.18) เพื่อนำไปคำนวณสมบัติของความต้านทานต่อแรงดึงที่เปลี่ยนไปหลังจากปมเร่ง ได้ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ ก่อนและหลังการบ่มแรง

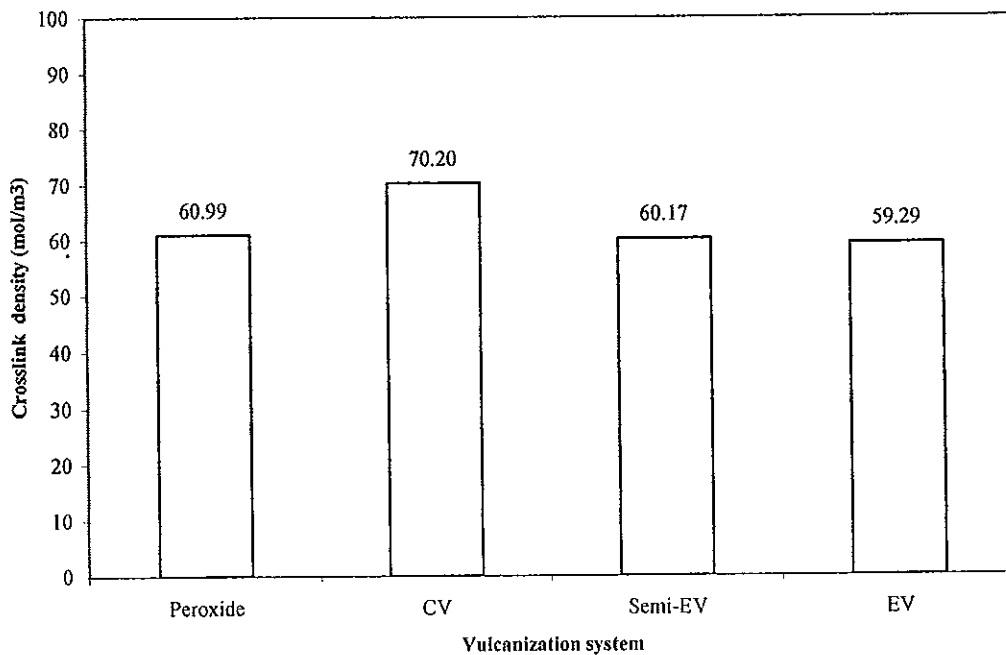


รูปที่ 4.19 ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มแรงของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ



จากการทดลองพบว่าหลังการบ่มเร่งอย่างธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง (รูปที่ 4.18) และเมื่อนำมาคำนวณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นร้อยละของสมบัติเดิม (รูปที่ 4.19) พบว่าสมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่งของระบบอีวี ดีกว่าระบบเคมีอีวี ระบบกำมะถันปริมาณปกติและระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากระบบอีวีเป็นระบบที่มีการใช้กำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมาก ซึ่งจะทำให้กำมะถันที่เชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น (Monosulphidic และ Disulphidic crosslink) ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยกว่าการใช้กำมะถันปริมาณปกติ แต่จะทำให้ยางมีความต้านทานต่อการ reversion ดี สมบัติการทนทานต่อความร้อนดี และมีสมบัติที่ทนทานต่อการเสื่อมเนื่องจากการออกซิไดซ์ดีด้วย

เมื่อนำตัวอย่างมาทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลายในตัวทำละลายโทลูอีน แล้วคำนวณหาความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ปริมาณการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

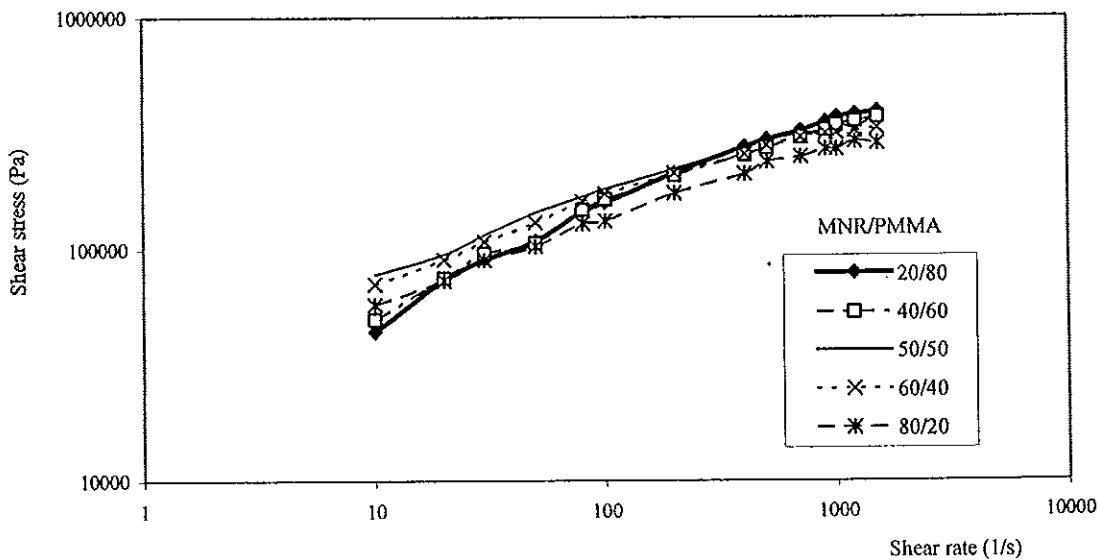
จากรูปที่ 4.20 พบว่าปริมาณการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปริมาณปกติให้ค่าการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลที่สูงที่สุด ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกันกับการทดลองหาค่าผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดกับค่าทอร์กต่ำสุดของยางธรรมชาติมาลิเอตในรูปที่ 4.8

### 4.3 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA

#### 4.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA โดยใช้ MNR ที่เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทруд

##### 4.3.1.1 สมบัติการไหล

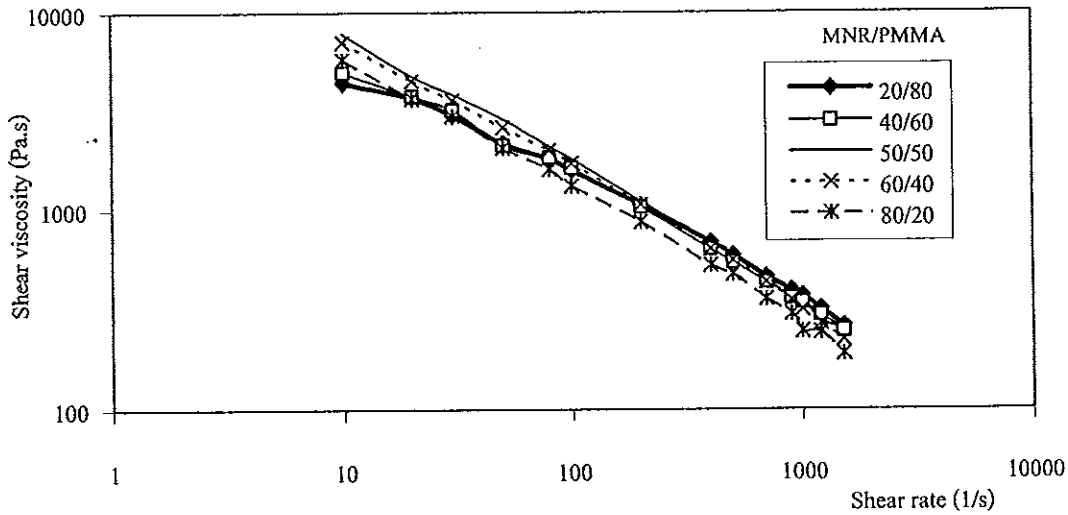
นำยางธรรมชาติมาลิเอดที่เตรียมโดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr มาเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท (PMMA) ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติมาลิเอด/พอลิเมทิลเมทาคริเลท เท่ากับ 80/20, 60/40, 50/50, 40/60 และ 20/80 โดยผสมในเครื่องเอ็กซ์ทрудแบบสกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วรอบสกรู 15 รอบต่อนาที หลังจากนั้นตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก แล้วทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารีที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยให้คายที่มีความยาว 32 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มุมไหลเข้า 90 องศา และตั้งค่าอัตราเฉือนในช่วง 5-1600  $s^{-1}$  ได้ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนแสดงดังในรูปที่ 4.21 และ 4.41



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ

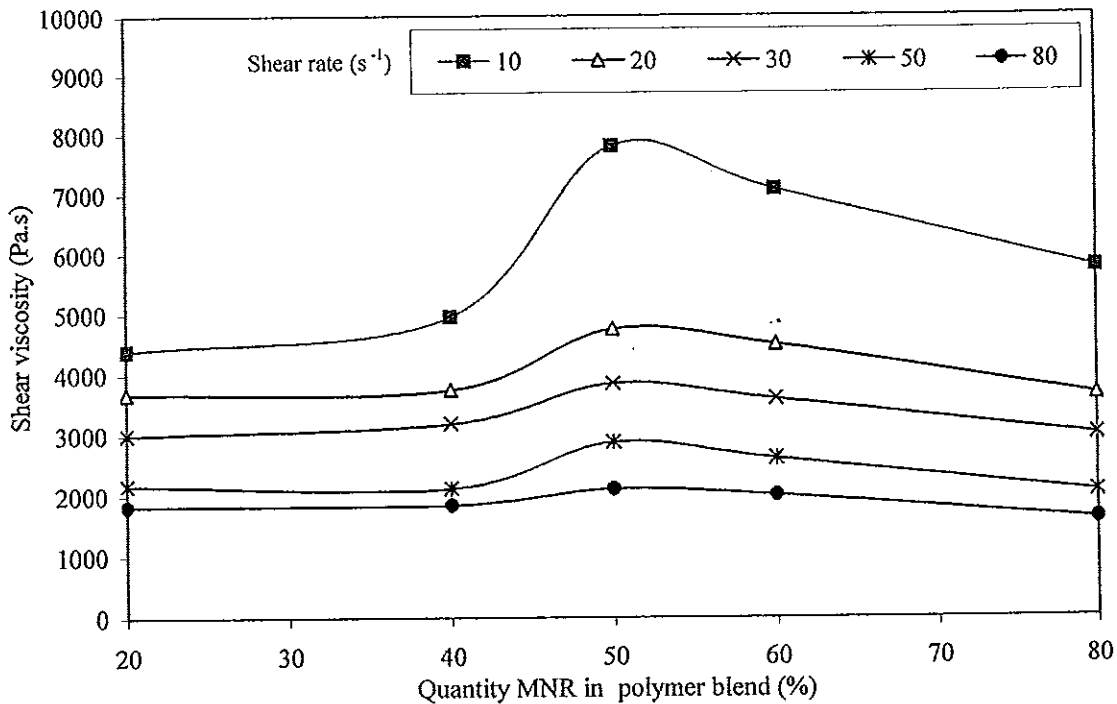
จากรูปที่ 4.21 พบว่าการเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์หลอมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าที่อัตราส่วน MNR/PMMA เท่ากับ 50/50 พอลิเมอร์หลอมจะมีค่าความเค้นเฉือนสูงที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากที่อัตราส่วน 50/50 มีการเชื่อมประสานระหว่างยางธรรมชาติมาลิเอดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลท ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองเกิดแรงยึดเหนี่ยวกัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไหลได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนมีค่าสูง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนแสดงค่าในรูปที่ 4.22 ซึ่งพบว่าค่าความหนืดเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนและพบว่าความหนืดเฉือนที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA 50/50 มีค่าสูงที่สุดในทำนองเดียวกับความเค้นเฉือน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ

เมื่อนำค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนคงที่ต่างๆ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณของยางธรรมชาติมาลิเอตในพอลิเมอร์เบลนด์จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนกับปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอตในพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราเฉือนคงที่ต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนเดียวกัน พบว่าในช่วงปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอต 20-50 % ค่าความหนืดเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ MNR แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ MNR ในพอลิเมอร์เบลนด์สูงกว่านี้จะทำให้ค่าความหนืดเฉือนมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าระดับอันตรกิริยาระหว่างเฟสของยางธรรมชาติมาลีเอตกับ PMMA จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MNR จนถึงจุดวิกฤตค่าหนึ่ง (ในที่นี้คือที่อัตราส่วน 50/50) และหลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณ MNR จะทำให้ระดับอันตรกิริยาลดลงเนื่องจากเกิดการกลับเฟสจากการมี PMMA เป็นเฟสต่อเนื่องเปลี่ยนเป็น MNR เป็นเฟสต่อเนื่อง ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ในลักษณะนี้สามารถอธิบายได้ด้วย Log additive rule (Kundu et al., 1998) ดังสมการ

$$\log \eta_B = \sum W_i \log \eta_i \quad (4.3)$$

โดย  $\eta_B$  คือ ความหนืดรวมของพอลิเมอร์เบลนด์

$\eta_i$  คือ ความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในพอลิเมอร์เบลนด์

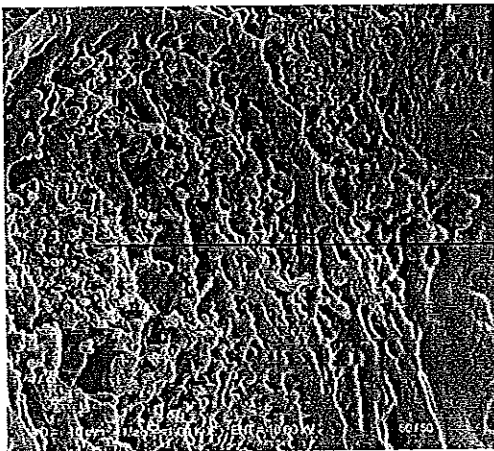
$W_i$  คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในพอลิเมอร์เบลนด์

จากสมการ (4.3) จะเห็นว่าความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์เป็นผลรวมของผลคูณระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักกับความหนืดของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของการเบลนด์แต่ละชนิด ซึ่งถ้า

ระดับความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มเชิงบวก (Positive deviation blend, PDB) กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ ดังรูปที่ 4.23 แสดงว่าองค์ประกอบของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการเบลนด์มีความเข้ากันได้ (Miscible blend) แต่ถ้าพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์มีความไม่เข้ากัน (Immiscible blend) จะทำให้ความหนืดรวมของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีแนวโน้มเชิงลบ (Negative deviation blend, NDB) ดังนั้นจากรูปที่ 4.23 ลักษณะกราฟมีแนวโน้มเชิงบวก (Positive deviation blend, PDB) ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ แสดงว่ายางธรรมชาติมาลีเอตและ PMMA มีความเข้ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าความหนืดเฉือนสูงที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้พอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ดี ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไหลได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้มีความหนืดสูง ซึ่งจากข้อสรุปดังกล่าวจึงเลือกอัตราส่วน 50/50 มาเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic Vulcanizate) ต่อไป

#### 4.3.1.2 สัณฐานวิทยา

เมื่อนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วน 50/50 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลทและยางธรรมชาติมาลีเอต ซึ่งทำโดยการนำชิ้นทดสอบแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นหักชิ้นทดสอบเพื่อเปิดผิวหน้าใหม่ แล้วนำมาสกัดเอาเฟสของพอลิเมทิลเมทาคริเลทออก แล้วเคลือบผิวหน้าใหม่นั้นด้วยทองคำ จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.24



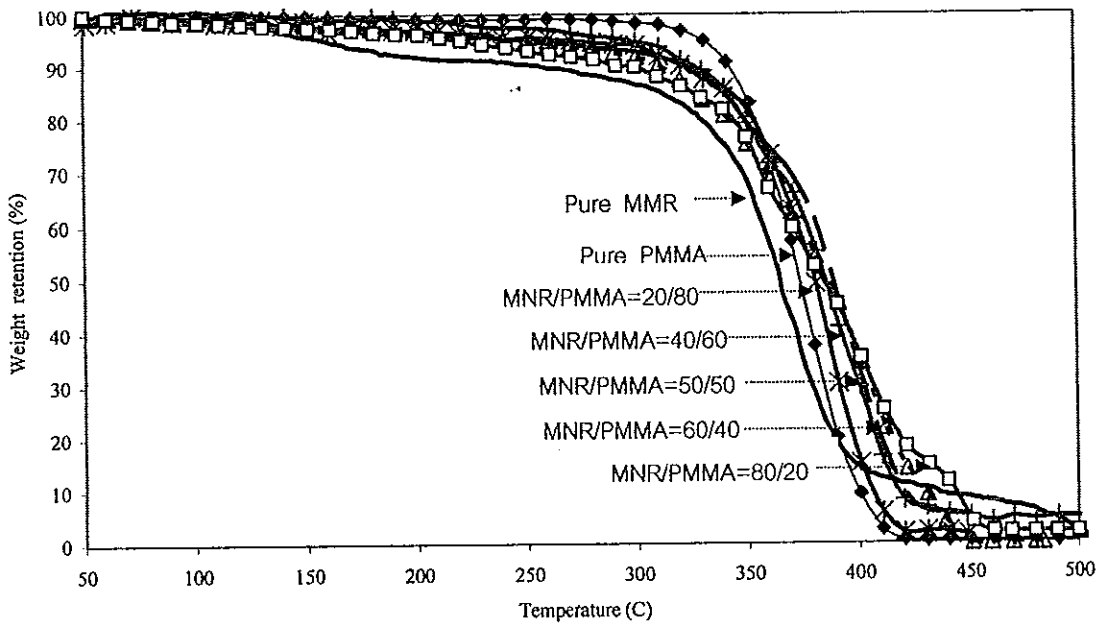
Co-Continuous phase morphology

รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ MNR/PMMA ที่อัตราส่วน 50/50 (Simple blend)

จากรูปที่ 4.24 พบว่าที่อัตราส่วน 50/50 มีลักษณะเป็นสัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วม (Co-continuous phase morphology) กล่าวคือ ทั้งสองเฟสต่างก็เป็นเฟสต่อเนื่องกระจายตัวในกันและกัน ทั้งยางและพลาสติก โครงสร้างแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับเซลล์ฟองน้ำแบบเปิด (open cell foam) ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงจากเฟสต่อเนื่องที่แข็ง (Continuous hard phase) และมีความยืดหยุ่น (Flexibility) จากเฟสต่อเนื่องที่นิ่ม (Continuous soft phase)

#### 4.3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

เมื่อนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่เอ็กซ์ทรูดได้ไปวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่  $10^{\circ}\text{C}$  ต่อนาทีภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ได้ความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่เปลี่ยนไป (ในรูปของร้อยละ) กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนด์ MNR/PMMA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ เปรียบเทียบกับ PMMA และ MNR

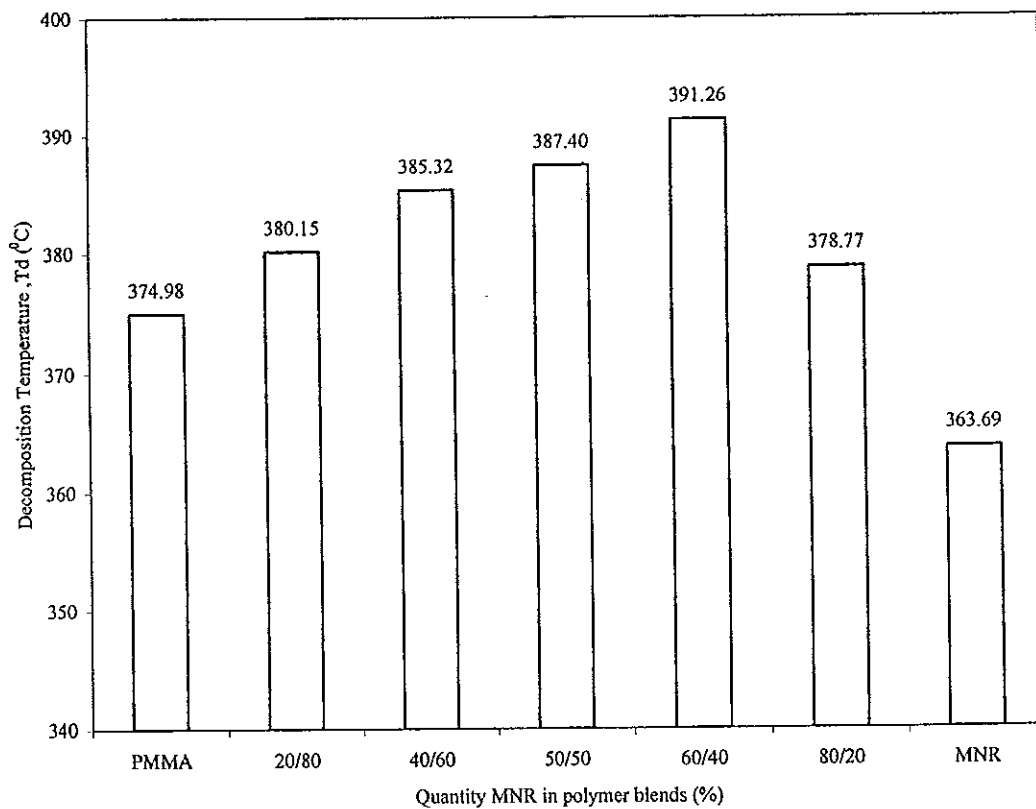
จากรูปที่ 4.25 พบว่าน้ำหนักของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิ โดยน้ำหนักพอลิเมอร์จะมีอัตราการลดลงที่สูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 320 ถึง 420  $^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นไฮโดรคาร์บอนเกิดการสลายตัว ซึ่งหลังจากพอลิเมอร์สลายตัวแล้วจะเหลือเศษซากที่ไม่ถูกสลายตัวด้วยความร้อนทำให้น้ำหนักสุดท้ายไม่เป็นศูนย์

จากเทอร์โมแกรมที่แสดงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่สลายตัวในช่วงสูงที่สุดสามารถวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิสลายตัวของพอลิเมอร์ [decomposition temperature (Td)] ได้ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

ชนิดของพอลิเมอร์	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
MNR	363.69
PMMA	374.98
MNR/PMMA=20/80	380.15
MNR/PMMA=40/60	385.32
MNR/PMMA=50/50	387.40
MNR/PMMA=60/40	391.26
MNR/PMMA=80/20	378.77

จากตารางที่ 4.7 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง MNR ในพอลิเมอร์เบลนด์กับอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติมาลิตในพอลิเมอร์เบลนด์

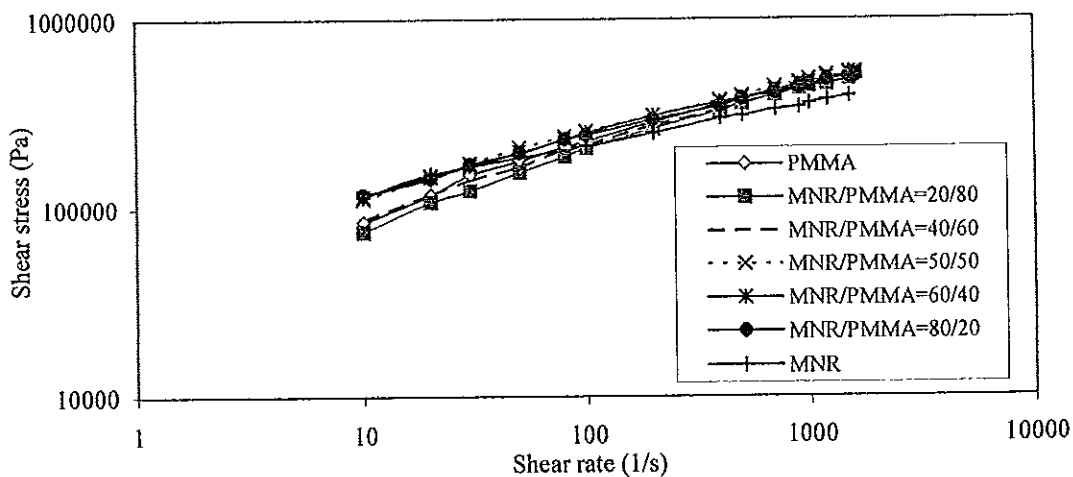
จากตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.26 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีคุณสมบัติการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลทและยางธรรมชาติมาลีเอตที่ใช้ในการเบลนด์ เนื่องจากในขณะเบลนด์ ยางธรรมชาติมาลีเอตซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลจากหมู่ที่มีความเป็นขั้วสูงจะเกิดการยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลทซึ่งมีความเป็นขั้วเหมือนกัน ทำให้คุณสมบัติการสลายตัวสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอตในพอลิเมอร์เบลนด์จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีแนวโน้มการสลายตัวที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและสูงที่สุดที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่มากกว่านี้เป็นแบบเฟสพอลิเมอร์ที่แข็งกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องของยาง ซึ่งสมบัติของยางจะเด่นกว่าคือนิ่มและยืดหยุ่น แต่จะมีความแข็งแรงน้อยเนื่องจากเป็นยางที่ไม่มีการวัลคาไนซ์จึงทำให้คุณสมบัติการสลายตัวมีแนวโน้มต่ำลง

#### 4.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA โดยใช้ MNR ที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติกคอเดอร์

นำยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมจากการใช้มาลีอิกแอนไฮไดรด์ 10 phr มาเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท (PMMA) ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติมาลีเอต/พอลิเมทิลเมทาคริเลท เท่ากับ 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 โดยผสมในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์ พลาสติกคอเดอร์ ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ทดสอบสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

##### 4.3.2.1 สมบัติการไหล

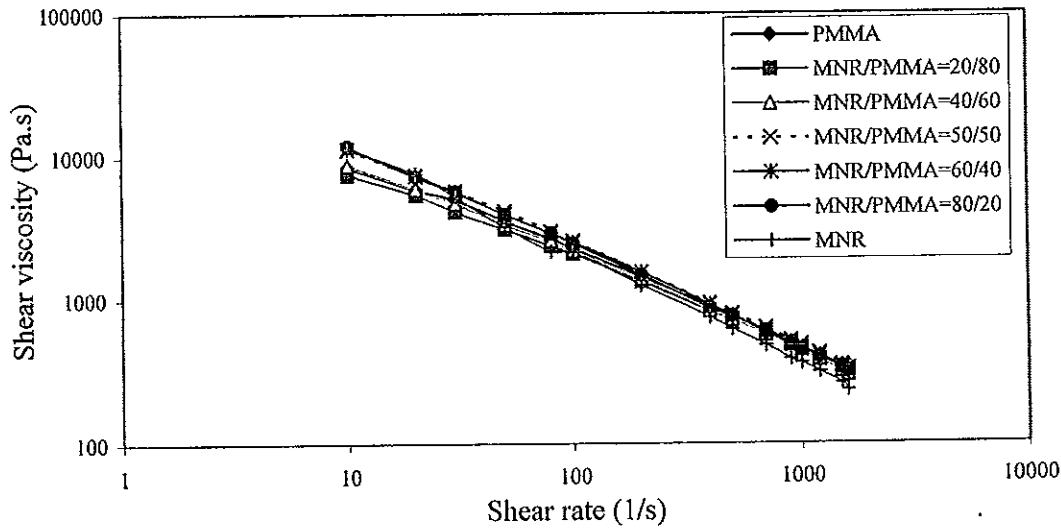
นำตัวอย่างที่ตัดหรือบดเป็นชิ้นละเอียดแล้วด้วยเครื่องบดพลาสติก หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารีที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ

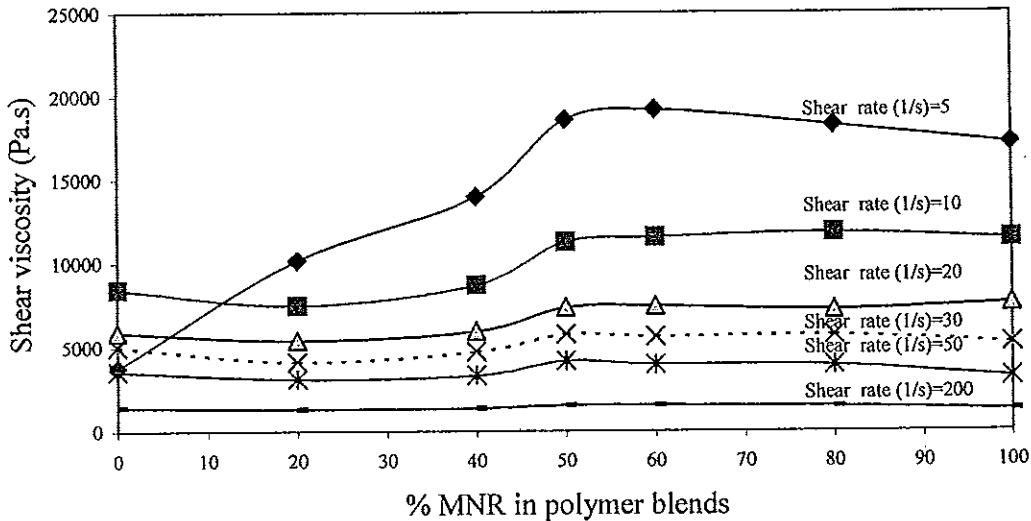


จากรูปที่ 4.27 จะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์หดรูดเพิ่มขึ้น และพบว่าที่อัตราส่วน MNR/PMMA เท่ากับ 50/50 นั้นมีค่าความเค้นเฉือนสูงที่สุด เป็นผลมาจากที่อัตราส่วน 50/50 มีการเชื่อมประสานระหว่างยางธรรมชาติมาลีเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทได้ดีที่สุด ซึ่งพอลิเมอรทั้งสองเกิดแรงยึดเหนี่ยวกัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไหลได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนมีค่าสูง ส่วนค่าความหนืดเฉือน (รูปที่ 4.28) พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นและพบว่าความหนืดเฉือนของการเบลนด์ MNR/PMMA เท่ากับ 50/50 มีค่าสูงที่สุดในทำนองเดียวกับความเค้นเฉือน



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ MNR/PMMA โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ

เมื่อนำค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนต่างๆ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับระหว่างปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอตในพอลิเมอรเบลนด์กับค่าความหนืดเฉือนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนกับปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอตในพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราเฉือนคงที่ต่างๆ

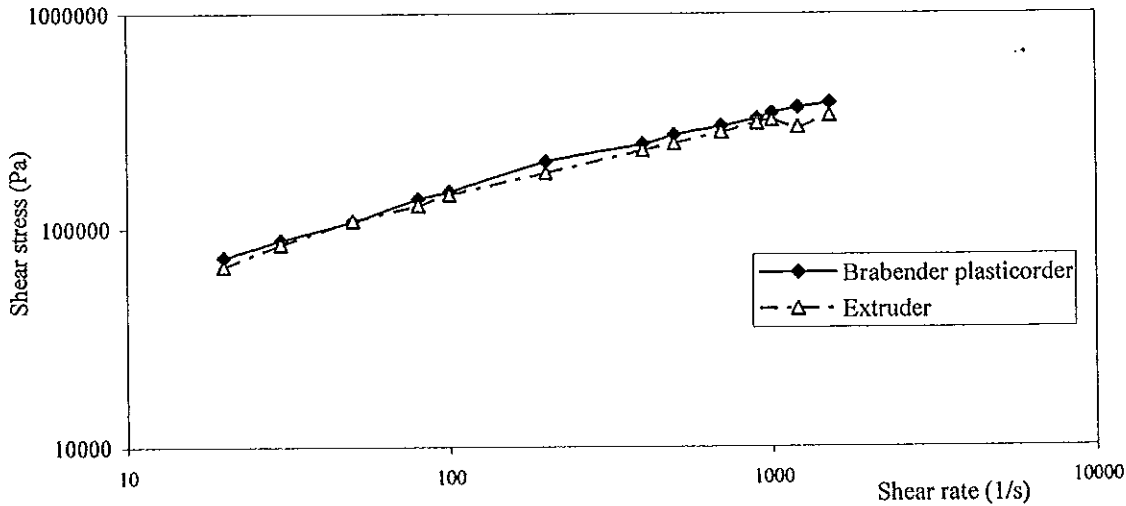
จากรูปที่ 4.29 เมื่อพิจารณาค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนเดียวกัน พบว่าการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอตในช่วง 0-50 % ทำให้ค่าความหนืดเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MNR แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ MNR ในพอลิเมอร์เบลนด์สูงกว่านี้จะทำให้แนวโน้มค่าความหนืดเฉือนลดลง แสดงว่าระดับอันตรกิริยาระหว่างเฟสของยางธรรมชาติมาลีเอตกับ PMMA จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MNR จนถึงจุดวิกฤตค่าหนึ่ง (ในที่นี้คือที่อัตราส่วน 50/50 เป็นส่วนใหญ่ รองลงมาคือ 60/40 ที่บางอัตราเฉือน) และหลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณ MNR จะทำให้ระดับอันตรกิริยาลดลง เนื่องจากการที่มีปริมาณ MNR ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการเบลนด์ในลักษณะนี้สามารถอธิบายได้ด้วย Log additive rule (Kundu *et al.*, 1997) ดังสมการ (4.3) ในข้อ 4.3.1.1 กล่าวคือพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มเชิงบวก (Positive deviation blend, PDB) ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ แสดงว่ายางธรรมชาติมาลีเอตและ PMMA มีความเข้ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วน 50/50 และ 60/40 มีค่าความหนืดเฉือนสูงที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้พอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ดี ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไหลได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้มีความหนืดสูง

#### 4.4 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์

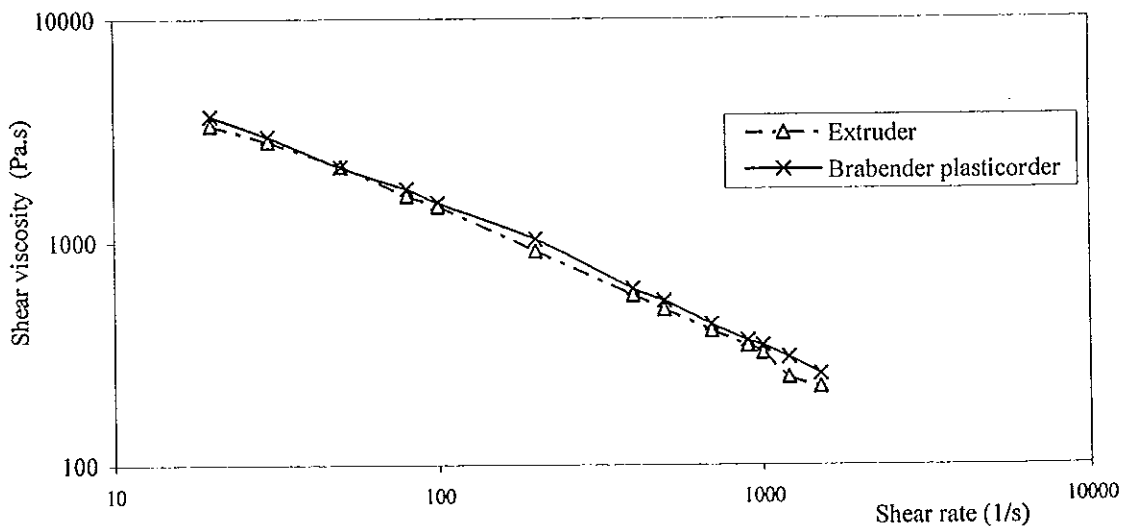
##### 4.4.1 เปรียบเทียบสมบัติของ TPVs จากการเตรียมด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดกับบราเวนเดอร์พลาสติกค็อคเคอร์

ทดลองเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์เซชันแบบไดนามิกส์โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว กับเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์

พลาสติกคอร์เดอร์ ใช้การวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติเนื่องจากให้ TPVs ที่สมบัติเชิงกลดี โดยใช้สารเคมีตามรายละเอียดในตารางที่ 3.5 มาทำการเตรียม TPVs แล้วเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ เช่น ความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือน ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง และสัณฐานวิทยา ได้ผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนแสดงดังในรูปที่ 4.30 และความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนแสดงดังในรูปที่ 4.31

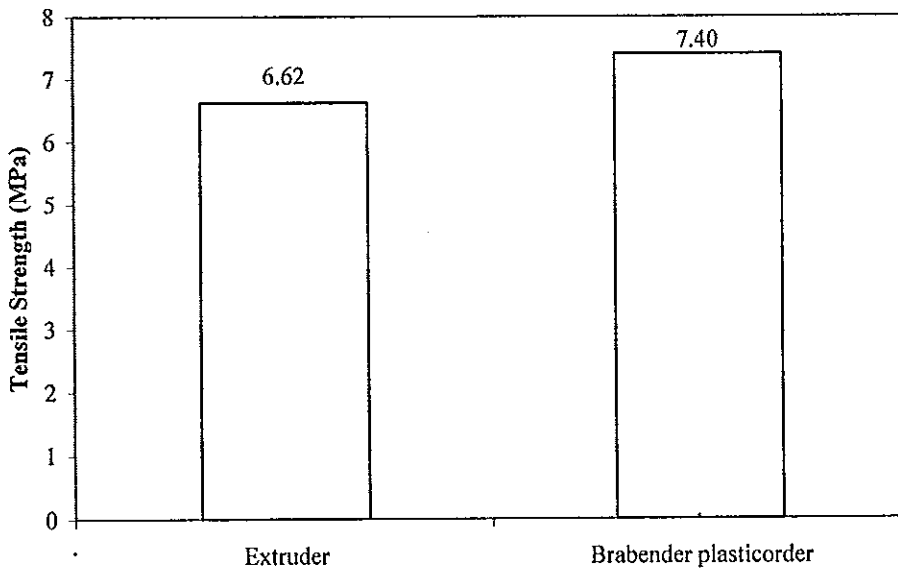


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบกำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA= 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดและเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์

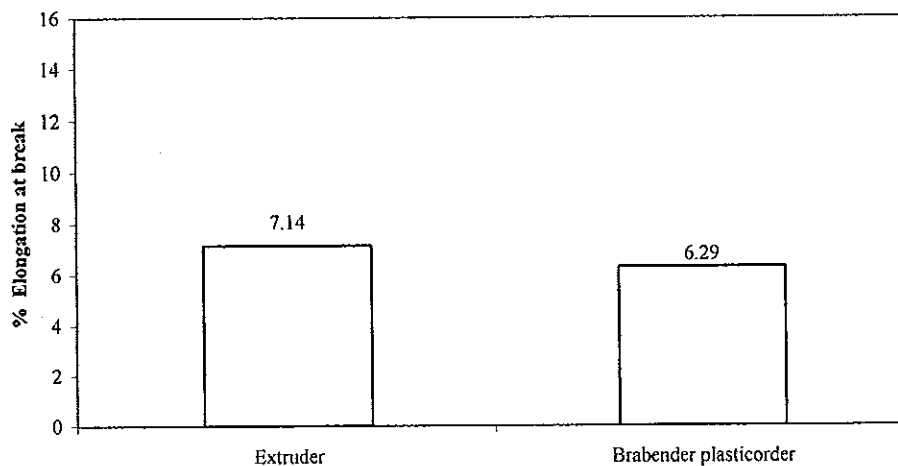


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบกำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA= 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดและเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 พบว่าค่าความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนของ TPVs ที่เตรียมจากทั้งสองเทคนิคมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้จากทั้งสองวิธีไปฉีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบดัมเบลล์ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 412 ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 200°C จากนั้นนำไปทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดด้วยเครื่อง Tensometer ที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33



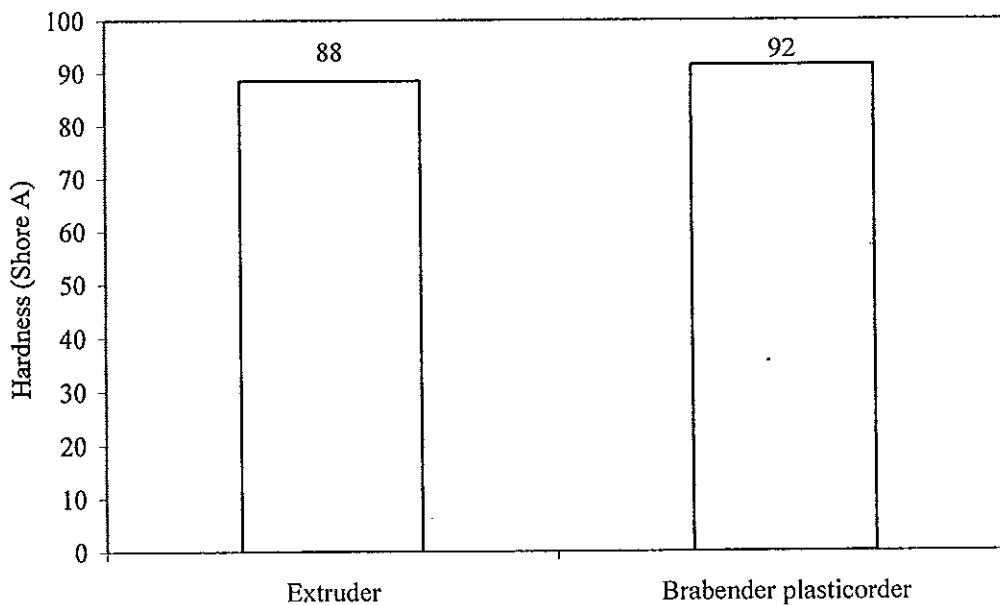
รูปที่ 4.32 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบก้ำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA= 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทูดและเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์



รูปที่ 4.33 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบก้ำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทูดและเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์

จากรูปที่ 4.32 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบก้ำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA= 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการเอ็กซ์ทรูดถูกแรงเฉือนกระทำในระดับที่สูงกว่า จึงอาจทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกตัดขาดมากกว่า ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้มีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์ ส่วนความสามารถในการยึดในรูปที่ 4.33 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทดสอบค่าความแข็งแบบ Shore A ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ระบบก้ำมะถันปกติที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดและเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์

เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์พบว่าได้ค่าความแข็งต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องบราเวนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเสียดของโมเลกุลสูงกว่า

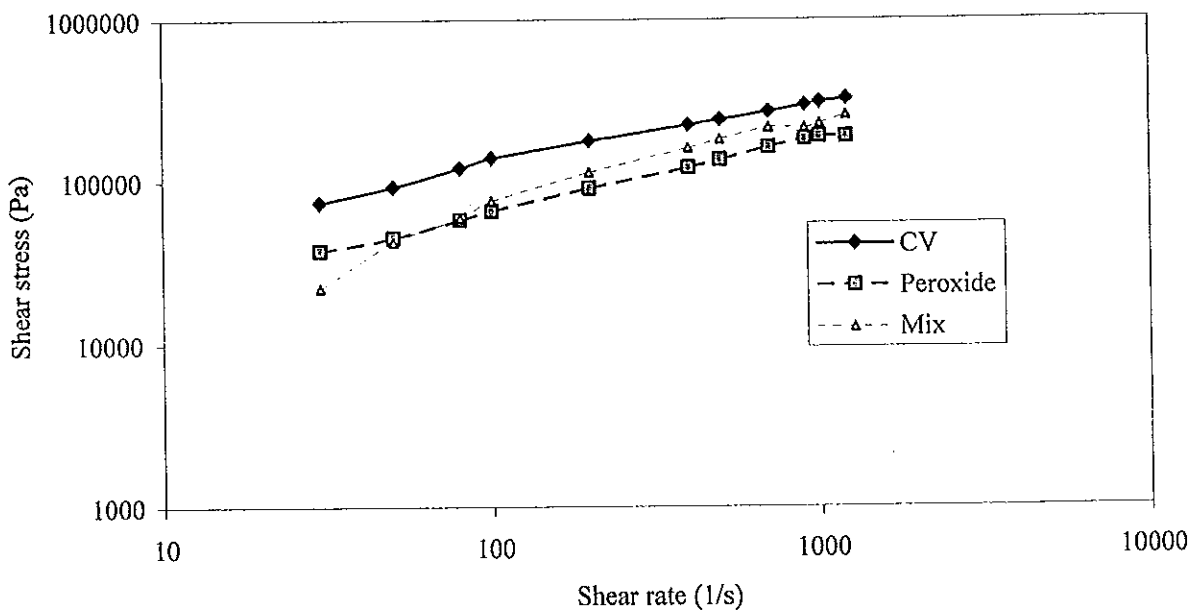
ดังนั้นจากการทดลองต่างๆ ข้างต้นพอสรุปได้ว่าควรใช้เครื่องมือแบบบราเวนเดอร์ พลาสติกคอร์เดอร์ ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในการทดลองต่อไป

#### 4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

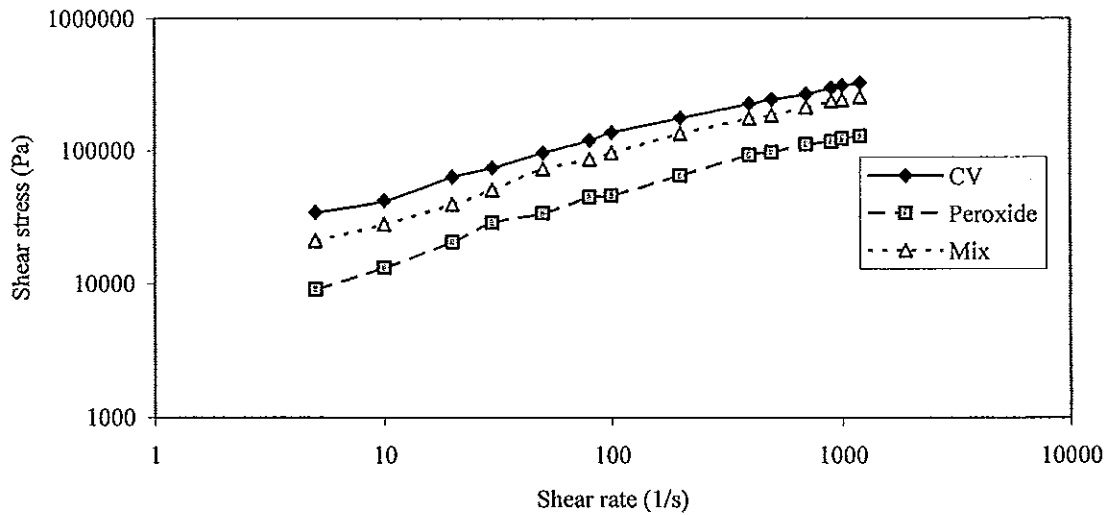
ทำการทดลองโดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ การวัลคาไนซ์แบบใช้ระบบกำมะถันปกติ ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม ทำการทดลองตามสูตรในตารางที่ 3.7 และขั้นตอนการผสมดังตารางที่ 3.8 จากนั้นบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ ในอัตราส่วน 40/60, 50/50 และ 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที

##### 4.4.2.1 สมบัติทางรีโอโลยี

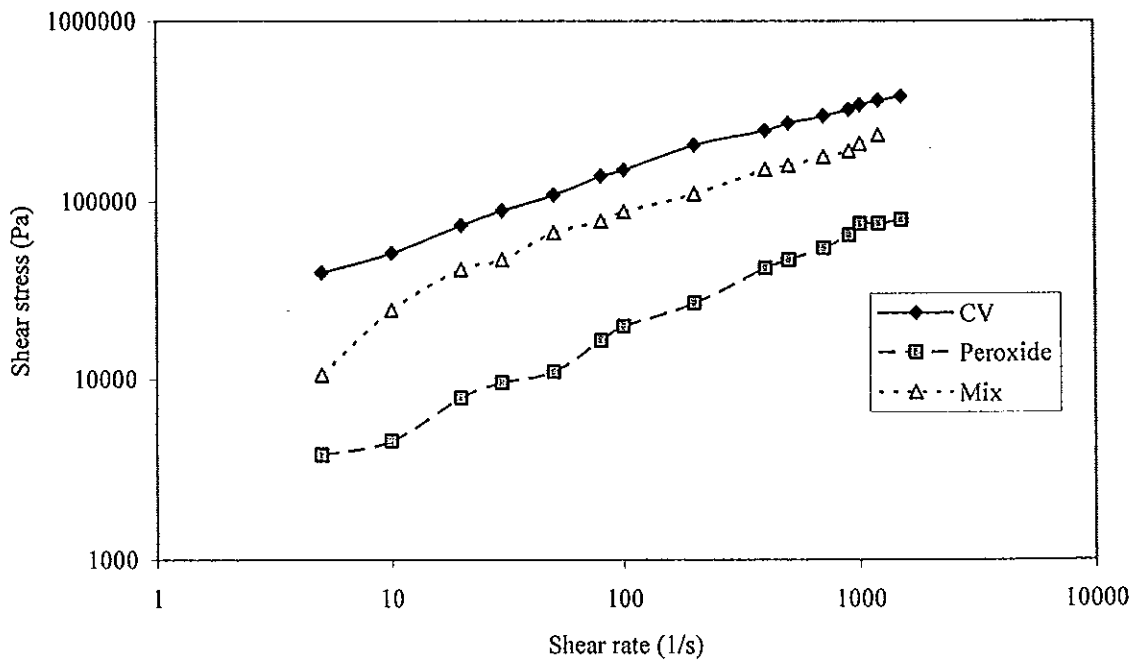
นำเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้จากการบดผสมยางคอมปาวด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทตามสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 3.7 และลำดับการผสมในตารางที่ 3.8 ในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ โดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 40/60, 50/50 และ 60/40 โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ระบบต่างๆ หลังจากนั้นตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก แล้วทดสอบสมบัติทางรีโอโลยี ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของ TPVs ที่เตรียมจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสมระหว่างกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วน MNR/PMMA = 40/60, 50/50 และ 60/40 แสดงดังในรูปที่ 4.35 – 4.37 ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 40/60 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 50/50 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

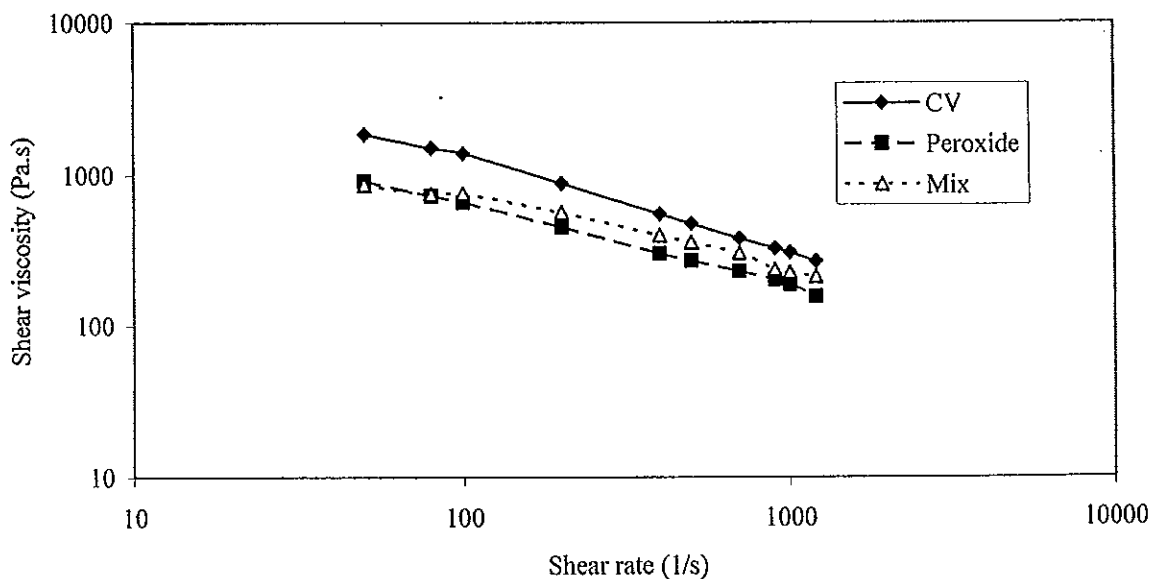


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 60/40 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.35 - 4.37 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์ทุกระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าที่ทุกอัตราส่วน

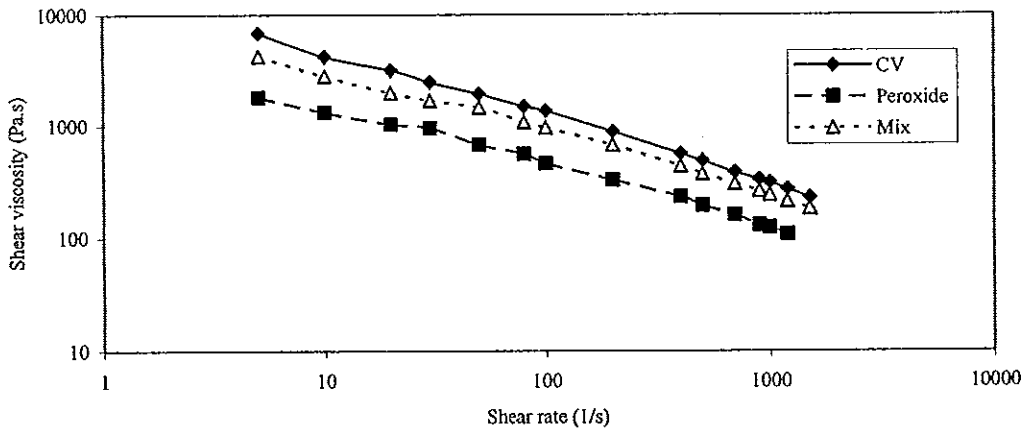
การเบลนด์ของ MNR/PMMA การใช้ระบบกำมะถันปกติในการวัลคาไนเซชันเฟสยางธรรมชาติมาลิเอต ให้ค่าความเค้นเฉือนที่สูงกว่าระบบผสมและระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งค่าความเค้นเฉือนที่สูงนี้เป็นผลมาจากการเชื่อมประสานระหว่างยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทได้ดีที่สุด ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองเกิดแรงยึดเหนี่ยวกัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไหลได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนมีค่าสูง นอกจากนี้ยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปริมาณปกติให้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด รองลงมาคือ ระบบผสม และเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากระบบกำมะถันเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ซึ่งส่วนใหญ่จะมีกำมะถันอยู่หนึ่งหรือสอง (Monosulphidic และ Disulphidic crosslink) ะตอมหรือมากกว่า (polysulphidic crosslink) ซึ่งเป็นพันธะเชื่อมโยงที่ยาวกว่าพันธะ C-C ของระบบเปอร์ออกไซด์จึงสามารถจัดเรียงตัวให้มีผลึกในโครงสร้างได้ (semi-crystalline) ทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า ดังนั้นความเค้นเฉือนจึงสูงกว่าการใช้ระบบเปอร์ออกไซด์

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของ TPVs ที่เตรียมจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสมระหว่างกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ แสดงดังในรูปที่ 4.38 – 4.40

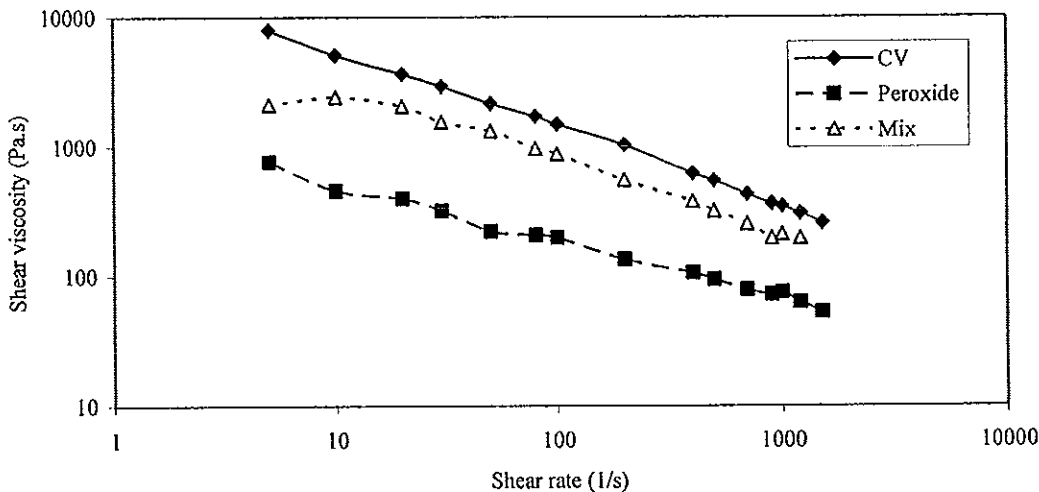


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 40/60 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนเซชันแบบต่างๆ





รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 50/50 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ



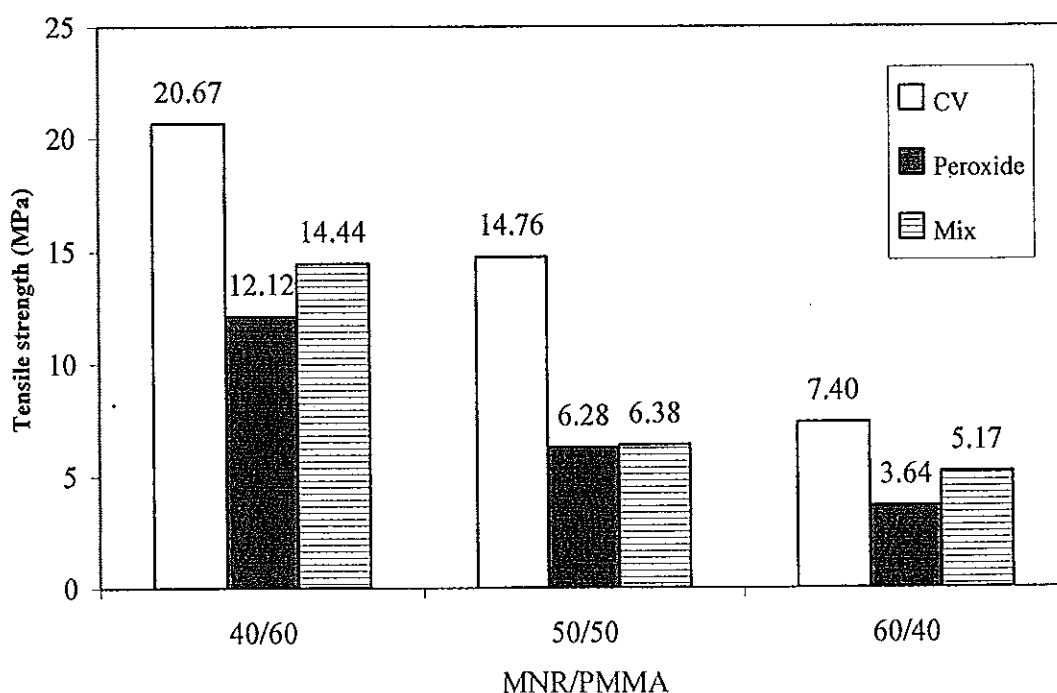
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน MNR/PMMA = 60/40 เปรียบเทียบการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

ส่วนค่าความหนืดเฉือน (รูปที่ 4.38-4.40) พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น และพบว่าที่ทุกอัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA ด้วยระบบกำมะถันปกติให้ค่าความหนืดเฉือนที่สูงกว่าระบบผสมและระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งค่าความหนืดเฉือนที่สูงนี้เป็นผลมาจากการเชื่อมประสานระหว่างยางธรรมชาติมาลีเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทได้ดี ส่งผลให้ค่าความหนืดเฉือนมีค่าสูงสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับความเค้นเฉือน กล่าวคือระบบกำมะถันเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ซึ่งส่วนใหญ่จะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม (polysulphidic crosslink) ซึ่งเป็นพันธะเชื่อมโยงที่ยาวกว่าพันธะ C-C ของระบบเปอร์ออกไซด์จึงสามารถจัดเรียงตัวให้มีผลึกในโครงสร้างได้ (semi-crystalline) ทำ

ให้ไหลยากกว่าและมีสมบัติด้านความเหนียวที่สูงกว่าการใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ในการวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลีเอต

#### 4.4.2.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

นำพอลิเมอร์ที่เตรียมได้โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ คือ การวัลคาไนซ์เรซินโดยใช้ระบบกำมะถันปกติ ระบบเปอร์ออกไซด์ และระบบผสม โดยใช้อัตราส่วนการเบลนด์ของคอมพาวด์ยางธรรมชาติมาลีเอตและพอลิเมทิลเมทาคริเลทเป็น 40/60, 50/50 และ 60/40 มาทำการทดลองตามสูตรในตารางที่ 3.7 และขั้นตอนการผสมดังตารางที่ 3.8 แล้วฉีดเข้าเบ้า จากนั้นทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.41

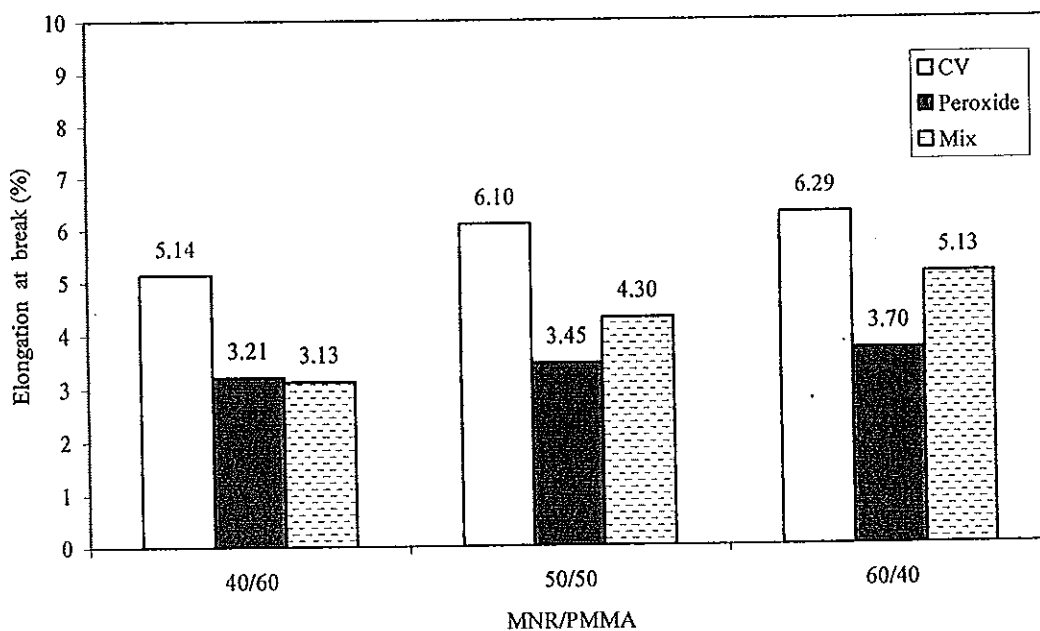


รูปที่ 4.41 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.41 พบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ 40/60 ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทุกระบบ มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าที่อัตราส่วน 50/50 และ 60/40 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลทเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูง (68-75 MPa) (Dominighaus, 1993) ดังนั้นที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลทสูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจากมีพอลิเมทิลเมทาคริเลทช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ระบบ พบว่าการวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติ จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือระบบผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ เนื่องจากระบบกำมะถันเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ซึ่งส่วนใหญ่จะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม (polysulphidic crosslink) ซึ่งเป็นพันธะเชื่อมโยงที่ยาวกว่าพันธะ C-C ของระบบเปอร์ออกไซด์จึงสามารถจัดเรียงตัวให้มีผลึกในโครงสร้างได้เมื่อดึง ดังนั้นจึงช่วยเสริมแรงให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า ดังนั้นความต้านทานต่อแรงดึงจึงสูงกว่าการใช้ระบบเปอร์ออกไซด์

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 40/60 50/50 และ 60/40 ตามสูตรต่าง ๆ ข้างต้น ทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการยืด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.42 พบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ 40/60 ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทุกระบบ มีค่าความสามารถในการยืดต่ำกว่าที่อัตราส่วน 50/50 และ 60/40 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากพอลิเมทิลเมทาคริเลทเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเปราะ นั่นคือมีความสามารถในการยืดน้อยมาก ประมาณ 4% (ชัยวัฒน์, 2526) ดังนั้นที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่ใช้พอลิเมทาคริเลทมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการยืดต่ำลง

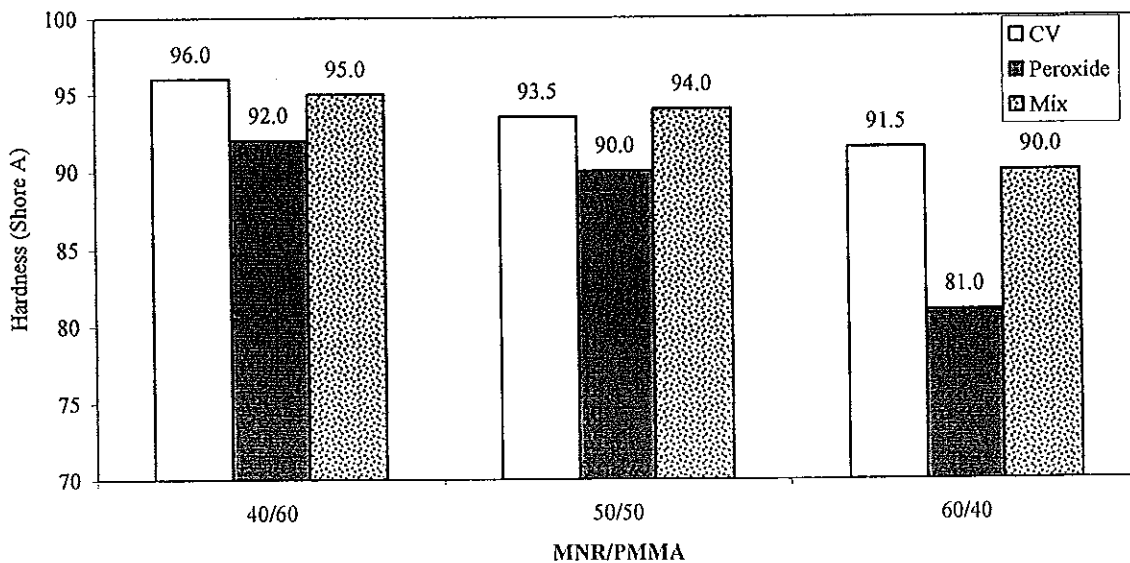
เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ระบบ พบว่าการวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติ จะมีค่าความสามารถในการยืดสูงที่สุด รองลงมาคือระบบ

ผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ของยางธรรมชาติมาลิเลตที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบปกติจะสามารถทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติเกิดเป็นสายยาวได้มากกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้โอกาสการหมุนของพันธะในสายโซ่ที่มีพันธะ C-S<sub>x</sub>-C ยังมากกว่าสายโซ่ของระบบเปอร์ออกไซด์ที่เป็นพันธะ C-C ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการยืดของระบบกำมะถันดีกว่า

นอกจากนี้การที่ค่าความสามารถในการยืดตัวของระบบเปอร์ออกไซด์มีค่าน้อยกว่าระบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์นั้นนอกจากจะทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงแล้วยังสามารถแตกตัวจะทำให้มีปริมาณของอนุมูลอิสระที่ไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงเหลืออยู่ในระบบ จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ที่ได้สั้นลง ส่งผลให้ค่าความสามารถในการยืดมีค่าน้อยกว่าระบบอื่นๆ

#### 4.4.2.3 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ตามสูตรต่าง ๆ เบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทที่อัตราส่วน 40/60 50/50 และ 60/40 แล้วทดสอบความแข็งโดยใช้เทคนิคแบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240-97 (2000) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ความแข็ง (shore A) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.43 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทุกสูตรมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริลเลทที่ใช้ในการเบลนด์ เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริลเลทเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งสูง

นอกจากนี้สภาพผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลทยังมีส่วนไปช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลทจะทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรง

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งแรงแบบ Shore A ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบปกติมีค่าสูงกว่าที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบผสมและระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งสมบัติด้านความแข็งแรงในกรณีนี้จะขึ้นกับธรรมชาติของพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์และปริมาณความเข้มข้น ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันซึ่งมีปริมาณการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลยางสูงที่สุดจะให้ค่าความแข็งแรงมากที่สุด

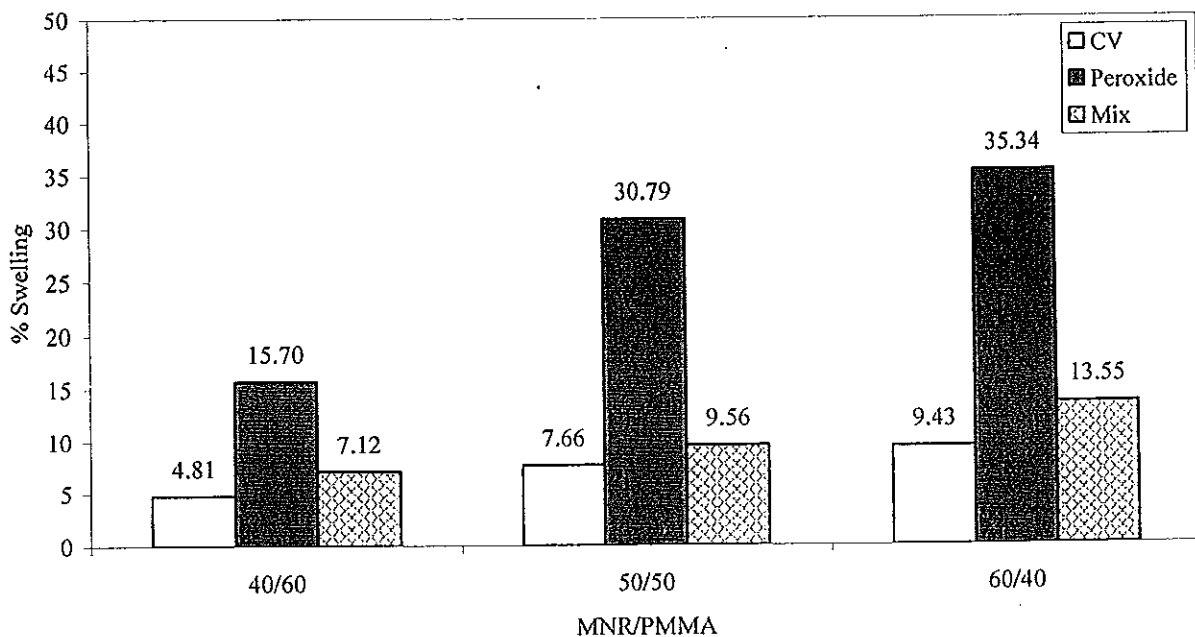
#### 4.4.2.4 ความต้านทานต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

ทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลิเอตที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ คือ 60/40, 50/50 และ 40/60 โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471-98 (2000) ได้ผลการทดลองดังนี้

##### (1) ความต้านทานต่อน้ำมันดีเซล

ผลการทดสอบความต้านทานต่อน้ำมันดีเซลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ระบบต่างๆ แสดงดัง

รูปที่ 4.44



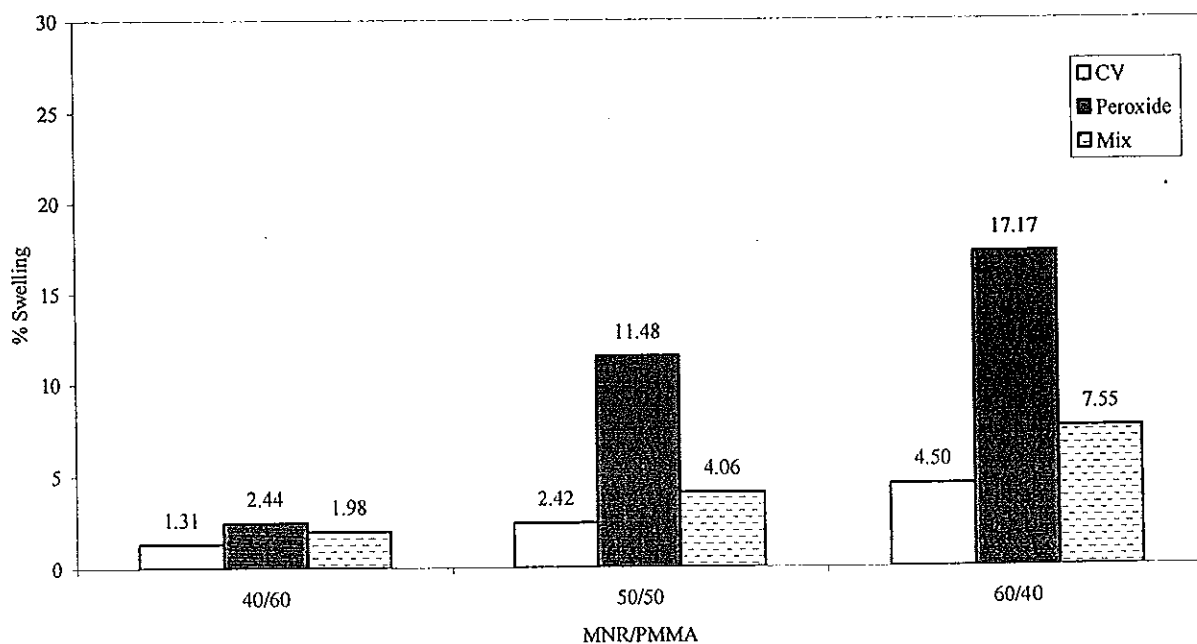
รูปที่ 4.44 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันดีเซลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ ด้วยอัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA เป็น 40/60, 50/50 และ 60/40

จากรูปที่ 4.44 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลท ทำให้เปอร์เซ็นต์การบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลของสภาพผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลท กล่าวคือพอลิเมอร์ที่มีสภาพผิวจะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีสภาพผิว เช่น น้ำมันดีเซล จึงทำให้มีการบวมพองลดลงตามการเพิ่มปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลท

เมื่อทดลองเปรียบเทียบระบบการวัลคาไนซ์พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถัน มีร้อยละการบวมพองในน้ำมันดีเซลน้อยที่สุด รองลงมาคือระบบผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของระบบกำมะถันมีมากกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันสามารถทนทานต่อน้ำมันดีเซลได้ดีกว่าระบบอื่น

## (2) ความต้านทานต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ

ผลการทดสอบความต้านทานต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ระบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.45



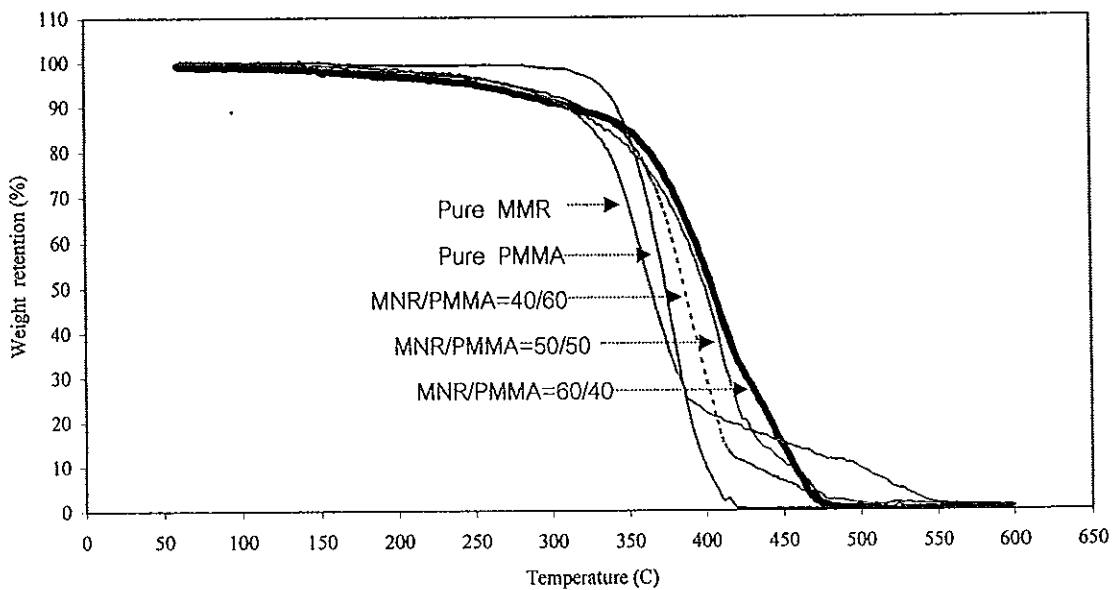
รูปที่ 4.45 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ ด้วยอัตราส่วนการเบลนด์ MNR/PMMA เป็น 40/60, 50/50 และ 60/40

จากรูปที่ 4.45 พบว่าการบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะให้ผลในทำนองเดียวกับการทดสอบในน้ำมันดีเซล กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลท ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้

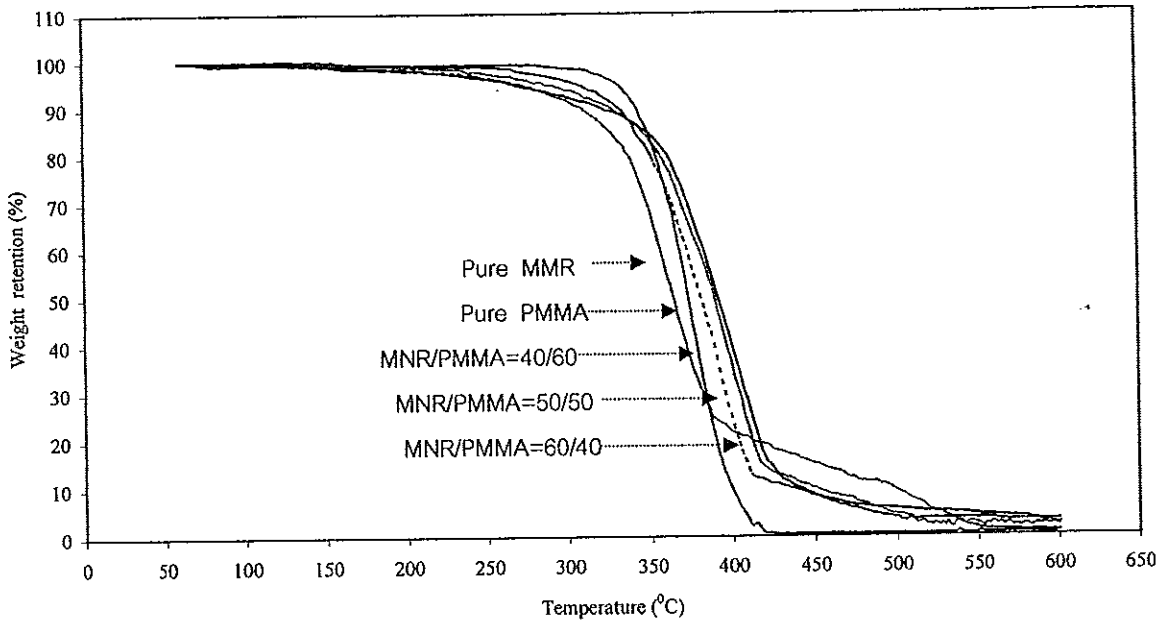
เหตุผลในทำนองเดียวกันกับการทดสอบในน้ำมันดีเซลในรูปที่ 4.44 นอกจากนี้เมื่อทดลองเปรียบเทียบระบบการวัลคาไนซ์พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลีเอตด้วยกำมะถันระบบปกติ มีร้อยละการบวมพองในน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะน้อยที่สุด รองลงมาคือระบบผสมและระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทนทานต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะมากกว่าน้ำมันดีเซล

#### 4.4.2.5 สมบัติเชิงความร้อน

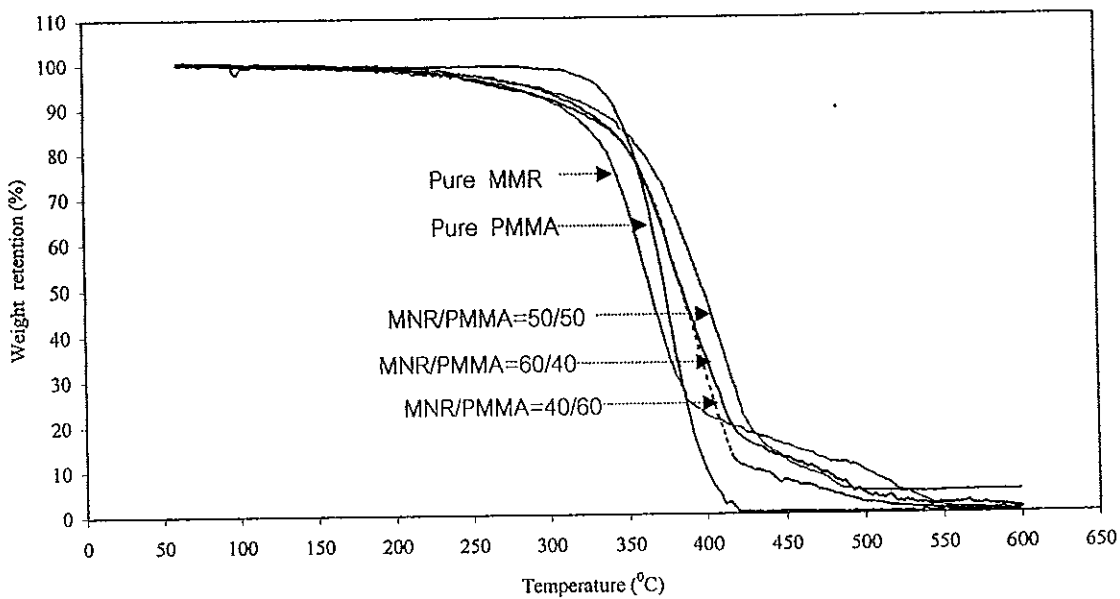
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลีเอตและพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ คือ 40/60, 50/50 และ 60/40 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) การทดสอบกระทำภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  ลักษณะเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ แบบกำมะถัน และแบบผสม ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.46 – 4.48



รูปที่ 4.46 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4.47 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบก้ำมะถัน

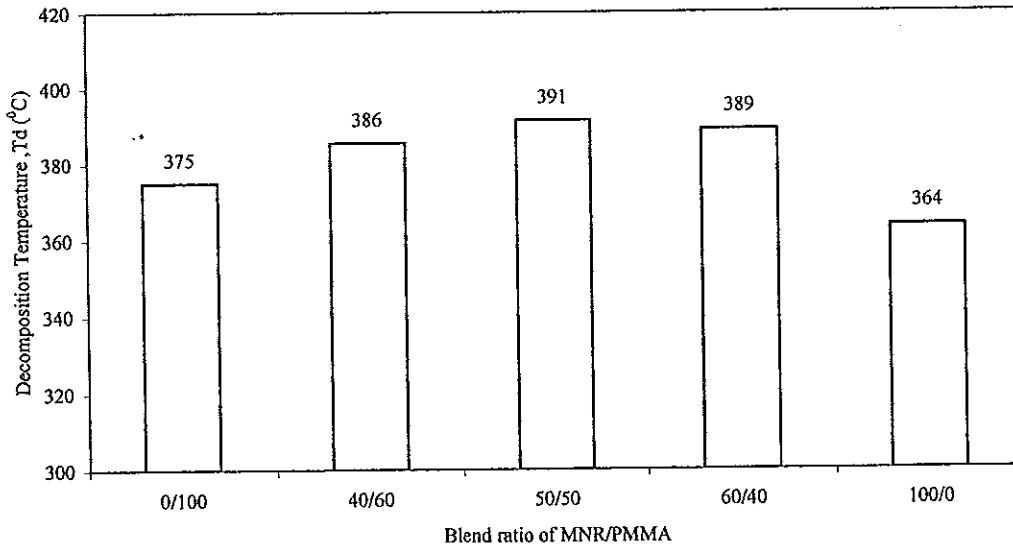


รูปที่ 4.48 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบผสม

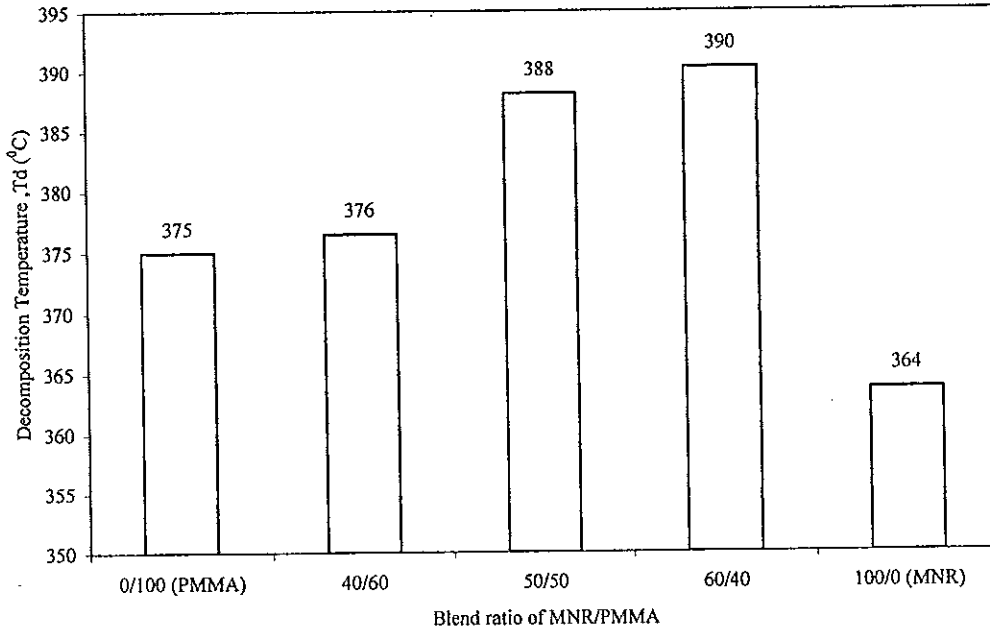
จากรูปที่ 4.46 – 4.48 พบว่าน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกอัตราส่วนการเบลนดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการสลายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ทุกอัตราส่วนการเบลนดมีอัตราการลดลงของน้ำหนักสูงที่สุดอยู่ในช่วง 300-420



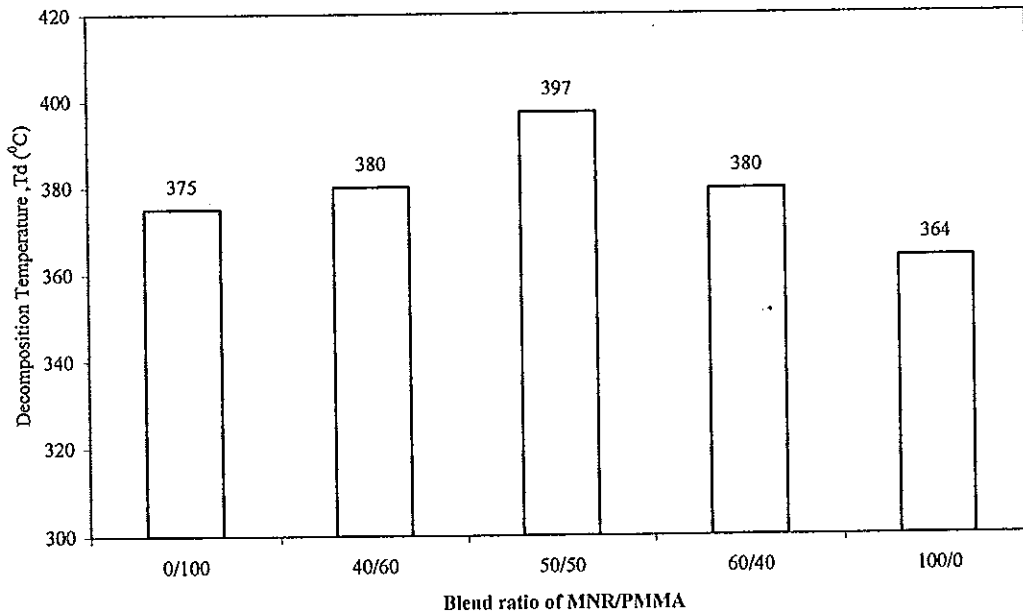
°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของสารไฮโดรคาร์บอนสามารถคำนวณอุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสูงที่สุดเป็นอุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature,  $T_d$ ) ของพอลิเมอร์เบลนด์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.49 - 4.51 ตามลำดับ



รูปที่ 4.49 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.50 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.51 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์แบบผสมระหว่างกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.49 - 4.51 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าพอลิเมอร์เริ่มต้นคือพอลิเมทิลเมทาคริเลทและยางธรรมชาติมาลีเอต ทั้งนี้เนื่องจากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลีเอตและพอลิเมทิลเมทาคริเลทซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว ทำให้เกิดอันตรกิริยาเคมีและพันธะเคมีระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันสูงมากขึ้นจึงส่งผลให้มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงเพิ่มขึ้น

#### 4.4.2.6 ความสามารถในการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

##### (1) ความสามารถในการแปรรูปด้วยการอัดเบ้า

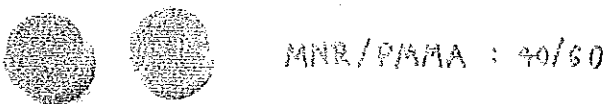
นำเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ได้จากการบดผสมยางคอมปาวด์ตามสูตรต่างๆ กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่อัตราส่วน 40/60 50/50 และ 60/40 ไปตัดหรืออบตัวอย่างเป็นชิ้นละเย็ดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในการแปรรูปด้วยการอัดเบ้าขึ้นทดสอบ Compression Set ที่อุณหภูมิ 200°C ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.52-4.54



รูปที่ 4.52 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบเปอร์ออกไซด์  
(สูตรที่ 1)



รูปที่ 4.53 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติ  
(สูตรที่ 2)

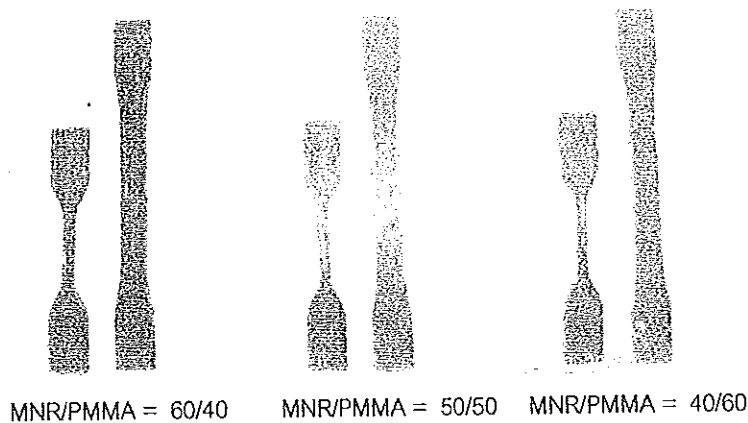


รูปที่ 4.54 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบผสม  
(สูตรที่ 3)

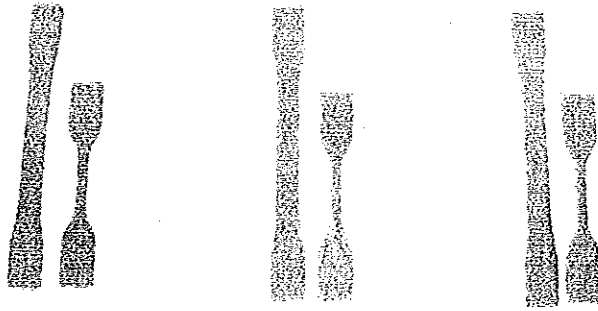
จากรูปที่ 4.52-4.54 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ สูตรที่ 2 ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันปริมาณปกติสามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ผิวที่เรียบที่สุด รองลงมาคือระบบผสมและระบบเปอร์ออกไซด์ตามลำดับ แสดงว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ไม่เหมาะที่จะแปรรูปด้วยวิธีการนี้ เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานในสูตรเดียวกันพบว่าที่อัตราส่วน MNR/PMMA เท่ากับ 60/40 สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ผิวที่เรียบที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วน 50/50 และ 40/60 ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณของยางมาก

## (2) ความสามารถในการแปรรูปด้วยการฉีดเข้าเบ้า

นำเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้จากการบดผสมยางคอมปาวด์ตามสูตรต่างๆ กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดปราบนเดอร์พลาสติกคอร์เคอร์ที่อัตราส่วน 40/60, 50/50 และ 60/40 ไปตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในการแปรรูปด้วยการฉีดเข้าเบ้าขึ้นทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.55-4.57

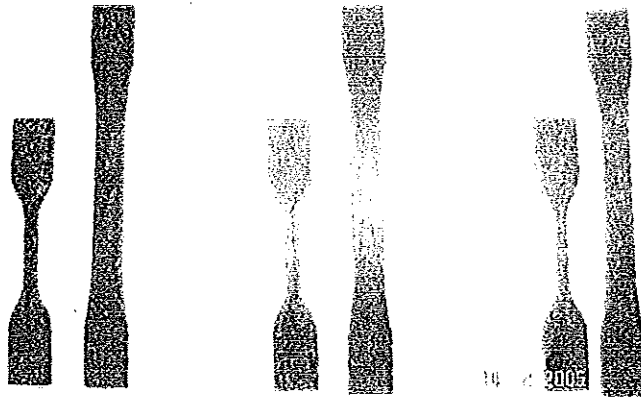


รูปที่ 4.55 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ (สูตรที่ 1)



MNR/PMMA = 60/40      MNR/PMMA = 50/50      MNR/PMMA = 40/60

รูปที่ 4.56 เทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตซึ่งโพลีคาร์บอเนตของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติ (สูตรที่ 2)



MNR/PMMA = 60/40      MNR/PMMA = 50/50      MNR/PMMA = 40/60

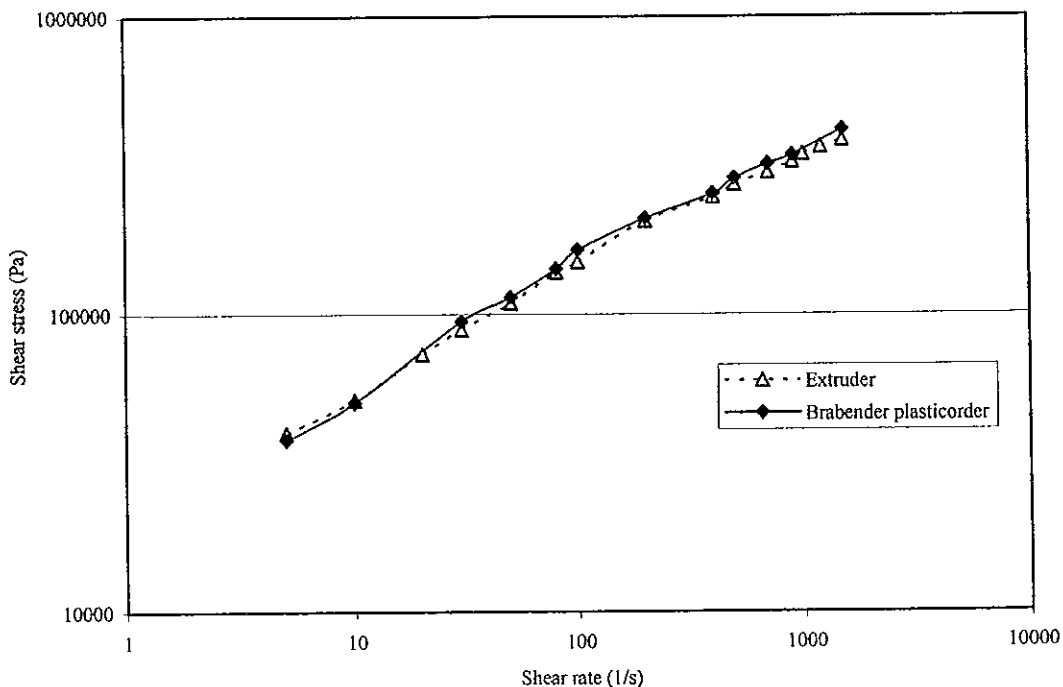
รูปที่ 4.57 เทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตซึ่งโพลีคาร์บอเนตของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบผสม (สูตรที่ 3)

จากรูปที่ 4.55-4.57 พบว่าเทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตทุกสูตรสามารถขึ้นรูปได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบ เช่นเดียวกัน แสดงว่าเทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตทุกสูตรสามารถแปรรูปได้ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก เข้าเป้า

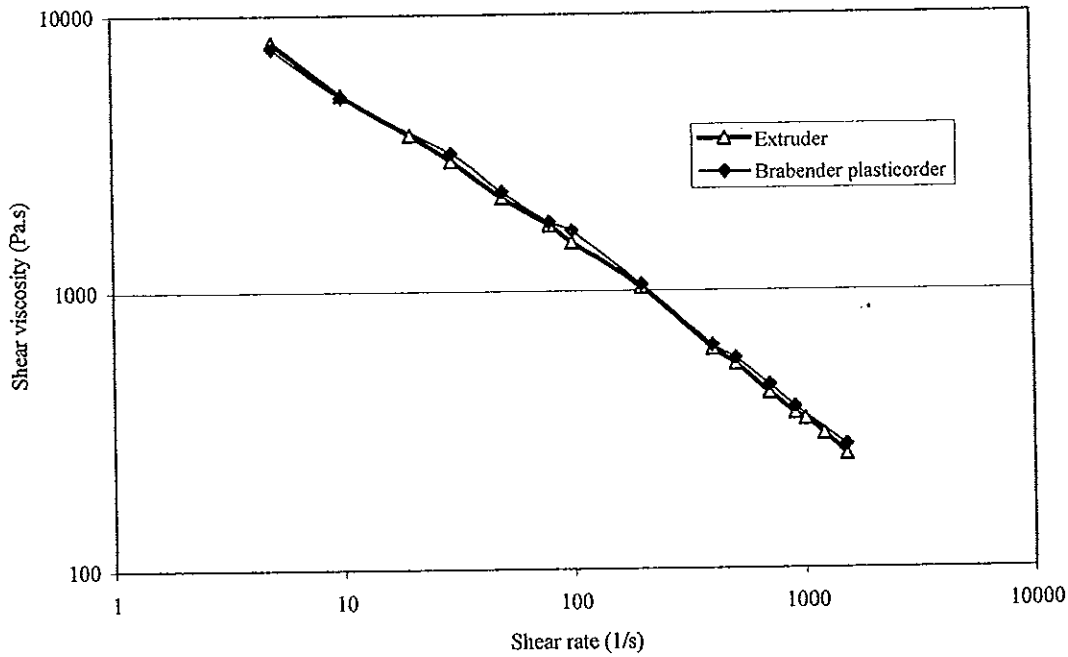
#### 4.4.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด้วยธรรมชาติมาลีเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยใช้สารช่วยในการแปรรูปชนิดต่าง ๆ

##### 4.4.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นำยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอเดอร์คอมปาวด์ตามตารางที่ 3.5 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้สารช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้นคือ Deoflow S แล้วบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเนนเดอร์พลาสติกคอเดอร์ ในอัตราส่วน 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที จากนั้นตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก นำไปทดสอบรีโอโลยี แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ็กซทูด ได้ความเค้นเฉือนดังรูปที่ 4.58 และความหนืดเฉือนดังรูปที่ 4.59



รูปที่ 4.58 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)



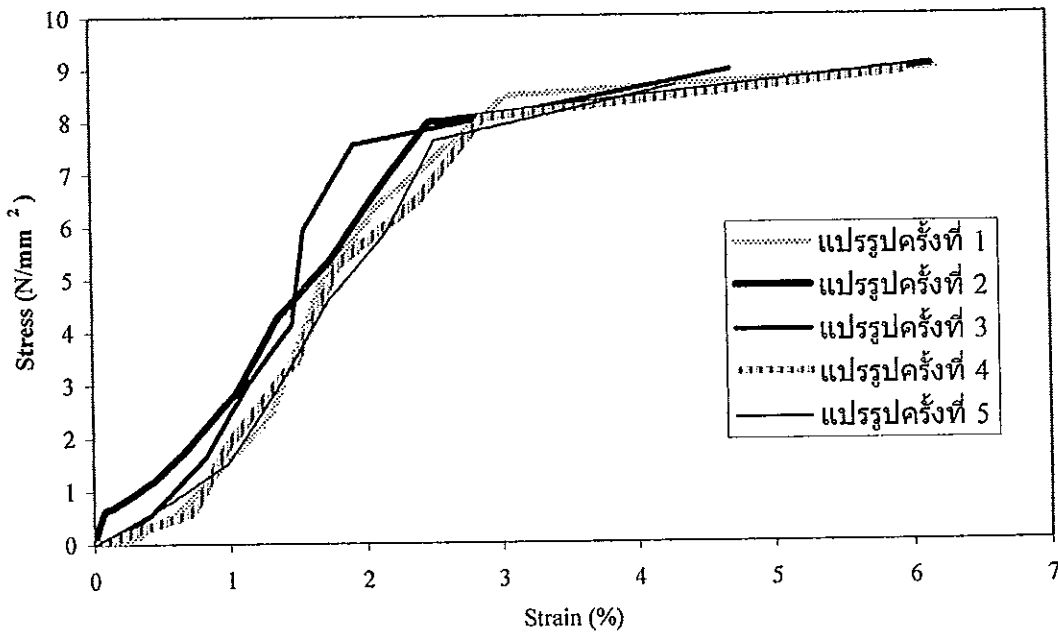
รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบความหนืดเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

จากรูปที่ 4.58 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนืดเฉือน (รูปที่ 4.59) พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มีสมบัติการไหลเป็นแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) นั่นคือมีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน หรืออาจเรียกการไหลแบบนี้ว่าเป็นพฤติกรรมแบบลดความหนืด

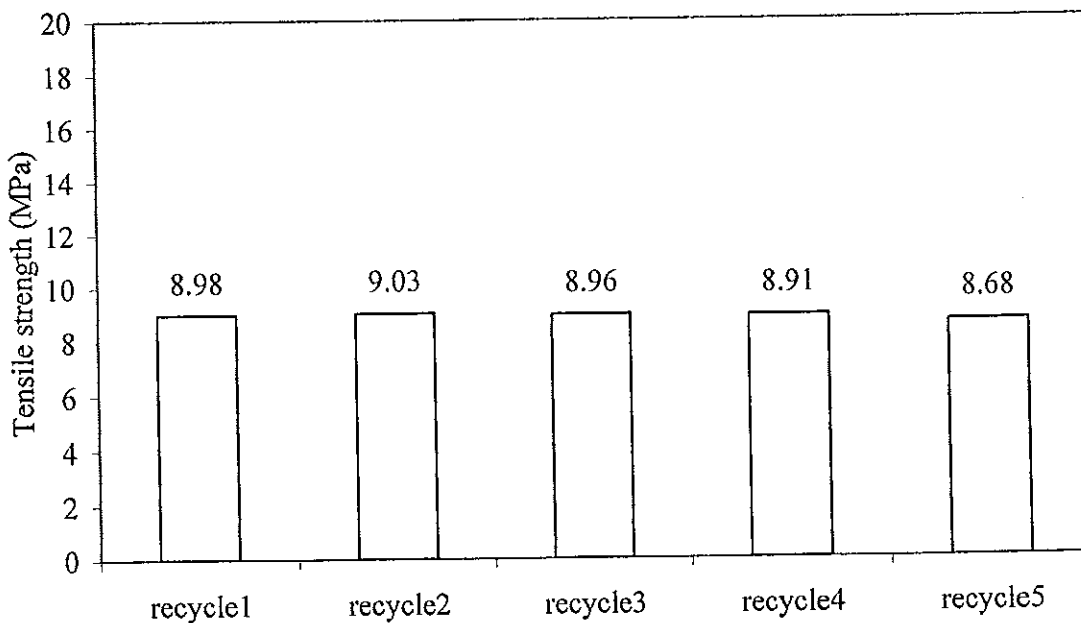
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์และเครื่องเอ็กซ์ทูด พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ให้ค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทูดเพียงเล็กน้อย อาจเป็นผลเนื่องจากยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์มีการเกาะติดของมาลิคิกแอนไฮโดรด์ที่มากกว่ายางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทูด ซึ่งหมู่คีโตนิกแอนไฮโดรด์หรืออนุพันธ์จากการแตกตัวที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงที่มากขึ้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ไหลยากขึ้น

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบรูปคัมเบลล์ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 412 ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 200°C จำนวน 5 ครั้ง แล้วเก็บตัวอย่าง

แต่ครั้งของการฉีดขึ้นรูปไปทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาทีและค่าความสามารถในการยืดจนขาดด้วยเครื่อง Tensometer ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.60 และ 4.61



รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอดจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)



รูปที่ 4.61 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอดจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)



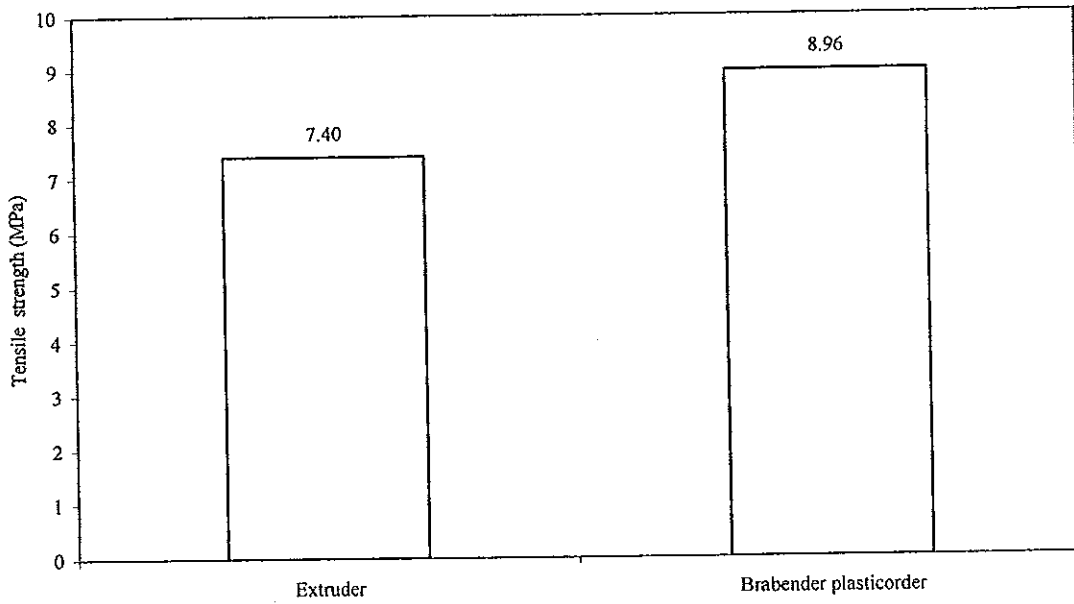
จากรูปที่ 4.60 และ 4.61 สามารถนำมาคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

ค่า	N	Range	Minimum	Maximum	Mean	Median	Std. Deviation
ความต้านทานต่อแรงดึง, MPa	5	0.35	8.68	9.03	8.91	8.96	0.14

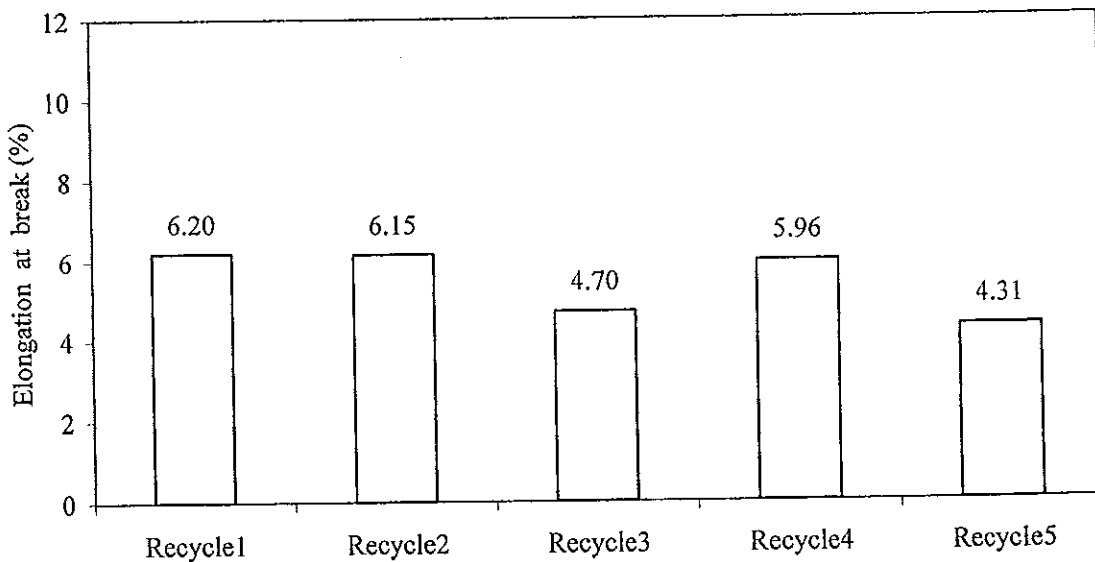
จากรูปที่ 4.61 และตารางที่ 4.8 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอเดอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกันมาก ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.14 และมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 8.68 – 9.03 และมีค่ากลางคือ 8.96

เมื่อนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทรูด ดังรูปที่ 4.62 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้มีค่ามากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทรูด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการเอ็กซ์ทรูดถูกแรงเฉือนกระทำมากกว่า จึงอาจทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกตัดมากกว่า ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้มีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเนนเดอร์ พลาสติกคอเดอร์



รูปที่ 4.62 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอดจากเครื่องเอ็กสทรูดเดอร์ และเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์ดเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการยืด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.63



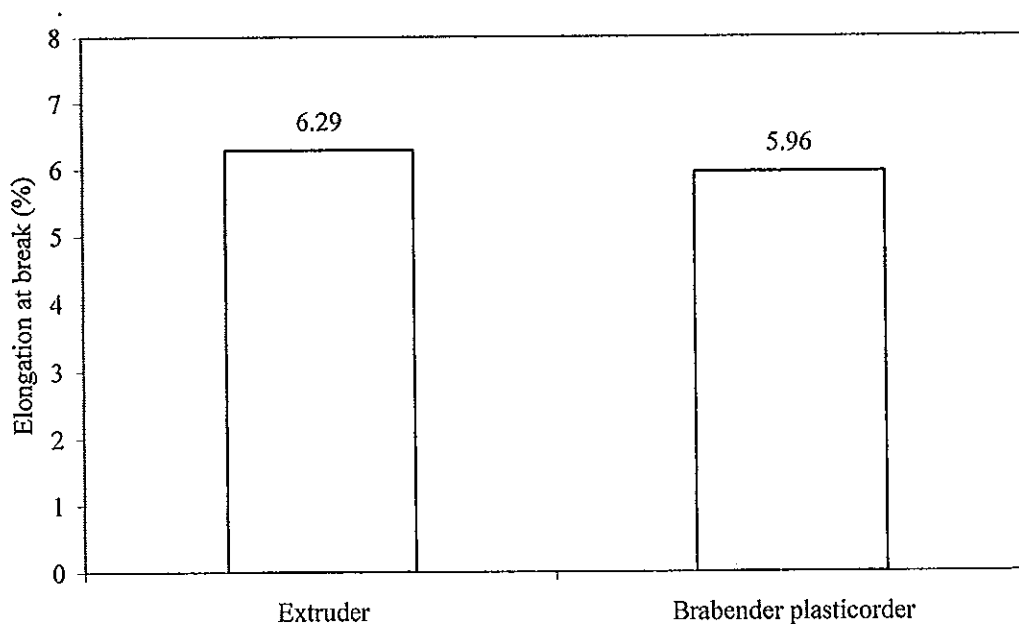
รูปที่ 4.63 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอดจากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์ดเดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

จากรูปที่ 4.63 สามารถนำมาคำนวณค่าความสามารถในการยืดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

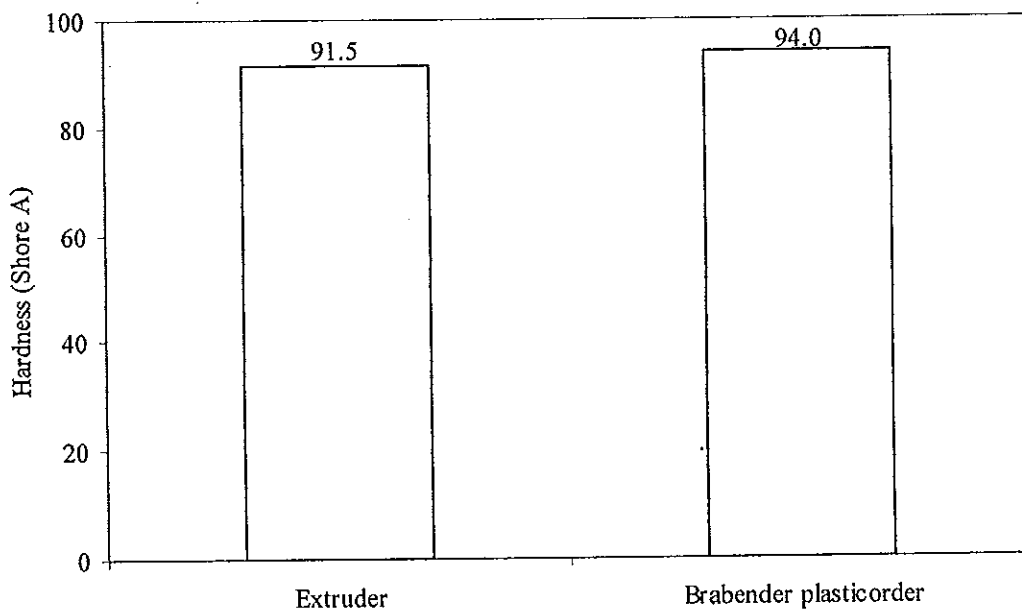
ค่า	N	Range	Minimum	Maximum	Mean	Median	Std. Deviation
ความสามารถในการยืดจนขาด	5	1.89	4.31	6.20	5.46	5.96	0.89

จากรูปที่ 4.63 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์ดอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าความสามารถในการยืดใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.89 และมีค่าความสามารถในการยืดจนขาดอยู่ในช่วง 4.31 – 6.20 และมีค่ากลางคือ 5.96 เมื่อนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทูด ดักรูปที่ 4.64 พบว่าค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน



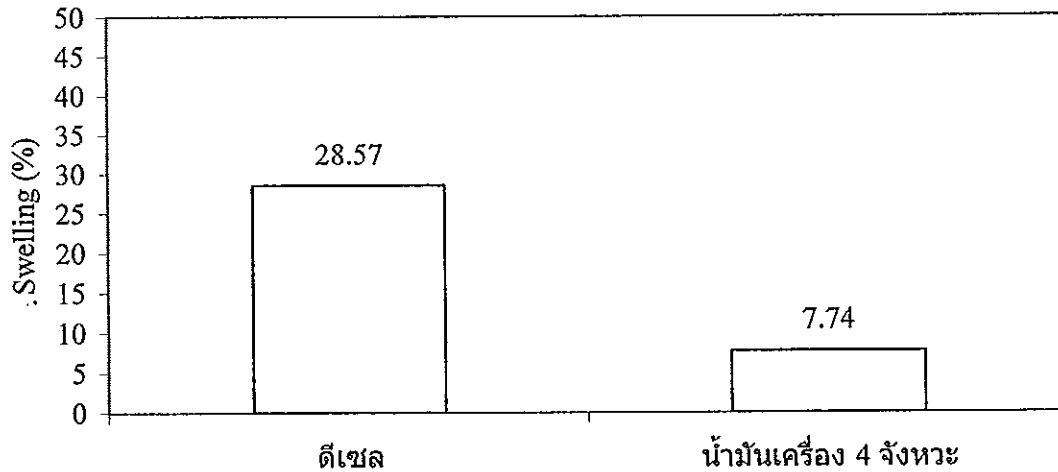
รูปที่ 4.64 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทูดเดอร์และเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์ดอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

นอกจากนี้เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ๊กซทรูดแบบสกรูเดี่ยว และเครื่องผสมแบบปิดบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ มาทดสอบค่าความแข็งแบบ Shore A ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.65 ซึ่งพบว่า เมื่อใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ๊กซทรูดมาเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้ค่าความแข็งน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่ได้จากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์มีการเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มากกว่า ดังนั้นจึงเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลที่สูงกว่า ส่งผลให้ค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามากกว่า



รูปที่ 4.65 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ๊กซทรูดเดอร์และเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ (ใช้ Deofflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

เมื่อนำชิ้นทดสอบของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนดยางธรรมชาติมาลิเอต (ที่เตรียมจากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์) กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ คือ 60/40 มาทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance) โดยใช้ตัวทำละลายคือน้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471-98 (2000) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.66

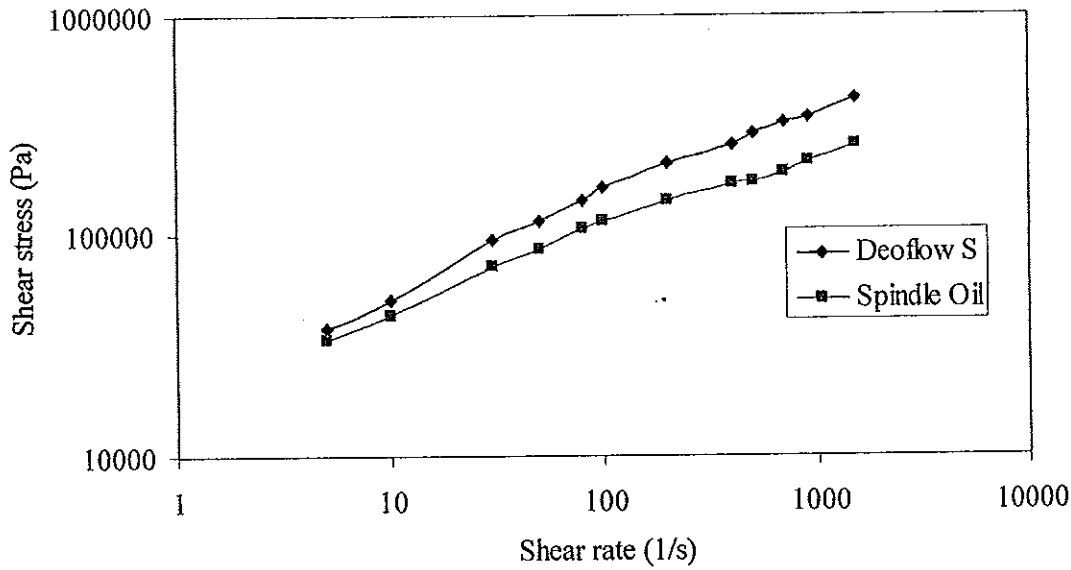


รูปที่ 4.66 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอเคอร์ (ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

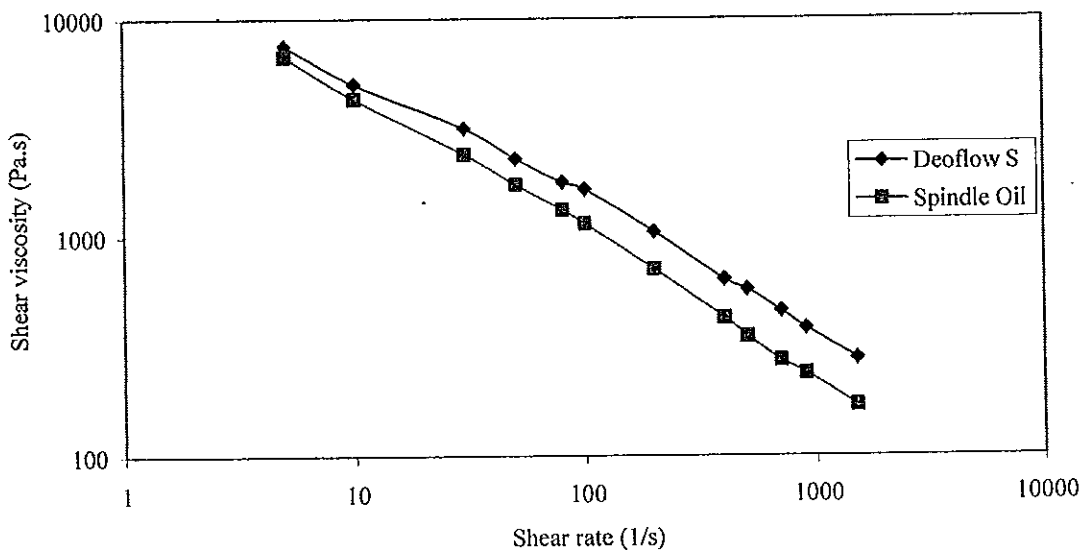
จากรูปที่ 4.66 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้สามารถทนต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทสามารถทำเป็นชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะได้โดยเกิดการบวมพองน้อยมาก

#### 4.4.3.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นำยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอเคอร์คอมปาวด์ตามสูตรที่ 2 ในตารางที่ 3.7 แต่เปลี่ยนจากการใช้ Deoflow S มาเป็น Spindle Oil 10 phr แล้วบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเนนเดอร์พลาสติกคอเคอร์ ในอัตราส่วน 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที จากนั้นตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก นำไปทดสอบรีโอโลยี แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการใช้ Deoflow S ได้ความเค้นเฉือนดังรูปที่ 4.67 และความหนืดเฉือนดังรูปที่ 4.68



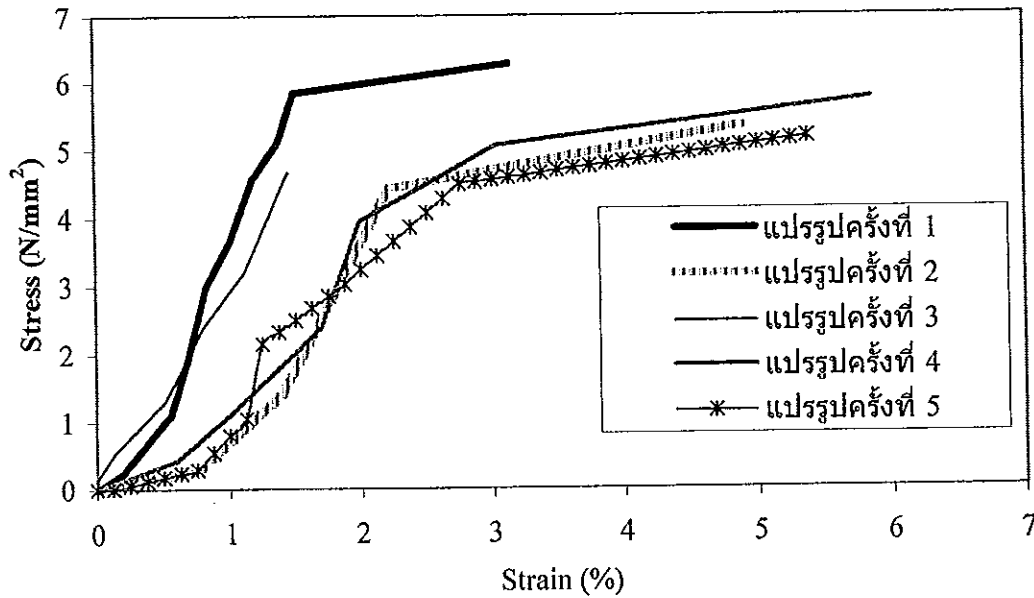
รูปที่ 4.67 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์



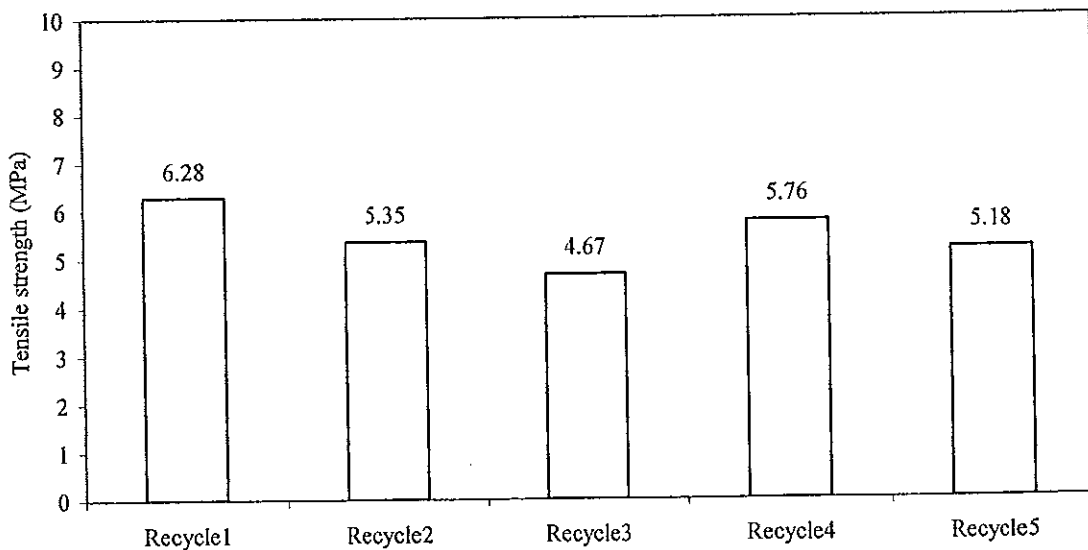
รูปที่ 4.68 เปรียบเทียบความหนืดเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 4.67 และ 4.68 จะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนืดเฉือนมีค่าลดลง และพบว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ Deoflow S มีค่าความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนที่สูงกว่า Spindle Oil ดังนั้นการใช้ Spindle Oil จะสามารถช่วยในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ระหว่าง MNR/PMMA ได้ดีกว่า และสามารถไหลได้ง่ายกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ Deoflow S

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตที่เตรียมได้ไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 412 ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 200°C จำนวน 5 ครั้ง แล้วเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งของการฉีดขึ้นรูปไปทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยเครื่อง Tensometer ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.69 - 4.70



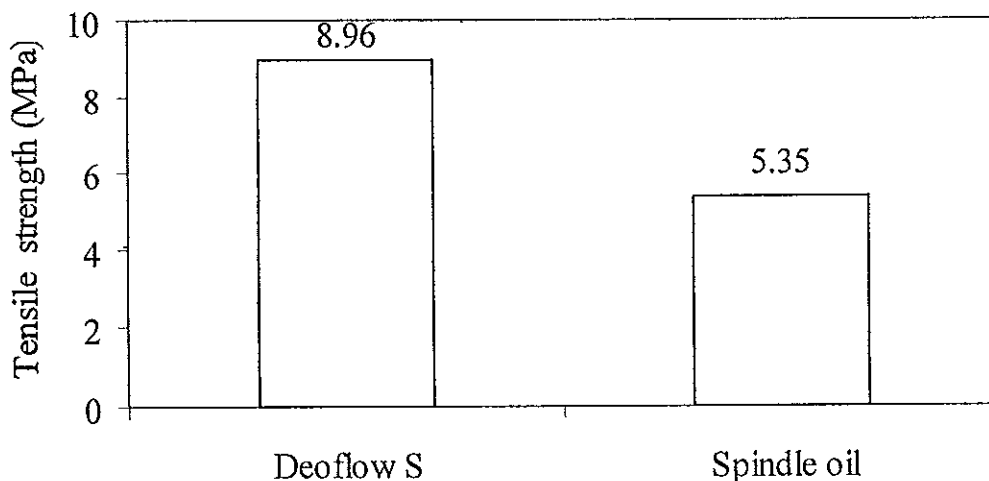
รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตที่เตรียมโดยใช้อย่างธรรมชาติมาลิเอดจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอเคอร์ (ใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป)



รูปที่ 4.70 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตที่เตรียมโดยใช้อย่างธรรมชาติมาลิเอดจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอเคอร์ (ใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

จากรูปที่ 4.70 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอดจากเครื่องบรวาเนเตอร์พลาสติกคอเคอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกันและมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 4.70 – 6.28 และมีค่ากลางคือ 5.35

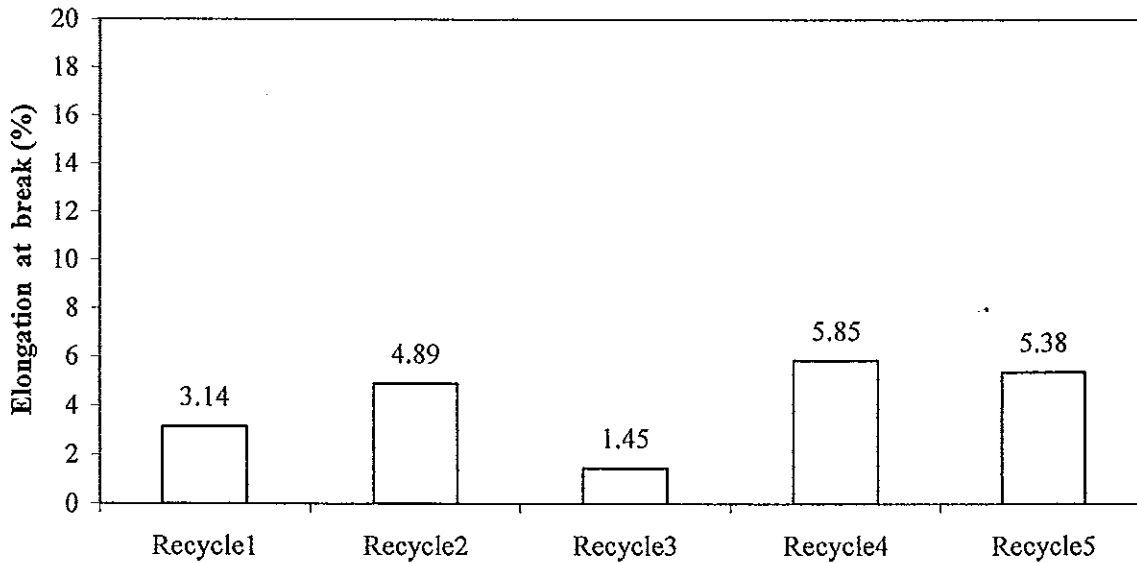
เมื่อนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Deoflow S ดังรูปที่ 4.71 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้มีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Spindle Oil สามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลยางได้มากกว่า ทำให้โมเลกุลยางจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ส่งผลให้ความแข็งแรงของเฟสยางน้อยลง ทำให้ได้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงน้อยลง



รูปที่ 4.71 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

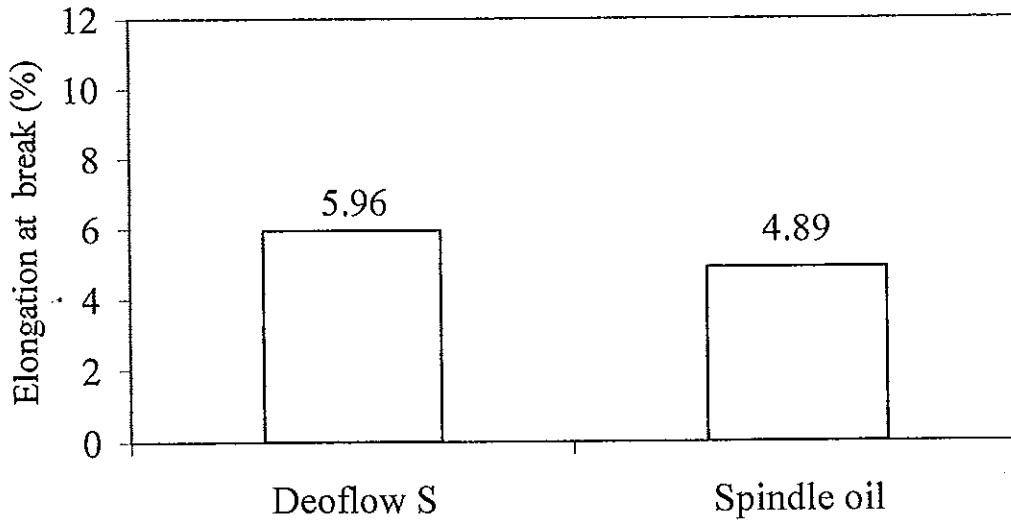
จากรูปที่ 4.69 สามารถนำมาคำนวณค่าความสามารถในการยึดขนาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป ดังรูปที่ 4.72





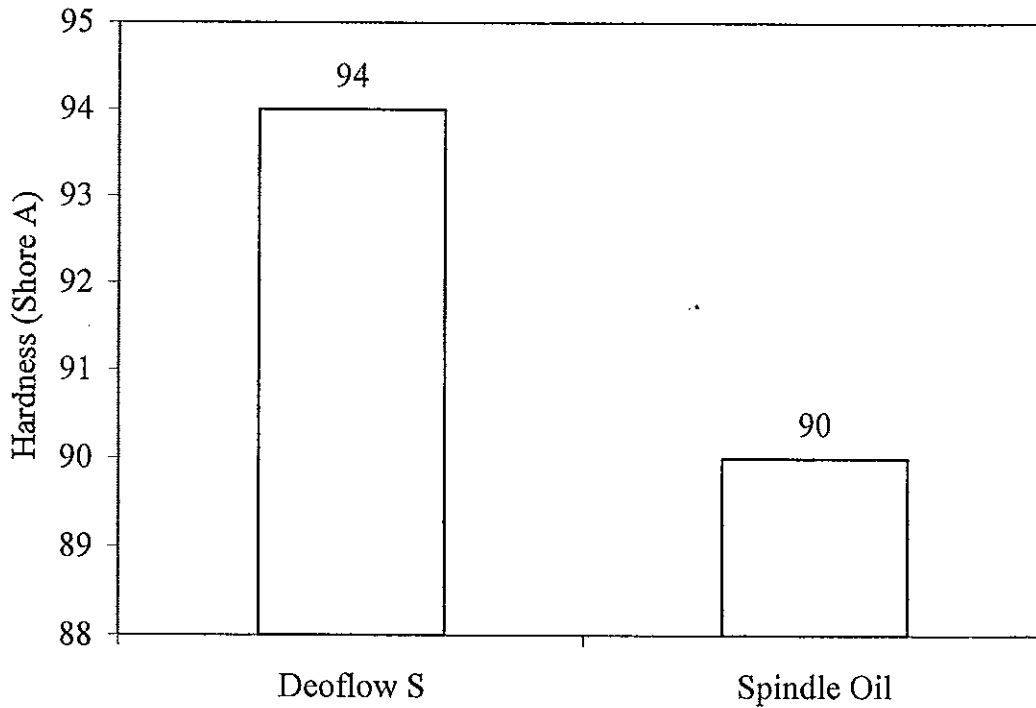
รูปที่ 4.72 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยให้ยางธรรมชาติ มาลิเอตจากเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์ (ใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

จากรูปที่ 4.72 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยให้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่อง บราเวนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Spindle oil มีค่าความสามารถในการยืดจนขาดอยู่ในช่วง 1.45 – 5.85 และมีค่ากลางคือ 4.89 เมื่อนำค่ากลางที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมโดยให้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป ดัง รูปที่ 4.73 พบว่าค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียม โดยให้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียม โดยให้ Spindle Oil นั้น Spindle Oil สามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลยางได้มากกว่า ทำให้ โมเลกุลยางจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จึงขาดง่ายกว่า ดังนั้น ความต้านทานต่อการยืดจนขาดจึงน้อยกว่าการใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป



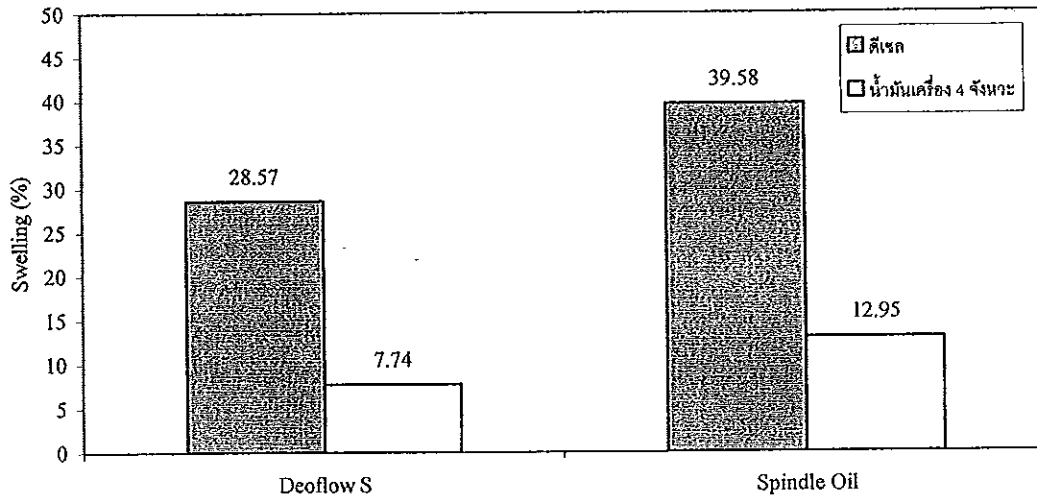
รูปที่ 4.73 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นอกจากนี้เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอดที่เตรียมจากเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์และใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป มาทดสอบค่าความแข็งแบบ Shore A ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.74 ซึ่งพบว่ามีความแข็งน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการใช้ Spindle Oil สามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลยางได้มากกว่า ทำให้โมเลกุลยางจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.74 เปรียบเทียบความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

เมื่อนำชิ้นทดสอบของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลีเซต (ที่เตรียมจากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอเดอร์) กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ คือ 60/40 มาทดสอบความความต้านทานต่อตัวทำละลายโดยใช้ตัวทำละลายคือ น้ำมันดีเซล และ น้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471-98 (2000) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.75



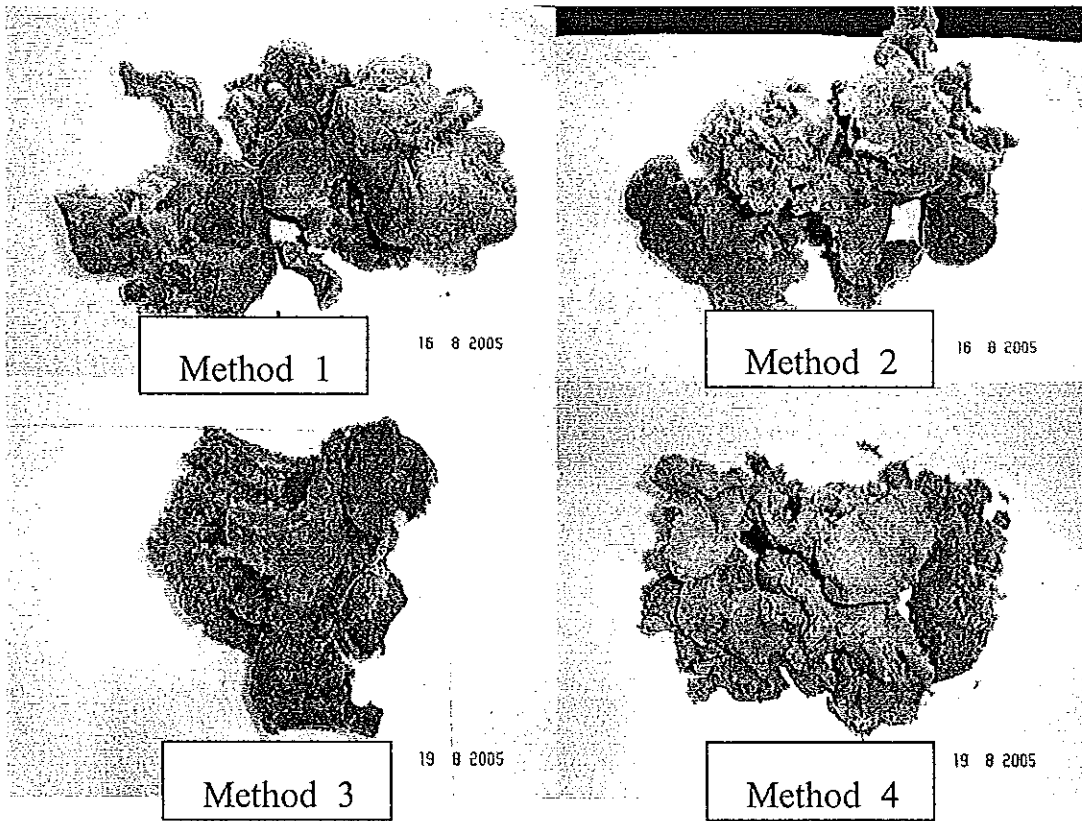
รูปที่ 4.75 ร้อยละการบวมพองในน้ำมันของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

จากรูปที่ 4.75 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้สามารถทนต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลีเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทสามารถทำเป็นชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะได้โดยเกิดการบวมพองน้อยมาก

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Spindle Oil สามารถทนต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะและน้ำมันดีเซลได้น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S อาจเนื่องมาจาก Spindle Oil สามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลยางได้มากกว่า ทำให้โมเลกุลยางจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ดังนั้นน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะและน้ำมันดีเซลจึงสามารถเข้าไปแทรกกระหว่างโมเลกุลของยางได้ง่ายกว่าทำให้ยางที่ใช้ Spindle Oil สามารถทนทานต่อน้ำมันทั้งสองชนิดนี้ได้น้อยกว่ายางที่ใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยแปรรูป

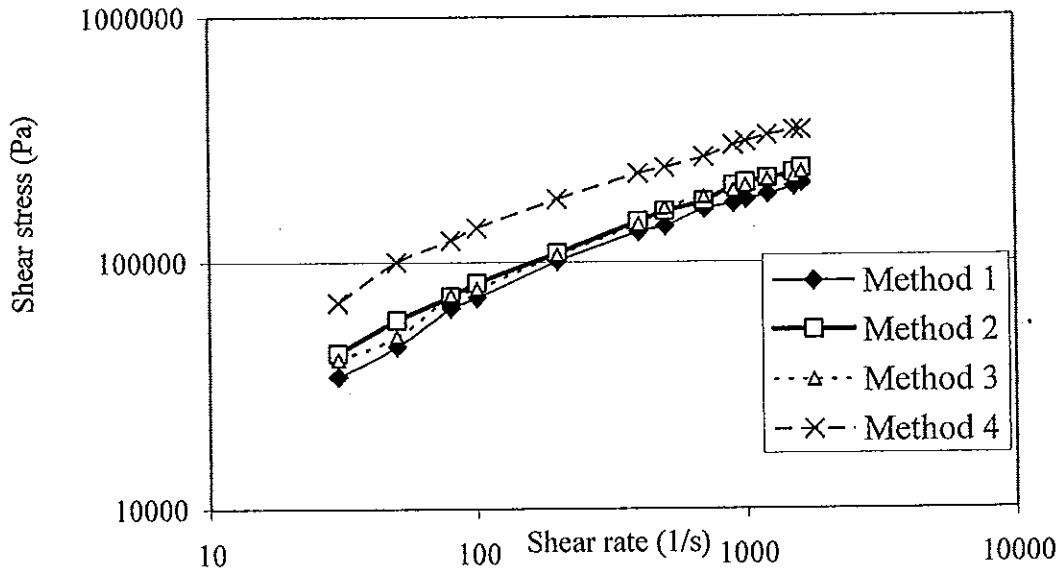
#### 4.4.3.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป

นำยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราวนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์คอมปาวด์ตามสูตรที่ 2 ในตารางที่ 3.7 แต่เปลี่ยนจากการใช้ Deoflow S มาเป็น DOP 20 phr แล้วบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราวนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์ ในอัตราส่วน 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที โดยทดลองเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ 4 วิธี ดังหัวข้อ 3.3.4.4.3 ได้ผลการทดลองดังนี้

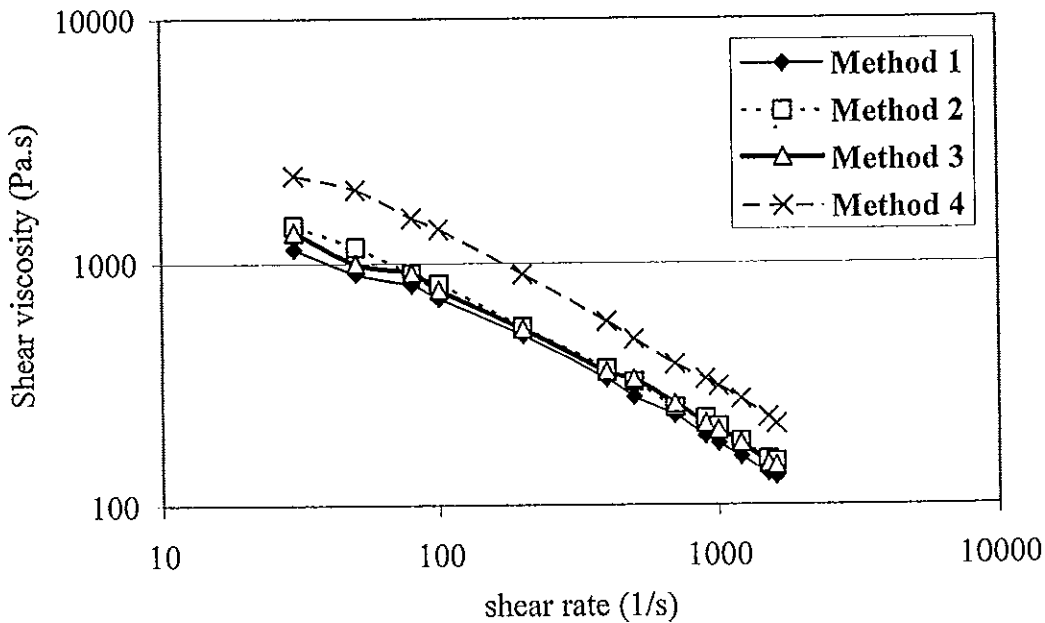


รูปที่ 4.76 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเตรียมวิธีที่ 1-4

จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้ไปตัดหรือบดตัวอย่างเป็นชิ้นละเอียดด้วยเครื่องบดพลาสติก นำไปทดสอบรีโอโลยี ได้ความเค้นเฉือนดังรูปที่ 4.77 และความหนืดเฉือนดังรูปที่ 4.78



รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

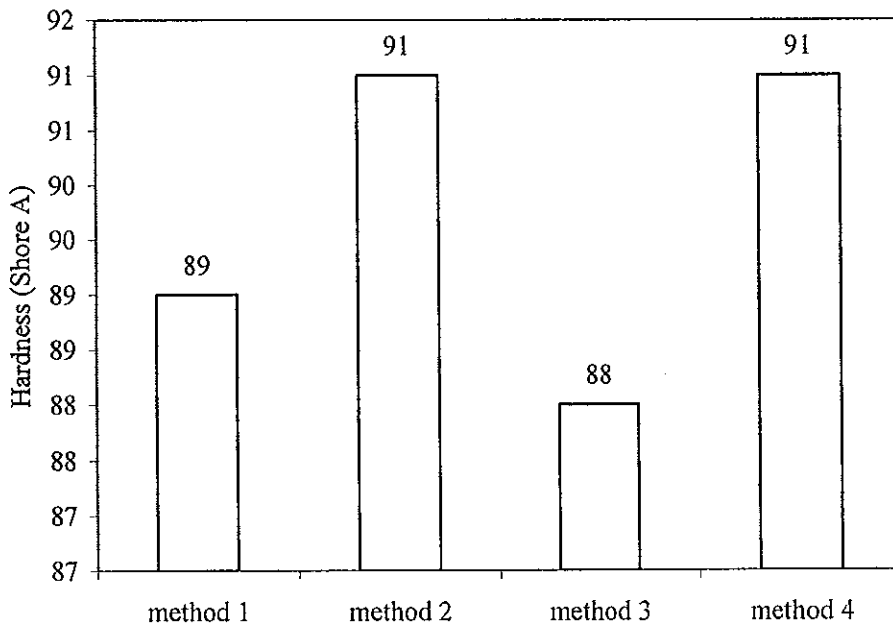


รูปที่ 4.78 เปรียบเทียบความหนืดเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

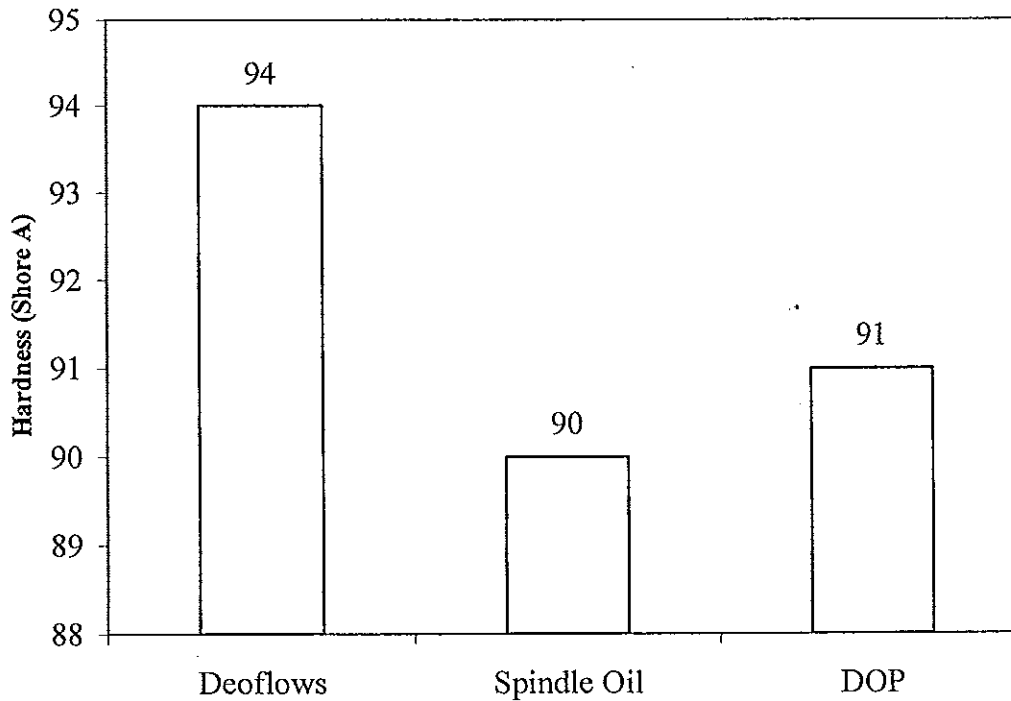
จากรูปที่ 4.77 และ 4.78 พบว่าวิธีที่ 4 มีค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนสูงที่สุด รองลงมาคือวิธีที่ 2, 3 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนที่สูงนี้เป็นผลมาจากการเชื่อมประสานระหว่างยางธรรมชาติมาลีเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้ดีที่สุด ซึ่งพอลิเมอร์ทั้ง

สองเกิดแรงยึดเหนี่ยวกัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไหลได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนมีค่าสูง

นอกจากนี้เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกคอร์เดอร์ และใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป ไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 200°C แล้วทดสอบค่าความแข็งแบบ Shore A ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.79 ซึ่งพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์วิธีที่ 2 และ 4 มีค่าความแข็งมากกว่าวิธีที่ 1 และ 3 ตามลำดับ การที่วิธีที่ 3 มีความแข็งน้อยที่สุดเนื่องจากมีความเข้ากันได้ของกันเบลดน้อยที่สุดซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนในรูปที่ 4.76 ส่วนวิธีที่ 1 มีค่าความแข็งน้อยอาจมีผลเนื่องจากการที่ DOP สามารถเข้าไปแทรกในโมเลกุลได้มากส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกที่ได้มีความนิ่ม ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองรีโอโลยี ในรูปที่ 4.77 - 4.78 ซึ่งวิธีที่ 1 ไหลได้ง่ายกว่าวิธีอื่นๆ จึงน่าจะมีค่าความแข็งน้อย



รูปที่ 4.79 เปรียบเทียบความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

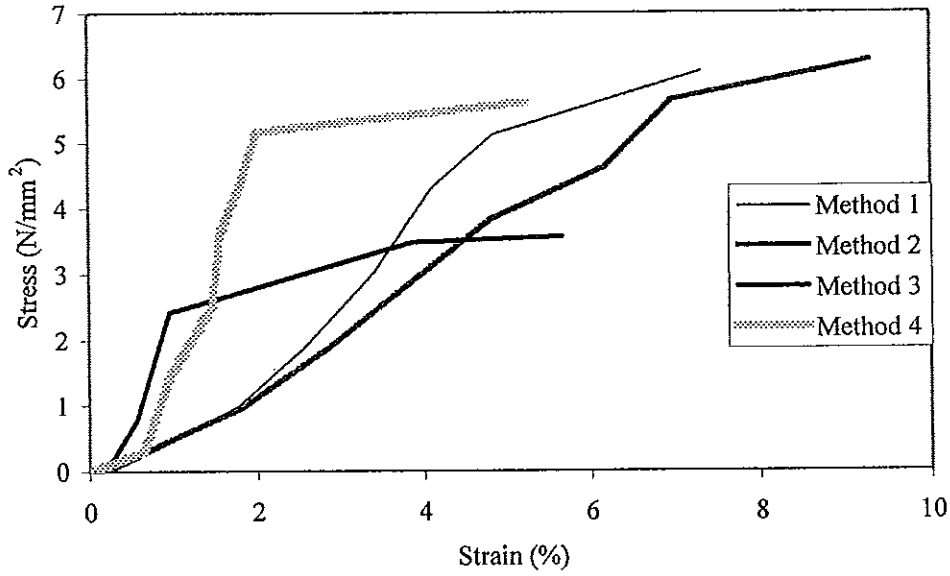


รูปที่ 4.80 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารช่วยในการแปรรูปต่างชนิดกัน

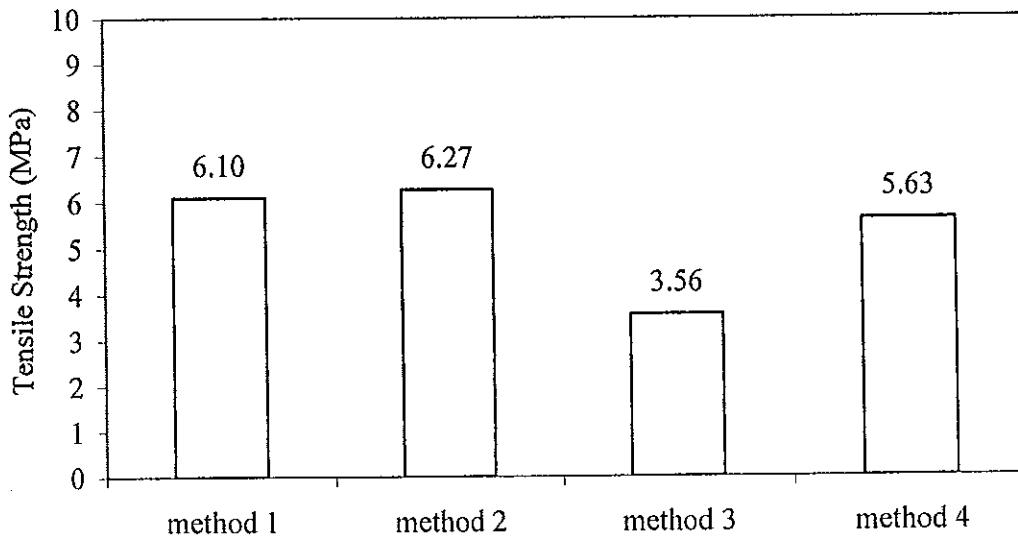
เมื่อนำค่าความแข็งที่ได้จากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์วิธีที่ 2 ที่ใช้ DOP มาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S ให้ค่าความแข็งมากกว่า DOP และ Spindle Oil ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ และใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูปมาทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยเครื่อง Tensometer ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.81-4.82

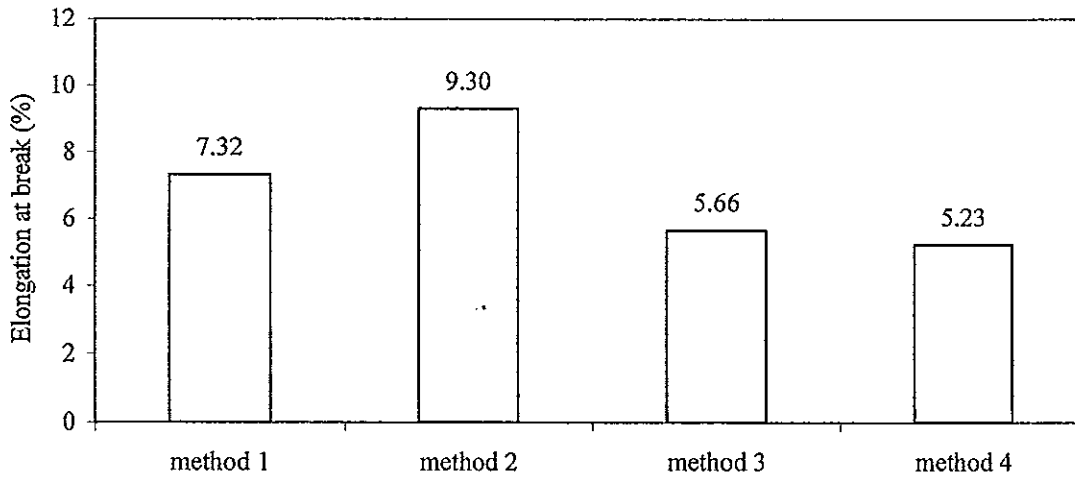




รูปที่ 4.81 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์ (ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป)

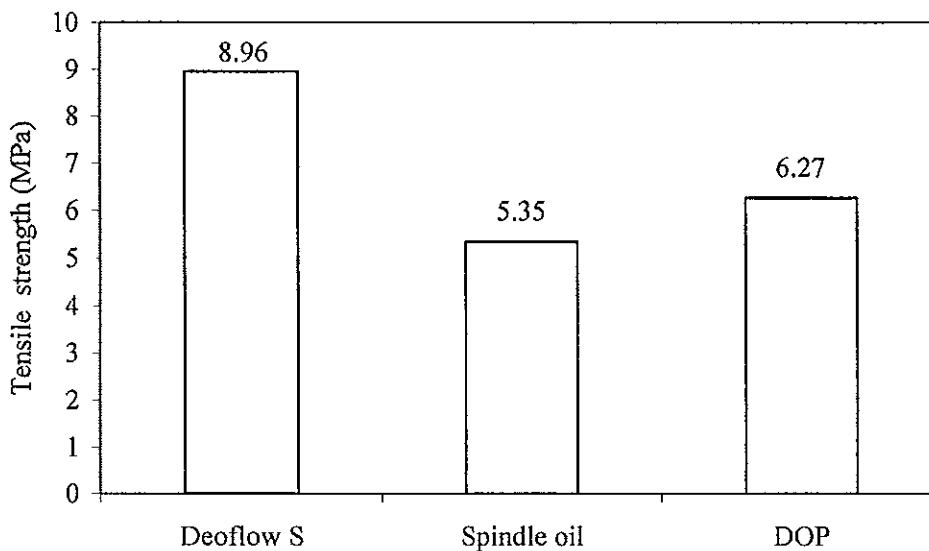


รูปที่ 4.82 เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

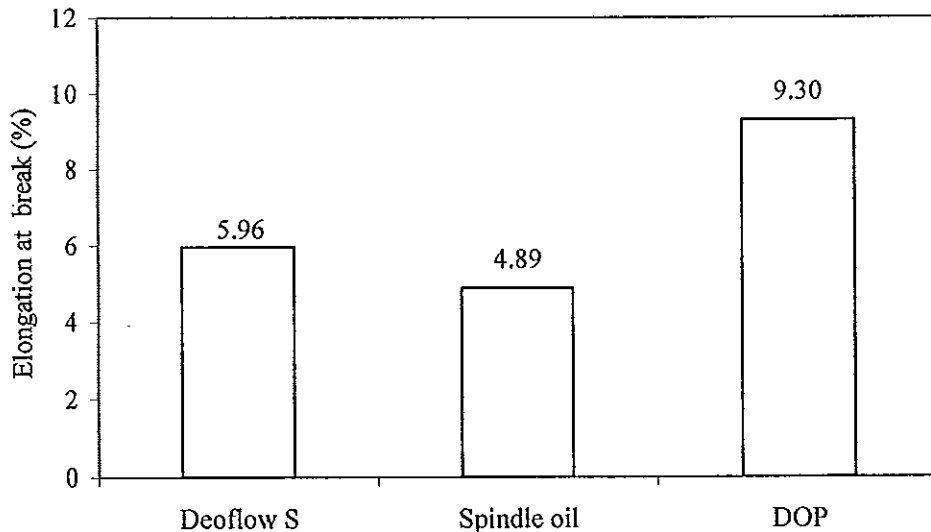


รูปที่ 4.83 เปรียบเทียบความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึงจากรูปที่ 4.82 พบว่าวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าวิธีที่ 4 และ 3 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากรูปที่ 4.83 พบว่าการเตรียมวิธีที่ 2 ให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่สูงที่สุด จึงเลือกวิธีการที่ 2 ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP ช่วยในการแปรรูปต่อไป



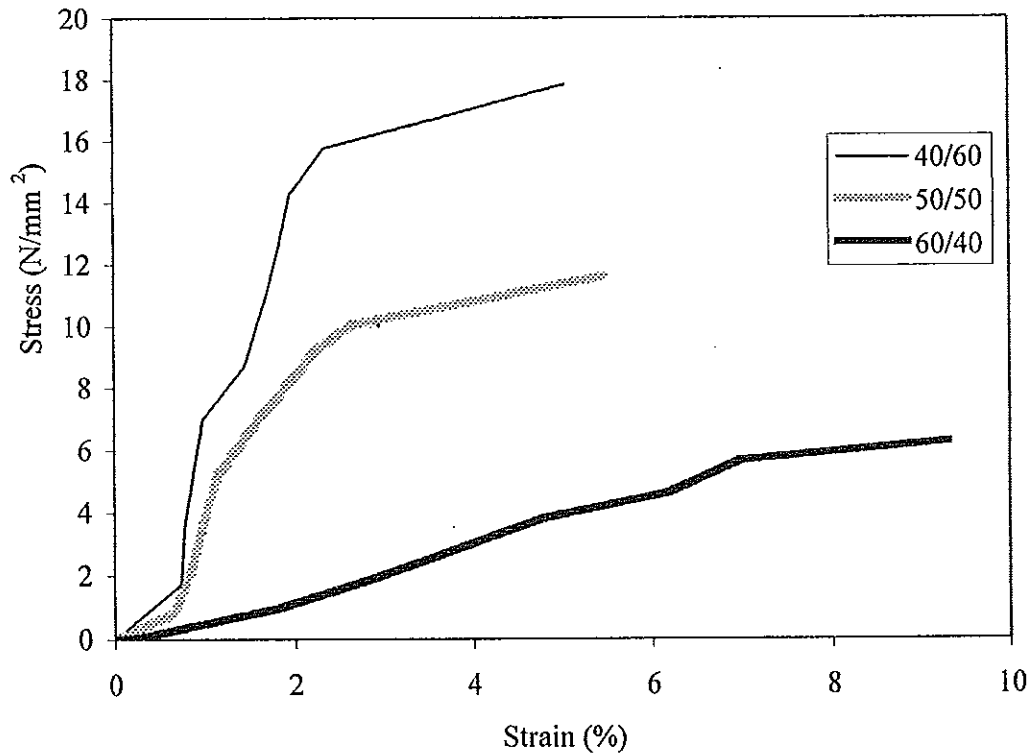
รูปที่ 4.84 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารช่วยในการแปรรูปต่างชนิดกัน



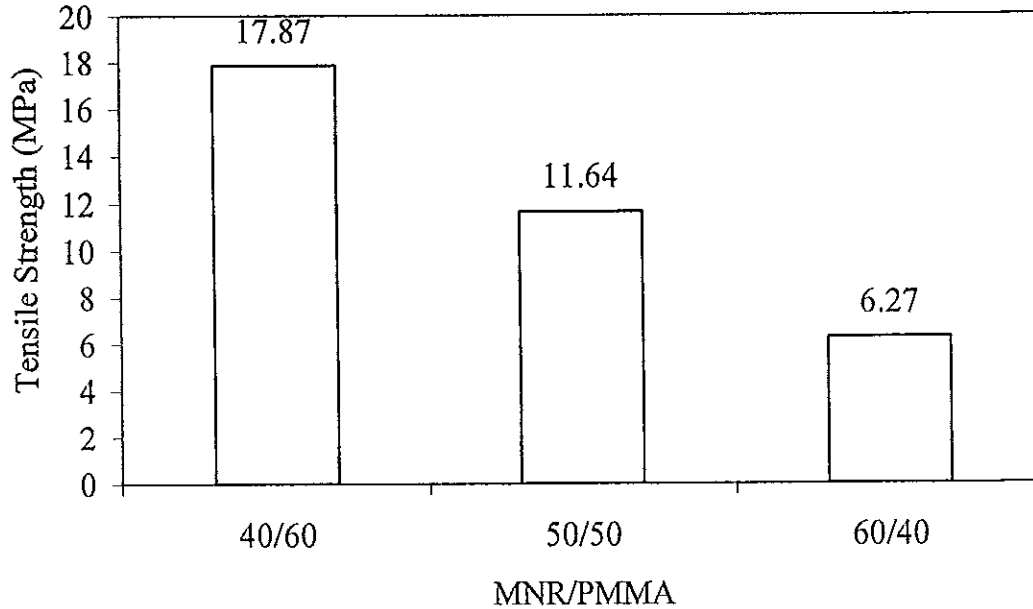
รูปที่ 4.85 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารช่วยในการแปรรูปต่างชนิดกัน

เมื่อนำค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้จากวิธีที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ DOP มาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil (รูปที่ 4.84) พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ DOP ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ระหว่าง Deoflow S และ Spindle Oil แต่เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการยืดจนขาด (รูปที่ 4.85) พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ DOP มีค่าความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด จึงทดลองแปรอัตราส่วนในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ DOP ในการทดลองต่อไป

เมื่อนำยางคอมปาวด์ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูปวิธีที่ 2 ข้างต้น ไปบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ ในอัตราส่วน 40/60, 50/50 และ 60/40 ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลส์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) รุ่น TII-90F ที่อุณหภูมิ 200°C แล้วทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาทีด้วยเครื่อง Tensometer ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.86-4.87



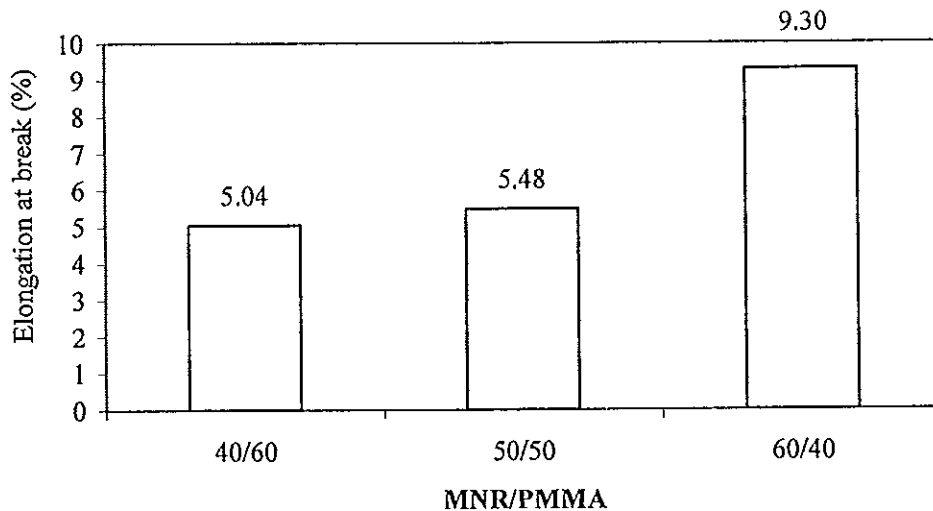
รูปที่ 4.86 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเนนเดอร์พลาสติกคอคเคอร์ (ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป)



รูปที่ 4.87 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป

จากรูปที่ 4.86- 4.87 พบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ 40/60 ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าที่อัตราส่วน 50/50 และ 60/40 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากพอลิเมทิลเมทาคริเลทเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูง (68-75 Mpa) (Dominighaus, 1993) ดังนั้นที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่ใช้พอลิเมทาคริเลทมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจากมีพอลิเมทิลเมทาคริเลทช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

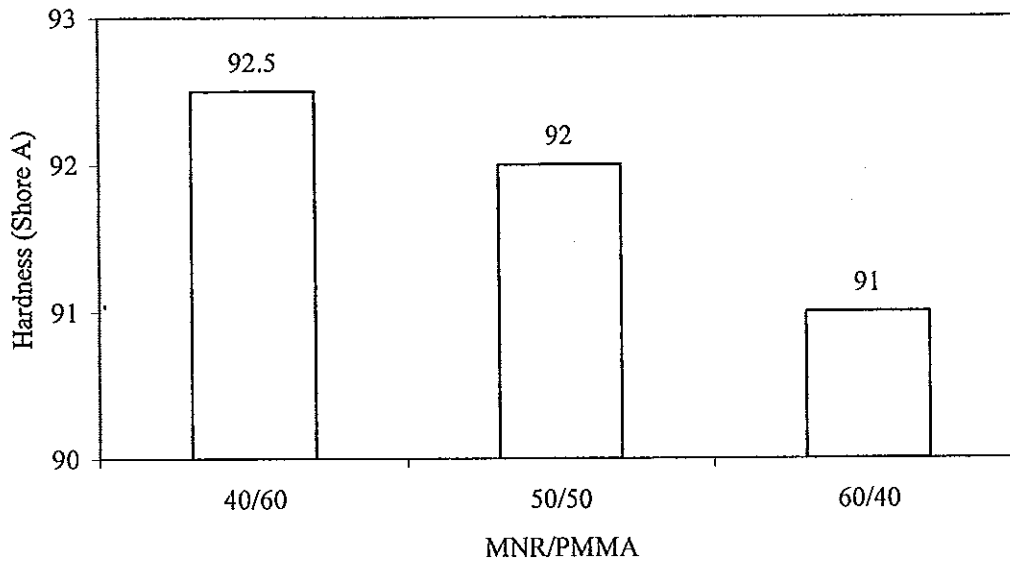
จากรูปที่ 4.86 สามารถคำนวณค่าความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป ได้ดังรูปที่ 4.88



รูปที่ 4.88 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป

จากรูปที่ 4.88 พบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ 40/60 ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทุกระบบ มีค่าความสามารถในการยืดจนขาดต่ำกว่าที่อัตราส่วน 50/50 และ 60/40 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากพอลิเมทิลเมทาคริเลทเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเปราะ นั่นคือมีความสามารถในการยืดน้อยมาก ประมาณ 4% (ชัยวัฒน์, 2526) ดังนั้นที่อัตราส่วนการเบลนด์ที่ใช้พอลิเมทาคริเลทมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการยืดต่ำลง

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วน 40/60 50/50 และ 60/40 ทดสอบความแข็งโดยใช้เทคนิคแบบ Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240-97 (2000) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.89



รูปที่ 4.89 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป

จากรูปที่ 4.89 พบว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทุกสูตรมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่ใช้ในการเบลนด์ เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลทเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าความแข็งสูง นอกจากนี้สภาพตัวของพอลิเมทิลเมทาคริเลทยังมีส่วนไปช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลทจะทำให้เกิดการเพิ่มความแข็ง

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุป

5.1.1 การเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต การวิเคราะห์การเกาะติดของหมู่ซัคซินิคแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติและปริมาณเจล

(1) จากสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่ามียางแหวนแอนไฮไดรด์ที่เกาะบนโมเลกุลยางธรรมชาติ คือ วงแหวนที่อยู่ในรูปวงแหวนที่ยังไม่แตกตัว (สังเกตจากพีคที่เลขคลื่น  $1784\text{ cm}^{-1}$ ) และอนุพันธ์การแตกตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของวงแหวนชนิดนี้กับความชื้นในอากาศได้กรดซัคซินิคและเอสเทอร์ ซึ่งพบพีคหมู่คาร์บอนิลของกรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1710\text{ cm}^{-1}$  พีคของหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ที่เลขคลื่น  $1735\text{ cm}^{-1}$  และพีคของหมู่ไฮดรอกซิล (OH-stretching) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $2500 - 3300\text{ cm}^{-1}$

(2) สภาพที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตในเครื่องเอ็กซ์ทруд คือ วิธีที่ 3 กล่าวคือ การเอ็กซ์ทруд ยางธรรมชาติ 1 รอบ ก่อนผสมมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนเครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) ที่อุณหภูมิห้องและเอ็กซ์ทрудต่อที่  $145^{\circ}\text{C}$  ที่ความเร็วรอบสกรู 15 rpm จำนวน 2 รอบ รวมระยะเวลาที่ยางอยู่ในเครื่องเอ็กซ์ทруд 8 นาที 20 วินาที

(3) การเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกเคอเดอร์ให้การเกาะติดของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติมากกว่าการเตรียมด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทрудแบบสกรูเดียว

(4) เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอตจะทำให้อัตราส่วนการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิลมีค่าสูงขึ้น และปริมาณเจลก็มีค่ามากขึ้นด้วย

5.1.2 การศึกษาระบบการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติมาลิเอต

(1) ยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด รองลงมาคือระบบเซมิอีวี อีวี และเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ ส่วนค่าโมดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ พบว่ายางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีค่าโมดูลัสสูงกว่าระบบที่ใช้กำมะถัน

(2) ปริมาณการเชื่อมโยงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติมีค่าสูงที่สุด

(3) ความสามารถในการคืนตัวของยางธรรมชาติมาลิเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ แยกไม่แตกต่างกัน และมีค่าน้อยมาก กล่าวคือทุกสูตรให้ค่าความสามารถในการคืนตัวอยู่ในช่วง 0-0.5% หรือ 0-1 มิลลิเมตร

(4) ค่าการคงรูปของยางหลังจากการกด พบว่าทุกระบบวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลีเอต จะให้ค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดที่ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าระบบเปอร์ออกไซด์ให้ค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดที่ต่ำกว่าระบบกำมะถัน ส่วนระบบกำมะถันพบว่าระบบกำมะถันแบบปกติมีค่าการคงรูปของยางหลังจากการกดต่ำกว่าระบบเคมี-ซีวีและอีวี ตามลำดับ

(5) ความแข็งของยางธรรมชาติมาลีเอตที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีค่าสูงกว่าระบบกำมะถันปกติ เคมี-ซีวี และอีวี ตามลำดับ

(6) หลังการบ่มเร่งยางธรรมชาติมาลีเอตที่เตรียมจากระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง และเมื่อนำมาคำนวณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นร้อยละของสมบัติเดิม พบว่าสมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่งของระบบอีวี ดีกว่าระบบเคมีอีวี ระบบกำมะถันปริมาณปกติและระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

### 5.1.3 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ MNR/PMMA

(1) เมื่อเพิ่มอัตราเขื่อนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หลอมเพิ่มขึ้น และพบว่าที่อัตราส่วน MNR/PMMA เท่ากับ 50/50 นั้นมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุด หลังจากนั้นค่าความเค้นเฉือนจะลดลง ส่วนค่าความหนืดเฉือน พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราเขื่อนเพิ่มขึ้นและพบว่าความหนืดเฉือนของการเบลนด์ MNR/PMMA เท่ากับ 50/50 มีค่าสูงสุดในทำนองเดียวกับความเค้นเฉือน เมื่อนำค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเขื่อนต่างๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับร้อยละของยางธรรมชาติมาลีเอตในพอลิเมอร์เบลนด์จะได้กราฟมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ แสดงว่ายางธรรมชาติมาลีเอตและ PMMA มีความเข้ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าความหนืดเฉือนสูงสุด

(2) ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่าที่อัตราส่วน MNR/PMMA เท่ากับ 50/50 มีลักษณะเป็น Co-Continuous morphology กล่าวคือ ทั้งสองเฟสต่างก็เป็นเฟสต่อเนื่องกระจายตัวเข้าด้วยกัน

(3) เมื่อนำพอลิเมอร์เบลนด์ไปวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) พบว่าน้ำหนักของพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา สามารถหาค่าอุณหภูมิสลายตัวของพอลิเมอร์ได้ พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีอุณหภูมิการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติมาลีเอต และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติมาลีเอตในพอลิเมอร์เบลนด์มีมากขึ้นจะส่งผลให้พอลิเมอร์มีแนวโน้มการสลายตัวที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



#### 5.1.4 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกซ์

##### 5.1.4.1 สมบัติทางรีโอโลยีของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทุกระบบการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนืดเฉือน พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นและพบว่าความหนืดเฉือนของการเบลนด์ MNR/PMMA สำหรับเปอร์ออกไซด์นั้นที่อัตราส่วน MNR/PMMA เท่ากับ 40/60 มีค่าสูงสุด แต่สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกตินั้นค่าความหนืดเฉือนที่อัตราส่วน 60/40 มีค่าสูงสุด และระบบผสมมีค่าความหนืดเฉือนที่อัตราส่วน 50/50 สูงที่สุด นอกจากนี้พบว่าความหนืดเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางธรรมชาติมาลิเอตที่ใช้ในการเบลนด์ โดยมีความหนืดเฉือนสูงสุดที่ปริมาณ MNR/PMMA เท่ากับ 50/50 สำหรับระบบเปอร์ออกไซด์และระบบผสม ส่วนการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบปกติมีค่าความหนืดเฉือนสูงสุดที่ปริมาณ MNR/PMMA เท่ากับ 60/40 เมื่อนำค่าความหนืดเฉือนที่อัตราเฉือนต่างๆ มาสร้างความสัมพันธ์กับร้อยละของยางธรรมชาติมาลิเอตในพอลิเมอร์เบลนด์จะได้กราฟในลักษณะของระฆังคว่ำ แสดงว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีความเข้ากันได้

##### 5.1.4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

(1) เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ระบบ พบว่าการวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติ จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดสูงสุด รองลงมาคือระบบผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

(2) ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 40/60, 50/50 และ 60/40 ตามสูตรต่าง ๆ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่สมบัติด้านความสามารถในการยืดลดลงตามปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้

##### 5.1.4.3 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทุกสูตรมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ในการเบลนด์ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งแบบ Shore A ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบปกติมีค่าสูงกว่าที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

##### 5.1.4.4 ความต้านทานต่อตัวทำละลายของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

(1) ร้อยละการบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ MNR/PMMA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ 40/60, 50/50 และ 60/40 ในน้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต ทำให้เปอร์เซ็นต์การบวมพองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลง

(2) นอกจากนี้เมื่อทดลองเปรียบเทียบระบบการวัลคาไนซ์พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ซึ่งวัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยกำมะถันระบบปกติ มีร้อยละการบวมพองในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะน้อยที่สุด รองลงมาคือระบบผสม และระบบเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

#### 5.1.4.5 สมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

(1) การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ วัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบเปอร์ออกไซด์พบว่าน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกอัตราส่วนการเบลนด์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ นอกจากนี้พบว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติมาลิเอตต่อพอลิเมทิลเมทาคริลเลทเท่ากับ 50/50 ทำให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงที่สุด

(2) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ วัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบกำมะถันปริมาณปกติ พบว่าน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกอัตราส่วนการเบลนด์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติมาลิเอตในพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มมากขึ้น (ที่ปริมาณยางธรรมชาติมาลิเอตต่อพอลิเมทิลเมทาคริลเลท 60/40) จะทำให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวยิ่งเพิ่มมากขึ้น

(3) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ วัลคาไนซ์เฟสของยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยระบบผสมพบว่าน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกอัตราส่วนการเบลนด์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ นอกจากนี้พบว่าที่ปริมาณยางธรรมชาติมาลิเอตต่อพอลิเมทิลเมทาคริลเลทเท่ากับ 50/50 ทำให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงที่สุดเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์

5.1.5 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทโดยใช้สารช่วยในการแปรรูปชนิดต่างๆ

##### 5.1.5.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

(1) เมื่อเพิ่มอัตราเจือปนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนืดเฉือน พบว่าจะมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์และเครื่องเอ็กซ์ทรูดพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ให้ค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดเล็กน้อย

(2) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกคอเดอรักับพอลิเมทิลเมทาคริลเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกันในทั้ง 5 ครั้งของการฉีดขึ้นรูปใหม่ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 8.68 – 9.03 MPa มีค่ากลางคือ 8.96 MPa และ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.14 เมื่อนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมโดยใช้ยาง

ธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทูด พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้มีค่ามากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทูด

(3) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าความสามารถในการยืดไกล่เคียงกันทั้ง 5 ครั้งของการฉีดขึ้นรูปใหม่ ซึ่งมีค่าความสามารถในการยืดจนขาดอยู่ในช่วง 4.31 – 6.20 % มีค่ากลางคือ 6.00 % และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.89 เมื่อนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องเอ็กซ์ทูด พบว่าค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

(4) เมื่อใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตที่เตรียมจากเครื่องเอ็กซ์ทูดมาเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้ค่าความแข็งแรงน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติมาลิเอตที่ได้จากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์

(5) ขึ้นทดสอบของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ คือ 60/40 สามารถทนต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะ ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล

#### 5.1.5.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูป

(1) เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนืดเฉือนมีค่าลดลง และพบว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ Deoflow S มีค่าความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนที่สูงกว่า Spindle Oil ดังนั้นการใช้ Spindle Oil จะสามารถช่วยในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ระหว่าง MNR/PMMA ได้ดีกว่า และสามารถไหลได้ง่ายกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ Deoflow S

(2) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกันทั้ง 5 ครั้งของการฉีดขึ้นรูปใหม่ โดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 4.67 – 6.28 MPa และมีค่ากลางคือ 5.35 MPa เมื่อนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Deoflow S พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้มีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

(3) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมาลิเอตจากเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกคอคเตอร์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่อัตราส่วนการเบลนด์ 60/40 และใช้ Spindle oil มีค่าความสามารถในการยืดจนขาดอยู่ในช่วง 1.45 – 5.85 % และมีค่ากลางคือ 4.89 % เมื่อนำค่ากลางที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

พบว่าค่าความสามารถในการยึดจนขาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Deoflow S เป็นสารช่วยในการแปรรูป

(4) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ Spindle Oil เป็นสารช่วยในการแปรรูปมีค่าความแข็งน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S

(5) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้สามารถทนต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S และ Spindle Oil พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Spindle Oil สามารถทนต่อน้ำมันเครื่อง 4 จังหวะและน้ำมันดีเซลได้น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S

#### 5.1.5.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูป

(1) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ Deoflow S ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือ DOP และ Spindle Oil ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการยึดจนขาดพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ DOP มีค่าความสามารถในการยึดจนขาดสูงที่สุด

(2) เมื่อนำยางคอมปาวด์ที่ใช้ DOP เป็นสารช่วยในการแปรรูปไปบดผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเครื่องผสมแบบปิดบราเวนเดอร์ พลาสติกอร์เดอร์ ในอัตราส่วน 40/60, 50/50 และ 60/40 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความสามารถในการยึดจนขาดลดลงตามปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลท

### 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

- 5.2.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วโรเตอร์ของการบดผสมต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติมาลิเอตกับ PMMA
- 5.2.2 ศึกษาชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลท
- 5.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแปรรูปต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่เตรียมจากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลิเอตและพอลิเมทิลเมทาคริเลท
- 5.2.4 ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ จากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลิเอตและพอลิเมทิลเมทาคริเลทด้วยระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารฟีนอลิกเรซิน
- 5.2.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ของยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่มากกว่า 5 ครั้ง

## บรรณานุกรม

- ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2526. โพลีเมอร์เชิงพาณิชย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- ชายีมีง สาเมาะ. 2544. รีเอกทีฟเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติมาลีเอตกับแป้งมันสำปะหลัง, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชิตีไชยตะห์ สายวารี. 2547. การเตรียมเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติมาลีเอตเบลนด์กับพอลิโพรไพลีน, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ญาณินี ศรีสุวรรณ. 2547. การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณัฐพล อุทัยพันธุ์. 2548. การวัลคาไนซ์ร่วมของยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพดีเอ็ม, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุญธรรม นิธิอุทัย. 2530. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. ยาง เทคนิคการออกสูตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปัตตานี.
- วรวรรณ เพชรอุไร. 2547. การเตรียมเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์จากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อนุรักษ์ ไชยพลฤทธิ. 2547. เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- อภิชัย สมบัติ. 2539. *การเกาะติดมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติในสภาวะหลอม*, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อมร อาจีนสมาจาร. 2547. *เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเบลนด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลท*, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อัศรพงษ์ ตอบประโคน. 2546. *การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลทโดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์*, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Annual Book of ASTM D395. 2000. *Compression Set Under Constant Deflection*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.
- Annual Book of ASTM D412-98a. 2000. *Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer-Tension*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.
- Annual Book of ASTM D 471-98. 2000. *Standard Test Method for Rubber Property-Effect of Liquids*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.
- Annual Book of ASTM D 624. 2000. *Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.
- Annual Book of ASTM D2084-95. 2000. *Standard Test Method for Rubber Property-Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.

- Annual Book of ASTM D2240-97. 2000. *Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.
- Annual Book of ASTM D3182-89. 2000. *Standard Practice for Rubber-Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.
- Annual Book of ASTM D3184-89. 2000. *Standard Test Method for Rubber Evaluation of Natural Rubber*. Section 9: Rubber. Volume 09:01. Rubber, Natural and Synthetic General Test method; Carbon black.
- Asaletha, R.; Kumaran, M.G. and Thomas, S. 1999. *Thermoplastic Elastomer from Blends of Polystyrene and Natural Rubber: Morphology and Mechanical Properties*. Eur. Polym. J. 35, 253-271.
- Domininghaus, H. 1993. *"Plastics for Engineers" Materials, Properties, Applications*. Hanser Publishers, New York., 268-269.
- Dupont. 2006. *Reactive functional copolymers*. [www.specialchem4polymers.com](http://www.specialchem4polymers.com).
- Duryodhan, M. 2002. *Elastomer Blends*. Rubber Chemical and Technology. Vol.75 Issue 3, 365-427.
- Gelling I.R. and Porter M. 1988. *Chemical Modification of Natural Rubber*. (Roberts A.D., ed.), Oxford University Press, Oxford, 359-362.
- George, S.; Ramamurthy, K.; Anand, J.S.; Groeninckx, G.; Varughese, K.T. and Thomas, S. 1999. *Rheological Behaviour of Thermoplastic Elastomer from Polypropylene/Acrylonitrile-butadiene rubber blends : Affect of Blend Ratio, Reactive Compatibilization and Dynamic Vulcanization*. Polymer. 40, 4325-4334.
- George, J.; Varughese, K.T. and Thomas, S. 2000. *Dynamically Vulcanised Thermoplastic Elastomer Blends of Polyethylene and Nitrile Rubber*. Polymer. 41,1507-1517.
- George, J.; Ramamurthy, K.; Varughese, K.T. and Thomas, S. 2000. *Melt Rheology and Morphology of Thermoplastic Elastomers from Polyethylene/Nitrile-Rubber*

- Blends: The Effect of Blend Ratio, Reactive Compatibilization, and Dynamic Vulcanization.* J. Polym. Sci. Part B. Polym. Phys. 38, 1104-1122.
- Gercia-Martinez, J.M., Laguna, O., Areso, S. and Collar, E.P. 1999. *FTIR Quantitative Characterization of Chemically Modified Polypropylene Containing Succinic Grafted Groups.* J. App. Polym Sci. 73, 2837-2847.
- Hashim, A.S.; Ong S.K. and Jessy R.S. 2002. *A General Review of Recent Developments on Chemical Modification of Natural Rubber.* Newsletter of the Rubber Foundation Information Center for Natural Rubber, Natural Rubber 28. (4<sup>th</sup> quarter 2002), 3-8.
- Hofmann, W. 1989. *Rubber Technology Handbook.* Hanser Publishers, Munich, 21.
- Holden, G. 2000. *Understanding Thermoplastic Elastomers.* Hanser Publishers, Munich, 9-72.
- International Rubber Study Group. *Rubber Statistical Bulletin*, London.
- Kundu, P.P. and Tripathy, D.K. 1998. *Rheological Properties of Poly[ethylene co-(methylacrylate)], Polychloroprene and Their Blends.* Polymer. 39, 1869-1874.
- Mandal, U.K. 2000. *Ionic Elastomer based on Carboxylated Nitrile Rubber : Infrared Spectral Analysis.* Polymer International. 49, 1653-1657.
- Mehrabzadeh, M. and Delfan, N. 2000. *Thermoplastic Elastomers of Butadiene-Acrylonitrile Copolymer and Polyamide. VI. Dynamic Crosslinking by Different Systems.* J. Appl. Polym. Sci. 77, 2057-2066.
- Nakason, C.; Kaesaman, A. and Supasanthitikul, P. 2004. *The Grafting of Maleic Anhydride onto Natural Rubber.* Polym. Test. 23, 35-41.
- Nakason, C.; Kaesaman, A.; Homsin, S. and Kiatkamjornwong, S. 2001. *Rheological and Curing Behavior of Reactive Blending. I. Maleated Natural Rubber-Cassava Starch.* J. Appl. Polym. Sci. 81, 2803-2813.
- Nakason, C.; Kaesaman, A.; Samoh, Z.; Homsin, S. and Kiatkamjornwong, S. 2002. *Rheological Properties of Maleated Natural Rubber and Natural Rubber Blends.* Polym. Test. 21, 449-455.



- Nakason, C., Tatum, S., Saiwaree, S. and Kaesaman, A. 2006. *Rheological, Thermal and Morphological Properties of Maleated Natural Rubber and its Reactive Blending with Poly(methyl methacrylate)*. Polym. Test. 25, 656-667.
- Nakason, C., Toprakon, A. and Kaesaman, A. 2005. *Thermoplastic Based on Poly(methyl methacrylate)/Epoxidized Natural Rubber Blends: Mechanical, Thermal and Morphological Properties*. J. Appl. Polym. Sci. in - print.
- Oaklands Corporate Center. 2002. *Basic Principles of Peroxide-Coagent Curing of Elastomers*. Sartomer Application Bulletin. 4101.
- Oderkerk, J. and Groeninckx, G. 2002. *Morphology Development by Reactive Compatibilization and Dynamic Vulcanisation of Nylon6/EPDM Blends with a High Rubber Fraction*. Polymer. 43, 2219-2228.
- Phinyocheep, P. 1995. *UV cure elastomer, การประชุมวิชาการพอลิเมอร์และยางธรรมชาติ ไทย-ฝรั่งเศส ครั้งที่ 2 หน้า 8 - 9*.
- Polymer Engineering Center. *Plastics Pocket Power*. Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison.
- Sclavons, M., Franquient, D., Carlier, V., Verfaillie, R., Lauvant, M. and Thyron, F.C. 2000. *Quantification of the Maleic Anhydride Grafted onto Polypropylene by Chemical and Viscosimetric Titration, and FTIR Spectroscopy*. J. Appl. Polym. Sci. 41, 1989 - 1999.
- Visconte, L.L.Y., Andrade, C.T. and Azuma, C. 1991. *Photosensitivity of Modified Natural Polyisoprene as a Function of the Aliphatic Side Chain*. Polym. Bull. 25, 214-223.
- Xavier, T. 2002. *A General Review of Recent Developments on Chemical Modification of Natural Rubber*. Newsletter of the Rubber Foundation Information Center for Natural Rubber, Natural Rubber 28. (4<sup>th</sup> quarter 2002), 10-11.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวสุวิมล ศิริวงศ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4647039	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2546
(วท.บ.เคมีอุตสาหกรรม)		

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

ทุน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ แผนกวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป ภาควิชาวิทยาศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี