

การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสมในการหล่อ
ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน



นายสุพัฒน์ มุลสิน

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

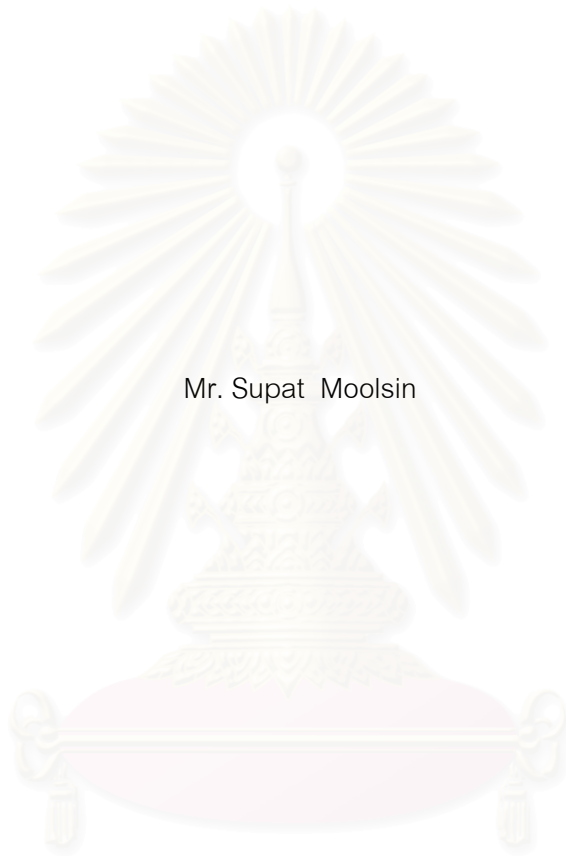
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3636-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USE OF STYRENE GRAFTED NATURAL RUBBER AS A COMPATIBILIZER IN CASTING
NATURAL RUBBER/POLYSTYRENE BLEND FILMS

Mr. Supat Moolsin



สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3636-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสมในการหล่อฟิล์ม พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน
โดย	นายสุพัฒน์ มูลสิน
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ รัจนา ศิริสุข)

ผู้พัฒนา มุลลิน : การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสมในการหล่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน. (USE OF STYRENE GRAFTED NATURAL RUBBER AS A COMPATIBILIZER IN CASTING NATURAL RUBBER/POLYSTYRENE BLEND FILMS) อ. ที่ปรึกษา : รศ. เสาวรณี ช่วยจุลจิตรี, 108 หน้า. ISBN 974-17-3636-3.

พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 70/30 60/40 และ 50/50 ถูกขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลายโดยใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสมสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและสไตรีนที่อัตราส่วน 90/10 80/20 และ 70/30 โดยจำนวนโมล ด้วยกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอิมัลชัน และใช้ TBHPO/TEPA เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาอินทรีย์ ปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เติมในพอลิเมอร์ผสม คือ 0 5 10 15 20 25 และ 30 phr แล้วจึงนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปตรวจสอบสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยา ผลจากการทดสอบพบว่า ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ NR-g-styrene 80/20 เป็นสารช่วยผสมมีความทนแรงดึงและความทนแรงฉีกขาดสูงกว่าที่ใช้ NR-g-styrene 90/10 และ NR-g-styrene 70/30 และผลของสัญญาณวิทยาที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ NR-g-styrene 80/20 เป็นสารช่วยผสมยังทำให้เฟสกระจายมีขนาดของโดเมนที่ละเอียดกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การใช้กราฟต์โคพอลิเมอร์ในปริมาณสูงเกินไป มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักที่สูญเสียมีค่าลดลงเมื่อมีการใส่ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนลงไปในระบบพอลิเมอร์ผสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4472462623 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
 KEYWORD : THERMOPLASTIC ELASTOMERS / NR/PS BLEND / NR-*g*-STYRENE / FILMS
 SUPAT MOOLSIN : USE OF STYRENE GRAFTED NATURAL RUBBER AS A
 COMPATIBILIZER IN CASTING NATURAL RUBBER/POLYSTYRENE BLEND
 FILMS. THESIS ADVISOR : SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 108 pp. ISBN 974-17-
 3636-3.

Natural rubber/polystyrene blends with weight ratios of 70/30, 60/40 and 50/50 were casted into films by the solution-casting technique using toluene as a casting solvent. Properties of these blends were improved by using natural rubber graft styrene (NR-*g*-styrene) as a compatibilizer. In this research, graft copolymers with molar ratios of NR/styrene 90/10, 80/20 and 70/30 were prepared via emulsion copolymerization using tert-butyl hydroperoxide/tetraethylene pentamine (TBHPO/TEPA) as an organic redox initiator. The obtained graft copolymers were added to the blends with the amount of 0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 phr. After film formation, mechanical and morphological properties were investigated. It was found that the film prepared from NR-*g*-styrene 80/20 showed higher tensile and tear strength, moreover, morphology obtained from optical microscope showed finer domain size of the dispersed phase than those from NR-*g*-styrene 90/10 and NR-*g*-styrene 70/30. However, at high loading of the graft copolymer, the mechanical properties of the blends decreased. In addition, thermogravimetric analysis revealed that weight loss was found to decrease on the introduction of the compatibilizer.

Department of Materials Science

Student's signature.....

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์โดยท่านผู้ทรงคุณวุฒิเหล่านี้คือ รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงแนะแนวทางในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอกราบขอบพระคุณ รศ.ไพพรรณ สันติสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ผศ.ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ และอาจารย์ รัชนา ศิริสุข คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณหน่วยงานต่างๆ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับการทำวิจัย ดังรายนามต่อไปนี้

1. บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์คอร์ปอเรชัน (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ให้ความอนุเคราะห์ให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง
2. บริษัท แปซิฟิค พลาสติก (ประเทศไทย) จำกัด (มาบตาพุด) ให้ความอนุเคราะห์สไตรีนมอนอเมอร์
3. บริษัท สยามพอลิสไตรีน จำกัด ให้ความอนุเคราะห์พอลิสไตรีน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ผู้ให้การสนับสนุนและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้การอุปการะเลี้ยงดูด้วยความเอื้ออาทร ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ นิสิตภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านสำหรับน้ำใจ กำลังใจ ความช่วยเหลือและความปรารถนาดีที่มีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและส่วนรวมแล้ว ผู้วิจัยขอขอบความดีทั้งหมดแก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่

1	บทนำ.....	1
	1.1 วัตถุประสงค์.....	2
	1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
	1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
2	วรรณสารปริทัศน์.....	4
	2.1 น้ํายางธรรมชาติ.....	4
	2.2 พอลิสไตรีน.....	12
	2.3 โคพอลิเมอร์.....	18
	2.4 การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติ.....	19
	2.5 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	22
	2.6 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....	23
	2.7 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ต่าง ๆ.....	27
3	วิธีการทดลอง.....	29
	3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	29
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
	3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	30
	3.4 ขอบเขตการทดลอง.....	30

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5 การเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	32
3.5.1 การทำให้สไตรีนมอนอเมอร์บริสุทธิ์.....	32
3.5.2 การเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	32
3.6 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	36
3.6.1 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์.....	36
3.6.2 การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ ด้วยเครื่อง GPC.....	36
3.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR.....	36
3.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC.....	37
3.7 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน.....	37
3.7.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	37
3.7.2 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	39
3.8 การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	40
3.8.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง.....	40
3.8.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาด.....	41
3.8.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA.....	42
3.8.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC.....	42
3.9 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเครื่อง OM.....	42
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	43
4.1 ผลการวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	43
4.1.1 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์.....	43
4.1.2 การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ.....	45
4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	47
4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	49
4.2 ผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	51
4.2.1 ความทนแรงดึง.....	51
4.2.2 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด.....	60

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2.3 อีลาสติคโมดูลัส.....	63
4.3 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	66
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	69
4.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA.....	69
4.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC.....	72
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	82
ภาคผนวก ง.....	91
ภาคผนวก จ.....	100
ภาคผนวก ฉ.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง.....	10
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ	10
ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของพอลิस्टไทรีน.....	17
ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิस्टไทรีน.....	17
ตารางที่ 2.5 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	24
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไทรีน.....	34
ตารางที่ 3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิस्टไทรีน.....	38
ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ของสูตรต่างๆ ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิस्टไทรีน และสารช่วยผสม ที่เตรียมจากการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไทรีนในอัตราส่วน 90/10.....	38
ตารางที่ 3.4 สัญลักษณ์ของสูตรต่างๆ ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิस्टไทรีน และสารช่วยผสม ที่เตรียมจากการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไทรีนในอัตราส่วน 80/20.....	38
ตารางที่ 3.5 สัญลักษณ์ของสูตรต่างๆ ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิस्टไทรีน และสารช่วยผสม ที่เตรียมจากการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไทรีนในอัตราส่วน 70/30.....	39
ตารางที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/สไทรีนมอนอเมอร์ต่อปฏิกิริยา กราฟต์โคพอลิเมอร์ไอโซแทน.....	43
ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิस्टไทรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ.....	45
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติกราฟต์สไทรีน.....	49
ตารางที่ 4.4 ค่าแต่ละฟีกของ DTG เทอร์โมแกรม.....	70
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม.....	71
ตารางที่ 4.6 น้ำหนักที่สูญเสียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม.....	71
ตารางที่ 4.7 ค่า T_g (midpoint) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิस्टไทรีน ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม.....	72

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างอย่างง่ายของเลซีทีน.....	6
รูปที่ 2.2 การดึงดูดชั้นของไลปิดโดยอนุภาคยาง.....	6
รูปที่ 2.3 (ก) พันธะเปปไทด์ (ข) โครงสร้างโมเลกุลของโปรตีนอย่างง่าย.....	7
รูปที่ 2.4 (ก) โปรตีนที่แสดงประจุเป็นบวก (ข) โปรตีนที่แสดงประจุเป็นลบ.....	7
รูปที่ 2.5 จุดไอโซอิเล็กทริกของน้ำยางธรรมชาติ.....	8
รูปที่ 2.6 ประจุลบบนอนุภาคยางโดยไลปิดให้ประจุลบ(OH ⁻)และโปรตีนให้ประจุลบ(CO ₂ ⁻).....	8
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิสไตรีน.....	12
รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์และหอปฏิกิริยาสำหรับการเตรียมพอลิสไตรีนด้วยกระบวนการ พอลิเมอไรเซชันแบบบัลก์.....	13
รูปที่ 2.9 หน่วยการผลิตพอลิสไตรีนในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย.....	14
รูปที่ 2.10 ความแข็งของ TPE ซึ่งเชื่อมข้อกับยางและเทอร์โมพลาสติก.....	24
รูปที่ 2.11 กราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ.....	25
รูปที่ 2.12 การผลิตของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีเพียงขั้นตอนเดียวขณะที่เทอร์โมเซต รับเบอร์จะมี 3 ขั้นตอน หรือมากกว่า.....	26
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	31
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	33
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน.....	35
รูปที่ 3.4 ลักษณะและขนาดของแผ่นกระจกที่ใช้เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	39
รูปที่ 3.5 หัวตัดรูปดัมเบลล์ชนิด C สำหรับทดสอบด้านความทนแรงดึง.....	40
รูปที่ 3.6 หัวตัดชนิด C สำหรับทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาด.....	41
รูปที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/สไตรีนมอนอเมอร์ต่อเปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์.....	44
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/สไตรีนต่อเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติ กราฟต์สไตรีน เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ไม่ถูกกราฟต์ และเปอร์เซ็นต์ของ พอลิสไตรีนที่ไม่ได้กราฟต์กับยางธรรมชาติ.....	44
รูปที่ 4.3 GPC โคมาโทแกรมของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติชนิด 90:10.....	45
รูปที่ 4.4 GPC โคมาโทแกรมของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติชนิด 80:20.....	46
รูปที่ 4.5 GPC โคมาโทแกรมของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติชนิด 70:30.....	46

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ.....	47
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของพอลิสไตรีน.....	47
รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของ (ก) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 90 : 10 %โมล) (ข) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 80 : 20 %โมล) และ (ค) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 70 : 30 %โมล)	48
รูปที่ 4.9 DSC เทอร์โมแกรมของ (ก) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 90 : 10 %โมล) (ข) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 80 : 20 %โมล) และ (ค) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 70 : 30 %โมล).....	50
รูปที่ 4.10 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและ พอลิสไตรีนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม.....	51
รูปที่ 4.11 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10.....	52
รูปที่ 4.12 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20.....	52
รูปที่ 4.13 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30.....	53
รูปที่ 4.14 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) โดยใช้สารช่วยผสมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน.....	54
รูปที่ 4.15 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) โดยใช้สารช่วยผสมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน.....	54
รูปที่ 4.16 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) โดยใช้สารช่วยผสมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน.....	55
รูปที่ 4.17 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	56
รูปที่ 4.18 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	56

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	57
รูปที่ 4.20	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	57
รูปที่ 4.21	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	58
รูปที่ 4.22	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	58
รูปที่ 4.23	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	59
รูปที่ 4.24	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	59
รูปที่ 4.25	สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า.....	60
รูปที่ 4.26	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม.....	61
รูปที่ 4.27	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 90/10.....	61
รูปที่ 4.28	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR- <i>g</i> -Styrene 80/20.....	62

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30.....	62
รูปที่ 4.30 ค่าอิลาสติกมอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และพอลิสไตรีนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม.....	63
รูปที่ 4.31 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10.....	64
รูปที่ 4.32 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20.....	64
รูปที่ 4.33 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30.....	65
รูปที่ 4.34 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม.....	66
รูปที่ 4.35 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10.....	67
รูปที่ 4.36 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20.....	67
รูปที่ 4.37 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30.....	68
รูปที่ 4.38 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ON ₇₀	69
รูปที่ 4.39 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 5 _(80/20) N ₇₀	69
รูปที่ 4.40 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 15 _(80/20) N ₇₀	70
รูปที่ 4.41 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 25 _(80/20) N ₇₀	70
รูปที่ 4.42 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม ก) ON ₅₀ (ข) ON ₇₀ (ค) 5 _(80/20) N ₇₀ (ง) 15 _(80/20) N ₇₀	73

บทที่ 1

บทนำ

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นเทคนิคที่สำคัญในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เนื่องจากทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติการใช้งานกว้างขึ้น เช่น เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers, TPE) [1] ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการนำเทอร์โมพลาสติกเรซินผสมกับยางหรืออีลาสโตเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติและเพิ่มความสะดวกในการผลิต โดย TPE ที่รู้จักกันดี ได้จากการนำพอลิโพรพิลีนผสมกับยางอีพีอาร์ (ethylene propylene rubber, EPR) หรือยางอีพีดีเอ็ม (ethylene propylene diene rubber, EPDM) นอกจากนี้ ยังมียางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ เช่น ยางบิวทิล (butyl rubber, IIR) และยางเอสบีอาร์ (styrene butadiene rubber, SBR) เป็นต้น แต่ในปัจจุบันได้มีการนำยางธรรมชาติมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกเรซินซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้สมบัติด้านความแข็งตึง (stiffness) และยางธรรมชาติจะเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น (elastic properties) และการคืนตัว (resilience) ซึ่ง TPE ได้เข้ามามีส่วนในตลาดการค้าร่วมกับยางเทอร์โมเซตและพลาสติกอื่นๆ และได้ถูกนำไปใช้แทนยางอย่างกว้างขวาง หรือแม้แต่แทนที่ PVC หรือพลาสติกอื่นๆ ที่มีความยืดหยุ่นไปจนถึงพลาสติกที่มีความแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการผสมเทอร์โมพลาสติกเรซินกับยางได้หลายชนิดและด้วยอัตราส่วนต่างๆ กัน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแตกต่างกันไปตามความต้องการ นอกจากนี้ กระบวนการผลิต TPE นั้นจะไม่ยุ่งยาก และมีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่ายางเทอร์โมเซต รวมทั้งไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการวัลคาไนซ์ จึงทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำลง ถึงแม้การทำพอลิเมอร์ผสมจะเป็นวิธีที่ง่ายแต่ก็ยังมีปัญหาของความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีการยึดเกาะที่ดีระหว่างเฟสที่เกิดขึ้น ซึ่งปัญหานี้อาจแก้ไขได้โดยใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) เป็นตัวเชื่อมระหว่างพื้นผิวของบริเวณที่มีองค์ประกอบต่างกัน ทำให้พลังงานพื้นผิว (interfacial energy) ลดลง และมีการยึดติดระหว่างพื้นผิว (interfacial adhesion) ดีขึ้น โดยสารช่วยผสมอาจเป็นได้ทั้งกราฟต์โคพอลิเมอร์ (graft copolymer) หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) [2]

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจและทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย โดยเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากและราคาถูก ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับการศึกษาพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่นในด้านความยืดหยุ่น และความสามารถในการคืนตัว แต่จะมีสมบัติด้อยบางประการ เช่น มีความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการเสื่อมสภาพต่ำ ส่วนเทอร์โมพลาสติกเรซิน

ที่มีราคาถูก และสมบัติเด่นด้านการขึ้นรูป ได้แก่ พอลิสไตรีน หากแต่เป็นพลาสติกที่เปราะและมีความทนแรงกระแทกต่ำ ดังนั้น การทำพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความทนแรงกระแทก ความยืดหยุ่น และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่เนื่องจากความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองยังไม่ดีพอ จึงจำเป็นต้องมีการใช้สารช่วยผสมเพื่อแก้ไขปัญหานี้

การกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไตรีนจะทำให้ส่วนของสายสไตรีนสั้นๆ บนโมเลกุลของยางเข้ารวมตัวกับพอลิสไตรีน และส่วนที่เป็นยางจะเข้ารวมตัวกับยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติสามารถรวมตัวกับพอลิสไตรีนได้ดีขึ้น เพื่อช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะเป็นการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน โดยใช้ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสม แล้วนำไปทดลองขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ (casting) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด เป็นต้น นอกจากนี้ ยังวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมเพื่อดูความเข้ากันได้อีกด้วย

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไตรีน
2. ศึกษาการนำยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยสไตรีนไปใช้เป็นสารช่วยผสมในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน
3. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของสไตรีนบนยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นสารช่วยผสม โดยใช้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน ซึ่งใช้ปริมาณยางธรรมชาติต่อสไตรีนในอัตราส่วน 90:10 80:20 และ 70:30 โดยโมล
2. วิเคราะห์ผลของการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไตรีน ดังนี้
 - ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์
 - น้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ
 - โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีนในโมเลกุลของยางธรรมชาติ
 - สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน
3. เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน ในอัตราส่วน 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก โดยใช้โพลูอินเป็นตัวทำละลาย ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม
4. นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ
5. ทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ดังนี้
 - สมบัติเชิงกลของฟิล์ม เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด
 - สัณฐานวิทยาของฟิล์ม
 - สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. สามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการทำเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกเรซินชนิดอื่นๆ
3. เป็นแนวทางในการนำยางธรรมชาติไปใช้ให้เกิดประโยชน์ และประยุกต์สู่อุตสาหกรรม

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 น้ำยางธรรมชาติ [3,4]

น้ำยางธรรมชาติได้จากการกรีดยางผ่านเปลือกต้นยางด้วยมีดชนิดพิเศษ โดยเฉียดทำมุมลงจากซ้ายไปขวาประมาณ 20-30 องศา กับแนวนอน จะมีน้ำยางซึมออกมาเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้น (คล้ายน้ำมัน) หรือสีครีมเล็กน้อย มีความหนาแน่นระหว่าง 0.975-0.980 กรัม/มิลลิลิตร มี pH ตั้งแต่ 6.5-7.0 ความหนืดและส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำยางจะแปรเปลี่ยนได้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุของต้นยาง ฤดูกรีดยาง และวิธีกรีดยาง เป็นต้น เมื่อนำน้ำยางที่กรีดได้ไปตรวจสอบพบว่ามียุทูปขนาดต่างๆ กันแขวนลอย หรือกระจาย (disperse) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว (dispersion media) อุณหภูมิเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน และมีประจุลบซึ่งผลัดกันตลอดเวลา จึงทำให้อุณหภูมิเหล่านี้แขวนลอยและคงสภาพเป็นของเหลวได้นานจนกว่าจะมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ มารบกวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับส่วนของเหลวที่เป็นตัวกลาง เรียกว่า “เซรัม” (serum)

น้ำยางเป็นสารละลายคอลลอยด์ (colloidal solution) ชนิดไฮโดรโซล (hydrosol) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย แต่มีลักษณะพิเศษกว่าไฮโดรโซลทั่วไป คือ น้ำยางมีลักษณะกึ่งชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่ลักษณะไม่ชอบน้ำจะเด่นกว่า นอกจากนี้ น้ำยางยังประกอบด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยาง เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และอนุมูลของโลหะ ซึ่งส่วนประกอบของน้ำยางโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1.	ส่วนที่เป็นเนื้อยาง	35 %
2.	ส่วนที่ไม่ใช่ยาง	65 %
2.1	ส่วนที่เป็นน้ำ	55 %
2.2	ส่วนของลูทอยด์ (lutoid) และสารอื่น ๆ	10 %

ส่วนที่เป็นเนื้อยาง

ปริมาณเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติอาจแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 25-45 % ขึ้นกับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล เนื้อยางเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหน่วยที่เรียกว่า “ไอโซพรีน” (isoprene) ต่อซ้ำๆ กัน 2,000-5,000 หน่วย กลายเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลเป็นโซ่ยาว ดังนี้



ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

ส่วนที่เป็นน้ำ (aqueous phase) มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัม/มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารต่างๆ ดังนี้

- *คาร์โบไฮเดรต* ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล สารเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ย่อยสลายเปลี่ยนเป็นกรดไขมัน เช่น กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดโพรพิโอนิก ทำให้น้ำยางเสียความคงตัวและจับตัวกันเป็นก้อน
- *โปรตีนและกรดอะมิโน* ได้แก่ แอลฟาไกลูบูลิน และฮีวิน ซึ่งแอลฟาไกลูบูลินจะเป็นส่วนที่พบมากในน้ำยางสด มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในสารละลายของเกลือ กรด และด่าง ส่วนฮีวินมีน้ำหนักโมเลกุลเพียงประมาณ 10,000 และละลายน้ำได้

ลูทอยด์มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาออสโมติกได้ง่าย ดังนั้น การเติมน้ำลงไปให้น้ำยางมีผลทำให้ลูทอยด์บวมตัวและแตกออก ของเหลวที่อยู่ในลูทอยด์จะออกมาอยู่ในเซรุ่ม ทำให้ความหนืดของน้ำยางเพิ่มขึ้น ผลของลูทอยด์อีกประการหนึ่ง คือ เมื่อแปรรูปน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้นด้วยการหมუნเหวียง จะมีการเติมแอมโมเนียเข้าไปเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง ซึ่งแอมโมเนียที่เติมลงไปจะรวมตัวกับลูทอยด์ และแมกนีเซียมฟอสเฟต ตกตะกอนเป็นตะกอนน้ำตาลและสีขาวแยกจากเนื้อยาง และเกาะรวมกันอยู่ด้านล่างของเครื่องหมუნเหวียง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องลดลง ต้องถอดล้างเอาตะกอนเหล่านี้ออก นอกจากลูทอยด์แล้วยังมี “อนุภาคเฟรย์-วิสลิง” (Frey-Wyssling) ซึ่งมีลักษณะกลม อนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคของยาง ความหนาแน่นมากกว่าเล็กน้อยและมีสีเหลืองเข้มเนื่องจากมีสารคาโรทีนอยด์ (carotinoid) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดสีเหลืองเข้ม

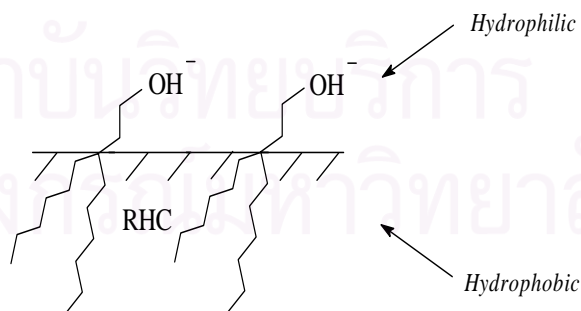
ธรรมชาติของน้ำยางสด [5]

น้ำยางสดที่กรีตจากต้นยางพาราจะคงสภาพเป็นของเหลวได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากอนุภาคยางที่แขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำมีประจุลบของไลปิดและโปรตีนอยู่ที่พื้นผิวหน้าของอนุภาค ทำหน้าที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง ตราบใดที่ประจุลบที่ห่อหุ้มอนุภาคยางไว้ยังคงอยู่ น้ำยางจะคงสภาพเป็นของเหลวได้

ไลปิด (lipids) เป็น fatty glycerides ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน ซึ่งไลปิดมักจะรวมกับไอออนอื่นๆ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} และ Cu^{2+} แต่จะรวมกับ P (ในรูปของ H_2PO_4) มากที่สุด นอกจากนี้ ยังรวมกับไฮดรอกไซด์กลายเป็นหมู่ของสารประกอบที่เรียกว่า “เลซิทีน” (lecithins) ซึ่งเขียนสูตรโครงสร้างง่ายๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และเมื่อน้ำยางถูกกรีตออกมาจากลำต้นใหม่ๆ จะมี $\text{pH} \approx 7$ เนื่องจากอนุภาคยางเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วจึงดูดชั้นของไลปิดไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.2

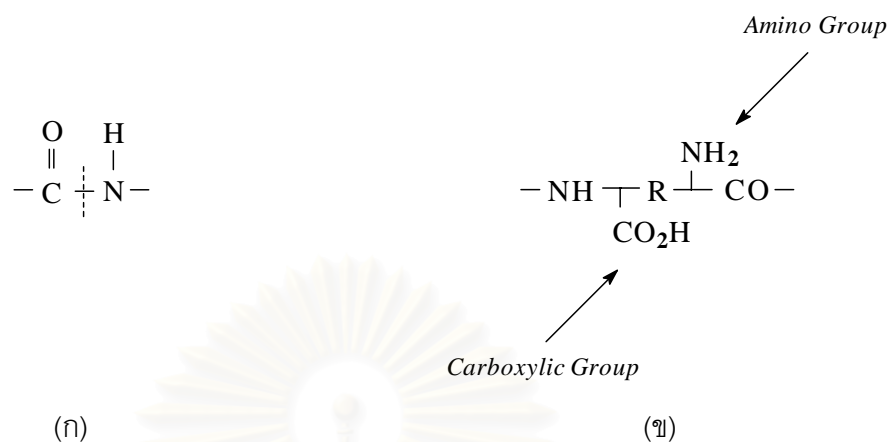


รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างอย่างง่ายของเลซิทีน [5]



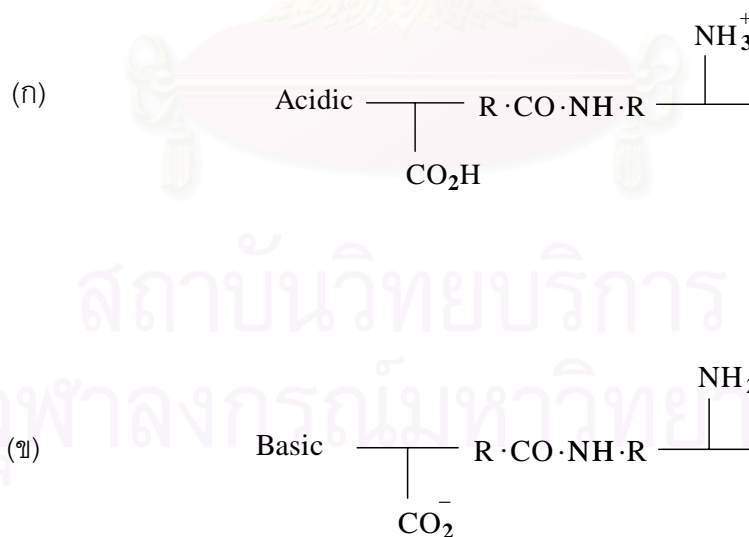
รูปที่ 2.2 การดึงดูดชั้นของไลปิดโดยอนุภาคยาง [5]

โปรตีนเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของกรดอะมิโนแบบควบแน่น โดยมีการเชื่อมของพันธะเปปไทด์ (peptide linkage) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



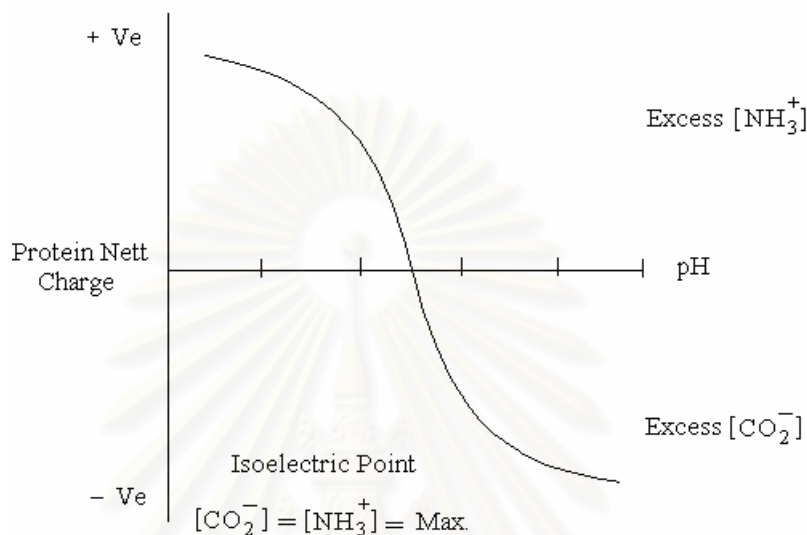
รูปที่ 2.3 (ก) พันธะเปปไทด์ (ข) โครงสร้างโมเลกุลของโปรตีนอย่างง่าย [5]

โดยธรรมชาติแล้วโปรตีนจะมีทั้งประจุบวกและประจุลบ เนื่องจากมีทั้งหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) และหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) แต่ถ้าตัวกลางที่ล้อมรอบอยู่เป็นกรดจะทำให้โปรตีนมีประจุเป็นบวก และถ้าตัวกลางที่ล้อมรอบเป็นเบสจะทำให้โปรตีนมีประจุเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



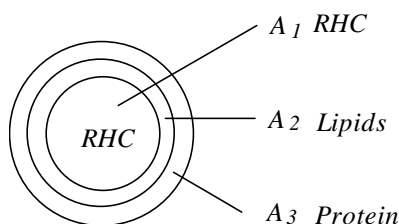
รูปที่ 2.4 (ก) โปรตีนที่แสดงประจุเป็นบวก (ข) โปรตีนที่แสดงประจุเป็นลบ [5]

ในน้ำยางธรรมชาติจะมีจุดซึ่งโปรตีนเกิดการแตกตัวของ $-\text{COOH}$ และ $-\text{NH}_2$ มากที่สุด และจะให้ $[\text{CO}_2^-]$ และ $[\text{NH}_3^+]$ เท่าๆ กัน ทำให้ความแตกต่างระหว่างประจุบวกกับประจุลบที่จุดนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ (zero net charge) ซึ่งเรียกว่า “จุดไอโซอิเล็กทริก” (isoelectric point) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยจะเกิดได้มากที่สุดที่ pH 5 (ช่วง pH 4.5 – 8)



รูปที่ 2.5 จุดไอโซอิเล็กทริกของน้ำยางธรรมชาติ [5]

ดังนั้น น้ำยางซึ่งเพิ่งกรีดจากต้นใหม่ ๆ ที่มี pH ≈ 7 เมื่อเทียบกับจุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนที่ pH 5 จะได้ว่าสิ่งแวดล้อมของตัวกลางเป็นเบส ดังนั้น โปรตีนจะแตกตัวให้ประจุลบของ $[\text{CO}_2^-]$ ที่มากเกินไป และประจุบวกของ $[\text{NH}_3^+]$ ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าจะพุ่งเข้าไปภายในยางไฮโดรคาร์บอนโดยจะถูกดึงดูดไว้ด้วยหมู่ $[-\text{OH}^-]$ ของไลปิด ส่วนประจุลบ $[\text{CO}_2^-]$ จะพุ่งออกมาที่พื้นผิวด้านนอกของยางไฮโดรคาร์บอนโดยเกิดจากแรงผลักของประจุลบ $[-\text{OH}^-]$ ของไลปิด ดังนั้นธรรมชาติของอนุภาคยางที่มีประจุลบจะยังคงถูกรักษาไว้ได้โดยผ่านทางไลปิดและโปรตีนในน้ำยางสด ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ประจุลบบนอนุภาคยางโดยไลปิดให้ประจุลบ (OH^-) และโปรตีนให้ประจุลบ (CO_2^-) [5]

น้ำยางสดที่ได้จากต้นยางพารา ถ้าไม่ได้ใส่สารเคมีป้องกันน้ำยางจับตัว น้ำยางจะเสียสถานะความเป็นของเหลว โดยจะหนืดขึ้นและจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ ที่เรียกว่า “เม็ดพริก” มีกลิ่นเหม็นบูดภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมงนับจากน้ำยางไหลออกจากต้นยาง ซึ่งจะเกิดช้าหรือเร็วขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ของสิ่งแวดล้อม แบคทีเรียที่อยู่ในอากาศ และสภาพแวดล้อมที่ไม่ถูกสุขลักษณะ เช่น มีครีดยางและถ้วยรองน้ำยางสกปรก ดังนั้น ในการผลิตน้ำยางชั้นจำเป็นต้องเติมสารรักษาคุณภาพน้ำยาง ซึ่งที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ แอมโมเนีย ฟอสเฟต คอสติกโซดา โซเดียมไบซัลไฟต์ พอร์มัลดีไฮด์ บอเรต และออกซาเลต เป็นต้น แต่ในทางการค้านิยมใช้แอมโมเนียปริมาณ 0.1 0.2 0.25 0.3 และ 0.4 % (น้ำหนัก/น้ำหนัก) หรือใช้แอมโมเนียร่วมกับสารบางชนิด (secondary preservative)

แอมโมเนีย ที่เติมลงในน้ำยาง [6] มีหน้าที่ดังนี้

1. กีดกันหรือขัดขวางการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำยาง
2. แอมโมเนียมีฤทธิ์เป็นด่าง จึงช่วยส่งเสริมความคงตัวของเซรุ่ม ทำให้คงสถานะเป็นน้ำยางอยู่ได้
3. แอมโมเนียจะตกตะกอนไอออนโลหะ เช่น ตะกอนของแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

น้ำยางชั้นที่ใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวเพื่อรักษาคุณภาพน้ำยาง จะต้องใช้แอมโมเนียสูงถึง 0.7 % ของน้ำหนักยาง น้ำยางชนิดนี้เรียกว่า “HA latex” (high ammonia latex) ซึ่งมีสมบัติแสดงในตารางที่ 2.1 ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียเล็กน้อยประมาณ 0.2 % ของน้ำหนักยาง ร่วมกับสารอื่น เช่น ZnO/TMTD 0.02 % หรือกรดบอริก 0.2 % หรือแซนโตไบรต์ (santobrite) 0.2 % เรียกว่า “LA latex” (low ammonia latex)

สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติจากแหล่งต่างๆ มีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากมีความแตกต่างกันของปริมาณสารที่ไม่ใช่ยางปะปน ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพโดยเฉลี่ยของยางธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 สมบัติของน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง [7]

Properties	Test Results
Total Solid Content, %	61.78
Dry Rubber Content, %	60.08
Non Rubber Solids, %	1.70
Ammonia Content (on Total Weight), %	0.7
Ammonia Content (on Water Phase), %	1.83
pH Value	10.44
KOH Number	0.5377
Volatile Fatty Acid Number	0.0246
Mechanical Stability Time @55% TSC, sec.	850
Specific Gravity at 25 C	0.9467
Magnesium Content (on solids), ppm	22.5
Chemical Stability Test (CST)	2.1
Viscosity (60%TS.Spindle no.1.60rpm.) cps.	87.5

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ [8]

Density	0.92
Refractive Index (20 องศา)	1.52
Coefficient of Cubical Expansion	0.00062 / °C
Cohesive Energy Density	63.7 cal. / cc.
Heat of Combustion	10700 cal. / g
Thermal Conductivity	0.00032 cal. / sec / cm ² / °C
Dielectric Constant	2.37
Power Factor (1000 cycle)	0.15-0.20
Volume Resistivity	10 ¹⁵ ohm / cc.
Dielectric Strength	1000 volts / mil

ตัวทำละลายของยางธรรมชาติ คือ สารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว สารคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbon) อีเทอร์ (ethers) คาร์บอนไดซัลไฟด์ (carbon disulfide) ยางธรรมชาติไม่ละลายในสารต่อไปนี้ คือ สารคีโตนโมเลกุลต่ำ (lower ketone) แอลกอฮอล์ (alcohol) และสารเอสเทอร์โมเลกุลต่ำ (lower ester)

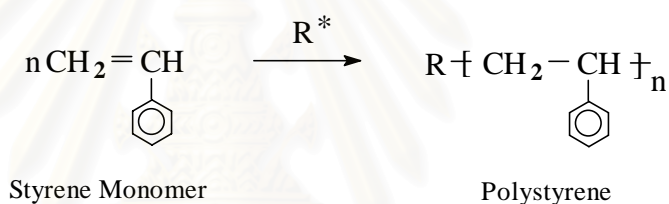
ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอง (resilience) สูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ การใช้ฟิลเลอร์เสริมแรง (reinforce filler) เช่น เขม่าดำ (carbon black) จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.915 – 0.930 ยางธรรมชาติมีจุดอ่อนตัว (softening point) ประมาณ 120°C ทนน้ำ กรดเจือจาง ต่าง และเกลือได้ดี แต่ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้ยางธรรมชาติเกิดรอยแตก หรือแตกหักได้ พบว่าปริมาณโอโซน 100 ppm สามารถทำลายยางภายใน 2 นาที และถ้าจุ่มยางธรรมชาติในกรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดโครมิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโซเดียมไฮโปคลอไรด์ ยางจะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ยางธรรมชาติไม่ทนต่อน้ำมัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 พอลิสไตรีน [9-11]

พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) เป็นพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุดชนิดหนึ่ง บริษัทชั้นนำที่ผลิต PS ในปัจจุบัน ได้แก่ บริษัท BASF และบริษัท Dow Chemical ซึ่งทั้งสองเป็นบริษัทแรกๆที่ดำเนินการผลิต PS ในเชิงพาณิชย์ (เริ่มดำเนินการในราว ค.ศ. 1930s) เพื่อใช้เป็นฉนวน (insulator) ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 สมบัติเด่นของ PS คือ ราคาถูก ขึ้นรูปง่าย โดยเฉพาะวิธีฉีดแบบ (injection molding) สามารถผสมสีเพื่อทำเป็นมาสเตอร์แบทช์ (master batch) ได้ง่ายและหลายเฉดสี เป็นวัสดุโปร่งแสงที่แข็ง และมีการดูดซึมน้ำต่ำ แต่มีข้อเสียในด้านความเปราะ ปัจจุบันเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ (chain polymerization) ของ สไตรีนมอนอเมอร์ ซึ่งกระบวนการเตรียม PS ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแบบบัลก์ (bulk process) ส่วนกระบวนการแบบแขวนลอย (suspension process) นิยมเตรียม PS ชนิดที่เป็น expandable polystyrene (EPS) โครงสร้างทางเคมีของ PS ที่เตรียมได้ แสดงในรูปที่ 2.7



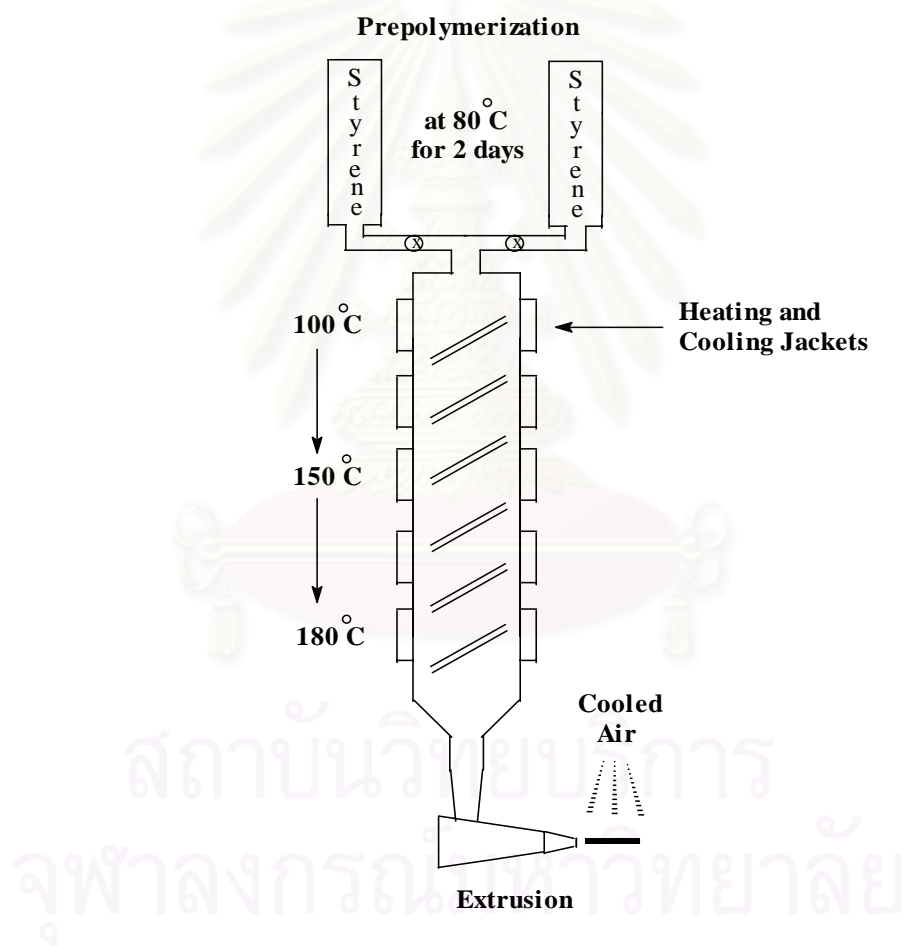
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิสไตรีน [9]

การสังเคราะห์พอลิสไตรีน

การสังเคราะห์ PS เริ่มในห้องปฏิบัติการเมื่อปี ค.ศ. 1839 และผลิตสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ในราวปี ค.ศ. 1930 ปัจจุบันการสังเคราะห์ PS ที่สำคัญมี 4 แบบ ดังนี้

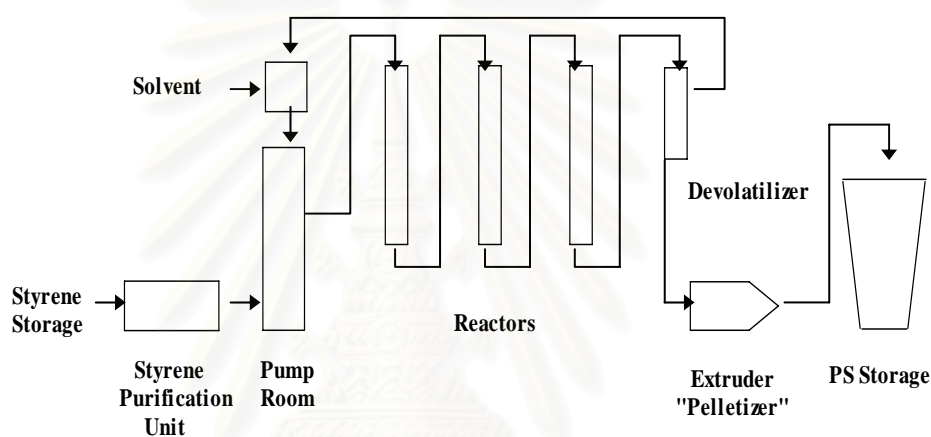
1. **พอลิเมอไรเซชันแบบบัลก์ (bulk polymerization)** : เป็นกระบวนการที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน โดยในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ประกอบด้วยสไตรีนมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอาจมีการเติมตัวทำละลายลงไปเล็กน้อย และเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้น ระหว่างการเตรียมอาจเกิดจุดร้อน (heat spot) ขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นผลทำให้พอลิเมอร์ที่ผลิตได้มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ หรือที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ทรอมมส์ดอร์ฟฟ์” (Trommsdorff effect) การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยแบ่งขั้นตอนการสังเคราะห์เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรก เรียกว่า ขั้นพรีพอลิเมอไรเซชัน (prepolymerization) ซึ่งในขั้นนี้จะมีแต่สไตรีนมอนอเมอร์เท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อน (thermal polymerization) ที่ 80°C เป็นเวลา 2

วัน โดยปฏิกิริยาดำเนินไป 33-35% ซึ่งในเครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วย พอลิเมอร์ใช้สั้นๆ และมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา ในขั้นที่สอง ของผสมที่ได้จากขั้นแรกจะถูกถ่ายไปยังหอปฏิกิริยา ซึ่งสูงประมาณ 25 ฟุต โดยในหอดังกล่าวของเหลวจะไหลจากบนลงล่าง ซึ่งในแต่ละตอนของหอ จะมีอุณหภูมิจาก 110°C ถึง 180°C เรียงลำดับจากด้านบนสู่ด้านล่าง และตรงกลางของหอจะมี อุณหภูมิประมาณ 150°C เหตุที่อุณหภูมิด้านล่างสุดของหอเป็น 180°C ก็เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิด อย่างสมบูรณ์ และเหตุผลอีกประการ คือ เพื่อไล่มอนอเมอร์ที่เหลือติดมากับพอลิเมอร์ออกไป ซึ่ง พอลิเมอร์ที่ได้จะถูกส่งเข้าเครื่องอัดรีด (extruder) เพื่อทำเป็นเม็ด PS ต่อไป รูปที่ 2.8 แสดง ขั้นตอนการเตรียม PS โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบบัลก์



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์และหอปฏิกิริยาสำหรับการเตรียมพอลิสไตรีน ด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบบัลก์ [10]

2. พอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (solution polymerization) : การเตรียม PS โดยวิธีแบบบัลก์อาจเกิดปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อนขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป และปัญหาอีกอย่าง คือ ความหนืดที่สูงขึ้นมากเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ควบคุมกระบวนการผลิตได้ยาก และน้ำหนักโมเลกุลของ PS ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น กระบวนการเตรียม PS แบบสารละลายจะประกอบด้วยสไตรีนมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตัวทำละลาย และสารถ่ายโอนสายโซ่ (chain transfer agent) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ และตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีจุดเดือดปานกลาง เช่น โทลูอีน และไซโคลเฮกเซน เป็นต้น รูปที่ 2.9 แสดงหน่วยการผลิต PS ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย



รูปที่ 2.9 หน่วยการผลิตพอลิสไตรีนในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย [10]

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นการจัดวางเครื่องปฏิกรณ์แบบ CSTR (continuous stirring tank reactors) ซึ่งมีเครื่องปฏิกรณ์ 3 เครื่อง ต่อกัน โดยมอนอเมอร์ ตัวทำละลาย และตัวริเริ่มจะถูกสูบเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องแรก ซึ่งภายในแบ่งเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อให้สไตรีนมอนอเมอร์เริ่มเกิดปฏิกิริยา (ตัวริเริ่มส่วนใหญ่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อน) จากนั้นสารละลายทั้งหมดจะไหลไปยังบริเวณที่ 2 และ 3 ของเครื่องปฏิกรณ์อันแรก และสุดท้ายเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 โดยบริเวณทั้งหมดจะมีตัวหล่อเย็นเพื่อดึงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกจากระบบ ทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ตลอดเวลา เมื่อสารละลายผสมผ่านมาถึงเครื่องปฏิกรณ์ที่ 3 อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเนื่องจากปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ลดลง ดังนั้น ต้องเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 3 เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดอย่างสมบูรณ์

สารละลายที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่ 3 จะถูกส่งเข้าสู่ถังกำจัดตัวทำละลาย (devolatilizer) เพื่อกำจัดตัวทำละลาย และมอนอเมอร์ที่เหลือจากปฏิกิริยา รวมทั้งสารน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่อาจเกิดขึ้นออกจากพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ ซึ่งตัวทำละลายและมอนอเมอร์ที่เหลือจะนำกลับมาใช้ได้ใหม่ ส่วนพอลิเมอร์ที่ได้จะส่งไปยังเครื่องอัดรีดเพื่อทำเป็นเม็ดต่อไป

การเตรียม PS แบบสารละลายจะได้ PS ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสม่ำเสมอ แต่ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง เนื่องจากราคาของตัวทำละลาย และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ได้ใหม่ ดังนั้น กระบวนการนี้จึงไม่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์มากนัก แต่จะใช้ในห้องปฏิบัติการมากกว่า

3. พอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (suspension polymerization) : การเตรียม PS ด้วยกระบวนการแบบสารละลายมีข้อจำกัดเรื่องค่าใช้จ่ายของตัวทำละลาย และตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดมีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำ เนื่องจากมีค่าความจุความร้อน (heat capacity) ต่ำ “น้ำ” เป็นตัวทำละลายที่มีจุดเดือดค่อนข้างสูง และมีค่าความจุความร้อนสูงด้วย ที่สำคัญไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะจะใช้เป็นตัวทำละลายในการเตรียม PS แต่น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วสูง จึงไม่สามารถละลายสไตรีนและ PS ได้ ดังนั้น จึงได้มีกระบวนการที่ผสมผสานระหว่างวิธีแบบบัลก์และแบบสารละลายเข้าด้วยกัน เรียกว่า กระบวนการแบบแขวนลอย โดยสารละลายสไตรีนและสารเปอร์ออกไซด์ที่เป็นตัวริเริ่มจะถูกตีด้วยใบพัดให้กระจายเป็นเม็ดเล็กๆ ขนาด 1-3 มม. แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยมีสารช่วยการกระจาย (dispersant) หรือสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer) หุ้มเม็ดอยู่ เพื่อป้องกันการรวมตัว ดังนั้น ภายในเม็ดที่แขวนลอยจะเปรียบเสมือนเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (micro reactor) โดยกระบวนการดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนเป็นไปได้ดีกว่ากระบวนการแบบสารละลาย โดยทั่วไปนิยมใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารช่วยการกระจาย ลักษณะและขนาดของเม็ด PS ที่เตรียมได้จะถูกควบคุมด้วยความเร็วของการกวน และอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายสไตรีนและน้ำที่เติมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์

ข้อเสียของการเตรียม PS ด้วยกระบวนการแบบแขวนลอย คือ ปริมาณเม็ด PS ที่เตรียมได้ต่อครั้งจะค่อนข้างน้อย เนื่องจากปริมาตรส่วนใหญ่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นน้ำประมาณ 70% และเม็ด PS ที่เตรียมได้มีความชื้นสูง จึงต้องนำไปอบก่อนใช้งาน บางครั้งการอบด้วยความร้อนสูงอาจทำให้เม็ด PS เปลี่ยนสีได้ โดยปกติวิธีนี้นิยมใช้เตรียม EPS เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสามารถเติมสารฟลู (blowing agent) เข้าไปในระหว่างการผลิตได้

4. **พอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization)** : การเตรียม PS โดยกระบวนการแบบอิมัลชันจะมีวิธีและหลักการคล้ายกระบวนการแบบแขวนลอย แต่จะต่างกันตรงที่กระบวนการแบบอิมัลชันนั้น ตัวริเริ่มจะละลายอยู่ในน้ำซึ่งเป็นตัวกลางสำหรับการกระจาย ดังนั้น ตัวริเริ่มที่เข้้มักเป็น $K_2S_2O_8$ (potassium persulfate) โดยเม็ดสไตรีนจะแขวนลอยอยู่ในน้ำในลักษณะของคอลลอยด์ (colloidal) โดยมีสารประเภทสบู่ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ป้องกันไม่ให้เม็ดสไตรีนกลับมารวมตัวกัน วิธีการดังกล่าวนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในการเตรียม PS แต่พบว่าใช้อย่างแพร่หลายในการเตรียม PVC และ PMMA เป็นต้น

สมบัติของพอลิสไตรีน

PS ในทางการค้าจะมีการจัดโครงสร้าง (configuration) เป็นแบบอะแทกติก (atactic) จึงมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน ค่า T_g ของ PS อยู่ในช่วง $90-100^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปอยู่ในช่วงระหว่าง $150-260^\circ\text{C}$ ขึ้นกับวิธีการที่ใช้ในการขึ้นรูป ค่า HDT (heat distortion temperature) ของ PS อยู่ในช่วง $77-93^\circ\text{C}$ (สำหรับแรงกด 1.8 MPa) และ $68-93^\circ\text{C}$ (สำหรับแรงกด 0.45 MPa) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 PS มีความหนาแน่น $1.04-1.05 \text{ g/ml}$ และเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงาน (mould shrinkage) อยู่ในช่วง $0.4-0.7\%$ ส่วนค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, k) มีค่าประมาณ 3 w/(m.K) ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ จึงเหมาะสำหรับใช้ทำฉนวนกันความร้อน

ที่อุณหภูมิห้อง PS จะมีลักษณะแข็ง และสีใส ไม่มีกลิ่น ติดไฟได้ง่าย ราคาถูก นอกจากนี้ ความเหนียวของการให้สีมีค่าต่ำ จึงทำให้ง่ายต่อการกำหนดเฉดสีของผลิตภัณฑ์ PS สามารถละลายในตัวทำละลายทั่วไป โดยเฉพาะตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เบนซีน และโทลูอีน โดย PS มีค่าพารามิเตอร์การละลาย (solubility parameter, δ) เท่ากับ $18.6 \text{ MPa}^{1/2}$ ทำให้การทนสารเคมี (chemical resistance) ของ PS มีค่าไม่สูง แต่มีค่าการดูดความชื้น (moisture absorption) ต่ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของพอลิสไตรีน [9]

สมบัติ	GPS
Density (g/ml)	1.04 – 1.05
T _g (°C)	90 – 100
HDT (1.8 MPa)	77 – 93
HDT (0.45 MPa)	68 – 93
Mould Shrinkage (%)	0.4 – 0.7
Thermal Conductivity [w/(m.K)]	3

ชิ้นงานที่ผลิตจาก PS จะเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างได้น้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จึงจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความคงขนาด (dimension stability) อยู่ในเกณฑ์ดี ส่วนความแข็งแรงเชิงกลของ PS ขึ้นกับลักษณะโครงสร้าง และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นหลัก ตารางที่ 2.4 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของ PS เกรดต่างๆ โดยมีค่าความทนแรงดึง 40-50 MPa ค่ายังส์มอดุลัสประมาณ 35 MPa ส่วนค่าความทนแรงกระแทก 0.25 – 0.35 ft lb/in ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้ PS เป็นวัสดุที่ค่อนข้างเปราะ

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิสไตรีน [11]

สมบัติ	วิธีการทดสอบ	PS เกรดต่าง ๆ			
		GPS ^a	High Mw ^b	Heat ^c	Easy Flow ^d
Tensile Strength (MPa)	ASTM D 638	40-48	45-52	45-52	40-48
Elongation (%)	ASTM D 638	1.0-2.5	1.0-2.5	1.0-2.5	1.0-2.5
Young's Modulus (MPa)	ASTM D 638	35	35	35	35
Flexural Strength (MPa)	ASTM D 790	62-76	69-83	69-83	62-76
Izod Impact (ft lb/in)	BSI 493	0.25-0.35	0.25-0.35	0.25-0.35	0.25-0.35

^a พอลิเมอร์ที่ใช้งานทั่วไป

^b พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

^c พอลิเมอร์เกรดที่ทนความร้อนสูง

^d พอลิเมอร์เกรดความเหนียวต่ำ

2.3 โคพอลิเมอร์ [12]

พอลิเมอร์ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำ (repeating unit) เพียง 1 แบบ จัดเป็น “โฮโมพอลิเมอร์” (homopolymer) ซึ่งสมบัติต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงกลหรือสมบัติทางเคมีจะเปลี่ยนไปตามโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ที่เป็นหน่วยย่อยของพอลิเมอร์ ซึ่งโฮโมพอลิเมอร์อาจมีสมบัติไม่ครอบคลุมสมบัติที่ต้องการทั้งหมด จึงต้องมีการผสมโฮโมพอลิเมอร์ต่างชนิดเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามต้องการ ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ดังกล่าวจะทำให้เกิดเป็น “พอลิเมอร์ผสม” (polymer blends) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะง่ายและสะดวก แต่เทคนิคดังกล่าวก็ไม่สามารถเตรียมวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติดีขึ้นเสมอไป อีกทางเลือกหนึ่งที่น่าจะช่วยพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ให้มีสมบัติตามต้องการได้ คือ การทำให้เป็นโคพอลิเมอร์ ซึ่งเตรียมได้จากการใช้มอนอเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิด ขึ้นไป จึงทำให้มีหน่วยซ้ำมากกว่า 1 แบบ

ในการใช้มอนอเมอร์ 2 ชนิด เช่น มอนอเมอร์ A และมอนอเมอร์ B จะสามารถเตรียมโคพอลิเมอร์ได้ 4 แบบ ดังนี้

- โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymers)
- โคพอลิเมอร์แบบสลับ (alternative copolymers)
- โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (block copolymers)
- โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์ (graft copolymers)

โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม

เป็นโคพอลิเมอร์ที่โครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์ 2 ชนิด ต่อกันอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามอนอเมอร์แต่ละชนิดเข้าทำปฏิกิริยาในลักษณะสุ่ม ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่ถูกผลิตในอุตสาหกรรมมากที่สุด

~~~~~ ABAABABBABAABBABAA ~~~~~

### โคพอลิเมอร์แบบสลับ

เป็นโคพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์ 2 ชนิด ที่ใช้ปริมาณเป็นโมลเท่ากัน และจัดเรียงตัวสลับกันอย่างเป็นระเบียบ

~~~~~ ABABABABABABABABAB ~~~~~

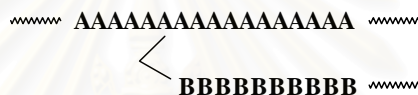

โคพอลิเมอร์แบบบล็อก

โคพอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยโซ่สั้นๆ ของมอนอเมอร์ A และมอนอเมอร์ B ต่อเชื่อมกัน มีลักษณะเหมือนเอาบล็อกของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B มาต่อกัน



โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์

โคพอลิเมอร์ชนิดนี้มีมอนอเมอร์ A ต่อเป็นสายโซ่หลักของโมเลกุล และมอนอเมอร์ B ต่อเป็นกิ่งสั้นๆ แยกออกมา



โดยทั่วไปแล้วโคพอลิเมอร์ที่เป็นลักษณะบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์จะมีสมบัติเด่นเป็นไปตามไฮโมพอลิเมอร์ที่ประกอบเข้าเป็นโคพอลิเมอร์ ส่วนโคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบสุ่มและแบบสลับ สมบัติของพอลิเมอร์จะอยู่ระหว่างสมบัติของไฮโมพอลิเมอร์ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ทั้งสองชนิด ขึ้นกับอัตราส่วนของแต่ละไฮโมพอลิเมอร์ที่อยู่ในโคพอลิเมอร์

2.4 การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติ [13,14]

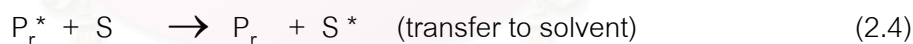
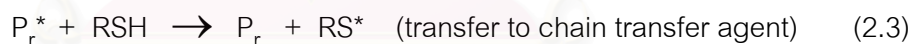
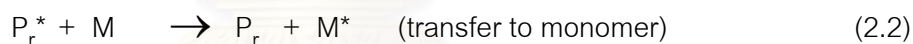
การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ต้องทำให้เกิดจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาขึ้นบนโมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงจะสามารถเกิดการโคพอลิเมอร์ได้ วิธีส่วนใหญ่ที่ใช้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ คือปฏิกิริยาแรดิคัลพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งจะเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ขึ้นกับว่าพอลิเมอร์ที่ถูกรูปกราฟต์จะสามารถละลายในมอนอเมอร์ที่มากกราฟต์ได้หรือไม่

การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนยางธรรมชาติให้เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer, TPE) ซึ่งวิธีสังเคราะห์มีหลายวิธีดังนี้

- กลไกการถ่ายโอน (transfer mechanisms)
- การกราฟต์ผ่านตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวในยางธรรมชาติ (graft copolymerization via the unsaturation in natural rubber)
- พอลิเมอไรเซชันแบบรีดอกซ์ (redox polymerization)
- การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตเคมีคัล (photochemical synthesis)
- เทคนิคการฉายรังสีพลังงานสูง (high energy irradiation techniques)

กลไกการถ่ายโอน

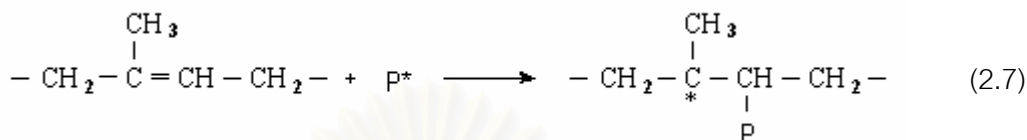
ในระหว่างการสังเคราะห์พอลิเมอร์อาจมีการถ่ายโอนแรดิคัลจากพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด (P_r^*) ให้กับตัวริเริ่ม มอนอเมอร์ สารถ่ายโอนโซ่ ตัวทำละลาย พอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด ดังสมการที่ (2.1)–(2.6)



ในแต่ละกลไกจะมีการถ่ายโอนอะตอมของไฮโดรเจนไปยังสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดบนพอลิเมอร์สิ้นสุดลง ซึ่งกลไกในสมการที่ (2.5) เป็นกลไกที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์

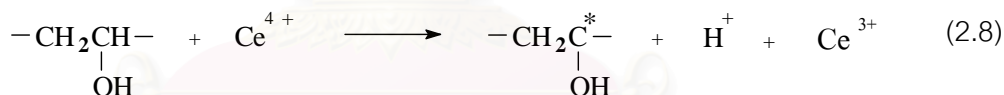
การกราฟต์ผ่านตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวในยางธรรมชาติ

เป็นการเข้าทำปฏิกิริยาของสายโซ่พอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาด (P^*) ที่ตำแหน่งไม่อิ่มตัว หรือพันธะคู่ของโมเลกุลในยางธรรมชาติ ดังแสดงในสมการที่ 2.7



พอลิเมอไรเซชันแบบรีดอกซ์

เป็นวิธีเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับพอลิเมอร์ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเซลลูโลส เป็นต้น ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้ซีริกไอออน (ceric ion) หรือสารออกซิไดส์ (oxidizing agents) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดแรดิคัลอิสระบนพอลิเมอร์ วิธีนี้ไม่มีโฮโมพอลิเมอร์เกิดในระบบ เพราะมอนอเมอร์ไม่วงไวต่อซีริกไอออน นอกจากนี้ ตัวริเริ่มในปฏิกิริยารีดอกซ์จะมีข้อจำกัดกรณีที่พอลิเมอร์มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์แสดงไว้ในสมการที่ 2.8



การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตเคมีคัล

สารอินทรีย์ซึ่งมีโครงสร้างที่เหมาะสมจะสามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงที่มองเห็นได้ (visible light) และอัลตราไวโอเล็ต ทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์กับสารโมเลกุลใหญ่ที่มีหมู่ที่วงไวต่อแสงได้ อย่างไรก็ตาม มีพอลิเมอร์เพียงไม่กี่ชนิดที่จะถูกกระตุ้นด้วยแสงได้โดยตรง ถ้าพลังงานของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นมากเกินไปอาจทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออก และถ้าในระบบมีมอนอเมอร์อยู่ด้วย จะมีผลทำให้เกิดโคพอลิเมอร์แบบบล็อก แต่ถ้าหมู่ด้านข้าง (side group) ถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์แทน

เทคนิคการฉายรังสีพลังงานสูง

เมื่อพอลิเมอร์ได้รับการฉายรังสีพลังงานสูงจะเกิดผลกระทบ 2 ประการ คือ (1) เกิดการสูญเสียหมู่ที่อยู่ด้านข้าง เช่น ไฮโดรเจนอะตอมจากสายโซ่พอลิเมอร์ และ (2) สายโซ่หลักขาดออก ซึ่งทั้งสองกรณีนี้เรดิคัลของพอลิเมอร์อื่นสามารถรวมตัวกับพอลิเมอร์ที่ถูกฉายรังสีแล้วเกิดเป็นกราฟต์โคพอลิเมอร์และบล็อกโคพอลิเมอร์ได้ตามลำดับ เช่น cis-1,4-poly(isoprene-g-methyl methacrylate) สังเคราะห์โดยฉายรังสี ^{60}Co ให้กับน้ำยางธรรมชาติที่ผสมเมทิลเมทาคริเลต ทำให้มีประสิทธิภาพของการกราฟต์ (grafting efficiency) สูง และในระบบจะปราศจากไฮโมพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต

2.5 การสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

ในปัจจุบันได้มีการเตรียมโคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ ด้วยการกราฟต์ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ คือ การทำให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (reactive site) ขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลของยาง มักเป็นเรดิคัล และสามารถไปริเริ่มให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของไวนิลมอนอเมอร์ต่อไป ดังเช่นงานวิจัยต่อไปนี้

Cooper, W. และคณะ [15] ใช้เทคนิคการฉายรังสีเพื่อทำให้เกิดการริเริ่มปฏิกิริยาขึ้นบนโมเลกุลของยาง ซึ่งใช้รังสีแกมมาของธาตุโคบอลต์-60 (^{60}Co γ -radiation) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ระบบเป็นแบบอิมัลชัน มีสไตรีนมอนอเมอร์ผสมอยู่กับน้ำยางธรรมชาติที่ทราบค่าปริมาณเนื้อยางแห้ง (DRC) ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิห้อง โดยฉายรังสีเป็นเวลา 16 ชั่วโมง (อัตรา 0.1166 mrad/h) ผลของการทำปฏิกิริยาพบว่ามีประสิทธิภาพของการกราฟต์ 49 เปอร์เซ็นต์ และมีพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ 20 เปอร์เซ็นต์

Fukushima, Y. และคณะ [16] ศึกษาการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติโปรตีนต่ำกับสไตรีนมอนอเมอร์ โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น benzoyl peroxide (BPO) tert-butyl hydroperoxide (TBHPO) cumene hydroperoxide (CHPO) 2,2'-azobis-isobutyronitrile (AIBN) และ tert-butyl hydroperoxide / tetraethylenepentamine (TBHPO/TEPA) เป็นต้น ก่อนเริ่มปฏิกิริยาจะต้องเตรียมน้ำยางธรรมชาติให้มีปริมาณเนื้อยางแห้งเป็น 8 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงเติมสไตรีนมอนอเมอร์บริสุทธิ์ 8 มิลลิลิตร และตัวริเริ่มปฏิกิริยา $1.6 \times 10^{-5} - 13.0 \times 10^{-5}$ โมล/กรัม ของน้ำยาง ลงในน้ำยาง 100 มิลลิลิตร กวนให้เกิดปฏิกิริยาที่ความเร็ว 400 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศา

เซลเซียส ถึง 80 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เป็น TBHPO/TEPA ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 3.3×10^{-5} โมล/กรัมของน้ำยาง ทำให้ได้กราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณสไตรีน ประสิทธิภาพของการกราฟต์ และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลของยางสูง

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติในสภาวะน้ำยางกับสไตรีนมอนอเมอร์ใช้เทคนิคการเตรียมแบบอิมัลชัน กระบวนการเป็นแบบเรดิคัลพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งจะเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชันแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ในระบบจะประกอบด้วย น้ำยางธรรมชาติ (60%DRC) สไตรีนมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา โปแตสเซียมลอเรต (ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์) และน้ำกลั่น ตัวริเริ่มปฏิกิริยาใช้สารเคมี 2 ชนิดทำปฏิกิริยากัน ตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดแรก คือ เตตราเอทิลีนเพนตามีน (tetraethylene pentamine, TEPA) ซึ่งละลายน้ำและอีกชนิด คือ เทอร์เชียรีบิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (*t*-butyl hydroperoxide, TBHPO) ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทั้งสองชนิดเกิดปฏิกิริยาแล้วแตกตัวได้อนุมูลอิสระที่อินเทอร์เฟซของน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์

2.6 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [1,17,18]

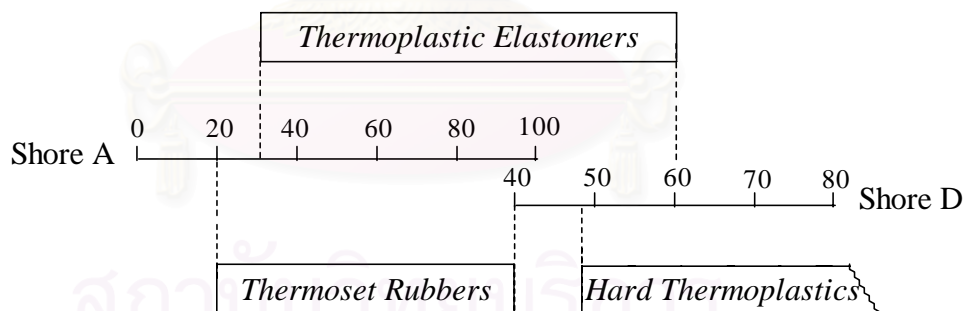
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer : TPE) สามารถเตรียมได้จากการทำพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) และการเตรียมบล็อกโคพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้วัสดุที่ได้มีทั้งส่วนที่แข็ง (hard segment) และส่วนที่อ่อน (soft segment) อยู่รวมกัน นอกจากนี้ TPE ยังสามารถเตรียมได้จากกราฟต์โคพอลิเมอร์อีกด้วย โดยให้มอนอเมอร์เกิดโคพอลิเมอร์เซชันบนโมเลกุลของยาง ดังนั้น TPE จึงเป็นวัสดุที่สามารถหลอมเหลวและขึ้นรูปได้เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ซึ่ง TPE สามารถเป็นได้ทั้งยางหรืออีลาสโตเมอร์และเทอร์โมพลาสติกเรซิน เนื่องจากแสดงสมบัติยืดหยุ่น (elastic property) เช่น การโค้งงอ (flexibility) การบิดเบี้ยว (distortion) ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำ และสามารถที่คืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิมได้หลังจากปล่อยแรงกระทำภายนอก ส่วนสมบัติของเทอร์โมพลาสติก คือ สามารถหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิสูง และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดได้ และที่ต่างจากยางคือ เศษชิ้นงานของ TPE ที่เหลือจากกระบวนการผลิตสามารถนำไปรีไซเคิลได้ ขณะที่เศษชิ้นงานของยางไม่สามารถรีไซเคิลได้

TPE อาจแบ่งกว้างๆ ได้ 5 ชนิด ตามชนิดของเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [1,19]

| Type | End Blocks | Middle block | Specific gravity |
|--------------|-------------------------|---------------------------------|------------------|
| Styrenic | Polystyrene | Polybutadiene or polyisoprene | 0.90 – 1.14 |
| Polyolefin | Isotactic polypropylene | Ethylene –propylene copolymer | 0.89 – 1.25 |
| Polyurethane | Rigid polyurethane | Flexible polyester or polyether | 1.10 – 1.34 |
| Copolyester | Rigid polyester | Flexible polyester | 1.13 – 1.39 |
| Polyamide | Rigid polyamide | Flexible polyether | 1.01 – 1.14 |

รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นสมบัติของ TPE ที่เหลื่อมซ้อนกับทั้งยางและเทอร์โมพลาสติกได้จากค่าความแข็ง แต่จะมีแนวโน้มมาทางยางมากกว่า ซึ่งเป็นเหตุให้สามารถนำ TPE ไปใช้ได้ทั้งในอุตสาหกรรมยางและเทอร์โมพลาสติก โดย TPE จะประกอบไปด้วยพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 เฟส คือ เฟสที่เป็นส่วนที่แข็งของเทอร์โมพลาสติก (hard thermoplastic phase) รวมตัวอยู่กับเฟสอ่อนนิ่มของยาง (soft elastomer phase) ดังนั้น สมบัติของ TPE จะมาจากสมบัติของแต่ละเฟส และจากการทำปฏิกิริยากันเองของเฟสทั้งสอง

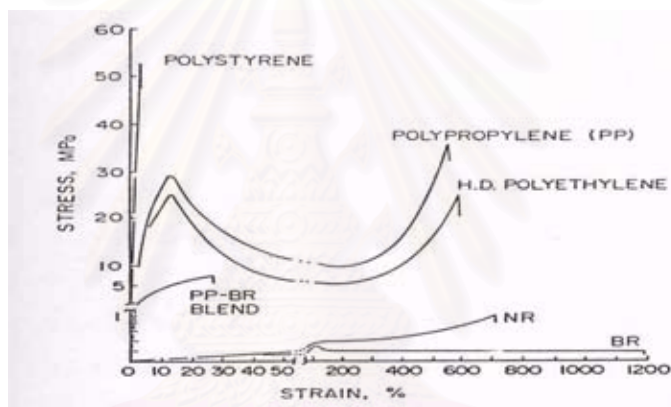


รูปที่ 2.10 ความแข็งของ TPE ซึ่งเหลื่อมซ้อนกับยางและเทอร์โมพลาสติก [18]

สมบัติของ TPE ขึ้นกับอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของเทอร์โมพลาสติก และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของยาง ช่วงอุณหภูมิที่นำไปใช้งานจะอยู่ระหว่าง T_m และ T_g ซึ่งภายในช่วงอุณหภูมินี้ TPE จะแสดงสมบัติของยางตามที่ต้องการ แต่ถ้าเหนือ T_m เฟสของเทอร์โมพลาสติกจะหลอมเหลว ทำให้ TPE กลายเป็นของไหล และสามารถขึ้นรูปโดยเทคนิคที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกทั่วไปได้ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า T_g จะทำให้ TPE เปราะ และสูญเสียสมบัติของยางไป

ก่อนที่จะตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม (ยาง/พลาสติก) หรือ TPE ควรพิจารณาสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเสียก่อน เพราะสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและ TPE จะขึ้นกับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ

ยางและพลาสติกจะมีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยรูปที่ 2.11 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของพลาสติกและยาง ซึ่งพอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพลาสติกที่สามารถเกิดผลึกได้ ส่วนพอลิสไตรีน (PS) เป็นวัสดุอสัณฐานที่มีสมบัติคล้ายแก้ว จะมีกราฟแตกต่างจากยางธรรมชาติ (NR) และยางบิวทิล (BR) นอกจากนี้ยังได้แสดงกราฟของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP และ BR โดยใช้เทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (melt-mixed blend) อีกด้วย



รูปที่ 2.11 กราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ [20]

การเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์กับเทอร์โมเซ็ตรับเบอร์ [18]

เพื่อที่จะให้เข้าใจว่า TPE ได้เข้ามามีบทบาทแทนที่เทอร์โมเซ็ตรับเบอร์หรืออย่างไร จึงได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุทั้งสองประเภท โดย TPE จะมีข้อดีกว่ายาง ดังนี้

1. กระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ของ TPE ง่ายกว่า และมีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งถ้าเทียบกับยางแล้ว จะพบว่าผลิตภัณฑ์จากยางมีขั้นตอนยุ่งยากกว่ามาก
2. เวลาที่ใช้ผลิต TPE สั้นกว่า ถึงแม้ว่าเวลาที่อยู่ในแม่พิมพ์จำเป็นต้องนานพอเพื่อหล่อเย็นชิ้นงาน แต่เวลาเหล่านี้ใช้เวลาเป็นวินาทีเท่านั้น แต่ถ้าเปรียบเทียบกับยางแล้ว จะใช้เวลาหลายนาที่ที่อยู่ในแม่พิมพ์ เนื่องจากต้องมีขั้นตอนการเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุล (vulcanization)

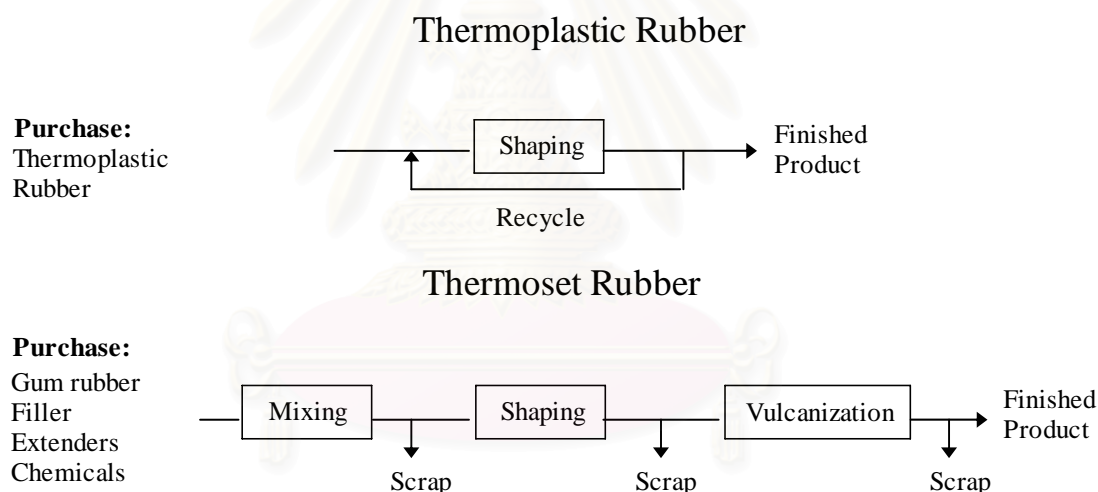
3. เศษชิ้นงานของ TPE สามารถนำไปรีไซเคิลได้ โดยส่วนใหญ่สามารถรีไซเคิลได้หลายครั้งโดยสมบัติเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

4. การผลิตชิ้นงานจาก TPE จะใช้พลังงานน้อยกว่า เนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายและน้อยกว่า ซึ่งการผลิตจะเหมือนเทอร์โมพลาสติก คือ ถูกหลอมเหลวแล้วส่งเข้าสู่แม่แบบ จากนั้นจะถูกหล่อเย็นเพื่อให้ได้รูปร่างตามแม่แบบ

5. TPE ไม่จำเป็นต้องทำเป็นคอมพาวด์ ในขณะที่ยางจำเป็นต้องใส่สารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) สารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer) สารช่วยกระบวนการผลิต (processing aid) และสารเติมแต่ง (additives) บางชนิด เช่น สารหน่วงไฟ (flame retardant) เป็นต้น

6. สำหรับการประยุกต์ที่เหมือนกัน ชิ้นงาน TPE มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ต่ำกว่า เนื่องจากยางจะมีการใส่สารตัวเติมอนินทรีย์หรือเขม่าดำลงไปด้วย

7. TPE สามารถใช้กระบวนการผลิตที่เหมือนกับเทอร์โมพลาสติกเรซินได้ ขณะที่บางวิธีไม่สามารถนำไปใช้กับยางได้



รูปที่ 2.12 การผลิตของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีเพียงขั้นตอนเดียว

ขณะที่เทอร์โมเซ็ตรับเบอร์ จะมี 3 ขั้นตอน หรือมากกว่า [18]

สำหรับข้อเสียของ TPE เมื่อเทียบกับยาง มีดังนี้

1. TPE ส่วนใหญ่ต้องผ่านการทำให้แห้งก่อน ซึ่งเป็นขั้นตอนปกติในการผลิตชิ้นงานจากเทอร์โมพลาสติกเรซิน และขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นสำหรับวัสดุประเภทยาง

2. เครื่องมือที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ TPE โดยทั่วไปมีราคาแพงกว่าเครื่องมือที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์จากยาง

2.7 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ต่าง ๆ

พอลิเมอร์ผสมเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาทางอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้มีการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์นั้น นิยมทำกันมากในปัจจุบัน เนื่องจากจะทำให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติโดยทั่วไปคล้ายยางแต่สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายเหมือนกับวัสดุพวกเทอร์โมพลาสติก อีกทั้งยังมีข้อดีในแง่ของการนำมารีไซเคิลใหม่ได้ นอกจากนี้การผลิตวัสดุประเภทนี้จะมีความสามารถในการผลิตที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการทำคอมพาวด์และการวัลคาไนซ์ และยังสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง Extrusion อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดแต่เพียงลำพังนั้น สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้อาจไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดในการเข้ากันได้ของ พอลิเมอร์ผสม ดังนั้นการใช้สารช่วยผสมดังกล่าวมาแล้วจึงนับเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ และมีความสำคัญในการพัฒนาพอลิเมอร์ผสม ดังงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา เช่น

Asaletha, R. และคณะ [21,22] ได้ศึกษาถึงการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน ซึ่งพอลิเมอร์คู่นี้มีความเข้ากันได้ที่ไม่ดี จึงมีการเติมสารช่วยผสมที่เป็นยางธรรมชาติกราฟต์พอลิสไตรีน (NR-g-PS) ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้รังสีแกมมาเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา เทคนิคการเตรียมพอลิเมอร์ผสมนี้ใช้ตัวทำละลายในการช่วยผสม หลังจากตรวจสอบผลฐานานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยใช้คาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้พื้นผิวที่มีความละเอียดมากกว่าการใช้คลอโรฟอร์ม และคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมคู่นี้ปรับปรุงขึ้นเมื่อมีการใช้สารช่วยผสมร่วมด้วยในระบบการผสม นอกจากนี้ Asaletha, R. และคณะ [23] ยังได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการไหล (rheology) ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์คู่นี้ด้วย เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมมี 2 เทคนิค คือ เทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) และการผสมแบบสารละลาย (solution mixing) พบว่า ความหนืดของระบบของทั้ง 2 เทคนิคจะลดลงเมื่อเพิ่มแรงเฉือน ซึ่งเป็นพฤติกรรมของซูโดพลาสติก (pseudo plastic) และความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางลงในระบบ โดยระบบการผสมแบบสารละลายจะมีความหนืดที่สูงกว่าระบบการผสมแบบหลอมเหลว นอกจากนี้ความหนืดของระบบการผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อการเติมสารช่วยผสมเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความหนืดจะลดลง

Oommen, Z. และคณะ [24] ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ทั้งที่มีการใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม ซึ่งสารช่วยผสมได้จากการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลตโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ เทคนิคการผสมมีทั้งการผสมแบบสารละลายและการผสมแบบหลอมเหลว พบว่า ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางธรรมชาติ ในกรณีของการผสมแบบสารละลายนั้น ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับการกระทำระหว่างเฟส (interfacial activity) [25] ของพอลิเมอร์ผสมคู่นี้ด้วยผ่านทางสัณฐานวิทยา โดยใช้ทั้งกล้องจุลทรรศน์ (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่า ขนาดของเฟสที่กระจาย (dispersed phase) ลดลงอย่างมากเมื่อมีการเติมกราฟต์โคพอลิเมอร์ลงไปเพียงเล็กน้อย และสมบัติเชิงกล [26] ปรับปรุงขึ้นเมื่อมีการเติมกราฟต์โคพอลิเมอร์ลงไปด้วยในปริมาณเล็กน้อยเช่นกัน นอกจากนี้ Oommen, Z. และคณะ [27] ศึกษาผลของการใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิด ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยใช้ยางธรรมชาติกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นสารช่วยผสม พบว่า การใช้คลอโรเบนซีนจะทำให้ได้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีกว่าการใช้โทลูอีน

El-Sabbagh, S. H. [28] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม (NR/EPDM) ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้มีความเข้ากันได้ต่ำมาก จึงได้พัฒนาความเข้ากันได้ของวัสดุทั้งสองโดยการใช้รังสีแกมมา เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลระหว่างกันและกัน การเติมสารช่วยผสม EPDM-g-MAH ลงไปในระบบ และการเติมพอลิเมอร์ เช่น พอลิบูทาไดอีนรับเบอร์ (BR) ยางคลอริเนต คลอโรซัลไฟเนต พอลิเอทิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ ลงไปในระบบพอลิเมอร์ผสม พบว่า การเติมยางคลอริเนต และคลอโรซัลไฟเนต พอลิเอทิลีนลงไปในระบบ NR/EPDM Blends สามารถที่จะปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมที่ดีที่สุด และจากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ระบบพอลิเมอร์ผสมนี้ให้ค่า T_g เพียงค่าเดียวนั้น แสดงถึง ระบบมีความเข้ากันได้ที่ดีขึ้น

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์นั้นยังสามารถเตรียมได้จากการนำยางที่ใช้แล้วมารีไซเคิลใหม่โดยการผสมกับพอลิเมอร์ ดังงานวิจัยของ Suryadiansyah, H. I. และคณะ [29] ได้เปรียบเทียบการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีน/ยางธรรมชาติ (PP/NR Blends) และพอลิโพรพิลีน/ยางรีไซเคิล (PP/RR Blends) พบว่า ที่อัตราส่วนเดียวกัน PP/RR Blends ให้ค่าความทนแรงดึง และค่ายังมอดุลัส ที่สูงกว่า PP/NR Blends และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่แตกหักโดยใช้เทคนิค SEM พบว่า PP/NR Blends มีพื้นผิวที่หยาบกว่า ทำให้ต้องใช้พลังงานในการทำให้เกิดการแตกหักที่มากกว่า

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Natural rubber latex : Thai Rubber Latex Corporation (Thailand) Public Co., Ltd.
2. Styrene monomer : Pacific Plastics (Thailand) Ltd. (Maptaphut)
3. General purpose polystyrene : Siam Polystyrene Co., Ltd.
4. Tert-butyl hydroperoxide : A.S.C. Xenon Limited Partnership
5. Tetraethylene pentamine : Merck
6. Anhydrous sodium sulfate : APS Ajax Finechem
7. Sodium hydroxide : Lab Scan
8. Potassium hydroxide : Fluka
9. Lauric acid : Fluka
10. Calcium chloride : ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
11. Petroleum ether : Bangtreeding (LCA) Co., Ltd.
12. Methyl ethyl ketone : Lab System
13. Toluene : Lab System

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดปฏิกิริยาปฏิกิริยาขนาด 500 มิลลิลิตร
2. ไบพัตกวนและแกนไบพัต
3. มอเตอร์ปั่นกวนชนิดปรับรอบ
4. เทอร์มิเตอร์ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
6. ชุดกลั่นซอท์กัลดัต
7. เตาอบให้ความร้อน
8. เครื่องแก้วอื่น ๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

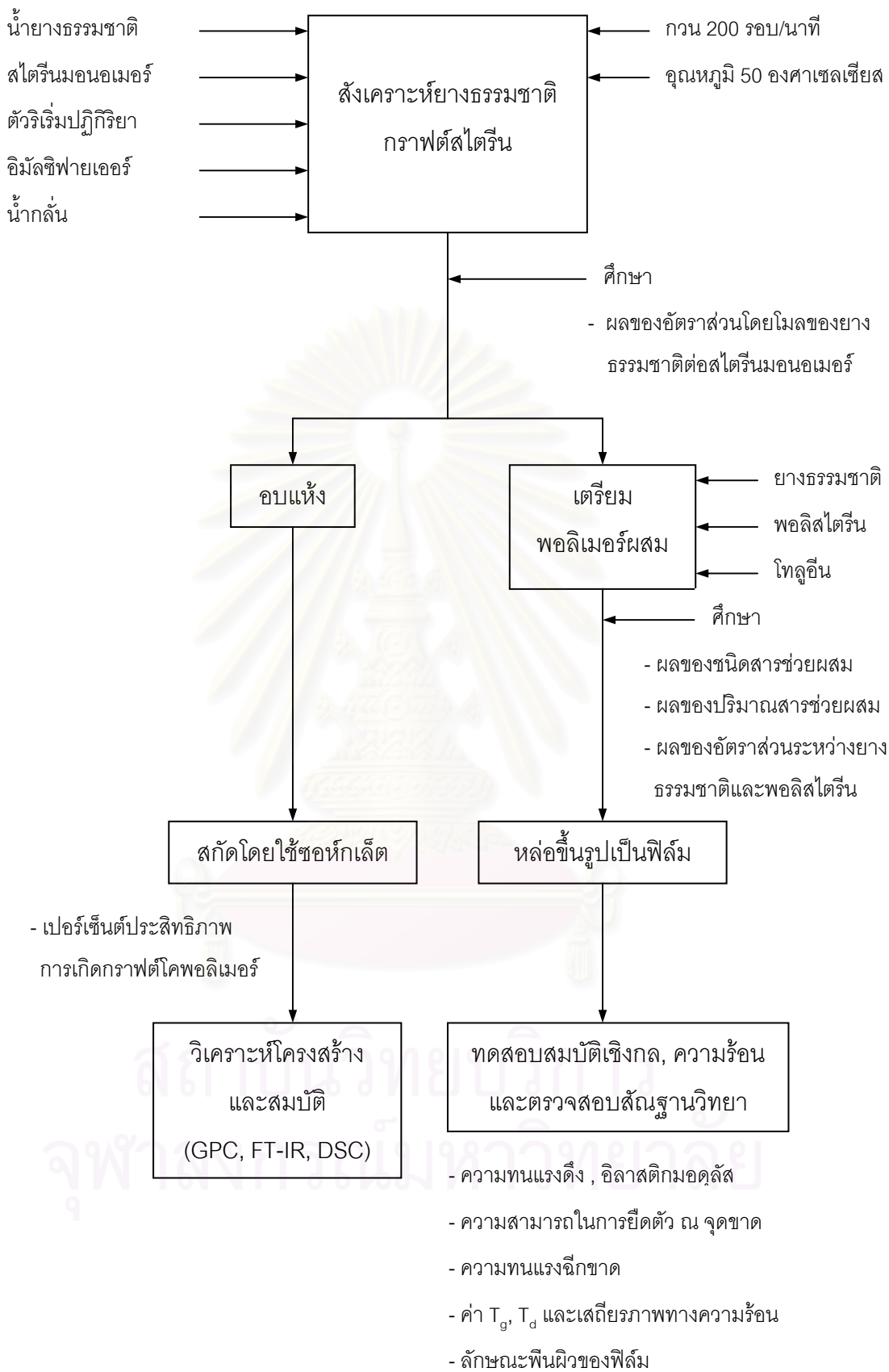
1. เครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR) , Nicolet รุ่น Impact 400D
2. เครื่อง Tensile testing machine , LLOYD รุ่น LR 5K
3. เครื่อง Optical microscope (OM) , Olympus รุ่น BH2-UMA
4. เครื่อง Gel permeation chromatograph (GPC) , Waters รุ่น 150-CV
5. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) , Netzsch รุ่น STA 409C
6. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) , Netzsch รุ่น DSC 200

3.4 ขอบเขตการทดลอง

เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน โดยใช้ยางธรรมชาติ กราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสม มีขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.5 การเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

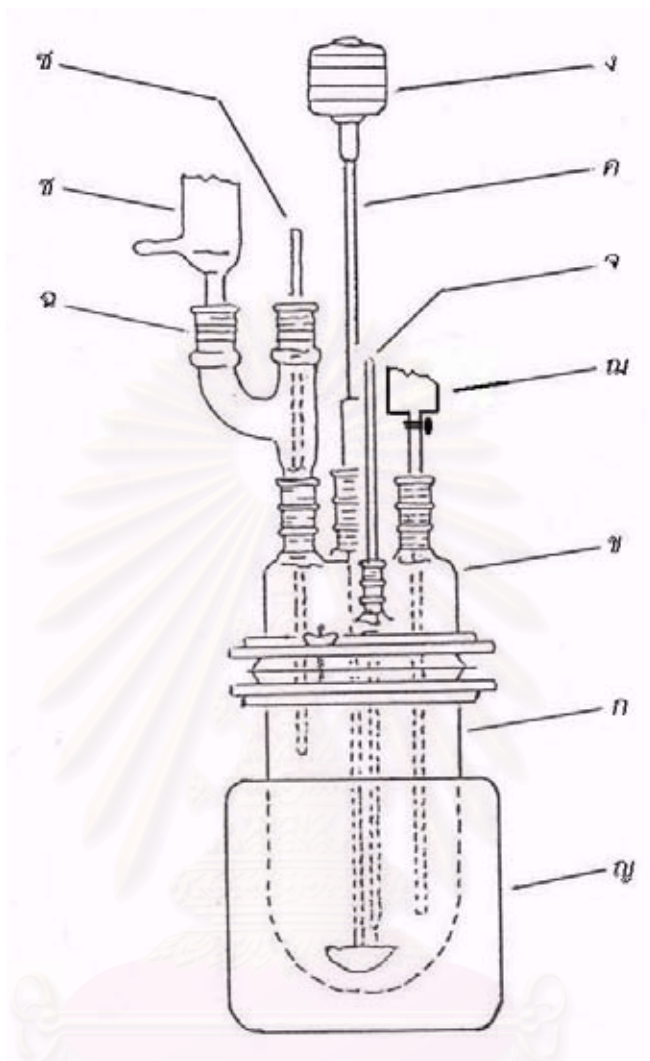
3.5.1 การทำให้สไตรีนมอนอเมอร์บริสุทธิ์ [30]

การทำให้สไตรีนมอนอเมอร์บริสุทธิ์ต้องกำจัดตัวยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) ที่ผสมอยู่ในมอนอเมอร์ออกให้หมด ซึ่งตัวยับยั้งทำหน้าที่ไม่ให้มอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งได้แก่ ไฮโดรควิโนน (hydroquinone) โดยนำสไตรีนมอนอเมอร์ไปล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% โดยใช้กรวยแยก 2-3 ครั้ง จนกระทั่งสีชมพูที่เกิดขึ้นจางหายไป จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกว่าต่างจะหมดไป (ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส) หลังจากนั้นแยกน้ำที่ล้างออก แยกสไตรีนมอนอเมอร์ออกแล้วใส่แอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (anhydrous Na_2SO_4) ในอัตราส่วน 100 กรัม/ลิตร เพื่อดูดน้ำที่ติดมาออกไป โดยตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที แล้วกรอง Na_2SO_4 ออก หลังจากนั้นนำมอนอเมอร์ที่ได้บรรจุลงในขวดสีชาที่ปิดแสง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส และสามารถทดสอบสไตรีนหลังทำให้บริสุทธิ์แล้วว่ามีพอลิเมอร์เกิดปะปนหรือไม่ โดยหยดเมทานอลลงไปในสไตรีน 1 หยด ถ้าเกิดความขุ่นแสดงว่ามีพอลิเมอร์ปนอยู่

3.5.2 การเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการกราฟต์สไตรีนบนยางธรรมชาติด้วยกระบวนการแบบอิมัลชันแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์หลัก (main reactor) ภาชนะป้อน (feeding tank) เครื่องกวน (mechanical stirrer) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ชุดกลั่น (condenser) และระบบไนโตรเจน ทำการทดลองโดยแปรอัตราส่วนโดยโมลของยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์เป็น 90:10 80:20 และ 70:30 รายละเอียดของปริมาณสารเคมีที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

การทดลองเริ่มโดยเติมน้ำยางธรรมชาติ เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (TEPA) และน้ำกลั่น ลงในเครื่องปฏิกรณ์หลัก กวนด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ส่วนในภาชนะป้อนเติมสไตรีนมอนอเมอร์ (ที่กำจัดตัวยับยั้งปฏิกิริยาออกแล้ว) เทอร์เชียรีบิวทิลไฮดรอปเปอร์ออกไซด์ (TBHPO) โปแตสเซียมลอเรต และน้ำกลั่น กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที แล้วหยดของผสมจากภาชนะป้อนลงในเครื่องปฏิกรณ์หลัก โดยมีอัตราการไหล 2 มิลลิลิตร/นาที ซึ่งใช้เวลาหยดประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาต่ออีก 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมบางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน [31]

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| (ก) ส่วนล่างเครื่องปฏิกรณ์ | (ข) ส่วนบนเครื่องปฏิกรณ์ |
| (ค) ไบพัสทวีสเตนเลส | (ง) มอเตอร์ |
| (จ) เทอร์โมมิเตอร์ | (ฉ) ข้อต่อ |
| (ช) ชุดกลั่น | (ช) ช่องทางเข้าแก๊สไนโตรเจน |
| (ฉ) ภาชนะป้อน | (ญ) อ่างควบคุมอุณหภูมิ |

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

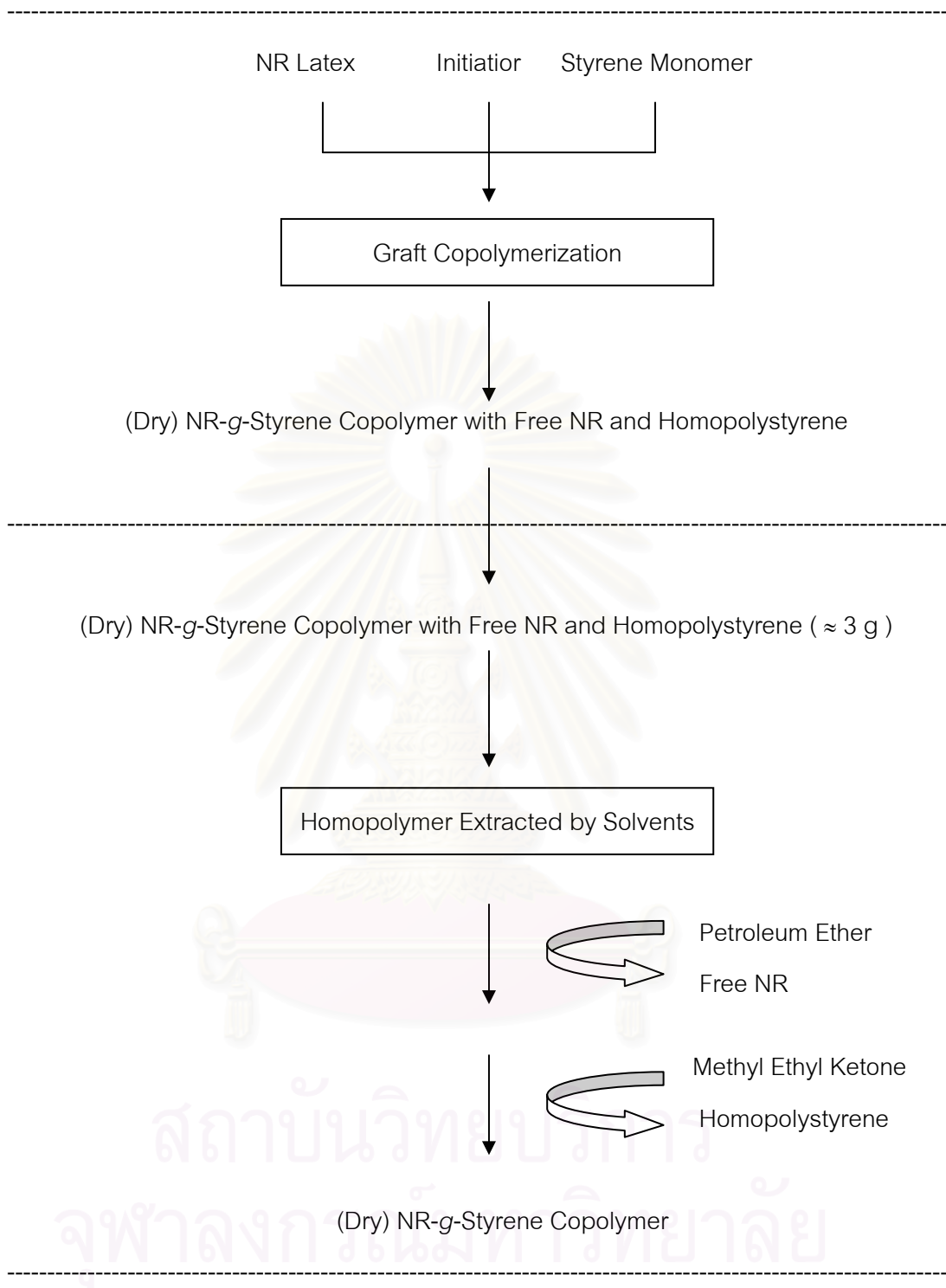
ก. เครื่องปฏิกรณ์หลัก

| น้ำยางธรรมชาติ/สไตรีน
(% mol) | น้ำยางธรรมชาติ
(60.07%DRC) (g) | TEPA
(g) | น้ำกลั่น
(g) |
|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------|
| 90/10 | 146.92 | 1.0 | 50 |
| 80/20 | 130.59 | 1.0 | 50 |
| 70/30 | 114.26 | 1.0 | 50 |

ข. ภาชนะป้อน

| น้ำยางธรรมชาติ/สไตรีน
(% mol) | สไตรีน
(g) | TBHP
(g) | โปแตสเซียมลอเรต
(g) | น้ำกลั่น
(g) |
|----------------------------------|---------------|-------------|------------------------|-----------------|
| 90/10 | 15 | 1.0 | 5 | 50 |
| 80/20 | 30 | 1.0 | 5 | 50 |
| 70/30 | 45 | 1.0 | 5 | 50 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

3.6 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

3.6.1 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ [31]

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ ทำโดยนำลาเท็กซ์ของกราฟต์โคพอลิเมอร์มาจับด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10% w/v นำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้มารีดเป็นแผ่นบาง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้ง ซึ่งยางแห้งประมาณ 3 กรัม แล้วนำไปสกัดยางที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกโดยใช้ชุดสกัดซอห์นเกล็ด ใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย สกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปสกัดพอลิสไตรีนที่ไม่กราฟต์กับยางธรรมชาติออกโดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเป็นตัวทำละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส จนแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้หลังสกัดซึ่งวิธีคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์แสดงไว้ในภาคผนวก ก

3.6.2 การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติด้วยเครื่อง GPC

เนื่องจากไม่สามารถใช้กระบวนการแยกพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติให้เป็นอิสระกับโมเลกุลของยางธรรมชาติได้ จึงไม่สามารถหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติได้โดยตรง ดังนั้น จึงใช้การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่เกิดในปฏิกิริยาและไม่ได้กราฟต์กับโมเลกุลยางธรรมชาติ แล้วให้เป็นน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติแทน [32]

นำพอลิสไตรีนที่ได้จากการสกัดในข้อ 3.6.1 มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GPC โดยใช้เตตระไฮโดรฟูราน (THF) เป็นตัวทำละลายสำหรับชะล้าง (eluent) และใช้สารละลายพอลิสไตรีนเป็นสารละลายมาตรฐาน การวิเคราะห์ทำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการไหลของตัวทำละลายชะล้างเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตร/นาที

3.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR

นำกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ได้จากการสกัดในข้อ 3.6.1 มาเย็ดตั้งให้เป็นฟิล์มบาง แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR

3.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนด้วยเครื่อง DSC โดยนำยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในภาดอะลูมิเนียม ซึ่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วปิดผนึก และใช้อากาศเป็นสารอ้างอิง โดยให้ภาวะของการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ -100 ถึง 150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที การทดสอบกระทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

3.7 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน

3.7.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนใช้เทคนิคการหล่อแบบสารละลาย (solution-cast blend) โดยใช้โพลูอินเป็นตัวทำละลาย อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนเป็น 70:30 60:40 และ 50:50 ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม (ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน)

การทดลองเริ่มจากการนำน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่มี 60 %DRC มาตกตะกอนด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 10 %w/v แล้วล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง ก่อนนำไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

นำโพลูอินเทลงในยางธรรมชาติแห้งและพอลิสไตรีนซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะสำหรับผสม พร้อมกับกวนสารผสมด้วยใบกวนด้วยอัตราเร็ว 800 รอบ/นาที แล้วจึงเติมยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนที่เตรียมได้ด้วยปริมาณต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ทั้งนี้ต้องมีการปรับเปลี่ยนปริมาณโพลูอินเพื่อให้ได้สารละลายพอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้มข้น 3 %w/v กวนสารละลายผสมต่อไปจนครบ 5 ชั่วโมง แล้วปรับความเร็วลงเหลือ 500 รอบ/นาที เป็นเวลาอีก 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ฟองอากาศที่เกิดขึ้น แล้วจึงนำสารละลายพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มตามวิธีในหัวข้อที่ 3.7.2 และมีการกำหนดสัญลักษณ์ของสูตรต่างๆ ไว้ในตารางที่ 3.3-3.5

ตารางที่ 3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน

| พารามิเตอร์ | ค่าที่แปรเปลี่ยน |
|---------------------------|--------------------------------|
| ตัวทำละลาย | โทลูอีน |
| ปริมาณของสารช่วยผสม (phr) | 0 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 |
| อัตราส่วนการผสม (NR : PS) | 70:30 , 60:40 , 50:50 |

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ของสูตรต่างๆ ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน และสารช่วยผสมที่เตรียมจากการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไตรีนในอัตราส่วน 90/10

| ปริมาณสารช่วยผสม
(phr) | ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | 70/30 | 60/40 | 50/50 |
| 0 | 0 N ₇₀ | 0 N ₆₀ | 0 N ₅₀ |
| 5 | 5 _(90/10) N ₇₀ | 5 _(90/10) N ₆₀ | 5 _(90/10) N ₅₀ |
| 10 | 10 _(90/10) N ₇₀ | 10 _(90/10) N ₆₀ | 10 _(90/10) N ₅₀ |
| 15 | 15 _(90/10) N ₇₀ | 15 _(90/10) N ₆₀ | 15 _(90/10) N ₅₀ |
| 20 | 20 _(90/10) N ₇₀ | 20 _(90/10) N ₆₀ | 20 _(90/10) N ₅₀ |
| 25 | 25 _(90/10) N ₇₀ | 25 _(90/10) N ₆₀ | 25 _(90/10) N ₅₀ |
| 30 | 30 _(90/10) N ₇₀ | 30 _(90/10) N ₆₀ | 30 _(90/10) N ₅₀ |

ตารางที่ 3.4 สัญลักษณ์ของสูตรต่างๆ ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน และสารช่วยผสมที่เตรียมจากการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไตรีนในอัตราส่วน 80/20

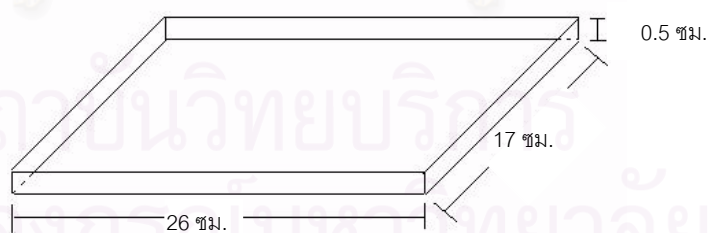
| ปริมาณสารช่วยผสม
(phr) | ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | 70/30 | 60/40 | 50/50 |
| 0 | 0 N ₇₀ | 0 N ₆₀ | 0 N ₅₀ |
| 5 | 5 _(80/20) N ₇₀ | 5 _(80/20) N ₆₀ | 5 _(80/20) N ₅₀ |
| 10 | 10 _(80/20) N ₇₀ | 10 _(80/20) N ₆₀ | 10 _(80/20) N ₅₀ |
| 15 | 15 _(80/20) N ₇₀ | 15 _(80/20) N ₆₀ | 15 _(80/20) N ₅₀ |
| 20 | 20 _(80/20) N ₇₀ | 20 _(80/20) N ₆₀ | 20 _(80/20) N ₅₀ |
| 25 | 25 _(80/20) N ₇₀ | 25 _(80/20) N ₆₀ | 25 _(80/20) N ₅₀ |
| 30 | 30 _(80/20) N ₇₀ | 30 _(80/20) N ₆₀ | 30 _(80/20) N ₅₀ |

ตารางที่ 3.5 สัญลักษณ์ของสูตรต่างๆ ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน และสารช่วยผสมที่เตรียมจากการกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยสไตรีนในอัตราส่วน 70/30

| ปริมาณสารช่วยผสม
(phr) | ปริมาณยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | 70/30 | 60/40 | 50/50 |
| 0 | 0 N ₇₀ | 0 N ₆₀ | 0 N ₅₀ |
| 5 | 5 _(70/30) N ₇₀ | 5 _(70/30) N ₆₀ | 5 _(70/30) N ₅₀ |
| 10 | 10 _(70/30) N ₇₀ | 10 _(70/30) N ₆₀ | 10 _(70/30) N ₅₀ |
| 15 | 15 _(70/30) N ₇₀ | 15 _(70/30) N ₆₀ | 15 _(70/30) N ₅₀ |
| 20 | 20 _(70/30) N ₇₀ | 20 _(70/30) N ₆₀ | 20 _(70/30) N ₅₀ |
| 25 | 25 _(70/30) N ₇₀ | 25 _(70/30) N ₆₀ | 25 _(70/30) N ₅₀ |
| 30 | 30 _(70/30) N ₇₀ | 30 _(70/30) N ₆₀ | 30 _(70/30) N ₅₀ |

3.7.2 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมออร์ผสม

นำสารละลายพอลิเมออร์ผสมที่เตรียมได้เทลงบนแผ่นกระจก (glass plate) ซึ่งมีลักษณะและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.4 แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวทำละลายระเหยออกไปจนหมด จากนั้นจึงนำฟิล์มที่ลอกออกจากแผ่นกระจกไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำฟิล์มพอลิเมออร์ผสมไปทดสอบสมบัติต่างๆ

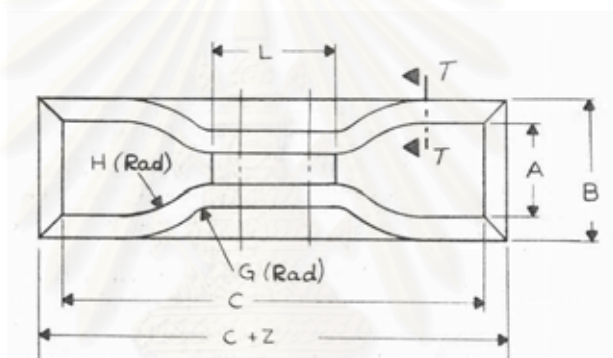


รูปที่ 3.4 ลักษณะและขนาดของแผ่นกระจกที่ใช้เตรียมฟิล์มพอลิเมออร์ผสม

3.8 การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

3.8.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ซึ่งมีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร มาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แล้วนำไปทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่อง LLOYD โดยใช้ load cell ขนาด 500 นิวตัน ซึ่งตั้งด้วยอัตราเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที และมีระยะ gauge length บนชิ้นทดสอบเท่ากับ 25 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่อง extensometer วัดระยะยืดตัวของฟิล์มและรายงานค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ค่าอิลาสติคโมดูลัส (modulus of elasticity) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation at break)

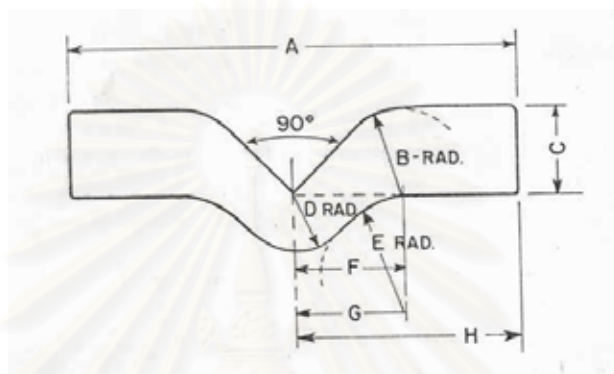


| Dimension | Millimetres | | Inches | |
|-----------|-------------|-----------|--------|-----------|
| | Value | Tolerance | Value | Tolerance |
| A | 25 | ±1 | 1.0 | ±0.04 |
| B | 40 | max | 1.6 | max |
| C | 115 | min | 4.5 | min |
| G | 14 | ±1 | 0.56 | ±0.04 |
| H | 25 | ±2 | 1.0 | ±0.08 |
| L | 33 | ±2 | 1.31 | ±0.08 |
| Z | 13 | ±1 | 0.5 | ±0.04 |

รูปที่ 3.5 หัวตัดรูปดัมเบลล์ชนิด C สำหรับทดสอบด้านความทนแรงดึง [33]

3.8.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาด

ขั้นตอนทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาดของฟิล์ม มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D 624 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้เครื่องทดสอบเดียวกันกับการทดสอบความทนแรงดึง ภายใต้ load cell ขนาด 500 นิวตัน อัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที และมีระยะ gauge length บนขั้นตอนทดสอบเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และรายงานผลของค่าความทนแรงฉีกขาด (tear strength)



| Dimension | Millimetres | | Inches | |
|-----------|-------------|-----------|--------|-----------|
| | Value | Tolerance | Value | Tolerance |
| A | 102 | ±0.50 | 4.0 | ±0.02 |
| B | 19 | ±0.05 | 0.75 | ±0.002 |
| C | 19 | ±0.05 | 0.75 | ±0.002 |
| D | 12.7 | ±0.05 | 0.5 | ±0.002 |
| E | 25 | ±0.05 | 1.0 | ±0.002 |
| F | 27 | ±0.05 | 1.061 | ±0.002 |
| G | 28 | ±0.05 | 1.118 | ±0.002 |
| H | 51 | ±0.25 | 2.0 | ±0.01 |

รูปที่ 3.6 หัวตัดชนิด C สำหรับทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาด [34]

3.8.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA เพื่อหาเสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์ม กระทำโดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักประมาณ 15 มิลลิกรัม ใส่ในที่ใส่ตัวอย่างซึ่งทำจากแพลตินัม ตั้งภาวะทดสอบโดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้อัตราให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที จนถึง 750 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

3.8.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC เพื่อหา T_g ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม กระทำโดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในภาชนะอะลูมิเนียมซึ่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วปิดผนึก ซึ่งใช้อากาศเป็นสารอ้างอิง โดยให้ภาวะของการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ -100 ถึง 150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที การทดสอบกระทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

3.9 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเครื่อง OM

การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมกระทำโดยนำแผ่นฟิล์มไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) ที่กำลังขยาย 160 เท่า เพื่อดูการกระจายของพอลิสไตรีนในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

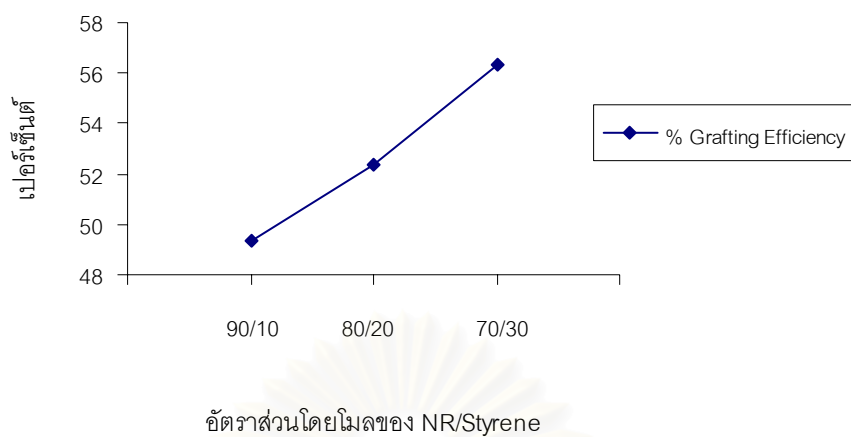
4.1.1 การหาเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

ผลของการหาเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1-4.2

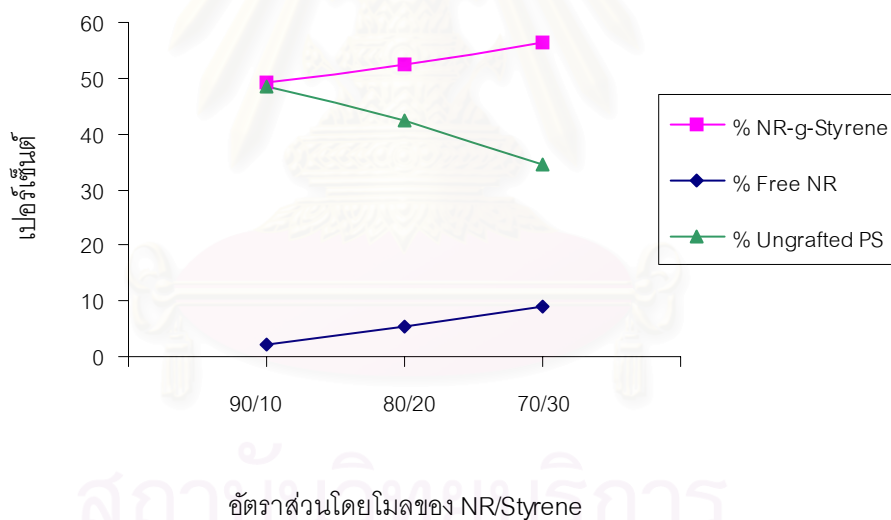
ตารางที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/สไตรีนมอนอเมอร์ต่อปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไอเซชัน

| ผลของปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไอเซชัน | ยางธรรมชาติ/สไตรีน (% โมล) | | |
|--|----------------------------|-------|-------|
| | 90/10 | 80/20 | 70/30 |
| ประสิทธิภาพการกราฟต์ (%) | 49.33 | 52.33 | 56.33 |
| สมบัติการกราฟต์ | | | |
| - ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน (%) | 49.33 | 52.33 | 56.33 |
| - ยางธรรมชาติที่ไม่ถูกกราฟต์ (%) | 2.00 | 5.34 | 9.00 |
| - พอลิสไตรีนที่ไม่กราฟต์ (%) | 48.67 | 42.33 | 34.67 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/สไตรีนมอนอเมอร์ ต่อเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์



รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ/สไตรีนต่อเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติ กราฟต์สไตรีน เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ไม่ถูกกราฟต์ และเปอร์เซ็นต์ของ พอลิสไตรีนที่ไม่ได้กราฟต์กับยางธรรมชาติ

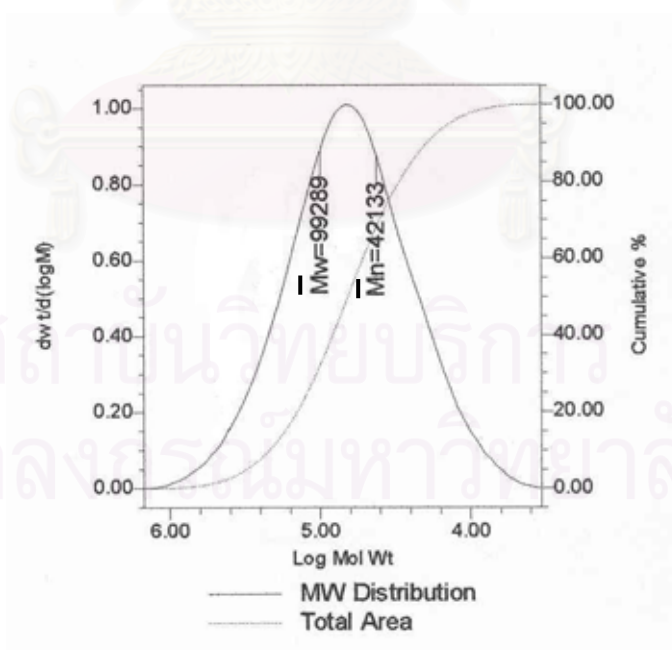
ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณสไตรีนในน้ำยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการกราฟต์สไตรีนบนยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีคำนวณและข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก ก และ ข ตามลำดับ นอกจากนี้ ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ยังได้แสดงสมบัติของการกราฟต์โดยบอกเปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ถูกกราฟต์ด้วยสไตรีน เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ไม่ถูกกราฟต์ และเปอร์เซ็นต์ของพอลิสไตรีนที่เกิดขึ้นแต่ไม่ได้เข้าไปกราฟต์กับยางธรรมชาติ

4.1.2 การหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ

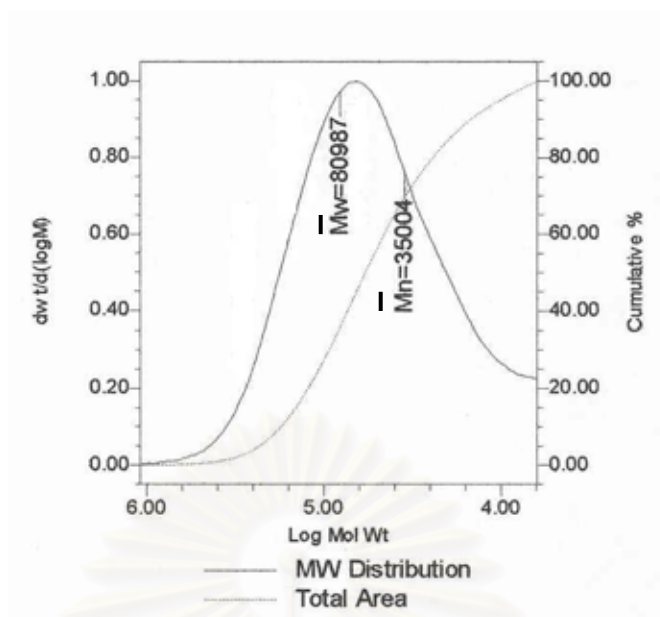
ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติด้วยเครื่อง GPC แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3-4.5

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ

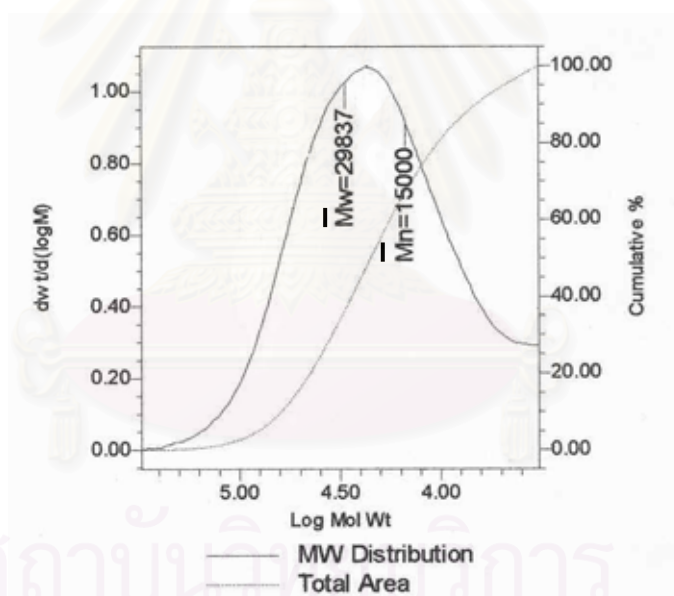
| ยางธรรมชาติ/สไตรีน (% โมล) | \bar{M}_n | \bar{M}_w | Polydispersity Index |
|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| 90 : 10 | 4.2×10^4 | 9.9×10^4 | 2.4 |
| 80 : 20 | 3.5×10^4 | 8.1×10^4 | 2.3 |
| 70 : 30 | 1.5×10^4 | 3.0×10^4 | 2.0 |



รูปที่ 4.3 GPC โครมาโทแกรมของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ ซึ่งใช้ยางธรรมชาติ/สไตรีน 90 : 10



รูปที่ 4.4 GPC โคจรมาโทแกรมของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ
ซึ่งใช้ยางธรรมชาติ/สไตรีน 80 : 20

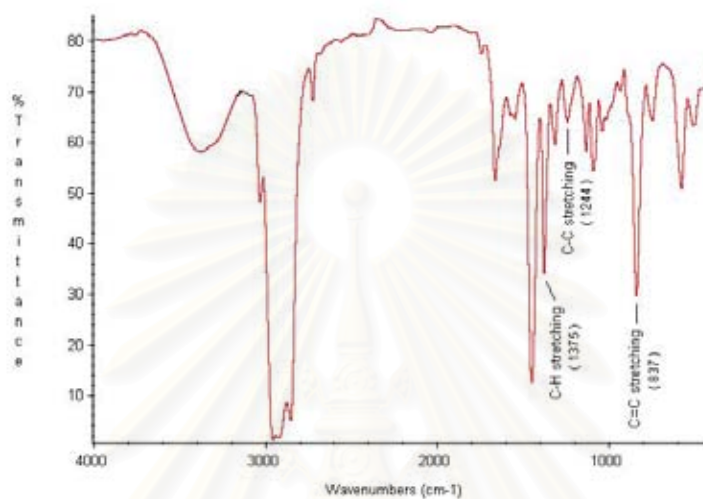


รูปที่ 4.5 GPC โคจรมาโทแกรมของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนยางธรรมชาติ
ซึ่งใช้ยางธรรมชาติ/สไตรีน 70 : 30

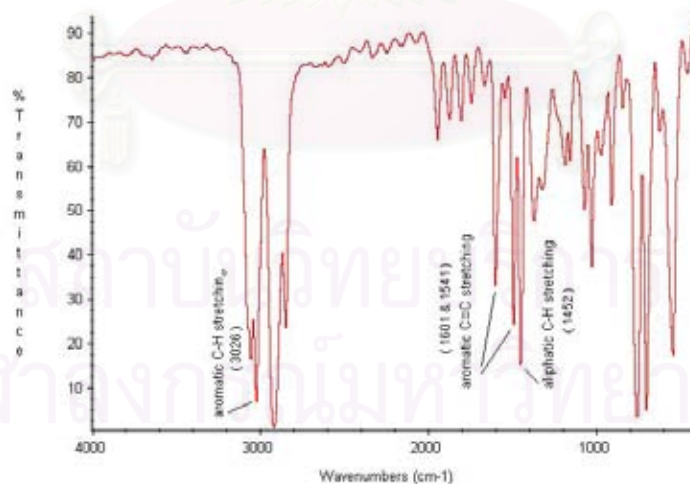
ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3-4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ในน้ำยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง แต่จากตารางที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพของการกราฟต์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีพอลิสไตรีนกราฟต์บนยางธรรมชาติมากหากแต่เป็นในลักษณะของสายโซ่สั้นๆ

4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

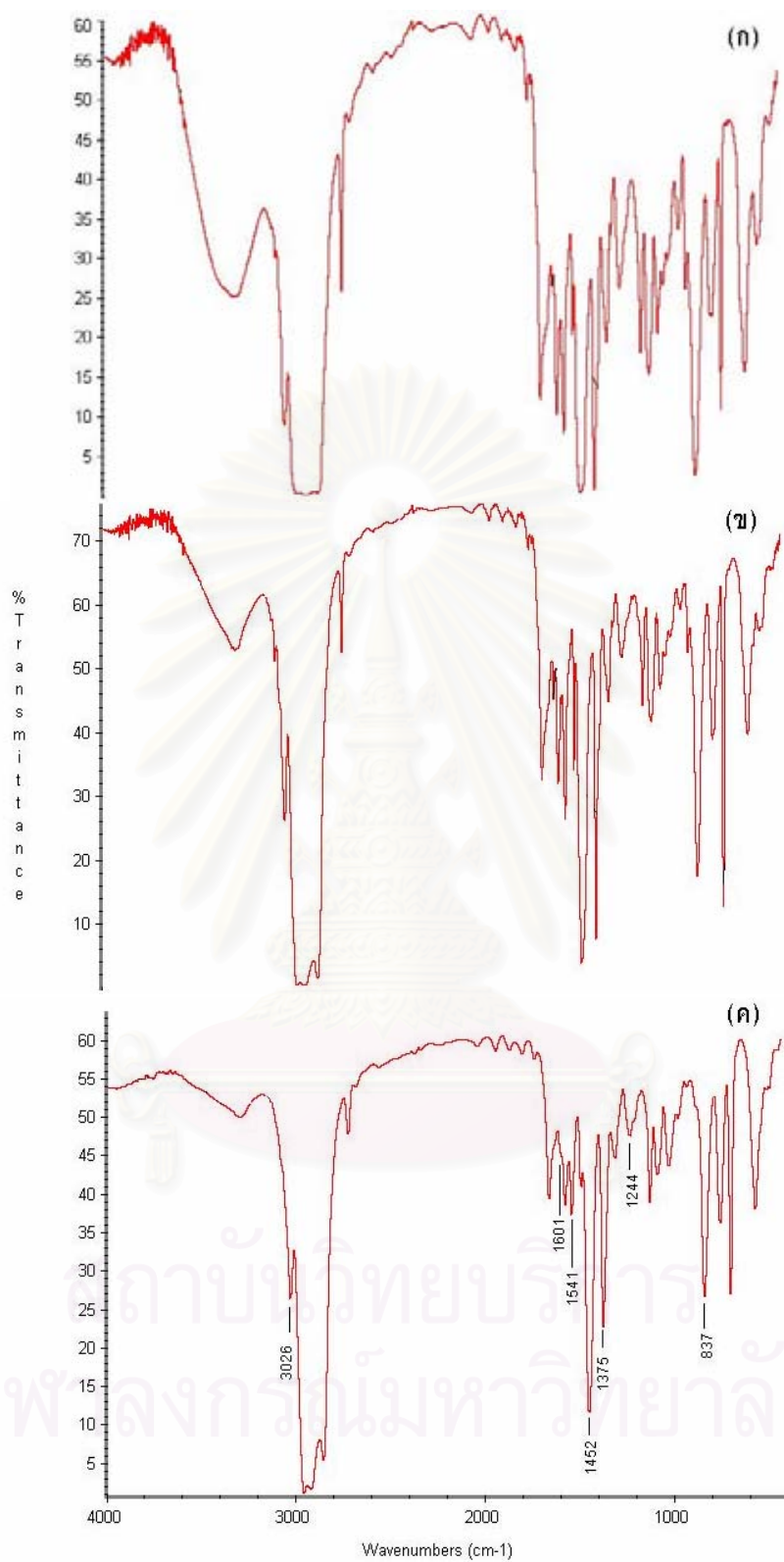
รูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนด้วยเทคนิค FT-IR ตามลำดับ และรูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน



รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของพอลิสไตรีน



รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของ (ก) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 90 : 10 %โมล)
 (ข) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 80 : 20 %โมล)
 และ (ค) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 70 : 30 %โมล)

จาก FT-IR สเปกตรัมในรูปที่ 4.6 พบว่าโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติประกอบไปด้วยพันธะของคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเห็นได้จาก C=C stretching ที่ตำแหน่งพีก 837 cm^{-1} และ C-C stretching ที่ตำแหน่งพีก 1244 cm^{-1} นอกจากนี้ ยังมีพันธะของคาร์บอน-ไฮโดรเจน ซึ่งเห็นได้จาก C-H stretching ที่ตำแหน่งพีก 1375 cm^{-1} และรูปที่ 4.7 แสดง FT-IR สเปกตรัมของพอลิस्टาไร์น โดยมีโครงสร้างที่เด่นชัดของวงแหวนเบนซีน ซึ่งประกอบด้วย aromatic C-H stretching ที่ตำแหน่งพีก 3026 cm^{-1} และ aromatic C=C stretching ที่ตำแหน่ง 1601 cm^{-1} และ 1541 cm^{-1} นอกจากนี้ ยังแสดง aliphatic C-H stretching ที่ตำแหน่งพีก 1452 cm^{-1} อีกด้วย

การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างโมเลกุลยางธรรมชาติกับสไตรีนมอนอเมอร์สามารถพิสูจน์ได้จาก FT-IR สเปกตรัมในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงสเปกตรัมของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ต่างๆ กัน พบว่าในแต่ละสเปกตรัมแสดงตำแหน่งพีกที่สำคัญของทั้งยางธรรมชาติและพอลิस्टาไร์น ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการกราฟต์พอลิस्टาไร์นบนโมเลกุลยางธรรมชาติ

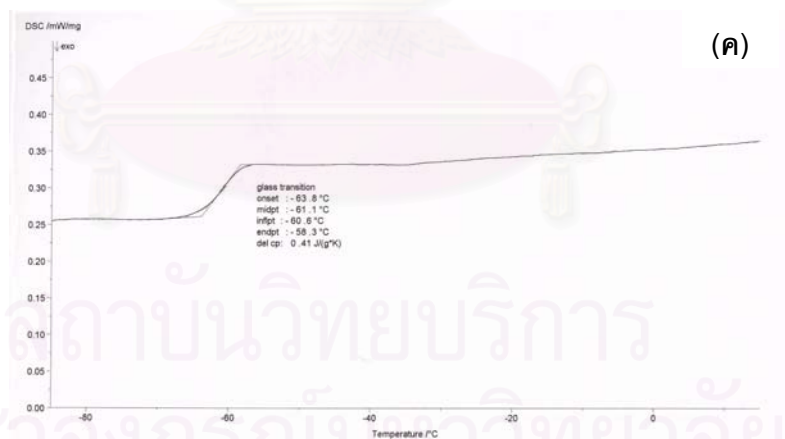
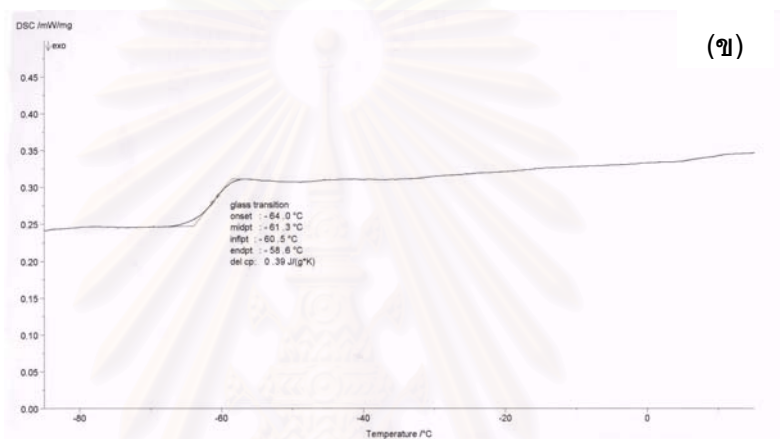
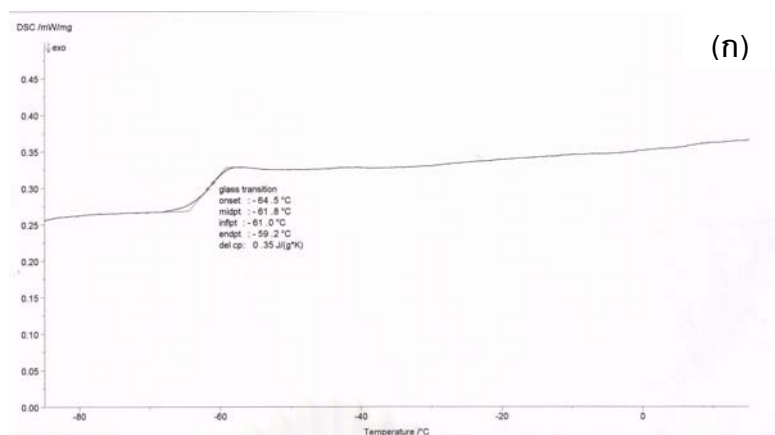
4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนด้วยเครื่อง DSC

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

| อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน | น้ำยางธรรมชาติ/สไตรีน (%โมล) | | |
|---|------------------------------|-------|-------|
| | 90/10 | 80/20 | 70/30 |
| Onset temperature ($^{\circ}\text{C}$) | -64.5 | -64.0 | -63.8 |
| Midpoint temperature ($^{\circ}\text{C}$) | -61.8 | -61.3 | -61.1 |
| Inflection point temperature ($^{\circ}\text{C}$) | -61.0 | -60.5 | -60.6 |

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นพีกของอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) เพียงพีกเดียว โดยเมื่ออัตราส่วนของสไตรีนมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น ค่า T_g ของยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.9 DSC Thermogram ของ (ก) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 90 : 10 %โมล)

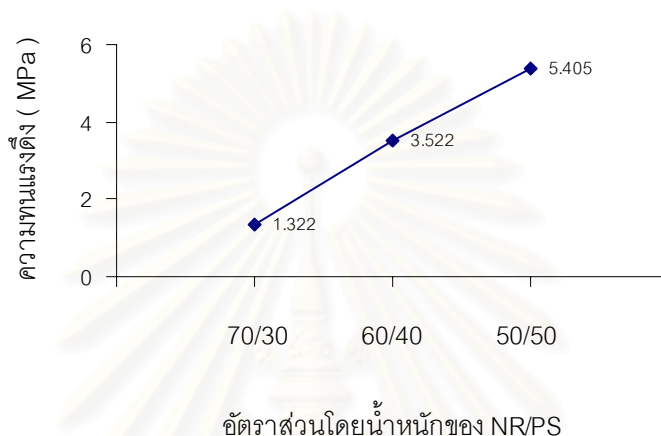
(ข) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 80 : 20 %โมล)

และ (ค) NR-g-Styrene (NR : Styrene = 70 : 30 %โมล)

4.2 ผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

4.2.1 ความทนแรงดึง

รูปที่ 4.10 แสดงผลค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนต่างๆ กัน โดยไม่ใส่สารช่วยผสม

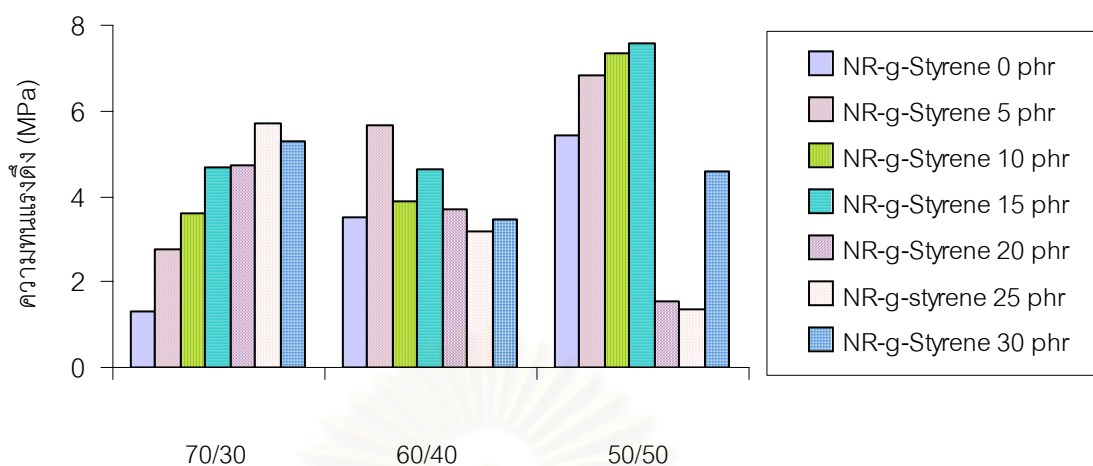


รูปที่ 4.10 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อปริมาณพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น

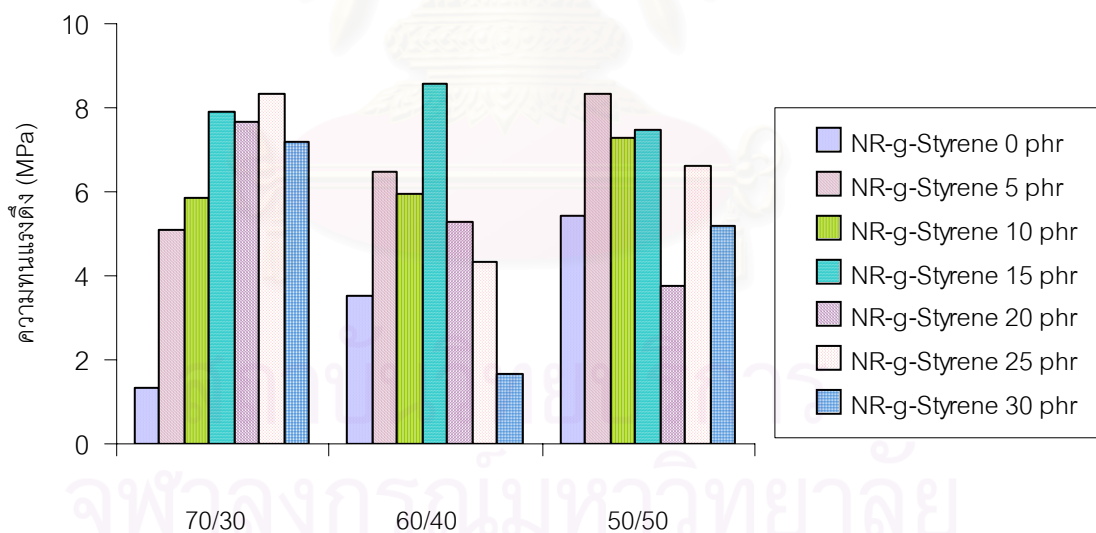
รูปที่ 4.11-4.13 แสดงกราฟค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม (ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน) ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณต่างๆ กัน

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



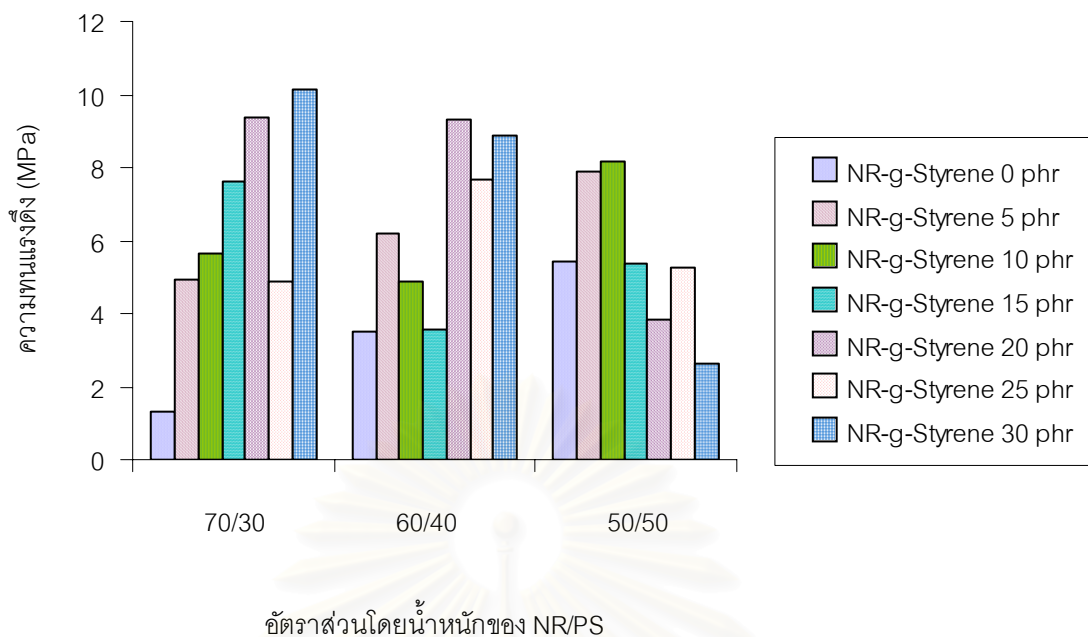
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ NR/PS

รูปที่ 4.11 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 (ยางธรรมชาติ/สไตรีน = 90/10 %โมล)



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ NR/PS

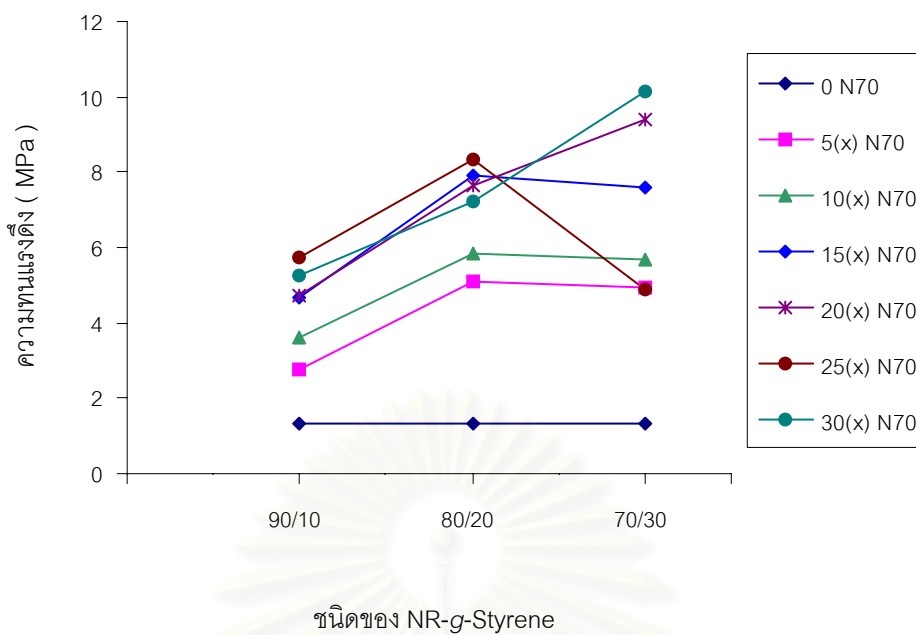
รูปที่ 4.12 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 (ยางธรรมชาติ/สไตรีน = 80/20 %โมล)



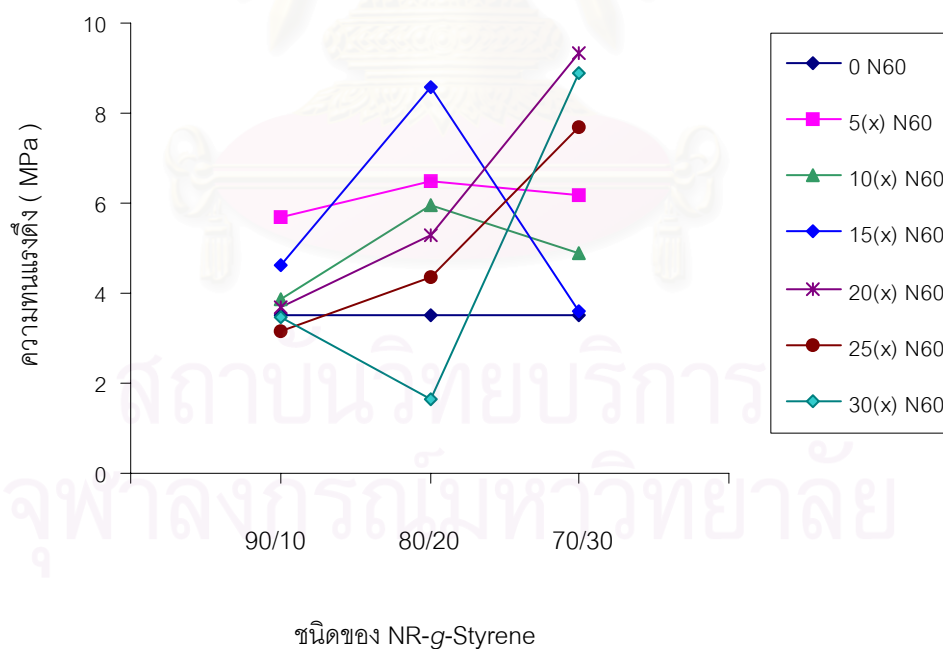
รูปที่ 4.13 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30 (ยางธรรมชาติ/สไตรีน = 70/30 %โมล)

จากรูปที่ 4.11-4.13 แสดงให้เห็นว่าการใส่สารช่วยผสม (ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน) เข้าไปในระบบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน มีผลทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น แต่การใส่สารช่วยผสมในปริมาณที่สูงขึ้นอาจทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในสารช่วยผสมมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ดังนั้น การใช้โพลูอินเป็นตัวทำละลายซึ่งมีค่าพารามิเตอร์การละลายต่างจากน้ำค่อนข้างมาก ทำให้ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันหรือเกิดการแยกเฟส และภายหลังจากการระเหยของตัวทำละลายและน้ำจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงลดลง

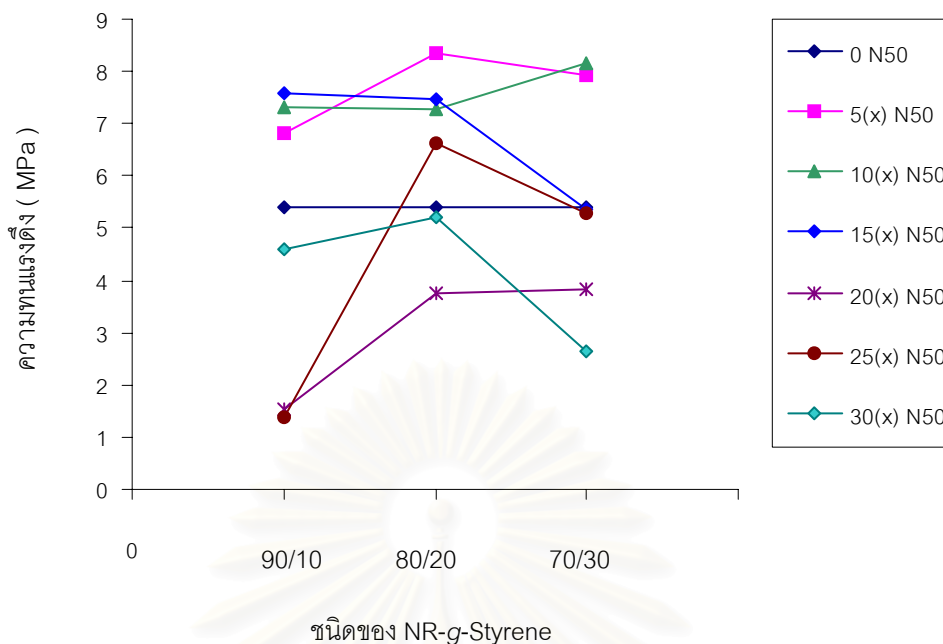
รูปที่ 4.14-4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมกับชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม



รูปที่ 4.14 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) โดยใช้สารช่วยผสมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน



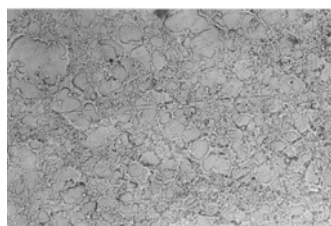
รูปที่ 4.15 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) โดยใช้สารช่วยผสมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน



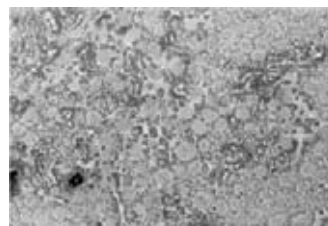
รูปที่ 4.16 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) โดยใช้สารช่วยผสมชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

จากกราฟในรูปที่ 4.14-4.16 แสดงให้เห็นว่าการใส่สารช่วยผสมต่างชนิดกัน มีผลทำให้สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนเดียวกันแตกต่างกัน โดยจากการตรวจสอบหาค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม 3 ชนิด คือ NR-g-Styrene 90/10 NR-g-Styrene 80/20 และ NR-g-Styrene 70/30 พบว่า ฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 โดยส่วนใหญ่มีค่าความทนแรงดึงมากที่สุด

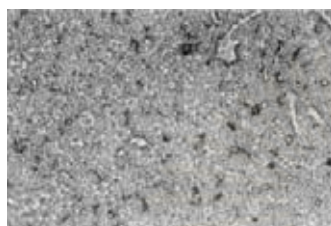
รูปที่ 4.17-4.25 แสดงลักษณะฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน และใส่สารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 0 5 15 และ 25 phr ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง optical microscope (OM)



(ก)



(ข)



(ค)

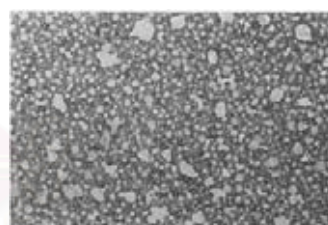


(ง)

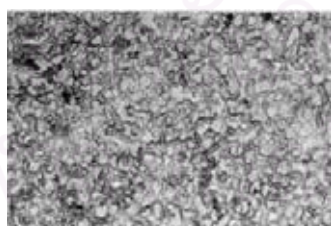
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



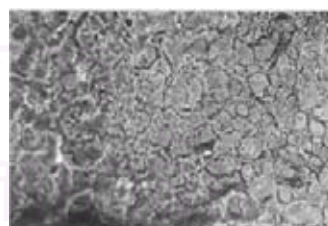
(ก)



(ข)

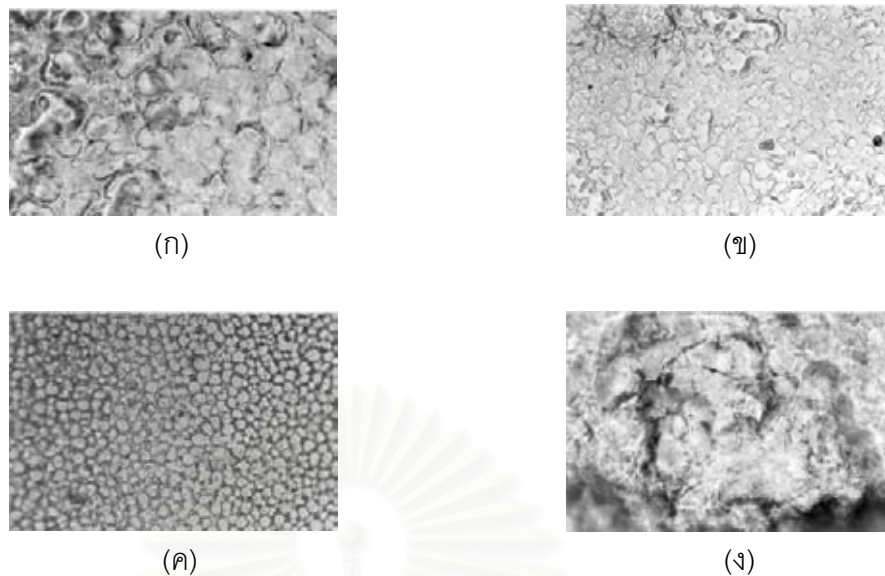


(ค)

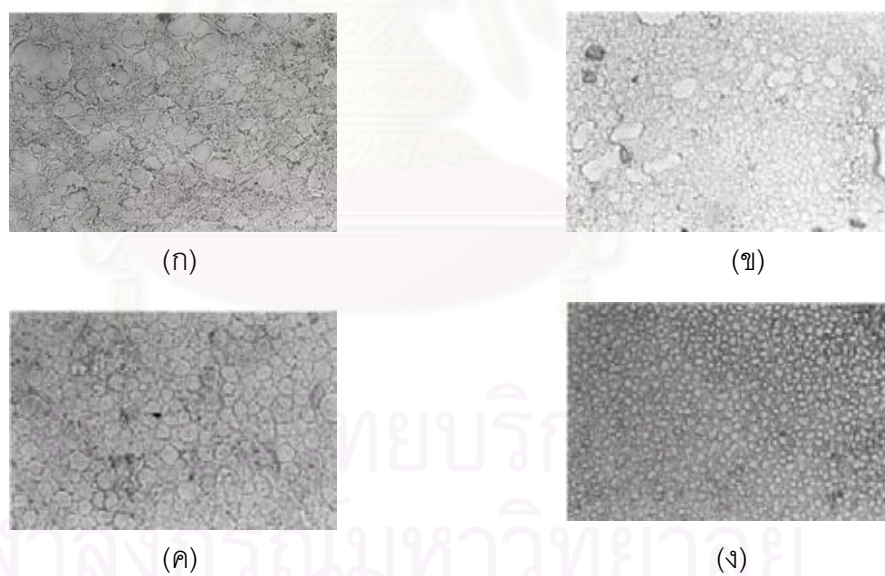


(ง)

รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



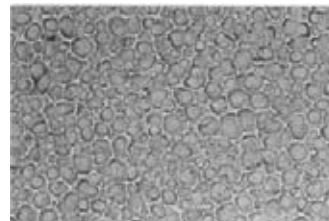
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



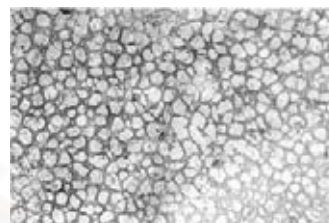
(ก)



(ข)



(ค)

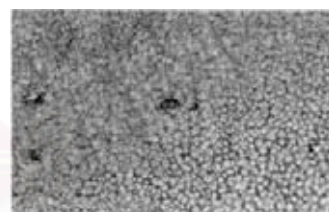


(ง)

รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



(ก)



(ข)

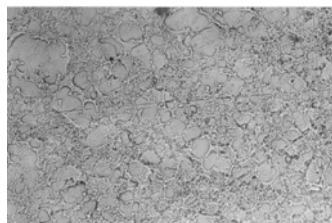


(ค)

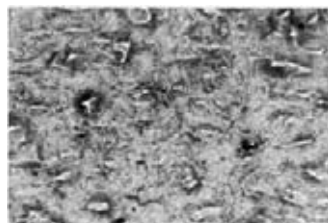


(ง)

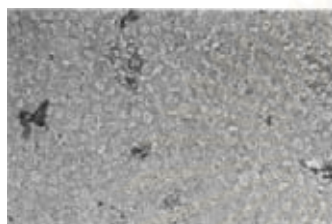
รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

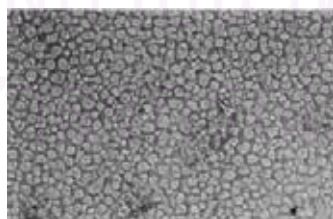
รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 70/30) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



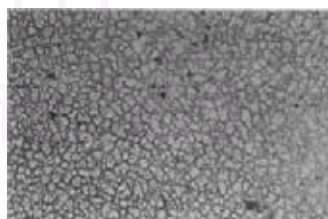
(ก)



(ข)

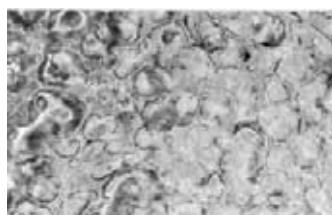


(ค)

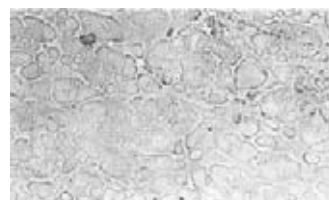


(ง)

รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 60/40) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า



(ก)



(ข)



(ค)



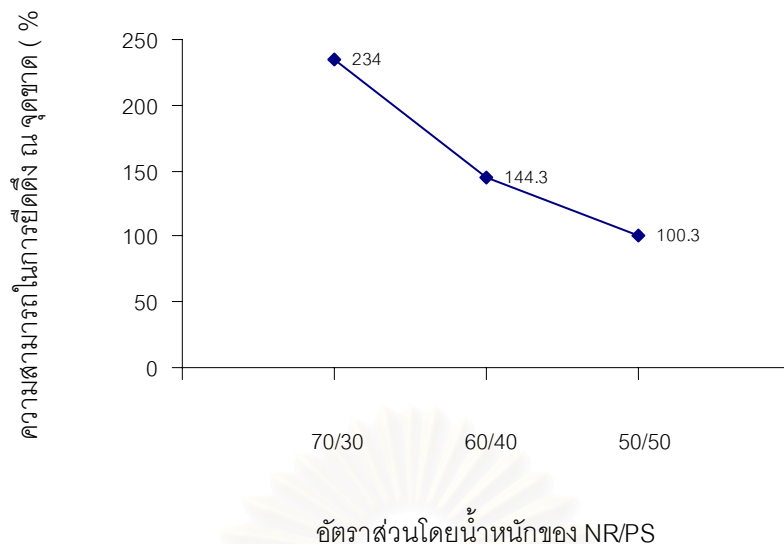
(ง)

รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีน = 50/50) ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OM กำลังขยาย 160 เท่า

จากรูปที่ 4.17–4.25 พบว่าเมื่อไม่ได้ใส่สารช่วยผสมเข้าไปในระบบ ขนาดอนุภาคของพอลิสไตรีนซึ่งเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) มีขนาดใหญ่กว่าที่ใส่สารช่วยผสม และให้ผลสอดคล้องกับค่าความทนแรงดึง กล่าวคือ ขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะมีความทนแรงดึงสูง เนื่องจากสามารถเข้าร่วมตัวกันได้ดี

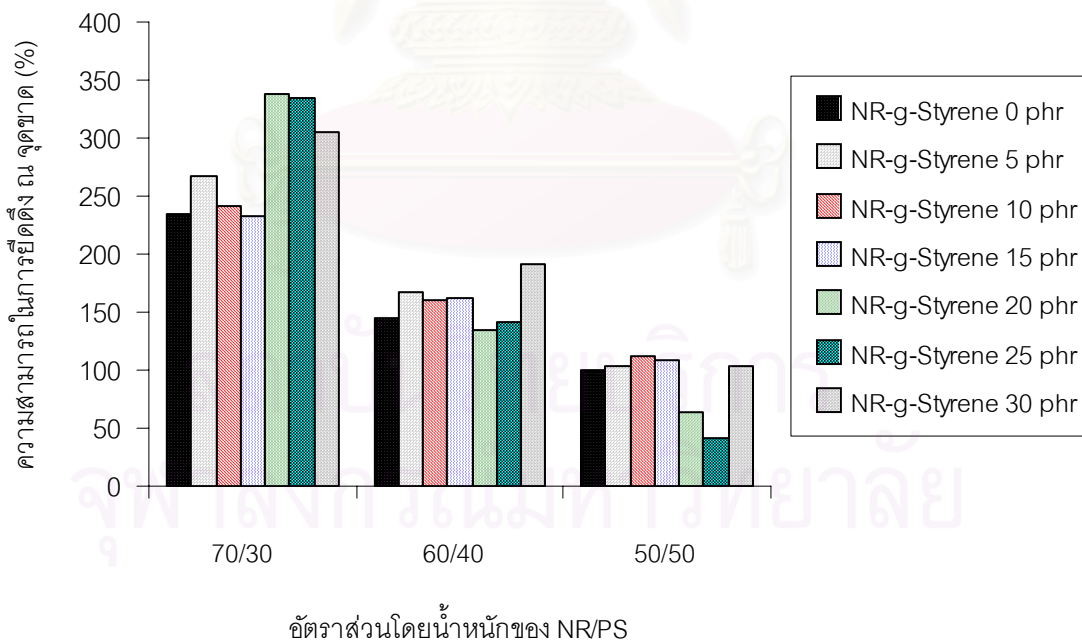
4.2.2 เปรอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด

รูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนลดลงเมื่อปริมาณพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะพอลิสไตรีนเป็นวัสดุที่แข็งและเปราะ จึงทำให้ความสามารถในการยึดตัวลดลง

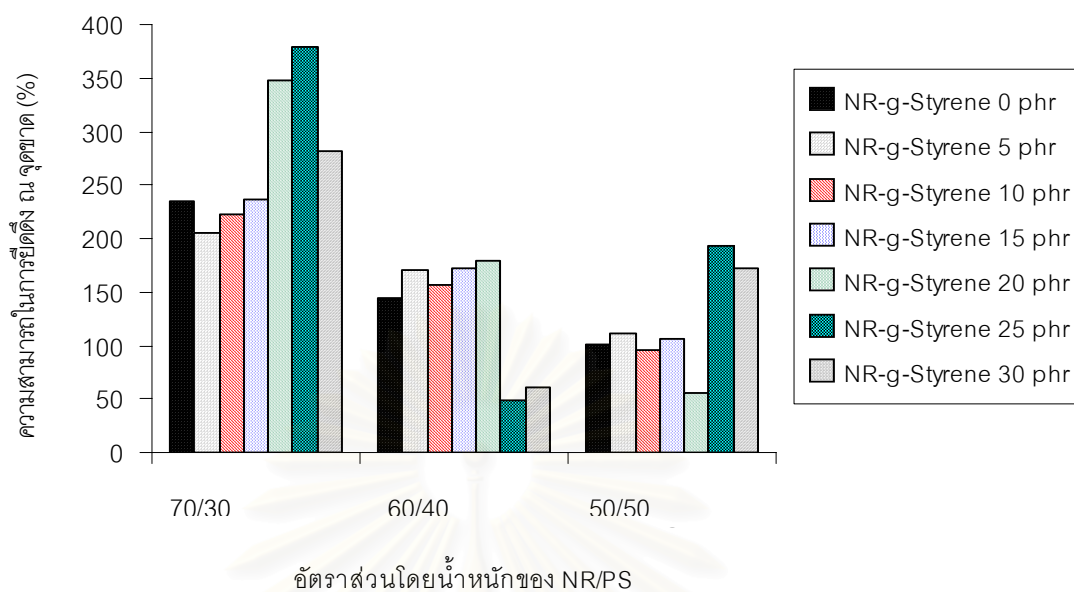


รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม

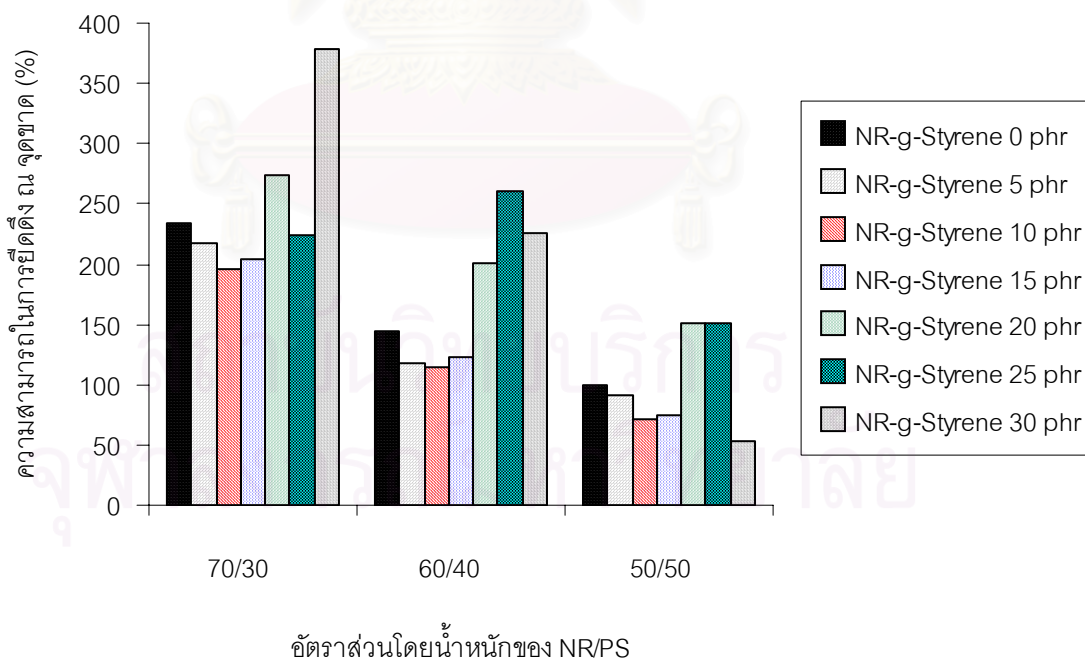
รูปที่ 4.27-4.29 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม (ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน) ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10



รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20

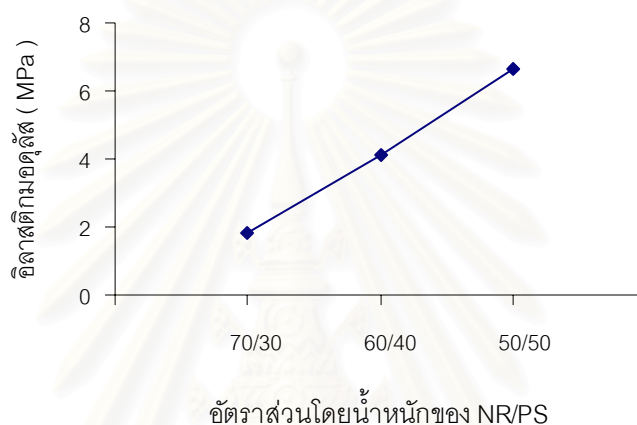


รูปที่ 4.29 เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30

จากรูปที่ 4.27–4.29 พบว่าสารช่วยผสมทั้ง 3 ชนิด ช่วยให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้านการยึดตัว ณ จุดขาด ดีขึ้น โดยเปรียบเทียบกับเมื่อไม่ได้ใส่สารช่วยผสม

4.2.3 อีลาสติคโมดูลัส

รูปที่ 4.30 แสดงกราฟค่าอีลาสติคโมดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม

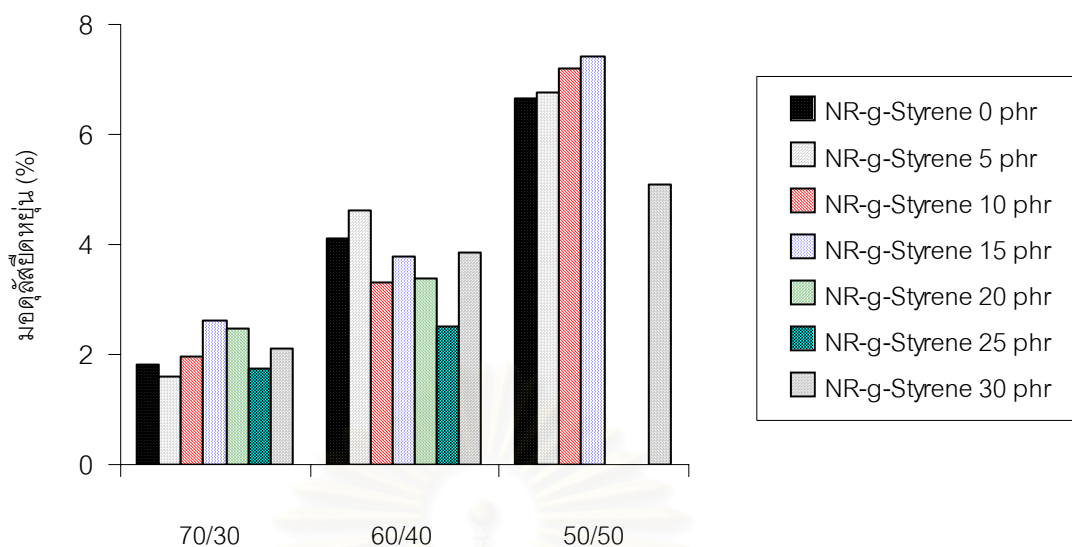


รูปที่ 4.30 ค่าอีลาสติคโมดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม

จากรูปที่ 4.30 พบว่า เมื่อปริมาณของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ค่าอีลาสติคโมดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งและเปราะ

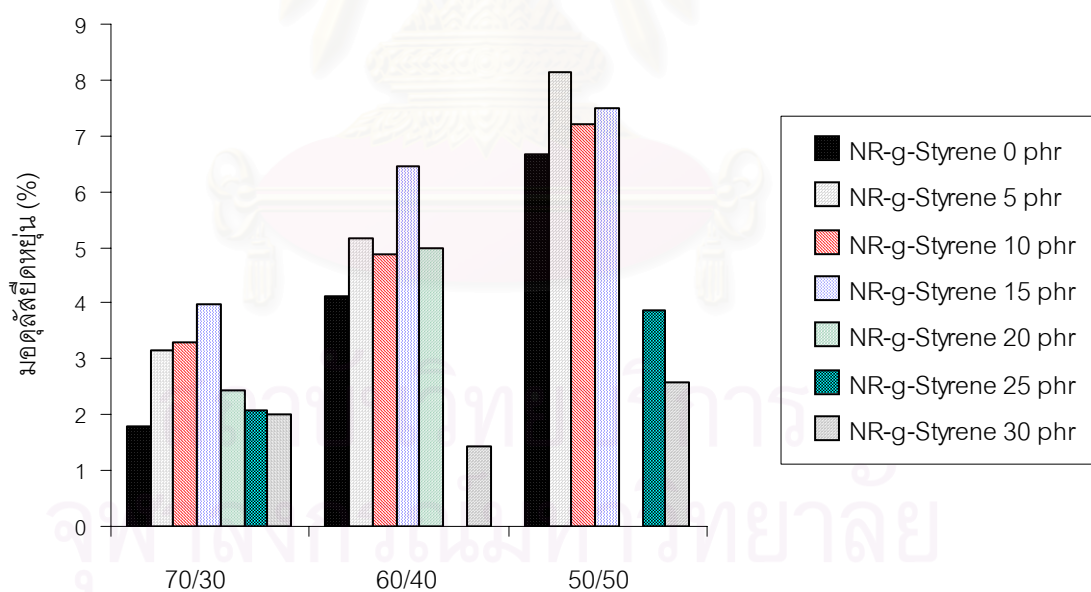
รูปที่ 4.31-4.33 แสดงกราฟค่าอีลาสติคโมดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม (ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน) ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



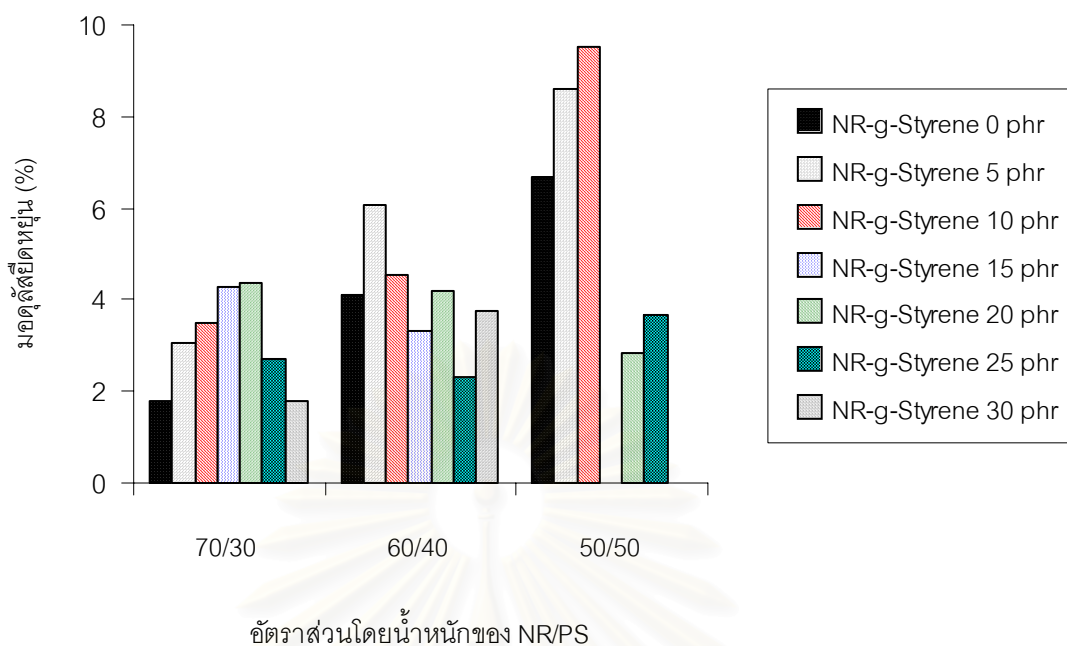
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ NR/PS

รูปที่ 4.31 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ NR/PS

รูปที่ 4.32 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20

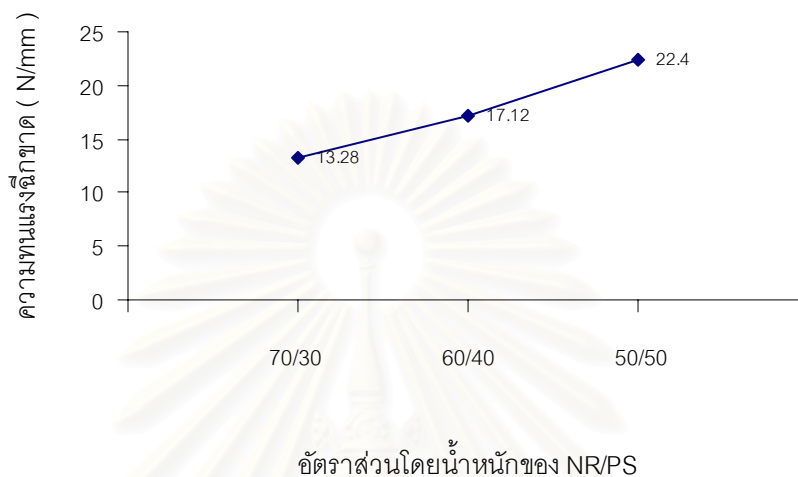


รูปที่ 4.33 ค่าอิลาสติคมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30

จากรูปที่ 4.31-4.33 จะให้ผลคล้ายกับค่าความทนแรงดึง กล่าวคือ การใส่สารช่วยผสมเข้าไปในระบบพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนมีผลทำให้ค่าอิลาสติคมอดุลัสที่ความเครียด 100 % ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น แต่การใส่สารช่วยผสมในปริมาณที่สูงขึ้นอาจทำให้ค่าอิลาสติคมอดุลัสของฟิล์มลดลงเหมือนกับค่าความทนแรงดึงตามที่ได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อสังเกตจากกราฟ พบว่า พอลิเมอร์ผสมบางสูตรมีความเครียดไม่ถึง 100 % จึงไม่แสดงค่าอิลาสติคมอดุลัสที่ความเครียด 100% ซึ่งส่วนใหญ่พบในพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิสไตรีนเป็นจำนวนมาก เช่น อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อพอลิสไตรีนเท่ากับ 50/50 เป็นต้น

4.3 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

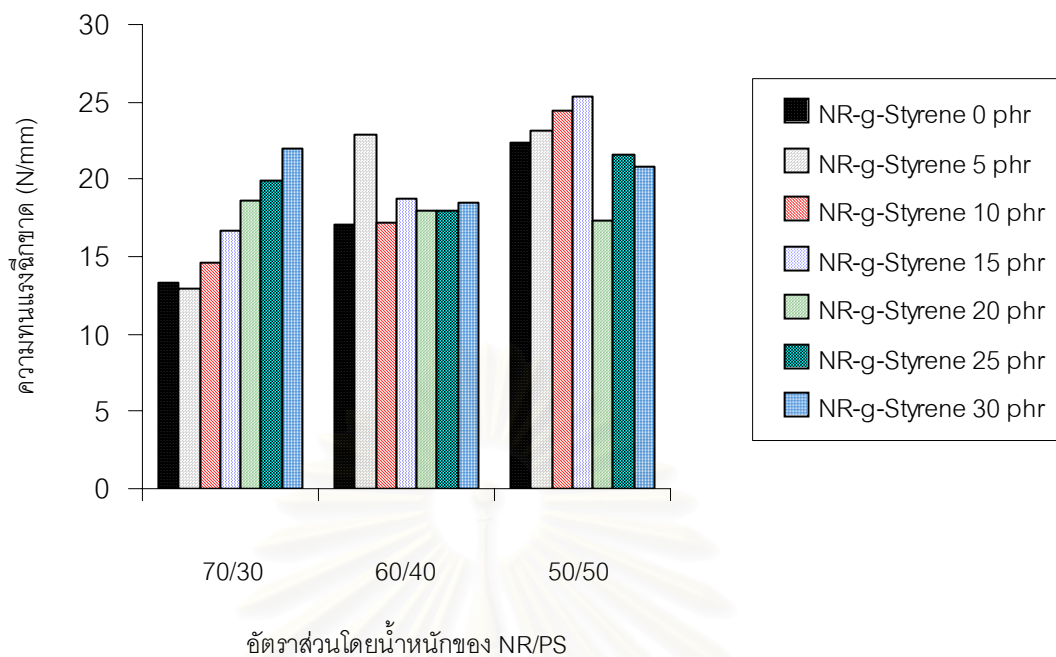
รูปที่ 4.34 แสดงค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนต่างๆ กัน โดยไม่ใส่สารช่วยผสม



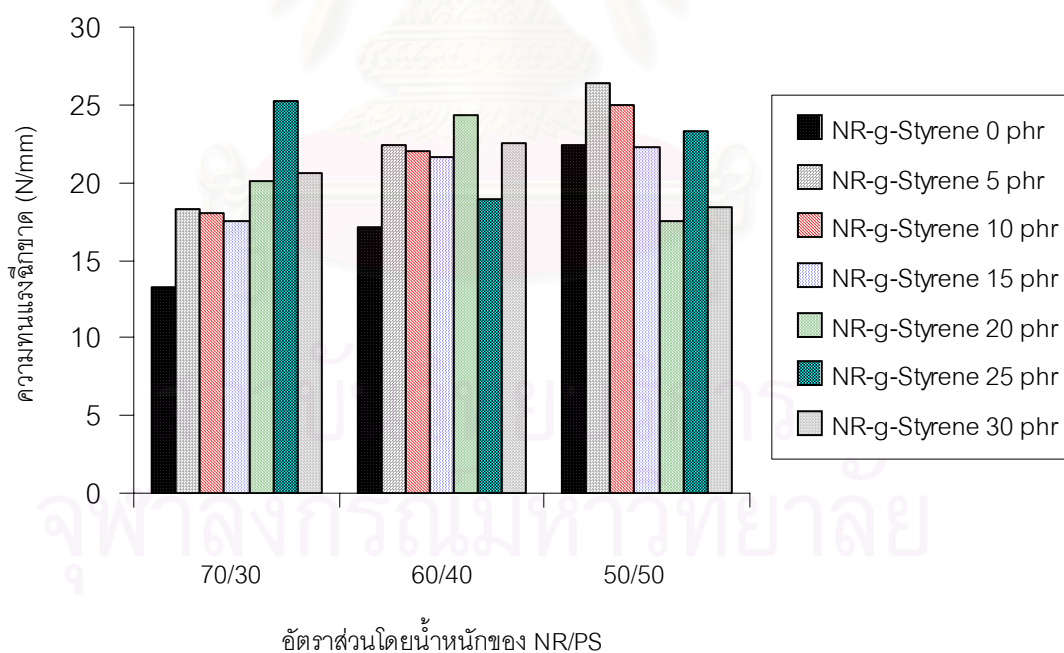
รูปที่ 4.34 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนต่างๆ โดยไม่ได้ใส่สารช่วยผสม

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.34 พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับค่าความทนแรงดึงและค่าอิลาสติคโมดูลัส ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

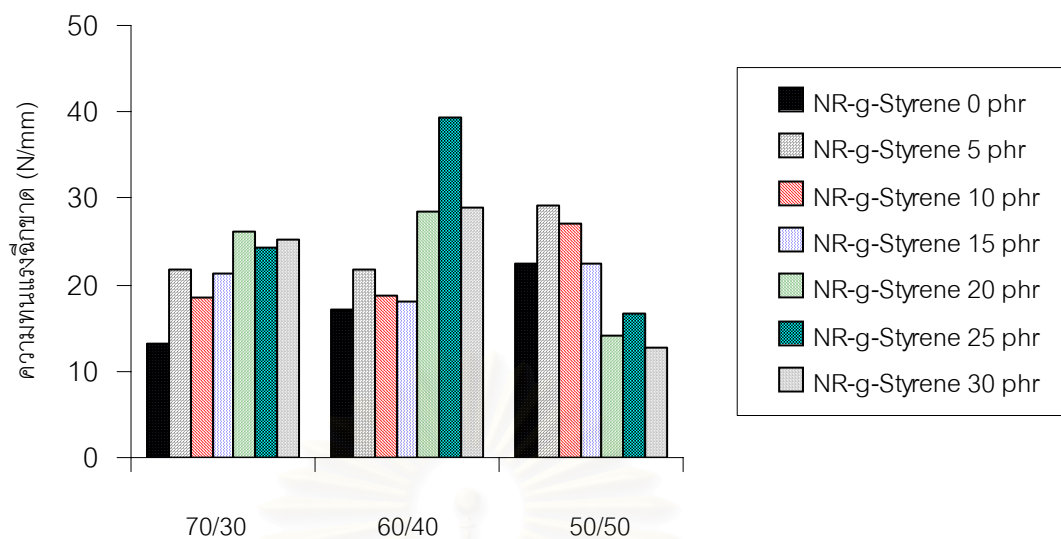
สำหรับการใส่สารช่วยผสมที่เป็นยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน มีผลทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.35–4.37



รูปที่ 4.35 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10



รูปที่ 4.36 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20



อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ NR/PS

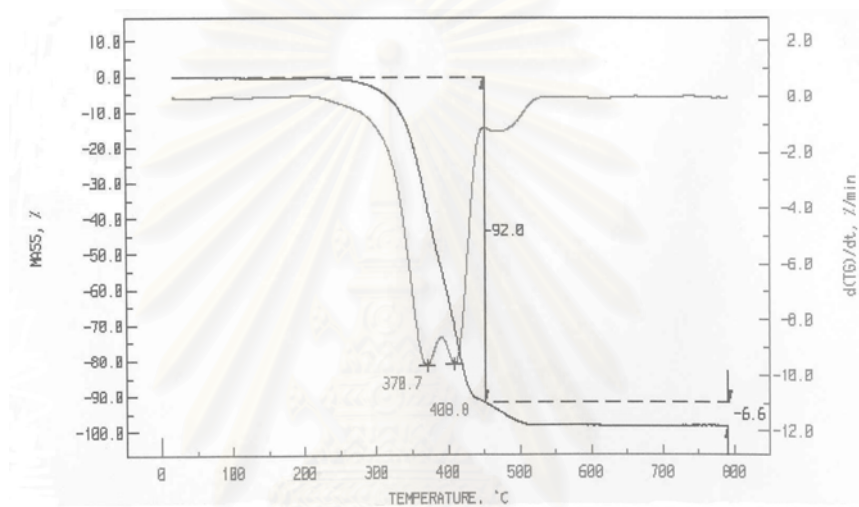
รูปที่ 4.37 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

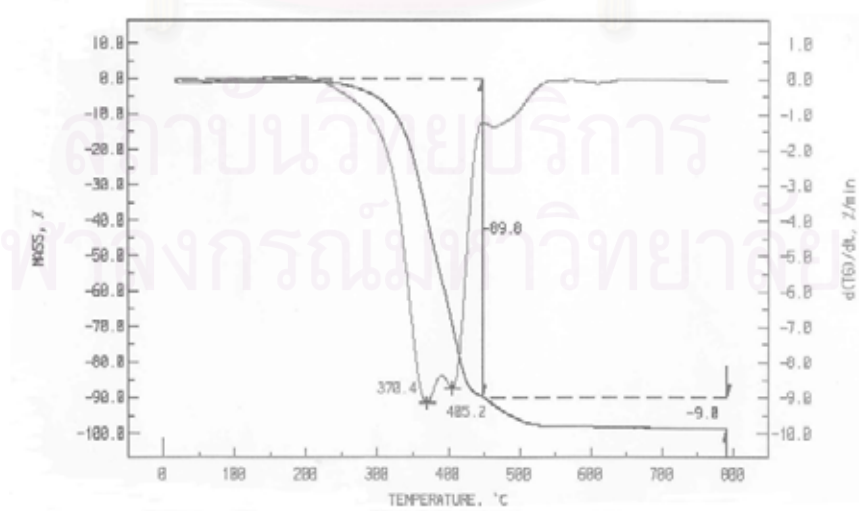
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

4.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA

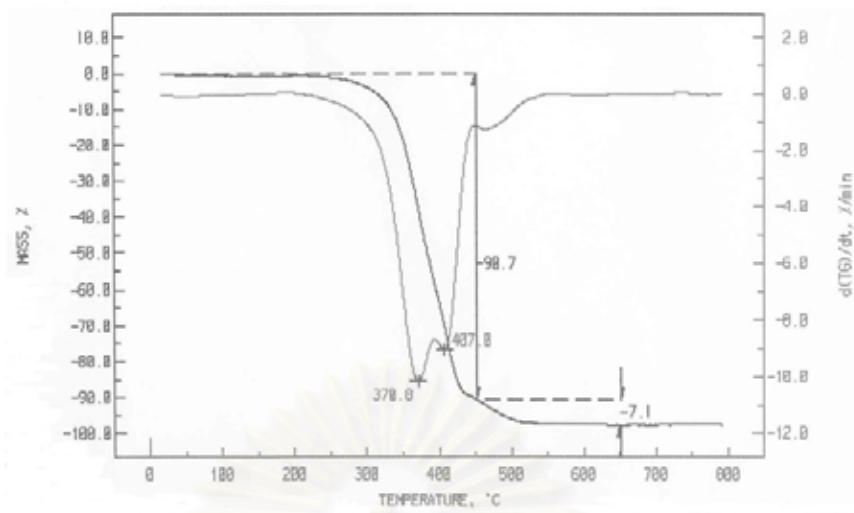
รูปที่ 4.38-4.41 แสดง TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนในอัตราส่วน 70/30 ทั้งที่ใส่และไม่ได้ใส่สารช่วยผสม และตารางที่ 4.4 แสดงค่าแต่ละพีกของ DTG เทอร์โมแกรม ซึ่งเป็นค่าที่แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



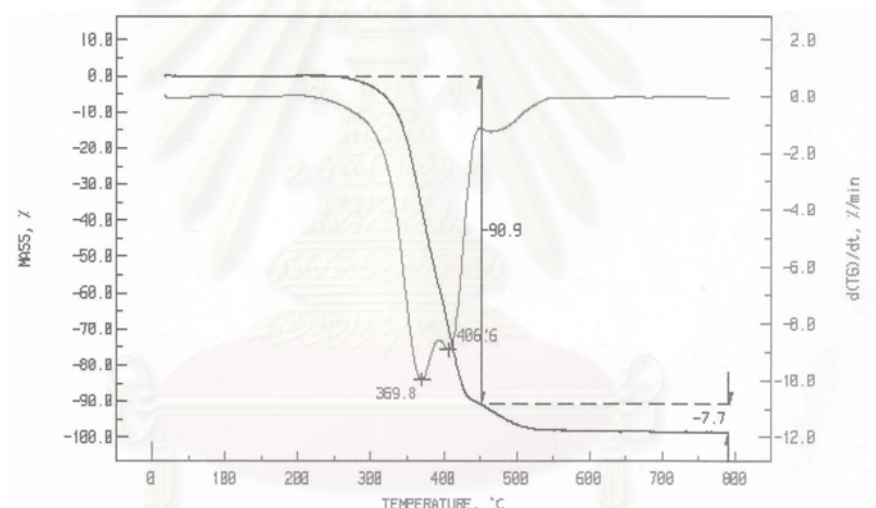
รูปที่ 4.38 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ON₇₀



รูปที่ 4.39 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 5_(80/20)N₇₀



รูปที่ 4.40 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม $15_{(80/20)}N_{70}$



รูปที่ 4.41 TG และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม $25_{(80/20)}N_{70}$

ตารางที่ 4.4 ค่าแต่ละพีกของ DTG เทอร์โมแกรม

| สูตร | พีกที่ 1 (°C) | พีกที่ 2 (°C) |
|----------------------|---------------|---------------|
| $0N_{70}$ | 370.7 | 408.8 |
| $5_{(80/20)}N_{70}$ | 370.4 | 405.2 |
| $15_{(80/20)}N_{70}$ | 370.8 | 407.0 |
| $25_{(80/20)}N_{70}$ | 369.8 | 406.6 |

ตารางที่ 4.4 เป็นค่าแต่ละพีคของ DTG เทอร์โมแกรม ซึ่งมี 2 พีค โดยพีคแรกแสดงค่าประมาณ 370°C แสดงถึงการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติและพีคที่สองอยู่ที่ประมาณ 400°C แสดงถึงการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไสไตรีน

จาก TG เทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.38-4.41 สามารถหาอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ผสมเริ่มต้นและสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อน ซึ่งค่าที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 พบว่า กรณีที่ไม่ได้ใส่สารช่วยผสม พิล์มพอลิเมอร์ผสมจะเริ่มสลายตัวทางความร้อนที่ 330.7°C แต่เมื่อใส่สารช่วยผสมจะทำให้ฟิล์มส่วนใหญ่มีอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัวทางความร้อนเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ส่วนอุณหภูมิที่สิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อนก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ซึ่งถือได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

| สูตร | อุณหภูมิเริ่มสลายตัว($^{\circ}\text{C}$) | อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว($^{\circ}\text{C}$) |
|-----------------------------|--|---|
| ON_{70} | 330.7 | 504.9 |
| $5_{(80/20)}\text{N}_{70}$ | 330.2 | 508.9 |
| $15_{(80/20)}\text{N}_{70}$ | 332.4 | 507.9 |
| $25_{(80/20)}\text{N}_{70}$ | 331.0 | 510.6 |

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าน้ำหนักที่สูญเสียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ 300°C , 400°C และน้ำหนักทั้งหมดที่สูญเสียไป

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักที่สูญเสียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม

| สูตร | น้ำหนักที่สูญเสีย (%) ที่ 300°C | น้ำหนักที่สูญเสีย (%) ที่ 400°C | น้ำหนักทั้งหมดที่สูญเสีย (%) |
|-----------------------------|---|---|------------------------------|
| ON_{70} | 4.2 | 66.4 | 98.6 |
| $5_{(80/20)}\text{N}_{70}$ | 5.3 | 64.9 | 98.8 |
| $15_{(80/20)}\text{N}_{70}$ | 3.8 | 64.8 | 98.4 |
| $25_{(80/20)}\text{N}_{70}$ | 2.9 | 64.0 | 98.6 |

จากตารางที่ 4.6 พบว่า น้ำหนักที่สูญเสียมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากขึ้น

4.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

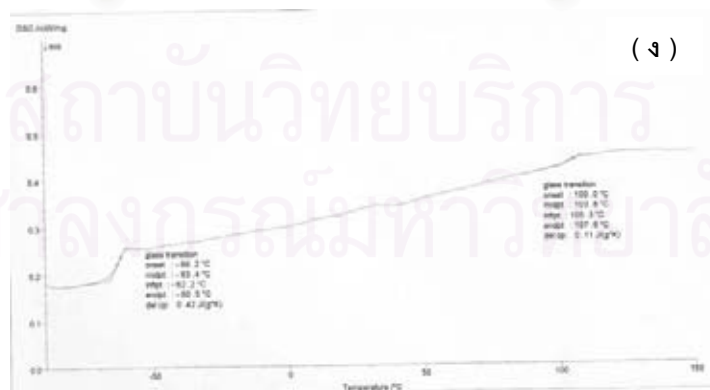
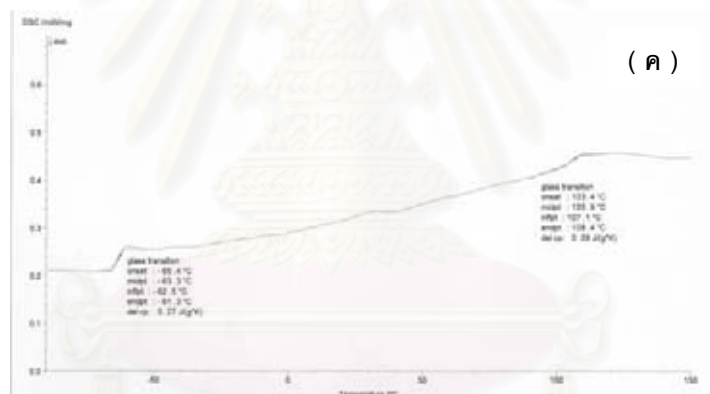
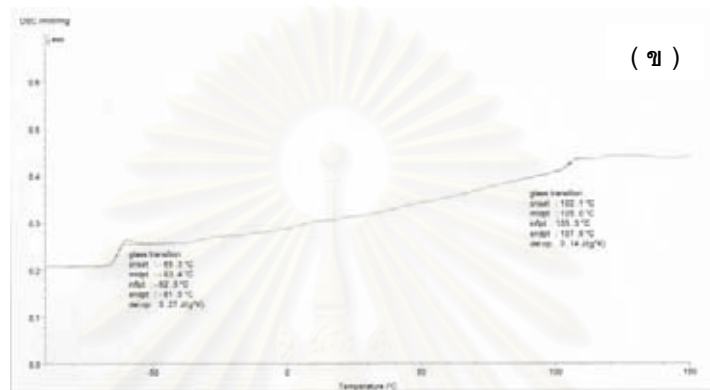
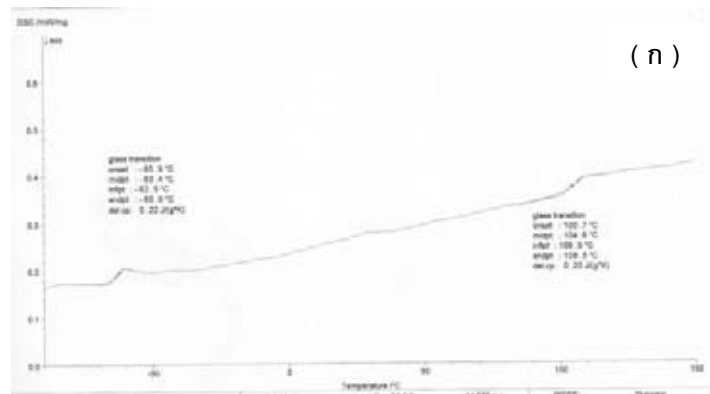
ผลของการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสมด้วยเครื่อง DSC แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.42

ตารางที่ 4.7 ค่า T_g (midpoint) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม

| ตัวอย่าง | ค่า T_g ($^{\circ}\text{C}$) |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| ON ₅₀ | -63.4 และ +104.6 |
| ON ₇₀ | -63.4 และ +105.0 |
| 5 _(80/20) N ₇₀ | -63.3 และ +105.9 |
| 15 _(80/20) N ₇₀ | -63.4 และ +103.8 |

จากรูปที่ 4.42 (ก-ง) พบว่า การใส่สารช่วยผสมที่เป็นยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนนั้นยังคงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่า T_g 2 ค่า ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการแยกเฟสระหว่างเฟสกระจาย (dispersed phase) และเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ดังแสดงในภาพถ่าย OM ที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ Paul [35] ที่กล่าวว่า ถ้าพอลิเมอร์ 2 ชนิด มีความสามารถในการเข้ารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้น้อยมาก จะไม่มีโคพอลิเมอร์ใดที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดเป็นเฟสเดียวได้อย่างสมบูรณ์ โดยโคพอลิเมอร์จะมีหน้าที่หลักเป็นเพียงสารยี้ระหว่างผิว (interfacial agent) เท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.42 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม (ก) ON₅₀ (ข) ON₇₀ (ค) 5_(80/20)N₇₀ (ง) 15_(80/20)N₇₀

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนโดยใช้เทคนิคการหล่อแบบสารละลายที่มีโพลีเอทิลีนเป็นตัวทำละลาย อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนเป็น 70:30, 60:40 และ 50:50 ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนเป็นสารช่วยผสม ในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 phr จากนั้นนำฟิล์มไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และตรวจสอบสัณฐานวิทยา

จากการวิเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน ในอัตราส่วนโดยโมลของยางธรรมชาติต่อสไตรีนมอนอเมอร์ เป็น 90:10, 80:20 และ 70:30 นั้น พบว่า เมื่อปริมาณสไตรีนในน้ำยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของการกราฟต์สไตรีนบนยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้น แต่น้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่ามีพอลิสไตรีนกราฟต์บนยางธรรมชาติปริมาณมาก หากแต่เป็นในลักษณะของสายโซ่สั้นๆ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เช่น ความทนแรงดึง และความทนแรงฉีกขาด พบว่า สมบัติเชิงกลเหล่านี้ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารช่วยผสม แต่การใส่สารช่วยผสมในปริมาณที่สูงขึ้นอาจทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มลดลง ทั้งนี้ การใส่สารช่วยผสมต่างชนิดกัน มีผลทำให้สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนเดียวกันแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 ส่วนใหญ่มีค่าความทนแรงดึงมากที่สุด สำหรับสมบัติความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มนั้นมีแนวโน้มคล้ายกับค่าความทนแรงดึง และ จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง OM พบว่าเมื่อไม่ได้ใส่สารช่วยผสมเข้าไปในระบบ อนุภาคของพอลิสไตรีนซึ่งเป็นเฟสกระจาย มีขนาดใหญ่กว่าที่ใส่สารช่วยผสม และให้ผลสอดคล้องกับค่าความทนแรงดึง กล่าวคือ ขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะมีความทนแรงดึงสูง เนื่องจากสามารถเข้ารวมตัวกันได้ดี

สำหรับสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง TGA และ DSC นั้นพบว่า การใส่สารช่วยผสมไม่สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ โดยอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ผสมเริ่มต้นและสิ้นสุดการสลายตัวทางความร้อนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ยังคงพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากขึ้น ส่วนเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสมนั้นให้ค่า T_g 2 ค่า แสดงว่ายางธรรมชาติกราฟต์สไตรีนที่ได้จากการสังเคราะห์นี้ไม่สามารถช่วยให้ฟิล์ม พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนมีความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสังเคราะห์สารช่วยผสมที่เป็นยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่ยังไม่ได้ทำการศึกษา ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน เช่น ปริมาณสารเริ่มต้น (initiator) ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) อุณหภูมิ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น
2. จากกระบวนการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลายแล้ว ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อนั้น พบว่า การระเหยของตัวทำละลาย และการแห้งตัวของฟิล์มขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อลักษณะและสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ ดังนั้น จึงควรควบคุมปัจจัยเหล่านี้เพื่อไม่ให้มีผลต่อการทดลอง
3. ควรปรับเปลี่ยนตัวทำละลายจากโกลูอินเป็นตัวทำละลายชนิดอื่นๆ เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์ม เป็นต้น เนื่องจากตัวทำละลายเหล่านี้มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกับทั้งยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกตัวทำละลายให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไป
4. สามารถนำเทคนิคและวิธีการในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนไปประยุกต์ใช้เตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์คู่อื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. European Plastic News. August 1986.
2. Folkes, M. J., and Hope, P. S. Polymer Blends and Alloys. London: Chapman & Hall, 1993.
3. Morton, M. Rubber Technology. 2 nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
4. Robert, A. D. Natural Rubber Science and Technology. Oxford: Oxford University Press, 1988.
5. กุลทิวา รัตน์เวคินรักษ์. การผลิตและการทดสอบน้ำยางชั้น. ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2539.
6. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. น้ำยาง. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรกระบวนการผลิตยาง ศูนย์วิจัยยางสงขลา จังหวัดสงขลา. 2531.
7. Thai Rubber Latex Corporation (Thailand) Public CO., LTD. Certificate of Analysis. Lot No. A0756HAT14.
8. ปรีชา ป็องภัย. การทดสอบยางและผลิตภัณฑ์ยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ : ปัตตานี, 2534.
9. Chanda, M., and Roy S. K. Plastic Technology Handbook. 2 nd ed. New York: Marcel Dekker, 1993.
10. Charrier J. M. Polymeric Materials and Processing: Plastics, Elastomers and Composites. Germany: Hanser Publishers, 1991.
11. Brydon J. A. Plastics Materials. 6 th ed. Oxford: Butterworth – Heinemann Ltd., 1995.
12. ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. เคมีโพลีเมอร์พื้นฐาน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ : กรุงเทพมหานคร, 2527.
13. Eirich, F. R. Science and Technology of Rubber. New York: Academic Press, 1978.
14. Ceresa, R. J. Block and Graft Copolymer. London: John Wiley & Sons, 1973.
15. Cooper, W., Sewell, P. R., and Vaughan, G. Journal of Polymer Science 41(1959).
Cited in Asaetha, R., and Kumaran, M. G. Effect of Casting Solvents and Compatibilizer Loading on the Morphology and Properties of Natural

- Rubber/Polystyrene Blends. Polymer – Plastics Technology and Engineering 34(1995): 633-648.
16. Fukushima, Y., Kawahara, S. and Tanaka, Y. Synthesis of Graft Copolymers From Highly Deproteinised Natural Rubber. Journal of Rubber Research 1(1998): 154-166.
 17. Paul, D. R., and Newman, S. Polymer blends. New York: Academic press, 1978.
 18. Charles, A. H. Handbook of Plastics, Elastomer, and Composites. 2 nd ed. New York: McGraw-Hill, 1992.
 19. Malcolm, P. S. Polymer Chemistry: An Introduction. 3 rd ed. New York: Oxford University Press, 1999.
 20. Bhowmick, A. K., and Stephen, H. L. Handbook of Elastomers: New developments and Technology. New York: Marcel Dekker, 1988.
 21. Asaletha, R., and Kumaran, M. G. Effect of Casting Solvents and Compatibilizer Loading on the Morphology and Properties of Natural Rubber/Polystyrene Blends. Polymer – Plastics Technology and Engineering 34(1995): 633-648.
 22. Asaletha, R., Thomas, S., and Kumaran, M.G. The Technological Compatibilization of Natural Rubber/Polystyrene Blends by the Addition of Natural Rubber-graft-Polystyrene. Rubber Chemistry and Technology 68(1995): 671-687.
 23. Asaletha, R., Kumaran, M. G., Groeninckx, G., and Thomas, S. Melt Rheology and Morphology of Physically Compatibilized Natural Rubber-Polystyrene Blends by the Addition of Natural Rubber-g-Polystyrene. Journal of Applied Polymer Science 69(1998): 2673-2690.
 24. Oommen, Z., and Thomas, S. Melt Rheological Behaviour of Natural Rubber/Poly(methyl methacrylate)/Natural Rubber-g-Poly(methyl methacrylate) Blends. Polymer 38(1997): 5611-5621.
 25. Oommen, Z., and Thomas, S. Interfacial Activity of Natural Rubber-g-Poly(methyl methacrylate) in Incompatible Natural Rubber-Poly(methyl methacrylate) Blends. Polymer Bulletin 31(1993): 623-628.
 26. Oommen, Z., Groeninckx, G., and Thomas, S. Dynamic Mechanical and Thermal Properties of Physically Compatibilized Natural Rubber/Poly(methyl methacrylate) Blends by the Addition of Natural Rubber-graft-Poly(methyl

- methacrylate). Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics 38(2000): 525-536.
27. Oommen, Z., Thomas, S., and Nair, M. R. G. Polymer Engineering and Science (in press). Cited in Asaletha, R., and Kumaran, M. G. Effect of Casting Solvents and Compatibilizer Loading on the Morphology and Properties of Natural Rubber/Polystyrene Blends. Polymer – Plastics Technology and Engineering 34(1995): 633-648.
 28. El-Sabbagh, S. H. Compatibility Study of Natural Rubber and Ethylene-Propylene Diene Rubber Blends. Polymer Testing 22(2003): 93-100.
 29. Suryadiansyah, H. I. Thermoplastic Elastomers based on Polypropylene/Natural Rubber and Polypropylene/Recycle Rubber Blends. Polymer Testing 21(2002): 389-395.
 30. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร, 2546.
 31. เจริญ นาคะสวรรค, อาชีชัน แกสमान และนิกร ยี่มวัลย์. การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของน้ำยางธรรมชาติโปรตีนต่ำและน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงด้วยเมทิลเมทาคริเลท. วารสารสงขลานครินทร์ วทท. 22(4) (มิถุนายน 2543): 467-476.
 32. นายวีรเดช กীরติธนวิทย์. การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังและสไตรีนโดยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบฟรีแรดิคัล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
 33. An American National Standard. Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomers:Tension. Annual book of ASTM Standards. 09.01(1991): 41-53.
 34. An American National Standard. Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers. Annual book of ASTM Standards. 09.01(1991): 123-133.
 35. Paul, D. R., and Newman, S. Polymer Blends. New York:Academic Press, 1978. Cited in Asaletha, R., Kumaran, M. G., and Thomas, S. Thermal Behaviour of Natural Rubber/Polystyrene Blends: Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis. Polymer Degradation and Stability 61(1998): 431-439.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

ประสิทธิภาพการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์คำนวณจาก น้ำหนักของกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังสกัดหารด้วยน้ำหนักของพอลิเมอร์ก่อนสกัด สูตรที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกราฟต์} = \frac{\text{น้ำหนักกราฟต์โคพอลิเมอร์หลังสกัด} \times 100}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนสกัด}}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลของการทดลองในการสังเคราะห์ยางธรรมชาติกราฟต์สไตรีน

| NR / Styrene
(%mol) | No. of
syn. | Before soxhlet
(g) | Homo PS
(g) | NR- <i>g</i> -Styrene
(g) | Homo PS
(%) | NR- <i>g</i> -Styrene
(%) | Free NR
(%) | Graft. Eff.
(%) |
|------------------------|----------------|-----------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| 90/10 | 1 | 3.00 | 1.47 | 1.46 | 49.00 | 48.67 | 2.33 | 48.67 |
| | 2 | 3.00 | 1.45 | 1.47 | 48.33 | 49.00 | 2.67 | 49.00 |
| | 3 | 3.00 | 1.46 | 1.51 | 48.67 | 50.33 | 1.00 | 50.33 |
| | เฉลี่ย | 3.00 | 1.46 | 1.48 | 48.67 | 49.33 | 2.00 | 49.33 |
| 80/20 | 1 | 3.00 | 1.27 | 1.56 | 42.33 | 52.00 | 5.67 | 52.00 |
| | 2 | 3.00 | 1.25 | 1.55 | 41.67 | 51.67 | 6.66 | 51.67 |
| | 3 | 3.00 | 1.29 | 1.60 | 43.00 | 53.33 | 3.67 | 53.33 |
| | เฉลี่ย | 3.00 | 1.27 | 1.57 | 42.33 | 52.33 | 5.34 | 52.33 |
| 70/30 | 1 | 3.00 | 1.04 | 1.69 | 34.67 | 56.33 | 9.00 | 56.33 |
| | 2 | 3.00 | 1.06 | 1.68 | 35.33 | 56.00 | 8.67 | 56.00 |
| | 3 | 3.00 | 1.02 | 1.70 | 34.00 | 56.67 | 9.33 | 56.67 |
| | เฉลี่ย | 3.00 | 1.04 | 1.69 | 34.67 | 56.33 | 9.00 | 56.33 |

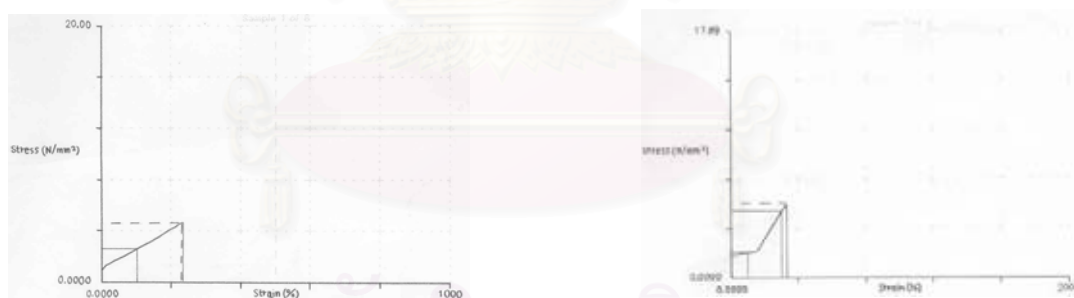
ภาคผนวก ค

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่อัตราส่วนต่างๆ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม



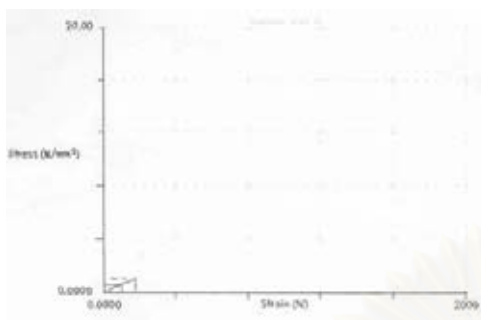
(ก)

(ข)

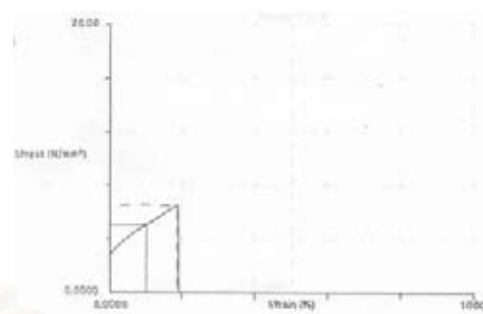


(ค)

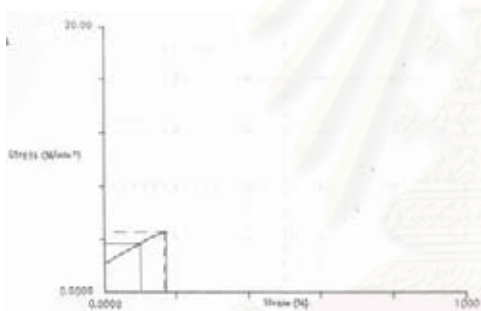
รูปที่ ค.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



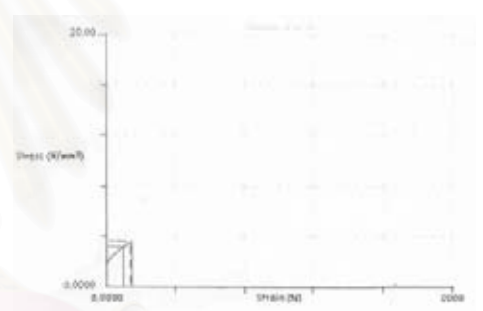
(ก)



(ข)



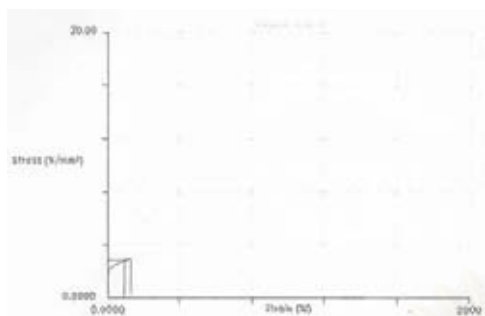
(ค)



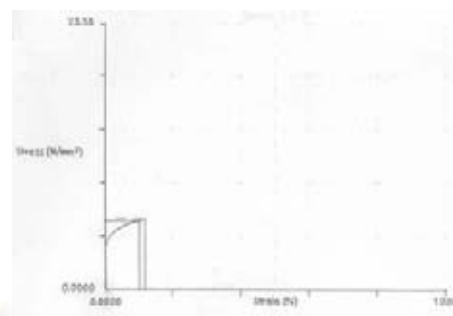
(ง)

สถาบันวิทยบริการ

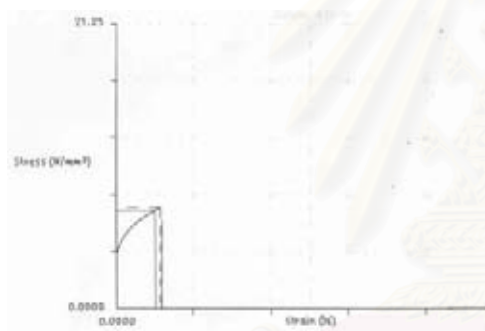
รูปที่ ค.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอริผสมระหว่าง ยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



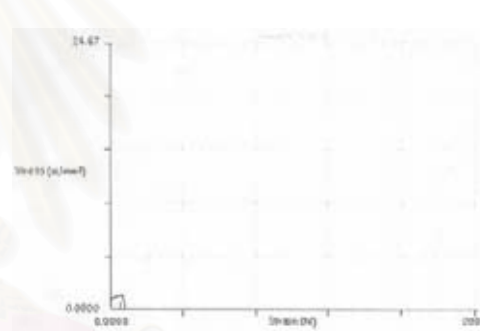
(ก)



(ข)



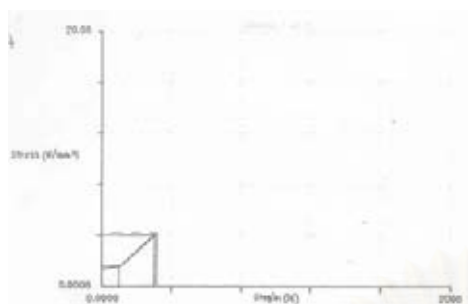
(ค)



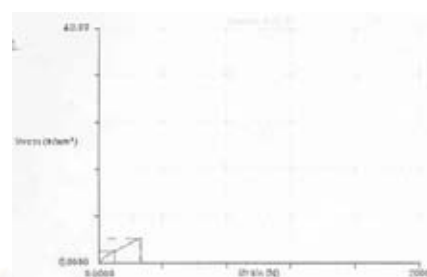
(ง)

สถาบันวิทยบริการ

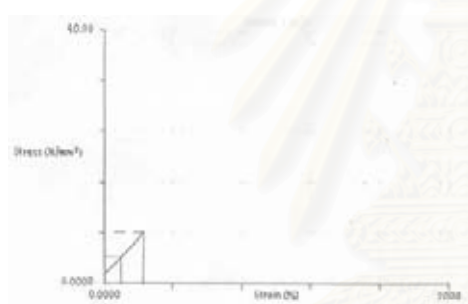
รูปที่ ค.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอริผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



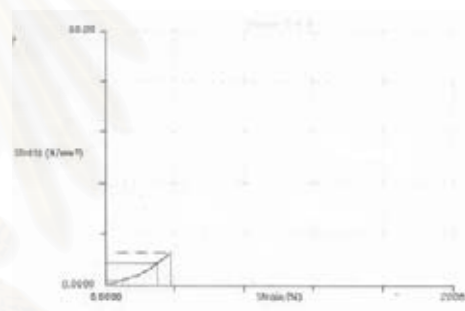
(ก)



(ข)

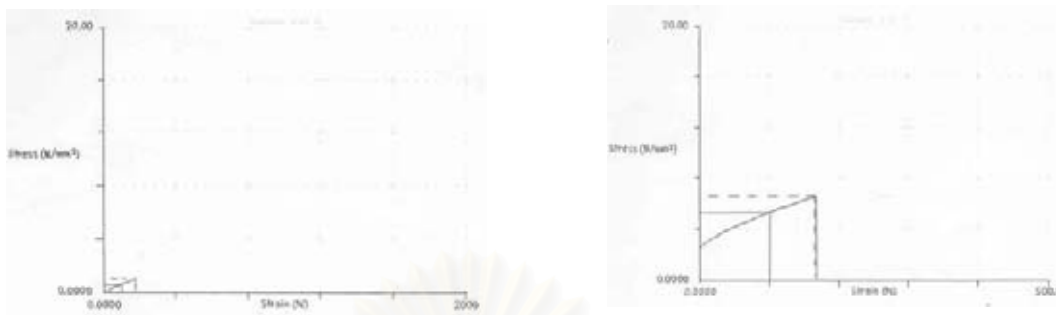


(ค)

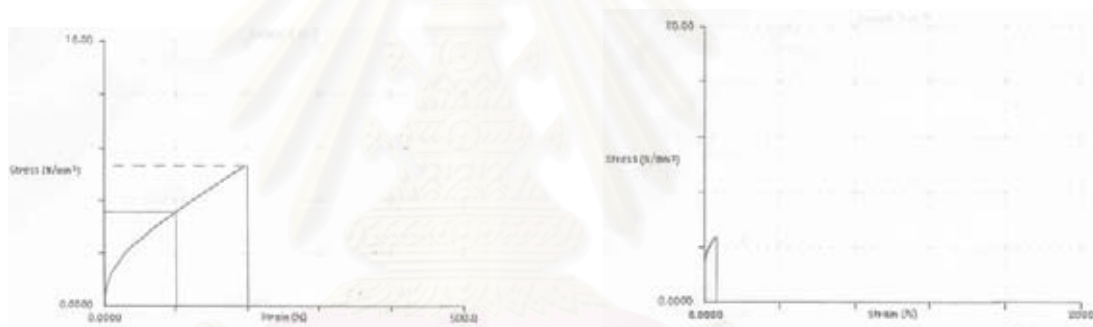


(ง)

รูปที่ ค.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



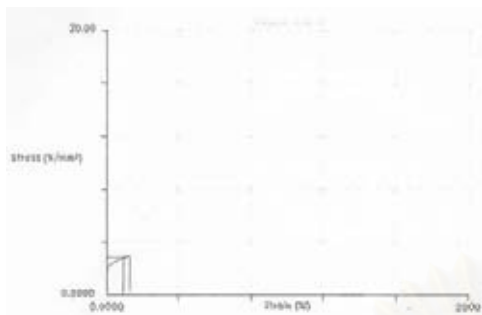
(ข)



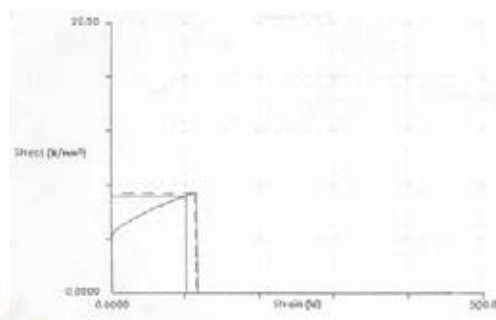
(ค)

(ง)

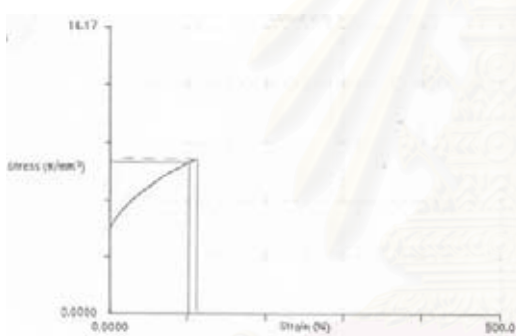
รูปที่ ค.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอริผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



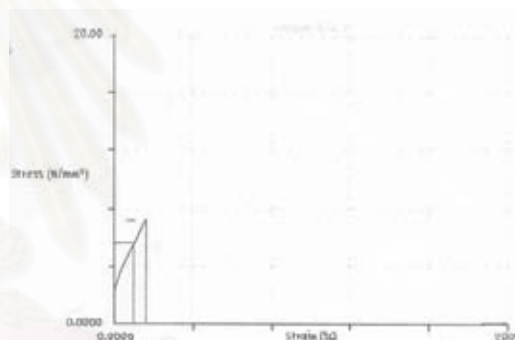
(ก)



(ข)



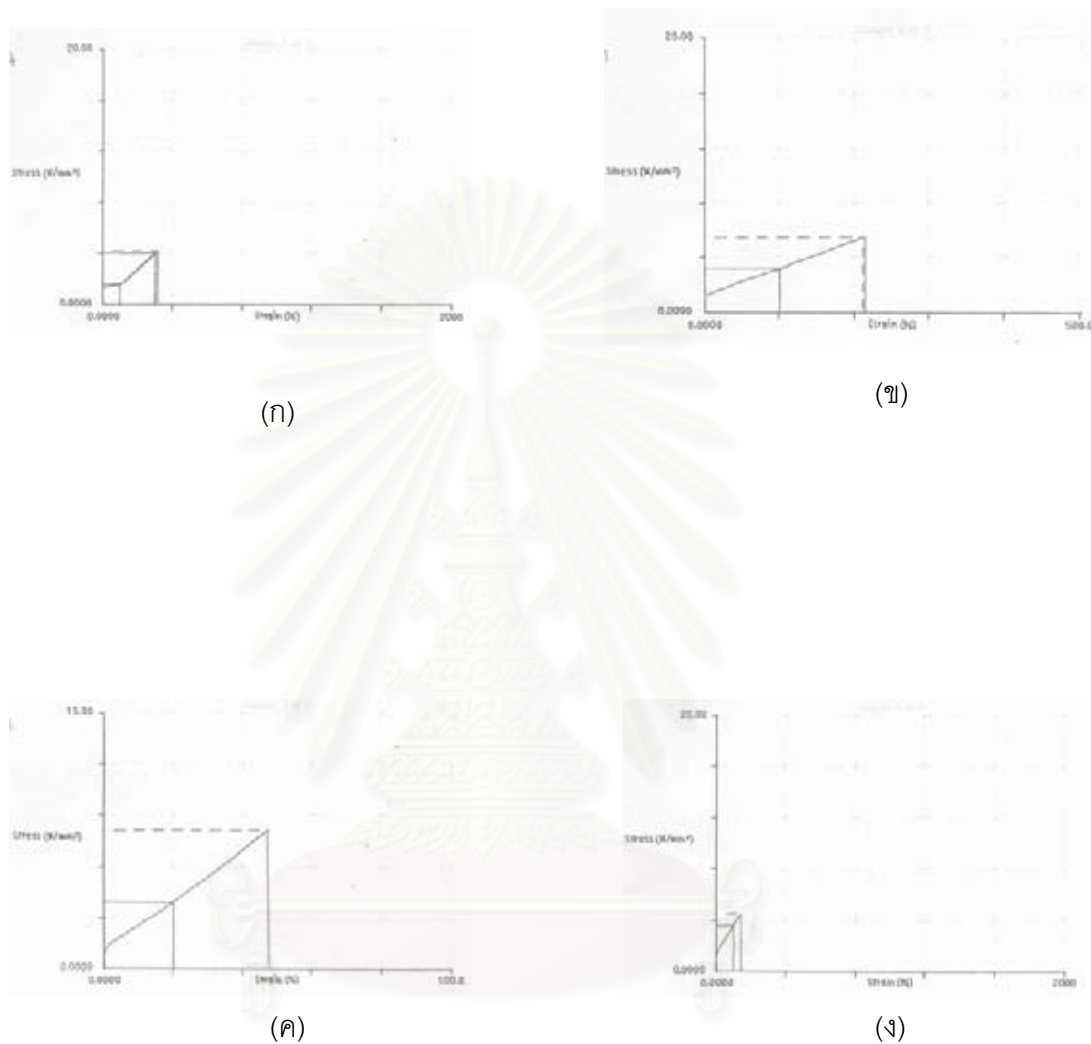
(ค)



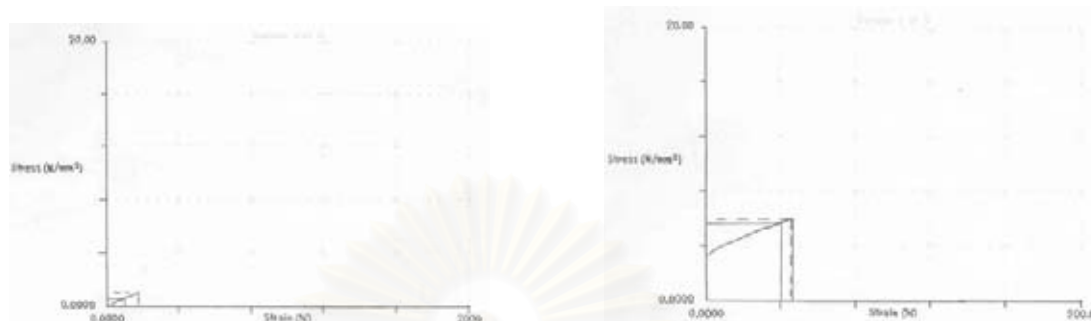
(ง)

สถาบันวิทยบริการ

รูปที่ ค.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



รูปที่ ค.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



(ก)

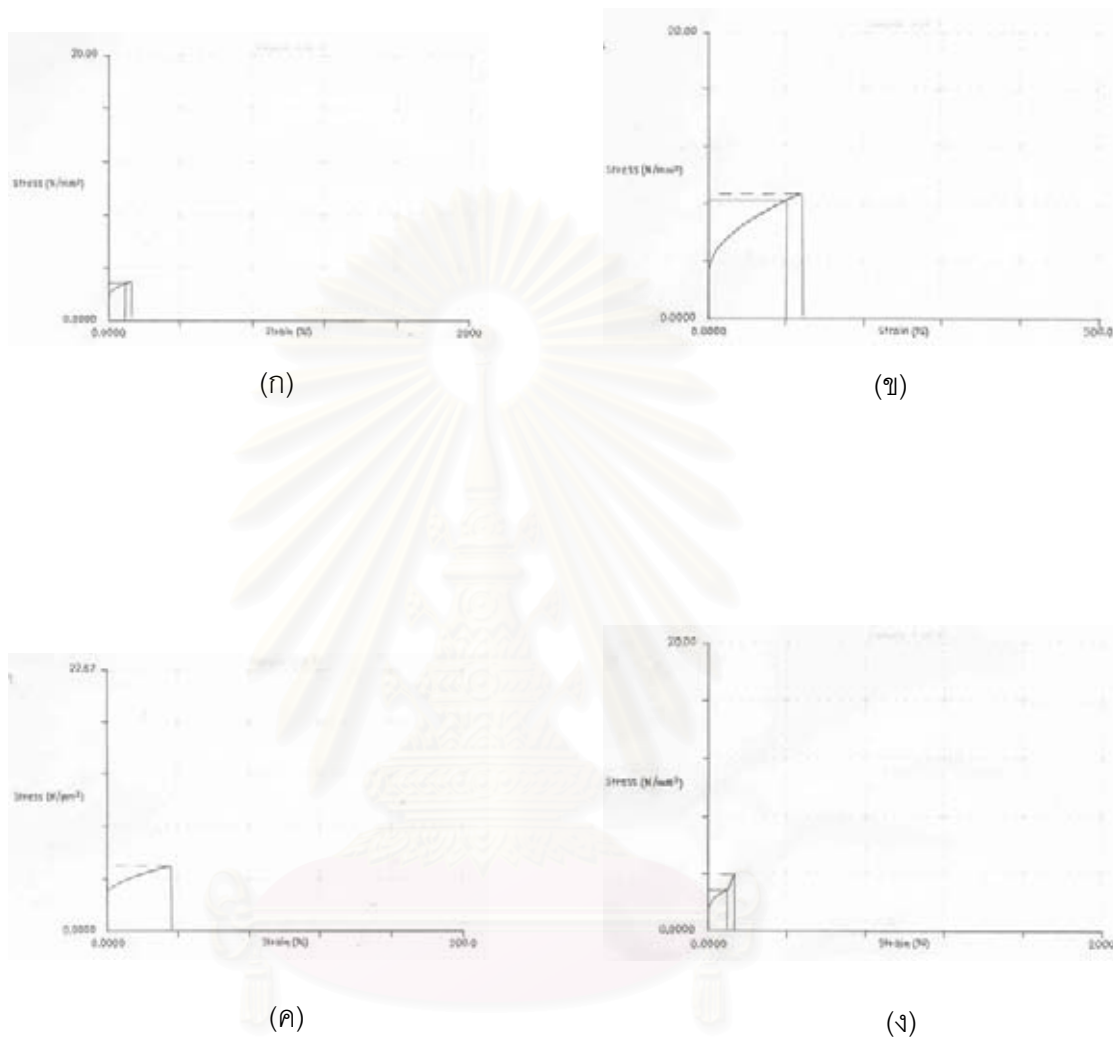
(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ ค.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr



รูปที่ ค.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก และใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30 ในปริมาณ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 15 phr และ (ง) 25 phr

ภาคผนวก ง

ข้อมูลดิบของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ และพอลิสไตรีน ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม

ตารางที่ ง.1 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10

| สูตร | ค่าความทนแรงดึง (MPa) | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 1.364 | 1.175 | 1.374 | 1.060 | 1.635 | 1.322 | 0.219 |
| 5 _(90/10) N ₇₀ | 2.911 | 2.755 | 2.720 | 2.844 | 2.623 | 2.771 | 0.112 |
| 10 _(90/10) N ₇₀ | 3.779 | 3.744 | 3.532 | 3.478 | 3.465 | 3.600 | 0.151 |
| 15 _(90/10) N ₇₀ | 4.609 | 4.578 | 4.935 | 4.551 | 4.785 | 4.692 | 0.164 |
| 20 _(90/10) N ₇₀ | 5.013 | 5.033 | 4.424 | 4.561 | 4.682 | 4.743 | 0.272 |
| 25 _(90/10) N ₇₀ | 5.404 | 4.015 | 6.883 | 6.416 | 5.838 | 5.711 | 1.102 |
| 30 _(90/10) N ₇₀ | 4.411 | 5.540 | 5.913 | 5.202 | 5.265 | 5.267 | 0.554 |
| 0 N ₆₀ | 3.044 | 3.883 | 3.959 | 3.309 | 3.414 | 3.522 | 0.389 |
| 5 _(90/10) N ₆₀ | 5.444 | 5.404 | 5.802 | 6.119 | 5.647 | 5.683 | 0.292 |
| 10 _(90/10) N ₆₀ | 4.097 | 3.991 | 3.949 | 3.647 | 3.681 | 3.873 | 0.198 |
| 15 _(90/10) N ₆₀ | 4.839 | 4.733 | 4.592 | 4.556 | 4.415 | 4.627 | 0.164 |
| 20 _(90/10) N ₆₀ | 3.400 | 3.842 | 3.981 | 3.391 | 3.846 | 3.692 | 0.276 |
| 25 _(90/10) N ₆₀ | 1.874 | 3.815 | 3.153 | 3.400 | 3.582 | 3.165 | 0.761 |
| 30 _(90/10) N ₆₀ | 3.248 | 3.115 | 2.816 | 4.017 | 4.104 | 3.460 | 0.571 |
| 0 N ₅₀ | 4.309 | 6.705 | 5.139 | 3.584 | 7.289 | 5.405 | 1.567 |
| 5 _(90/10) N ₅₀ | 7.159 | 6.793 | 6.860 | 6.499 | 6.782 | 6.819 | 0.235 |
| 10 _(90/10) N ₅₀ | 7.602 | 7.228 | 7.228 | 7.194 | 7.417 | 7.334 | 0.174 |
| 15 _(90/10) N ₅₀ | 7.629 | 7.590 | 7.590 | 7.510 | 7.510 | 7.566 | 0.053 |
| 20 _(90/10) N ₅₀ | 1.503 | 1.834 | 1.559 | 1.231 | 1.554 | 1.536 | 0.214 |
| 25 _(90/10) N ₅₀ | 1.357 | 1.069 | 1.926 | 1.313 | 1.229 | 1.379 | 0.325 |
| 30 _(90/10) N ₅₀ | 5.218 | 4.590 | 5.305 | 2.407 | 5.498 | 4.604 | 1.274 |

ตารางที่ ง.2 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20

| สูตร | ค่าความทนแรงดึง (MPa) | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 1.364 | 1.175 | 1.374 | 1.060 | 1.635 | 1.322 | 0.219 |
| 5 _(80/20) N ₇₀ | 4.991 | 4.737 | 5.000 | 6.413 | 4.250 | 5.078 | 0.806 |
| 10 _(80/20) N ₇₀ | 6.612 | 6.930 | 4.602 | 5.904 | 5.238 | 5.857 | 0.960 |
| 15 _(80/20) N ₇₀ | 8.106 | 8.011 | 8.084 | 7.781 | 7.660 | 7.928 | 0.198 |
| 20 _(80/20) N ₇₀ | 7.256 | 8.087 | 7.571 | 7.900 | 7.546 | 7.672 | 0.325 |
| 25 _(80/20) N ₇₀ | 8.488 | 8.583 | 8.329 | 8.477 | 7.781 | 8.332 | 0.321 |
| 30 _(80/20) N ₇₀ | 9.278 | 7.658 | 4.827 | 8.327 | 5.951 | 7.208 | 1.802 |
| 0 N ₆₀ | 3.044 | 3.883 | 3.959 | 3.309 | 3.414 | 3.522 | 0.389 |
| 5 _(80/20) N ₆₀ | 5.563 | 7.325 | 7.206 | 5.783 | 6.570 | 6.489 | 0.802 |
| 10 _(80/20) N ₆₀ | 5.475 | 5.161 | 6.468 | 6.580 | 6.023 | 5.942 | 0.616 |
| 15 _(80/20) N ₆₀ | 8.623 | 9.163 | 8.198 | 8.297 | 8.583 | 8.573 | 0.377 |
| 20 _(80/20) N ₆₀ | 6.040 | 6.871 | 3.250 | 6.994 | 3.391 | 5.309 | 1.853 |
| 25 _(80/20) N ₆₀ | 4.730 | 4.832 | 4.353 | 5.192 | 2.670 | 4.355 | 0.988 |
| 30 _(80/20) N ₆₀ | 1.726 | 1.317 | 1.571 | 1.174 | 2.543 | 1.666 | 0.535 |
| 0 N ₅₀ | 4.309 | 6.705 | 5.139 | 3.584 | 7.289 | 5.405 | 1.567 |
| 5 _(80/20) N ₅₀ | 8.406 | 8.719 | 8.356 | 8.003 | 8.265 | 8.350 | 0.258 |
| 10 _(80/20) N ₅₀ | 8.225 | 7.480 | 7.135 | 6.485 | 7.070 | 7.279 | 0.639 |
| 15 _(80/20) N ₅₀ | 8.265 | 7.184 | 7.700 | 7.106 | 7.153 | 7.482 | 0.500 |
| 20 _(80/20) N ₅₀ | 3.203 | 4.087 | 3.815 | 3.580 | 4.133 | 3.764 | 0.385 |
| 25 _(80/20) N ₅₀ | 7.448 | 5.540 | 7.704 | 5.132 | 7.228 | 6.610 | 1.184 |
| 30 _(80/20) N ₅₀ | 6.700 | 3.121 | 6.907 | 5.722 | 3.529 | 5.196 | 1.771 |

ตารางที่ ง.3 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมออร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30

| สูตร | ค่าความทนแรงดึง (MPa) | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 1.364 | 1.175 | 1.374 | 1.060 | 1.635 | 1.322 | 0.219 |
| 5 _(70/30) N ₇₀ | 4.689 | 4.530 | 5.501 | 5.423 | 4.521 | 4.933 | 0.488 |
| 10 _(70/30) N ₇₀ | 5.595 | 5.786 | 5.900 | 5.287 | 5.780 | 5.669 | 0.240 |
| 15 _(70/30) N ₇₀ | 7.700 | 7.417 | 8.114 | 7.327 | 7.497 | 7.611 | 0.313 |
| 20 _(70/30) N ₇₀ | 9.900 | 8.670 | 8.767 | 9.918 | 9.628 | 9.377 | 0.613 |
| 25 _(70/30) N ₇₀ | 4.899 | 4.768 | 6.564 | 3.787 | 4.477 | 4.899 | 1.184 |
| 30 _(70/30) N ₇₀ | 10.20 | 9.839 | 9.938 | 10.27 | 10.55 | 10.16 | 0.282 |
| 0 N ₆₀ | 3.044 | 3.883 | 3.959 | 3.309 | 3.414 | 3.522 | 0.389 |
| 5 _(70/30) N ₆₀ | 5.960 | 6.433 | 5.198 | 6.184 | 7.145 | 6.184 | 0.708 |
| 10 _(70/30) N ₆₀ | 4.787 | 4.787 | 4.874 | 4.411 | 5.475 | 4.867 | 0.38 |
| 15 _(70/30) N ₆₀ | 3.748 | 3.112 | 3.391 | 3.815 | 3.870 | 3.587 | 0.325 |
| 20 _(70/30) N ₆₀ | 9.696 | 7.130 | 8.392 | 11.13 | 10.25 | 9.320 | 1.576 |
| 25 _(70/30) N ₆₀ | 8.084 | 7.757 | 5.166 | 7.517 | 9.876 | 7.680 | 1.683 |
| 30 _(70/30) N ₆₀ | 8.670 | 7.889 | 9.984 | 8.828 | 9.083 | 8.891 | 0.756 |
| 0 N ₅₀ | 4.309 | 6.705 | 5.139 | 3.584 | 7.289 | 5.405 | 1.567 |
| 5 _(70/30) N ₅₀ | 5.722 | 9.078 | 8.639 | 7.368 | 8.751 | 7.912 | 1.386 |
| 10 _(70/30) N ₅₀ | 7.153 | 8.559 | 7.841 | 7.587 | 9.738 | 8.175 | 1.011 |
| 15 _(70/30) N ₅₀ | 5.572 | 5.722 | 5.325 | 4.967 | 5.213 | 5.360 | 0.297 |
| 20 _(70/30) N ₅₀ | 3.088 | 3.916 | 3.794 | 4.424 | 3.875 | 3.819 | 0.478 |
| 25 _(70/30) N ₅₀ | 3.909 | 5.845 | 6.358 | 3.877 | 6.421 | 5.282 | 1.288 |
| 30 _(70/30) N ₅₀ | 2.666 | 2.678 | 2.681 | 2.562 | 2.648 | 2.647 | 0.049 |

ตารางที่ ง.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10

| สูตร | ค่าความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาด (%) | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 242.3 | 266.4 | 181.6 | 221.6 | 258.2 | 234.0 | 33.9 |
| 5 _(90/10) N ₇₀ | 241.7 | 245.1 | 337.5 | 248.6 | 261.5 | 266.9 | 40.2 |
| 10 _(90/10) N ₇₀ | 230.7 | 236.2 | 327.8 | 187.4 | 225.8 | 241.6 | 51.9 |
| 15 _(90/10) N ₇₀ | 230.2 | 229.2 | 237.4 | 224.8 | 239.2 | 232.2 | 6.0 |
| 20 _(90/10) N ₇₀ | 312.5 | 356.4 | 364.4 | 332.0 | 324.1 | 337.9 | 21.9 |
| 25 _(90/10) N ₇₀ | 326.5 | 302.1 | 282.2 | 401.0 | 358.3 | 334.0 | 47.0 |
| 30 _(90/10) N ₇₀ | 256.3 | 278.3 | 305.8 | 293.6 | 396.1 | 306.0 | 53.6 |
| 0 N ₆₀ | 167.8 | 126.3 | 152.6 | 102.5 | 172.3 | 144.3 | 29.5 |
| 5 _(90/10) N ₆₀ | 165.4 | 177.0 | 159.9 | 173.3 | 161.1 | 167.3 | 7.5 |
| 10 _(90/10) N ₆₀ | 152.6 | 158.1 | 162.4 | 166.0 | 158.7 | 159.6 | 5.0 |
| 15 _(90/10) N ₆₀ | 164.8 | 184.9 | 167.8 | 139.8 | 156.3 | 162.7 | 16.5 |
| 20 _(90/10) N ₆₀ | 117.8 | 101.9 | 177.0 | 135.5 | 139.2 | 134.3 | 28.2 |
| 25 _(90/10) N ₆₀ | 133.7 | 229.5 | 96.44 | 108.6 | 137.9 | 141.2 | 52.3 |
| 30 _(90/10) N ₆₀ | 267.3 | 188.0 | 130.0 | 199.6 | 171.5 | 191.3 | 50.0 |
| 0 N ₅₀ | 111.0 | 95.32 | 114.7 | 85.01 | 95.36 | 100.3 | 12.3 |
| 5 _(90/10) N ₅₀ | 101.3 | 117.2 | 110.5 | 98.90 | 92.20 | 104.0 | 9.8 |
| 10 _(90/10) N ₅₀ | 123.3 | 105.6 | 111.7 | 108.6 | 108.6 | 111.6 | 6.9 |
| 15 _(90/10) N ₅₀ | 114.7 | 103.8 | 115.4 | 103.1 | 109.5 | 109.3 | 5.8 |
| 20 _(90/10) N ₅₀ | 61.04 | 62.50 | 57.21 | 64.97 | 73.85 | 63.91 | 6.2 |
| 25 _(90/10) N ₅₀ | 22.10 | 36.62 | 73.24 | 55.54 | 20.42 | 41.58 | 22.6 |
| 30 _(90/10) N ₅₀ | 110.5 | 67.75 | 125.7 | 83.1 | 131.2 | 103.6 | 27.4 |

ตารางที่ ง.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิไสไตรีนที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20

| สูตร | ค่าความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาด (%) | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 242.3 | 266.4 | 181.6 | 221.6 | 258.2 | 234.0 | 33.9 |
| 5 _(80/20) N ₇₀ | 204.7 | 159.8 | 183.1 | 217.2 | 259.7 | 204.9 | 37.6 |
| 10 _(80/20) N ₇₀ | 233.4 | 209.3 | 205.9 | 229.9 | 231.0 | 221.9 | 13.2 |
| 15 _(80/20) N ₇₀ | 229.7 | 233.7 | 250.3 | 221.2 | 248.0 | 236.6 | 12.4 |
| 20 _(80/20) N ₇₀ | 309.2 | 385.3 | 350.8 | 329.5 | 361.7 | 347.3 | 29.3 |
| 25 _(80/20) N ₇₀ | 354.0 | 405.5 | 361.3 | 399.5 | 375.5 | 379.2 | 22.8 |
| 30 _(80/20) N ₇₀ | 224.6 | 479.0 | 194.6 | 276.4 | 229.9 | 280.9 | 114.5 |
| 0 N ₆₀ | 167.8 | 126.3 | 152.6 | 102.5 | 172.3 | 144.3 | 29.5 |
| 5 _(80/20) N ₆₀ | 157.5 | 178.2 | 190.4 | 164.2 | 164.8 | 171.0 | 13.2 |
| 10 _(80/20) N ₆₀ | 146.5 | 145.9 | 166.6 | 164.2 | 158.7 | 156.4 | 9.7 |
| 15 _(80/20) N ₆₀ | 135.5 | 170.3 | 170.9 | 183.7 | 199.2 | 171.9 | 23.5 |
| 20 _(80/20) N ₆₀ | 165.0 | 169.2 | 181.7 | 179.4 | 202.2 | 179.5 | 14.5 |
| 25 _(80/20) N ₆₀ | 53.10 | 48.23 | 62.87 | 53.10 | 23.80 | 48.22 | 14.7 |
| 30 _(80/20) N ₆₀ | 14.95 | 60.25 | 25.94 | 120.2 | 79.96 | 60.26 | 42.5 |
| 0 N ₅₀ | 111.0 | 95.32 | 114.7 | 85.01 | 95.36 | 100.3 | 12.3 |
| 5 _(80/20) N ₅₀ | 98.27 | 109.9 | 112.3 | 101.3 | 130.6 | 110.5 | 12.7 |
| 10 _(80/20) N ₅₀ | 95.4 | 98.9 | 86.7 | 88.5 | 108.0 | 95.5 | 8.6 |
| 15 _(80/20) N ₅₀ | 100.1 | 100.1 | 111.1 | 105.7 | 110.5 | 105.5 | 5.4 |
| 20 _(80/20) N ₅₀ | 81.79 | 39.67 | 51.54 | 46.39 | 54.86 | 54.85 | 16.1 |
| 25 _(80/20) N ₅₀ | 272.2 | 184.3 | 174.0 | 177.0 | 156.3 | 192.8 | 45.6 |
| 30 _(80/20) N ₅₀ | 112.5 | 219.7 | 172.9 | 211.8 | 147.1 | 172.8 | 44.8 |

ตารางที่ ง.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิไทรินที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30

| สูตร | ค่าความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาด (%) | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 242.3 | 266.4 | 181.6 | 221.6 | 258.2 | 234.0 | 33.9 |
| 5 _(70/30) N ₇₀ | 225.2 | 197.8 | 212.4 | 206.3 | 241.6 | 216.7 | 17.2 |
| 10 _(70/30) N ₇₀ | 203.9 | 199.0 | 200.8 | 180.7 | 199.6 | 196.6 | 9.2 |
| 15 _(70/30) N ₇₀ | 191.0 | 200.8 | 235.6 | 199.0 | 197.1 | 204.7 | 17.7 |
| 20 _(70/30) N ₇₀ | 354.0 | 244.1 | 239.3 | 257.7 | 272.8 | 273.6 | 46.8 |
| 25 _(70/30) N ₇₀ | 306.4 | 136.7 | 313.6 | 224.3 | 141.0 | 224.4 | 85.6 |
| 30 _(70/30) N ₇₀ | 373.8 | 384.5 | 377.2 | 361.9 | 395.8 | 378.6 | 12.6 |
| 0 N ₆₀ | 167.8 | 126.3 | 152.6 | 102.5 | 172.3 | 144.3 | 29.5 |
| 5 _(70/30) N ₆₀ | 113.5 | 105.0 | 115.8 | 119.4 | 134.3 | 117.6 | 10.7 |
| 10 _(70/30) N ₆₀ | 116.6 | 103.8 | 121.5 | 114.2 | 113.9 | 114.0 | 6.5 |
| 15 _(70/30) N ₆₀ | 125.7 | 100.7 | 134.9 | 128.2 | 126.3 | 123.2 | 13.1 |
| 20 _(70/30) N ₆₀ | 192.9 | 160.5 | 246.7 | 206.3 | 201.6 | 201.6 | 30.9 |
| 25 _(70/30) N ₆₀ | 291.7 | 262.5 | 163.0 | 253.3 | 329.6 | 260.0 | 61.9 |
| 30 _(70/30) N ₆₀ | 263.7 | 226.0 | 201.4 | 166.6 | 272.8 | 226.1 | 44.0 |
| 0 N ₅₀ | 111.0 | 95.32 | 114.7 | 85.01 | 95.36 | 100.3 | 12.3 |
| 5 _(70/30) N ₅₀ | 91.7 | 106.2 | 77.5 | 63.5 | 119.6 | 91.7 | 22.3 |
| 10 _(70/30) N ₅₀ | 39.7 | 79.4 | 72.0 | 60.4 | 108.0 | 71.9 | 25.1 |
| 15 _(70/30) N ₅₀ | 74.5 | 90.3 | 65.9 | 68.4 | 76.9 | 75.2 | 9.56 |
| 20 _(70/30) N ₅₀ | 183.1 | 152.6 | 126.3 | 103.8 | 193.0 | 151.8 | 37.5 |
| 25 _(70/30) N ₅₀ | 133.1 | 164.2 | 167.8 | 103.8 | 184.9 | 150.8 | 32.2 |
| 30 _(70/30) N ₅₀ | 18.31 | 91.55 | 54.93 | 24.41 | 79.35 | 53.71 | 32.41 |

ตารางที่ ง.7 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10

| สูตร | ค่าอิลาสติกมอดุลัส (MPa) | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 1.589 | 1.669 | 1.653 | 2.065 | 2.032 | 1.802 | 0.228 |
| 5 _(90/10) N ₇₀ | 1.773 | 1.637 | 1.201 | 1.740 | 1.563 | 1.583 | 0.229 |
| 10 _(90/10) N ₇₀ | 2.261 | 2.160 | 1.272 | 1.963 | 2.098 | 1.951 | 0.395 |
| 15 _(90/10) N ₇₀ | 2.580 | 2.628 | 2.720 | 2.577 | 2.608 | 2.623 | 0.058 |
| 20 _(90/10) N ₇₀ | 2.797 | 3.306 | 2.040 | 2.502 | 1.641 | 2.457 | 0.648 |
| 25 _(90/10) N ₇₀ | 1.812 | 1.405 | 2.349 | 1.705 | 1.458 | 1.746 | 0.377 |
| 30 _(90/10) N ₇₀ | 2.489 | 2.637 | 1.812 | 1.445 | 2.106 | 2.098 | 0.488 |
| 0 N ₆₀ | 5.516 | 3.378 | 4.782 | 3.753 | 3.179 | 4.122 | 0.995 |
| 5 _(90/10) N ₆₀ | 4.411 | 4.292 | 4.802 | 4.848 | 4.709 | 4.612 | 0.247 |
| 10 _(90/10) N ₆₀ | 3.562 | 3.426 | 3.310 | 3.076 | 3.140 | 3.303 | 0.200 |
| 15 _(90/10) N ₆₀ | 3.956 | 3.779 | 3.709 | 3.921 | 3.635 | 3.800 | 0.137 |
| 20 _(90/10) N ₆₀ | 3.230 | 3.815 | 3.289 | 3.118 | 3.478 | 3.386 | 0.273 |
| 25 _(90/10) N ₆₀ | 1.495 | 2.100 | 2.522 | 3.301 | 3.197 | 2.523 | 0.757 |
| 30 _(90/10) N ₆₀ | 2.861 | 5.432 | 3.843 | 4.423 | 2.661 | 3.844 | 1.143 |
| 0 N ₅₀ | 6.821 | 6.588 | 6.505 | 6.391 | 7.010 | 6.663 | 0.250 |
| 5 _(90/10) N ₅₀ | 7.132 | 6.626 | 6.773 | 6.499 | 6.760 | 6.758 | 0.237 |
| 10 _(90/10) N ₅₀ | 7.321 | 7.156 | 7.091 | 7.091 | 7.309 | 7.194 | 0.114 |
| 15 _(90/10) N ₅₀ | 7.315 | 7.550 | 7.388 | 7.470 | 7.407 | 7.426 | 0.089 |
| 20 _(90/10) N ₅₀ | - | - | - | - | - | - | - |
| 25 _(90/10) N ₅₀ | - | - | - | - | - | - | - |
| 30 _(90/10) N ₅₀ | 5.108 | 5.105 | 5.020 | 5.075 | 5.142 | 5.090 | 0.046 |

ตารางที่ ง.8 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20

| สูตร | ค่าอิลาสติกมอดุลัส (MPa) | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-------|-------|--------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 1.589 | 1.669 | 1.653 | 2.065 | 2.032 | 1.802 | 0.228 |
| 5 _(80/20) N ₇₀ | 3.170 | 3.496 | 3.321 | 3.704 | 2.008 | 3.140 | 0.663 |
| 10 _(80/20) N ₇₀ | 3.592 | 3.973 | 2.892 | 3.176 | 2.792 | 3.285 | 0.494 |
| 15 _(80/20) N ₇₀ | 4.179 | 3.990 | 4.057 | 4.130 | 3.551 | 3.982 | 0.251 |
| 20 _(80/20) N ₇₀ | 2.726 | 2.138 | 2.543 | 2.122 | 2.631 | 2.432 | 0.283 |
| 25 _(80/20) N ₇₀ | 2.173 | 2.012 | 3.846 | 1.139 | 1.244 | 2.083 | 1.086 |
| 30 _(80/20) N ₇₀ | 0.861 | 0.840 | 2.637 | 2.870 | 2.797 | 2.001 | 1.054 |
| 0 N ₆₀ | 5.516 | 3.378 | 4.782 | 3.753 | 3.179 | 4.122 | 0.995 |
| 5 _(80/20) N ₆₀ | 4.726 | 5.665 | 5.419 | 4.753 | 5.293 | 5.171 | 0.416 |
| 10 _(80/20) N ₆₀ | 4.698 | 4.413 | 5.043 | 5.354 | 4.900 | 4.881 | 0.354 |
| 15 _(80/20) N ₆₀ | 7.408 | 6.991 | 6.104 | 5.976 | 5.722 | 6.440 | 0.722 |
| 20 _(80/20) N ₆₀ | 6.008 | 4.339 | 5.037 | 4.973 | 4.513 | 4.974 | 0.656 |
| 25 _(80/20) N ₆₀ | - | - | - | - | - | - | - |
| 30 _(80/20) N ₆₀ | 1.235 | 0.956 | 1.197 | 0.6108 | 2.543 | 1.450 | 0.991 |
| 0 N ₅₀ | 6.821 | 6.043 | 6.505 | 6.883 | 7.063 | 6.663 | 0.401 |
| 5 _(80/20) N ₅₀ | 8.406 | 8.538 | 8.084 | 7.963 | 7.745 | 8.147 | 0.324 |
| 10 _(80/20) N ₅₀ | 7.025 | 7.480 | 7.884 | 6.725 | 6.941 | 7.211 | 0.465 |
| 15 _(80/20) N ₅₀ | 8.262 | 7.182 | 7.518 | 7.487 | 6.991 | 7.488 | 0.485 |
| 20 _(80/20) N ₅₀ | - | - | - | - | - | - | - |
| 25 _(80/20) N ₅₀ | 2.754 | 2.551 | 5.722 | 2.679 | 5.689 | 3.879 | 1.669 |
| 30 _(80/20) N ₅₀ | 2.178 | 3.272 | 3.947 | 1.504 | 1.997 | 2.580 | 1.001 |

ตารางที่ ง.9 ค่าอิลาสติกมอดุลัสที่ความเครียด 100% ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
ยางธรรมชาติและพอลิสไตรีนที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30

| สูตร | ค่าอิลาสติกมอดุลัส (MPa) | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 1.589 | 1.669 | 1.653 | 2.065 | 2.032 | 1.802 | 0.228 |
| 5 _(70/30) N ₇₀ | 2.775 | 2.898 | 3.246 | 3.329 | 3.062 | 3.062 | 0.232 |
| 10 _(70/30) N ₇₀ | 3.361 | 3.510 | 3.520 | 3.511 | 3.526 | 3.486 | 0.070 |
| 15 _(70/30) N ₇₀ | 4.727 | 4.304 | 3.961 | 4.206 | 4.287 | 4.297 | 0.277 |
| 20 _(70/30) N ₇₀ | 4.330 | 4.417 | 4.482 | 4.419 | 4.112 | 4.352 | 0.144 |
| 25 _(70/30) N ₇₀ | 2.713 | 3.878 | 1.097 | 2.329 | 3.548 | 2.713 | 1.097 |
| 30 _(70/30) N ₇₀ | 1.745 | 1.821 | 1.800 | 1.918 | 1.671 | 1.791 | 0.092 |
| 0 N ₆₀ | 5.516 | 3.378 | 4.782 | 3.753 | 3.179 | 4.122 | 0.995 |
| 5 _(70/30) N ₆₀ | 5.682 | 6.283 | 6.278 | 5.833 | 6.204 | 6.056 | 0.279 |
| 10 _(70/30) N ₆₀ | 4.504 | 4.681 | 4.450 | 6.430 | 2.660 | 4.545 | 1.336 |
| 15 _(70/30) N ₆₀ | 3.494 | 3.093 | 3.105 | 3.426 | 3.511 | 3.326 | 0.209 |
| 20 _(70/30) N ₆₀ | 6.753 | 4.039 | 3.324 | 3.431 | 3.518 | 4.213 | 1.446 |
| 25 _(70/30) N ₆₀ | 2.015 | 2.055 | 2.422 | 2.312 | 2.755 | 2.312 | 0.301 |
| 30 _(70/30) N ₆₀ | 3.786 | 3.741 | 3.200 | 4.218 | 3.760 | 3.741 | 0.361 |
| 0 N ₅₀ | 6.821 | 6.522 | 6.505 | 6.723 | 6.744 | 6.663 | 0.141 |
| 5 _(70/30) N ₅₀ | 8.702 | 8.916 | 8.621 | 8.456 | 8.265 | 8.591 | 0.247 |
| 10 _(70/30) N ₅₀ | 9.518 | 9.825 | 9.448 | 9.213 | 9.501 | 9.501 | 0.219 |
| 15 _(70/30) N ₅₀ | - | - | - | - | - | - | - |
| 20 _(70/30) N ₅₀ | 1.683 | 2.572 | 3.605 | 4.291 | 2.005 | 2.831 | 1.095 |
| 25 _(70/30) N ₅₀ | 2.859 | 4.026 | 3.703 | 3.681 | 4.126 | 3.679 | 0.498 |
| 30 _(70/30) N ₅₀ | - | - | - | - | - | - | - |

ภาคผนวก จ

ข้อมูลดิบของการทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ และพอลิสไตรีน ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม

ตารางที่ จ.1 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ และพอลิสไตรีน ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 90/10

| สูตร | ค่าความทนแรงฉีกขาด (N/mm) | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 12.72 | 13.25 | 14.69 | 13.92 | 11.81 | 13.28 | 1.10 |
| 5 _(90/10) N ₇₀ | 11.70 | 13.46 | 13.24 | 13.05 | 13.35 | 12.96 | 0.72 |
| 10 _(90/10) N ₇₀ | 13.99 | 15.02 | 15.45 | 14.36 | 14.05 | 14.57 | 0.64 |
| 15 _(90/10) N ₇₀ | 15.26 | 18.87 | 16.93 | 15.71 | 16.53 | 16.66 | 1.40 |
| 20 _(90/10) N ₇₀ | 17.17 | 16.05 | 18.16 | 20.77 | 21.19 | 18.67 | 2.24 |
| 25 _(90/10) N ₇₀ | 21.43 | 20.29 | 20.56 | 18.12 | 19.21 | 19.92 | 1.28 |
| 30 _(90/10) N ₇₀ | 20.46 | 21.93 | 22.66 | 21.88 | 22.75 | 21.94 | 0.92 |
| 0 N ₆₀ | 16.30 | 16.21 | 18.51 | 17.07 | 17.51 | 17.12 | 0.95 |
| 5 _(90/10) N ₆₀ | 23.43 | 22.38 | 22.68 | 23.34 | 22.89 | 22.94 | 0.44 |
| 10 _(90/10) N ₆₀ | 17.31 | 16.62 | 17.40 | 17.59 | 17.17 | 17.22 | 0.37 |
| 15 _(90/10) N ₆₀ | 18.53 | 19.75 | 18.84 | 18.31 | 18.53 | 18.79 | 0.57 |
| 20 _(90/10) N ₆₀ | 15.08 | 19.44 | 18.89 | 18.91 | 17.31 | 17.93 | 1.78 |
| 25 _(90/10) N ₆₀ | 17.72 | 16.30 | 18.46 | 17.73 | 19.66 | 17.97 | 1.22 |
| 30 _(90/10) N ₆₀ | 18.44 | 18.15 | 18.52 | 18.70 | 18.91 | 18.54 | 0.28 |
| 0 N ₅₀ | 21.43 | 24.11 | 21.46 | 23.55 | 21.46 | 22.40 | 1.32 |
| 5 _(90/10) N ₅₀ | 21.80 | 25.56 | 23.21 | 23.23 | 21.71 | 23.10 | 1.56 |
| 10 _(90/10) N ₅₀ | 24.08 | 24.46 | 24.80 | 24.91 | 24.23 | 24.50 | 0.36 |
| 15 _(90/10) N ₅₀ | 25.10 | 26.48 | 25.27 | 24.56 | 25.50 | 25.38 | 0.70 |
| 20 _(90/10) N ₅₀ | 16.35 | 18.20 | 19.07 | 16.35 | 16.50 | 17.30 | 1.26 |
| 25 _(90/10) N ₅₀ | 21.01 | 23.11 | 23.25 | 17.95 | 22.68 | 21.60 | 2.23 |
| 30 _(90/10) N ₅₀ | 16.30 | 17.31 | 25.53 | 21.44 | 23.45 | 20.81 | 3.94 |

ตารางที่ จ.2 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 80/20

| สูตร | ค่าความทนแรงฉีกขาด (N/mm) | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 12.72 | 13.25 | 14.69 | 13.92 | 11.81 | 13.28 | 1.10 |
| 5 _(80/20) N ₇₀ | 21.62 | 18.18 | 17.87 | 17.74 | 15.99 | 18.28 | 2.05 |
| 10 _(80/20) N ₇₀ | 15.64 | 19.62 | 16.82 | 20.81 | 16.99 | 17.98 | 2.15 |
| 15 _(80/20) N ₇₀ | 15.48 | 18.44 | 18.87 | 17.55 | 16.98 | 17.46 | 1.33 |
| 20 _(80/20) N ₇₀ | 21.87 | 18.36 | 19.26 | 20.10 | 20.63 | 20.04 | 1.34 |
| 25 _(80/20) N ₇₀ | 25.43 | 24.41 | 25.84 | 24.71 | 25.91 | 25.26 | 0.67 |
| 30 _(80/20) N ₇₀ | 20.16 | 21.47 | 16.53 | 21.70 | 23.18 | 20.61 | 2.51 |
| 0 N ₆₀ | 16.30 | 16.21 | 18.51 | 17.07 | 17.51 | 17.12 | 0.95 |
| 5 _(80/20) N ₆₀ | 26.70 | 22.89 | 22.13 | 21.19 | 18.86 | 22.35 | 2.86 |
| 10 _(80/20) N ₆₀ | 23.10 | 21.68 | 21.85 | 21.97 | 21.40 | 22.00 | 0.65 |
| 15 _(80/20) N ₆₀ | 19.89 | 20.20 | 22.02 | 22.54 | 23.58 | 21.65 | 1.57 |
| 20 _(80/20) N ₆₀ | 27.13 | 24.80 | 25.26 | 17.04 | 27.55 | 24.36 | 4.26 |
| 25 _(80/20) N ₆₀ | 20.98 | 16.18 | 19.98 | 20.98 | 19.68 | 18.96 | 2.25 |
| 30 _(80/20) N ₆₀ | 25.18 | 24.58 | 20.81 | 21.29 | 20.50 | 22.47 | 2.23 |
| 0 N ₅₀ | 21.43 | 24.11 | 21.46 | 23.55 | 21.46 | 22.40 | 1.32 |
| 5 _(80/20) N ₅₀ | 28.61 | 24.80 | 26.49 | 27.05 | 25.18 | 26.42 | 1.53 |
| 10 _(80/20) N ₅₀ | 25.03 | 24.41 | 26.38 | 26.70 | 22.68 | 25.04 | 1.62 |
| 15 _(80/20) N ₅₀ | 20.03 | 20.60 | 23.34 | 24.23 | 23.31 | 22.30 | 1.86 |
| 20 _(80/20) N ₅₀ | 13.22 | 16.78 | 19.60 | 18.68 | 19.44 | 17.54 | 2.66 |
| 25 _(80/20) N ₅₀ | 25.81 | 22.46 | 22.69 | 21.30 | 24.36 | 23.32 | 1.76 |
| 30 _(80/20) N ₅₀ | 22.54 | 14.31 | 17.31 | 20.98 | 16.93 | 18.41 | 3.31 |

ตารางที่ ๑.3 ค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน
ที่ใส่สารช่วยผสมชนิด NR-g-Styrene 70/30

| สูตร | ค่าความทนแรงฉีกขาด (N/mm) | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ค่าเฉลี่ย | ค่า SD |
| 0 N ₇₀ | 12.72 | 13.25 | 14.69 | 13.92 | 11.81 | 13.28 | 1.10 |
| 5 _(70/30) N ₇₀ | 21.15 | 23.04 | 20.48 | 22.51 | 21.55 | 21.75 | 1.03 |
| 10 _(70/30) N ₇₀ | 19.84 | 18.18 | 17.80 | 20.13 | 16.45 | 18.48 | 1.52 |
| 15 _(70/30) N ₇₀ | 19.33 | 23.31 | 22.13 | 19.58 | 22.17 | 21.30 | 1.76 |
| 20 _(70/30) N ₇₀ | 26.70 | 25.10 | 23.84 | 29.85 | 25.27 | 26.15 | 2.30 |
| 25 _(70/30) N ₇₀ | 23.98 | 24.41 | 23.65 | 25.43 | 24.49 | 24.39 | 0.67 |
| 30 _(70/30) N ₇₀ | 23.08 | 24.22 | 27.28 | 26.32 | 25.25 | 25.23 | 1.66 |
| 0 N ₆₀ | 16.30 | 16.21 | 18.51 | 17.07 | 17.51 | 17.12 | 0.95 |
| 5 _(70/30) N ₆₀ | 21.42 | 22.62 | 21.25 | 20.98 | 22.57 | 21.77 | 0.77 |
| 10 _(70/30) N ₆₀ | 17.90 | 18.56 | 19.31 | 17.73 | 20.66 | 18.83 | 1.20 |
| 15 _(70/30) N ₆₀ | 17.80 | 16.08 | 17.90 | 17.71 | 20.27 | 17.95 | 1.50 |
| 20 _(70/30) N ₆₀ | 26.09 | 27.87 | 29.80 | 30.12 | 28.51 | 28.48 | 1.62 |
| 25 _(70/30) N ₆₀ | 35.86 | 40.44 | 37.97 | 43.87 | 38.69 | 39.37 | 3.01 |
| 30 _(70/30) N ₆₀ | 26.94 | 28.11 | 28.99 | 30.90 | 29.25 | 28.84 | 1.46 |
| 0 N ₅₀ | 21.43 | 24.11 | 21.46 | 23.55 | 21.46 | 22.40 | 1.32 |
| 5 _(70/30) N ₅₀ | 31.13 | 31.47 | 29.11 | 26.98 | 26.91 | 29.12 | 2.18 |
| 10 _(70/30) N ₅₀ | 27.21 | 26.28 | 28.42 | 25.66 | 28.13 | 27.14 | 1.18 |
| 15 _(70/30) N ₅₀ | 25.25 | 23.79 | 20.66 | 20.35 | 22.38 | 22.48 | 2.08 |
| 20 _(70/30) N ₅₀ | 12.44 | 10.26 | 18.18 | 15.39 | 13.76 | 14.01 | 2.99 |
| 25 _(70/30) N ₅₀ | 16.78 | 19.07 | 14.67 | 17.62 | 14.98 | 16.62 | 1.84 |
| 30 _(70/30) N ₅₀ | 13.85 | 13.23 | 11.34 | 13.86 | 11.16 | 12.69 | 1.34 |

ภาคผนวก จ

เครื่องทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ จ.1 เครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer
(FT-IR, Nicolet รุ่น Impact 400D)



รูปที่ จ.2 เครื่อง Tensile testing machine
(LLOYD: Model LR 5K)



รูปที่ ๓.3 เครื่อง Optical microscope
(OM, Olympus รุ่น BH2-UMA)



รูปที่ ๓.4 เครื่อง Gel permeation chromatograph
(GPC,Waters รุ่น 150-CV)



รูปที่ ๕.5 เครื่อง Thermogravimetric analyzer
(TGA, Netzsch รุ่น STA 409C)



รูปที่ ๕.6 เครื่อง Differential scanning calorimeter
(DSC, Netzsch รุ่น DSC 200)



รูปที่ ๗.7 เครื่องตัดชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงฉีกขาด



รูปที่ ๗.8 หัวตัดชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงฉีกขาด



รูปที่ ๑.๑ เครื่องวัดความหนาของชิ้นงาน (micrometer)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุพัฒน์ มูลสิน เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2522 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมพอลิเมอร์) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2543 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2544 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย