

การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ของของผสมยางธรรมชาติกับ  
ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์



นางสาววิมล ยันตะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF GRAFTED NATURAL RUBBER AS COMPATIBILIZER FOR NATURAL  
RUBBER/FLUOROELASTOMER BLENDS

Ms. Wimon Yanta

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ของ  
ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์

โดย

นางสาววิมล ยันตะ

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

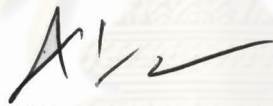
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวฒนานนท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

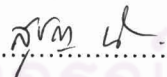
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวฒนานนท์)



..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หนีชูระนันท์)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชาศริต สิริสิงห์)

วิมล ยันตะ : การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์. (UTILIZATION OF GRAFTED NATURAL RUBBER AS COMPATIBILIZER FOR NATURAL RUBBER/FLUOROELASTOMER BLENDS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.คุณากร ภูจินดา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.สุชญา นิติวฒนานนท์), 98 หน้า.

ความแตกต่างของความมีขั้วส่งผลต่อความเข้ากันได้ของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ โดยการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้จะทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นวัฏภาคเดียวกันได้ดี ในงานวิจัยนี้ศึกษาชนิดของสารเสริมสภาพเข้ากันได้จากการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน (NR-g-PDA) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (NR-g-MA) ในขั้นแรกเป็นการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์ที่สัดส่วนมอนอเมอร์ระหว่าง 1 ถึง 10 phr ผลการทดลองพบว่า ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 phr และมีค่าลดลงเมื่อเติมมอนอเมอร์ 10 phr โดย NR-g-MA มีค่าร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์สูงกว่า NR-g-PDA ในทุกสัดส่วนของมอนอเมอร์ ในขั้นที่สองทำการผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนระหว่าง 0 ถึง 100 phr แล้วนำอัตราส่วนยางยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่ 90 ต่อ 10 และ 10 ต่อ 90 มาทำการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ที่เตรียมได้ในสัดส่วนระหว่าง 2 ถึง 8 phr และทำการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผสมด้วยสมบัติเชิงกล การบวมตัวและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากน้ำมัน สันฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 (NR:ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์) NR-g-MA ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล การบวมตัวและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากน้ำมันให้ดีขึ้น โดยที่ปริมาณการเติม 6 phr ให้ผลดีที่สุด ขณะที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 (NR:ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์) การเติม NR-g-MA ทำให้ระยะยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเติม NR-g-PDA ปริมาณ 2 phr ในของผสมทั้งสองอัตราส่วน พบว่าสมบัติต่างๆดีขึ้น

ภาควิชา เคมีเทคนิค  
สาขาวิชา เคมีเทคนิค  
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อผู้นิสิต วิมล ยันตะ  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก คุณากร ภูจินดา  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สุชญา นิติวฒนานนท์

## 5072470523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY


KEYWORDS : BLENDING/GRAFTED NATURAL RUBBER/ FLUOROELASTOMER /  
1,2-PHENYLENEDIAMINE/ COMPATIBILIZER

WIMON YANTA : UTILIZATION OF GRAFTED NATURAL RUBBER AS  
COMPATIBILIZER FOR NATURAL RUBBER/FLUOROELASTOMER BLENDS.

ADVISOR: KUNAKORN POOCHINDA, Ph.D. CO-ADVISOR: ASST. PROF.

SUCHAYA NITIVATTANANON, Ph.D. 98 pp.

Difference of polarity in natural rubber (NR)/fluoroelastomer blends affects their compatibility. This study investigated the effects of compatibilizer type and quantity of compatibilizer on the compatibility of NR/fluoroelastomer blends. The compatibilizers used in this work were synthesized by grafting NR with 1,2-phenylenediamine (NR-g-PDA) and maleic anhydride (NR-g-MA) between the amounts of 1 and 10 phr. The results showed that the percentage of grafted NR (GNR) was increased when the amount of PDA or MA increased up to 5 phr and NR-g-MA gave the percentage of GNR more than that of NR-g-PDA. The compatibility study was carried out at different ratio of NR/fluoroelastomer (0 to 100 phr) and amount of compatibilizer (0 to 8 phr). The GNR was added to the blends of NR/fluoroelastomer (using 90:10 and 10:90 ratios). The experimental results showed that the addition of NR-g-MA could improve the compatibility of the blends at 90:10 ratio with the optimum dosage of NR-g-MA at 6 phr. The addition of NR-g-MA at 10:90 of NR/fluoroelastomer could improve the percentage of elongation at break of the NR/fluoroelastomer blends. The incorporation of 2 phr of NR-g-PDA was found to improve the compatibility of the blends for both ratios.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature : 

Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature : 

Academic Year : 2009..... Co-advisor's Signature : 

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชนา นิติวัดมนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย และความเมตตา ตลอดจนให้ข้อคิดเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในการวิจัยมาตลอด

งานวิจัยเรื่อง “การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยเพื่อผลิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ซึ่งผู้ทำวิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ บริษัทลูกกลิ้งอุตสาหกรรมไทยจำกัด และบริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด ที่ช่วยสนับสนุนวัสดุ เครื่องมือและคำแนะนำที่ดีในการทำงานวิจัย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการวิจัยเป็นอย่างดี รวมถึง พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้ให้กำเนิด เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ยางธรรมชาติ.....	4
2.1.1 น้ำยาง.....	4
2.1.2 ยางแห้ง.....	4
2.2 โครงสร้างยางธรรมชาติ.....	6
2.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	8
2.4 ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	8
2.4.1 โครงสร้าง การผลิต และสมบัติของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	9
2.4.2 ชนิดของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	11
2.4.3 สมบัติทั่วไปของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	12
2.4.4 การผสมเคมีของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	14
2.4.5 การใช้งานของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	15

2.5 การผสมยาง.....	15
2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมยาง.....	16
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างของยางผสม.....	16
2.5.3 การใช้ยางผสม.....	18
2.5.4 สมบัติยางผสม.....	18
2.5.5 ปัญหาการใช้ยางผสม.....	19
2.6 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง.....	19
2.6.1 การออกสูตรยาง.....	19
2.6.2 การบดยางให้นิ่ม.....	21
2.6.3 การบดยางกับสารเคมี.....	22
2.7 การขึ้นรูปยาง.....	24
2.8 การทำให้ยางคงรูป.....	25
2.9 การทดสอบสมบัติยาง.....	26
2.9.1 การทดสอบคุณภาพของยางดิบ.....	26
2.9.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต.....	26
2.9.3 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป.....	26
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	32
3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	34
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	34
3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์.....	37
3.6 ขั้นตอนการบดผสมยาง.....	38
3.7 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์กราฟต์ที่ได้.....	39
3.8 การทดสอบการแปรรูปและการคงรูป.....	40
3.9 การทดสอบสมบัติของยางผสมที่ผ่านการคงรูป.....	41



	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	45
4.1 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์.....	45
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการวัลคะไนซ์ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติ กับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	51
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล.....	55
4.4 การวิเคราะห์ความต้านทานเนื่องจากการบวมตัวเนื่องจากสารละลาย โทลูอีน.....	66
4.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางผสม.....	68
4.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางผสม.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	77
5.1 หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติกราฟต์.....	77
5.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยวิธีการสกัดร้อน.....	77
5.3 การวิเคราะห์ลักษณะการวัลคะไนซ์ของยางผสม.....	77
5.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของยางผสม.....	78
5.5.การวิเคราะห์ความต้านทานต่อการบวมตัวเนื่องจากสารละลายโทลูอีน.....	79
5.6 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางผสม.....	79
5.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางผสม.....	80
5.8 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้ทำวิทยานิพนธ์.....	98

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติยางแท่ง.....	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	7
ตารางที่ 2.3 ปริมาณฟลูออรีนและไฮโดรเจนในฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ชนิดต่างๆ.....	10
ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ชนิดต่างๆ.....	12
ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางธรรมชาติแบบแท่งที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
ตารางที่ 3.2 สมบัติของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	33
ตารางที่ 3.3 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไซแน.....	35
ตารางที่ 3.4 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์	35
ตารางที่ 3.5 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ (NR-g-MA)	36
ตารางที่ 3.6 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ (NR-g-PDA)	36
ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดและปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อสมบัติการกราฟต์ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ไซแนบนยางธรรมชาติ.....	49
ตารางที่ 4.2 ผลการวัลคะไนซ์ของยางธรรมชาติผสมกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ .....	52
ตารางที่ 4.3 ผลการวัลคะไนซ์ของยางผสมที่อัตราส่วนการผสมของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เท่ากับ 90 ต่อ10.....	53
ตารางที่ 4.4 ผลการวัลคะไนซ์ของยางผสมที่อัตราส่วนการผสมของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เท่ากับ 10:90 .....	54
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ โดยไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์.....	55
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์.....	56
ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90:10 โดยมีการเติม NR-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ.....	74
ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10:90 โดยมีการเติม NR-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ.....	76

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองกราฟต์โคพอลิเมอร์ไธเซนของ Maleic Anhydride บนยางธรรมชาติ.....	91
ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองกราฟต์โคพอลิเมอร์ไธเซนของ 1,2-Phenylenediamine บนยางธรรมชาติ.....	92
ตารางที่ ข.3 ความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติผสมฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	93
ตารางที่ ข.4 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผสมฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	94
ตารางที่ ข.5 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	95



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ.....	7
รูปที่ 2.2 ชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	9
รูปที่ 2.3 ชนิดของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์.....	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Block copolymer/ Graft copolymer.....	17
รูปที่ 2.5 ลักษณะวิภาคของยางผสม.....	18
รูปที่ 2.6 เครื่องบดผสมแบบเปิด.....	22
รูปที่ 2.7 เครื่องบดผสมแบบปิด (kneader).....	23
รูปที่ 2.7 เครื่องบดผสมแบบปิด (banbury).....	23
รูปที่ 3.1 เครื่องบดผสมแบบปิด.....	35
รูปที่ 3.2 เครื่องบดผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง.....	39
รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี.....	40
รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงรูปดัมเบลล์.....	41
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการทนแรงดึง.....	42
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง.....	42
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	43
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวของยางผสม.....	44
รูปที่ 4.1 ปฏิกริยาที่เป็นไปได้ของยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน.....	45
รูปที่ 4.2 ปฏิกริยาที่เป็นไปได้ของยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	46
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของยางธรรมชาติ.....	47
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน.....	47
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ NR-g-PDA.....	47
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	48
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ NR-g-MA.....	48
รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนของกราฟต์โคพอลิเมอร์ ชั้นบนยางธรรมชาติ.....	50
รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์.....	50
รูปที่ 4.10 ค่าความต้านแรงดึงของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9.....	57
รูปที่ 4.11 ค่าความต้านแรงดึงของยางผสมสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 13.....	57

รูปที่ 4.12 ค่าความต้านแรงดึงของยางผสมสูตรที่ 14 ถึงสูตรที่ 17.....	58
รูปที่ 4.13 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9.....	59
รูปที่ 4.14 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 13.....	60
รูปที่ 4.15 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่ 14 ถึงสูตรที่ 17.....	60
รูปที่ 4.16 ค่าความเค้นของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9.....	61
รูปที่ 4.17 ค่าความเค้นของยางผสมสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 13.....	62
รูปที่ 4.18 ค่าความเค้นของยางผสมสูตรที่ 14 ถึงสูตรที่ 17.....	63
รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9.....	64
รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งของยางผสมสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 13	64
รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งของยางผสมสูตรที่ 14 ถึงสูตรที่ 17.....	65
รูปที่ 4.22 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากสารละลายโทลูอีนของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9.....	66
รูปที่ 4.23 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากสารละลายโทลูอีนของยางผสมสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 13.....	67
รูปที่ 4.24 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากสารละลายโทลูอีนของยางผสมสูตรที่ 14 ถึงสูตรที่ 17.....	68
รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9.....	69
รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 13.....	70
รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่ 14 ถึงสูตรที่ 17.....	72
รูปที่ 4.28 คุณสมบัติกลศาสตร์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์สูตรที่ 1, 2, 8 และ 9	74
รูปที่ 4.29 คุณสมบัติกลศาสตร์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์สูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 13	75
รูปที่ 4.30 คุณสมบัติกลศาสตร์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์สูตรที่ 14 ถึงสูตรที่ 17	76
รูปที่ ค.1 ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางผสม	96

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น มีความยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อการฉีกขาดและการขัดสีได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการใช้ยางธรรมชาติในหลากหลายอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติยังมีสมบัติด้อยที่สำคัญคือมีความต้านทานการสึกหรอและเสื่อมสภาพต่ำ [1] ซึ่งแนวทางหนึ่งที่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นเพื่อเพิ่มความหลากหลายในการนำยางธรรมชาติไปใช้งานคือการผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ [2-8] โดยชนิดของพอลิเมอร์ที่เลือกนำมาผสมนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการนำไปใช้งาน เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์มอพลาสติกเรซินมีสมบัติที่ดีด้านความแข็งตึง (Stiffness) แต่ยังคงมีความยืดหยุ่น (Elastic properties) และการคืนตัว (Resilience) ของยางธรรมชาติอยู่ หรือยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เช่น ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile Butadiene Rubber) มีสมบัติที่ดีด้านการทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เป็นต้น

ในกระบวนการผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ความเหนียวและระบบการวัลคาไนซ์เป็นปัจจัยที่สำคัญ นอกจากนี้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญโดยความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์และยางธรรมชาตินั้น ต้องมีความใกล้เคียงกันจึงสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ [9, 10] หากพอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันอาจเป็นเหตุให้สมบัติเชิงกลต่ำลงเนื่องจากไม่มีการยึดเกาะที่ระหว่างเฟสที่เกิดขึ้น ซึ่งปัญหานี้ อาจแก้ไขได้โดยการใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ (Compatibilizer) เพื่อเชื่อมระหว่างพื้นที่ผิวที่ผิวงค์ประกอบต่างกันและลดพลังงานระหว่างผิว (Interfacial energy) ลง ทำให้การยึดติดระหว่างพื้นผิว (Interfacial adhesion) ดีขึ้น [2, 3, 8] โดยสารเสริมสภาพเข้ากันได้ อาจเป็นได้ทั้งกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft copolymer) และบล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymer) [11-12]

การศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมมีหลายวิธี เช่นการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic technique) [4, 5] การวิเคราะห์ความหนืดของพอลิเมอร์ผสม (Viscometry technique) [7] การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal analysis เช่น DSC, DMA) เป็นต้น [2, 4, 5]

โครงการวิจัยนี้มุ่งศึกษาการกราฟต์ 1, 2-ฟีนิลีนไดเอมีน (1, 2-Phenylenediamine, PDA) และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride, MA) บนยางธรรมชาติ แล้วทำการวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์โดยใช้เทคนิค FTIR ยางธรรมชาติกราฟต์ที่เตรียมได้นี้ถูกใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

ได้ของการผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ การศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมนี้ ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงความร้อน การดูดซับตัวทำละลาย สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมและสัญญาณวิทยา

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เป็นยางธรรมชาติกราฟต์ โดยใช้มอนอเมอร์สองชนิด คือ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์
2. ศึกษาผลของการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ในการผสมยางธรรมชาติกับยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้โดยการกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ บนยางธรรมชาติ
2. วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง FTIR และหาค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกราฟต์บนยางธรรมชาติระหว่าง 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์
4. ศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติและฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่เหมาะสม
5. ศึกษาผลของการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ที่มีต่อสมบัติของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ ดังนี้
  - สมบัติเชิงความร้อน
  - สมบัติเชิงกล
  - การดูดซับตัวทำละลาย
  - สัญญาณวิทยา

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ด้วยการกราฟต์มอนอเมอร์ 2 ชนิดคือ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ บนยางธรรมชาติ ที่ปริมาณ PDA และ MA 5 ค่า คือ 1, 2, 3, 5 และ 10 phr ตามลำดับ
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้เครื่อง FTIR
4. วิเคราะห์ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ด้วยวิธีการสกัดร้อน
5. เตรียมการผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ 9 ค่าคือ 100:0, 90:10, 75:25, 60:40, 50:50, 40:60, 25:75, 10:90 และ 0:100 โดยไม่มีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้
6. เตรียมการผสมยางธรรมชาติ ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ และสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่อัตราส่วนส่วนต่างๆ คือ 2, 4, 6 และ 8 phr ตามลำดับ
7. ศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงความร้อน การดูดซับตัวทำละลาย สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมและฐานฐานวิทยา
8. วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้

สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ให้ดีขึ้นโดยการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่เป็นยางธรรมชาติกราฟต์ ส่งผลให้ยางธรรมชาติให้มีสมบัติดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าและประโยชน์การนำไปใช้งานที่กว้างขวางขึ้นในอุตสาหกรรมให้แก่ยางธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [10, 13-16]

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชชนิดหนึ่งที่สำคัญของประเทศไทย ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ลักษณะของน้ำยางที่ได้เป็นสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนมมีกลิ่นหอมเล็กน้อย ประกอบด้วยอนุภาคยางเล็กๆแขวนลอย อยู่ในน้ำในลักษณะอิมัลชัน (Emulsion) มีเนื้อของแข็งอยู่ร้อยละ 30 ถึง 40 ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาล การนำยางธรรมชาติไปใช้งานมีอยู่ 2 รูปแบบคือ รูปแบบน้ำยาง และรูปแบบยางแห้ง ในรูปแบบน้ำยางนั้น น้ำยางสดจะถูกนำมาแยกน้ำออกเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเนื้อยางขั้นตอนหนึ่งก่อนด้วยวิธีการต่าง ๆ แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือการใช้เครื่องเซนตริฟิวส์ ในขณะที่การเตรียมยางแห้งนั้น มักจะใช้วิธีการใส่กรดอะซิติกลงในน้ำยางสด การใส่กรดอะซิติกเจือจางลงในน้ำยางทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน เกิดการแยกชั้นระหว่างเนื้อยางและน้ำ ส่วนน้ำที่ปนอยู่ในยางจะถูกกำจัดออกไปโดยการรีดด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้ง วิธีการหลัก ๆ ที่จะทำให้ยางแห้งสนิทมี 2 วิธีคือ การรมควันยาง และการทำยางเครพ แต่เนื่องจากยางผลิตได้มาจากแหล่งที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องมีการแบ่งชั้นของยางตามความบริสุทธิ์ของยางนั้น ๆ

##### 2.1.1 น้ำยาง [10, 13]

น้ำยางมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนมหรือสีครีมเล็กน้อย มีความหนาแน่นระหว่าง 0.975 ถึง 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าพีเอชตั้งแต่ 6.5 ถึง 7.0 น้ำยางมีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์ (Colloid solution) ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Hydrosol) แต่มีลักษณะพิเศษ คือโมเลกุลของน้ำยางมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่สมบัติส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นกว่า นอกจากนี้น้ำยางยังประกอบด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่สารพวกโปรตีน กรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น

##### 2.1.2 ยางแห้ง [16]

ยางแห้งได้จากการนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ แล้วทำการไล่ความชื้นเพื่อป้องกันเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

- 1) **ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)** ทำการแปรรูปจากน้ำยางสดเป็นยางแผ่นรมควัน โดยนำแผ่นยางดิบที่ได้มาอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60 – 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 – 3 วัน เพื่อลดความชื้นในแผ่นยาง ซึ่งการแบ่งชั้นของยางนั้นจะดูด้วยสายตา โดยพิจารณาจาก ขนาด รูปร่าง ความหนา สี เชื้อราบนแผ่นยาง ความชื้น สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น
- 2) **ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air-Dried Sheet, ADS)** มีขั้นตอนการผลิตเหมือนยางแผ่นรมควันทุกประการ ยกเว้นทำให้แห้งโดยไม่ต้องรมควัน และไม่ต้องทำการเติมสารอื่นนอกเหนือไปจากสารที่ได้รับการยกเว้น เช่น สารฟอกสีโซเดียมไบซัลไฟท์และสารกันเชื้อราพาราไนโตรฟินอล
- 3) **ยางเครพ (Crepe Rubber)** เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดด้วยเครื่องรีดยางสองลูกกลิ้ง โดยทั่วไปเรียกว่าเครื่องเครพ จะมีการใช้น้ำในการทำความสะดวกในระหว่างการรีด เพื่อนำสิ่งสกปรกออกจากยางในขณะรีดยางหลังจากรีดในเครื่องเครพแล้วจะนำยางไปผึ่งแห้ง หรืออบแห้งด้วยลมร้อน ยางเครพที่ได้จะมีสีค่อนข้างเข้ม และมีหลายรูปแบบ เช่น ยาง Brown crepe, Flat bark crepe , Skim crepe และ Blanket crepe เป็นต้น ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ส่วนยางเครพขาวเป็นยางเครพที่ได้มาจากน้ำยางที่มีการกำจัดสารเกิดสีในน้ำยางคือ สารเบต้าแคโรทีน ซึ่งมีสีเหลืองอ่อน โดยการฟอกสียางให้มีสีขาวด้วยสารเคมี ก่อนการทำให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนด้วยกรด ยางเครพขาวเป็นยางที่มีคุณภาพและราคาค่อนข้างสูง
- 4) **ยางแท่ง (Block Rubber)** ยางแท่งเป็นยางที่ทำจากน้ำยางและเศษก้อนยาง โดยทำให้ยางเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาอบด้วยความร้อนให้แห้งต่อจากนั้นจึงอัดเป็นแท่ง ยางแท่งเป็นยางที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐานมีการใช้เครื่องจักรเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต บรรจุหีบห่อทันสมัยสะดวกในการขนส่งและใช้งาน ยางแท่งของประเทศไทยมีชื่อเรียกว่า เอส ที อาร์ (STR, Standard Thai Rubber) สมบัติที่ใช้ระบุเป็นคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง ตามตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 คุณภาพของยางแท่ง เอส ที อาร์ ชนิดต่างๆ [16]

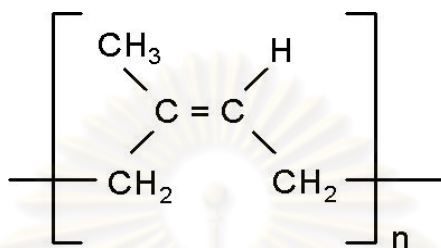
สมบัติ	ชั้นยาง เอส ที อาร์							
	เอ็กซ์ แอล	5 แอล	5	5 ซีวี	10	10 ซีวี	20	20 ซีวี
เปอร์เซ็นต์ผง (กรอง 325 เมช) ไม่เกิน	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
เปอร์เซ็นต์เถ้า ไม่เกิน	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.50	0.80
เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ไม่เกิน	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
เปอร์เซ็นต์สิ่งระเหย ไม่เกิน	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ดัชนีความอ่อนตัว ไม่เกิน	60	60	60	60	50	50	40	40
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ไม่ต่ำกว่า	35	35	30	-	30	-	30	-
สียางเทียบโดยไลวบอนด์ไม่เกิน	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
รหัสชั้นสี	น้ำเงิน อ่อน	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	เขียว	น้ำตาล	น้ำตาล	แดง	แดง

- 5) **ยางแท่งรูปแบบอื่นๆ** นอกจากรูปแบบต่าง ๆ ของยางธรรมชาติดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ยางธรรมชาติยังสามารถผลิตให้อยู่ในรูปแบบอื่นๆ ได้อีกเช่น ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่หรือยาง CV (Constant Viscosity) ยางที่แปรรูปได้ดี (Superior Processing Rubber, SP/PA grade) ยางที่ผสมน้ำมัน (Oil Extended Natural Rubber, OENR) ยาง ENR (Epoxidized Natural Rubber) ยางธรรมชาติที่มีโปรตีนต่ำ (Deproteinized Natural Rubber, OPNR) ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic NR) และยางผง (Powdered Rubber) เป็นต้น

## 2.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ [17]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า Cis-1,4-polyisoprene ( $C_5H_8$ )<sub>n</sub> โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15 ถึง 20,000 มีสูตรโครงสร้างและสมบัติโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางธรรมชาติจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำ

หรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง



รูป 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ [17]

ตาราง 2.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [10, 13]

สมบัติ	ปริมาณ
ความหนาแน่น	0.975 – 0.980 กรัม / มิลลิลิตร
pH	6.5 – 7.0
ความหนืด	ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ , อายุ , ฤดูและวิธีการรีดยาง เป็นต้น
ความร้อนในการเผาไหม้	10700 แคลอรี / กรัม
ค่าการนำความร้อน	0.00032 แคลอรี / (วินาที เซนติเมตร องศาเซลเซียส)
ความถ่วงจำเพาะ	0.915 – 0.930
จุดอ่อนตัว	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิการใช้งาน	- 55 ถึง 70 องศาเซลเซียส
ความยืดหยุ่น	สูง
ความทนทานต่อแรงดึง	สูง
การละลาย	ละลายได้ดีในตัวทำละลายไม่มีขั้ว
ความทนกรด – ด่าง	ทนกรด – ด่างอ่อน แต่ ไม่ทนกรด - ด่างแก่
การนำไฟฟ้า	ต่ำมาก

### 2.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [10, 17]

ยางธรรมชาติมีสมบัติที่เยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น ในด้านความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง ยางธรรมชาติสามารถทนต่อการฉีกขาดได้ดีทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

ความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปและจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางจะกลับคืนรูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น ประการสุดท้ายยางธรรมชาติสามารถทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง แต่ยังคงต่ำกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

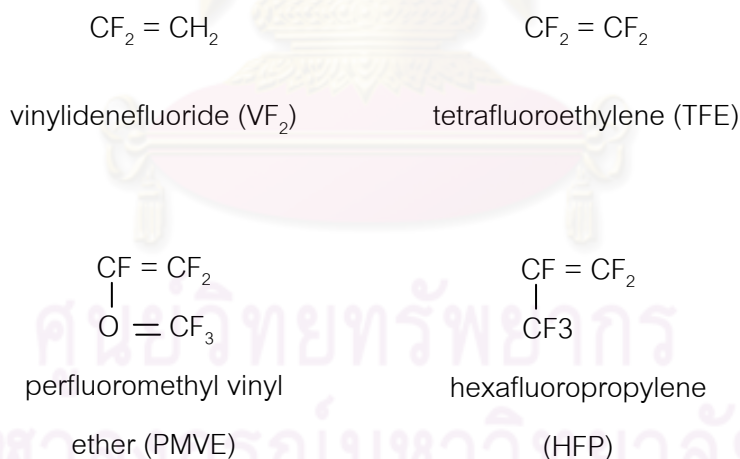
### 2.4 ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Fluoroelastomers, FPM หรือ FKM) [10, 18-23]

ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล ทำให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้งและมีความเสถียรสูงมาก ทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพอากาศ ความร้อน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลวไฟ และสารเคมีต่างๆ ได้ดีเยี่ยม ถึงแม้ว่ายางชนิดนี้จะทนสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี แต่ไม่ควรนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้ง เช่น คีโตน อีเธอร์ และเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สารประกอบเอมีน กรดไฮโดรฟลูออริก และกรดคลอโรซัลโฟนิกที่ร้อน น้ำร้อนและไอน้ำเมทานอล และน้ำมันเบรกที่มีไกลคอล เป็นองค์ประกอบ ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีหลายเกรดแตกต่างกันตามโครงสร้างทางเคมีและปริมาณของฟลูออรีนในยาง การใช้งานค่อนข้างจำกัดเนื่องจากยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก มักนำไปผลิตปลอกหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความทนทานต่อความร้อน โอโซน สารเคมี และเปลวไฟสูงเป็นพิเศษ

ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Fluoroelastomers หรือ Fluorocarbon elastomers) มีชื่อย่อตามมาตรฐาน ASTM D1418 ว่า FKM ซึ่งเป็นรู้จักกันกว้างขวางกว่าชื่อย่อตามมาตรฐาน ISO 1629 (1987) ที่เรียกว่า FPM บริษัท Dupont ได้พัฒนาและนำ FKM ที่ชื่อทางการค้าว่า Viton ออกสู่ตลาดในปี 1957 ซึ่งเป็นเกรดที่เรียกว่า Dipolymer (Copolymer) ระหว่าง hexafluoropropylene (HFP) กับ vinylidene fluoride (VF<sub>2</sub>) โดยบริษัท Dupont ได้กำหนดเป็น A-Type เพื่อสนองความต้องการของอุตสาหกรรมด้านยานอวกาศในขณะนั้นที่ต้องการยางกันซึม (Rubber seals) ที่มีประสิทธิภาพในการทนความร้อนสูง

#### 2.4.1 โครงสร้าง การผลิต และสมบัติของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ [10,18, 23]

โครงสร้างของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีมอนอเมอร์ที่มีพันธะ C-F มากกว่า C-H จึงทำให้มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณสูงซึ่งฟลูออรีนนอกจากทำให้ยางมีความเป็นขั้วแล้วยังทำให้ยางมีความเสถียรสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานพันธะของ C-F (442 กิโลจูลต่อโมล) มีค่าสูงกว่าพลังงานพันธะของ C-H (377 กิโลจูลต่อโมล) มาก จากรูปที่ 2.2 แสดงชนิดของมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการผลิตยางชนิดนี้

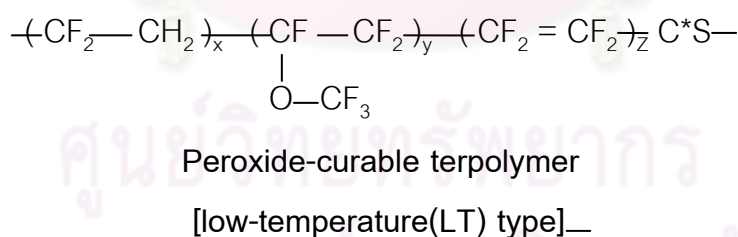
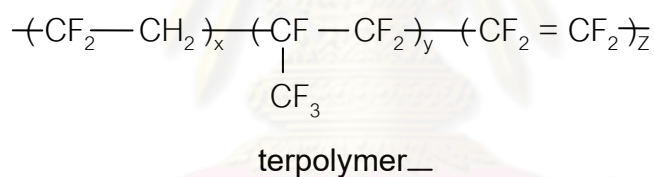
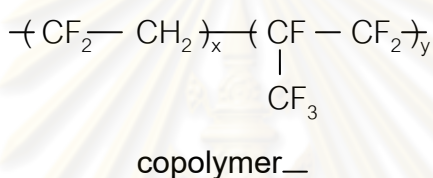


รูป 2.2 ชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ [10]

ในอดีต ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ใช้ชื่อเรียกอย่อว่า CFM แต่ปัจจุบันนิยมใช้ชื่อย่อว่า FKM (ตามมาตรฐาน ASTM) หรือ FPM (ตามมาตรฐาน ISO) อย่างไรก็ตาม ยางชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อทางการค้าว่า ไวตัน (Viton) ซึ่งมีหลายเกรดแตกต่างกันตามโครงสร้างทางเคมี (รูปที่ 2.3) และตามปริมาณของฟลูออรีนในยาง (ตารางที่ 2.3)

ตาราง 2.3 ปริมาณของฟลูออรีนและไฮโดรเจนในฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ชนิดต่าง ๆ [10]

ชนิดของพอลิเมอร์	มอนอเมอร์ที่ใช้	ปริมาณฟลูออรีน (%)	ปริมาณไฮโดรเจน (%)
Copolymer	VF-HFP	66	1.9
Terpolymer	VF-HFP-TFE	68	1.4
Tetrapolymer	VF-HFP-TFE-CS	70	1.1
LT tetrapolymer	VF-PMVE-TFE-CS	67	1.1



C\*S = cure site monomer [e.g., trifluoro-monobromo-ethylene]

รูป 2.3 ชนิดของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ [10]

ยางชนิด Terpolymer สามารถทนต่อของเหลวและสารเคมีได้ดีกว่ายางชนิด Copolymer ซึ่งความทนทานต่อสารเคมีจะสูงขึ้นถ้าเพิ่มปริมาณของฟลูออรีนที่มีอยู่ในโมเลกุล (แต่จะทำให้สมบัติของ

ยางที่อุณหภูมิต่ำเสียไป) ยางเกรดที่มี PMVE จะมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้นในขณะที่สมบัติ อื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่ยางเกรดนี้จะมีราคาสูงกว่ายางเกรดอื่น ๆ

#### 2.4.2 ชนิดของไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ [10,18,23]

ไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ฟลูออรีนที่เป็นองค์ประกอบในไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (ตารางที่ 2.4) มีดังนี้

1. **ชนิด A** เป็นไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่มีปริมาณฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 66 เป็น Dipolymer (Copolymer) ระหว่าง hexafluoropropylene (HFP) กับ Vinylidene fluoride (VF<sub>2</sub>) มีลักษณะทางโครงสร้างเป็น VF<sub>2</sub>-HFP-VF<sub>2</sub> โดยมีชื่อทางการค้าคือ Viton A200, Viton A401C, Viton A500 เป็นต้น
2. **ชนิด B** เป็นไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่มีปริมาณฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 68 เป็น Terpolymer ของ tetrafluoroethylene (TFE), hexafluoropropylene (HFP) และ vinylidene fluoride (VF<sub>2</sub>) มีลักษณะทางโครงสร้างเป็น VF<sub>2</sub>-HFP-TFE โดยมีชื่อทางการค้าคือ Viton B 70N เป็นต้น
3. **ชนิด F** เป็นไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่มีปริมาณฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 70 เป็น Terpolymer ของ tetrafluoroethylene (TFE), hexafluoropropylene (HFP) และ vinylidene fluoride (VF<sub>2</sub>) เหมือนกับชนิด B แต่มีการเพิ่ม Cure Site Monomer, CSM เข้าไปในปริมาณน้อยๆ ซึ่ง CSM ที่เพิ่มเข้าไปทำให้สามารถใช้ระบบ Peroxide cure ได้ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในด้านการทนต่อสารเคมีต่าง ๆ ได้สูงกว่าชนิด B และ A ซึ่งไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ชนิด F จะมีลักษณะทางโครงสร้างเป็น VF<sub>2</sub>-HFP-TFE-CSM โดยมีชื่อทางการค้าคือ Viton GF600S เป็นต้น

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเกรดพิเศษ เพื่อให้ยางมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงขึ้นไปอีก ได้แก่ Viton GLT grade, Viton VTR 9217, Viton VTR 9207 เป็นต้น



ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของไวตันฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ชนิดต่างๆ [10, 18, 23-26]

สมบัติ	Viton® A	Viton® B	Viton® F
ฟลูออรีน (%)	66	68	70
รูปแบบ	เม็ด, แท่ง, แผ่น	เม็ด, แท่ง, แผ่น	เม็ด, แท่ง, แผ่น
สี	ขาว	ขาว	ขาว
กลิ่น	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
การละลายน้ำ	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
ความถ่วงจำเพาะ	1.77 – 1.86	1.77 – 1.86	1.89 – 1.91
ความแข็ง (shore A)	75 ± 5	75 ± 5	75 ± 5
Tensile Strength	< 1600 psi	> 1400 psi	> 2000 psi
ระยะยืด	165 %	> 175 %	> 175 %
อุณหภูมิการใช้งาน	-18 °C ถึง 204 P°C	-18 °C ถึง 220 °C	-18 °C ถึง 220 °C

### 2.4.3 สมบัติทั่วไปของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ [10]

1) **สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)** ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางไดอีนชนิดอื่น ๆ มาก ค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กล่าวคือ ค่าความทนทานต่อแรงดึงและความแข็งของยางจะลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ๆ โดยทั่วไปฟลูออโรอีลาสโตเมอร์จะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 50 ถึง 95 Shore A (ส่วนใหญ่จะมีความแข็งประมาณ 70 Shore A) นอกจากนี้ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ยังมีค่าความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ

2) **ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging properties)** ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีความทนทานต่อความร้อนสูงที่สุดในบรรดายางทั้งหมด จึงสามารถนำยางชนิดนี้ไปใช้งานในที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ นอกจากนี้โมเลกุลของยางชนิดนี้ยังประกอบไปด้วยพันธะที่อึดตัวหมด (ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) ดังนั้นยางชนิดนี้จึงทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซนได้เป็นอย่างดี

3) **ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and chemical resistance)** แม้ว่ายางชนิดนี้จะทนต่อการบวมพองในน้ำมันร้อน น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเชื้อเพลิง ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ กรด และ สารเคมีต่าง ๆ ได้ดีเป็นพิเศษ แต่ไม่ควรนำยางชนิดนี้มาใช้งานในกรณีที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีดังต่อไปนี้

1. ตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น คีโตน อีเทอร์ และเอสเทอร์ (โดยเฉพาะสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ)
2. กรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก
3. น้ำร้อนและไอน้ำ (ยกเว้นในกรณีที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ลงไปในยาง)
4. เมทานอล (ยกเว้นในกรณีที่มีปริมาณฟลูออรีนสูงมาก ๆ)
5. น้ำมันเบรคที่มีไกลคอลเป็นองค์ประกอบ
6. กรดไฮโดรฟลูออริกและกรดคลอโรซัลโฟนิกที่ร้อน
7. ต่างและสารประกอบเอมีน เพราะต่างจะทำให้ยางแข็ง เปราะ และมีรอยแตกได้ง่ายโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง

#### 4) ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสี (Radiation resistance)

ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์สามารถทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากรังสีที่มีพลังงานสูงได้ถึง  $10^6$  Rad

5) การซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก

6) ความเป็นฉนวน (Insulation) ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีความเป็นฉนวนปานกลาง แต่ก็เพียงพอสำหรับการผลิตปลอกหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล

7) สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแข็งเปราะค่อนข้างสูง (ประมาณ  $-18$  องศาเซลเซียส) แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาชนิดนี้ให้มีอุณหภูมิต่ำที่ทำให้เกิดการแข็งเปราะลดต่ำลงจนถึง  $-40$  องศาเซลเซียส

8) อุณหภูมิของการใช้งาน (Service temperature) นอกจากฟลูออโรอีลาสโตเมอร์จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมสูงเป็นพิเศษแล้ว ยางชนิดนี้ยังรักษาสมบัติความยืดหยุ่นไว้ได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ จึงมีอุณหภูมิของการใช้งานสูงถึง  $200$  องศาเซลเซียส และบางครั้งยังสามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง  $300$  องศาเซลเซียส (ถ้าอย่างถูกใช้งานที่อุณหภูมินี้ในระยะเวลาดสั้น ๆ) สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำนั้น ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์สามารถนำไปใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำถึง  $-20$  องศาเซลเซียส

#### 2.4.4 การผสมเคมีของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ [10, 19-20]

ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีระบบการคงรูปที่แตกต่างจากยางชนิดอื่น ๆ สารคงรูปที่นิยมใช้ในอดีต ได้แก่ สารประกอบของไดเอมีน (Diamine) เช่น Hexamethylenediamine carbamate ร่วมกับตัวจับกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการคงรูป เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือ ตะกั่วออกไซด์ (PbO) เป็นต้น แม้ว่าระบบการคงรูปด้วยไดเอมีนจะทำให้ยางสามารถยึดติดกับโลหะได้ดี แต่ระบบการคงรูปดังกล่าวทำยางคงรูปก่อนเวลาได้ง่ายและสมบัติของยางคงรูปที่ได้ค่อนข้างต่ำ ปัจจุบันจึงนิยมนำระบบการคงรูปด้วย Bisphenol AF ร่วมกับตัวจับกรด MgO กับ  $\text{Ca(OH)}_2$  มาใช้แทน เพราะระบบนี้ นอกจากจะช่วยลดโอกาสของการเกิดยางที่คงรูปก่อนเวลาแล้ว ยางคงรูปที่ได้ยังมีค่า Compression set ต่ำ และมีสมบัติเชิงกลที่ดีอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถแกะยางคงรูปออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย แต่ยางคงรูปที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบนี้จะไม่ทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีการผสมกับสารประกอบที่ทำให้คงตัว (Stabilizer) ในกลุ่มเอมีนลงไป

ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เกรดที่มีปริมาณฟลูออรีนสูงๆ สามารถคงรูปได้ด้วยเปอร์ออกไซด์ซึ่งยางคงรูปที่ได้สามารถทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีสารประกอบกลุ่มเอมีนหรือเอทานอลเป็นองค์ประกอบได้ดีด้วยเหตุนี้ ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์จึงนิยมใช้กันแพร่หลายมากขึ้น เปอร์ออกไซด์ที่ใช้กันมากในการคงรูปฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ได้แก่ Peroxycarbamate นอกจากนี้ การคงรูปด้วยระบบนี้ยังต้องการเติมสารกระตุ้นและตัวจับกรดลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม การใช้เปอร์ออกไซด์อาจทำให้ยางคงรูปเหนียวติดแม่พิมพ์ได้ การเติมไซ เช่น Carnauba wax ก็อาจช่วยบรรเทาปัญหาดังกล่าวได้

เนื่องจากในระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ พันธะการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นพันธะระหว่าง C-C เหมือนกรณีที่เกิดขึ้นในยางชนิดอื่น ๆ แต่การเชื่อมโยงจะเกิดผ่านสารกระตุ้นร่วมที่ใช้ ดังนั้นในพันธะเชื่อมโยง (Bridge) จึงมีไฮโดรเจนอยู่ ทำให้การคงรูปด้วยระบบนี้มีความเสถียรต่อความร้อนและต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำกว่าระบบการคงรูปด้วย Bisphenol A หรือ Bisphenol AF ด้วยเหตุนี้ การเลือกใช้สารกระตุ้นร่วมก็เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเช่นกัน เช่น การใช้ Triallyl isocyanate (TAIC) ทำให้ยางคงรูปที่ได้มีค่า Compression set ต่ำกว่าการใช้ Triallyl cyanate (TAC)

นอกจากนี้ การเลือกใช้ตัวจับกรดก็เป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปหากต้องการยางที่ทนต่ออากาศร้อนได้ดีก็สามารถใช้ MgO และ CaO ได้ แต่ถ้าหากยางคงรูปต้องสัมผัสกับกรดที่ร้อนก็ควรใช้ PbO เป็นตัวจับกรดแทน สำหรับในกรณีที่ยางคงรูปต้องสัมผัสกับน้ำร้อนหรือไอน้ำก็ควรใช้ Dibasic Pb-phosphite ร่วมกับ ZnO

การเติมเขม่าดำเกรดที่ไม่เสริมแรงลงไปนอกจากจะสามารถช่วยลดต้นทุนแล้ว ยังช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตรวมถึงสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยางคอมพาวด์จะแข็งตัวอย่างรวดเร็วหลังการผสม ดังนั้นจึงสามารถเติมสารตัวเติมลงไปได้ในปริมาณที่เล็กน้อยเท่านั้น

(โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10-30 Phr) ฟลูออโรอีทิลีนโพรพิลีนไม่สามารถเข้ากันได้กับสารทำให้ยางนิ่มที่ใช้กันโดยทั่วไป ดังนั้นในกรณีที่ต้องการปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิตก็สามารถทำได้โดยการเติม Carnauba wax หรือเติมพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกันกับ Vinylidene fluoride/Hexafluoro propylene (VF<sub>2</sub>/HFP)

ภายหลังการคงรูป การทำการบ่มเร่งภายหลังการคงรูป (Post-curing) ก็เป็นสิ่งที่จำเป็นกับยางชนิดนี้ โดยทั่วไปจะนำยางคงรูปที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ยางเกิดการคงรูปได้อย่างสมบูรณ์และมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงซึ่งส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีค่า Compression set ต่ำ

#### 2.4.5 การใช้งาน [10]

ยางฟลูออโรคาร์บอนสามารถใช้ในการผลิตปลอกหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิล โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความทนทานต่อความร้อน โอโซน สารเคมีและเปลวไฟสูงเป็นพิเศษ นอกจากนี้ยังสามารถนำยางชนิดนี้ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ ได้แก่ ท่อน้ำมัน เชื้อเพลิง ยางไอรัง ปะเก็น ยางซีล เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานของยางชนิดนี้ค่อนข้างจำกัดเนื่องจากยางชนิดนี้มีราคาแพง

#### 2.5 การผสมยาง (Blending) [27-29]

Blending คือ การผสมกันของวัตถุดิบ เช่น ยาง โดยยังไม่ทำการบดผสมกับสารเคมี การผสมยางทำได้หลายวิธี ได้แก่ผสมในสถานะของน้ำยาง ในสถานะของสารละลายยาง หรือผสมในสถานะน้ำยางร่วมกับสารละลายยาง การผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical) การผสมโดยใช้เครื่องมือกลร่วมกับสารเคมี (Mechanochemical) และการผสมในสถานะของยางผง (Powdered or particulate form) เป็นต้น

ยางผสมชนิดต่างๆ ส่วนใหญ่มีสมบัติที่ต้องการไม่ครบถ้วน ยางผสมแต่ละชนิดอาจขาดสมบัติบางอย่างที่การผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ต้องการ เช่น

ผสม EPDM กับยางธรรมชาติ	เพื่อปรับปรุงความทนต่อโอโซนของยางธรรมชาติ
ผสม BR กับยางธรรมชาติ	เพื่อปรับปรุงความทนต่อการสึกกร่อนของยางธรรมชาติ
ผสม NBR กับ SBR	เพื่อปรับปรุงความทนน้ำมันของ SBR
ผสม NR กับ SBR	เพื่อปรับปรุงสมบัติการเกาะติด (Tack) ของ SBR
ผสม ACR กับยางธรรมชาติ	เพื่อลดต้นทุนการผลิต

ดังนั้นจึงเป็นผลให้เกิดการผสมยางตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เพื่อให้สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ต้องการอย่างครบถ้วน และการผสมยางยังช่วยแก้ปัญหาเรื่องราคาได้ด้วย

วิธีที่สะดวกในการใช้งานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมยาง คือใช้วิธีผสมโดยใช้เครื่องมือกล ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ เครื่องบดผสมแบบระบบเปิด (Open mill – two roll mills) หรือเครื่องบดผสมแบบระบบปิด (Internal mixers) โดยการผลิตยางนี้อาจใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์ หรือใช้ยางสังเคราะห์ผสมกับยางสังเคราะห์ก็ได้

### 2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมยาง

- อัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสม (polymer ratio)
- ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์
- การยึดเกาะบริเวณพื้นผิว (Interfacial adhesion) และพันธะการเชื่อมขวาง (crosslinking)
- การกระจายตัวของสารตัวเติมภายในยาง
- การกระจายตัวของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ภายในยาง
- การกระจายตัวของสารเชื่อมต่อกันภายในยาง

ปัจจัยอื่นที่มีผล ได้แก่ ค่าความหนืด และ ความแตกต่างทางด้านความมีขั้วของยางแต่ละชนิด

### 2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างของยางผสม

2.5.2.1 **วิธีการผสมและสภาวะที่ใช้ในการผสม** ยางที่ผสมในรูปของลาเทกซ์ ในรูปของสารละลายหรือในรูปของยางแห้งจะเกิดการแยกตัวไม่เท่ากัน และมีขนาดของภูมิภาคไม่เท่ากัน ในการผสมในรูปของยางแห้งสามารถใช้กับเครื่องผสมแบบลูกกอล์ฟหรือเครื่องผสมแบบปิด หลังจากการผสมการเข้ากันของยางและขนาดของภูมิภาค ขึ้นกับ

1. **แรงบด** ถ้าแรงบดสูง ภูมิภาคจะมีขนาดเล็กลง
2. **ความหนืดของยางที่ผสม** ยางที่มีความหนืดใกล้เคียงกันจะผสมเข้ากันได้ดีกว่า ส่วนยางที่มีความหนืดต่ำมักจะเป็นภูมิภาคต่อเนื่อง

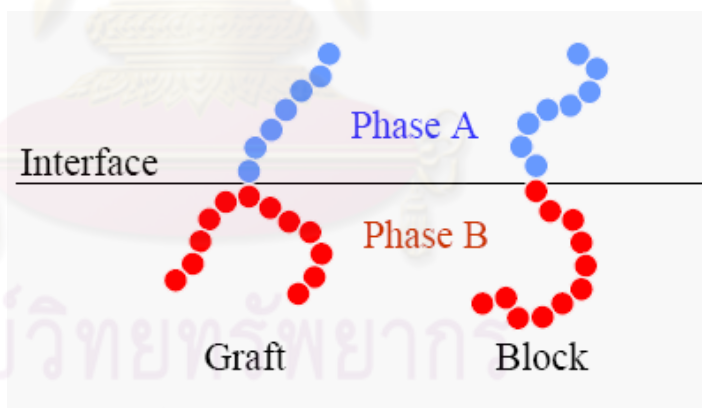
3. **อุณหภูมิที่ผสม** ปกติถ้าอุณหภูมิที่ผสมยางสูงขึ้น ยางจะผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

4. **เวลาที่ใช้ผสม** ถ้าใช้เวลายาวนานขึ้น ยางผสมจะเข้ากันได้ดีขึ้น และมีขนาดของวิฏภาคเล็กลงแต่จะลดลงถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง

2.5.2.2 **การใช้สารช่วยการผสม (compatibilizer)** ช่วยให้ยางผสมเข้ากันได้เร็วขึ้นและดีขึ้น (ขนาดวิฏภาคลดลง) มีสองชนิดดังนี้

1. **Homogeniser** เป็น resin ผสม (ไม่ทราบส่วนผสมชัดเจน) ช่วยให้ยางผสมเข้ากันได้เร็วขึ้นและดีขึ้น และอาจช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางในแต่ละวิฏภาคได้ดีขึ้นด้วย

2. **Block copolymer / graft copolymer** [28, 30] โดยที่ Block copolymer ประกอบด้วยโซ่สั้น ๆ ของบล็อกมอนอเมอร์ชนิดที่ 1 (สีฟ้า) และบล็อกมอนอเมอร์ชนิดที่ 2 (สีแดง) ต่อเชื่อมกัน ดังรูปที่ 2.4 (ด้านขวา) ส่วน Graft copolymer โคพอลิเมอร์มีมอนอเมอร์ชนิดที่ 1 (สีฟ้า) ต่อเป็นสายโซ่หลักของโมเลกุล และมอนอเมอร์ชนิดที่ 2 (สีแดง) ต่อเป็นกิ่งสั้น ๆ ออกมา ดังรูปที่ 2.4 (ด้านซ้าย)



รูป 2.4 ลักษณะของ Block copolymer / graft copolymer [28]

โดยทั่วไปแล้วโคพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ จะมีสมบัติเด่นเป็นไปตามไฮโมพอลิเมอร์ที่ประกอบเข้าเป็นโคพอลิเมอร์ ส่วนโคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบสุ่ม และแบบสลับ สมบัติของพอลิเมอร์จะอยู่ระหว่างสมบัติของไฮโมพอลิเมอร์ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดขึ้นกับอัตราส่วนของแต่ละไฮโมพอลิเมอร์ที่อยู่ในโคพอลิเมอร์

2.5.2.3 การเกิด co-crosslinking ระหว่างการวัลคาไนซ์ ในระหว่างการวัลคาไนซ์ยางผสม อาจเกิดการ crosslink ระหว่างยางต่างชนิด (co-crosslinking) มีผลให้ยางที่ผสมสามารถเข้ากันได้มากขึ้น

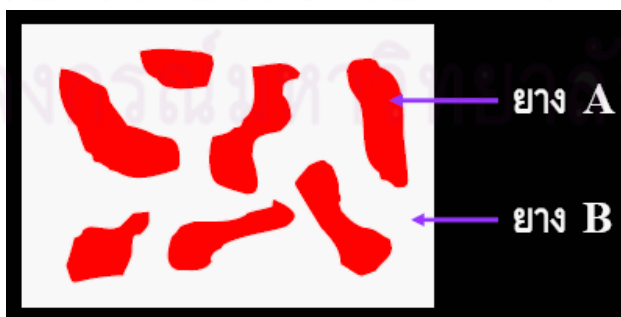
### 2.5.3 การใช้ยางผสม

ยางที่ใช้ผสมกันจะไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ โดยมียางชนิดหนึ่งกระจายอยู่ในยางอีกชนิดหนึ่งแยกเป็น 2 สถานะได้แก่ Continuous phase เป็นส่วนของยางที่เป็นพื้น matrix และ Disperse phase เป็นส่วนของยางที่เข้าไปกระจายในส่วนของ Continuous phase

เพื่อให้การกระจายของยางเกิดขึ้นได้ดีที่สุด ยางทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันควรจะมีคุณสมบัติเท่าๆกันโดยใช้เหตุผลประกอบหลายประการ เช่น เพื่อเพิ่มความสามารถในการแปรรูปของยางที่ใช้ เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการเสื่อของยาง หรือเพื่อลดต้นทุน โดยผสมยางที่มีราคาถูกกว่าเข้าไป โดยสิ่งสำคัญที่จะต้องระมัดระวังในการนำยางมาผสมกัน คือ ยางทั้งสองชนิดต้องมีการวัลคาไนซ์ไปพร้อมๆกัน

### 2.5.4 สมบัติของยางผสม

สมบัติของยางผสมขึ้นกับความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของยางที่ผสม ยางที่ผสมเข้ากันได้ (เช่น SBR/BR) สมบัติที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนักของยางที่ผสม ส่วนยางที่ผสมเข้ากันไม่ได้ (ยางผสมส่วนใหญ่) สมบัติหลักจะกำหนดโดยยางที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (ยาง B) โดยสมบัติจะลดหลั่นลงไปตามปริมาณที่ผสมอยู่ ดังรูปที่ 2.5



รูป 2.5 ลักษณะวัฏภาคของยางผสม [28]

เช่น ยางผสม NR/NBR ถ้า NBR เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง ยางผสมที่ได้จะทนน้ำมัน แต่ถ้า NR เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง ยางผสมที่ได้จะไม่ทนน้ำมัน นอกจากนี้การยึดติดกันระหว่างยางในวัสดุภาคต่างๆ มีผลต่อสมบัติของยางผสมด้วย

### 2.5.5 ปัญหาการใช้ยางผสม [28]

2.5.5.1 เกิดจากการที่ยางแยกตัวเป็นวัสดุภาค เนื่องจากการวัลคาไนซ์ของยางในแต่ละวัสดุภาคไม่สมดุล หรือสารตัวเติม (เสริมแรง) กระจายตัวในยางแต่ละวัสดุภาคไม่เท่ากัน หรือไม่เป็นไปตามต้องการ ทำให้สมบัติด้อยลง

2.5.5.2 ยางแต่ละชนิดมีสมบัติต่างกัน มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมี เช่น กับกำมะถัน/ตัวเร่ง ยางคนละชนิดในแต่ละวัสดุภาคสุดท้าย (cure) ไม่เท่ากัน หรือไม่เป็นไปตามต้องการ รวมไปถึงความชอบสารเคมียาง / สารตัวเติม การกระจายตัวของสารเคมี / สารตัวเติม ในยางแต่ละวัสดุภาคไม่เท่ากัน (กำมะถัน, ตัวเร่ง, เขม่าดำ, ซิลิกา ฯลฯ)

## 2.6 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Manufacturing Process) [15, 17]

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ คือ การออกสูตรยาง (Compounding design) การผสมยางกับสารเคมี (Mixing) การขึ้นรูปยาง (Forming) และการทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing)

### 2.6.1 การออกสูตรยาง (Compounding design)

การออกสูตรยางเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ ดังนี้



1. **ยาง (rubber)** การออกสูตรยางจะต้องรู้สมบัติของยางแต่ละชนิดเป็นอย่างดี กล่าวคือ ต้องรู้ข้อดีและข้อเสียของยางที่จะนำมาใช้ เช่น ยางธรรมชาติมีข้อดีคือ มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (Pure gum) ดีมาก นั่นคือไม่ต้องเติมสารเสริมแรงก็สามารถให้ความแข็งแรงได้ดี ในขณะที่เดียวกันยาง EPDM มีความแข็งแรงของน้ำยางล้วนๆ สู้อย่างธรรมชาติไม่ได้ แต่มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและสภาพอากาศที่ดีกว่า เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการผสมยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดและยังมีผลต่อการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย
2. **สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)[17,28-32]** สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยืดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า “ คงรูป ” แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า “ ยางสุก ” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน
3. **สารป้องกันการเสื่อมของยาง (Antidegradants)[10, 33,34]** สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อลดอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยาง อันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ออกซิเจน ความร้อน แสงแดด และโอโซน เป็นต้น โดยทั่วไปอาจแบ่งออกได้เป็น Antioxidant คือ สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและสาร Antiozonant คือ สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยากับโอโซน
4. **สารตัวเติม (filler)** สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยาง เพื่อช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ให้ ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (Clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น
5. **สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing Aid)** สารตัวเติมที่ใส่ลงไปในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ เช่น การผสม (Mixing) หรือการขึ้นรูป (Shape

forming) เป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น สารบางตัวในกลุ่มนี้ช่วยลดความเหนียวของยางคอมพาวด์ ทำให้ยางไหลได้ง่ายยิ่งขึ้น จึงลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิต

6. **สารกลุ่มอื่นๆ (miscellaneous ingredients)** สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย เช่น

- **สารหน่วง (retarder)** จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้อายุที่กำลั้งบดผสมคงรูปเสียก่อน (scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วงได้แก่ benzoic acid หรือ salicylic acid เป็นต้น
- **สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)** ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางฟองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สาร sodium bicarbonate หรือ dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น
- **สารทำให้เกิดสี (pigments)** อาจเป็นสีอนินทรีย์ เช่น cadmium sulphide (ให้สีแดงเข้ม-ส้มและเหลือง) chromium oxide (ให้สีเขียวขุ่น) และ titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์ จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสีอนินทรีย์

### 2.6.2 การบดยางให้เหนียว (Mastication)

การบดยางให้เหนียว คือ การทำให้ยางซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการฉีกขาดของสายโมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง การบดยางให้เหนียวเป็นวิธีการสำคัญและมักใช้กับยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติมีความเหนียวสูงหรือแข็งเกินกว่าที่จะให้สารเคมีต่างๆ กระจายเป็นเนื้อเดียวกันได้นอกจากนี้ยังจำเป็นในด้านการผสมเข้าด้วยกัน (Blending) เพื่อเป็นการปรับค่าความเหนียว (Mooney viscosity) ของยางที่นำมาผสมกันให้มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของยางผสม สามารถทำได้โดยการบดยางล้วนๆ ในตอนเริ่มแรกโดยไม่ผสมสารเคมีใดๆ

กลไกของการบดยางให้เหนียว คือ ขณะที่ทำการบดยาง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำการตัดสายโมเลกุลยางและเกิดราดิคัล (Radical) ที่ปลายสายโมเลกุลที่ขาดออก ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงและความเหนียวจึงลดลงด้วย

### 2.6.3 การบดผสมยางกับสารเคมี

เครื่องมือที่ใช้ในการบดผสมยางกับสารเคมีในระดับโรงงานอุตสาหกรรม แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องบดผสมแบบเปิด (Open mill mixer) เช่น เครื่องบดแบบ 2 ลูกกิ้ง (Two-roll mill) แสดงดังรูปที่ 2.6 และเครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) เช่น เครื่องนวด (Kneader) แสดงดังรูปที่ 2.7 และ เครื่อง Banbury แสดงดังรูปที่ 2.8 เป็นต้น



รูป 2.6 เครื่องบดผสมระบบเปิด (Two-roll mill) [35]

เครื่องบดผสมระบบเปิด (Two-roll mill) เป็นเครื่องผสมยางระบบเปิดที่ประกอบด้วย ลูกกิ้ง 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ในการผสมยางกับสารเคมียางจะใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกิ้ง ยางจะถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกิ้งด้านหน้า จากนั้นจึงเติมสารเคมียาง โดยผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นและพับไปมา ในขณะที่เติมสารเคมีลงไปยาง ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปช่องระหว่างลูกกิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี เครื่องผสมยางแบบสองลูกกิ้งใช้ผสมยางในปริมาณไม่มาก เนื่องจากต้องอาศัยความชำนาญและกำลังของคนงานในการทำการผสม two-Roll Mill สามารถใช้สำหรับการออกแผ่นยางให้มีขนาดและความหนาตามต้องการ บางครั้งเรียกว่าเป็น Sheeting roll



รูป 2.7 เครื่องบดผสมแบบปิด (kneader) [36]

เครื่องใช้ในการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากัน แต่ลักษณะรูปแบบแตกต่างกันกับ Banbury mixer ประสิทธิภาพของ Kneader นั้นจะดีกว่า banbury ในเรื่องของ เวลาการผสม การกระจายตัว (แล้วแต่สูตรยาง และสภาวะในการผสม) ข้อดีของ Kneader ก็คือ ใช้ผสม compound ที่จะใส่ curing ได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ทำให้ compound scorch ได้ง่ายเพราะ Kneader มีความร้อนสะสมในเครื่องน้อยเหมาะกับการผสม compound ที่จะใส่ cure แต่จะไม่เหมาะสำหรับการผลิต compound ซึ่งจะทำให้เคมีบางตัวที่ต้องใช้อุณหภูมิในการผสมสูงไม่กระจายตัวและไม่หลอม และถ้าจะให้ได้ compound ที่มีคุณภาพที่ดีก็ต้องใช้เวลาในการผสมนานมาก



รูป 2.8 เครื่องบดผสมแบบปิด (banbury) [37]

เครื่องบดผสมแบบปิด (banbury) เป็นเครื่องมือผสมระบบปิดที่มีประสิทธิภาพสูง ผสมยางให้เข้ากันได้อย่างรวดเร็วและการกระจายตัวดีมาก มีขนาดของห้องผสมตั้งแต่ 1 ลิตรขึ้นไป ตามความต้องการในการใช้งาน นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมผลิต compound หรือโรงงานที่ทำเกี่ยวกับยางใหญ่ๆ เพราะผลิตได้ครั้งละมากๆ และใช้เวลาในการผลิตน้อย แต่มีข้อเสียก็คือ Banbury มีความร้อนสะสมในเครื่องมาก อุณหภูมิในการผสมจะขึ้นอย่างรวดเร็วอาจเป็นอันตรายต่อ compound บางชนิดที่มีการ scorch (หรือเรียกว่ายางตาย) ได้ง่าย

## 2.7 การขึ้นรูปยาง (forming) [15, 17]

การขึ้นรูปยางคอมพาวด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคนิคใหญ่ ๆ ได้แก่ การใช้แม่พิมพ์ (Moulding) การอัดรีดหรือการอัดผ่านตาย (Extrusion) และ การใช้เครื่องรีดแบบหลายลูกกลิ้งหรือที่เรียกว่าเครื่องคาลเ็นเดอร์ (Calendar) ปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดเทคนิคการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างคงที่ และมีความยาวมากๆ เช่น ท่อยางหรือยางขอบกระฉกรถยนต์ ก็จำเป็นต้องใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบและมีขนาดใหญ่และยาว เช่น สายพานลำเลียง ก็ควรเลือกใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเ็นเดอร์

### 2.7.1 การใช้แม่พิมพ์ (moulding)

การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง เป็นการขึ้นรูปยางพร้อมๆ กับการเกิดปฏิกิริยาครอสลิงก์ (Vulcanization) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปมีหลายแบบ ได้แก่ แบบอัด (Compression mould) แบบกึ่งฉีด (Transfer mould) และแบบฉีด (Injection mould) แม่พิมพ์แบบอัด เป็นแม่พิมพ์แบบง่าย ราคาถูก ใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำผลิตภัณฑ์ทั่วไป ลักษณะของแม่พิมพ์แบบอัด ประกอบด้วยฝา 2 ชั้นที่ยึดกันด้วยสลักฝาด้านหนึ่งจะเป็นช่องรูปร่างของผลิตภัณฑ์ซึ่งเวลาอัดยางจะใส่ยางลงในฝานี้ เมื่อนำอีกฝาหนึ่งปิดลงและวางพิมพ์ในเครื่องอัดพร้อมทั้งให้ความร้อน ยางจะไหลเต็มช่องของแม่พิมพ์ ส่วนแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดนั้นมีส่วนประกอบของแม่พิมพ์มากกว่า 2 ส่วน ยางจะถูกอัดจากส่วนของแม่พิมพ์ที่เรียกว่า Pot เข้าไปยังช่องของแม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดนี้สามารถใช้ผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนได้ แม่พิมพ์แบบฉีดเป็นแบบที่ได้รับการพัฒนามาจาก 2 แบบแรก ซึ่งจะประกอบด้วยเครื่องที่เป็นส่วนทำให้ยางนิ่มแล้วฉีดยางเข้าพิมพ์ เครื่องฉีดและแม่พิมพ์แบบนี้ราคาสูงมาก แต่จะให้อัตราเร็วในการผลิตสูง เหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนที่ซับซ้อนและมีปริมาณการผลิตสูง

### 2.7.2 การอัดผ่านตาย (extrusion)

การอัดยางผ่านตาย (die) ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอาศัยเครื่องอัดหรือต้นยาง ซึ่งเครื่องอัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่อาศัยแรงอัดจากแรม (Ram) และชนิดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของสกรู (Screw) ชนิดหลังเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและเรียกกันว่า Extruder ผลิตภัณฑ์ยางที่ขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคนี้ได้แก่ ท่อยาง ยางหุ้มสายเคเบิล และยางรัดของ เป็นต้น โดยปกติยางที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้จะต้องผ่านการอบให้ยางคงรูปในหม้ออบไอน้ำหลังจากต้นยางออกจากตายแล้ว

### 2.7.3 การใช้เครื่องรีดแบบหลายลูกกลิ้งหรือคาลเอนเดอร์ (calendar)

เครื่อง Calendar คือเครื่องที่ประกอบด้วยชุดของลูกกลิ้งจำนวน 2 หรือ 3 หรือ 4 ลูก ที่ทำจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวหน้าขัดเรียบ ปกติจะใช้เครื่อง Calendar ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบ มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอหรือเพื่อการฉาบยางบางๆ ลงบนผ้าหรือแผ่นใยลวด (Coating) ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้แก่ สายพานลำเลียง ยางแผ่นเรียบใช้ในงานปูพื้นต่างๆ เช่น ยางแผ่นปูอ่างน้ำ ยางบุถัง เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบให้คงรูปก่อนนำไปใช้งาน

## 2.8 การทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing)

การทำให้ยางคงรูปหรือทำให้ยางสุก คือการทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลหรือที่เรียกกันว่า ปฏิกิริยาคัลคาไนเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากค่อนข้างอ่อน ( มีความเป็นพลาสติกสูง) ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ปฏิกิริยาคัลคาไนเซชันต้องการอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or Curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้

## 2.9 การทดสอบสมบัติยาง [15,17,31]

การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ การทดสอบคุณภาพยางดิบ การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต (Processibility) และการทดสอบสมบัติของยางที่คงรูปแล้ว (Vulcanizate properties)

### 2.9.1 การทดสอบคุณภาพของยางดิบ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ ถ้าเป็นยางธรรมชาติจะมีการทดสอบสิ่งเจือปน ความชื้น และสารประกอบบางอย่าง เช่น ไนโตรเจน ผงเถ้า ความอ่อนตัวและดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Plasticity and plasticity retention index) ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ส่วนยางสังเคราะห์มักทดสอบค่าความหนืดมูนนี่

### 2.9.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต

สมบัติที่จำเป็น ได้แก่ ความนิ่ม-แข็งของยาง ซึ่งแสดงในรูปของค่าความหนืดมูนนี่ กรณีที่ต้องการศึกษาการไหล (Rheology) ก็ต้องใช้เครื่อง Capillary rheometer ในการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางก็จะวัดโดยใช้เครื่อง Oscillating disc rheology หรือ Moving die rheology เป็นต้น

### 2.9.3 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

สมบัติพื้นฐานของยางคงรูปที่ต้องทดสอบ ได้แก่ สมบัติการดึงยาง (Tensile properties) เช่น ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่าโมดูลัส (Modulus) และค่าความยืดสูงสุด (Elongation at break) สมบัติการทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ความแข็ง (Hardness) การหักงอ (Flex cracking) การล้าตัว (Fatigue) การต้านทานโอโซน (Ozone resistance) การกระเด็ง (Rebound resilience) ความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) การยุบตัว (Compression set) การเกิดความร้อนสะสม (Heat build-up) เป็นต้น

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.A. El-Wakil (2007) [38] ได้ทำการกราฟต์ 1,2-พีนินไดเอมีน(PDA) ลงบนยางธรรมชาติ (NR-g-PDA) เพื่อเปรียบเทียบผลการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์แล้วระหว่าง

การเติม NR-g-PDA กับสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันทางการค้า (N-isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene-diamine, IPPD) ยางกราฟต์เตรียมโดยใช้เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง ซึ่งเริ่มต้นโดยการนำยางธรรมชาติมาบดเพื่อให้ขนาดโมเลกุลเล็กลงก่อน แล้วจึงทำการผสมกับ 1,2-ฟีนิลไดเอมีนผสมให้เข้ากัน โดยยางกราฟต์ (NR-g-PDA) ที่เตรียมได้นั้น ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR เพื่อยืนยันผลการกราฟต์ 1,2-ฟีนิลไดเอมีนลงบนยางธรรมชาติ จากการทดลองพบว่า ยางกราฟต์ (NR-g-PDA) ที่เตรียมได้สามารถต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่ายางธรรมชาติที่เติม IPPD

H. Afifi และ A.A. El-Wakil (2008) [4] ทำการศึกษาผลของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีต่อความเข้ากันได้ของการผสมยางธรรมชาติ/ยางไนไตรล์ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก โดยใช้เทคนิค Ultrasonic ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (NR-g-MA) ถูกสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคสารละลาย ประกอบกับการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต NR-g-MA ที่เตรียมได้ถูกนำไปใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางไนไตรล์ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก ซึ่งเติมในช่วง 2, 4, 5, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ว่าเมื่อเติม NR-g-MA มากขึ้นส่งผลให้ยางธรรมชาติ/ยางไนไตรล์มีสภาพเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

Radhakrishnan และคณะ (2006) [3] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับพอลิไวนิลคลอไรด์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 โดยใช้โคพอลิเมอร์แบบบล็อกของยางธรรมชาติกับพอลิยูรีเทนเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่ปริมาณการเติม 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งผลของความเข้ากันได้นั้นศึกษาโดยอาศัยสมบัติความเหนียวของสารละลายและกล้องจุลทรรศน์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ต่อสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของของผสม จากการทดลองพบว่า ปริมาณโคพอลิเมอร์แบบบล็อกของยางธรรมชาติกับพอลิยูรีเทนที่เหมาะสม คือ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากให้ค่าความเหนียวที่สุดและทำให้พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ต่อเนื่องที่สุด

El-Nashar และคณะ (2001) [8] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วนปริมาณยางไนไตรล์ต่อยางธรรมชาติและปริมาณของ Tetrachoro Phthalic Anhydried (TCPA) ซึ่งเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้และทำการผสมยางด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง ยางไนไตรล์ที่ใช้มีปริมาณของ acrylonitrile 32 เปอร์เซ็นต์ การคำนวณค่าความร้อนในการผสมและค่าความหนาแน่นในการเชื่อมต่อได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยพบว่า ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ในสถานะของแข็งจะเกิดขึ้นได้เมื่อค่าความร้อนในการผสมต่ำกว่า  $41.85 \times 10^{-3}$  J/mol และยางไนไตรล์ต่อยาง



ธรรมชาติที่อัตราส่วน 25 ต่อ 75 ที่เติม TCPA 3 phr เป็นภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมต่อน้อยที่สุด นั้นแสดงถึงสภาพเข้ากันได้มากที่สุด

Pratitha และคณะ (2008) [2] ได้ทำการศึกษาสภาพเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้ ethylene-co-vinyl acetate (EVA) เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ที่ปริมาณการเติม EVA 0 ถึง 10 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน โดยวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและการดูดซับ พบว่า ethylene-co-vinyl acetate (EVA) เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่มีประสิทธิภาพที่อัตราการเติม ethylene-co-vinyl acetate (EVA) ปริมาณ 6 phr ส่งผลให้ยางผสมเข้ากันได้ดีที่สุด เนื่องจากมีการดูดซับตัวทำละลายน้อยที่สุดและพอลิเมอร์เป็นวัฏภาคที่ต่อเนื่องที่สุด อนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็กที่สุด

เจริญ นาคะสรรค์ และคณะ (2004) [39] ได้ทำการกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์(MA) บนยางธรรมชาติ (NR-g-MA) ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้สารละลายโทลูอีนและมี Benzoyl peroxide (BPO) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ MA และ BPO รวมทั้งผลของอุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อการกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ MA และ BPO เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาส่งผลให้ลำดับการกราฟต์เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ของ NR-g-MA มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติบริสุทธิ์ และจะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ MA

สุพัฒน์ มุลสิน (2003) [40] ได้ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสมในการหล่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 ซึ่งขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลายโดยใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย ซึ่งการใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสม สามารถปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนได้ ในงานวิจัยได้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติ/สไตรีนที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยจำนวนโมลด้วยกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอิมัลชันและใช้ TBHPO/TEPA เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เติมในพอลิเมอร์ผสม คือ 0 5 10 15 20 25 และ 30 phr และนำฟิล์มที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาพบว่า ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ NR-g-styrene ที่อัตราส่วน 80/20 เป็นสารช่วยผสมที่มีความทนแรงดึงและความทนแรงฉีกขาดสูงกว่าที่ใช้ NR-g-styrene 90/10 และ NR-g-styrene 70/30 และผลของสัญญาณ

วิทยาที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ NR-g-styrene 80/20 เป็นสารช่วยผสมยังทำให้เฟสกระจายมีขนาดของโดเมนที่ละเอียดกว่าอีกด้วย

Krisna Kongsin และ Michael V. Lewan (1998) [29] ทำการศึกษาการผสมกันระหว่างยางธรรมชาติและยางอะครีโลไนไตรล์ โดยใช้ยางพอลิคลอโรพรีนเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ทั้งนี้เนื่องจากยางพอลิคลอโรพรีนมีลักษณะทางโครงสร้างคล้ายกับยางธรรมชาติ และมีความเป็นขั้วที่สูงกว่า จากการทดลองพบว่ายางพอลิคลอโรพรีนมีค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) อยู่ระหว่างยางธรรมชาติและยางอะครีโลไนไตรล์ ซึ่งช่วยให้การผสมระหว่างยางทั้งสองดีขึ้น โดยปริมาณของพอลิคลอโรพรีนที่เติมลงไปแทนยางอะครีโลไนไตรล์แล้วส่งผลให้ค่าทนต่อแรงดึงมีค่าดีที่สุด คือ 5 phr (NR:CR:NBR = 50:5:45) นอกจากนี้ยังช่วยทำให้ขนาดเฟสของยางแต่ละตัวมีค่าเฉลี่ยและทำให้การกระจายตัวของการเกิดการเชื่อมโยงดีขึ้นอีกด้วย

H.M. Nor และ J.R. Ebdon (2000) [43] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยไอโซนของยางธรรมชาติในสารละลายคลอโรฟอร์มที่ 0 องศาเซลเซียส ทางด้านจุลศาสตร์การแตกออกของสายโซ่และการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันหลักของยางธรรมชาติด้วยเครื่อง GPC และ FTIR spectroscopy พบว่าปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยไอโซนทำให้จำนวนมวลโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติลดลงและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันเกิดเป็น คาร์บอนิล, ไอโซไนต์, ไฮดรอกซิล และ/หรือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์

นุชนาฏ ญ ระนองและคณะ (2007) [44] ทำการผสมยางธรรมชาติ กับยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติเด่นต่าง ๆ กัน 4 ชนิด คือ NBR EPDM พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีน (PE) ในการผสมยางธรรมชาติกับ NBR พบว่า เมื่อมียางธรรมชาติในสัดส่วนที่ลดลง ค่าการทนต่อน้ำมันดีขึ้น ในการผสมยาง EPDM กับยาง พบว่า NR:EPDM ในสัดส่วน 75:25 ความต้านทานต่อไอโซนเริ่มดีขึ้น และเมื่อใช้ EPDM ในสัดส่วนที่สูงขึ้น ยางเกิดรอยแตกเพียงเล็กน้อย เมื่อศึกษาการผสมยางธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีน พบว่า ยางผสมจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ PP โดยมีค่าความแข็งสูงถึง 90 Shore A ในขณะเดียวกัน เมื่อใช้พอลิเอทิลีนผสมกับยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อสัดส่วนของ PE สูงขึ้น จะทำให้ยางผสมมีค่าความแข็งสูงถึง 94 Shore A และค่าโมดูลัสก็ดีขึ้นด้วย ดังนั้นในทางกลับกัน หากต้องการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางสังเคราะห์ที่ต้องการความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ก็สามารถใส่ยางธรรมชาติลงไปผสมได้

M.A. Sidkey และคณะ (2001) [5] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของการผสมยางระบบต่างๆ คือ Adiprene CM-NR, Adiprene CM-NBR, Adiprene E-NR และ Adiprene E-NBR โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิก ซึ่งศึกษาร่วมกับการวัดค่าความหนาแน่นของของผสม การวิเคราะห์หุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่าเทคนิคอัลตราโซนิกสามารถใช้ศึกษาความเข้ากันได้ของการผสมยาง ทั้งนี้เนื่องจากให้ผลที่สอดคล้องกับวิธีต่างๆ ที่ได้ศึกษาร่วม

สุกัญญา เหนือแสน และคณะ (2005) [45] ทำการดัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอีพอกซิเดชัน ภายใต้ระบบของกรดฟอสฟอริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำให้น้ำยางมีเสถียรภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีหัว (โพลีออกซีเอทิลีน(12)ไตรเดคซิลอีเทอร์) อัตราส่วนโมลของกรดฟอสฟอริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อหน่วยไอโซพรีนของน้ำยางสดเท่ากับ 0.5 และ 0.75 ตามลำดับ พบว่าปริมาณอีพอกไซด์ที่ได้สูงขึ้นเมื่อใช้เวลามากขึ้นและสูงสุดเพื่อเวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง เท่ากับ 30 โมลเปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาเรื่องการสลายตัวด้วยความร้อนพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวและอุณหภูมิที่เกิดอัตราการสลายตัวสูงสุดมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ

EI-Sabbagh (2005) [6] ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม โดยการใช้รังสีแกมมาในการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลระหว่างกัน แล้วทำการเติมสารช่วยผสมและพอลิเมอร์ ได้แก่ EPDM-g-MAH พอลิบิวทาไดอินรีบเบอร์ ยางคลอริเนต คลอโรซัลโฟเนต พอลิเอทิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่า การเติมยางคลอริเนต และคลอโรซัลโฟเนต พอลิเอทิลีน สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมได้ดีที่สุด และจากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ให้ค่า T<sub>g</sub> เพียงค่าเดียวนั้นแสดงถึงระบบมีความเข้ากันได้ที่ดีขึ้น

ชัชวาลย์ กันทะลา และคณะ (2007) [47] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้าม และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง NBR ที่สัดส่วน 20:80 โดยใช้สารช่วยประสานยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0 ถึง 7 phr พบว่า การเติมสารช่วยประสาน ยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ทำให้ค่าความหนืดของยางผสมเพิ่มขึ้น โดยยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ส่งผลมากกว่า อย่างไรก็ตาม พบว่า การเติมสารช่วยประสานไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัว เวลาในการคงรูป และค่าความแตกต่างแรงบิด แต่ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยการเติมสารช่วยประสาน 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้

อนิดา เพ็ชรแก้วและ วราภรณ์ ตันรัตน์กุล (2007) [48] ได้ทำการศึกษาผลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีต่อการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิซิลิโคนเตตระพอลิเอทิลีน ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า Stuktol<sup>®</sup> 60 NS ที่ถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ นั้น เพิ่มค่าแรงดึง ณ จุดขาดเพียงเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านแรงดึงหลังการอบด้วยความร้อนของยางผสมทั้งสองสัดส่วนคือ 80/20 และ 70/30 ซึ่งเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 30 % โดยที่สัดส่วน 70/30 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าสัดส่วน 80/20 ส่วนยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ก็สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมได้โดยเพิ่มค่าแรงดึง ณ จุดขาด และลดขนาดของพอลิซิลิโคนเตตระพอลิเอทิลีน

พนิดา สุมานะตระกูล และคณะ (2005) [49] การศึกษาการแปรผันปริมาณยางรีเคลมในช่วง 0-50 phr เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในของผสมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก พบว่า เวลาที่ยางสุก และคุณสมบัติด้านความแข็งแรงจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยางรีเคลม แต่คุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด คุณสมบัติความกระด้างตัว และเวลาที่ยางสุกก่อนกำหนด จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยางรีเคลม ซึ่งที่ปริมาณยางรีเคลมเท่ากับ 40 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุดเท่ากับ 15.97 MPa และมีค่าความสามารถในการรับพลังงานได้สูงถึง 1224.93 N.mm/mm<sup>3</sup>

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นยางแท่ง STR 5L จากบริษัท ซาแนล เคมีคอล จำกัด ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 สมบัติของยางแท่งที่ใช้ในงานวิจัย (ตามวิธีทดสอบยางแท่ง เอส ที อาร์ [50])

สมบัติ	ผลการทดสอบ
ปริมาณผง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.009
ปริมาณเถ้า (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.23
ปริมาณสิ่งระเหย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.29
ปริมาณไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.385
ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI)	92.315
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก	38.75
สียางเทียบโดยไลวิบอนด์	4.0

##### 3.1.2 ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์

ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เป็นชนิด Viton B70N จากบริษัท Dupont Dow Elastomer จำกัด โดยมีสมบัติดังตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 สมบัติของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (VitonB70N) [18]

สมบัติ	ผลการทดสอบ
ความหนืดมูนิ (ที่ 100 องศาเซลเซียส)	72
ปริมาณสิ่งระเหย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.3
ปริมาณฟลูออรีน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	66.2
ลักษณะวัสดุ	แผ่น
สี	ขาว

- 3.1.3 1,2-ฟีนิลไดเอมีน, PDA (Fluka, AR grade)
- 3.1.4 มาเลอิกแอนไฮไดรด์, MA (Fluka, AR grade)
- 3.1.5 Benzoyl peroxide, BPO (Panreact Synthesis, AR grade)
- 3.1.6 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Mallinckrodt Baker, Inc.)
- 3.1.7 โทลูอีน (Mallinckrodt Baker, Inc.)
- 3.1.8 เอทานอล (Mallinckrodt Baker, Inc.)
- 3.1.9 แอซีโตน (Burdick & Jackson)
- 3.1.10 Viton curative NO.50, VC-50 (บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด)
- 3.1.11 Dicumyl peroxide, DCP (บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด)
- 3.1.12 แคลเซียมไฮดรอกไซด์,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Qrex)
- 3.1.13 High activity Magnesium oxide, MgO (บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วย

- 3.2.1 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, HAKKE)
- 3.2.2 เครื่องผสมแบบเปิด ชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความยาวลูกกลิ้งเป็น 8 x 20 นิ้ว
- 3.2.3 เครื่องอัดยางคงรูป (Hydraulic Press) ขนาดแท่งอัด 20 x 20 นิ้ว
- 3.2.4 ชุดกลั่น Soxhlet พร้อมไม้กรอง (Cellulose extraction thimber)
- 3.2.5 ตู้อบร้อนแบบ Hot air
- 3.2.6 ตู้อบแบบสุญญากาศ

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

- 3.3.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy : Thermo รุ่น 470 FT-IR  
สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างยางธรรมชาติกราฟต์
- 3.3.2 Moving Die Rheometer : Monsanto (MDR 2000)  
สำหรับวิเคราะห์ลักษณะการวัลคาไนชันของยางผสม
- 3.3.3 Differential Scanning Calorimeter : Mettler DSC822e  
สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางผสม
- 3.3.4 Universal Testing Machine : LLOYD LR 10k  
สำหรับวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาดและโมดูลัสของยางผสม
- 3.3.5 Hardness Tester : Durometer shore A REX 2000  
สำหรับวิเคราะห์ความแข็งของยางผสม
- 3.3.6 Scanning Electron Microscopy : JSM-6480LV  
สำหรับวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางผสม

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

#### 3.4.1 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์

- ศึกษาการกราฟต์ยางธรรมชาติโดยใช้มอนอเมอร์ต่างชนิดกัน คือ 1,2-ฟีนิลไดเอมีน(NR-g-PDA) และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์(NR-g-MA)
  - ศึกษาความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกราฟต์
- ส่วนผสมในการกราฟต์โคพอลิเมอร์โพรเซสแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไอเซน

สารเคมี	ปริมาณ (phr*)
ยางธรรมชาติ	100
BPO	1
มอนอเมอร์ (PDA หรือ MA)	1, 2, 3, 5, 10

\* 1 phr = 1/100 กรัมของเนื้อยางธรรมชาติ

### 3.4.2 การผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์

ทำการผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.4

ตาราง 3.4 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Viton B70N)

องค์ประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)								
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร3	สูตร4	สูตร5	สูตร6	สูตร7	สูตร8	สูตร9
ยางธรรมชาติ	100	90	75	60	50	40	25	10	0
Viton B70N	0	10	25	40	50	60	75	90	100
Ca(OH) <sub>2</sub>	6	6	6	6	6	6	6	6	6
High activity MgO	3	3	3	3	3	3	3	3	3
VC-50	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
DCP	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### 3.4.3 การผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์

ยางธรรมชาติกราฟต์ที่นำมาเติมได้จากข้อที่ 3.4.1 เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ลงในยางผสมสูตรที่ 2 และ สูตรที่ 8 ในข้อที่ 3.4.2 ซึ่งได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์สำหรับยางทั้ง 2 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และ ตารางที่ 3.6 ตามลำดับ



ตาราง 3.5 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Viton B70N) โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ (NR-g-MA)

องค์ประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)							
	สูตร 10	สูตร 11	สูตร 12	สูตร 13	สูตร 14	สูตร 15	สูตร 16	สูตร 17
ยางธรรมชาติ	90	90	90	90	10	10	10	10
Viton B70N	10	10	10	10	90	90	90	90
Ca(OH) <sub>2</sub>	6	6	6	6	6	6	6	6
High activity MgO	3	3	3	3	3	3	3	3
VC-50	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
DCP	1	1	1	1	1	1	1	1
NR-g-MA	2	4	6	8	2	4	6	8

ตาราง 3.6 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมของของผสมยางธรรมชาติกับ ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (Viton B70N) โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ (NR-g-PDA)

องค์ประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)	
	สูตร 18	สูตร 19
ยางธรรมชาติ	90	10
Viton B70N	10	90
Ca(OH) <sub>2</sub>	6	6
High activity MgO	3	3
VC-50	6.5	6.5
DCP	1	1
NR-g-PDA	2	2

### 3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์

1. นำยางธรรมชาติและมอนอเมอร์ (1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน หรือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์) ออบในตู้อบร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักของสารต่างๆ ตามตารางที่ 3.3
3. บดยางธรรมชาติในเครื่องผสมแบบปิด ดังรูปที่ 3.1 เป็นเวลา 5 นาที อุณหภูมิเริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที
4. เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Benzoyl Peroxide) ลงไปบดผสมกับยางเป็นเวลา 2 นาทีและทำการกรีดผสมยางต่อเป็นเวลา 3 นาที
5. เติมมอนอเมอร์ (1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน หรือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์) ลงไปบดผสมกับยางผสมเป็นเวลา 2 นาที และทำการกรีดผสมยางต่อเป็นเวลา 3 นาที โดยปริมาณของมอนอเมอร์จะมีการปรับค่าตามตารางที่ 3.3
6. นำยางที่ผสมได้ไปรีดให้เป็นแผ่นบางด้วยเครื่องบดผสมแบบเปิด ชนิดสองลูกกลิ้ง ดังรูปที่ 3.2 แล้วนำไปอบในตู้อบร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำยางธรรมชาติกราฟต์ที่เตรียมได้บางส่วนไปทำการหาค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) และร้อยละของมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer) ด้วยวิธีการสกัดร้อน (Soxhlet extraction) โดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์ในการสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ และแอสีโตนในการสกัดมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ แล้วนำยางที่สกัดได้ไปตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์ โดยวิธีอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี
8. นำยางส่วนที่เหลือจากข้อที่ 7 แซ่ด้วยแอสีโตนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดมอนอเมอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยา
9. ทำการกรองแอสีโตน แล้วนำยางกราฟต์ที่ได้ไปอบแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยแอสีโตนออกจากยางกราฟต์
10. นำยางที่ได้ไปใช้เติมเป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพลูออโรอีลาสโทเมอร์

### 3.6 ขั้นตอนการบดผสมยาง

1. ชั่งน้ำหนักของสารต่างๆ ตามตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.6
2. บดยางธรรมชาติและฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในเครื่องผสมแบบปิด เป็นเวลา 5 นาที อุณหภูมิเริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที
3. สำหรับสูตรที่ 1 ถึง สูตรที่ 9 นำยางทั้งสองชนิดมาบดผสมกันในเครื่องผสมแบบปิด เป็นเวลา 5 นาที (สำหรับสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 19 ใส่ยางธรรมชาติที่ผ่านการบดแล้วลงไป ก่อน จากนั้นค่อยๆเติมยางธรรมชาติกราฟต์ในเวลา 1 นาที แล้วทำการบดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมฟลูออโรอีลาสโตเมอร์บดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที) อุณหภูมิ เริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที
4. เติม  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ลงไปบดผสมกับยางผสมเป็นเวลา 2 นาที
5. เติม High activity MgO ลงไปบดผสมกับยางผสมเป็นเวลา 2 นาที
6. เติม VC-50 ลงไปบดผสมกับยางผสมเป็นเวลา 2 นาที
7. เติม DCP ลงไปบดผสมกับยางผสมเป็นเวลา 2 นาที
8. บดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที



รูปที่ 3.1 เครื่องบดผสมแบบปิด (internal mixer)



รูปที่ 3.2 เครื่องบดผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

### 3.7 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์กราฟต์ที่ได้

3.7.1 การหาค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) และร้อยละของมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ยางธรรมชาติกราฟต์ มอนอเมอร์ (Grafted natural rubber, GNR) ยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์ (Free natural rubber, Free NR) และมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ (Free monomer) โดยยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยากราฟต์ สามารถสกัดแยกออกมาได้โดยใช้การสกัดร้อน (Soxhlet extraction) ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์เบา และโคพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์สามารถสกัดแยกออกมาได้โดยใช้แอสโทน สำหรับสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) และร้อยละของมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer) แสดงในภาคผนวก ก

### 3.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์

ทำการตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเทคนิคอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared

Spectroscopy, FT-IR) รุ่น 470 เตรียมตัวอย่างที่จะทำการวัดโดยละลายยางกราฟต์ที่ได้ภายหลังการสกัดร้อน 1 กรัมในโทลูอีน 2 มิลลิลิตร นำไปหยดลงบนแผ่นโซเดียมคลอไรด์ รอให้ตัวทำละลายระเหยจนหมด แล้วนำไปทดสอบ เครื่อง FT-IR แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี รุ่น 470 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

### 3.8 การทดสอบการแปรรูปและการการคงรูป

ในการทดสอบหาเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูป จะใช้ขึ้นทดสอบที่ได้หลังจากการบดผสมแล้วทิ้งไว้ 1 คืน

#### 3.8.1 เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการในการคงรูป

ทดสอบโดยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส แรงดันโมลต์ที่ 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที

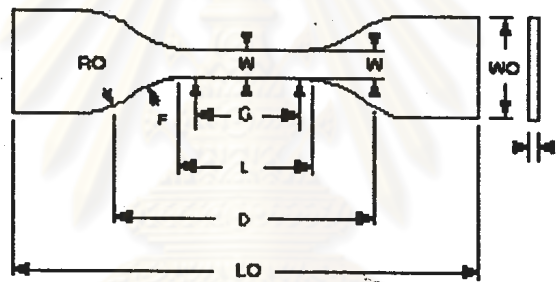
#### 3.8.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ทำการขึ้นรูปโดยเครื่องอัดยางคงรูป (Hydraulic Press) ขนาดแท่งอัด 20 x 20 นิ้ว อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการคงรูปที่วัดได้จากเครื่อง Moving Die Rheometer นำยางที่คงรูปมาตัดให้เป็นรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบแบบต่างๆ

### 3.9 การทดสอบสมบัติของยางผสมที่ผ่านการคงรูป

#### 3.9.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (%Elongation)

การทดสอบสมบัติด้านการต้านทานแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของยางผสม โดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากยางคงรูปแล้ว ซึ่งอัดเป็นแผ่นให้มีความหนาสม่ำเสมอด้วยเครื่องอัด (Compression Molding) ตัดให้เป็นรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นนำมาวัดหาพื้นที่หน้าตัดส่วนคอดของรูปดัมเบลล์ นำมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 10k ดังรูปที่ 3.5 วัดความหนาชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ที่อ่านละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ทำการวัด 3 แห่ง คือ ตรงกลาง และตรงปลาย ณ จุดที่เลยขีดความยาว 2 แห่ง ใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตสำหรับคำนวณค่า



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงรูปดัมเบลล์ LO = ความยาว WO = ความกว้างที่ปลาย  
G = ความยาวของแถบตรงกลาง W = ความกว้างของแถบตรงกลาง F = รัศมีโค้งเล็ก  
RO = รัศมีโค้งใหญ่

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการทนแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด (Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 10k)

### 3.9.2 การทดสอบความแข็งของยางผสม (Hardness)

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของยางผสม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้เครื่อง Durometer shore A REX 2000 ดังรูปที่ 3.6 สามารถทำได้โดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากยางคงรูป อัดเป็นแผ่นให้มีความหนาสม่ำเสมอด้วยเครื่องอัด (Compression Molding) ตัดชิ้นงานให้มีความหนา 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer shore A REX 2000)

### 3.9.3 การทดสอบความต้านทานต่อการบวมตัวเนื่องจากน้ำมันหรือจาระบีของยางผสม (Oil resistance)

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของยางผสม ซึ่งจะศึกษาในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างในแง่ของปริมาตร คือ การบวมตัวของชิ้นงานหลังจากผ่านการสัมผัสหรือแช่ในน้ำมันหรือจาระบีที่ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำเตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากยางคงรูป อัดเป็นแผ่นให้มีความหนาสม่ำเสมอด้วยเครื่องอัด (Compression Molding) ตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $2 \times 2 \times 0.2$  เซนติเมตร ซึ่งนำหน้าที่ยกก่อนแช่ในน้ำมัน และคำนวณหาร้อยละของการบวมตัวในน้ำมัน (%Volume change) โดยใช้สูตรการคำนวณในภาคผนวก ก

### 3.9.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Chromatography (DSC)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางผสมด้วยเครื่อง DSC ดังรูปที่ 3.7 โดยนำยางผสมหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในภาชนะอะลูมิเนียมขนาด 40 ไมโครลิตร ซึ่งนำหนักที่แน่นอนของยางผสมแล้วปิดผนึก และใช้อากาศเป็นสารอ้างอิง โดยให้ภาวะของการทดสอบเริ่มต้นจากอุณหภูมิ  $-100$  ถึง  $25$  องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน  $10$  องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล  $20$  มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน Differential Scanning Chromatography (DSC)



### 3.9.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของยางผสมด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy:SEM) เตรียมชิ้นงานมีความกว้าง 0.5 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อทำการหักตัวอย่าง เคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองคำ ทำการวัดพื้นผิวของยางผสมที่กำลังขยาย 100, 500 และ 3,000 เท่า



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของยางผสม Scanning Electron Microscopy (SEM)

## บทที่ 4

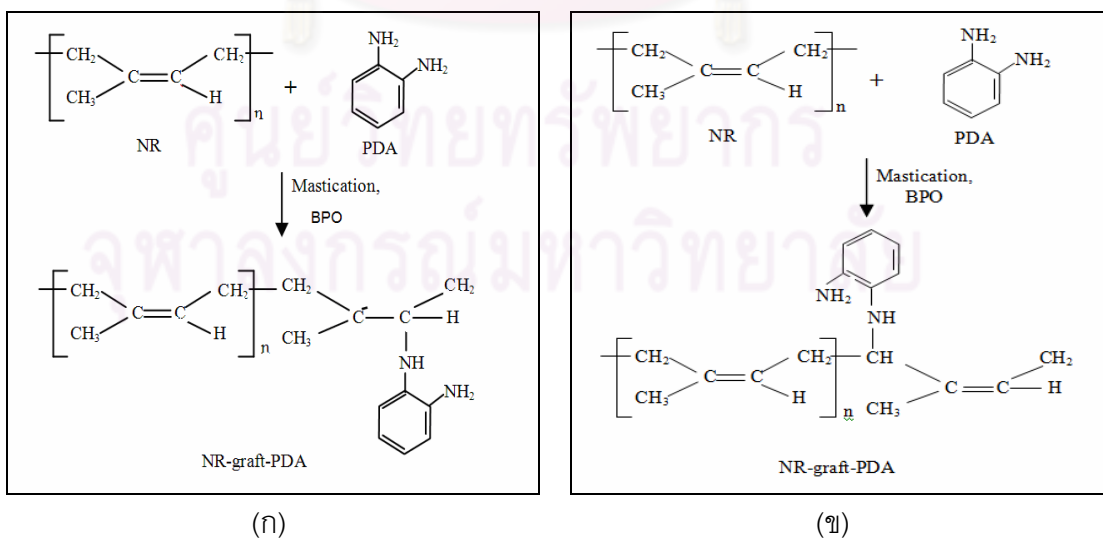
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติกราฟต์ที่มีต่อเข้ากันได้ ของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ โดยยางธรรมชาติกราฟต์เตรียมได้จากมอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งสมบัติที่ทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์ (โครงสร้างของยางธรรมชาติกราฟต์และประสิทธิภาพการกราฟต์) และการวิเคราะห์ของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ (เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ใช้ในการคงรูป ความต้านแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ ความแข็ง การบวมตัวและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากน้ำมัน ลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติทางความร้อน

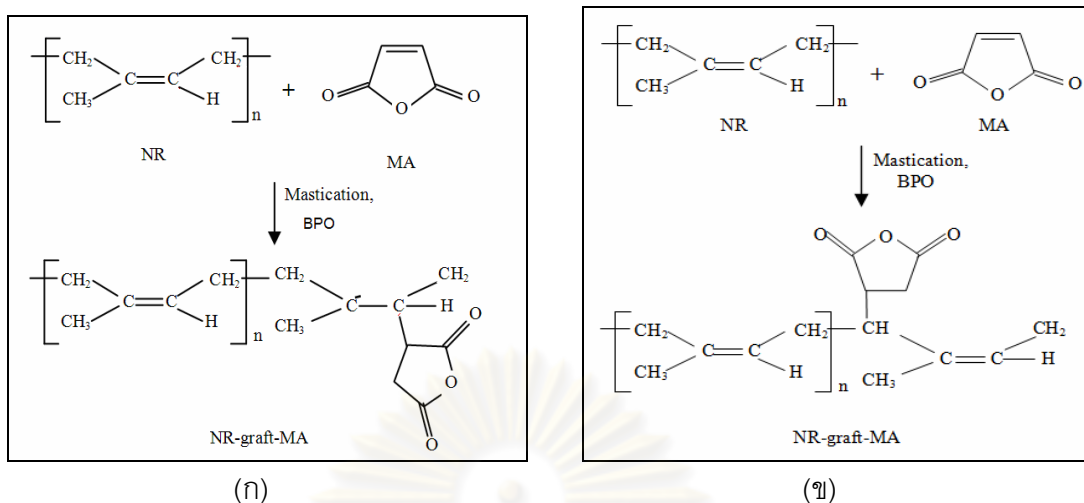
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์

##### 4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติกราฟต์

ในงานวิจัยได้ทำการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยมอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ในการกราฟต์แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



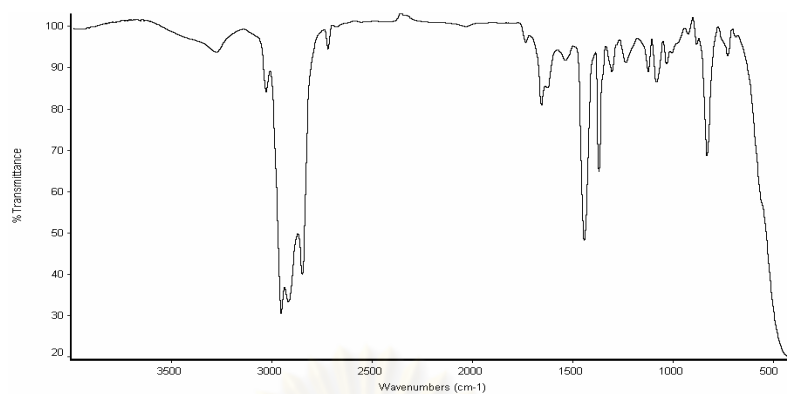
รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน (NR-g-PDA) [38]



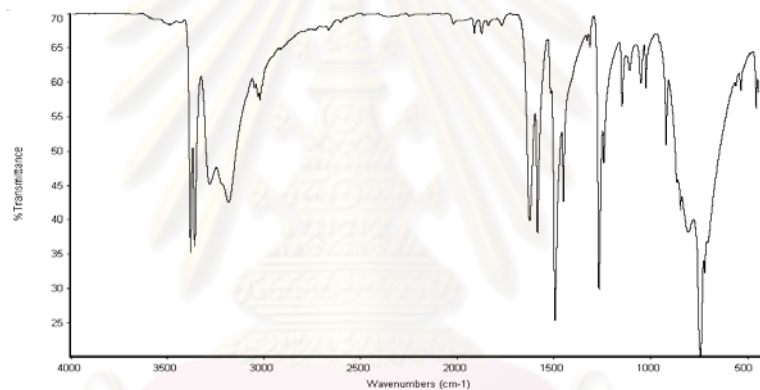
รูปที่ 4.2 ปฏิกริยาที่เป็นไปได้ของยางธรรมชาติกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [4, 39 และ 50]

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน(PDA) และ ยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน (NR-g-PDA) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) แสดงสเปกตรัมดังรูปที่ 4.3-4.5 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของยางธรรมชาติ พบว่าโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ประกอบด้วยพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเห็นได้จากหมู่ฟังก์ชันของ  $=C-H$  ณ จำนวนคลื่น  $3039.1$  และ  $839.1$   $\text{cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชันของ  $-C=C-$  ณ จำนวนคลื่น  $1660.9$   $\text{cm}^{-1}$  และ หมู่ฟังก์ชันของ  $-CH_2$  ณ จำนวนคลื่น  $2856.5-2969.6$ ,  $1447.8$  และ  $1369.6$   $\text{cm}^{-1}$  ขณะที่รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน ปรากฏฟังก์ชันของ  $C-H$  ณ จำนวนคลื่น  $3034.8$  และ  $747.8$   $\text{cm}^{-1}$  และที่จำนวนคลื่น  $1595.7$  และ  $1500$   $\text{cm}^{-1}$  บ่งบอกถึงหมู่  $C=C$  ของวงอะโรมาติก นอกจากนี้ที่จำนวนคลื่น  $3386.9$  และ  $3365.2$   $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ของ  $N-H$  และ  $1278.3$   $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ของ  $C-N$

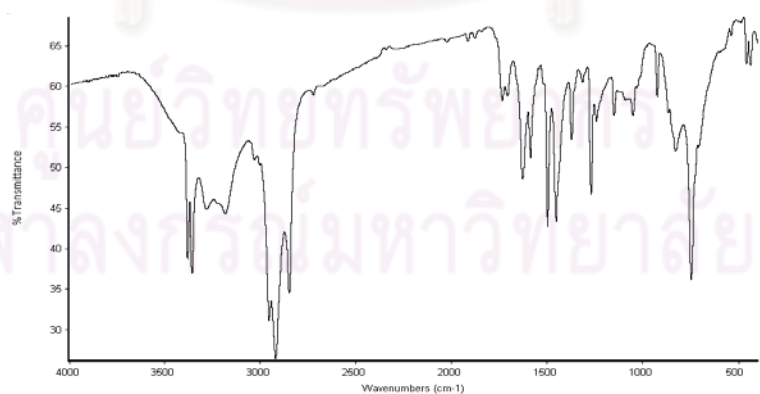
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของ NR-g-PDA ซึ่งยางธรรมชาติกราฟต์ที่นำมาวิเคราะห์ได้ผ่านการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์เพื่อสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์และสกัดด้วยแอสีโทนเพื่อสกัด 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนที่เหลือจากการกราฟต์ออกตามลำดับ พบว่าปรากฏฟังก์ชันของหมู่  $N-H$  ที่ตำแหน่ง  $3386.9$  และ  $3365.2$   $\text{cm}^{-1}$  และหมู่ของ  $C-N$  ณ ตำแหน่ง  $1278.3$   $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้ น่าจะเป็นฟังก์ชันของหมู่  $N-H$  และ  $C-N$  ใน 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน ที่เกิดการกราฟต์ลงบนยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าการกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนลงบนยางธรรมชาติ



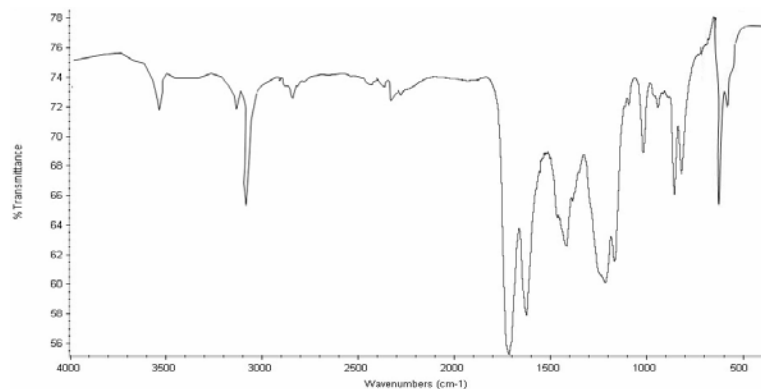
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของยางธรรมชาติ



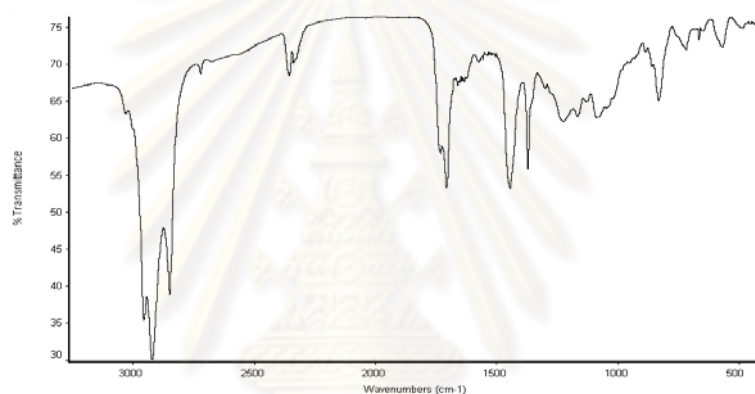
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ 1,2-พีนินไดเอมีน



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ NR-g-PDA



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ มาเลอิกแอนไฮไดรด์



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมอินฟราเรด (FTIR spectra) ของ NR-g-MA

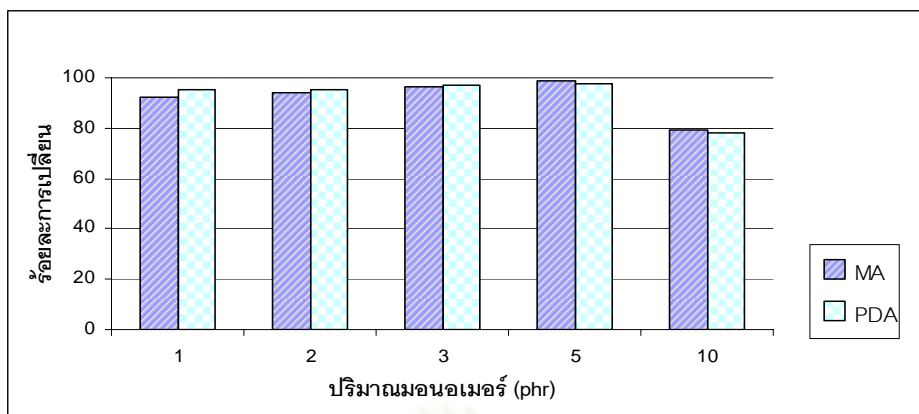
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าจำนวนคลื่นที่  $1728.2 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ของ C=O และ จำนวนคลื่นที่  $637.7 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ของ -C=C- จากรูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของ NR-g-MA ซึ่งยางธรรมชาติกราฟต์ที่นำมาวิเคราะห์ได้ผ่านการสกัดร้อนด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์เพื่อสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์และสกัดด้วยเอซีโตนเพื่อสกัดมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ที่เหลือจากการกราฟต์ออกตามลำดับ พบว่าปรากฏพีคที่ตำแหน่ง  $1713.1 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งบอกถึงหมู่ของ C=O ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากการเทียบอัตราส่วนพีคพบว่า หมู่ของ -C=C- ที่ตำแหน่ง  $637.7 \text{ cm}^{-1}$  ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีอัตราส่วนที่ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการที่พันธะคู่ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ณ ตำแหน่งนี้เกิดการกราฟต์กับยางธรรมชาติ (ดังรูปที่ 4.2) จึงทำให้ตำแหน่งพันธะคู่ลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าน่าจะเกิดการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบนยางธรรมชาติ

#### 4.1.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยวิธีการสกัดร้อน

ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อร้อยละของการเปลี่ยน (%Conversion) ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency) ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) และร้อยละของมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer) ด้วยวิธีการสกัดร้อน (Soxhlet extraction) โดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ แล้วทำการสกัดต่อด้วยเอซีโตน 24 ชั่วโมงเพื่อสกัดมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ออกตามลำดับ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8 ถึง 4.9 โดยสูตรการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก และข้อมูลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.1 และ ข.2)

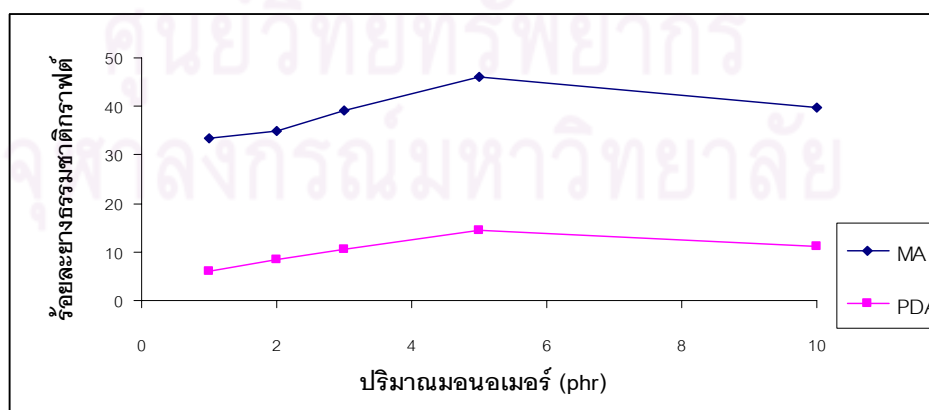
ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดและปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อสมบัติการกราฟต์ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ เซชันบนยางธรรมชาติ

ปริมาณมอนอเมอร์ (phr)	ร้อยละของการเปลี่ยน		ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์		ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์		ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์		ร้อยละของมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์	
	MA	PDA	MA	PDA	MA	PDA	MA	PDA	MA	PDA
1	92.16	95.10	93.74	91.24	33.42	6.06	60.33	85.18	6.26	8.76
2	94.30	95.43	95.43	93.45	34.88	8.50	60.54	84.95	4.57	6.55
3	96.68	96.97	96.32	94.41	39.09	10.54	57.23	83.86	3.68	5.59
5	98.86	97.82	96.71	95.76	46.02	14.31	50.69	81.45	3.29	4.24
10	79.52	78.01	92.85	95.73	39.84	11.20	53.01	84.53	7.15	4.27



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกราฟต์โคพอลิเมอร์ไฮเซนบนยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.8 ปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้ในการกราฟต์ยางธรรมชาติอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 phr จากกราฟแท่งด้านซ้ายเป็นกราฟของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าเมื่อปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 phr ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 92 ถึง 99 ดังนั้นมอนอเมอร์โดยส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์และมีไฮโมพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้น้อย แต่เมื่อปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์เท่ากับ 10 phr พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดเป็นไฮโมพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ที่มากเกินไป [39] ส่วนกราฟแท่งทางด้านขวาเป็นการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วย 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนซึ่งผลที่ได้ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์



รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีต่อร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ โดย กราฟเส้นด้านบนเป็นกราฟของยางธรรมชาติกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (NR-g-MA) และกราฟ เส้นด้านล่างเป็นกราฟของยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน (NR-g-PDA) จากกราฟจะได้ว่ายางธรรมชาติกราฟต์ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่เหมือนกัน กล่าวคือร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 phr ทั้งนี้อาจเกิดจากการเพิ่มปริมาณมอนอเมอร์เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อปริมาณของมอนอเมอร์เพิ่มเป็น 10 phr พบว่าร้อยละยางธรรมชาติมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณมอนอเมอร์ที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดเป็นไฮโมพอลิเมอร์ได้ดีกว่าการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ มอนอเมอร์ทั้งสองชนิด พบว่า NR-g-MA ให้ค่าที่สูงกว่าในทุกช่วงปริมาณของมอนอเมอร์ ทั้งนี้ อาจเกิดจากการที่โครงสร้างโมเลกุลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนซึ่ง มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีที่สูงกว่าอะตอมไนโตรเจนของ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน ดังนั้นมาเลอิกแอนไฮไดรด์จึงมีความสามารถในการชิงอิเล็กตรอนที่ดี ปฏิกิริยาการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จึง เกิดได้ดีกว่า 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน นอกจากนี้ อาจเกิดจากอะตอมออกซิเจนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ มีจำนวนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) มากกว่าอะตอมไนโตรเจนของ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน ความเสถียรของโมเลกุลจึงมีน้อยกว่า ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยาการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จึงเกิดได้ดีกว่า

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการวัลคะไนซ์ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอิลาสโทเมอร์

ทำการวิเคราะห์ลักษณะการวัลคะไนซ์ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอิลาสโทเมอร์ ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เพื่อหาเวลาที่ใช้ในการไหลของ (Scorch time,  $T_{s2}$ ) เวลาที่เหมาะสมในการวัลคะไนซ์ (Cure time,  $T_{c90}$ ) ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุด

##### 4.2.1 การผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอิลาสโทเมอร์โดยไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์

การผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอิลาสโทเมอร์โดยไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ ทำ โดยแปรผันอัตราส่วนยางธรรมชาติต่อกับฟลูออโรอิลาสโทเมอร์ 9 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0 90:10 75:25 60:40 50:50 40:60 25:75 10:90 และ 0:100 โดยมีสูตรการผสมแสดงในตารางที่ 3.4 และ ผลแสดงดังตารางที่ 4.2 และกราฟรูปที่ ค.1 ในภาคผนวก ค



ตารางที่ 4.2 ผลการวัลคะไนซ์ของยางธรรมชาติผสมกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์

สูตรที่	ยางธรรมชาติต่อ ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (NR:Viton)	แรงบิดต่ำสุด (ปอนด์-นิ้ว)	แรงบิดสูงสุด (ปอนด์-นิ้ว)	$\Delta S^{(1)}$ (ปอนด์-นิ้ว)	T <sub>S2</sub> (นาทิจ)	T <sub>C90</sub> (นาทิจ)
1	100:0	3.27	10.56	7.29	2.13	17.51
2	90:10	3.43	11.07	7.64	2.08	16.90
3	75:25	3.67	12.34	8.67	1.96	16.43
4	60:40	3.90	13.42	9.52	1.93	15.82
5	50:50	4.90	14.37	9.47	1.89	14.34
6	40:60	5.12	15.09	9.97	1.78	12.91
7	25:75	6.93	17.56	10.63	1.74	12.44
8	10:90	7.24	19.51	12.27	1.63	10.52
9	0:100	8.68	21.62	12.94	1.52	8.41

(1) ค่าความต่างของแรงบิด = แรงบิดสูงสุด – แรงบิดต่ำสุด

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เวลาที่ใช้ในการไหลของยางและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคะไนซ์มีค่าลดลง เมื่อปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้ในการวัลคะไนซ์มีความว่องไวกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มากกว่ายางธรรมชาติ และเมื่อพิจารณาที่ค่าความต่างของแรงบิด พบว่า มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ ทั้งนี้อาจเกิดจากระบบที่ใช้ในการวัลคะไนซ์มีผลต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มากกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ อาจทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางมากขึ้น ค่าแรงบิดจึงสูงขึ้น

#### 4.2.2 การผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้

การผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 2 ชนิด คือ ยางธรรมชาติกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์และยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนทำโดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์ที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 2, 4, 6 และ 8 ส่วนต่ออย่างร้อยละ โดยเติมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 2 อัตราส่วน คือ 90 ต่อ 10 และ 10 ต่อ 90 ซึ่ง

มีสูตรการผสมแสดงในตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3 ถึง ตารางที่ 4.4 และกราฟรูปที่ ค.1 ในภาคผนวก ค

**ตารางที่ 4.3** ผลการวัลคะไนซ์ของยางผสมที่อัตราส่วนการผสมของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโทเมอร์เท่ากับ 90 ต่อ 10

สูตรที่	NR-g-MA (phr)	NR-g-PDA (phr)	แรงบิดต่ำสุด (ปอนด์-นิ้ว)	แรงบิดสูงสุด (ปอนด์-นิ้ว)	$\Delta S^{(1)}$ (ปอนด์-นิ้ว)	$T_{S2}$ (นาทิจ)	$T_{C90}$ (นาทิจ)
2	-	-	3.43	11.07	7.64	2.08	16.90
10	2	-	3.46	11.82	8.32	2.13	16.91
11	4	-	3.47	13.04	9.57	2.11	17.22
12	6	-	4.49	14.36	9.87	2.24	16.78
13	8	-	3.35	12.57	9.22	2.25	16.93
18	-	2	4.96	14.93	9.97	2.36	16.84

(1) ค่าความต่างของแรงบิด = แรงบิดสูงสุด - แรงบิดต่ำสุด

จากตารางที่ 4.3 พบว่า เวลาที่ใช้ในการไหลและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคะไนซ์ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นั้นแสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติกราฟต์ไม่น่าจะส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการไหลของยางและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคะไนซ์ และเมื่อพิจารณาที่ค่าความต่างของแรงบิด พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 6 phr และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ NR-g-MA เท่ากับ 8 phr โดยการเติมปริมาณ NR-g-MA ที่ 6 phr ให้ค่าความต่างของแรงบิดสูงที่สุด นอกจากนี้ในการเติม NR-g-PDA ที่ปริมาณ 2 phr พบว่ามีค่าความต่างของแรงบิดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเติม NR-g-MA ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ 2 กรณี กรณีแรกอาจเกิดจากยางธรรมชาติกราฟต์ที่เติมลงไป น่าจะทำให้ของผสมสามารถเข้ากันได้ดีขึ้น เป็นผลให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางมีค่าสูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางเกี่ยวข้องกับค่าแรงบิด กล่าวคือ ถ้าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางมีค่ามากของผสมจะมีความทนทานต่อแรงบิดที่สูง[2] ดังนั้นการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ลงในของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 นั้นน่าจะช่วยให้ของผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น กรณีที่สองอาจเกิดจากการที่ยางธรรมชาติกราฟต์ที่เตรียมได้นั้นเป็นสารที่มีขั้ว ซึ่งจะเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ แต่เนื่องจากวัฏภาคหลักของของผสมเป็นยางธรรมชาติ และส่วนประกอบหลักของยาง

ธรรมชาติกราฟต์เป็นยางธรรมชาติ ดังนั้นยางธรรมชาติกราฟต์จึงน่าจะมาอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ ซึ่งอาจเป็นส่วนช่วยในการวัลคาไนซ์ขึ้น เกิดพันธะเชื่อมขวางมากขึ้น ดังนั้นค่าแรงบิดจึงเพิ่มสูงขึ้น

**ตารางที่ 4.4** ผลการวัลคาไนซ์ของยางผสมที่อัตราส่วนการผสมของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เท่ากับ 10 ต่อ 90

สูตรที่	NR-g-MA (phr)	NR-g-PDA (phr)	แรงบิดต่ำสุด (ปอนด์-นิ้ว)	แรงบิดสูงสุด (ปอนด์-นิ้ว)	$\Delta S^{(1)}$ (ปอนด์-นิ้ว)	T <sub>s2</sub> (นาทิจ)	T <sub>c90</sub> (นาทิจ)
8	-	-	7.24	19.51	12.27	1.63	10.52
14	2	-	6.54	19.21	12.67	1.71	10.28
15	4	-	5.9	17.83	11.93	1.67	10.34
16	6	-	4.49	16.05	11.56	1.62	10.72
17	8	-	4.26	14.86	10.6	1.69	10.63
19	-	2	4.96	14.91	9.95	1.72	10.55

(1) ค่าความต่างของแรงบิด = แรงบิดสูงสุด – แรงบิดต่ำสุด

จากตารางที่ 4.4 พบว่า เวลาที่ใช้ในการไหลของของผสมและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นั้นแสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติกราฟต์อาจจะไม่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการไหลของยางและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ ซึ่งให้ผลเช่นเดียว กันกับกรณีของของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าความต่างของแรงบิดพบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์ทั้งสองชนิด นั้นอาจเกิดจากการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ไม่น่าจะสามารถช่วยเสริมสภาพความเข้ากันได้ของของผสมที่อัตราส่วนนี้ อาจเพราะว่ายางธรรมชาติกราฟต์ไม่สามารถกระจายตัวได้ดีในของผสมที่มีฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เป็นวัฏภาคหลัก ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางต่ำ เป็นผลให้ค่าแรงบิดจึงลดลง หรืออาจพิจารณาได้จากกรณีที่ยางธรรมชาติกราฟต์น่าจะกระจายตัวในวัฏภาคของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ได้ดี ยางธรรมชาติกราฟต์จึงไม่ได้ทำหน้าที่ในการเสริมสภาพเข้ากันได้ของของผสม ดังนั้นค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางจึงน่าจะมีค่าคงที่ ค่าความต่างของแรงบิดจึงน่าจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่การที่ค่าลดลงนั้น อาจเกิดจากยางธรรมชาติกราฟต์ที่กระจายตัวอยู่ในวัฏ

ภาคของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์นั้นไปขัดขวางการวัลคาไนซ์ พันธะเชื่อมขวางจึงลดลง ค่าความต่างของแรงบิดจึงต่ำลง

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล

ของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ หลังจากที่ผ่านมาการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของยางผสมด้านการต้านแรงดึง (Tensile strength) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ความเค้นที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ และความแข็ง ผลแสดงดังตารางที่ 4.5 ถึงตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.3 ถึง ข.5)

**ตารางที่ 4.5** สมบัติเชิงกลของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยไม่มี การเติมยางธรรมชาติกราฟต์

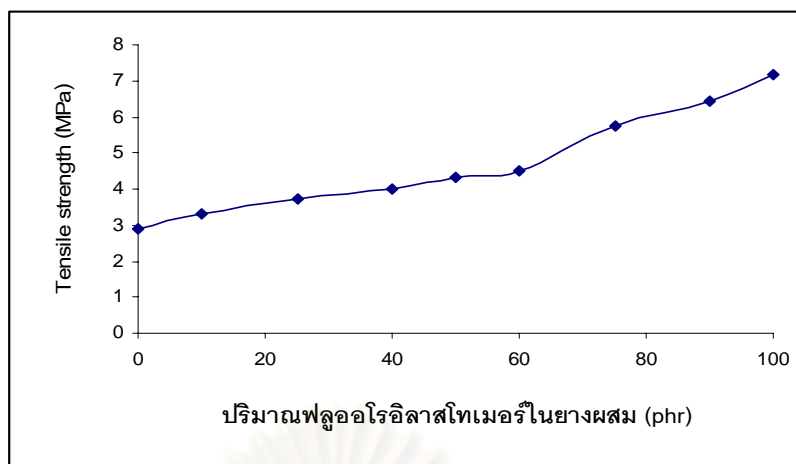
สูตรที่	NR:Viton	ความต้านแรงดึง (เมกกะพาสคาล)	ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ร้อยละ)	ความเค้น ที่ระยะการยืดตัว (เมกกะพาสคาล)		ค่าความ แข็ง (Shore A)
				100 %	300 %	
1	100:0	2.89	590.94	0.77	1.94	35
2	90:10	3.29	452.05	0.81	2.21	36
3	75:25	3.74	419.56	1.13	3.03	44.5
4	60:40	4.02	351.72	2.23	3.56	52
5	50:50	4.31	250.29	2.69	-	53
6	40:60	4.52	228.8	3.05	-	59
7	25:75	5.74	198.45	3.88	-	61
8	10:90	6.45	156.76	4.11	-	62.5
9	0:100	7.17	149.25	4.39	-	67

**ตารางที่ 4.6** สมบัติเชิงกลของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์

สูตรที่	NR:Viton	NR-g-MA (phr)	NR-g-PDA (phr)	ความต้าน แรงดึง (เมกกะ พาสคาล)	ความยืด สูงสุด ณ จุดขาด (ร้อยละ)	ความเค้น ที่ระยะการยืดตัว (เมกกะพาสคาล)		ความแข็ง (Shore A)
						100%	300%	
2	90:10	-	-	3.29	452.05	0.81	2.21	36
10	90:10	2	-	3.32	518.79	0.81	2.40	36
11	90:10	4	-	3.38	527.47	0.83	2.55	37
12	90:10	6	-	3.57	560.44	0.85	2.67	39
13	90:10	8	-	3.31	487.58	0.76	2.12	36
9	0:100	-	-	7.17	149.25	4.39	-	67
14	10:90	2	-	5.84	168.74	3.89	-	62.5
15	10:90	4	-	5.76	191.68	2.6	-	59.5
16	10:90	6	-	3.94	254.01	2.26	-	51
17	10:90	8	-	3.12	356.64	1.55	2.19	48
18	90:10	-	2	3.62	521.78	0.94	2.79	42.5
19	10:90	-	2	7.59	149.41	4.7	-	69

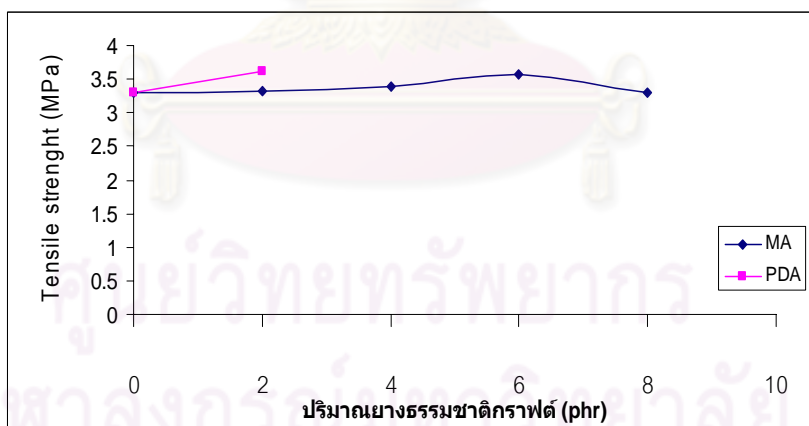
#### 4.3.1 ความต้านแรงดึง

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 นำค่าความต้านแรงดึงมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงดึง กับปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในของผสม (สำหรับยางสูตรที่ 1 ถึง 9) และค่าความต้านแรงดึงกับปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ (สำหรับยางสูตรที่ 10 ถึง 19) แสดงดังรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12



**รูปที่ 4.10** ค่าความต้านแรงดึงของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9 ที่ปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ค่าต่างๆโดยไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์

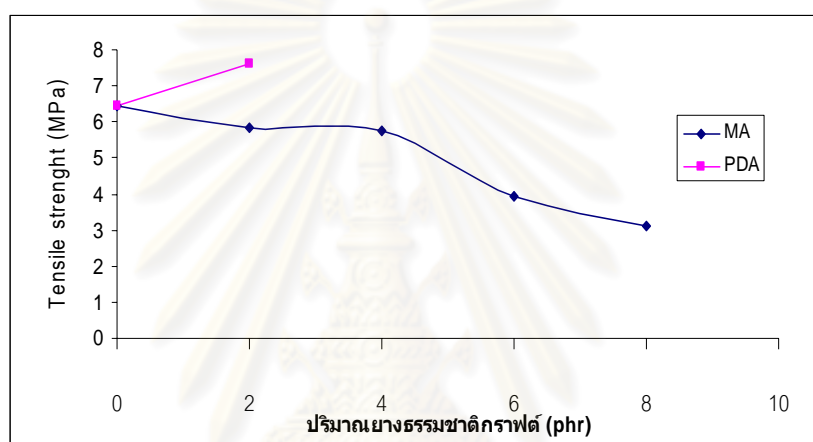
จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่มากขึ้นเมื่อปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มากขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่าความต่างของแรงบิดที่เพิ่มขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยค่าความต่างที่สูงขึ้นนั้น อาจมีผลให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น



**รูปที่ 4.11** ค่าความต้านแรงดึงของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 90 ต่อ 10) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.11 พบว่า ยางผสมเมื่อเติมปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 6 phr ค่าความต้านแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ปริมาณการเติม 6 phr มีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้น่าจะเกิดจาก NR-g-MA น่าจะช่วยเสริมสภาพเข้ากันได้ของยางผสม จึงส่งผลให้โมเลกุลของยางผสมอยู่ชิดกัน

มากขึ้น การยึดเกาะกันดีขึ้น ดังนั้นค่าความต้านแรงดึงจึงมีค่าสูงขึ้น และพบว่าค่าความต้านแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ NR-g-MA มีค่าเท่ากับ 8 phr ซึ่งอาจเกิดจากการปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ที่มากเกินไป ยางกราฟต์จะจับตัวกันเองมากกว่าที่จะกระจายไปยังเฟสของของผสมจึงทำให้ไม่ได้ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ ค่าความต้านแรงดึงจึงต่ำลง ส่วนการเติม NR-g-PDA ที่ปริมาณ 2 phr พบว่าค่าความต้านแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเติม NR-g-PDA น่าจะช่วยเสริมสภาพความเข้ากันได้ของยางผสมเช่นเดียวกัน นอกจากนี้อาจพิจารณาได้จากกรณีที่ยางธรรมชาติกราฟต์อาจไปอยู่บริเวณรอยต่อของของผสมแล้ว น่าจะช่วยให้การวัลคะไนซ์เกิดได้ดีขึ้น ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น



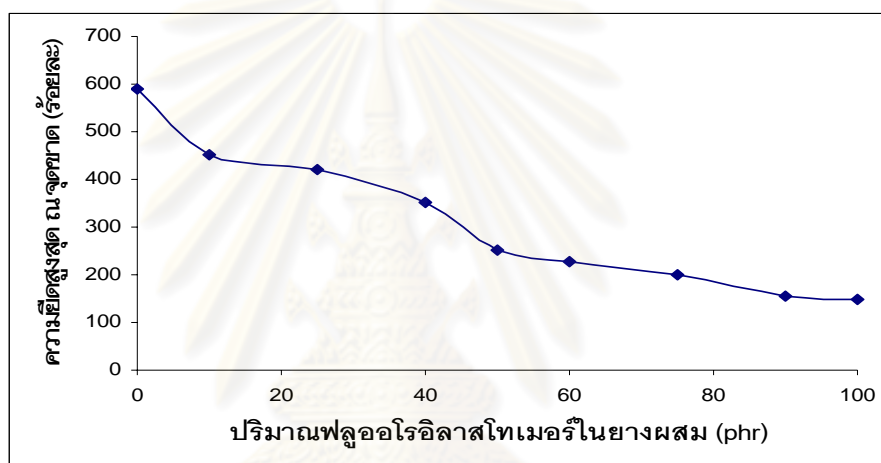
**รูปที่ 4.12** ค่าความต้านแรงดึงของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 10 ต่อ 90) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ยางผสมเมื่อเติมปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 8 phr ค่าความต้านแรงดึงมีค่าลดลง นั่นอาจเกิดจาก NR-g-MA ไม่สามารถช่วยเสริมสภาพเข้ากันได้ของยางผสม ยางทั้งสองจึงไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าความต้านแรงดึงจึงมีค่าที่ต่ำลง นอกจากนี้อาจพิจารณาได้จากค่าความต่างของแรงบิดที่ลดต่ำลงเมื่อเติมปริมาณ NR-g-MA จากการศึกษาลักษณะการวัลคะไนซ์ของของผสม ซึ่งอาจหมายถึงความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ลดลง ค่าความต้านแรงดึงจึงมีค่าลดลง ดังนั้นในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 การเติม NR-g-MA อาจไม่สามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของของผสม เมื่อเติม NR-g-PDA ที่ปริมาณ 2 phr พบว่าค่าความต้านแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการเติม NR-g-PDA น่าจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางผสมได้ดีขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่าความต่างของแรงบิดพบว่า มีค่าลดลงจากกรณีที่ไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์ ดังนั้นค่าการทนแรงบิดน่าจะ

ค่าลดลง แต่จากการทดลองพบว่าค่าแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณการเติม NR-g-PDA มีเพียงค่าเดียว จึงไม่สามารถบอกแนวโน้มที่แน่นอนได้

#### 4.3.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

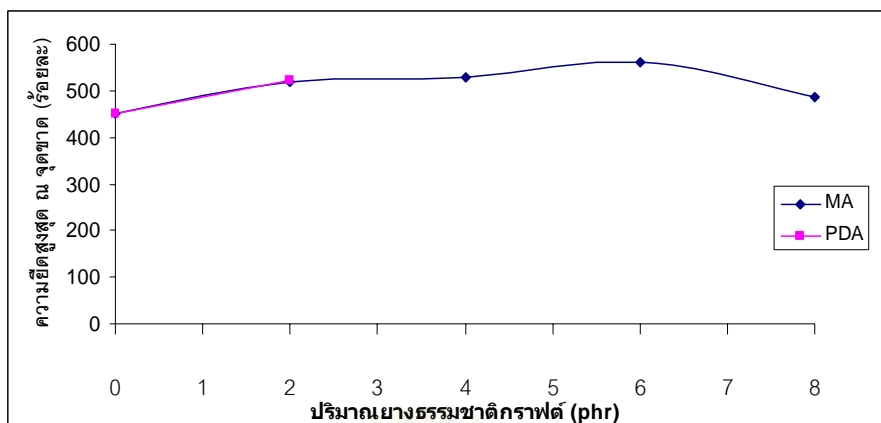
จากตารางที่ 4.5 เมื่อนำค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของยางสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 19 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยืดสูงสุด ณ จุดขาดกับปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในของผสม (สำหรับยางสูตรที่ 1 ถึง 9) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดกับปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ (สำหรับยางสูตรที่ 10 ถึง 19) แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของของผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9 ที่ปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ค่าต่างๆโดยไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์

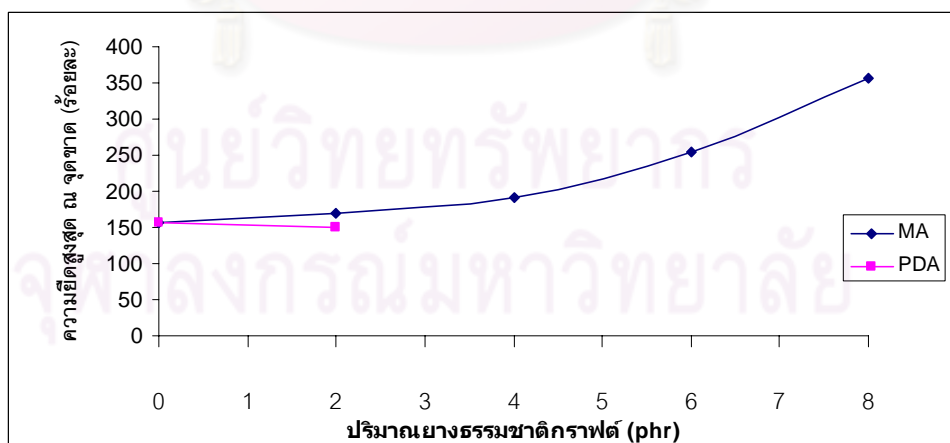
จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในยางผสมมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าลดลง ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่มากขึ้น จึงทำให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าลดลง นอกจากนี้โมเลกุลของยางธรรมชาติมีโครงสร้างเป็นแบบ Crystalline เรียงตัวเป็นระเบียบเมื่อถูกยืดให้ยาว ทำให้ยืดได้มากขึ้น ดังนั้นของผสมในอัตราส่วนที่มีปริมาณยางธรรมชาติมากน่าจะมีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่มีค่าสูง





รูปที่ 4.14 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ 90 ต่อ 10) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.14 พบว่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ NR-g-MA โดยที่ปริมาณการเติมเท่ากับ 6 phr จะให้ค่าที่สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเกิดจากยางธรรมชาติกราฟต์ที่เติมลงไป น่าจะช่วยทำให้ยางผสมมีความกันน้ำได้มากขึ้น โมเลกุลของยางผสมทั้งสองมีการยึดเกาะกันที่ดีขึ้น ส่งผลให้ความสามารถให้การยืดจึงมีมากขึ้น โดยการเติม NR-g-PDA ที่ปริมาณ 2 phr ให้ผลเช่นเดียวกัน นอกจากนี้อาจพิจารณาได้จากกรณีที่ยางธรรมชาติกราฟต์ที่เติมไปอยู่ตรงบริเวณรอยต่อของยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ น่าจะช่วยให้การยึดเกาะดีขึ้น ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงสามารถยืดได้มากขึ้น

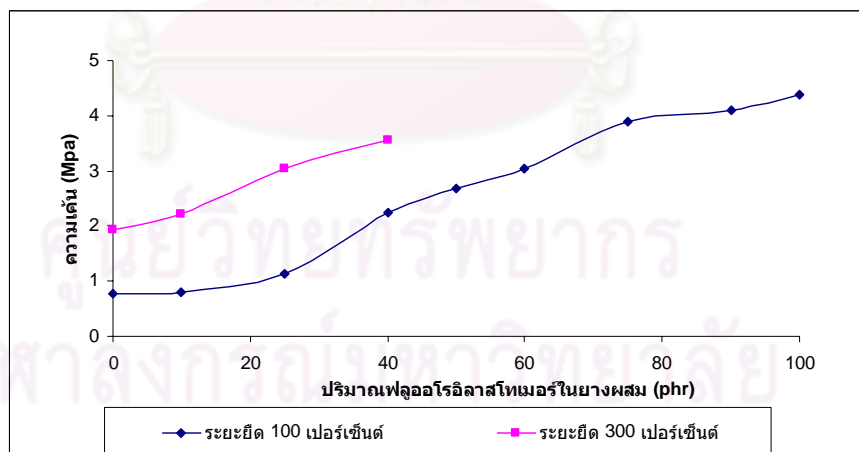


รูปที่ 4.15 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ 10 ต่อ 90) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ NR-g-MA ของผสมที่ได้จึงน่าจะมีความเข้ากันได้มากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาสมบัติอื่นร่วมด้วย เช่น ค่าแรงบิดสูงสุด ค่าแรงบิดต่ำสุด ค่าการทนแรงดึง และค่าความเค้น พบว่าค่าเหล่านี้มีค่าที่ต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณ NR-g-MA มากขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงว่ายางผสมไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แต่การเพิ่มขึ้นของความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ตามรูปที่ 4.15 นั้นน่าจะเกิดจากสมบัติการยึดที่ดีของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นส่วนประกอบใน NR-g-MA ดังนั้นถ้าปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ที่ใช้สูงขึ้น นั่นคือปริมาณยางธรรมชาติก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงขึ้น นอกจากนี้ อาจพิจารณาได้จากค่าความต่างของแรงบิดที่ลดลง ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นในการเชื่อมขวางลดลง จึงทำให้ระยะยืดมีค่ามากขึ้น

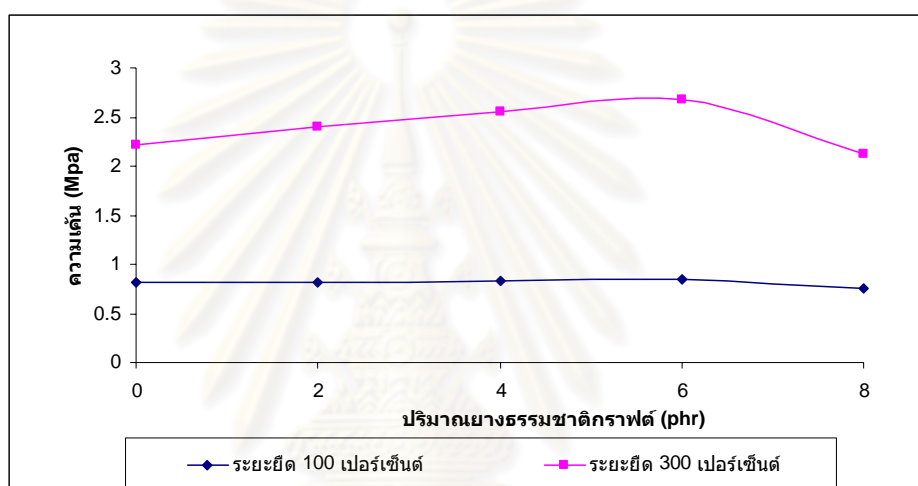
### 4.3.3 ความเค้นของยางผสม

จากตารางที่ 4.5 นำค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของยางสูตรที่ 1 ถึง สูตรที่ 19 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์กับปริมาณของฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ในของผสม (สำหรับยางสูตรที่ 1 ถึง 9) และค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์กับปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ (สำหรับยางสูตรที่ 10 ถึง 19) แสดงดังรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18



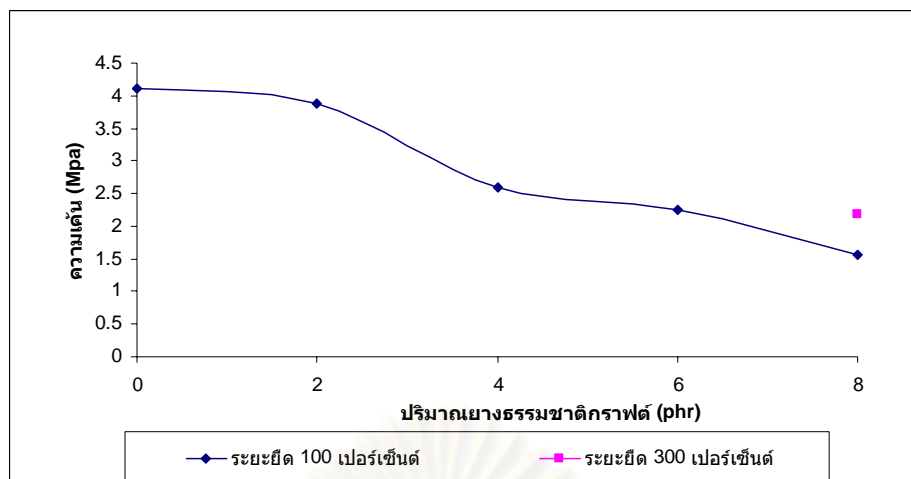
รูปที่ 4.16 ค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9 ที่ปริมาณฟลูออโรอีลาสโทเมอร์ค่าต่างๆโดยไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.16 พบว่า ค่าความเค้น ที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น อธิบายเหตุผลได้เช่นเดียวกับค่าการทนแรงดึงซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 นอกจากนี้อาจเกิดจากโครงสร้างของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่เป็น C-F ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงในการดึงให้ยืดออก ดังนั้นค่าความเค้นที่ได้จึงมีมากขึ้นเมื่อปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในอัตราส่วนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้นเป็น 50 phr จะไม่พบค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 300 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางผสมมีระยะยืดเมื่อขาดที่ต่ำกว่า 300 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5



**รูปที่ 4.17** ค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 90 ต่อ 10) โดยเติม NR-g-MA

จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของของผสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ NR-g-MA จาก 2 ถึง 6 phr โดยที่ปริมาณการเติม 6 phr ให้ค่าที่สูงที่สุด และที่ปริมาณการเติม 8 phr ให้ค่าที่ต่ำลง ซึ่งสามารถอธิบายผลได้เช่นเดียวกับค่าทนต่อแรงดึงในรูปที่ 4.11 ในส่วนของการเติม NR-g-PDA ที่ปริมาณ 2 phr แสดงผลดังตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความเค้น ที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์

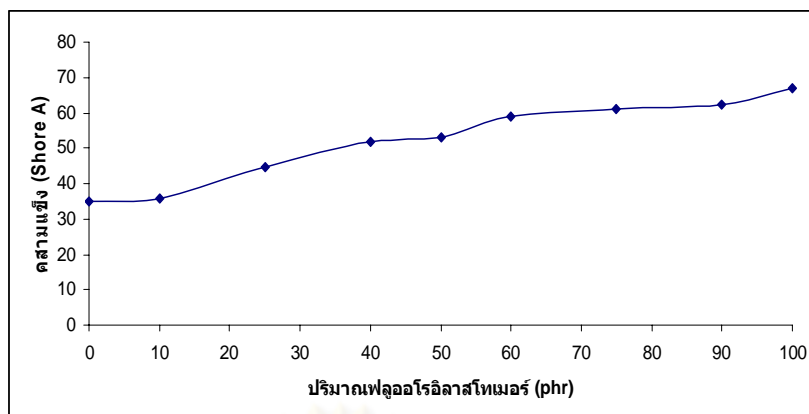


**รูปที่ 4.18** ค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 10 ต่อ 90) โดยเติม NR-g-MA

จากรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์มีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายผลได้เช่นเดียวกับค่าการทนแรงดึงตามรูปที่ 4.12 และในกรณีที่มีการเติม NR-g-MA ที่ปริมาณ 8 phr พบว่ามีค่าความเค้นที่ระยะการยืดตัว 300 เปอร์เซ็นต์เกิดขึ้น เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางธรรมชาติมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อระยะการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงขึ้น

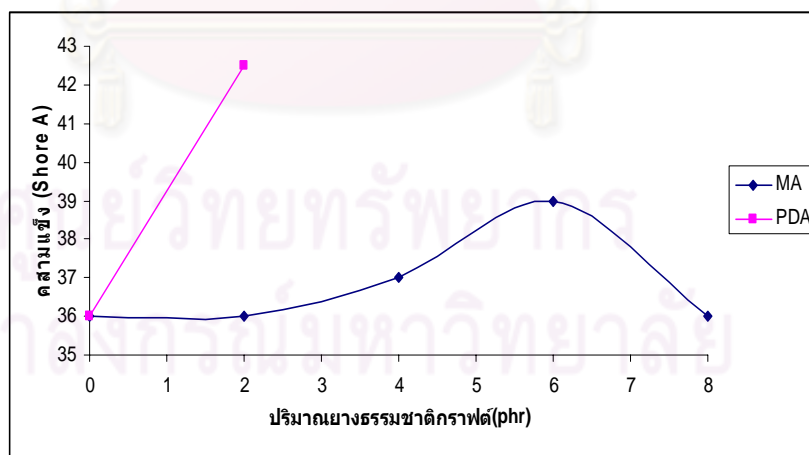
#### 4.3.4 ความแข็งของยางผสม

จากตารางที่ 4.5 นำค่าความแข็งของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 19 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในของผสม (สำหรับยางสูตรที่ 1 ถึง 9) และความแข็งกับปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ (สำหรับยางสูตรที่ 10 ถึง 19) แสดงดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21



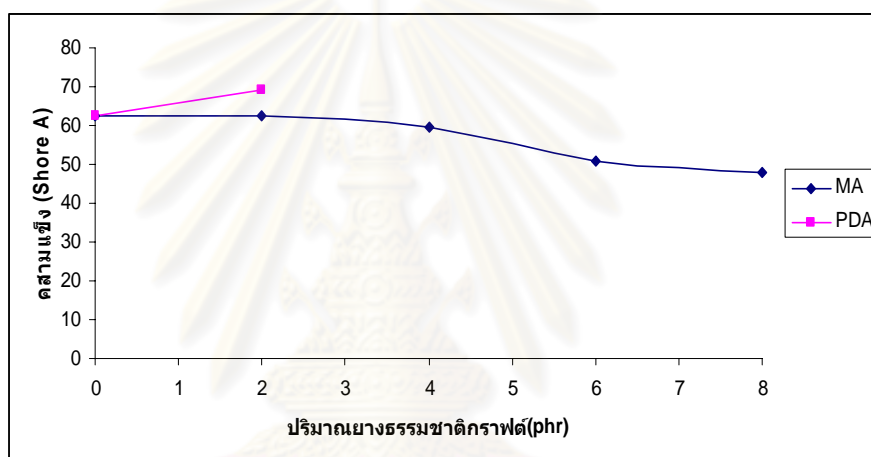
รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9 ที่ปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ค่าต่างๆโดยไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.19 พบว่าค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ ทั้งนี้ อาจเกิดจากฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่มีความหนาแน่นที่สูงกว่ายางธรรมชาติ โมเลกุลของยางอยู่ชิดกันมากกว่า จึงมีค่าความแข็งสูงกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ จึงทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และอาจพิจารณาได้จากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่มากขึ้นเมื่อปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์สูงขึ้น โดยถ้าพันธะเชื่อมขวางมาก ค่าความแข็งก็จะมากขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 90 ต่อ 10) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าความแข็งของยางผสมเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 6 phr โดยที่ปริมาณการเติม 6 phr ให้ค่าที่สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ของผสมน่าจะมี ความเข้ากันได้ดีขึ้น ทำให้การยึดเกาะระหว่างยางทั้งสองมีมากขึ้น ของผสมจึงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าความแข็งจึงมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเติมปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นเป็น 8 phr พบว่าค่าความ แข็งลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการเติมปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์ที่มากเกินไปนั้น ยางธรรมชาติกราฟต์ เกิดการรวมตัวกันเองมากกว่าการที่จะกระจายตัวในเฟสของยางผสม จึงอาจจะไม่ช่วยปรับปรุง ความเข้ากันของยางผสมได้ให้ดีขึ้นได้ ค่าความแข็งจึงลดลง ส่วนกรณีการเติม NR-g-PDA ให้ผล เช่นเดียวกัน คือ ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากการ ที่ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่มากขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

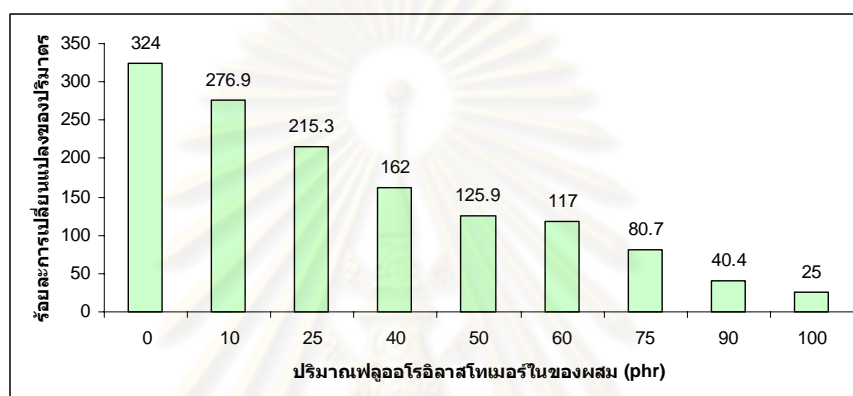


รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 10 ต่อ 90) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่าความแข็งลดลง เมื่อปริมาณของ NR-g-MA มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากยางธรรมชาติเป็นยางที่มีความอ่อน ดังนั้นเมื่อเติมลงไปยางผสมที่มีวิภาคหลักเป็นฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ซึ่งมีความแข็งนั้นจึงทำให้ยางผสมที่ได้มีความแข็งที่ลดลง นอกจากนี้จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลที่ผ่านมาแล้วนี้ พบว่า NR-g-MA อาจจะไม่ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางผสม ดังนั้นค่าความแข็งจึงต่ำลงด้วย นอกจากนี้อาจจะพิจารณาได้จากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ต่ำลง ซึ่งน่าจะเป็นผลให้ค่าความแข็งลดลง แต่ในกรณีที่เติม NR-g-PDA พบว่าให้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ยางธรรมชาติกราฟต์ที่เติมนั้นอาจจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันของยางผสม ซึ่งสามารถอธิบายผลได้เช่นเดียวกับกรณีที่เติมลงของผสมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ เท่ากับ 90 ต่อ 10

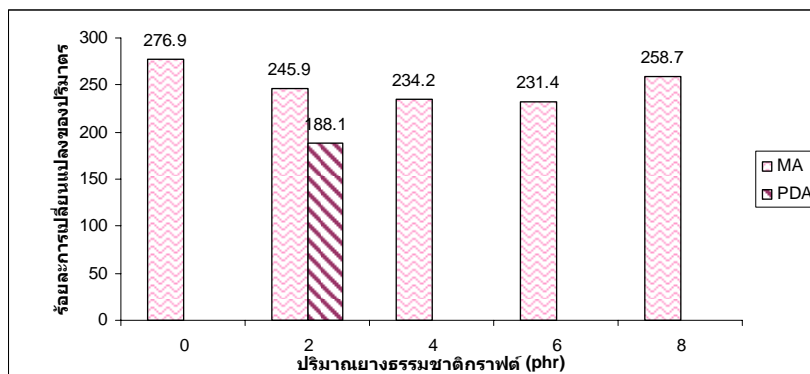
#### 4.4 การวิเคราะห์ความความต้านทานต่อการบวมตัวเนื่องจากสารละลายโทลูอีน

ในการทดสอบความต้านทานต่อการบวมตัวเนื่องจากสารละลายโทลูอีนของยางผสม ซึ่งใช้เวลาในการบ่มตัวอย่างในสารละลายโทลูอีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัดค่าออกมาในรูปของร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร ซึ่งคำนวณตามสูตรในภาคผนวก ก แสดงดังรูปที่ 4.22 ถึง 4.24



รูปที่ 4.22 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเนื่องจากสารละลายโทลูอีนของยางผสมสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9 ที่ปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ค่าต่างๆโดยไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์

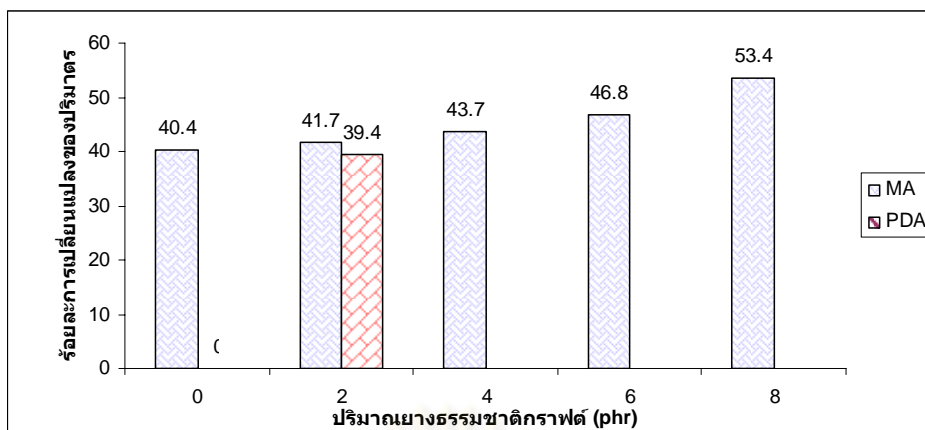
จากรูปที่ 4.22 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติ ในขณะที่สารละลายโทลูอีนที่ใช้มีขั้วต่ำเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อปริมาณของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับตัวทำลายของยางผสมลดลง อีกทั้งวัฏภาคหลักของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ห่อหุ้มไม่ให้อย่างธรรมชาติขยายตัวได้มาก จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรลดลง และอาจพิจารณาได้จากความหนาแน่นในการเชื่อมขวางที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ ได้ว่าพันธะเชื่อมขวางมากขึ้นทำให้โมเลกุลของของผสมอยู่ชิดกันมากขึ้น การบวมตัวจึงเกิดได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.23 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเนื่องจากสภาวะละลายโทลูอีนของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 90 ต่อ 10) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

จากรูปที่ 4.23 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของ NR-g-MA เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 6 phr โดยที่ค่า 6 phr ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรต่ำที่สุด โดยการเติม NR-g-MA น่าจะไปช่วยปรับปรุงบริเวณผิวสัมผัสผิวด้านของยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ให้มีความใกล้เคียงกันมากขึ้น [2] ทั้งนี้อาจเกิดจากยางธรรมชาติกราฟต์มีส่วนที่มีซัลฟ์ (Maleic anhydride) และไม่มีซัลฟ์ (ยางธรรมชาติ) ซึ่งส่วนที่มีซัลฟ์จะไปจับกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ แล้วส่วนที่ไม่มีซัลฟ์จะไปจับกับยางธรรมชาติ อาจจะทำให้ยางธรรมชาติและฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีความเข้ากันได้ดีขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าลดลง แต่เมื่อปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นเป็น 8 phr ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการจับตัวกันเองของยางธรรมชาติกราฟต์แทนการทำหน้าหน้าที่เสริมสภาพเข้ากันได้ จึงทำให้เกิดการบวมตัวในสภาวะละลายมากขึ้น ในกรณีที่เติม NR-g-PDA พบว่าให้ผลเช่นเดียวกัน คือร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าลดลง นอกจากนี้อาจพิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่มากขึ้น อาจทำให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางผสมลดลงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



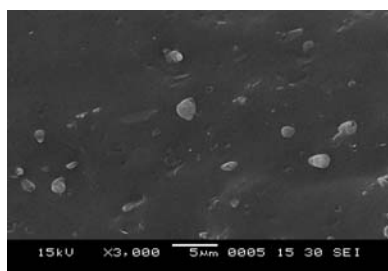


**รูปที่ 4.24** ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเนื่องจากสารละลายไทลูอินของของผสม (อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ 10 ต่อ 90) โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์

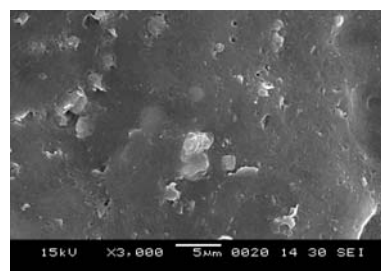
จากรูปที่ 4.24 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของผสมเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ NR-g-MA มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือยางผสมมีค่าความต้านทานต่อการบวมตัวเนื่องจากสารละลายไทลูอินลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจาก NR-g-MA กระจายตัวได้ไม่ดีในยางผสมที่วัฏภาคหลักเป็นฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ ดังนั้นของผสมจึงอาจจะเข้ากันได้ไม่ดี นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากยางธรรมชาติกราฟต์ที่เติมลงไปนั้นเกิดการบวมตัวได้ดีในสารละลายไทลูอิน ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมเพิ่มขึ้น ในกรณีที่เติม NR-g-PDA พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าลดลง เนื่องจากยางผสมน่าจะมีค่าความเข้ากันที่ดียิ่งขึ้น และอาจพิจารณาได้จากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ลดลง ได้ว่าเมื่อพันธะเชื่อมขวางลดลงโมเลกุลของยางอยู่กันห่างมากขึ้น จึงอาจจะเกิดการบวมตัวได้มากขึ้นเช่นกัน

#### 4.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางผสม

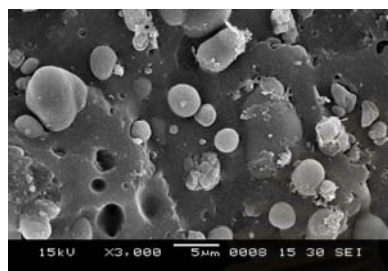
สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางผสม สามารถศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า เพื่อทำการศึกษาความเข้ากันได้ของการผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ รวมถึงผลของการใช้ยางธรรมชาติกราฟต์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้สำหรับยางผสม แสดงดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.27



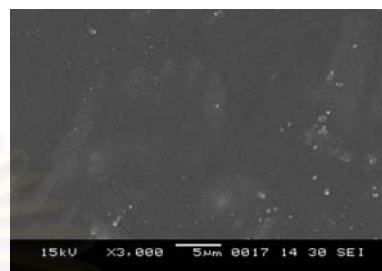
(น) 100:0



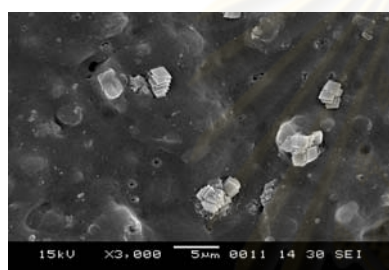
(ข) 90:10



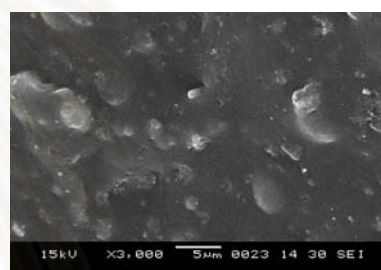
(ค) 75:25



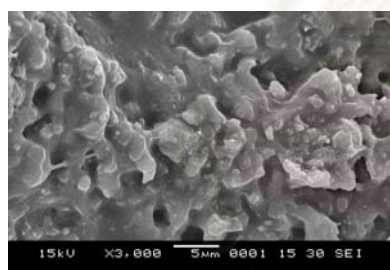
(ง) 60:40



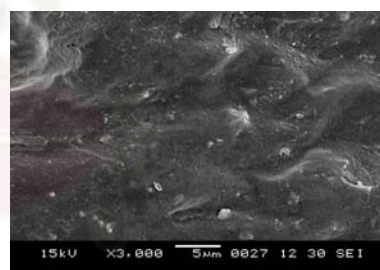
(จ) 50:50



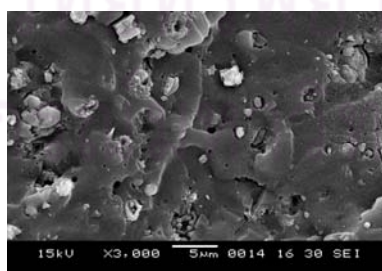
(ฉ) 40:60



(ช) 25:75



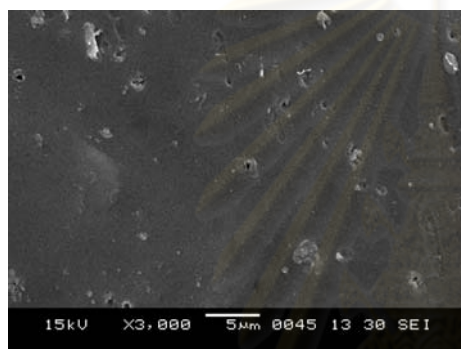
(ฐ) 10:90



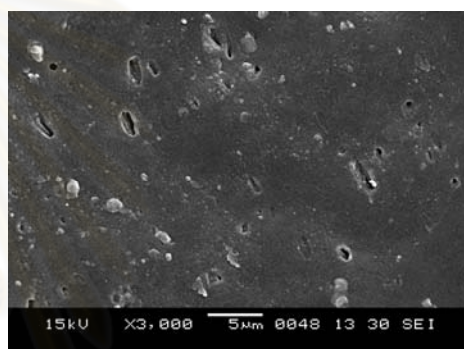
(ณ) 0:100

รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างตามสูตรที่ 1 ถึง 9 โดยไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์

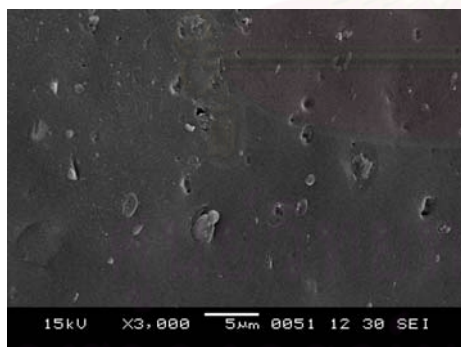
จากรูปที่ 4.25 แสดงการวิเคราะห์ที่สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ จากรูป (ก) ซึ่งแสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ และ (ข) ซึ่งแสดงสัณฐานวิทยาของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ เมื่อพิจารณารูป (ข) ถึง (ง) พบว่าที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เท่ากับ 50 ต่อ 50 ส่วน ภูมิภาคของยางผสมน่าจะไม่เข้ากันมากที่สุด โดยดูจากการกระจายตัวของยางทั้งสองซึ่งไม่สม่ำเสมอ และขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ายางผสมที่อัตราส่วนอื่น และความเข้ากันได้น่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติหรือฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นลำดับความเข้ากันได้ดังนี้ (ข) มากกว่า (ค) มากกว่า (ง) มากกว่า (จ) และ (จ) น้อยกว่า (ข) น้อยกว่า (ข) น้อยกว่า (ข)



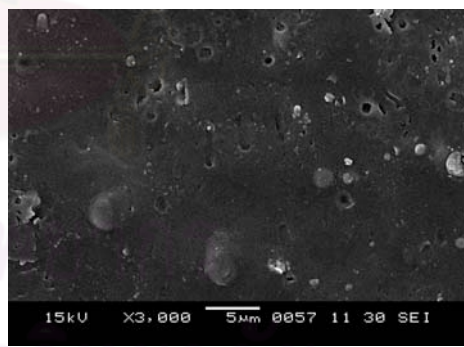
(ก) 2phr



(ข) 4 phr

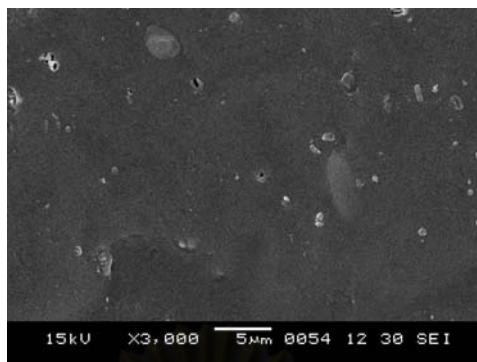


(ค) 6 phr



(ง) 8 phr

รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมีสารเติม NR-g-MA ปริมาณต่างๆ

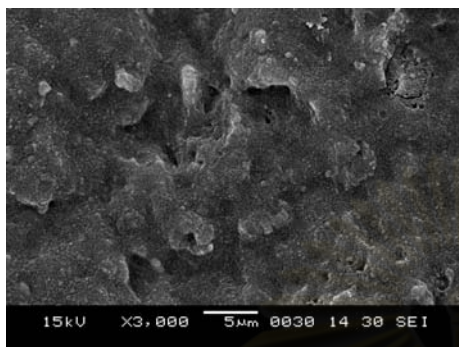


(จ)

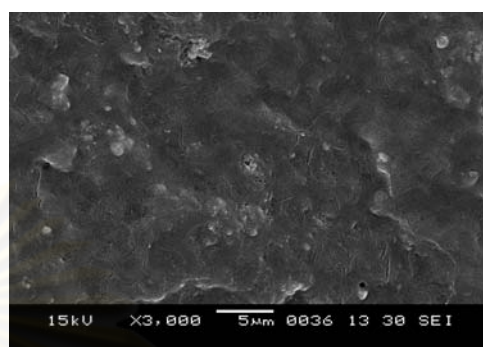
**รูปที่ 4.26** (ต่อ) สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ (จ) NR-g-PDA 2 phr

จากรูปที่ 4.26 (ก) ถึง (ง) พบว่าเมื่อปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 6 phr การกระจายตัวของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (เฟสสีดำ) ในยางธรรมชาติ (เฟสสีเทา) ดีขึ้น อนุภาคของเนื้อยางมีขนาดเล็กลง แสดงให้เห็นว่ายางผสมน่าจะมี ความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น แต่ความเข้ากันน่าจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ NR-g-MA เป็น 8 phr น่าจะเกิดจากการที่ยางธรรมชาติกราฟต์รวมตัวกันเองมากกว่าจะทำหน้าที่เป็นสารเสริมความเข้ากันได้ของยางผสม ส่วนการเติม NR-g-PDA 2 phr พบว่าน่าจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่มากขึ้นเป็นผลให้โมเลกุลของยางอยู่ชิดกันมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เห็นภาพเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

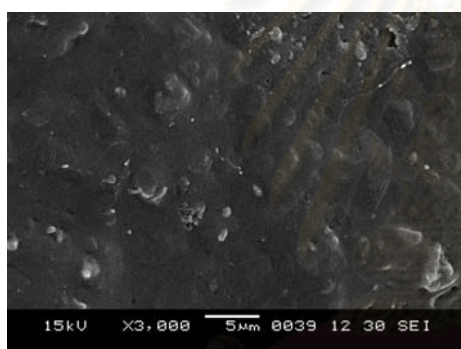
จากรูปที่ 4.27 (ก) ถึง (ง) พบว่าเมื่อปริมาณ NR-g-MA เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 8 phr การกระจายตัวของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (เฟสสีดำ) ในยางธรรมชาติ (เฟสสีเทา) แย่ลง อนุภาคของเนื้อยางมีขนาดใหญ่ขึ้น นั่นอาจจะแสดงให้เห็นว่า NR-g-MA น่าจะไม่สามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้นได้ เกิดจากการที่ NR-g-MA ไม่สามารถกระจายตัวได้ดีในยางผสมที่มีฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เป็นวัฏภาคหลัก นอกจากนี้ อาจพิจารณาได้จากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ลดลง อาจส่งผลให้การกระจายตัวของของผสมเกิดขึ้นไม่ดี ส่วนการเติม NR-g-PDA 2 phr ไม่สามารถบอกความแตกต่างจากกรณีที่ไม่เติมยางธรรมชาติกราฟต์ได้ จึงไม่สามารถอธิบายสัณฐานวิทยาของของผสมในกรณีนี้ได้



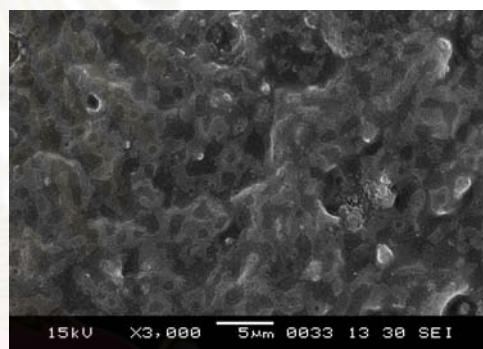
(ก) NR-g-MA 2 phr



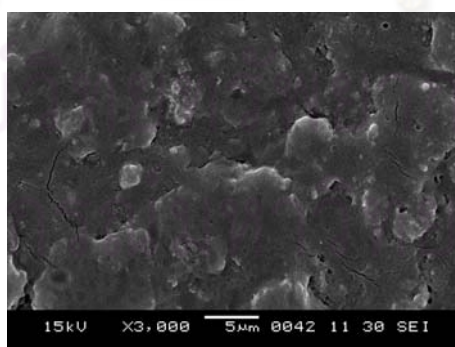
(ข) NR-g-MA 4 phr



(ค) NR-g-MA 6 phr



(ง) NR-g-MA 8 phr



(จ) NR-g-PDA 2 phr

**รูปที่ 4.27** สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมีการเติม NR-g-MA 2 ถึง 8 phr และ NR-g-PDA 2 phr

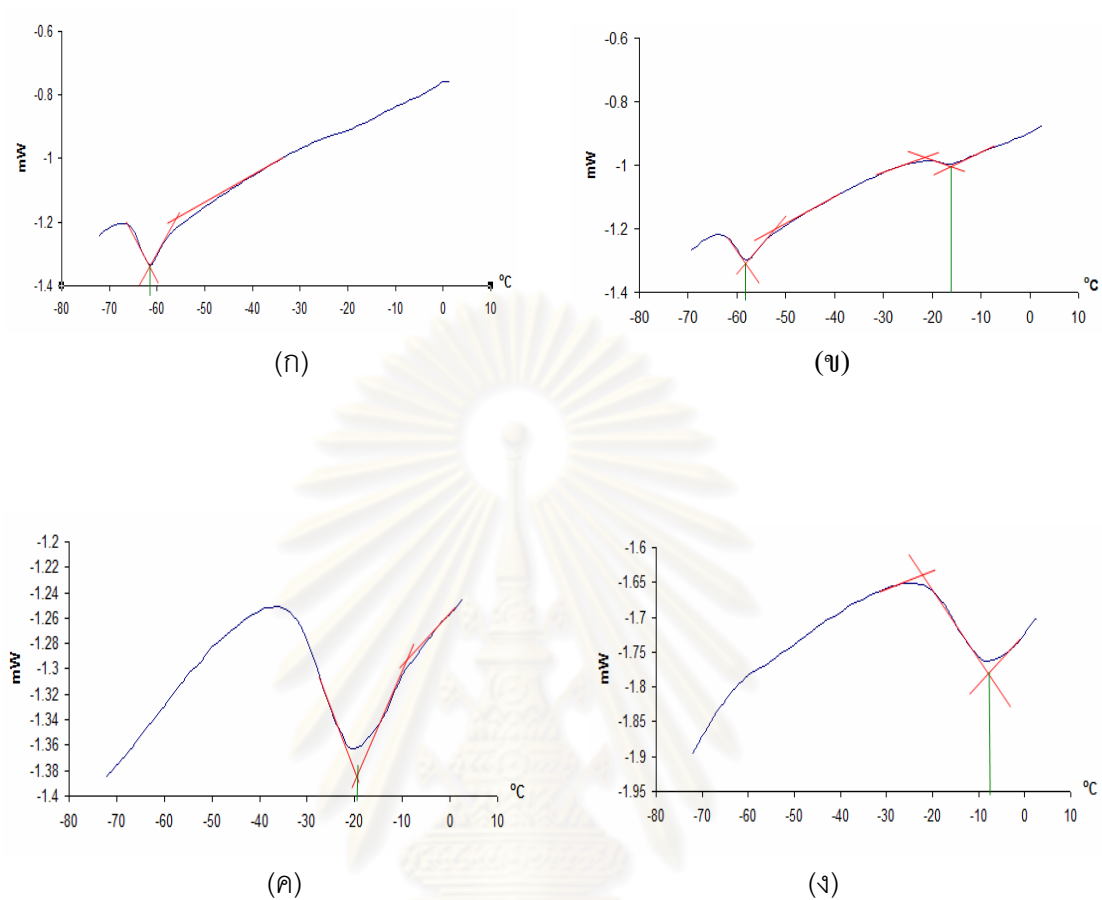
#### 4.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางผสม

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Chromatograph ของยางผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนตามสูตรยางผสมดังนี้ สูตรที่ 1 (100 ต่อ 0) สูตรที่ 2 (90 ต่อ 10) สูตรที่ 8 (90 ต่อ 10) และสูตรที่ 9 (0 ต่อ 100) โดยไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ สูตรที่ 10 ถึง 13 (90 ต่อ 10) และ สูตรที่ 14 ถึง 17 (10 ต่อ 90) โดยมีการเติม NR-g-MA สูตรที่ 18 (90 ต่อ 10) และสูตรที่ 19 (10 ต่อ 90) โดยมีการเติม NR-g-PDA ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6 ถึง 4.8 และ รูปที่ 4.28 ถึง 4.30

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์

สูตรที่	ยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (องศาเซลเซียส)
1	100:0	-61.35
2	90:10	-58.69 และ -16.02
8	10:90	-18.70
9	0:100	-8.04

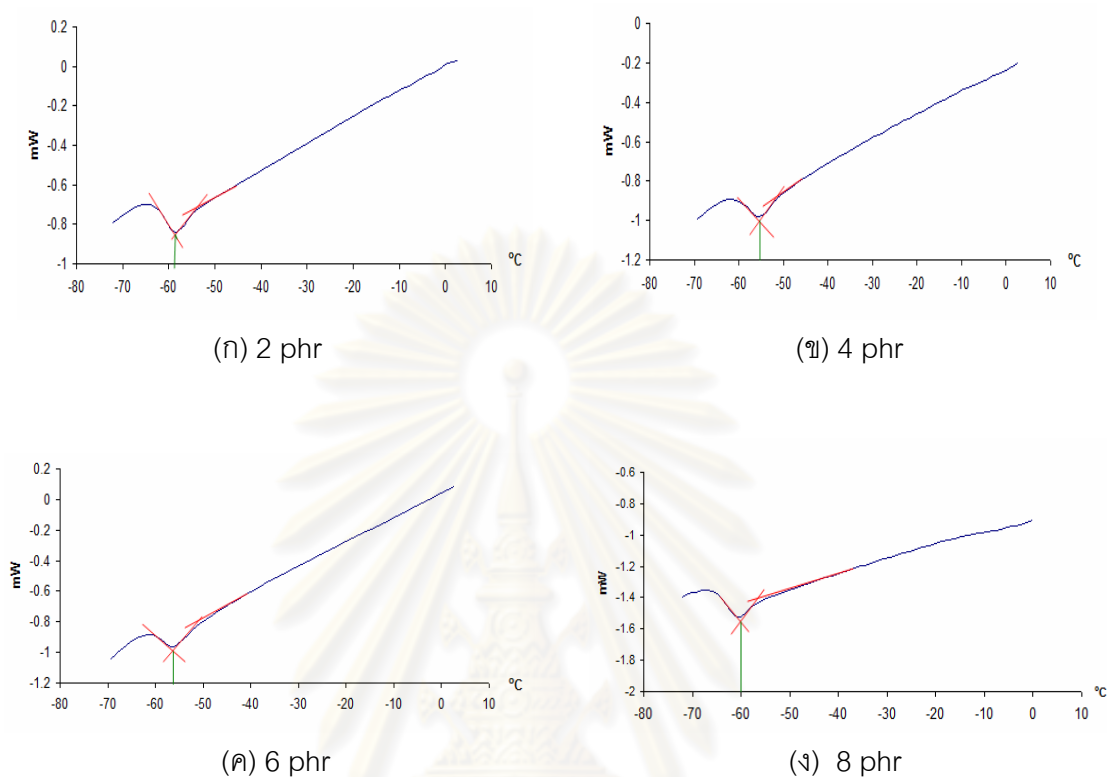
จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.28 พบว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 (สูตรที่ 2) ให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ค่า นั้นแสดงให้เห็นว่ายางผสมที่ได้น่าจะไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดการแยกเฟส ระหว่างเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง ดังแสดงในสัณฐานวิทยาของยางผสมที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ในกรณีของยางสูตรที่ 8 พบว่าให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงค่าเดียว และเป็นค่าที่อยู่ระหว่างค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติและฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ นั้นอาจกล่าวได้ว่าของผสมน่าจะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้



**รูปที่ 4.28** อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ (ก) 100 ต่อ 0 (ข) 90 ต่อ 10 (ค) 10 ต่อ 90 (ง) 0 ต่อ 100

**ตารางที่ 4.8** สมบัติทางความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมีการเติม NR-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ

สูตรที่	NR-g-MA (phr)	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (องศาเซลเซียส)
10	2	-58.68
11	4	-56.01
12	6	-56.01
13	8	-60



**รูปที่ 4.29** อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมีการเติม NR-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ

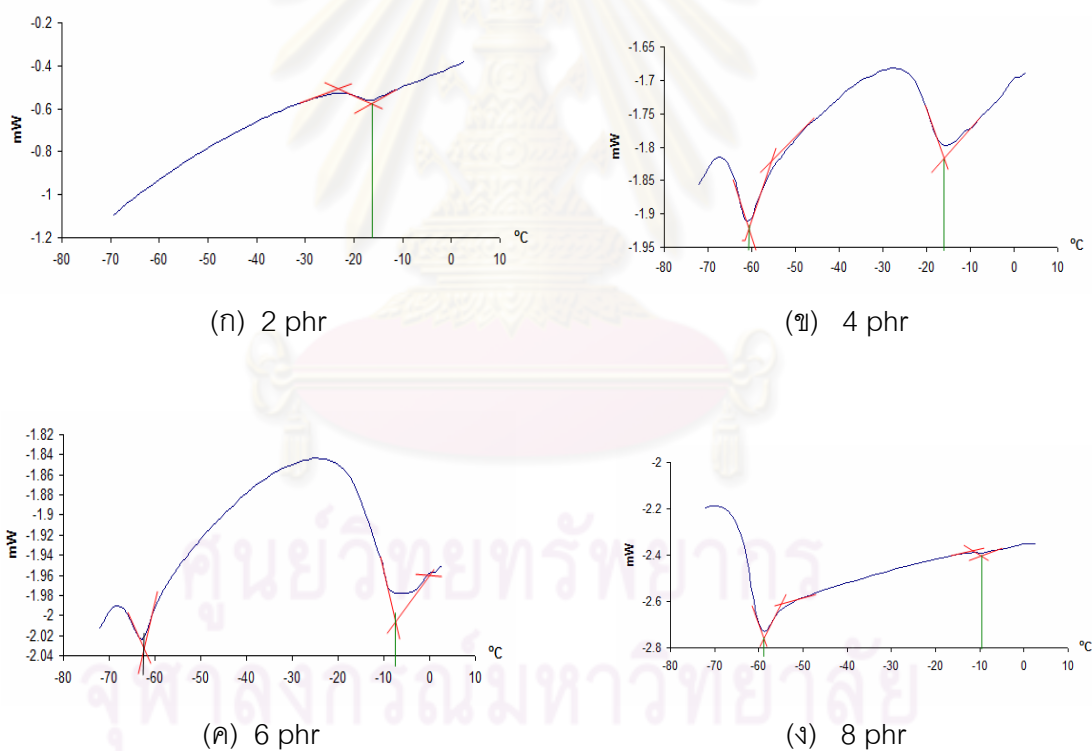
จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อเติม NR-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 ให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงค่าเดียว และเป็นค่าที่อยู่ระหว่างค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติและฟลูออโรอีลาสโตเมอร์นั้นแสดงให้เห็นว่ายางผสมที่ได้น่าจะเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่เกิดการแยกระหว่างเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง นั่นคือยางผสมอาจจะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น

จากตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อเติม NR-g-MA ที่ปริมาณ 2 phr ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมมีเพียงค่าเดียว และเป็นค่าที่อยู่ระหว่างยางธรรมชาติและฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ แสดงว่าของผสมน่าจะยังรวมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ NR-g-MA เป็น 4 ถึง 8 phr พบว่าค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมมีสองค่า นั่นแสดงให้เห็นว่ายางผสมที่ได้ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดการแยกระหว่างเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง



ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 โดยมีการเติม NR-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ

สูตรที่	NR-g-MA (phr)	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (องศาเซลเซียส)
14	2	-16.01
15	4	-61.36 และ -16.04
16	6	-62.69 และ -8.04
17	8	-58.71 และ -9.38



รูปที่ 4.30 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 โดยมีการเติม NR-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การศึกษากาการใช้ยางธรรมชาติกราฟต์เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ของของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ โดยศึกษาจากสมบัติเชิงกล การบวมตัวและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากน้ำมัน ลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงความร้อนของยางผสม ผลการทดลองได้สรุปดังนี้

#### 5.1 หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติกราฟต์

ยางธรรมชาติกราฟต์ถูกตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (Fourier-transform Spectroscopy Infrared, FT-IR) พบว่าน่าจะเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ เนื่องจากปรากฏพีคที่จำนวนคลื่น  $1713.1 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งบอกถึงหมู่  $\text{C}=\text{O}$  และหมู่  $-\text{C}=\text{C}-$  ที่ตำแหน่ง  $637.7 \text{ cm}^{-1}$  ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และพบว่าจะเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันของ 1,2-พีนีลีนไดเอมีนบนยางธรรมชาติ เนื่องจากปรากฏพีคของกลุ่ม  $\text{N-H}$  ที่ตำแหน่ง  $3386.9$  และ  $3365.2 \text{ cm}^{-1}$  และกลุ่มของ  $\text{C-N}$  ณ ตำแหน่ง  $1278.3 \text{ cm}^{-1}$

#### 5.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยวิธีการสกัดร้อน

การศึกษาผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันพบว่าร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ทั้ง 2 ชนิด มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 phr และลดลงเมื่อใช้มอนอเมอร์ 10 phr โดยยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ให้ค่าที่สูงกว่ายางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-พีนีลีนไดเอมีน

#### 5.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการวัลคะไนซ์ของยางผสม

สำหรับยางผสมที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ เมื่อปริมาณยางฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้นพบว่าเวลาที่ใช้ในการไหลและเวลาที่เหมาะสม ในการวัลคะไนซ์ของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่าความต่างของแรงบิด พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ระบบที่ใช้ในการวัลคะไนซ์น่าจะส่งผลต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มากกว่ายางธรรมชาติ

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการไหล และเวลาที่เหมาะสมในการวัลคะไนซ์ของยางผสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ค่าความต่างของแรงบิดสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 2 ถึง 6 phr และมีค่าลดลงที่ 8 phr ส่วนการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนที่ปริมาณ 2 phr ให้ผลเช่นเดียวกัน

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนพบว่าเวลาที่ใช้ในการไหล และเวลาที่เหมาะสมในการวัลคะไนซ์ของยางผสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ค่าความต่างของแรงบิดต่ำลง นั่นอาจแสดงว่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางลดลง

#### 5.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของยางผสม

สำหรับยางผสมที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ พบว่าความต้านแรงดึง ความเค้นที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าลดลง

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าความต้านแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความเค้นที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพิ่มจาก 2 ถึง 6 phr และลดลงเมื่อใช้ปริมาณ 8 phr ส่วนการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนที่ปริมาณ 2 phr ให้ผลสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าความต้านแรงดึง ความเค้นที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งมีค่าลดลง ขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าสูงขึ้นส่วนการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนที่ปริมาณ 2 phr ให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น

## 5.5 การวิเคราะห์ความความต้านทานต่อการบวมตัวเนื่องจากสารละลายโทลูอิน

สำหรับยางผสมที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณฟลูออโรอีลาสโตเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลกิกแอนไฮไดรด์ พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของยางธรรมชาติกราฟต์มาเลกิกแอนไฮไดรด์ เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 6 phr โดยที่ค่า 6 phr ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มขึ้นเป็น 8 phr ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนที่ปริมาณ 2 phr พบว่าให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรต่ำลงเช่นเดียวกัน

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลกิกแอนไฮไดรด์ พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีนที่ปริมาณ 2 phr พบว่าให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรต่ำลง

## 5.6 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของของผสม

สำหรับยางผสมที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ พบว่าที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เท่ากับ 50 ต่อ 50 ส่วน ภูมิภาคของยางผสมน่าจะไม่เข้ากันมากที่สุด

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลกิกแอนไฮไดรด์ พบว่าการกระจายตัวของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในยางธรรมชาติน่าจะดีขึ้น อนุภาคของเนื้อยางมีขนาดเล็กกลง แสดงให้เห็นว่ายางผสมน่าจะมีค่าเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยปริมาณยางธรรมชาติกราฟต์มาเลกิกแอนไฮไดรด์เป็น 6 phr ให้ค่าที่ดีที่สุด ส่วนการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน 2 phr พบว่าน่าจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้นเช่นกัน

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าการกระจายตัวของฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ในยางธรรมชาติแย่ง อนุภาคของเนื้อยางมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ น่าจะไม่สามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้น แต่การเติมยางธรรมชาติกราฟต์ 1,2-ฟีนิลีนไดเอมีน 2 phr พบว่าอาจจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้น

### 5.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางผสม

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณ 2 ถึง 6 phr ให้ค่า Tg เพียงค่าเดียว นั่นอาจจะได้ว่ายางผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มเป็น 8 phr พบว่าให้ค่า Tg 2 ค่า แสดงว่ายางผสมอาจไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

ของผสมยางธรรมชาติกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10 ต่อ 90 ส่วน เมื่อเติมยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ตั้งแต่ 4 ถึง 8 phr ให้ค่า Tg 2 ค่า แสดงว่ายางผสมอาจไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

### 5.8 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์ ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆที่อาจจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟต์ไดโพลไมโอไรเซชัน เช่น ปริมาณสารเริ่มต้น (initiator) อุณหภูมิ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น
2. ควรเลือกใช้ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์เกรดที่มีระบบการวัลคะไนซ์ที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในการขึ้นรูปยางผสม
3. ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการผสมเพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิและเวลาในการผสม เป็นต้น
4. สามารถนำยางธรรมชาติกราฟต์ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางผสมให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
5. ในการผสมยางที่มีระบบการวัลคะไนซ์ต่างกันที่อัตราส่วนต่างๆ สารที่นำมาใช้ในการวัลคะไนซ์ควรคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักยางแต่ละชนิด

6. การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนควรทำ DMA เพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่อง DSC ว่าให้ผลที่เหมือนหรือแตกต่างกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Siti Hajjar et.al. Studies on the curing behaviour and mechanical properties of styrene/methyl methacrylate grafted deproteinized natural rubber latex. J. Polymer Research, 2008, 15, 357-364.
- [2] Prajitha Kumari, C. K. Radhakrishnan, Shyla George and G. Unnikrishnan. Mechanical and sorption properties of poly(ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) compatibilized acrylonitrile butadiene rubber/natural rubber blend systems. J. Polymer Research, 2008, 15, 97–106.
- [3] M. N. Radhakrishnan Nair and M. R. Gopinathan Nair. Compatibility studies and characterization of a PVC/NR blend system using NR/PU block copolymer. J. Polymer Bulletin. 2006, 56, 619–631.
- [4] Hesham Afifi and A. A. El-Wakil. Study of the effect of natural rubber-graft-maleic anhydride (NR-g-MA) on the compatibility of NR-NBR blends using ultrasonic technic. J. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2008, 47, 1032-1039.
- [5] M.A. Sidkey,A.A. Yehia, N.A. Abd El Malak, M.S. gaafar. Compatibility studies on some rubber blend systems by ultrasonic technique. J. Materials Chemistry and Physics, 2002, 74, 23-32.
- [6] M. O. Abou-Helal and S. H. El-Sabbagh. A Study on the Compatibility of NR-EPDM Blends Using Electrical and Mechanical Techniques. J. Elastomers and Plastics, 2005, 37. 319.
- [7] Z. Oommen, S. Thomas. Compatibility studies of natural rubber/poly(methyl methacrylate) blends by viscometry and phase separation techniques. J. Materials science, 1997, 32, 6085-6094.

- [8] D. E. El-Nashar, S. L. Abd-El-Messieh and M. A. M.Eid. Filling Effect of Silica on Electrical and Mechanical Properties of EPDM/NBR Blends. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2001,45,675-684.
- [9] การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น. [Online]. Available from: <http://th.wikipedia.org>. 2009, Jan 2.
- [10] ดร.พงษ์ธร แซ่อู๋. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548.
- [11] C. Nakason, A. Kaesaman, Z. Samoh, S. Homsin, S. Kiatkamjornwong. Rheological properties of maleated natural rubber and natural rubber blends. J. Polymer Testing. 2002, 21, 449-455.
- [12] Guilherme M.O. Barra et.al. Maleic anhydride grafting on EPDM: qualitative and quantitative determination. J.Braz. Chem. Soc., 1999, 31-34.
- [13] รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. เทคโนโลยีของยาง. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [14] A.D. Roberts. Natural Rubber Science and Technology. Brickendonbury:Oxford University Press. 1988.
- [15] ดร.พงษ์ธร แซ่อู๋ และ ร.ศ.ดร.ชาคริต สิริสิงห. ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2550.
- [16] พลชิต บัวแก้ว. เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียางแห้ง. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2542.
- [17] หน่วยเทคโนโลยียาง. ชนิดของยางและการใช้งาน. [Online]. Available from: <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>. 2009, Feb 16.



- [18] Technical Information. Viton fluoroelastomer Selecton Guide [Online]. Available from: [www.dupont-dow.com](http://www.dupont-dow.com). 2008, Dec 15,
- [19] Technical Information. Viton fluoroelastomer Compounding With Viton Curative Masterbatches. [Online]. Available from: [www.dupont-dow.com](http://www.dupont-dow.com). 2008, Dec 15.
- [20] Technical Information. Viton fluoroelastomer Diak Curing Agents for Viton Fluoroelastomers [Online]. Available from: [www.dupont-dow.com](http://www.dupont-dow.com).
- [21] Viton Fluoroelastomer. [Online]. Available from: [http://www.thermodyn.com/Gasket/Viton\\_F.html](http://www.thermodyn.com/Gasket/Viton_F.html). 2008, March 9.
- [22] A. Taguet, B. Ameduri and B. Boutevin. Crosslinking of Vinylidene Fluoride-Containing Fluoropolymers. J. Adv Polym Sci. 2005, 184: 127-211.
- [23] Fluoroelastomers [Online]. Available from: <http://www.iisrp.com/WebPolymers/06ModFluoroelastomersv1-4.pdf>. 2009, March 14.
- [24] Dupont Dow Elastomers L.L.C.. Material Safty Data Sheet. Viton A. Available from: [www.dupont-dow.com](http://www.dupont-dow.com). 2008. March 14.
- [25] Dupont Dow Elastomers L.L.C.. Material Safty Data Sheet. Viton B. Available from: [www.dupont-dow.com](http://www.dupont-dow.com). 2008. March 14
- [26] Dupont Dow Elastomers L.L.C.. Material Safty Data Sheet. Viton F. Available from: [www.dupont-dow.com](http://www.dupont-dow.com). 2008. March 14.
- [27] Andrew J. Tinker. Distribution of crosslinks in vulcanized blend. Rubber Chemistry and Technology. 1995, 68,3.

- [28] ดร. กฤษฏา สุชีวะ. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้ยางผสม. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหน่วยเทคโนโลยียาง. มหาวิทยาลัยมหิดล. 2005.
- [29] Andrew J. Tinker and Kevin P. Jones. Blend of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymer. (n.p.): Chapman & Hall. 1998.
- [30] ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2527.
- [31] พายัพ นามประเสริฐ. เครื่องวัดความหนืดมูลี่ของยาง. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม. 2550
- [32] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง. ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร. เอกสารฉบับที่135. 2530
- [33] ดร.พงษ์ธร แซ่อูย. สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2548.
- [34] สารเคมียาง. [Online]. Available from:  
<http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=rubber-chemist&month=06-2008&date=03&group=4&gblog=5>. 2008. March 14.
- [35] เครื่องบดผสมระบบเปิด (Two-roll mill). [Online]. Available from:  
[www.made-in-china.com/trade-offers/offerviewZ...](http://www.made-in-china.com/trade-offers/offerviewZ...) 2008. March 14.
- [36] เครื่องบดผสมแบบปิด (kneader). [Online]. Available from:  
[www.made-in-china.com/.../China-Kneader.html](http://www.made-in-china.com/.../China-Kneader.html). 2008. March 14
- [37] เครื่องบดผสมแบบปิด (banbury). [Online]. Available from:  
[www.kangcheng.com.tw/intensive.html](http://www.kangcheng.com.tw/intensive.html). 2008. March 14.

- [38] A. A. El-Wakil. Study on effect of natural rubber-graft-1,2-phenylenediamine as antioxidant on oxidation resistance for natural rubber. J. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2007, 46, 661-666.
- [39] C. Nakason, A. Kaesaman, P. Supasanthikul. The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. J.Polymer Testing, 2004, 23, 35-41
- [40] สุพัฒน์ มุลลิน. การใช้ยางธรรมชาติกราฟสไตรีนเป็นสารช่วยผสมในการหล่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.
- [41] สมบัติ ธีระวันต์และกันนาพร พุฒูฒ. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติทนน้ำมันและความร้อนของยางธรรมชาติโดยผสมกับยางอะคริลิก. สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล. MT-B-44-POL-14-183-G. 2005.
- [42] จักรวธ ตันท์สุระ และคณะ. โพลีเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและโพลิพรอพิลีนเพื่อใช้ในการผลิตปะเก็น. ภาควิชาวิศวกรรมและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราช มงคลธัญบุรี. 2005.
- [43] H.M. Nor and J.R. Ebdon. Ozonolysis of natural rubber in chloroform solution Part 1. A study by GPC and FTIR spectroscopy. J. Polymer, 2000, 2359-2365.
- [44] นุชนาฏ ณ ระนอง และคณะ. เทคโนโลยีการผลิตยางผสมจากยางธรรมชาติ. รายงานผลการวิจัยเรื่องเต็ม ประจำปี 2550.
- [45] สุกัญญา เหนือแสน และคณะ. การดัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอีพอกซิเดชันและสมบัติทางความร้อน. *Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology*, 2005.

- [46] สุเมธ กิตติภูมิ และคณะ. คณะ. การเตรียมฟิล์มยางทนน้ำมันโดยจุ่มเคลือบยางธรรมชาติ อีพอกซีไดซ์บนฟิล์มยางธรรมชาติ. Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, 2005.
- [47] ชัชวาลย์ กันทะลา และคณะ. อิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์ การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. 2007.
- [48] อนิดา เพ็ชรแก้วและ วราภรณ์ ตันรัตน์กุล. อิทธิพลของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและมอร์โฟโลยีของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิซิลิโคนเตตพอลิเอทิลีน. 2005
- [49] พนิดา สุมานะตระกูล และคณะ. อิทธิพลของยางรีเคลมต่อผลของคุณสมบัติการเชื่อมโยงและคุณสมบัติเชิงกลของของผสมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 15. 2005
- [50] C. Nakason, S. Saiwaree, S. Tatun, A. Kaesaman. Rheological, thermal and morphological properties of maleated natural rubber and its reactive blending with poly(methyl methacrylate). *J. Polymer Testing*, 2006, 25, 656-667



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก  
สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

1. ร้อยละของการเปลี่ยน (%Conversion) = 
$$\frac{(\text{น้ำหนักยางที่ได้หลังอบ} - \text{น้ำหนักยางแห้ง})}{\text{น้ำหนักมอนอเมอร์ที่ใช้}} \times 100$$
2. ร้อยละยางธรรมชาติกราฟต์ (%GNR) = 
$$\frac{\text{น้ำหนักยางหลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์และอะซิโตน}}{\text{น้ำหนักยางที่นำมาสกัดร้อน}} \times 100$$
3. ร้อยละยางธรรมชาติที่ไม่เกิดการกราฟต์ (%Free NR) = 
$$\frac{(\text{น้ำหนักยางที่นำมาสกัดร้อน} - \text{น้ำหนักยางหลังสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์})}{\text{น้ำหนักยางที่นำมาสกัดร้อน}} \times 100$$
4. ร้อยละของมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์ (%Free monomer) = 
$$\frac{(\text{น้ำหนักยางหลังสกัดปิโตรเลียมอีเทอร์} - \text{น้ำหนักยางหลังสกัดปิโตรเลียมอีเทอร์และอะซิโตน})}{\text{น้ำหนักยางที่นำมาสกัดร้อน}} \times 100$$

5. ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting efficiency)

$$\begin{aligned} \text{พอลิเมอร์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น} &= \text{น้ำหนักยางที่ได้หลังอบ} - \text{น้ำหนักยางแห้ง} \\ \text{พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดการกราฟต์} &= \frac{\text{ร้อยละของมอนอเมอร์ที่เหลือจากการกราฟต์} \times \text{น้ำหนักยางที่ได้หลังอบ}}{100} \\ \text{พอลิเมอร์ที่เกิดการกราฟต์} &= \text{พอลิเมอร์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น} - \text{พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดการกราฟต์} \\ \text{ร้อยละของประสิทธิภาพการกราฟต์} &= \frac{\text{พอลิเมอร์ที่เกิดการกราฟต์}}{\text{น้ำหนักมอนอเมอร์ที่ใช้}} \times 100 \end{aligned}$$

6. ร้อยละของการบวมตัว (%Volume change)

$$= \frac{(\text{น้ำหนักยางหลังทดสอบในอากาศ} - \text{น้ำหนักยางหลังทดสอบในน้ำ}) - (\text{น้ำหนักยางก่อนทดสอบในอากาศ} - \text{น้ำหนักยางก่อนทดสอบในน้ำ})}{(\text{น้ำหนักยางก่อนทดสอบในอากาศ} - \text{น้ำหนักยางก่อนทดสอบในน้ำ})} \times 100$$

**ภาคผนวก ข**  
**ข้อมูลการทดลอง**

**ตาราง ข.1** ผลการทดลองกราฟต์โคพอลิเมอร์ไซันของ Maleic Anhydride บนยางธรรมชาติ

น้ำหนัก ยางแห้ง (กรัม)	น้ำหนัก มอนอเมอร์ที่ใช้ (กรัม)	น้ำหนัก ยางที่ได้ หลังอบ (กรัม)	น้ำหนัก ยางที่นำมา สกัดร้อน (กรัม)	น้ำหนัก ยางหลังสกัดด้วย ปิโตรเลียมอีเทอร์ (กรัม)	น้ำหนักยาง หลังสกัดด้วย ปิโตรเลียมอีเทอร์ และอะซิโตน (กรัม)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง (%Conversion)	ร้อยละยาง ธรรมชาติ กราฟต์ (%GNR)	ร้อยละยาง ธรรมชาติที่ ไม่เกิดการ กราฟต์ (%Free NR)	ร้อยละ มอนอเมอร์ที่ เหลือจากการ กราฟต์ (%Free monomer)	ร้อยละ ประสิทธิภาพ การกราฟต์ (%Grafting efficiency)
100	1.0023	100.92	2.0059	0.7958	0.6703	92.16	33.42	60.33	6.26	93.74
100	2.0017	101.89	2.0012	0.7896	0.6981	94.30	34.88	60.54	4.57	95.43
100	3.0021	102.90	2.0034	0.8568	0.7831	96.68	39.09	57.23	3.68	96.32
100	5.0031	104.95	2.0025	0.9874	0.9215	98.86	46.02	50.69	3.29	96.71
100	10.0022	107.95	2.0036	0.9415	0.7983	79.52	39.84	53.01	7.15	92.85

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ข.2 ผลการทดลองกราฟต์โคพอลิเมอร์ไซแนซของ 1,2-phenylenediamine บนยางธรรมชาติ

น้ำหนัก ยางแห้ง (กรัม)	น้ำหนัก มอนอเมอร์ที่ใช้ (กรัม)	น้ำหนัก ยางที่ได้ หลังอบ (กรัม)	น้ำหนัก ยางที่นำมา สกัดร้อน (กรัม)	น้ำหนัก ยางหลังสกัดด้วย ปิโตรเลียมอีเทอร์ (กรัม)	น้ำหนักยาง หลังสกัดด้วย ปิโตรเลียมอีเทอร์ และอะซิโตน (กรัม)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง (%Conversion)	ร้อยละยาง ธรรมชาติ กราฟต์ (%GNR)	ร้อยละยาง ธรรมชาติที่ ไม่เกิดการ กราฟต์ (%Free NR)	ร้อยละ มอนอเมอร์ที่ เหลือจากการ กราฟต์ (%Free monomer)	ร้อยละ ประสิทธิภาพ การกราฟต์ (%Grafting efficiency)
100	1.0039	100.95	2.0003	0.2965	0.1213	95.10	6.06	85.18	8.76	91.24
100	2.0005	101.91	2.0024	0.3014	0.1702	95.43	8.50	84.95	6.55	93.45
100	3.0015	102.91	2.0004	0.3228	0.2109	96.97	10.54	83.86	5.59	94.41
100	5.0041	104.90	2.0017	0.3714	0.2865	97.82	14.31	81.45	4.24	95.76
100	10.0032	107.80	2.0026	0.3099	0.2243	78.01	11.20	84.53	4.27	95.73

ตาราง ข.3 ความต้านแรงดึงของยางธรรมชาติผสมฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ

ยางธรรมชาติต่อ ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์	ยางธรรมชาติกราฟต์ (phr)		ความทนทานต่อแรงดึง (เมกกะพาสคาล)				
	NR-g-MA	NR-g-PDA	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
100:0	-	-	2.87	2.85	2.95	2.89	0.05
90:10	-	-	3.32	3.25	3.30	3.29	0.04
75:25	-	-	3.74	3.79	3.69	3.74	0.05
60:40	-	-	3.98	4.10	3.98	4.02	0.07
50:50	-	-	4.32	4.34	4.27	4.31	0.04
40:60	-	-	4.48	4.53	4.55	4.52	0.04
25:75	-	-	5.75	5.67	5.80	5.74	0.07
10:90	-	-	6.44	6.38	6.53	6.45	0.08
0:100	-	-	6.99	7.21	7.31	7.17	0.16
90:10	2	-	3.31	3.31	3.34	3.32	0.02
90:10	4	-	3.42	3.37	3.35	3.38	0.04
90:10	6	-	3.54	3.55	3.62	3.57	0.04
90:10	8	-	3.29	3.33	3.31	3.31	0.02
10:90	2	-	5.77	5.86	5.85	5.84	0.05
10:90	4	-	5.80	5.76	5.72	5.76	0.04
10:90	6	-	3.89	4.02	3.91	3.94	0.07
10:90	8	-	3.21	3.08	3.07	3.12	0.08
90:10	-	2	3.64	3.59	3.63	3.62	0.03
10:90	-	2	7.62	7.55	7.56	7.59	0.04

ตาราง ข.4 ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผสมฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน  
ต่างๆ

ยางธรรมชาติต่อ ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์	ยางธรรมชาติกราฟต์ (phr)		ระยะยืด ณ จุดขาด (เปอร์เซ็นต์)				
	NR-g-MA	NR-g-PDA	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
100:0	-	-	596.34	588.42	588.06	590.94	4.68
90:10	-	-	452.53	461.72	441.9	452.05	9.92
75:25	-	-	427.41	417.38	413.89	419.56	7.02
60:40	-	-	353.12	355.63	346.41	351.72	4.77
50:50	-	-	247.02	251.87	251.98	250.29	2.83
40:60	-	-	231.87	226.42	228.11	228.8	2.79
25:75	-	-	200.04	196.73	198.58	198.45	1.66
10:90	-	-	156.88	158.48	154.92	156.76	1.78
0:100	-	-	152.33	145.93	149.49	149.25	3.21
90:10	2	-	519.34	518.02	519.01	518.79	0.69
90:10	4	-	524.93	526.86	530.62	527.47	2.89
90:10	6	-	561.34	560.12	559.86	560.44	0.79
90:10	8	-	490.12	484.69	487.93	487.58	2.73
10:90	2	-	170.21	164.37	171.64	168.74	3.85
10:90	4	-	187.60	191.85	195.59	191.68	4.00
10:90	6	-	252.79	255.32	253.92	254.01	1.27
10:90	8	-	356.77	352.98	360.17	356.64	3.60
90:10	-	2	525.37	519.56	520.41	521.78	3.14
10:90	-	2	147.35	150.51	150.37	149.41	1.79

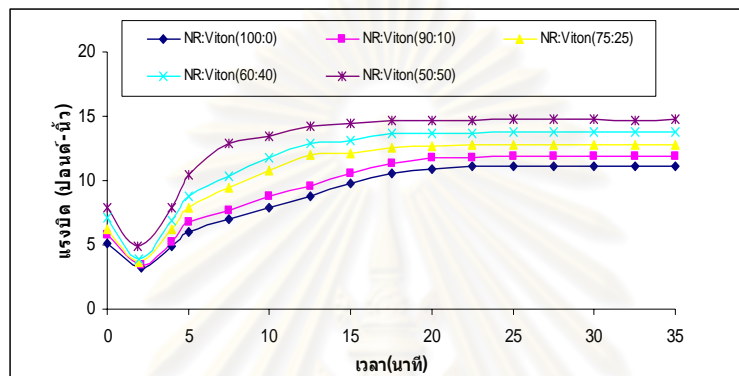
ตาราง ข.5 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมพลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ

ยางธรรมชาติต่อ พลูออโรอีลาสโตเมอร์	ยางธรรมชาติกราฟต์ (phr)		ความแข็ง (Shore A)				
	NR-gMA	NR-g-PDA	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
100:0	-	-	35.0	35.5	34.5	35.0	0.50
90:10	-	-	36.5	34.5	37	36.0	1.32
75:25	-	-	44.5	42.0	47	44.5	2.50
60:40	-	-	53.5	52.0	50.5	52.0	1.50
50:50	-	-	53.0	52.5	53.5	53.0	0.50
40:60	-	-	58.5	59.5	59	59.0	0.50
25:75	-	-	61.0	62.0	60	61.0	1.00
10:90	-	-	63.0	62.5	62	62.5	0.50
0:100	-	-	67.0	66.5	67.5	67.0	0.50
90:10	2	-	36.0	38.0	34	36.0	2.00
90:10	4	-	38.0	38.0	35.0	37.0	1.73
90:10	6	-	40.0	39.5	37.5	39.0	1.32
90:10	8	-	36.0	35.5	36.5	36.0	0.50
10:90	2	-	62.5	63.0	62.0	62.5	0.50
10:90	4	-	59.5	60.0	59.0	59.5	0.50
10:90	6	-	51.0	51.5	50.5	51.0	0.50
10:90	8	-	48.5	49.5	46.0	48.0	1.80
90:10	-	2	42.5	41.5	43.0	42.5	0.76
10:90	-	2	68.5	69.5	69	69.0	0.50

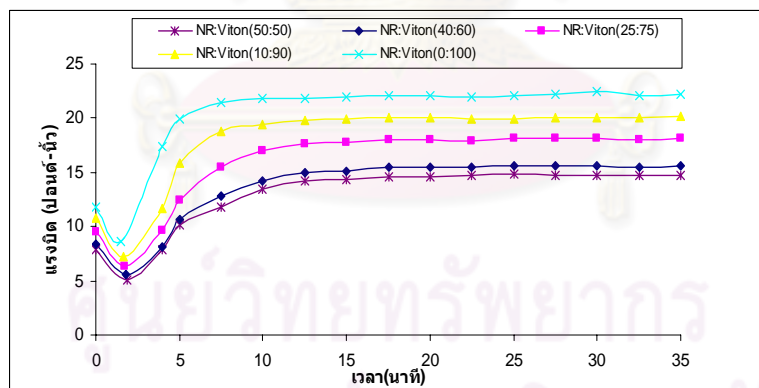
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

ลักษณะการวัลคะไนซ์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและฟลูออโรอีลาสโตเมอร์โดย  
ไม่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์และยางผสม ที่มีการเติมยางธรรมชาติกราฟต์ ด้วย  
เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่ 170 องศาเซลเซียส

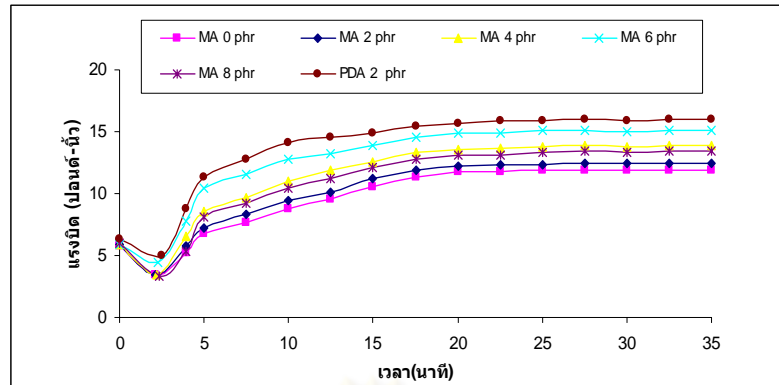


(ก)

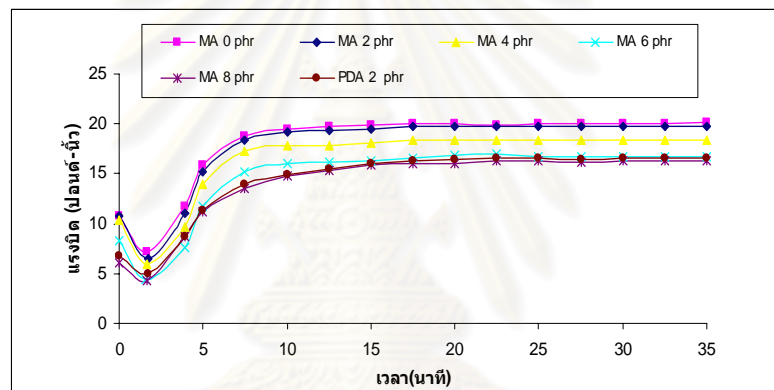


(ข)

รูปที่ ค.1 ลักษณะการวัลคะไนซ์ของ (ก) ยางธรรมชาติผสมกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์  
ที่อัตราส่วน 0:100, 90:10, 75:25, 60:40 และ 50:50 (ข) ยางธรรมชาติผสมกับฟลูออโร  
อีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50, 40:60, 25:75, 10:90 และ 0:100



(ค)



(ง)

รูปที่ ค.1 ลักษณะการวัดคาบในเซชันของ (ค) ยางธรรมชาติผสมกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ ที่อัตราส่วน 90:10 โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์ Maleic Anhydride ปริมาณ 2 ถึง 8 phr และ 1,2-Phenylenediamine ปริมาณ 2 phr (ง) ยางธรรมชาติผสมกับฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 10:90 โดยเติมยางธรรมชาติกราฟต์ Maleic Anhydride ปริมาณ 2 ถึง 8 phr และ 1,2-Phenylenediamine ปริมาณ 2 phr

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิมล ยันตะ เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขา  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2550  
และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย