การศึกษาพอลิเมอร์ผสมจากยางโบรโมบิวทิลผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

STUDY OF BROMOBUTYL RUBBER/LOW DENSITY POLYETHYLENE BLENDS

พรหมพร พิมพ์เสน

PHROMPHON PIMPSEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-014-028

การศึกษาพอลิเมอร์ผสมจากยางโบรโมบิวทิลผสมพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ

STUDY OF BROMOBUTYL RUBBER/LOW DENSITY POLYETHYLENE BLENDS

พรหมพร พิมพ์เสน

PHROMPHON PIMPSEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-014-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF BROMOBUTYL RUBBER/LOW DENSITY POLYETHYLENE BLENDS

PHROMPHON PIMPSEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

KMITL-2012-SC-M-014-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2012

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาพอลิเมอร์ผสมจากยางโบรโมบิวทิลผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
Study of bromobutyl rubber/low density polyethylene blends

นักศึกษา นางสาวพรหมพร พิมพ์เสน
รหัสประจำตัว 51067913
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	(ลงนาม)
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี	(ลงนาม)
รศ.ดร.สมบัติ ธนะวันต์	(ลงนาม)
รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด	(ลงนาม)

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 9.30 – 12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(ลงนาม)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่....๒๐.... **เดือน**....มิ.ย....... **พ.ศ.**....55.........

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพอลิเมอร์ผสมจากยางโบรโมบิวทิลผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
นักศึกษา	นางสาวพรหมพร พิมพ์เสน
รหัสประจำตัว	51067913
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์ผสมจากยางโบรโมบิวทิล (Bromobutyl rubber, BIIR) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานเป็นวัสดุปิดฝาขวดทางการแพทย์ (Rubber closure) โดยศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงาน ได้แก่ อัตราส่วนผสมระหว่าง BIIR/LDPE ที่ 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w) ศึกษาชนิดของสารช่วยผสม ได้แก่ Fusabond® E MB-226DY, SP-1045, Engage® 8407 และ Vestenamer® 8012 ศึกษาปริมาณสารช่วยผสม Fusabond® E MB-226DY ที่ 1.3, 2.2 และ 3.0 phr รวมทั้งวิธีการด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เปรียบเทียบกับเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ทำการผสมยาง BIIR ผสมสูตรกับ LDPE ที่อุณหภูมิ 140°C แล้วทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ที่อุณหภูมิ 180°C จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สัณฐานวิทยา (Morphology) และสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของตัวอย่างชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนผสมของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่ามอดุลัสของยางที่ 300% (M300) ค่าความแข็งกดและค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืด มีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับชนิดและปริมาณสารช่วยผสม พบว่าไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดทำให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE สูงกว่าการผสมด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง

คำสำคัญ : พอลิเมอร์ผสม, ยางโบรโมบิวทิล, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, สารช่วยผสม, เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง, เครื่องผสมแบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study of Bromobutyl Rubber and Low Density Polyethylene Blends
Student	Miss Phromphon Pimpsen
Student ID	51067913
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud

ABSTRACT

In this thesis, blends of bromobutyl rubber and low density polyethylene (BIIR/LDPE) were studied in order to be used as pharmaceutical rubber closures. Some factors affecting blend properties were studied, such as, blend ratios of BIIR/ LDPE (70/30, 60/40 and 50/50 (w/w)), types of compatibilizers, i.e., Fusabond® E MB-226DY, SP-1045, Engage®8407, and Vestenamer® 8012 compatibilizers, loading of Fusabond® E MB-226DY compatibilizer (1.3, 2.2 and 3.0 phr). Compounding techniques i.e., two-roll mill and internal mixer were also studied. Compounded BIIR was mixed with LDPE at 140°C. Then, samples of BIIR/LDPE blends were formed at 180°C by using a compression molding machine. Then, samples of BIIR/LDPE blends were tested for mechanical, morphological and thermal properties. As the ratios of LDPE in BIIR/LDPE blends were increased, it was found that %elongation at break was decreased. However, rubber modulus at 300% (M300), hardness and tension set at 200% were increased. It was found that types and % loading of compatibilizers had insignificant effects on mechanical and thermal properties of the blends. By compounding with internal mixer, mechanical properties of BIIR/LDPE blends were higher than those compounding with two-roll mill.

Keyword : Polymer blends, Bromobutyl rubber (BIIR), Low density polyethylene (LDPE), Compatibilizers, Two-roll mill, Internal mixer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยการให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้จาก รศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และความเอาใจใส่จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมบัติ ธนะวันต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยให้ความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะและตอบปัญหาข้อสงสัยต่างๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย นายศิริวัฒน์ ระดาบุตร และนางสาวภัทราพร สงวนสัตย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างชิ้นงานและให้คำแนะนำต่างๆ ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ บริษัทเอส เค โพลีเมอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางโบรโมบิวทิล สารเติมแต่งต่างๆ และข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้นเพื่อใช้ในงานวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีและบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี-พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นักศึกษาทุกคนที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาตลอดจนสำเร็จสมบูรณ์

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วซึ่งให้ความกรุณาช่วยเหลือ ทางผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พรหมพร พิมพ์เสน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**5**
2.1 พอลิเมอร์ผสม	5
2.1.1 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	6
2.1.2 สารช่วยผสม	8
2.2 ยางฮาโลบิวทิล	14
2.2.1 ยางโบรโมบิวทิล	15
2.2.2 สารเคมีสำหรับยางโบรโมบิวทิล	16
2.3 พอลิเอทิลีน	20
2.3.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	21
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	**35**
3.1 แผนการดำเนินงาน	35
3.2 ยางและสารเคมี	36
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 วิธีการทดลอง	40
3.4.1 การผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง	40
3.4.2 การผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมแบบปิด	41
3.4.3 การขึ้นรูปจุกยางขวดน้ำเกลือ	42
3.5 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสม	42
3.5.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล	42
3.5.2 ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density, n)	44
3.5.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	44
3.5.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA	45
3.5.5 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค AFM	46
3.5.6 การทดสอบการรั่วซึมของจุกยาง	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	**49**
4.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม	49
4.1.1 ศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง	49
4.1.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล	51
4.1.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา	55
4.2 ศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสม	57
4.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล	59
4.2.2 ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยง	61
4.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน	62
4.2.4 ศึกษาสัณฐานวิทยา	66
4.3 ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม	67
4.3.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล	67
4.3.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อน	70
4.4 ศึกษาผลของวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด	71
4.4.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล	71
4.4.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	**76**
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.1.1 อัตราส่วนผสมระหว่างยางโบรโมบิวทิลกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	76
5.1.2 ชนิดและปริมาณสารช่วยผสม	76
5.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	82
ประวัติผู้เขียน	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ปริมาณการผลิตและการใช้ยางสังเคราะห์ในช่วงปี พ.ศ. 2548-2553	1
1.2	เกณฑ์การทดสอบขั้นพื้นฐานสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ประเภทจุกยางขวดน้ำเกลือ	3
2.1	เครื่องมือการผสมด้วยแรงเชิงกล	7
2.2	ตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่เลือกใช้สารช่วยผสมประเภทที่มีโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์	13
2.3	ตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่เลือกใช้สารช่วยผสมประเภทที่มีโครงสร้างที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี	13
2.4	ระบบเชื่อมโยงแบบต่างๆ ของยางโบรโมบิวทิล	19
2.5	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพอลิเอทิลีน	21
2.6	สมบัติบางประการของ LDPE	24
2.7	ค่าความหนาแน่นเชื่อมโยง (n) ของพอลิเมอร์ผสม CSM/IIR และ CSM/CIIR	26
2.8	สูตรยางเบื้องต้นจากบริษัทเอส เค โพลีเมอร์ จำกัด	33
2.9	ผลการทดสอบจากสูตรยางเบื้องต้น	34
3.1	สมบัติบางประการของ Lanxess Bromobutyl X2	37
3.2	สมบัติบางประการของ Iceberg®	37
3.3	สมบัติบางประการของ LD 1630 J	37
3.4	สมบัติบางประการของ Fusabond® E MB-226DY (LLDPE-g-MA)	38
3.5	สมบัติบางประการของ Engage®8407	38
3.6	สมบัติบางประการของ SP-1045	38
3.7	สมบัติบางประการของ Vestenamer® 8012	39
3.8	สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ	41
4.1	อักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย	49
4.2	ค่าความหนืดมูนนี่ของพอลิเมอร์ผสม	50
4.3	ผลการทดสอบการรั่วซึม	57
4.4	ผลการเปรียบเทียบค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30) กับชนิดที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30) กับชนิดที่เติมสารช่วยผสม (PEm30f(2.2)) 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และเภสัชกรรมจากยางบิวทิลและยางฮาโลบิวทิล 2

2.1 ความสัมพันธ์ของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ร่วมในพอลิเมอร์ผสม 5

2.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (ก) พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน และ (ข) พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน 6

2.3 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน 9

2.4 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีผสมเข้ากันได้แบบบางส่วน 9

2.5 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน 10

2.6 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีร่วมผสม 10

2.7 ลักษณะการทำงานของสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม (ก) ไดบล๊อก (ข) ไตรบล๊อก (ค) มัลติกราฟต์ และ (ง) ซิงเกิลกราฟต์ 12

2.8 แผนภาพกระบวนการผลิตยางฮาโลบิวทิล 14

2.9 การเปรียบเทียบโครงสร้างของยาง [ก] โบรโมบิวทิลและ [ข] ยางคลอโรบิวทิล 15

2.10 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถันร่วมกับซิงค์ออกไซด์และ MBTS 16

2.11 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันร่วมกับ MBTS 17

2.12 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของซิงค์ออกไซด์ในยางโบรโมบิวทิล 17

2.13 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีน 20

2.14 การผลิต LDPE จากกระบวนการใช้ถังปฏิกรณ์ 22

2.15 การผลิต LDPE จากกระบวนการใช้ท่อปฏิกรณ์ 22

2.16 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการไหลกับความหนาแน่นของ LDPE สำหรับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ 23

2.17 สัดส่วนการขึ้นรูปเพื่อการใช้งาน LDPE 23

2.18 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม CSM/IIR และ CSM/CIIR (ก) ค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืด (ข) ค่าความแข็งแรงดึง และ (ค) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด 25

2.19 ปฏิกิริยาเชื่อมโยงและการตัดสายโซ่ของ PP 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 กราฟความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม MNR/HDPE เท่ากับ 60/40 (w/w) ที่สารช่วยผสมแตกต่างกัน	27
2.21 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง MNR กับ PhHRJ-PE	28
2.22 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง MNR กับ PhSP-PE	28
2.23 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง MNR กับ HDPE-g-MA	29
2.24 กราฟความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม MNR/HDPE เท่ากับ 60/40 (w/w) ที่ปริมาณ PhHRJ-PE แตกต่างกัน	29
2.25 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NR กับ SP-1045	30
2.26 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NR กับ HRJ-10518	31
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของ NBR/PP TPVs	32
2.28 AFM แสดงสัณฐานวิทยาของ NBR/PP TPVs ที่อัตราส่วน (ก) 50/50, (ข) 60/40 และ (ค) 70/30 (w/w)	32
3.1 แม่แบบรูปจุกยาง	42
3.2 สรุปแผนผังการดำเนินงานวิจัย BIIR/LDPE Blends	47
4.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง	50
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)	51
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)	52
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)	52
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300 % ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)	53
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)	53
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	AFM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน (ก) 70/30, (ข) 60/40 และ (ค) 50/50 (w/w)	55
4.9	Force-distance curve ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30 (w/w)	56
4.10	โครงสร้างของสารช่วยผสม (ก) Fusabond® E MB-226DY (ข) SP-1045 (ค) Vestenamer® 8012 และ (ง) Engage® 8407	58
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)	59
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)	60
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)	60
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)	61
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)	61
4.16	เปรียบเทียบความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสม กับพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ	62
4.17	เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสมกับพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC	63
4.18	เทอร์โมแกรม DMA ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เติมสารช่วยผสมกับตัวอย่างที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ (ก) ค่ามอดุลัสสะสม (E') (ข) ค่ามอดุลัสสูญเสีย (E") และ (ค) ค่า tan δ	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.19 AFM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE (ก) PEm30 (ข) PEm30f(2.2) (ค) PEm30n(2.2) (ง) PEm30r(2.2) และ (จ) PEm30v(2.2) 66

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับ ปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr 68

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับ ปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr 68

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr 69

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr 69

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสมBIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr 70

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer 72

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer 72

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer 73

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer 73

4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer 74

4.30 การเปรียบเทียบความหนาแน่นเชื่อมโยง (n) ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสม กับพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสม Vestenamer จากวิธีการผสมที่แตกต่างกัน 74

4.31 AFM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE (ก) PEm30 (ข) InPEm30 (ค) PEm30v(2.2) และ (ง) InPEm30v(2.2) 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

AFM	กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
BIIR	ยางโบรโมบิวทิล
CIIR	ยางคลอโรบิวทิล
DSC	Differential Scanning Calorimeter
DMA	เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัติ
ΔG	ผลต่างของพลังงานอิสระในการผสม
ΔH	ผลต่างของเอนทาลปี
LDPE	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
MA-g-PE	พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์
MDR	เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน
MFI	ดัชนีการไหล
n	ความหนาแน่นเชื่อมโยง
phr	ส่วนในร้อยส่วนของยาง
ΔS	ผลต่างของเอนโทรปี
TPEs	เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์
T_g	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
T_m	อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก
$T_{c(90)}$	เวลาเชื่อมโยง
t_{s2}	เวลาเริ่มเชื่อมโยง
V_s	ปริมาตรโมลาร์ของตัวทำละลาย
ν_r	สัดส่วนโดยปริมาตรของยางในเจลยางที่บวมตัว
χ_1	ตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในช่วง พ.ศ. 2548-2553 มีการผลิตยางสังเคราะห์ของโลก 77.159 ล้านตัน โดยมีแนวโน้มการผลิตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 [1] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.1 กลุ่มศึกษายางระหว่างประเทศ (International Rubber Study Group, IRSG) คาดการณ์ว่า ในปี พ.ศ. 2555 ความต้องการยางสังเคราะห์ในตลาดโลกจะเพิ่มขึ้นเป็น 15.9 ล้านตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.4 ในขณะที่ปริมาณการผลิตยางสังเคราะห์อยู่ที่ 15.6 ล้านตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.4 [2]

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตและการใช้ยางสังเคราะห์ในช่วงปี พ.ศ. 2548-2553 [1, 3]

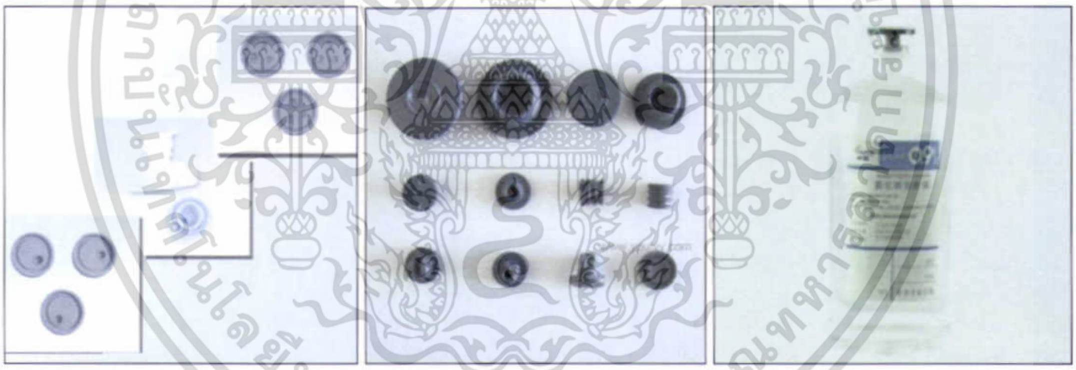
ปี	การผลิต (ล้านตัน)	การใช้ (ล้านตัน)
2548	12.136	11.936
2549	12.690	12.691
2550	13.430	13.308
2551	12.748	12.619
2552	12.168	11.878
2553	13.987	13.845

การใช้งานยางสังเคราะห์เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์โดยการเชื่อมโยงยางให้กลายเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ (3-Dimensional network) หรือเทอร์โมเซต (Thermoset) ยังถือว่ามีปัญหาเนื่องจากย่อยสลายยาก และไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [1] ดังนั้นการผลิต ค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเทอร์โม-พลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers, TPEs) จึงเป็นที่สนใจในตลาดโลกเพิ่มมากขึ้น โดยที่ TPEs ในปัจจุบันมีอัตราการเติบโตอย่างรวดเร็ว มีแนวโน้มของปริมาณความต้องการใช้ TPEs ในตลาดการค้าพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นปีละ 6 % จนถึงปี 2013 โดยมีความต้องการสูงถึง 4.2 ล้านตัน [4] เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เป็นวัสดุที่รวมเอาสมบัติของเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง (Rubber) มาไว้ด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องขึ้นรูปสำหรับเทอร์โมพลาสติก เช่น เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) เครื่องอัดรีด (Extruder) และเครื่องเป่าขึ้นรูป (Blow molding machine) เป็นต้น นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ช่วยลดเวลาในการขึ้นรูป และยังสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ซึ่งตรงข้ามกับยางที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหม่ มีข้อจำกัดสำหรับเครื่องมือในการขึ้นรูปชิ้นงาน ใช้เวลาในการขึ้นรูปนาน และขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนได้ยาก จากสมบัติดังกล่าวจึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

ในปัจจุบันชิ้นส่วนสำหรับการใช้ในทางการแพทย์และทางเภสัชกรรม เช่น จุกปิดขวดยา จุกยางขวดน้ำเกลือ ส่วนใหญ่จะใช้ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) หรือยางฮาโลบิวทิล (Halobutyl rubber, XIIR) เช่น ยางโบรโมบิวทิล (Bromobutyl rubber, BIIR) หรือยางคลอโรบิวทิล (Chlorobutyl rubber, CIIR) ดังรูปที่ 1.1 เนื่องจากมีการคงรูปสูง มีอัตราการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ ช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารภายในขวดบรรจุภัณฑ์ และยังมีความทนทานต่อสารเคมี ที่ช่วยลดปัญหาการทำปฏิกิริยากับสารเคมี อย่างไรก็ดีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากยางฮาโลบิวทิวด้วยเทคนิคเดิมของยาง ได้แก่ การกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ใช้เวลานานในการขึ้นรูป โดยเฉพาะการเชื่อมโยง (Crosslinking) ทำให้อัตราการผลิตต่ำ นอกจากนี้ยังมีต้นทุนการผลิตสูงอันเนื่องจากขอบเศษเหลือ (Scrap) จากการขึ้นรูปที่เป็นยางเชื่อมโยงเทอร์โมเซต ไม่สามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้ ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะปรับปรุงวัสดุใหม่เพื่อเพิ่มทางเลือกในการขึ้นรูปชิ้นงานที่หลากหลายมากขึ้น



รูปที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และเภสัชกรรมจากยางบิวทิลและยางฮาโลบิวทิล [5-7]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมจากยางโบรโมบิวทิล (BIIR) ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เนื่องจากโดยปกติแล้ว LDPE เป็นพอลิโอลิ-ฟินส์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic polyolefins) ที่มีสมบัติทนสารเคมี ไม่เป็นพิษ ราคาถูก และอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ในช่วง 120-140°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิผสมของ BIIR [8] ส่วนใหญ่พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกมักเป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาสารช่วยผสม (Compatibilizers) เพื่อช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากสารช่วยผสมช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจายตัวที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็กแล้วทำให้สมบัติยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์จำพวกจุกยาง ได้แก่ จุกยางขวดน้ำเกลือ จะเน้นศึกษาสมบัติบางประการเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์และทางเภสัชกรรมโดยให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ศึกษาการรั่วซึม (Leak test) ของชิ้นงาน โดยมีเกณฑ์การทดสอบขั้นพื้นฐาน ดังตารางที่ 1.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยเทคนิค AFM เพื่อศึกษาการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคยางกับพลาสติก และการกระจายตัวของทั้งสองวัฏภาค ศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ด้วยเทคนิค DSC และเทคนิค DMA เป็นต้น

ตารางที่ 1.2 เกณฑ์การทดสอบขั้นพื้นฐานสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ประเภทจุกยางขวดน้ำเกลือ

การทดสอบ	เกณฑ์	มาตรฐาน
ค่าความแข็งกด (Hardness)	40-60 (Shore A)	ASTM D 2240
เปอร์เซ็นต์การเสียรูปถาวรหลังการดึง (%Tension set) ที่อุณหภูมิห้อง, 200% ดึงยืด	$\leq$ 10 %	ASTM D 412
การรั่วซึม (Leak test)	$\leq$ 50 ml	BS 3263:1960

<u>หมายเหตุ</u> ข้อมูลจากบริษัทเอส เค โพลีเมอร์ จำกัด

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาพอลิเมอร์ผสมจากยางโบรโมบิวทิลผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (BIIR/LDPE) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ เช่น ผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม ผลของชนิดและปริมาณสารช่วยผสม เครื่องมือที่ใช้ในการผสม แล้วทำการศึกษาสมบัติของวัสดุ เช่น สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ผสมจากยางสังเคราะห์กับพอลิโอลิฟินส์
2. ศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)
3. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารช่วยผสมที่ปริมาณ 1.3, 2.2 และ 3.0 phr (3, 5 และ 7% ของ LDPE)
4. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค AFM สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ DMA และความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่มีผลอันเนื่องมาจากเครื่องผสมที่ต่างชนิดกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูลและตัวอย่างการศึกษาเพื่อนำไปใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจากยางผสมพลาสติกเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมทดแทนยางวัลคาไนซ์

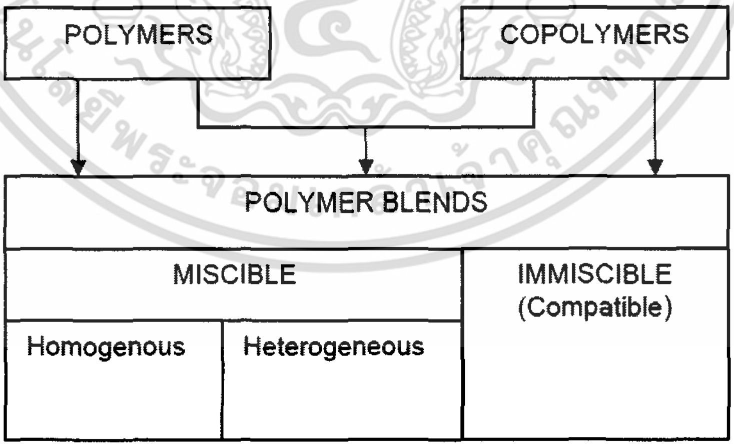
2. เป็นแนวทางในการผลิตพอลิเมอร์ผสมในเชิงพาณิชย์เพื่อลดต้นทุนผลิตภัณฑ์จากยางสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ผสม [9-11]

จากความต้องการผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่หลากหลายของตลาด ทำให้ผู้ผลิตพอลิเมอร์ได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ผสมขึ้นมาเป็นทางเลือกหนึ่งในการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ให้ตรงตามความต้องการของตลาด เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) คือสารผสมที่เกิดจากผสมพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไปหรือพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ร่วมในพอลิเมอร์ผสมได้ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้นการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะ จึงเกิดจากการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้ากันเพื่อปรับปรุงสมบัติที่ไม่สามารถได้จากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว การเตรียมพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่มักใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงวิศวกรรมที่มีความทนทานต่อแรงเชิงกลและอุณหภูมิสูงซึ่งได้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังนั้นจึงทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นโดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีความยุ่งยาก และซับซ้อนกว่าการผสม ซึ่งถือว่าเป็นการผสมที่ง่าย สะดวกและราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่จากมอนอเมอร์ นอกจากนี้ยังช่วยลดขยะเศษพอลิเมอร์จากผลิตภัณฑ์โดยการนำขยะเศษพอลิเมอร์มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นกลายเป็นพอลิเมอร์ผสมได้



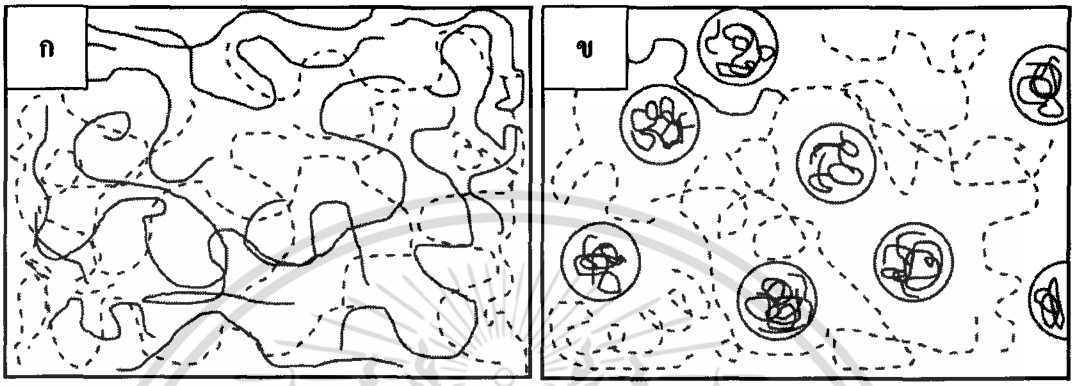
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ร่วมในพอลิเมอร์ผสม [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด สามารถจำลองสัณฐานวิทยาได้ดังรูปที่ 2.2 โดยที่กำหนดให้พอลิเมอร์ A (เส้นทึบ) ผสมกับพอลิเมอร์ B (เส้นปะ)

(ก) พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend)

(ข) พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend)



รูปที่ 2.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (ก) พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) และ (ข) พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) [11]

2.1.1 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมมีหลากหลายวิธี ดังนี้

1. การผสมด้วยแรงเชิงกล (Mechanical mixing) เป็นการผสมพอลิเมอร์โดยใช้แรงเชิงกล รวมถึงกระบวนการแปรรูปซึ่งเป็นกระบวนการหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting temperature, T_m)
2. การผสมด้วยการละลาย (Solution casting) เป็นการผสมพอลิเมอร์ด้วยการละลายพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดในตัวทำละลาย โดยการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีการละลาย (Solubility parameter, δ) ข้อเสียของวิธีนี้ คือเมื่อได้พอลิเมอร์ผสมแล้วต้องทำการระเหยตัวทำละลาย
3. การผสมในสถานะของเหลว (Latex blending) เป็นการผสมพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization reaction)
4. การผสมในสถานะผง (Fine powder mixing) เป็นการผสมพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะผง เช่น การผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer)
5. การผสมแบบสอดประสาน (IPNs) เป็นการผสมพอลิเมอร์โดยการเติมมอนอเมอร์ที่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวทำละลายลงไปในพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งแล้วทำให้เกิดการปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิธีการผสมที่ได้รับความนิยม คือการผสมด้วยแรงเชิงกล เนื่องจากความสะดวก รวดเร็ว ความง่ายในการผสม ส่งผลให้ระยะเวลา ต้นทุนการผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์น้อยกว่าวิธีการอื่น ซึ่งการผสมด้วยแรงเชิงกลเป็นกระบวนการผสมโดยมีการหลอมเหลวพอลิเมอร์ด้วยความร้อน สำหรับเครื่องมือการผสมด้วยแรงเชิงกลแบ่งออกได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เครื่องมือการผสมด้วยแรงเชิงกล [9]

Machine	Function
Continuous Mixers	
- Twin-screw extruder	primary polymer blend compounder
- Twin-shaft intensive mixers	primary polymer blend compounder
- Single-screw extruder	second choice
- Single shaft mixer	second choice
Batch Mixers	
- Roll mills	Laboratory or short runs
- Internal sigma-blade mixers	Laboratory or short runs
- Kinetic energy mixers	Laboratory or short runs
Special Machines	
- Plastificator patfoort	Blending or recycling
- Reverser	Recycling
- Multi-stage systems	Large volume, primary

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ของการผสมเป็นหลัก การผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ดีจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน โดยแต่ละวัฏภาคจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ด้อยกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสมด้วยเหตุนี้การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยส่วนมากมักใช้สารช่วยผสม (Compatibilizer) เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สารช่วยผสม

จากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ส่วนใหญ่มักเป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน คือพลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing) มีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดการแยกชั้นวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมกัน ดังนั้น Thermodynamic miscibility จึงเป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการผลิตพอลิเมอร์ผสม ซึ่งความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมนี้จะถูกกำหนดโดยสมดุลของเอนทาลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy) กล่าวคือความสามารถในการเข้ากันได้ หมายถึง ความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือการทำปฏิกิริยาขณะทำการผสม ซึ่งจะส่งผลต่อค่าพลังงานอิสระในการผสมสารโมเลกุลเล็กๆนั้นเอนโทรปีจะมีค่าสูงพอที่จะเกิดความเข้ากันได้ แต่สำหรับพอลิเมอร์เอนโทรปีจะมีค่าต่ำจนเกือบเป็นศูนย์ จึงทำให้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมถูกกำหนดโดยเอนทาลปีเพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระในการผสม เป็นดังสมการ [12]

$$\Delta G = \Delta H - T\,\Delta S \qquad (2.1)$$

โดย ΔG = ผลต่างของพลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing)
ΔH = ผลต่างของเอนทาลปี (Enthalpy)
ΔS = ผลต่างของเอนโทรปี (Entropy)
T = อุณหภูมิ (Temperature)

การที่พอลิเมอร์จะผสมเข้ากันได้ พลังงานอิสระในการผสมของระบบจะต้องมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

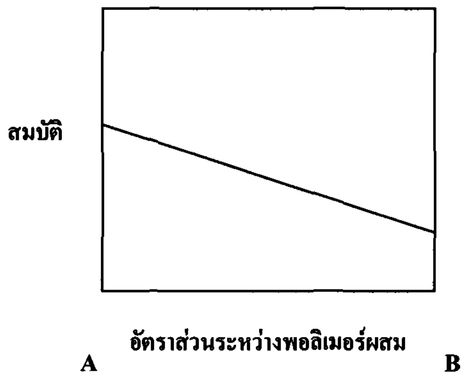
$$\Delta G < 0$$
$$(\partial^2 \Delta G/\partial \phi^2)_{P,T} < 0$$

เมื่อนำสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองที่ผสมกันมาเขียนกราฟ จะได้ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมเป็น 4 กรณี [13] ดังนี้

1. กรณีที่ 1 ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible)

ถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุล และเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อเดียวกัน สมบัติโดยทั่วไปที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด จึงทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดก็เป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.3

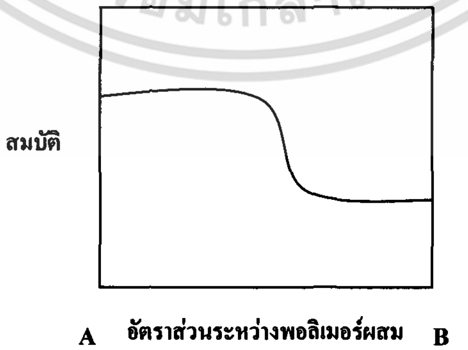
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [13]

2. กรณีที่ 2 ผสมเข้ากันได้แบบบางส่วน (Semi-compatible)

ถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่สามารถผสมเข้ากันได้และเกิดการแยกวัฏภาค โดยพอลิเมอร์หลักที่มีอัตราส่วนที่มากกว่าจะเป็นวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่อง (Matrix phase) ทำหน้าที่ควบคุมสมบัติทั้งหมดของพอลิเมอร์ผสม โดยที่วัฏภาครองที่มีอัตราส่วนที่น้อยกว่าจะเป็นวัฏภาคกระจายตัว (Dispersed phase) จะทำหน้าเสมือนเป็นสารตัวเติมซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เพราะฉะนั้นที่อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B ที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ A สูงกว่า สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะคล้ายกับพอลิเมอร์ A และเมื่ออัตราส่วนพอลิเมอร์ B สูงกว่า สมบัติของพอลิเมอร์ผสมย่อมคล้ายกับพอลิเมอร์ B แต่เมื่ออัตราส่วนระหว่าง A และ B เท่าๆกัน จะทำให้เกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่องขึ้นสองวัฏภาค (Cocontinuous phase) และเมื่อ A มากกว่า 50% ทำให้เกิดการเปลี่ยนกลับของวัฏภาค (Phase inversion) ด้วยการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็วจากช่วงหนึ่ง (Plateau) ไปเป็นอีกช่วงหนึ่ง ด้วยเหตุนี้จึงได้กราฟเส้นโค้งรูปตัวเอส ดังรูปที่ 2.4

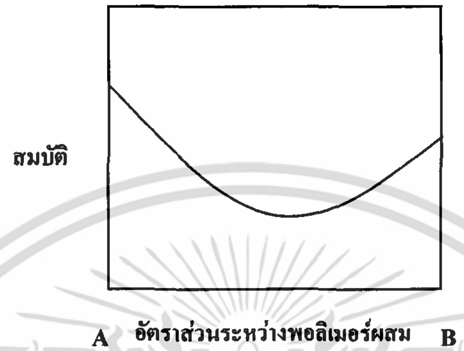


รูปที่ 2.4 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีผสมเข้ากันได้แบบบางส่วน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กรณีที่ 3 ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible)

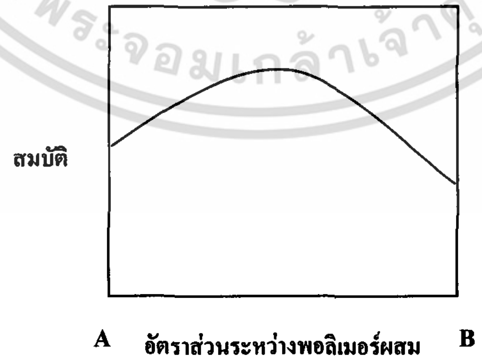
ถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่สามารถผสมเข้ากันได้ซึ่งกันและกันอย่างสมบูรณ์และแยกออกเป็นวัฏภาค โดยระหว่างผิวของวัฏภาค (Interphase) มีแรงดึงดูดระหว่างกันน้อยมาก ดังนั้นอาจทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์ผสมแต่ละตัว จึงทำให้ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [13]

4. กรณีที่ 4 ร่วมผสม (Synergistic)

กรณีนี้พอลิเมอร์ผสมจะแสดงสมบัติที่ดีกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัว เนื่องจากมีการปรับปรุงส่วนผสมที่สำคัญในทางปฏิบัติ เช่น การใช้วัฏภาคของยางที่ทำหน้าที่กระจายตัวให้ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของวัฏภาคพลาสติก ที่ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคหลักซึ่งมีลักษณะคล้ายแก้วและเปราะ ตัวอย่างเช่น PS/ABS จึงทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำลง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองในกรณีร่วมผสม [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ เรียกว่า "Heterogeneous blend" ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่องของพอลิเมอร์หลักชนิดหนึ่ง แล้วมีวัฏภาคกระจายตัวของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งอยู่ภายใน ซึ่งแยกจากกันอยู่อย่างชัดเจนโดยมีลักษณะเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Phase boundary) พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้นั้นอาจเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการดังนี้ [14]

1. ความมีขั้ว (Polarity) ของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างคล้ายกันหรือความมีขั้วคล้ายกันก็จะมีความเข้ากันได้มากกว่า แต่ถ้าแตกต่างจะไม่สามารถเข้ากันได้

2. น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะทำให้เกิดการผสมที่ดีเนื่องจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่ที่ง่าย ถึงแม้ว่าจะส่งผลให้ค่าเอนโทรปีเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ก็ยังสามารถเข้ากันได้ ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลก็จะไม่สามารถเข้ากันได้

3. อัตราส่วนของพอลิเมอร์ (Ratio of polymers) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความสามารถเข้ากันได้นั้นอาจเนื่องมาจากวัฏภาคกระจายตัวที่น้อยละลายในวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่องที่มากกว่า ดังนั้นอัตราส่วนของพอลิเมอร์ถือว่ามีความสำคัญต่อความเข้ากันได้หรือไม่ได้ของพอลิเมอร์ผสม

4. แรงดึงดูดจากหมู่ฟังก์ชันเฉพาะ (Specific group attraction) พอลิเมอร์อาจเกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน อันเนื่องมาจากแรงดึงดูดจากพันธะไฮโดรเจน เป็นต้น

5. ความเป็นผลึก (Crystallinity) การแยกตัวของวัฏภาคเกิดเนื่องมาจากการเกิดผลึกของพอลิเมอร์แต่ละตัว

จากสาเหตุดังกล่าวที่ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเกิดข้อบกพร่องหลายประการ ดังนี้ [13]

1. สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) คือพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันส่วนของวัฏภาคกระจายตัวไม่สามารถที่จะยึดติดกับวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่องได้

2. ค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่าง 2 วัฏภาค (Interfacial tension) คือความแตกต่างระหว่างค่าความตึงผิวระหว่าง 2 วัฏภาคของวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่องกับวัฏภาคกระจายตัว เนื่องจากส่วนที่เป็นวัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเม็ดเล็กใหญ่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าแรงตึงผิวต่างกัน โดยขนาดเม็ดใหญ่จะมีพลังงานสูง และมีเสถียรภาพต่ำ ส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่าย รับแรงได้น้อย

3. สัณฐานวิทยาที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

4. สมบัติเชิงกลต่ำ

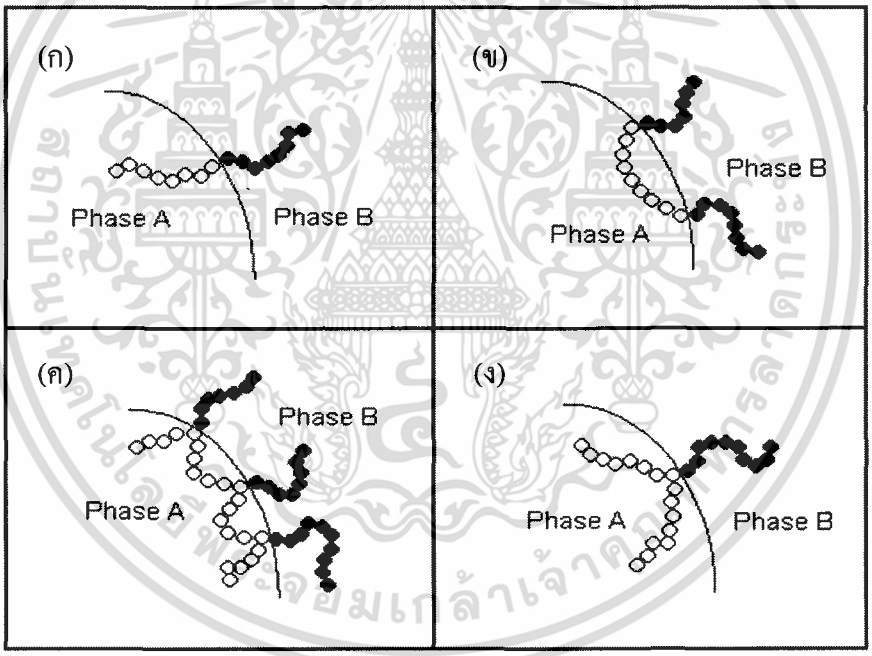
จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยมีการนำเสนอสารช่วยผสมมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ และให้ผลในการช่วยลดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจายตัวที่มีขนาดเล็กที่ทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ [15]

1. การเติมสารช่วยผสมก่อนหรือขณะทำการผสม สามารถแบ่งได้ 2 กรณี

1.1 Non-reactive blending คือการเติมสารช่วยผสมลงไปในพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรทางโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมแบบไดบล๊อก แบบไตรบล๊อก แบบกราฟต์ หรือแบบสุ่ม โดยสามารถจำลองการทำงานของสารช่วยผสมประเภทนี้ได้ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่เลือกใช้สารช่วยผสมประเภทนี้ แสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.7 ลักษณะการทำงานของสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม (ก) ไดบล๊อก (ข) ไตรบล๊อก (ค) มัลติกราฟต์ และ (ง) ซิงเกิลกราฟต์ [11]

1.2 Reactive blending เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะผสม หรืออาจเกิดการกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้หมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่เลือกใช้สารช่วยผสมประเภทนี้ แสดงดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่เลือกใช้สารช่วยผสมประเภทที่มีโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ [11]

Type of blend	Major component	Minor component	Compatibilizer
A/BA-B block	PE or PS PBT or PS	PS or PE PBT or PS	HPB-b-PS, SEBS, SBS PS-b-PBT or PS-b-PET
A/B/A-C block	PPO or PBT PS or PC	PPO or PBT PC or PS	PS-b-PET or PS-b-PBT PS-b-PCL
A/B/C-D block	Phenoxy PPO	PPO SAN	PS-b-PMMA PS-b-PMMA
A/B/A/B graft	EPDM PBT	PMMA PS	EPDM-g-MMA PRT-g-PS

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่เลือกใช้สารช่วยผสมประเภทที่มีโครงสร้างที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี [11]

Major component	Minor component	Compatibilizer
PPT	EPDM	EPM-g-MA
iPP or PA66	PA66 or iPP	iPP-g-MA
LDPE	PA	PE-g-MA
PP	PA	PP-g-MA

2. การปรับอัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio, λ) ระหว่างวัฏภาคกระจายตัวกับวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่องให้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ

$$\lambda = \eta_2 / \eta_1 \qquad (2.2)$$

เมื่อ λ = อัตราส่วนความหนืด

η_1 = ความหนืดของวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่อง

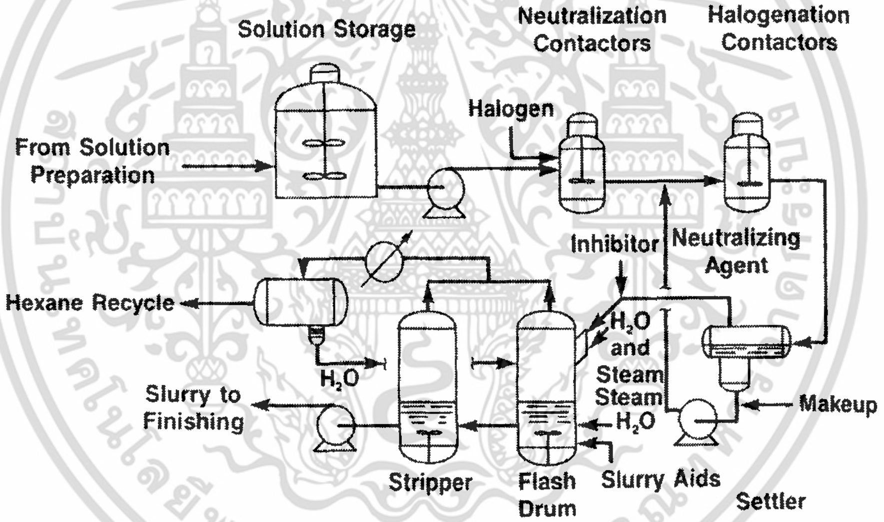
η_2 = ความหนืดของวัฏภาคกระจายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปรับอัตราส่วนความหนืดให้มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 1 ($\lambda \approx 1$) จะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยช่วยให้พอลิเมอร์ผสมปรับเข้าสู่สัณฐานวิทยาที่เสถียรได้เร็วยิ่งขึ้น ลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค และทำให้วัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง

2.2 ยางฮาโลบิวทิล [16-17]

ยางฮาโลบิวทิล (Halobutyl rubber, XIIR) เกิดจากการทำปฏิกิริยาฮาโลจิเนชัน (Halogenation) ระหว่างยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) กับก๊าซคลอรีน (Cl_2) หรือก๊าซโบรมีน (Br_2) ได้เป็นยางคลอโรบิวทิล (Clorobutyl rubber, CIIR) หรือยางโบรโมบิวทิล (Bromobutyl rubber, BIIR) ตามลำดับ ซึ่งในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาฮาโลจิเนชันจะต้องมีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้ยางฮาโลบิวทิลยังมีพันธะคู่เหลืออยู่ โดยกระบวนการผลิตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพกระบวนการผลิตยางฮาโลบิวทิล [18]

ในเชิงการค้ายางคลอโรบิวทิลจะมีคลอรีนอยู่ประมาณ 1.1-1.3% โดยน้ำหนัก ในขณะที่ยางโบรโมบิวทิลจะมีโบรมีนอยู่ประมาณ 1.9-2.1% โดยน้ำหนัก เนื่องจากยางฮาโลบิวทิลมีปริมาณฮาโลเจนอยู่น้อยมาก จึงไม่จัดว่ายางชนิดนี้เป็นยางที่มีขั้ว เพราะการเติมหมู่ฮาโลเจนเข้าไปในยางบิวทิลจะช่วยให้ยางมีความเป็นขั้วสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ อะตอมของธาตุฮาโลเจนยังทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาคงรูปหรือปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันสูงขึ้น ยางฮาโลบิวทิลจึงคงรูปได้เร็ว มีระดับการคงรูปสูง และมีความต้านทานต่อการเกิดการคืนตัวในระหว่างการคงรูปได้ดีขึ้น

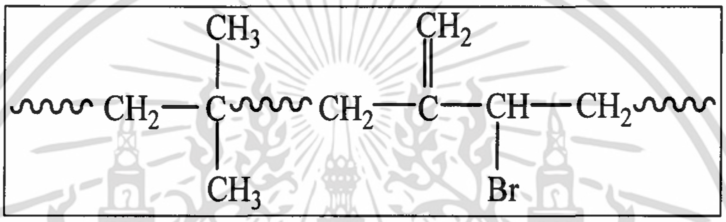
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางฮาโลบิวทิลมีสมบัติทั่วไปดีกว่ายางบิวทิลเล็กน้อย กล่าวคือมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่า มีความทนทานต่อโอโซน ความร้อน สภาพอากาศ และสารเคมีต่างๆได้ดีกว่า แต่มี Hysteresis สูงกว่า โดยที่สมบัติของยางคลอโรบิวทิลจะอยู่ระหว่างยางโบรโมบิวทิลกับยางบิวทิล ซึ่งยางคลอโรบิวทิลกับยางบิวทิลไม่สามารถใช้เปอร์ออกไซด์ในการคงรูปได้ ในขณะที่ยางโบรโมบิวทิลสามารถใช้เปอร์ออกไซด์ในการคงรูปได้

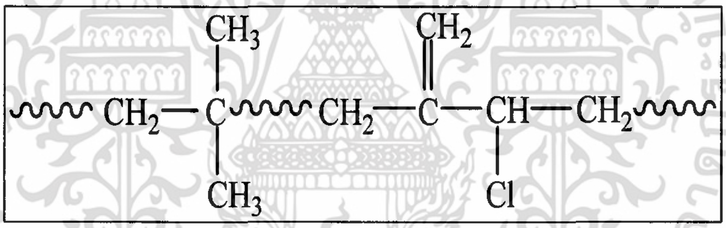
2.2.1 ยางโบรโมบิวทิล

ยางโบรโมบิวทิลเป็นยางที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับยางคลอโรบิวทิล โดยจะมีโบรมีนอะตอมแทนที่ในตำแหน่งของคลอรีนอะตอมในยางคลอโรบิวทิล ดังรูปที่ 2.9

[ก]



[ข]



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบโครงสร้างของ [ก] ยางโบรโมบิวทิลและ [ข] ยางคลอโรบิวทิล [19]

เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างของยางทั้งสองชนิด พบว่ามีความแตกต่างที่สำคัญของยางโบรโมบิวทิลกับยางคลอโรบิวทิลที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากพันธะ C-Br กับ C-Cl ดังนี้

1. ความสามารถในการเชื่อมโยงสำหรับ C-Br
2. มีตัวเลือกสำหรับระบบการเชื่อมโยงมากกว่า
3. โดยทั่วไปแล้วจะมีการเชื่อมโยงที่เร็วกว่าและเวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time) ที่สั้นกว่ามีแนวโน้มสำหรับการเชื่อมโยงร่วม (Covulcanization) กับยางชนิดไม่อิ่มตัวสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สารเคมีสำหรับยางโบรโมบิวทิล [20-21]

1. สารเชื่อมโยง

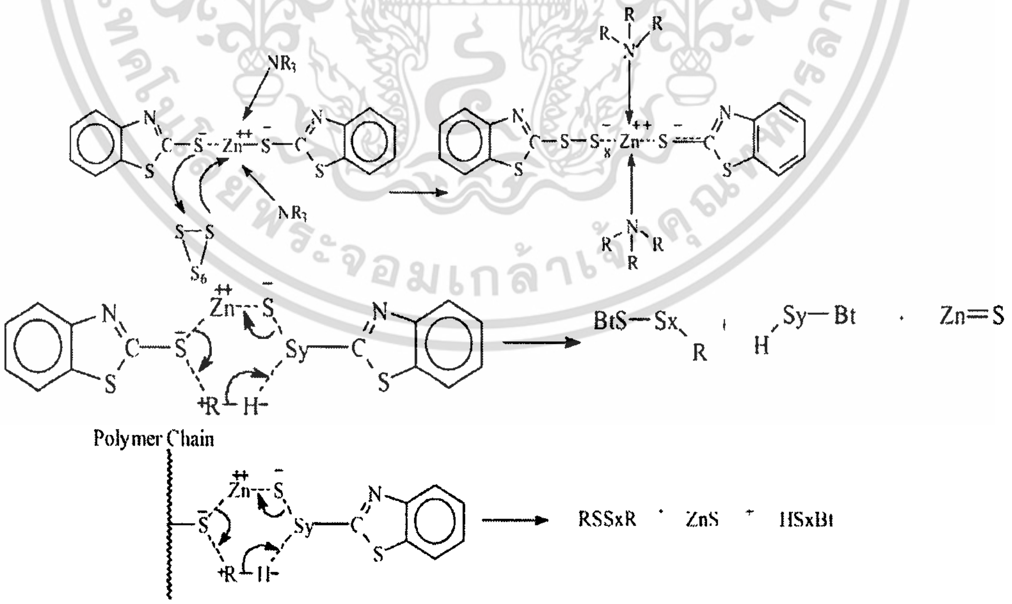
สารเชื่อมโยงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องผสมลงไปเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ซึ่งจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ (3-Dimensional network) ทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากไม่คงรูป ไหลได้ เสียสภาพ เหนียวติด (Sticky) เปลี่ยนเป็นยางที่มีความยืดหยุ่น แข็งแรง มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ทนอุณหภูมิสูง ซึ่งสำหรับยางโบรโมบิวทิลจะมีระบบเชื่อมโยงที่หลากหลาย ดังนี้

1.1 ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur cure)

ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถันสามารถใช้ในงานประเภทยางชั้นในรถยนต์ (Inner liners) ยางด้านข้าง (Sidewalls) โดยสามารถใช้ร่วมกับซิงค์ออกไซด์หรือไม่ก็ได้ ซึ่งมักจะใช้ควบคู่กับสารเร่งการเชื่อมโยง (Accerelators) ประเภทไทเอโซล (Thiazole) เช่น MBTS ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11

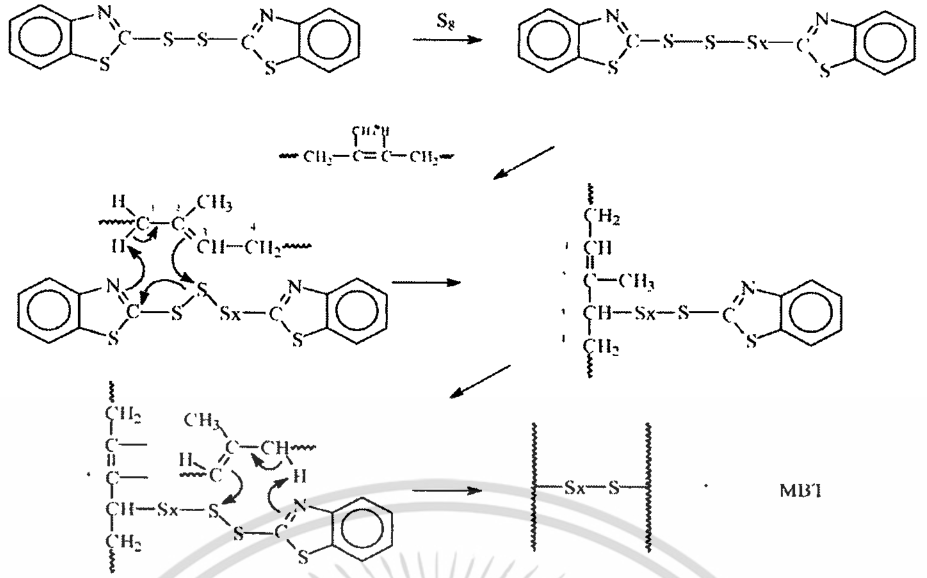
1.2 ระบบเชื่อมโยงที่ปราศจากซิงค์ (Zinc-free cure)

ระบบการเชื่อมโยงที่ปราศจากซิงค์ มักจะเป็นลักษณะสำคัญสำหรับวัสดุสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ เนื่องจากซิงค์มีความเป็นพิษจึงอาจส่งผลต่อผู้ป่วยที่ใช้วัสดุ ดังนั้นจึงใช้สารประกอบจำพวกเอมีนมาทำการเชื่อมโยงแทน เช่น เฮกซะเมทิลลีนไดเอมีนคาร์บาเมต (Hexamethylene diamine carbamate)



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถันร่วมกับซิงค์ออกไซด์ และ MBTS [21]

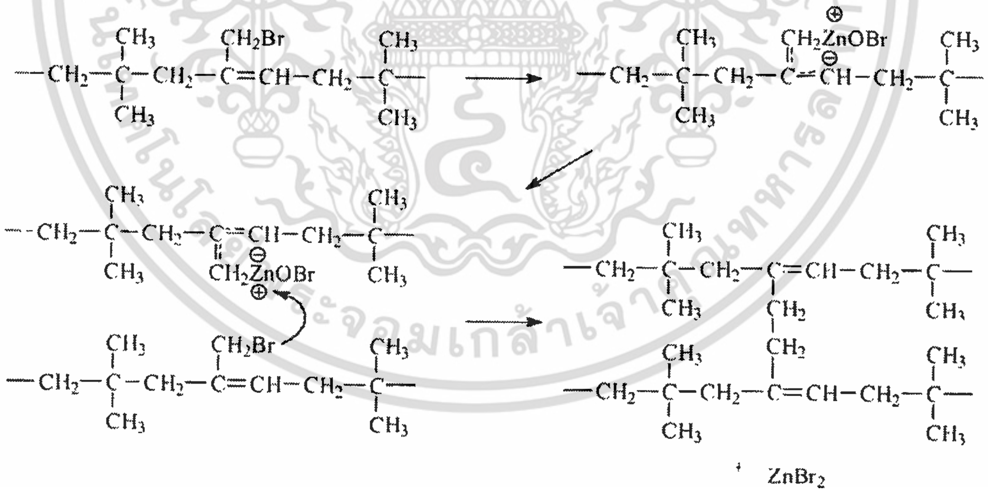
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถันร่วมกับ MBTS [21]

1.3 ระบบเชื่อมโยงด้วยโลหะออกไซด์ (Metal oxide cure)

สำหรับการเชื่อมโยงด้วยโลหะออกไซด์ มักที่จะใช้ซิงค์ออกไซด์ หรือแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับตำแหน่งที่มีหมู่ฮาโลเจน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของซิงค์ออกไซด์ในยางโบรโมบิวทิล [21]

1.4 ระบบเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide cure)

ถึงแม้ว่าสารจำพวกเปอร์ออกไซด์จะส่งผลให้ยางบิวทิลเกิดการขาดของสายโซ่ แต่สำหรับยางฮาโลบิวทิลนั้นก็ยังสามารถใช้สารจำพวกเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังเช่น การใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ร่วมกับบิสมาลิอิไมด์ (Bismaleimide) ที่ทำหน้าที่เป็นโคเอเจนต์ แต่ถึงอย่างไรก็ตามสำหรับการศึกษาในอนาคตข้างหน้าจะมีความพยายามทำการเชื่อมโยงยางโบรโมบิวทิลด้วยบิสมาลิอิไมด์โดยปราศจากเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าการเสียรูปถาวรเนื่องจากแรงกดที่ต่ำ (Compression set) และมีความต้านทานต่อความร้อนสูง

ซึ่งการเลือกระบบเชื่อมโยงสำหรับยางโบรโมบิวทิลนั้นต้องขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน ระยะเวลารอบการผลิต (Cycle time) สมบัติที่ต้องการ โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

2. สารเร่งการเชื่อมโยง

สารเร่งการเชื่อมโยงเป็นองค์ประกอบที่เติมลงไปในยางควบคู่กับการเติมสารเชื่อมโยงเพื่อช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยงเร็วขึ้น สำหรับการเลือกใช้ชนิดของสารเร่งการเชื่อมโยงควรเลือกให้เหมาะสมกับระบบเชื่อมโยง

3. สารช่วยกระบวนการผลิต

สารช่วยกระบวนการผลิตเป็นองค์ประกอบที่เติมลงไปในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ เป็นไปได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในกระบวนผลิต นอกจากนี้สารบางตัวในกลุ่มนี้ยังส่งผลทำให้ยางนิ่มมากขึ้นซึ่งช่วยทำให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้นด้วยเช่นกัน

4. สารตัวเติม

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ เป็นหนึ่งในสารเติมแต่งที่สำคัญอย่างหนึ่งของยาง เนื่องจากมีราคาถูก ซึ่งสามารถใช้ผสมในยางผสมสูตรหรือผลิตภัณฑ์ยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางตัวยังสามารถทำหน้าที่เสริมแรงให้กับยางได้อีก

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

4.1 สารตัวเติมชนิดเสริมแรง ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น สารตัวเติมชนิดนี้ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) เป็นต้น

4.2 สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ทำหน้าหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตอย่างเดียว สารตัวเติมชนิดนี้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ดินขาว (Kaolin หรือ Clay) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ระบบเชื่อมโยงแบบต่างๆ ของยางโบรโมบิวทิล [18]

Cure System		*Scorch Safety*	*Cure Rate*	*Other Characteristics*	*Applications*
Sulfur/MBTS	ZnO - 3 S - 0.5 MBTS - 1.5 Maglite D - 0.5 or Carbowax 4000 - 0.5 TMTDS - 0 to 0.25	Excellent	Moderate	Covulcanization with highly unsaturated rubbers.	Standard cure system. Tire innerliners. Blends with general-purpose rubbers
Sulfur/sulfenamide	ZnO - 3 Sulfur - 0.5 Santocure NS - 1.0 TMTDS - 0.25	Excellent	Fast	Covulcanization with highly unsaturated rubbers.	Blends with general-purpose rubbers.
Dithiocarbamate	ZnO - 3 ZDEDC - 1.5 Maglite - 0.5	Fair	Very fast	Low compression set. Heat resistant.	Mechanical goods. Injection molding.
Resin	ZnO - 3 SP 1045 - 2	Good	Fast	Sulfur-free.	Clay-filled compounds. Pharmaceutical closures.
Peroxide	Dicup - 2 HVA 2 - 1	Fair	Moderate	Very-low compression set. Highly heat resistant.	High temperature and steam resistance.
Room-temperature cure	ZnO - 5 $SnCl_2$ - 2 $ZnCl_2$ - 2	Very scorchy	Very fast	Curatives should be premixed in Vistanex®.	Room-temperature curing sheeting, tank lining.
Zinc-free	Maglite D - 3 Diak No.1 - 1	Scorchy	Fast	Low compression set.	Special pharmaceutical closures, zinc free.

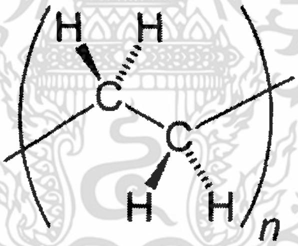
Cure rate: Very fast: <5 min at 160°C; fast: <15 min at 160°C; moderate, 15-30 min at 160°C.
Scorch T, 135°C: Very scorchy: <5 min; scorchy 5 min, fair 10 min; good 10-15 min; excellent >15 min.

2.3 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ค้นพบโดย W.H. Carother และเพื่อนร่วมงาน ซึ่งสังเคราะห์ได้จากการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจนกระทั่งถึงเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง กระบวนการสังเคราะห์มี 4 วิธี [22] ดังนี้

1. กระบวนการสังเคราะห์ด้วยความดันสูง (High-pressure processes)
2. กระบวนการสังเคราะห์ Ziegler (Ziegler processes)
3. กระบวนการสังเคราะห์ Phillips (The Phillips process)
4. กระบวนการสังเคราะห์ Indiana (The Standard Oil (Indiana) process)

โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะประกอบไปเอทิลีนมอนอเมอร์จัดเรียงตัวกันเป็นสายโซ่ยาว ดังรูปที่ 2.13 จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิห้องพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นพอลิเอทิลีนสามารถบวมตัวและละลายในพาราไซลีน (p-Xylene) ไตรคลอโรเบนซีน (Trichlorobenzene) เดกเคน (Decane) และเดกคาลิน (Decalin) ทนทานต่อกรด ด่าง และสารออกซิไดซ์ แต่ไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิสูงและรังสี เมื่อขีดข่วนสามารถเกิดรอยได้ [23] พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจึงไม่นำไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีและข้อเสีย [24] ดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีน [25]

การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามความหนาแน่น โดยใช้มาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Material) [25]

1. UHMWPE (Ultra high molecular weight polyethylene)
2. ULMWPE or PE-WAX (Ultra low molecular weight polyethylene)
3. HDPE (High density polyethylene)
4. HDXLPE (High density cross-linked polyethylene)
5. PEX or XLPE (Cross-linked polyethylene)
6. MDPE (Medium density polyethylene)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. LDPE (Low density polyethylene)
8. LLDPE (Linear low density polyethylene)
9. VLDPE (Very low density polyethylene)

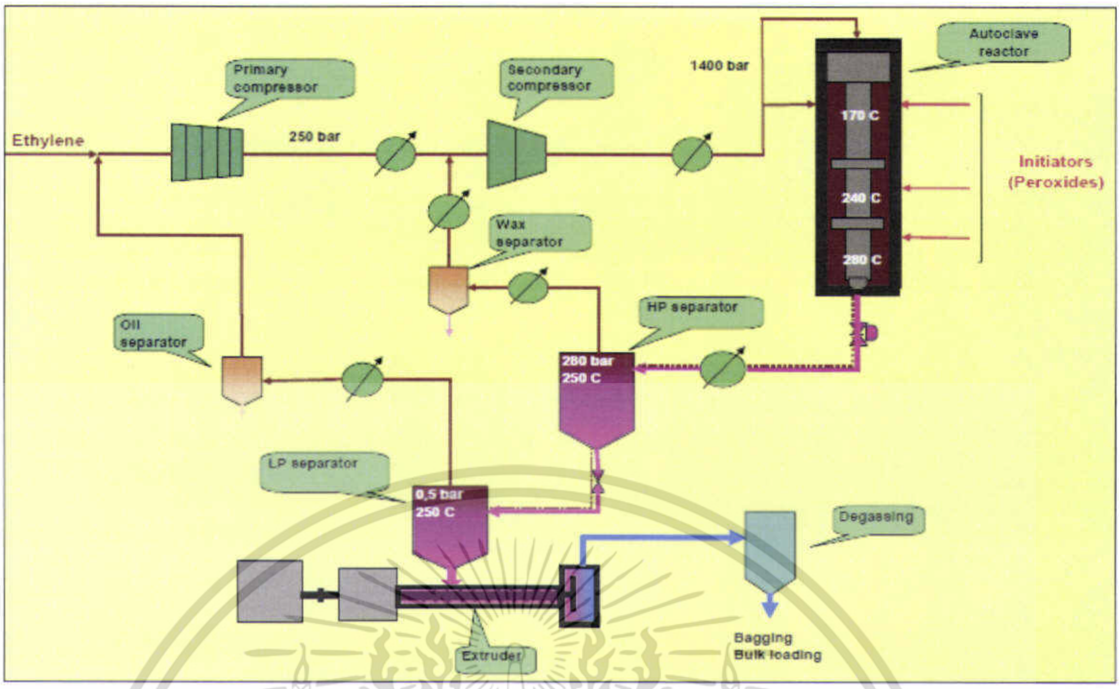
ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพอลิเอทิลีน [24]

ข้อดี	ข้อเสีย
- ราคาถูก - เป็นฉนวน - ทนความชื้นและสารเคมี - ใช้บรรจุอาหารได้ดี - ขึ้นรูปนำมาใช้งานได้โดยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกทั่วไป	-ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน -ไม่ทนสภาพดินฟ้าอากาศ -แตกหัก -ติดไฟได้

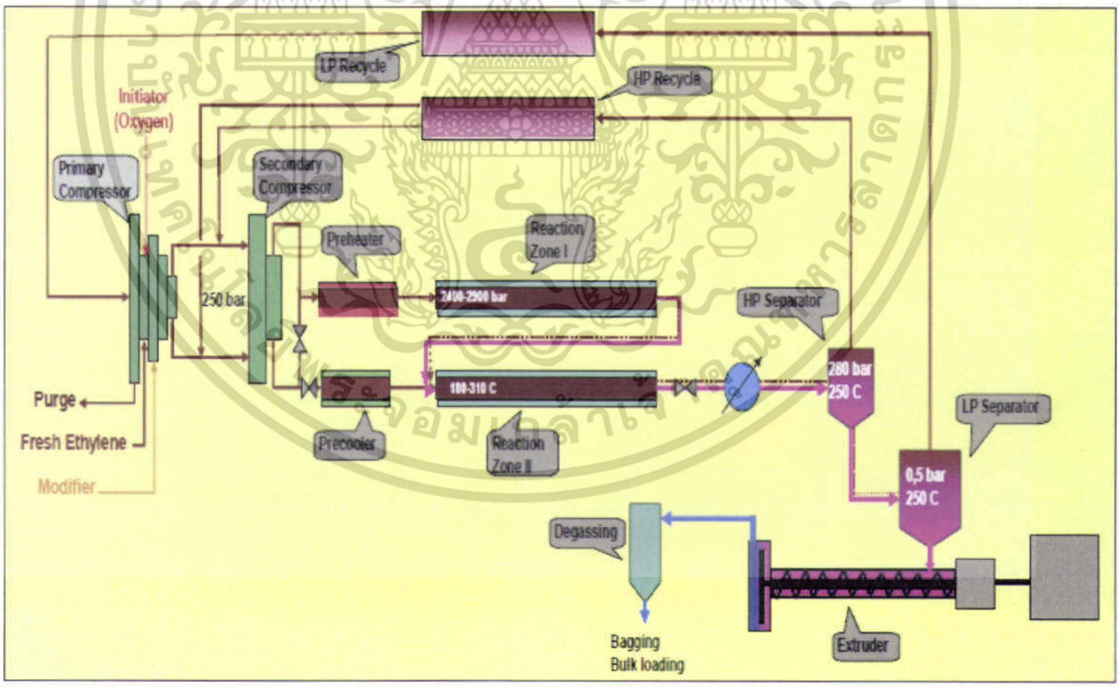
2.3.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [26]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย ICI ในปี 1933 จากกระบวนการใช้ถังปฏิกรณ์ (Autoclave process) ดังรูปที่ 2.14 จากนั้น BASF ได้มีการพัฒนาระบบการผลิตโดยผลิตจากกระบวนการใช้ท่อปฏิกรณ์ (Tubular process) ดังรูปที่ 2.15 ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนแบบอนุมูลอิสระ เช่น สารจำพวกเปอร์ออกไซด์หรือออกซิเจนด้วยความดันสูงและใช้อุณหภูมิในช่วง 150-200°C บางครั้งจึงมีชื่อเรียก ว่าพอลิเอทิลีนความดันสูง พอลิเมอร์ที่ได้จะมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกน้อย ความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000 – 40,000 g/mol ในเชิงพาณิชย์นิยมระบุน้ำหนักโมเลกุล ค่าดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) การใช้งาน LDPE ในปัจจุบันมีหลากหลาย เช่น ขวดพลาสติก ฟิล์ม ถุงพลาสติก เป็นต้น สำหรับการผลิต LDPE มีหลากหลายชนิดขึ้นกับการประยุกต์นำไปใช้งาน ดังนั้นจึงมีการผลิต LDPE ที่มีค่าดัชนีการไหลในช่วงกว้าง ซึ่งการขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้งานสามารถแบ่งได้ตามความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการไหลกับความหนาแน่นของ LDPE ดังรูปที่ 2.16 และสามารถแบ่งสัดส่วนการขึ้นรูปเพื่อการใช้งานได้ดังรูปที่ 2.17 โดยที่สมบัติบางประการของ LDPE แสดงดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

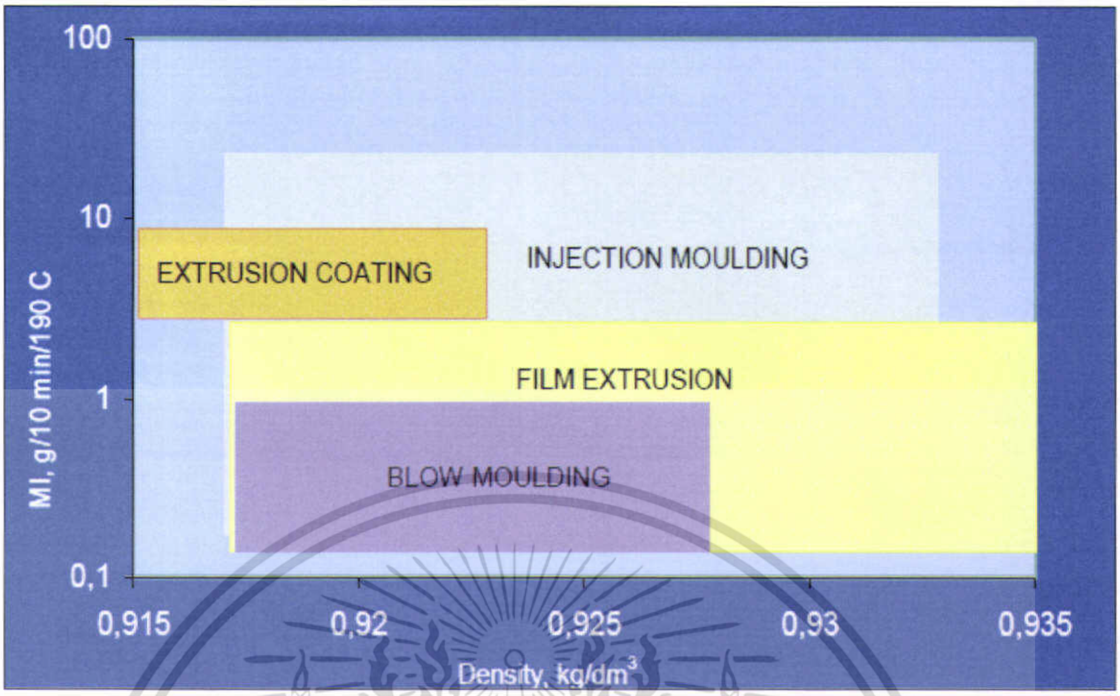


รูปที่ 2.14 การผลิต LDPE จากกระบวนการใช้ถังปฏิกรณ์ [26]

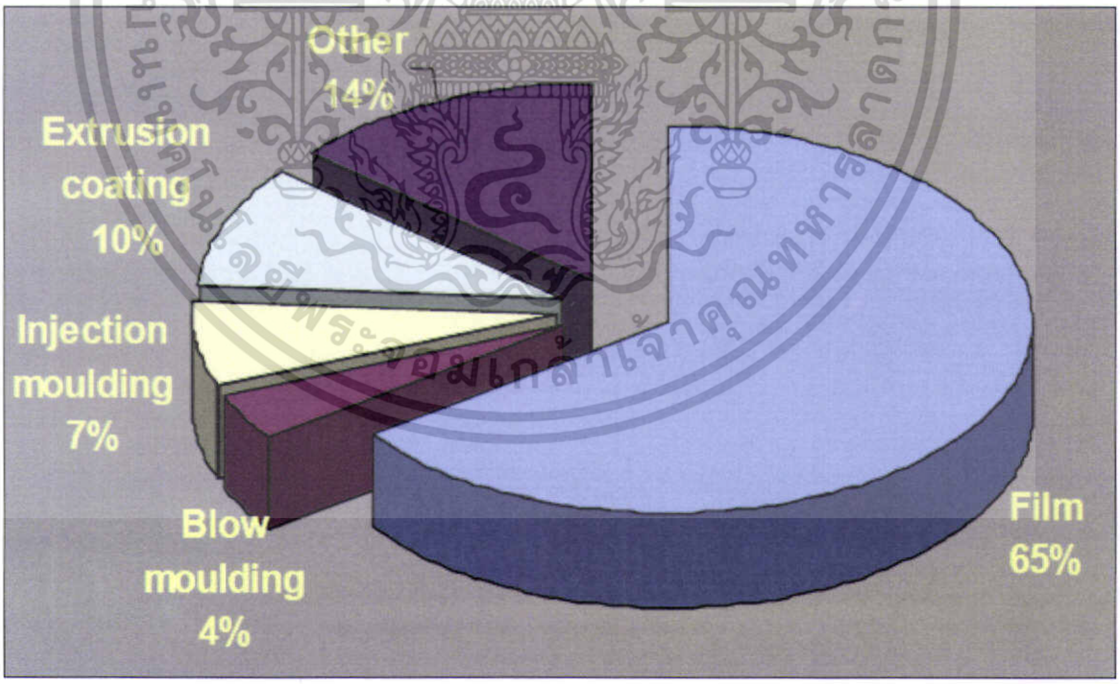


รูปที่ 2.15 การผลิต LDPE จากกระบวนการใช้ท่อปฏิกรณ์ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการไหลกับความหนาแน่นของ LDPE สำหรับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ [26]



รูปที่ 2.17 สัดส่วนการขึ้นรูปเพื่อการใช้งาน LDPE [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 สมบัติบางประการของ LDPE [24]

สมบัติ	ค่า
ความหนาแน่น (Density, g/cm^3)	0.914-0.928
เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity)	40 - 55
จุดหลอมเหลว (Melt temperature, °C)	80 - 110
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength, MPa)	4.0 – 8.0
มอดุลัสอิลาสติก (Elastic modulus, MPa)	200 – 400
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	90 – 800
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength, notched Izod, Jm^{-2})	No break
อุณหภูมิอ่อนตัว(Heat-deflection temperature, °C)	80 – 90

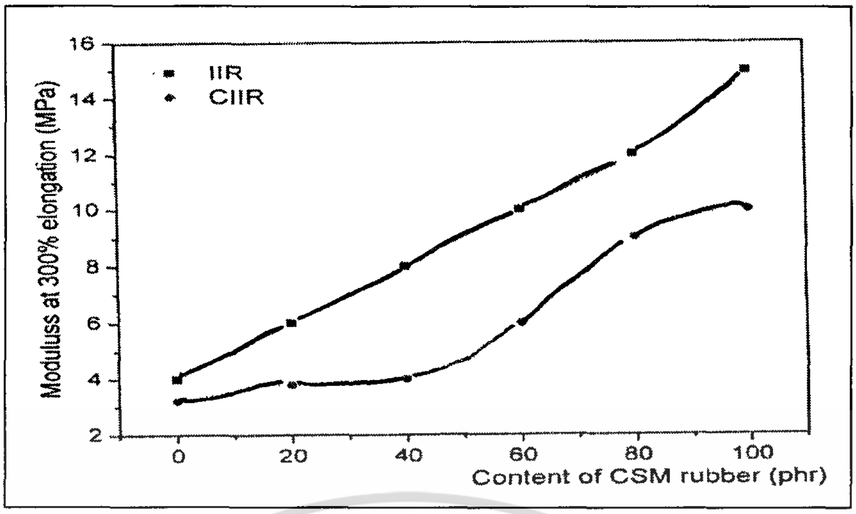
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Markovic, G. และคณะ [27] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมจากยางคลอโรซัล-โฟเนตพอลิเอทิลีนกับยางบิวทิล (CSM/IIR) และพอลิเมอร์ผสมจาก CSM/CIIR โดยเลือกใช้ระบบเชื่อมโยงเป็นโลหะออกไซด์ คือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) และกำมะถัน (Sulfur) ซึ่งทำการผสมด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และคำนวณหาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density, n) ด้วยเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย (Solvent swelling method) ผสมระหว่างดีเซล (Diesel), เคโรซีน (Kerosine) และโทลูอีน (Toluene) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาคำนวณจากสมการของฟลอรี-ไรเนอร์ (Flory-Rehner equation) ดังนี้

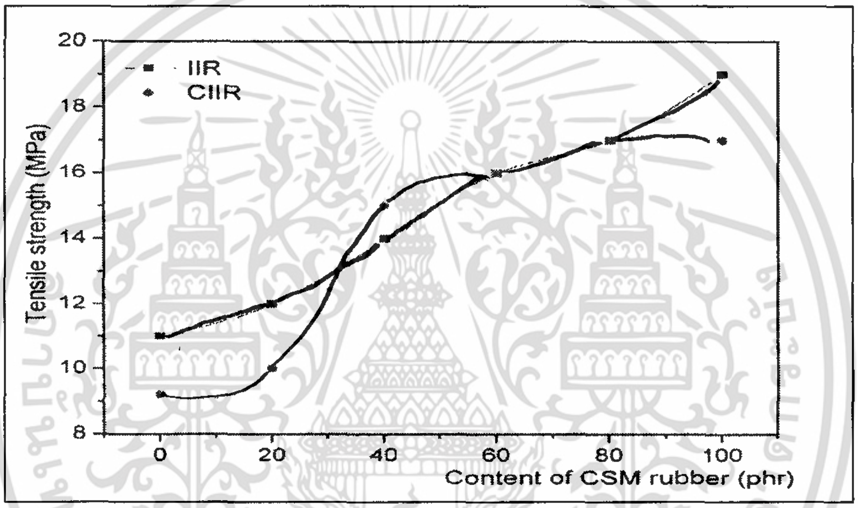
$$-[\ln(1 - \nu_r) + \nu_r + \chi_1 \nu_r^2] = V_s\, n\, [\nu_r^{1/3} - \nu_r/2] \qquad (2.3)$$

พบว่าค่ามอดุลัสของยาง (Rubber modulus) ที่ 300 % ของการยืดของชิ้นงานและค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ CSM เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นการลดอัตราส่วนของยางซึ่งมีสมบัติการยืดตัวที่ดี ดังนั้น CSM จึงทำหน้าที่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสม แสดงผลได้ดังรูปที่ 2.18 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของ CSM เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่อัตราส่วนของยางลดลงทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงของยางน้อยลงด้วย ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

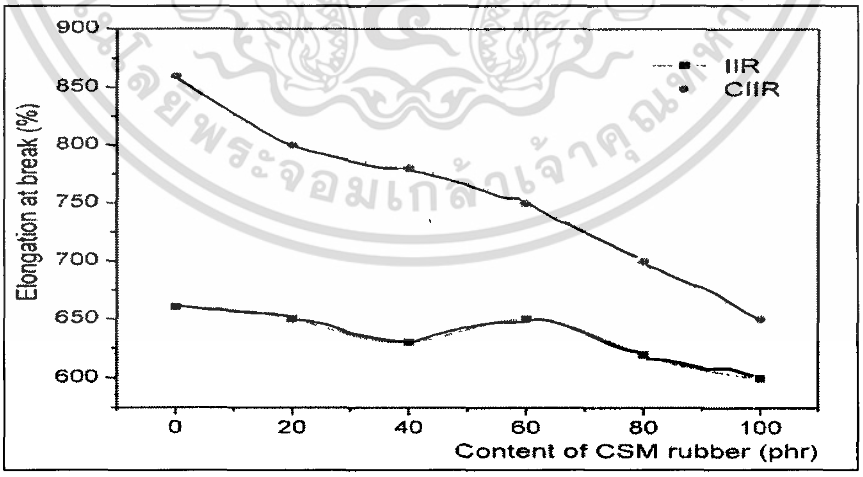
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

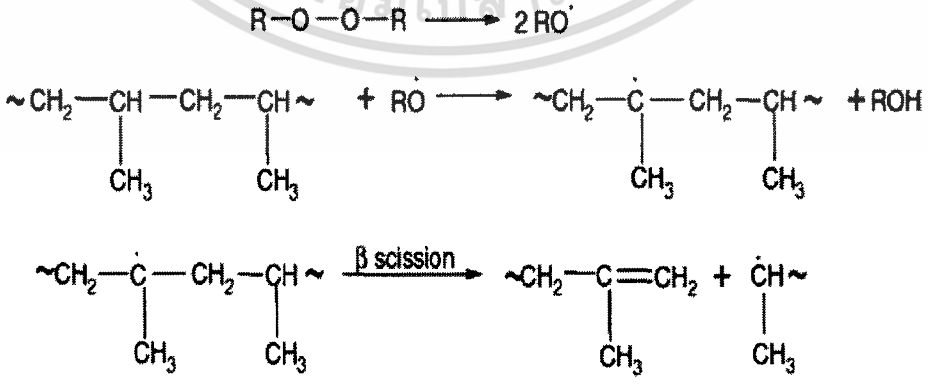
รูปที่ 2.18 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม CSM/IIR และ CSM/CIIR (ก) ค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืด (ข) ค่าความแข็งแรงดึง และ (ค) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ค่าความหนาแน่นเชื่อมโยง (n) ของพอลิเมอร์ผสม CSM/IIR และ CSM/CIIR [27]

Sample	n $\times 10^2$/mol dm^{-3}
CSM/IIR/CIIR (100/0/0)	710
CSM/IIR/CIIR (80/20/0)	795
CSM/IIR/CIIR (60/40/0)	800
CSM/IIR/CIIR (40/60/0)	810
CSM/IIR/CIIR (20/80/0)	830
CSM/IIR/CIIR (0/100/0)	832
CSM/IIR/CIIR (80/0/20)	812
CSM/IIR/CIIR (60/0/40)	824
CSM/IIR/CIIR (40/0/60)	831
CSM/IIR/CIIR (20/0/80)	847
CSM/IIR/CIIR (0/0/100)	850

Chatterjee, K. และ Narkar, K. [28] ทำการศึกษาผลของสารเชื่อมโยงไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ที่มีต่อเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (Thermoplastic vulcanizates, TPVs) ระหว่างยางเอ็ม-อีพีเอ็ม (Maleated-ethylene propylene, m-EPM) กับพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) โดยมี เอ็ม-พอลิพรอพิลีน (Maleated-polypropylene, m-PP) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP จาก 0-2 phr จะทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้ามีการใช้ DCP ที่มากกว่า 2 phr พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากการตัดสายโซ่ PP เมื่อมีการเติม DCP ที่มากเกินพอ ดังรูปที่ 2.19 ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การเสียรูปถาวรหลังการดึง มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ DCP เพิ่มขึ้น

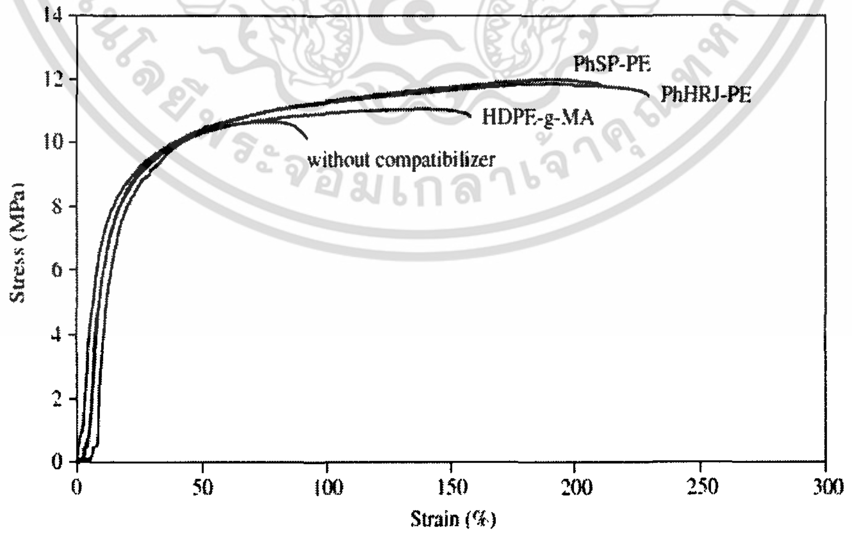


รูปที่ 2.19 ปฏิกิริยาเชื่อมโยงและการตัดสายโซ่ของ PP [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

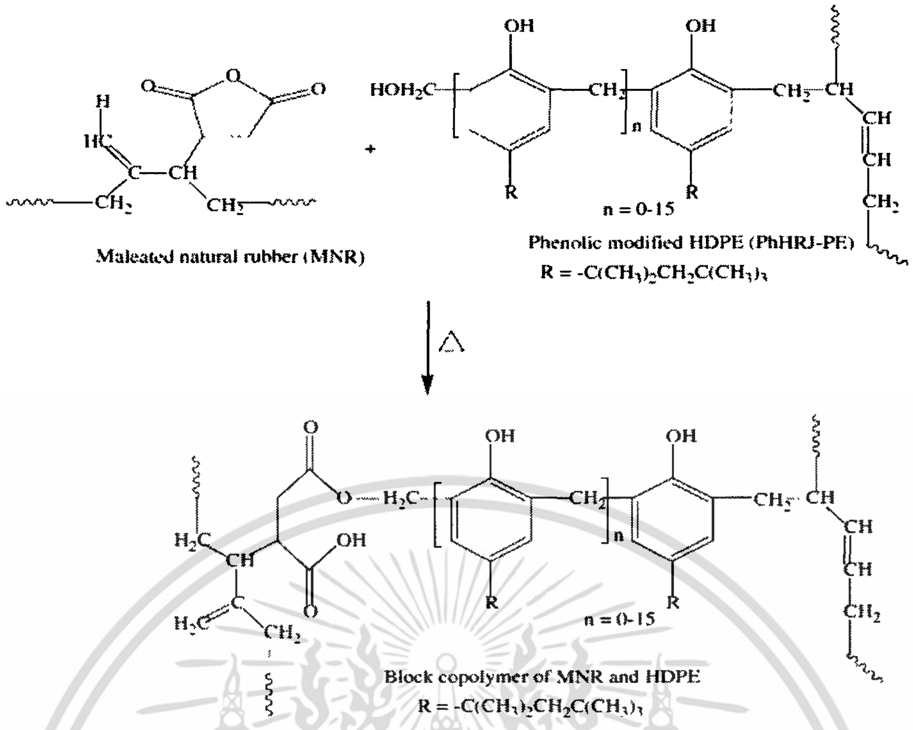
นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเชื่อมโยง (n) กับค่าแรงบิดจากเครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscilating disc rheometer, ODR) ซึ่งคำนวณได้จากสมการของฟลอรี-ไรเนอร์ ดังสมการที่ 2.3โดยใช้เทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย ซึ่งได้นำชิ้นงานมาแช่ในตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนที่อุณหภูมิประมาณ 23-25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าความหนาแน่นเชื่อมโยงแปรผันตรงกับแรงบิด

สกุลรัตน์ พิชัยยุทธ และคณะ [29] ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารช่วยผสม (HDPE-g-MA, PhSP-PE, PhHRJ-PE) ที่มีต่อเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (TPVs) ระหว่างยางเอ็ม-เอ็นอาร์ (Maleated-natural rubber, MNR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พบว่า PhSP-PE และ PhHRJ-PE ให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPVs สูงกว่า HDPE-g-MA ในขณะที่ค่าการ เสียรูปถาวรหลังการดึงมีค่าต่ำกว่า ซึ่งสามารถแสดงกราฟความเค้นความเครียด ได้ดังรูปที่ 2.20 โดยสามารถจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง MNR กับสารช่วยผสมทั้งสามชนิดได้ ดังรูปที่ 2.21-2.23 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการผสมโดยให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โดยผ่านปฏิกิริยาการเปิดวง (Ring-opening reaction) ของมาเลอิกแอนไฮดรายด์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาปริมาณของ PhHRJ-PE ที่ 3, 5, 7, 9 และ 12 (%wt ของ HDPE) ของMNR/HDPE TPVs เท่ากับ 60/40 (w/w) พบว่าที่ 5%wt ให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ TPVs มีค่าสูงสุด ในขณะที่ค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงมีค่าต่ำสุด ดังรูปที่ 2.24 ดังนั้นสารช่วยผสมที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด คือ PhHRJ-PE และที่ปริมาณ 5%wt ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

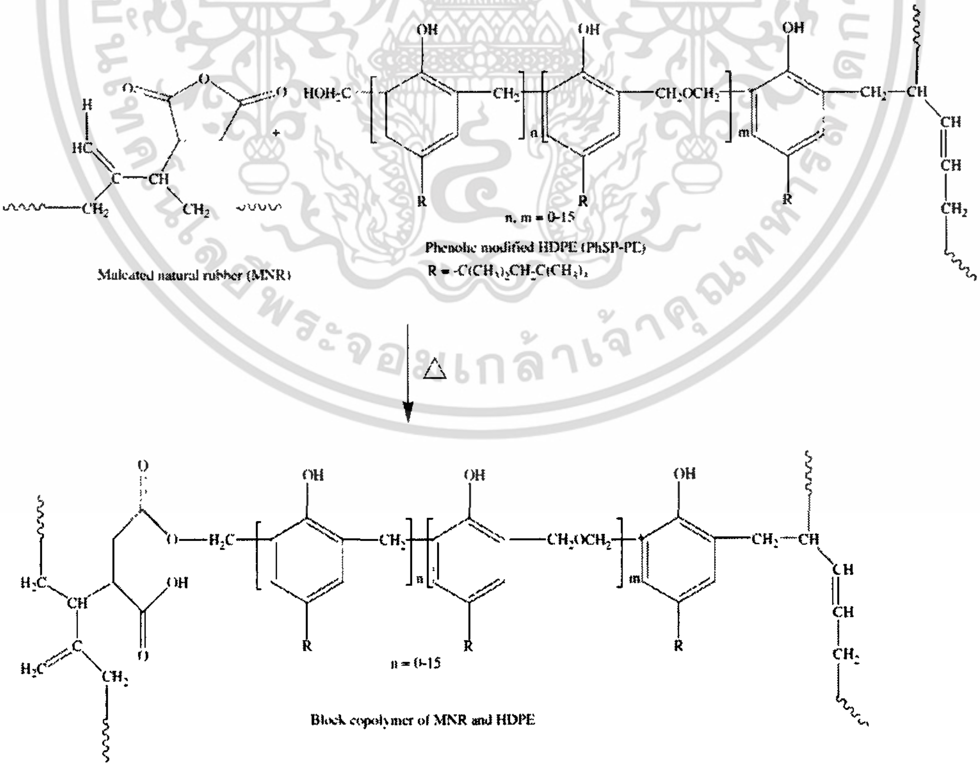


รูปที่ 2.20 กราฟความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม MNR/HDPE เท่ากับ 60/40 (w/w) ที่สารช่วยผสมแตกต่างกัน [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

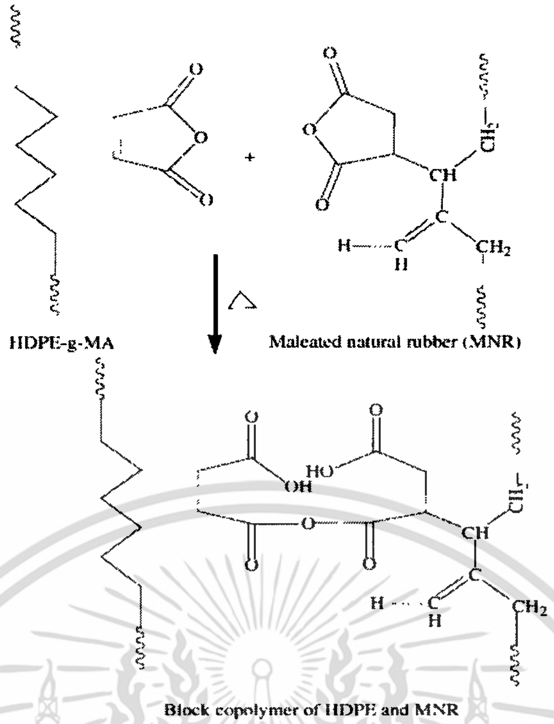


รูปที่ 2.21 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง MNR กับ PhHRJ-PE [29]

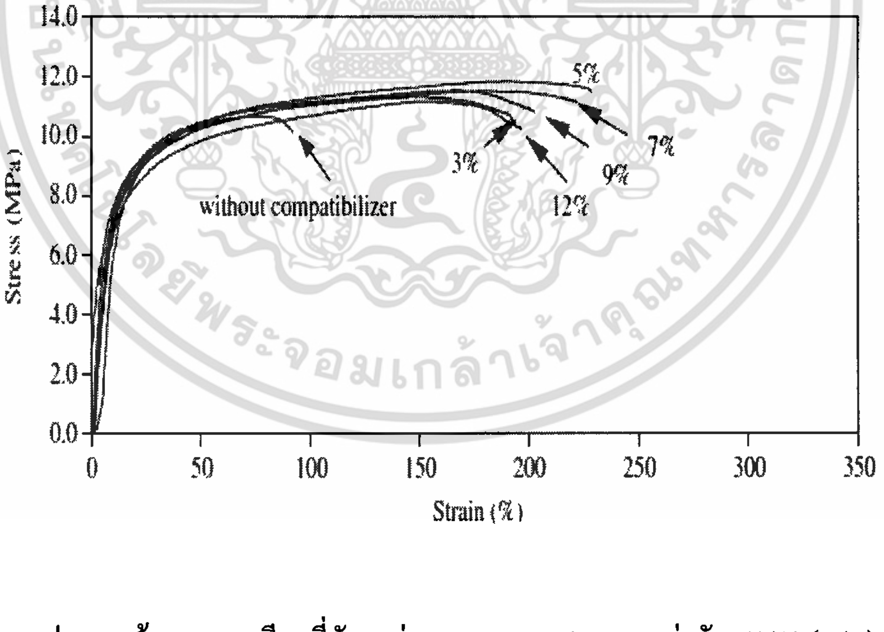


รูปที่ 2.22 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง MNR กับ PhSP-PE [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง MNR กับ HDPE-g-MA [29]

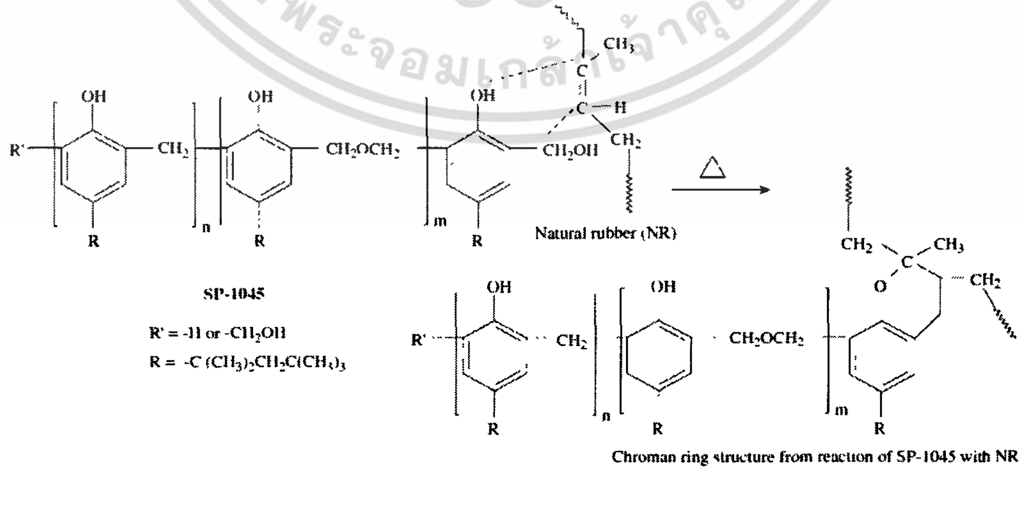


รูปที่ 2.24 กราฟความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม MNR/HDPE เท่ากับ 60/40 (w/w) ที่ปริมาณ PhHRJ-PE แตกต่างกัน [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

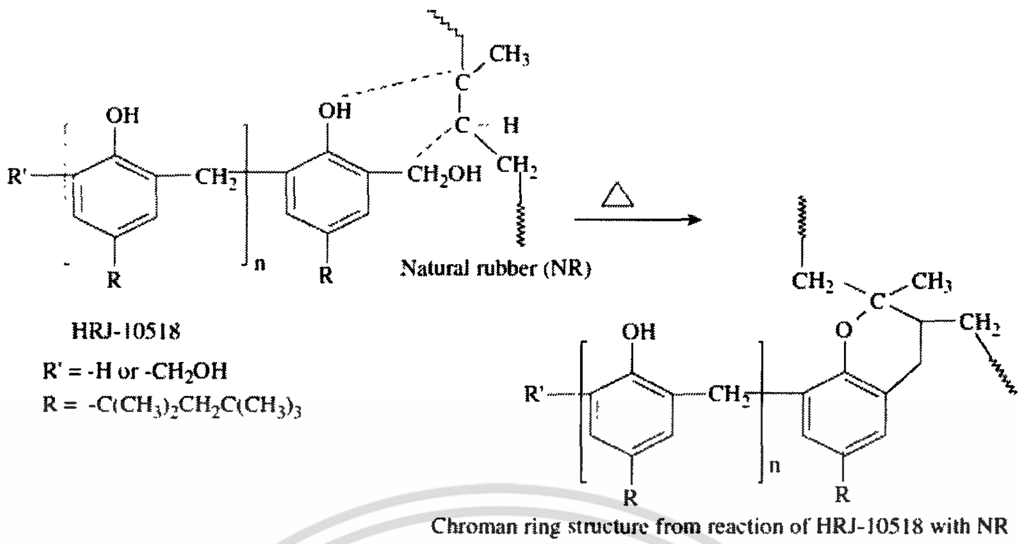
Basuli, U. และคณะ [30] ทำการศึกษาผลชนิดและปริมาณของเทอร์โมพลาสติก (Engage®) ที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมชนิดเอทิลีนออกทีน (Ethylene-octene copolymer) กับพอลิเมอร์ร่วมชนิดเอทิลีนบิวทีน (Ethylene-butene copolymer) เมื่อผสมกับยางซิลิโคนโดยผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ (Dynamic vulcanization, DV) ซึ่งทำการเชื่อมโยงด้วยไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ที่ 2.5 phr จะเห็นได้ว่าสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ามอดุลัส, ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, ค่าความแข็งกดและค่าการยืดตัวหลังการดึง) มีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มวัฏภาคของแข็ง และเมื่อทำการทดสอบสมบัติของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการทำรีไซเคิล พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีแนวโน้มต่ำลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้น

เจริญ นาคะสรรค์ และคณะ [31] ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสมชนิดต่างๆในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (TPVs) ระหว่างยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยทำการผสมผ่านเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอร์เดอร์ (Brabender plasticorder) ซึ่งสารช่วยผสมที่ทำการศึกษา ได้แก่ SP-1045 กับ HRJ-10518 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง NR/HDPE/สารช่วยผสม เท่ากับ 60/40/5 (w/w/w(%wt of HDPE)) ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบระหว่างไม่เติมสารช่วยผสม เติม SP-1045 และ HRJ-10518 ตามลำดับ ส่วนค่าการการเสียรูปถาวรหลังการดึงมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อเทียบระหว่างไม่เติมสารช่วยผสม เติม SP-1045 และ HRJ-10518 ตามลำดับ โดยสามารถจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NR กับสารช่วยผสมทั้งสองชนิดได้ดังรูปที่ 2.25-2.26 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการผสมโดยให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของ NR



รูปที่ 2.25 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NR กับ SP-1045 [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



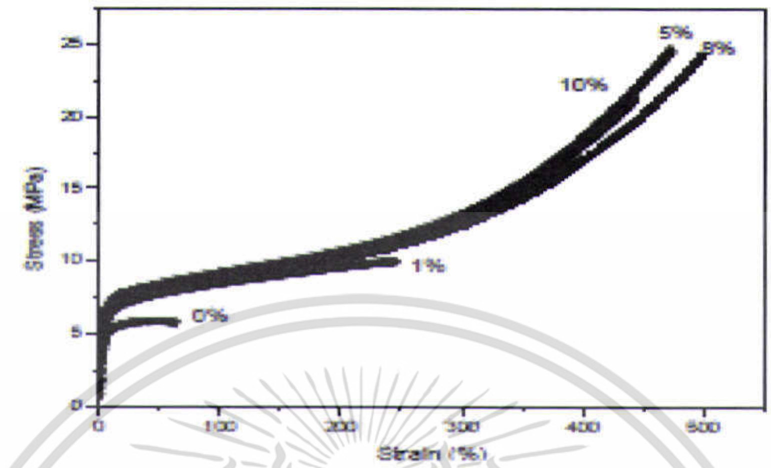
รูปที่ 2.26 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NR กับ HRJ-10518 [31]

Li, J. [32] ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีน พรอพิลีน ไดอีน (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) กับเอทิลีน เมทิลอะคริเลต โคพอลิเมอร์ (Ethylene methylacrylate copolymer, EMA) โดยเลือกใช้สารช่วยผสม 2 ชนิด คือชนิดที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยา (Non-reactive) ได้แก่ EXACT 0210, EVA และ Kraton-G กับชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยา (Reactive) ได้แก่ SP-1045 และ HRJ-10518 พบว่า EXACT 0210 ให้ผลสมบัติเชิงกลของชิ้นงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารช่วยผสมชนิดไม่สามารถทำปฏิกิริยา ในขณะที่ HRJ-10518 ให้ผลสมบัติเชิงกลของชิ้นงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารช่วยผสมชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยา เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง EXACT 0210 กับ HRJ-10518 พบว่าพอลิเมอร์ผสม EPDM/EMA ที่ใช้ HRJ-10518 มีค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นการยืด ณ จุดขาด และมอดุลัสของยาง (Rubber modulus) สูงกว่าที่ใช้ EXACT 0210 แต่ค่าความแข็งกด (Hardness, Shore A) มีค่าไม่แตกต่างกัน

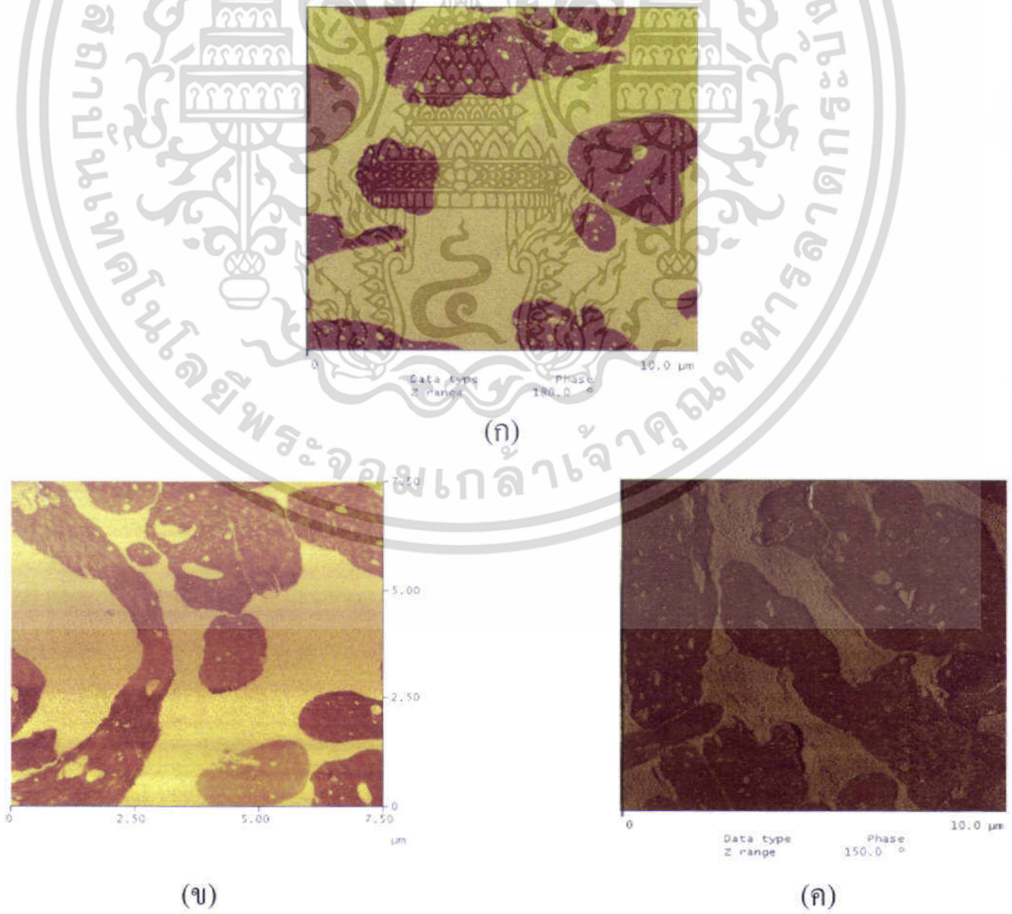
Joseph, A. และคณะ [33] ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติอื่นๆของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic polypropylene, iPP) กับยางอะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอีน (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) โดยมีพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเล-อิกแอนไฮดรายด์ (MA-PP) เป็นสารช่วยผสม เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารช่วยผสมที่อัตราส่วนระหว่าง NBR/PP เท่ากับ 60/40 (w/w) จากกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) พบว่าที่ 5% จะให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าสูงที่สุด ดังรูปที่ 2.27 นอกจากนี้ยังสามารถแสดงสัณฐานวิทยาของ NBR/PP TPVs ที่อัตราส่วนผสม NBR/PP เท่ากับ 50/50, 60/40 และ 70/30 (w/w) จากรูปที่ 2.28 วัฏภาค NBR ที่มีสีเข้มกว่าเป็นวัฏภาคกระจายตัวจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นว่าวัฏภาคมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน ในขณะที่วัฏภาค PP จะเป็นวัฏภาคเมตริกซ์ต่อเนื่อง และเมื่ออัตราส่วนของ NBR เพิ่มขึ้นจะเห็นวัฏภาคที่มีสีเข้มเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของ NBR/PP TPVs [33]



รูปที่ 2.28 AFM แสดงสัณฐานวิทยาของ NBR/PP TPVs ที่อัตราส่วน (ก) 50/50, (ข) 60/40 และ (ค) 70/30 (w/w) [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ในครั้งนี้ เป็นงานวิจัยต่อเนื่องเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทจุกยางขวดน้ำเกลือ สำหรับการเลือกใช้ BIIR (Lanxess Bromobutyl X2) เนื่องมาจากการที่ BIIR มีความสามารถต้านทานการซึมผ่านของก๊าซและความชื้นสูง ทนสารเคมีได้ดี ในขณะที่ BIIR เกรดนี้มีความนิ่มสูงเมื่อเทียบกับเกรดอื่น จึงเหมาะกับการใช้งานประเภทจุกยางขวดน้ำเกลือ เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นเรื่องการลดต้นทุน และคาดหวังว่าจะสามารถผลิต TPVs ที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคอื่นนอกจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) คือ เครื่องฉีดขึ้นรูป ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ LDPE (LD 1630J) ที่มีค่า MFI เท่ากับ 30 g/10 min ซึ่งเป็นเกรดที่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป นอกจากนี้ LDPE ยังมีสมบัติทนความชื้น ทนสารเคมีและมีราคาถูก สำหรับอัตราส่วน BIIR/LDPE ที่เลือกใช้เบื้องต้น ได้แก่ 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w) การที่เลือกอัตราส่วนของ BIIR ไม่ให้ต่ำกว่า 50 เพราะต้องการให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติของยางที่เด่นชัดในเรื่องของการคืนตัว ความแข็งกด แต่ยังสามารถขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปได้ ทั้งนี้ข้อมูลเบื้องต้น สูตรยาง อุณหภูมิการผสมและการขึ้นรูป รวมทั้งเป้าหมายงานวิจัยได้ทำการอ้างอิงจากบริษัทเอส เค โพลีเมอร์ จำกัด โดยสูตรยางเบื้องต้นแสดงได้ดังตารางที่ 2.8 สำหรับผลการทดสอบของชิ้นงานยางจากสูตรยางเบื้องต้น แสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 สูตรยางเบื้องต้นจากบริษัทเอส เค โพลีเมอร์ จำกัด

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
BIIR	100
Calcined clay	70
TiO_2	1.5
P-150	8
Stearic acid	1
MgO	5.8
Sulfur	0.3
Vultac	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ผลการทดสอบจากสูตรยางเบื้องต้น

สมบัติ	ผลการทดสอบ
Tensile strength (MPa)	8.68
Elongation at break (%)	800
Rubber modulus (M300)	2.35
Tear strength (N/mm)	25.05
Tension set (%)	6
Hardness (Shore A)	42
Specific gravity	1.27

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม

โดยศึกษาที่อัตราส่วนผสมระหว่างยางโบรโมบิวทิลต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (BIIR/LDPE) เท่ากับ 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสม

โดยทำการศึกษาชนิดสารช่วยผสมที่ 2.2 phr (5% ของ LDPE) โดยเลือกที่อัตราส่วนผสมระหว่าง BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30 (w/w)

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม

โดยเลือกอัตราส่วนผสมระหว่าง BIIR /LDPE เท่ากับ 70/30 (w/w) แล้วทำการศึกษาปริมาณสารช่วยผสม (Fusabond®E MB226DY) ที่ 1.3, 2.2 และ 3.0 phr (3, 5 และ 7% ของ LDPE)

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer)

ทดสอบสมบัติของ BIIR/LDPE ที่เตรียมได้ ดังนี้

- การทดสอบสมบัติเชิงกล
  - ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
  - เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)
  - มอดุลัสของยาง (Rubber modulus, M300)
- การทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการดึง (Tension set) ที่ 200% ดึงยืด
- การทดสอบความแข็งกด (Hardness tests, Shore A)
- การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Differential scanning calorimeter (DSC) และ Dynamic mechanical analyzer (DMA)
- การหาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ด้วยเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย (Solvent swelling method)
- การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย Atomic force microscope (AFM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ยางและสารเคมี

1. ยางโบรโมบิวทิล (Bromobutyl rubber, BIIR) ชื่อการค้า Lanxess Bromobutyl เกรด X2 บริษัท แลนเซส อินเนอร์ไจซิงค์ เคมิสทรี จำกัด สมบัติบางประการของ BIIR สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

2. แคลไซน์ เคลย์ (Calcined clay) ชื่อการค้า Iceberg® บริษัท เบอร์เจส พิกเมนท์ จำกัด สมบัติบางประการของ Iceberg® สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

3. ทิทาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เกรดการค้า บริษัท ดูปองท์ (ไทยแลนด์) จำกัด

4. น้ำมันพาราฟีน (Paraffinic oil) เกรด P-150 บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

5. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเตอร์บิสซิเนส จำกัด

6. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) เกรดการค้า บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

7. กำมะถัน (Sulfur, S) เกรด S poland บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด

8. พารา-เตตระไทโอบิวทิลฟีนอล ไดซัลไฟด์ (para-Tetratiobutylphenol disulfide) ชื่อการค้า Vultac® เกรด TB 710 บริษัท อาร์เคมา จำกัด

9. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เกรด LD 1630 J บริษัท ไทยโพลิเอททิลีน จำกัด สมบัติบางประการของ LDPE สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

10. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (LLDPE-g-MA) ชื่อการค้า Fusabond® เกรด E MB-226DY บริษัท ดูปองท์ ไชน่า โฮลดิ้ง จำกัด สมบัติบางประการของ Fusabond® สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

11. เอทิลีน-ออกทีน โคพอลิเมอร์ (Ethylene-octene copolymer) ชื่อการค้า Engage® เกรด 8407 บริษัท ดาว เคมิคอล จำกัด สมบัติบางประการของ Engage® สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5

12. ออกทิลฟีนอล-ฟอร์มอลดีไฮด์ เรซิน (Octylphenol-formaldehyde resin) เกรด SP-1045 บริษัท สเกอเนคทาดี อินเตอร์เนชันแนล จำกัด สมบัติบางประการของ SP-1045 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.6

13. พอลิออกทินาเมอร์ (Polyoctenamer) ชื่อการค้า Vestenamer® เกรด 8012 บริษัท อิโวนิค ดีกาสสา จำกัด สมบัติบางประการของ Vestenamer® สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ Lanxess Bromobutyl X2

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ค่าที่ได้
ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)	ASTM D 1646	46 ± 4 (ML 1+8(125°C))
ปริมาณโบรมีน (Function bromine)	-	1.80 ± 0.20 (wt %)
เวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch tome, t_{s2})	ASTM D 5289	2.7 min
เวลาเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90})	ASTM D 5289	9.0 ± 2.2 min

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Iceberg®

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ค่าที่ได้
ความสว่าง (GE brightness)	-	92 %
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size)	-	1.4μm
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	-	2.63
ค่าดัชนีการหักเห (Refractive index)	-	1.62
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH @ 20 % solids)	-	5.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ LD 1630 J

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ค่าที่ได้
ดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI)	ASTM D 1238	30 g/10 min (190°C /2.16 kg)
ความหนาแน่น (Density)	ASTM D 1505	0.916 g/cm^3
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	ASTM D 638	50 kg/cm^2
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ASTM D 638	450 %
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	ASTM D 790	1790 kg/cm^2
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 785	47 (Shore D)
จุดหลอมเหลว (Melting point)	ASTM D 2117	105°C
จุดอ่อนตัว (Vicat softening point, HDT)	ASTM D 1525	85°C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Fusabond® E MB-226DY (LLDPE-g-MA)

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ค่าที่ได้
ความหนาแน่น (Density)	-	0.93 g/cm^3
ดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI)	ASTM D 1238	1.5 g/10 min (190°C /2.16kg)
จุดหลอมเหลว (DSC) (Melting point)	ASTM D 3418	120°C
จุดแข็งตัว (DSC) (Freezing point)	ASTM D 3418	102°C
จุดอ่อนตัว (Vicat softening point, HDT)	ASTM D 1525	100°C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของ Engage®8407

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ค่าที่ได้
ดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI)	ASTM D 1238	30 g/10 min (190°C /2.16kg)
ความหนาแน่น (Density)	ASTM D 792	0.870 g/cm^3
ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)	ASTM D 1646	2 (ML 1+4(121°C))
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 2240	67 (Shore A)
จุดหลอมเหลว (DSC) (Melting point)	Dow method	65°C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.6 สมบัติบางประการของ SP-1045

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ค่าที่ได้
จุดหลอมเหลว (Capillaly) (Melting point)	SII group method	60-65°C
จุดอ่อนตัว (Ball & Ring) (Softening point)	SII group method	80-95°C
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	SII group method	1.04

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 สมบัติบางประการของ Vestenamer® 8012

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	ค่าที่ได้
ดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI)	ISO 1133	18 cm^3/10 min (190°C /2.16kg)
ความหนาแน่น (Density)	ISO 1183	0.91 g/cm^3
ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)	ASTM D 1646	< 10 (ML 1+4 (100°C))
จุดหลอมเหลว (DSC) (Melting point)	ISO 11357	54°C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท แล็บ เทค เอ็นจิเนียร์ จำกัด
2. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) บริษัท ยงฟง แมชชีนเนอรี่ จำกัด
3. เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) บริษัท แล็บ เทค เอ็นจิเนียร์ จำกัด
4. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 บริษัท ชิมัดซึ จำกัด
5. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (Moving die rheometer, MDR) บริษัท นิชิโกโชวจิ จำกัด
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) รุ่น LR 5 K บริษัท ลอยด์ อินสทรูเมนท์ จำกัด
7. เครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) บริษัท เอทีเอส ฟาร์เอส พี เอ จำกัด
8. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC (Differential scanning calorimeter) รุ่น DSC 204 F1 บริษัท เนทช จำกัด
9. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMA (Dynamic mechanical analyzer) รุ่น Q800 บริษัท ทีเอ อินสทรูเมนท์ จำกัด
10. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) รุ่น AFM Nanoscope IIIA model Ns3 บริษัท ดิจิตอล อินสทรูเมนท์ จำกัด
11. ตู้อบ
12. เครื่องชั่ง
13. อุปกรณ์เครื่องแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง

1. ตัดและชั่งยางโบรโมบิวทิล รวมทั้งสารเคมีต่างๆ ดังตารางที่ 3.8
2. ใส่ยางโบรโมบิวทิลในเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เพื่อทำการบดย่อยหรือมาสติเคชัน (Mastication) ให้ยางนิ่มตัวที่อุณหภูมิ 70-80°C และสามารถพันรอบลูกกลิ้งได้ แล้วทำการกรีดพับยางจนกระทั่งยางนิ่ม เป็นเวลา 2-3 นาที
3. ทำการใส่สารตัวเติมต่างๆ ยกเว้นสารเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยา พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารช่วยผสม โดยค่อยๆใส่ระหว่างลูกกลิ้ง และทำการผสมโดยการกรีดและพับยาง (Cut-and-fold) เพื่อให้สารตัวเติมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 100-120°C เป็นเวลา 15-20 นาที แล้วรีดยางออกเป็นแผ่นหนา 3-5 mm
4. ทำการหลอมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารช่วยผสมด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 130-140°C เป็นเวลา 3-5 นาที จนกระทั่งพอลิเอทิลีนใสและสามารถพันรอบลูกกลิ้งได้
5. จากนั้นนำยางผสมจากข้อที่ 3 มาทำการผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่หลอมแล้วด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง โดยทำการกรีดและพับยาง จนกระทั่งยางและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมเข้ากันดี เป็นเวลา 7-10 นาที แล้วรีดยางออกเป็นแผ่นหนา 3-5 mm
6. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 in^2 จำนวน 2 แผ่น นำไปวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 125°C โดยหาความหนืด ML 1+8 (125°C)
7. เมื่อตัดตัวอย่างยางเพื่อใช้ทดสอบความหนืดมูนนี่แล้ว จึงเติมสารเชื่อมโยงและตังเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยค่อยๆใส่ระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมโดยการกรีดและพับยางต่อจนกระทั่งสารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกับยางที่อุณหภูมิ 100-110°C แล้วรีดยางออกเป็นแผ่นหนา 2-3 mm
8. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 in^2 แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดการเชื่องโยง MDR ที่อุณหภูมิ 180°C เพื่อหาเวลาก่อนเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$)
9. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่น (152.4×152.4×2 mm^3) แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูปเพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยงที่ได้จากกราฟเชื่อมโยง ใช้เวลาเพิ่มเป็น $t_{c(90)}\times$ 1.2 สำหรับเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและชิ้นงานยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

สารเคมี	ปริมาณ (phr)							
	ตอนที่ 1	ตอนที่ 2				ตอนที่ 3	ตอนที่ 4	
BIIR	100	100	100	100	100	100	100	100
Calcined clay	70	70	70	70	70	70	70	70
TiO_2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
P-150	8	8	8	8	8	8	8	8
Stearic acid	1	1	1	1	8	1	1	1
MgO	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
Sulfur	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Vultac	1	1	1	1	1	1	1	1
LDPE	43, 67, 100	43	43	43	43	43	43	43
Fusabond	-	2.2	-	-	-	1.3, 2.2, 3.0	-	-
Engage	-	-	2.2	-	-	-	-	-
SP-1045	-	-	-	2.2	-	-	-	-
Vestenamer	-	-	-	-	2.2	-	-	2.2

<u>หมายเหตุ</u> ตอนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราส่วนผสม BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30, 60/40 และ 50/50 w/w (43, 67 และ 100 phr)

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสม

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด

3.4.2 การผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมแบบปิด

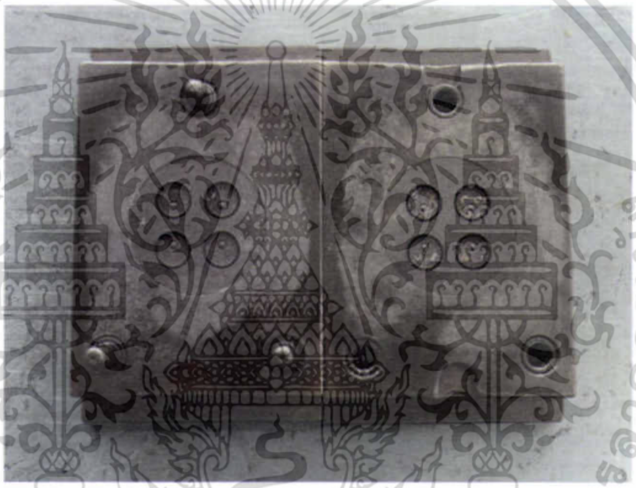
1. ทำการชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.8 ตอนที่ 4
2. ทำการบดยางโบรโมบิวทิลที่อุณหภูมิ 70-80°C เป็นเวลา 2 นาที
3. ทำการผสมสารตัวเติมตามตารางที่ 3.8 (ยกเว้น สารเร่งการเชื่อมโยง สารเชื่อมโยง LDPE และสารช่วยผสม) ที่อุณหภูมิ 100-120°C
4. ทำการผสม LDPE กับสารช่วยผสมที่อุณหภูมิ 130-140°C แล้วต่อด้วยการผสมสารเชื่อมโยง และสารเร่งการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 100-110°C
5. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการเชื่องโยง MDR ที่อุณหภูมิ 180°C เพื่อหาเวลาก่อนเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ชและเวลาเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่น (152.4×152.4×2 mm^3) แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูปเพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยงที่ได้จากกราฟเชื่อมโยง ใช้เวลาเพิ่มเป็น $t_{c(90)} \times 1.2$ สำหรับเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและชิ้นงานยาง

3.4.3 การขึ้นรูปจุกยางขวดน้ำเกลือ

1. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 3×3 in^2 ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่นรูปจุกยาง ดังรูปที่ 3.1
2. ทำการกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยงที่ได้จากกราฟเชื่อมโยง ใช้เวลาเพิ่มเป็น $t_{c(90)} \times 1.8$ สำหรับเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและชิ้นงานยาง



รูปที่ 3.1 แม่แบบรูปจุกยาง

3.5 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

3.5.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

1. การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) กำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึง (Cross head speed)	500	mm/min
ความยาวเริ่มต้น หรือความยาวเกจ (Gauge length)	25	mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	kN
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	10	ชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง} = F / A \qquad (3.1)$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

- ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = \frac{(l - l_0)}{l_0} \times 100 \qquad (3.2)$$

เมื่อ l = ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)

l_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) หรือความยาวเกจ

- มอดุลัสของยาง (Rubber modulus) ที่ 300% ดึงยืดของชิ้นงาน (M300) คือค่าความเค้นดึง (Tensile stress) ที่ค่าความเครียด 300% (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่)

2. การทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการดึง (Tension set) ด้วยเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ กำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึง	500	mm/min
ค่าการยืด	200	%
ความยาวเริ่มต้น หรือความยาวเกจ	25	mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	kN
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	10	ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์การเสียรูปถาวรของชิ้นงาน หลังจากทำการดึงชิ้นงานค้างไว้ที่ความเครียดคงที่เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำชิ้นงานมาตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ยางคืนตัวเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณ ดังสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเสียรูปถาวรหลังการดึง} = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0} \times 100 \qquad (3.3)$$

เมื่อ l_1 = ความยาวที่เปอร์เซ็นต์การยืด เท่ากับ 200% ของชิ้นงาน (mm)

l_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) หรือความยาวเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบความแข็งกด (Hardness test) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องที่ทำการกดตัวอย่างที่หนาอย่างน้อย ¼ in โดยสามารถซ้อนตัวอย่างทดสอบเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ ค่าความแข็งกดอ่านได้หลังจากกดเป็นระยะเวลาประมาณ 5 วินาที ใช้ตัวอย่างทดสอบจำนวน 3 ชิ้นในแต่ละสูตร โดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง คือ 10 จุดในการกดต่อหนึ่งตัวอย่างทดสอบ

3.5.2 ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยง

หาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง (n) ที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว จากเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย โดยการแช่ชิ้นงานขนาด 10×20×2 mm^3 ในสารละลายโทลูอีน 30 ml เป็นเวลา 4 วัน ทดสอบ 5 ชิ้นต่อสูตร ทำการวัดขนาดชิ้นงาน 2 ตำแหน่งทั้งก่อนและหลังการแช่ นำผลที่ได้มาคำนวณจากสมการของฟลอรี-ไรเนอร์ [34] ดังสมการที่ 2.3

$$-[\ln(1 - \nu_r) + \nu_r + \chi_1 \nu_r^2] = V_s\, n\, [\nu_r^{1/3} - \nu_r/2] \qquad (2.3)$$

เมื่อ n = ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง (mol/cm^3)

V_s = ปริมาตรโมล่าร์ (Molar volume) ของตัวทำละลาย (cm^3/mol)

ν_r = สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของยางในเจลยางที่บวมตัว (Swellen gel) (ไม่มีหน่วย)

χ_1 = ตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (Polymer-Solvent interaction parameter) (ไม่มีหน่วย) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.56 [35]

3.5.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

โดยใช้สภาวะการทดลองดังนี้

ชั่งตัวอย่างประมาณ	2-5 mg
อัตราการให้ความร้อน	10°C/min
ช่วงอุณหภูมิ	50 - 150°C

หาค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30 (w/w) จากสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\text{\% Crystallinity} = \frac{\Delta H_f / 0.19}{\Delta H_f^0} \times 100 \qquad (3.5)$$

เมื่อ ΔH_f = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนตัวอย่าง (J/g)

ΔH_f^0 = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [36]

0.19 = อัตราส่วนของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม

3.5.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA

การเตรียมชิ้นงานจะนำตัวอย่างมาตัดเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้วนำไปเข้าเครื่อง DMA โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

ขนาดของชิ้นงานโดยประมาณ	12 x 17 x 2 mm^3
รูปแบบในการทดสอบ	Single cantilever bending geometry
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน (Frame)	Medium Frame
ความถี่	1.0 Hz
อุณหภูมิ	-125-50°C
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	3°C/min

โดยค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) และค่า tan δ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

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

เมื่อ E' = มอดุลัสสะสม (Storage modulus)

E'' = มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus)

E^* = มอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)

$\tan\delta$ = ความสามารถในการกระจายพลังงานต่อความสามารถในการสะสมพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค AFM [37]

เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการตัดชิ้นทดสอบที่ผิวของยางในขณะที่แช่ด้วยไนโตรเจนเหลวตลอดเวลาด้วยเครื่องไมโครโทม (Microtome) หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM โดยใช้ Silicon nitride tip ที่มีความยาวของ Cantiliver เท่ากับ 125 μm ค่าคงที่ของสปริงอยู่ในช่วงระหว่าง 20-100 N/m รูปแบบการทดลองเป็น Tapping mode ที่ความถี่สั่นในช่วง 200-400 kHz ขนาดพื้นที่สแกน 10 μm^2 ความเร่งการสแกน 0.5 Hz บันทึกภาพจากสัญญาณ Phase image

การวิเคราะห์ Force-distance curve เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงกด (Compressive force) และแรงยึดเกาะ (Adhesive force) ระหว่าง tip กับชิ้นงาน โดยใช้ Silicon nitride tip มีค่าคงที่ของสปริง 0.58 N/m รูปแบบการทดลองเป็น Contact mode ความถี่ของ tip 5 Hz

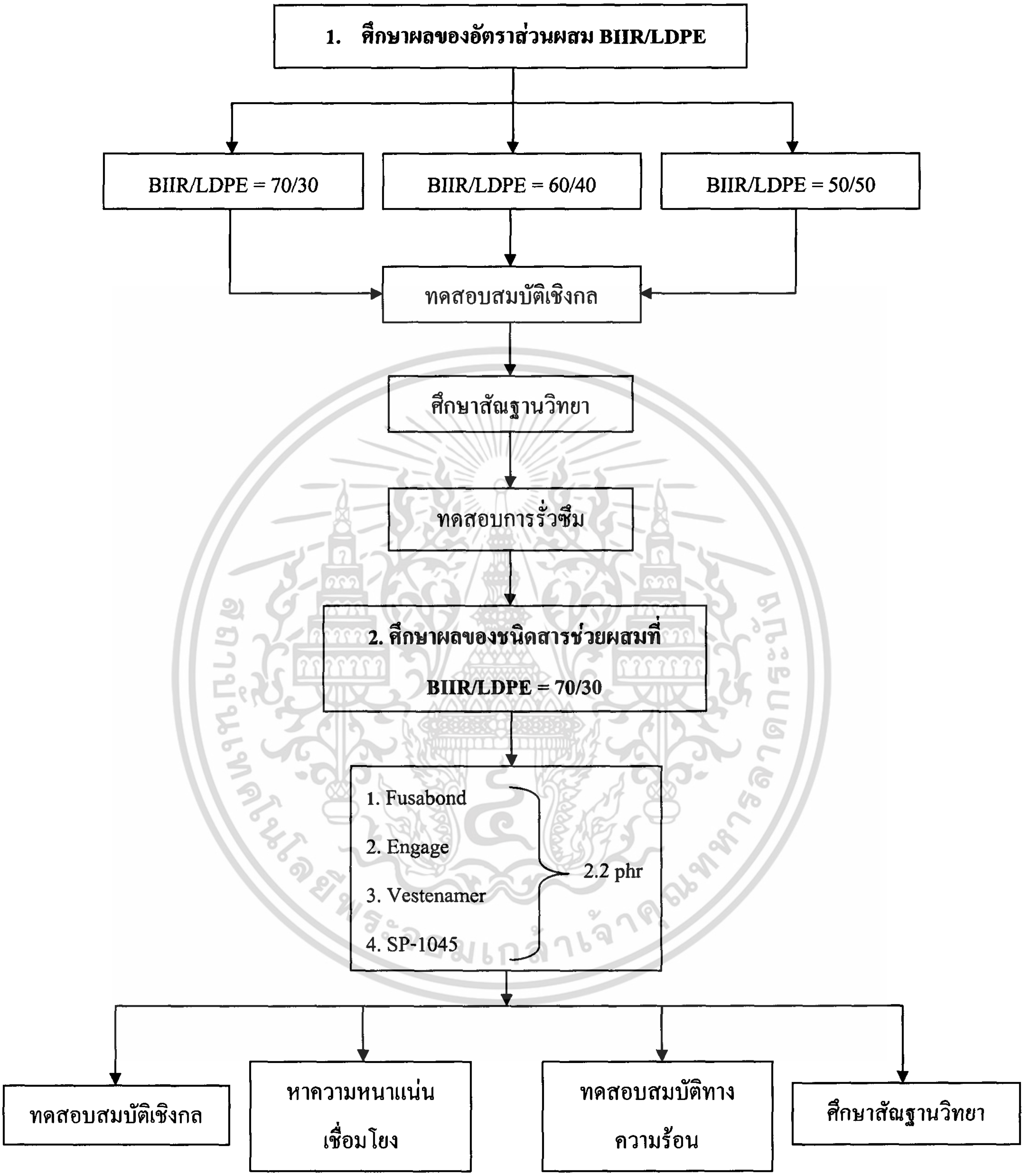
3.5.6 การทดสอบการรั่วซึมของจุกยาง (Leak test)

1. นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปจุกยางมาทำความสะอาดด้วยน้ำอุ่น มาประกอบเข้ากับ Cap และ Plug จากนั้นนำมาต่อเข้ากับขวดน้ำเกลือขนาด 1000 มิลลิลิตร

2. แขวนขวดที่ประกอบแล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้เข็มจากชุด ME set แทงที่ Target ring แล้วปรับอัตราการไหล 60 หยดต่อนาที ทิ้งไว้อีก 1 ชั่วโมง สังเกตว่ามีสารละลายซึมออกมาจากจุกยางหรือไม่

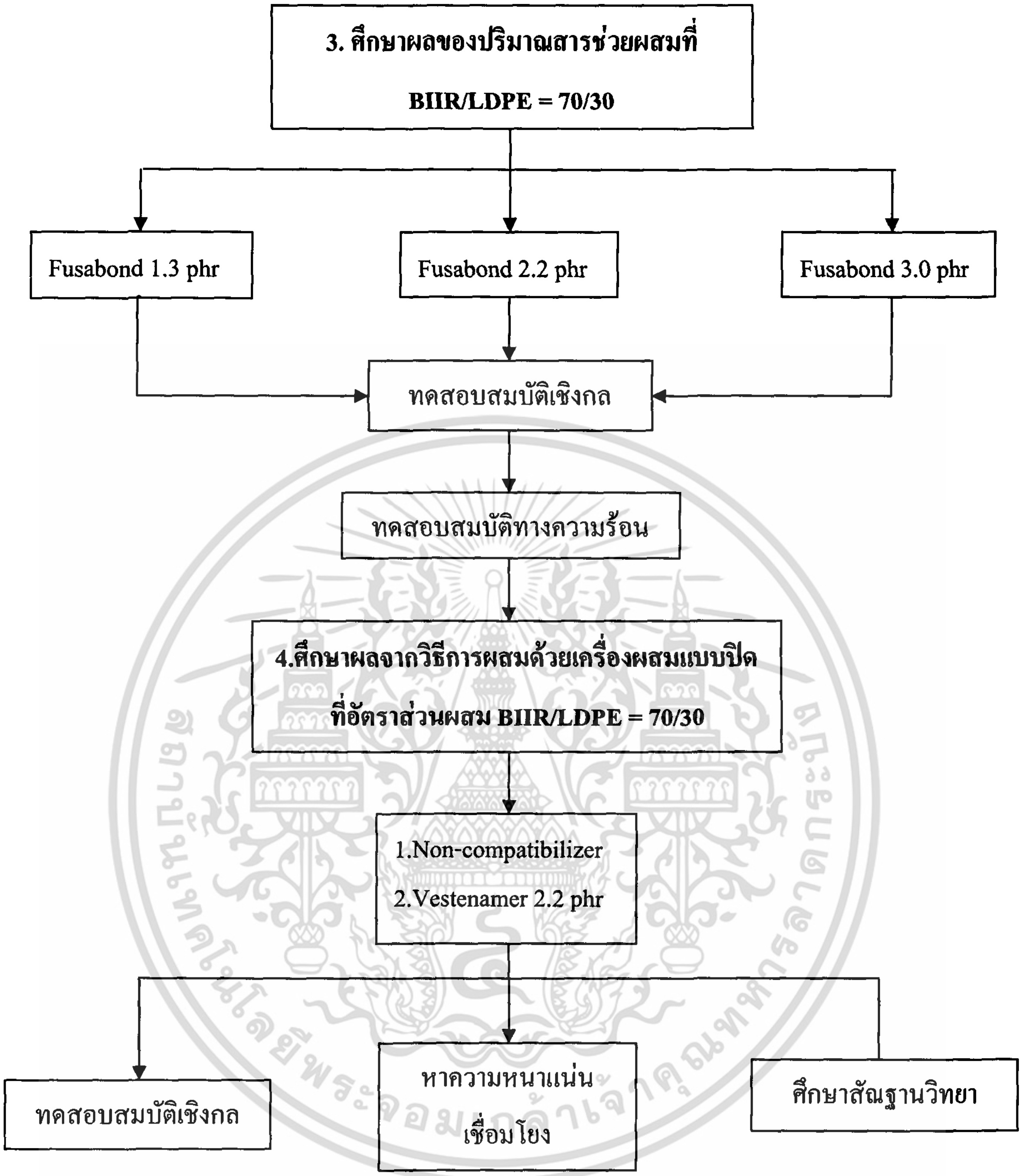
3. เมื่อครบ 1 ชั่วโมงให้ดึงเข็มออก แล้ววัดปริมาตรน้ำที่ไหลออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 สรุปแผนผังการดำเนินงานวิจัย BIIR/LDPE Blends

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 สรุปแผนผังการดำเนินงานวิจัย BIIR/LDPE Blends (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางโบรโมบิวทิล (BIIR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยเบื้องต้นการวิจัยนี้ได้มุ่งหวังศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่าง BIIR/LDPE เพื่อการใช้งานทางการแพทย์ ดังนั้นเป้าหมายการวิจัยจึงทำการทดสอบเพื่อให้ผ่านมาตรฐานดังตารางที่ 1.2 โดยมีปัจจัยศึกษาดังนี้

- อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE
- ชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม
- เครื่องมือที่ใช้ในการผสม

โดยได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา สำหรับอักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย

สูตรหลัก	สูตรย่อย	คำอธิบาย
PEm_	PEm30, PEm40, PEm50	PEm = LDPE เกรด LD 1630J
PEm_f_	PEm30f(1.3), PEm30f(2.2), PEm30f(3.0)	f = Fusabond® E MB-226DY
PEm_n_	PEm30n(2.2)	n = Engage® 8407
PEm_r_	PEm30r(2.2)	r = SP-1045
PEm_v_	PEm30v(2.2)	v = Vestenamer® 8012
InPEm_	InPEm30, InPEm30v(2.2)	In = Internal mixer

4.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม

4.1.1 ศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง

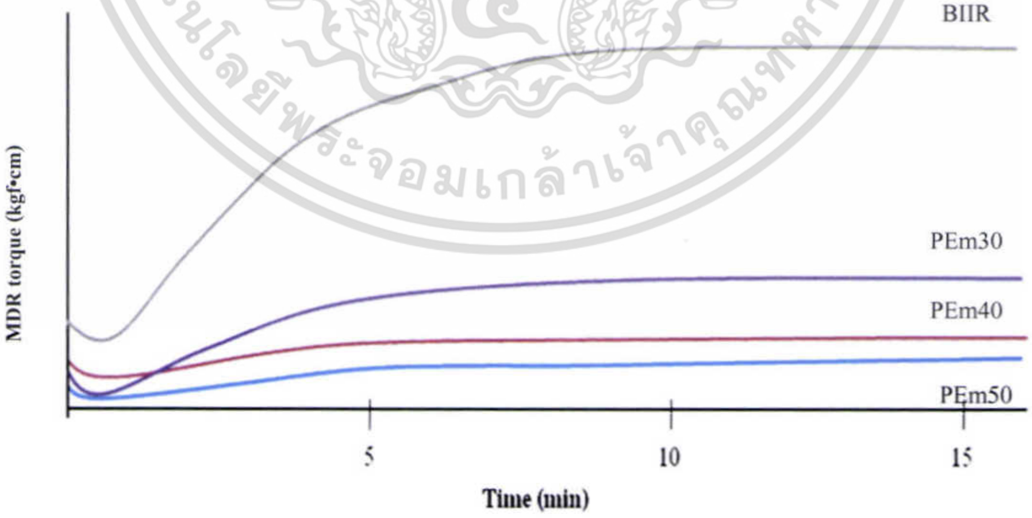
โดยทั่วไปกระบวนการผสมยางจะต้องมีการวัดความหนืดมูนนี่ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่ใช้ควบคุมคุณภาพของยางในแต่ละครั้งของการผสมให้มีค่าใกล้เคียง จากงานวิจัยได้ทำการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ที่สภาวะ ML (1+8) 125°C โดยสามารถแสดงค่าความหนืดมูนนี่ ได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ LDPE เพิ่มมากขึ้นค่าความหนืดมูนนี่ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่วัฏภาค LDPE มีความแข็งมากกว่าวัฏภาค BIIR เมื่อมีการแทรกวัฏภาค LDPE เข้าไปในเนื้อยางทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของจานหมุน (Rotor) ลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาพฤติกรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงของยาง ซึ่งใช้หาเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) จากงานวิจัยได้ทำการทดสอบด้วยเครื่องเอ็มดีอาร์ (Moving die rheometer, MDR) ที่อุณหภูมิ 180°C จากรูปที่ 4.1 เมื่อกราฟการเชื่อมโยงของ BIIR จะมีค่าแรงบิด (Torque) มากกว่ากราฟการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเป็นอุณหภูมิที่ LDPE เกิดการหลอมเป็นของเหลว ดังนั้นแรงบิดที่วัดได้จึงเป็นแรงบิดที่เกิดจากการเชื่อมโยงสายโซ่ของยางที่เปลี่ยนจากสายโซ่ตรงกลายเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ ดังนั้นเมื่อมีการเติม LDPE ถือว่าเป็นการลดอัตราส่วน BIIR ที่จะต้านทานแรงบิดของจานหมุนลดต่ำลง ด้วยเหตุผลนี้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน LDPE จึงทำให้แรงบิดของพอลิเมอร์ผสมลดลง ในขณะที่เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาชื่อมโยงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสารเชื่อมโยงที่ใช้ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเฉพาะวัฏภาคของยาง โดยที่ปริมาณสารเชื่อมโยงจะแปรผันตามปริมาณยาง ดังนั้นเวลาเชื่อมโยงจึงไม่ขึ้นกับกับอัตราส่วนของ LDPE

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดมูนนี่ของพอลิเมอร์ผสม

สูตร	ความหนืดมูนนี่ (ML (1+8) 125°C)
PEm30	4.8
PEm40	10.5
PEm50	12.2

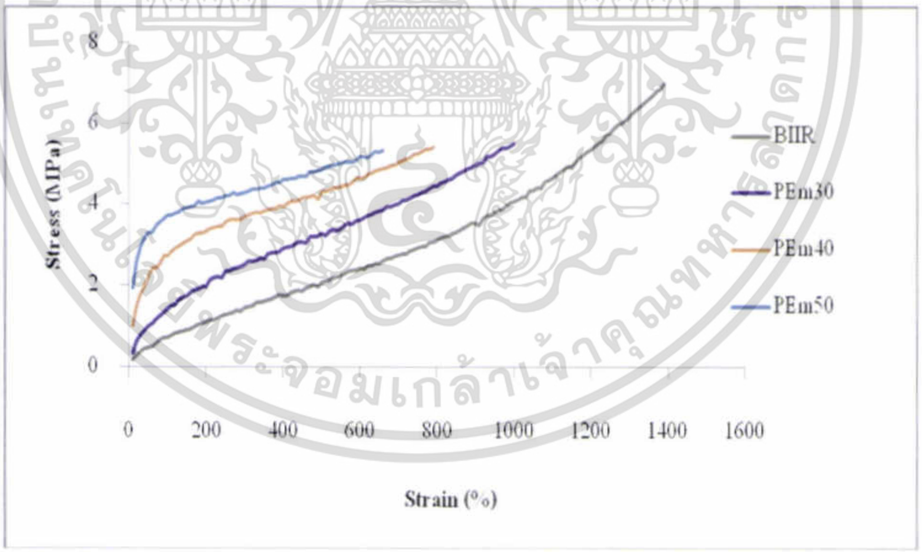


รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

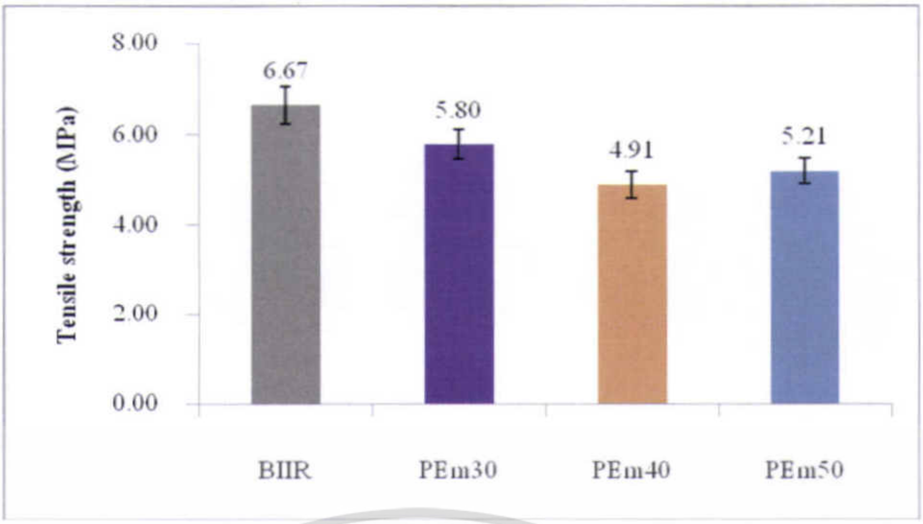
4.1.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาที่อัตราส่วนผสมระหว่างยางโบรโมบิวทิลต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (BIIR/LDPE) เท่ากับ 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w) ที่มีต่อสมบัติเชิงกล จากรูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง BIIR/LDPE จะเห็นว่าความสามารถในการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดต่ำลง เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของวัฏภาคพลาสติก ในขณะที่ความสามารถในการรับแรงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความแข็งแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ดังรูป 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่ออัตราส่วน LDPE เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยทั่วไปยางจะมีความสามารถในการดึงยืด ณ จุดขาดที่สูงมาก ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสม แต่จากการที่มีวัฏภาคของพลาสติกเพิ่มขึ้นซึ่งเปรียบเสมือนการลดปริมาณวัฏภาคยางลง ทำให้ความสามารถในการดึงยืดของชิ้นงานลดลง เนื่องมาจากพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) การที่มีวัฏภาคของพลาสติกเข้าไปผสมกับวัฏภาคของยาง ซึ่งเข้าไปขัดขวางการยืดตัวของยางเมื่อได้รับแรงกระทำ

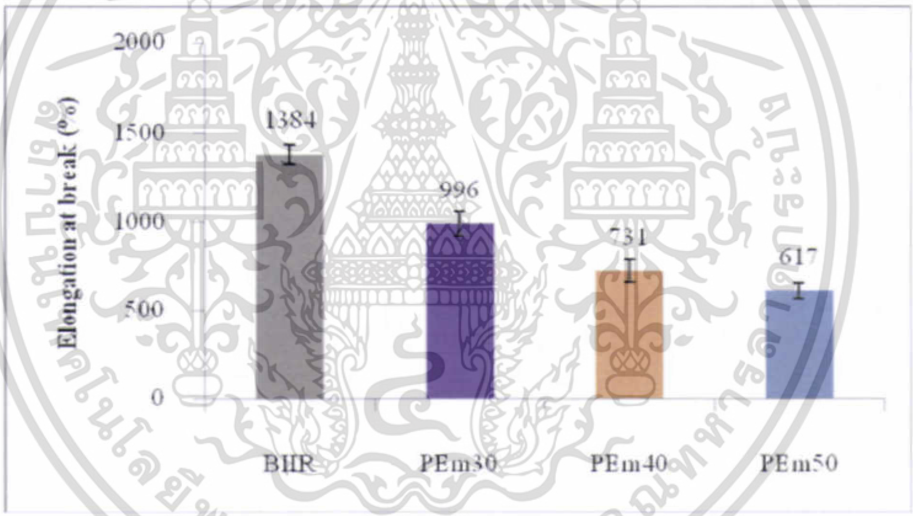


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)

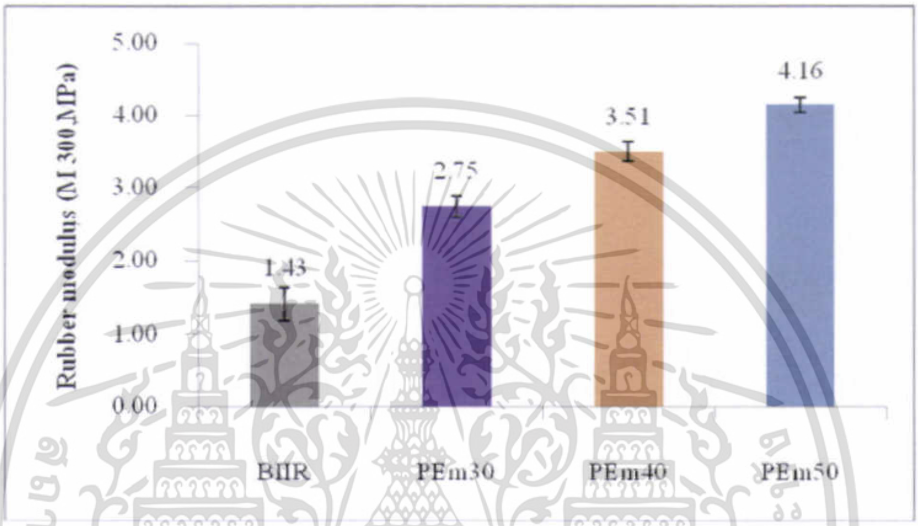


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)

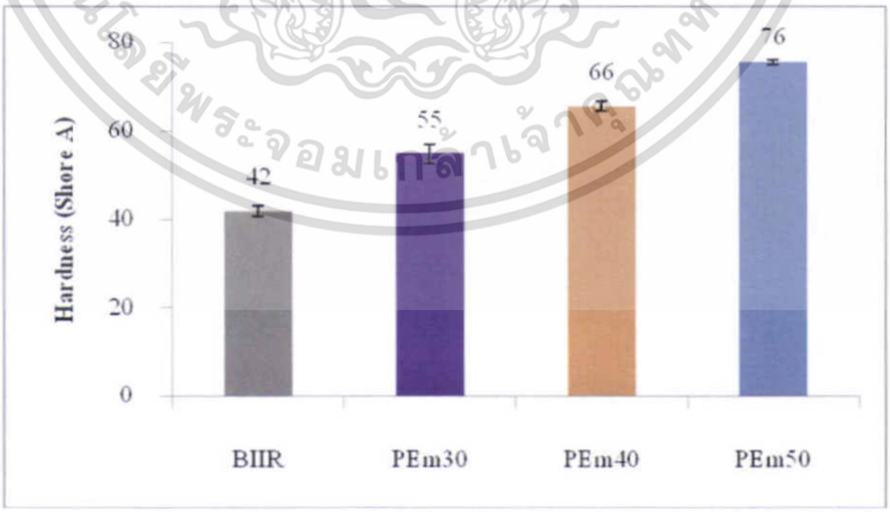
จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของ LDPE เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืด (Rubber modulus, M300) และค่าความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixtures) [38-39] ที่ว่าด้วยความสัมพันธ์ของสมบัติบางประการของของผสม โดยสมบัติที่ได้จะขึ้นกับชนิด ปริมาณและการจัดเรียงตัวของสารนั้นๆ โดยที่สมบัติที่ได้ก็จะยังคงไว้ซึ่งสมบัติของสารเดิมอยู่ แต่จะมากน้อยเพียงใดขึ้นกับอัตราส่วนของสารที่ผสม ดังนั้นค่ามอดุลัสของยางซึ่งเป็นค่าช่วงเริ่มต้นของการดึงยืดที่แสดงถึงความแข็งของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาจากวัฏภาคของพลาสติกมีความแข็งมากกว่าวัฏภาคของยาง ดังนั้นเมื่อผสมพลาสติกลงไปจึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเนื่องจากสมบัติของพลาสติก และเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกก็ส่งผลให้ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ LDPE เพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดและค่าความแข็งกดที่ได้จะมีแนวโน้มตามสมบัติของ LDPE ที่มีความแข็งมากกว่ายาง BIIR ซึ่งสอดคล้องกับความชันของกราฟตามรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าความชันของกราฟจะสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มวัฏภาคพลาสติก



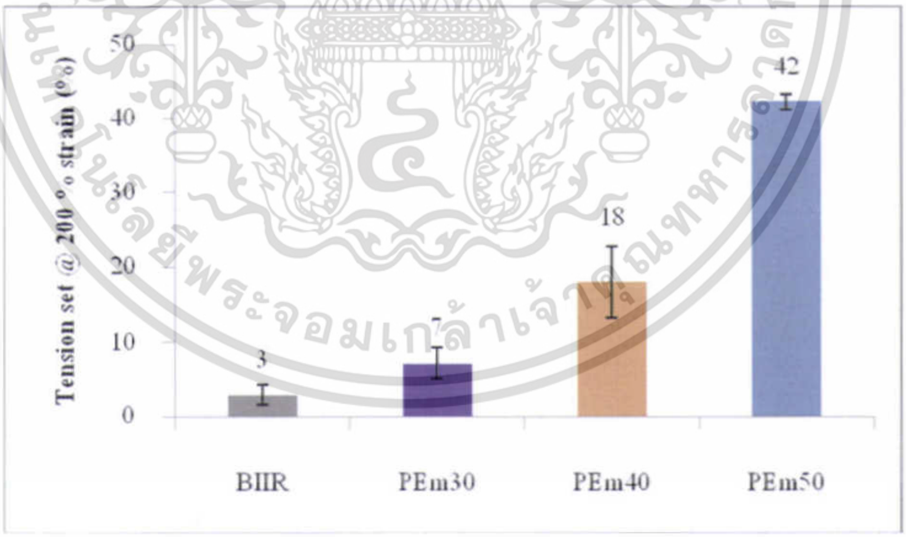
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสียรูปถาวร (Permanent set) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ยังคงอยู่หลังปลดปล่อยแรงจากภายนอกที่มากระทำ โดยการเสียรูปนั้นจะมีทั้งการเสียรูปถาวรหลังการดึง (Tension set) และการเสียรูปถาวรหลังการกด (Compression set) ซึ่งโดยทั่วไปการที่ยางสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้เนื่องมาจากโมเลกุลของยางที่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ที่จะทำหน้าที่ดึงโครงสร้างกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อปล่อยแรง ทำให้ไม่เกิดการเลื่อนผ่านอย่างไม่คืนกลับของสายโซ่ ดังนั้นความสามารถในการยืด คืนกลับของยางสู่รูปร่างเดิมหรือการเสียรูปถาวรจึงขึ้นกับความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง (Crosslink density, n) ที่มากพอทำให้โครงสร้างเชื่อมโยงสามมิติ เป็นที่ทราบดีว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastics) จำพวกพอลิเอทิลีนสามารถเกิดการคราก (Yield) เมื่อได้รับแรงถึงจุดหนึ่ง ซึ่ง LDPE (LD 1630J) มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดคราก (%Elongation at yield) เริ่มต้นที่ 30% ดึงยืด ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรหรือการเลื่อนหลุดออกจากกันของสายโซ่ (Chain disentanglement) จึงทำให้เกิดการเสียรูปถาวรหลังการดึงมากกว่ายางที่เชื่อมโยง ดังนั้นการที่มีวัฏภาคของพลาสติกเพิ่มขึ้นซึ่งเปรียบเสมือนการลดปริมาณวัฏภาคยางลงทำให้การเสียรูปถาวรเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 4.7 ที่แสดงถึงค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ตำแหน่ง 200% ดึงยืดของชิ้นงาน พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ LDPE เพิ่มมากขึ้น และทำการให้แรงดึงกับชิ้นงานในระยะเวลาหนึ่งก็จะส่งผลให้เกิดการเลื่อนหลุดของสายโซ่ จึงส่งผลให้สมบัติการคืนตัวของยางลดต่ำลง

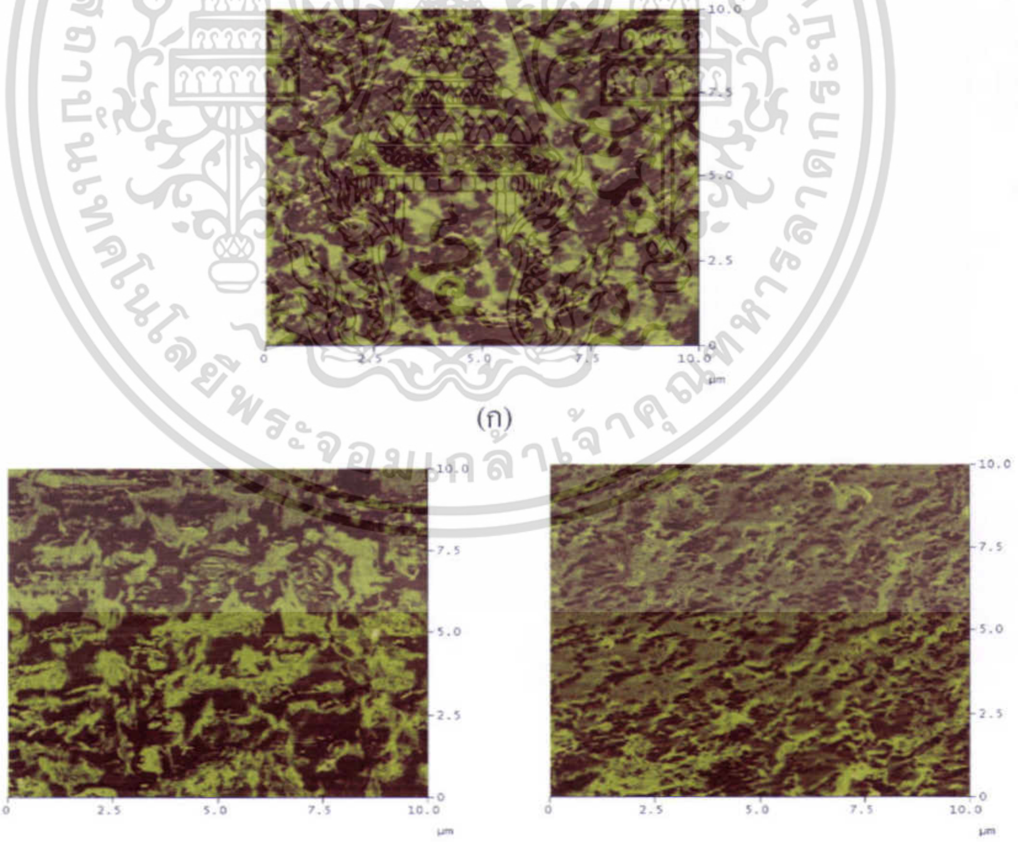


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา

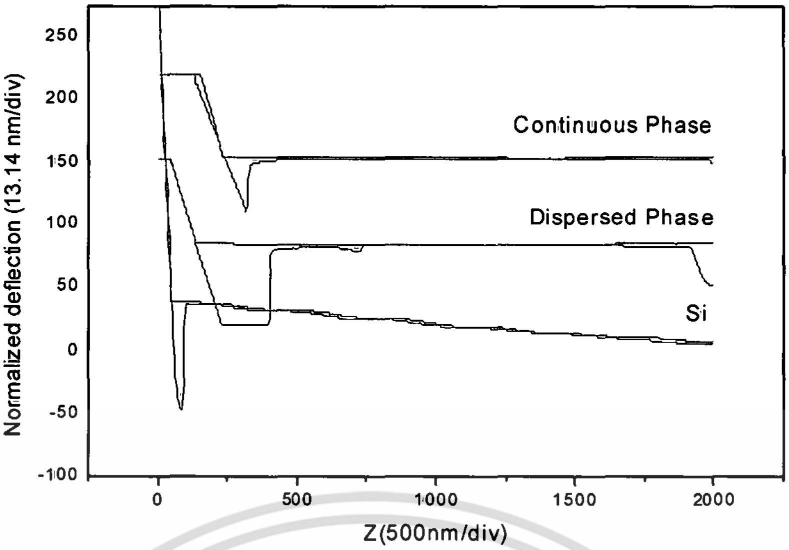
ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของพื้นผิวตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ทำการหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) จะสังเกตเห็นความแตกต่างของวัฏภาคของ BIIR และ LDPE ดังรูปที่ 4.8 โดยที่วัฏภาคของ BIIR จะมีสีแดง ส่วนวัฏภาคของ LDPE จะมีสีเหลือง พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ LDPE เพิ่มมากขึ้น จะสังเกตเห็นวัฏภาคของ LDPE (สีเหลือง) กระจายตัวในวัฏภาค BIIR (สีแดง) มากขึ้น แต่ที่อัตราส่วนที่ 70/30 และ 60/40 เห็นความแตกต่างไม่ชัดเจน ทั้งนี้การตรวจสอบความแตกต่างของวัฏภาคจากรูป AFM เพื่อระบุชนิดของพอลิเมอร์สามารถทดสอบด้วยการทำ Force-distance curve (F-S Curve) โดยแสดงค่าแรงที่เกิดจากการกดและการยึดเกาะระหว่าง tip กับตัวอย่าง แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 จะสังเกตได้ว่ากราฟของ Dispersed phase นั้นมีลักษณะการยึดเกาะที่นานกว่า ซึ่งเป็นการแสดงถึงความเหนียวของวัฏภาค สำหรับกราฟของ Continuous phase นั้นมีลักษณะการยึดเกาะที่เร็วกว่า ซึ่งเป็นการแสดงถึงความแข็งของพอลิเมอร์ที่มากกว่า สอดคล้องกับการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของกราฟโดยเปรียบเทียบกับกราฟของซิลิกอนให้มีค่าเท่ากับ 1 จะได้ค่า Relative surface stiffness ของ Dispersed phase (สีแดง) เท่ากับ 0.25 และ Continuous phase (สีเหลือง) เท่ากับ 0.88



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.8 AFM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน (ก) 70/30, (ข) 60/40 และ (ค) 50/50 (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 Force-distance curve ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30 (w/w)

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w) สรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนผสมของพลาสติกจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง แต่ค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืด ค่าความแข็งกดและค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้นจากการวิจัยจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ให้สมบัติเข้าใกล้เป้าหมายงานวิจัยมากที่สุด คือที่อัตราส่วน 70/30 (w/w) แต่เนื่องจากเป้าหมายงานวิจัยเพื่อการพัฒนาวัสดุสำหรับผลิตจุกยางขวดน้ำเกลือยังมีสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ที่สำคัญคือการทดสอบการรั่วซึม (Leak test) จากผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานทดสอบหลังจาก ME set ถูกดึงออก ซึ่งการคืนตัวของจุกยางส่งผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำเกลือที่อยู่ในขวด ดังนั้นการคืนตัวที่ช้าเกินไปจึงทำให้น้ำเกลือที่ใช้ทดสอบไหลออกมาหมดขวด ทำให้มีความสนใจศึกษาผลจากสารช่วยผสมในขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการรั่วซึม

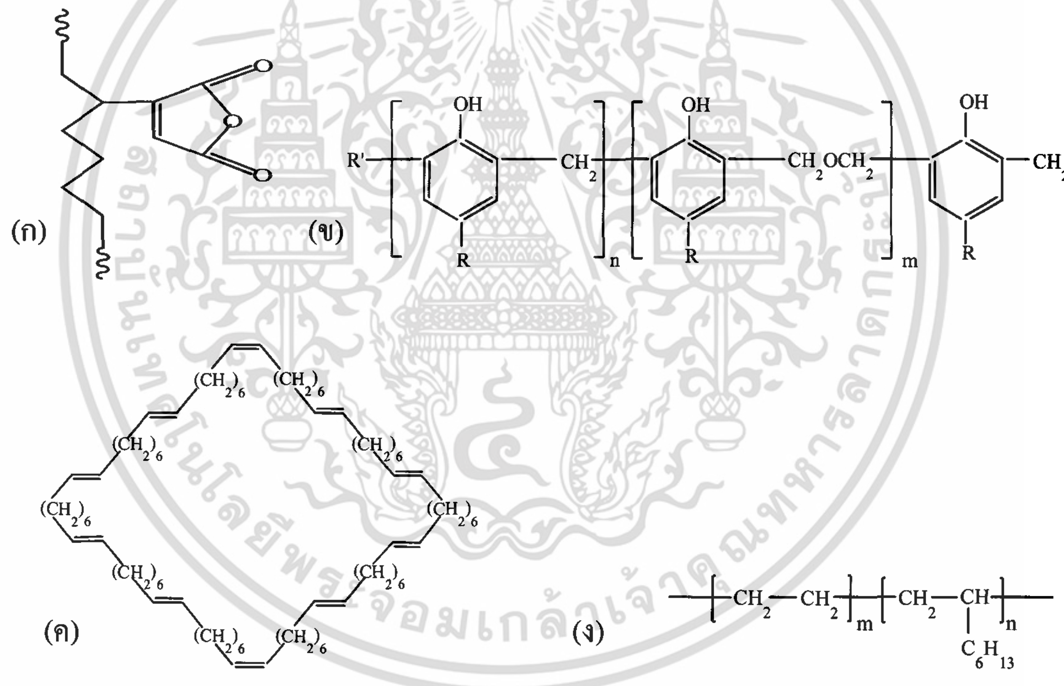
สูตร	ขวดที่	สารละลายที่ไหลขณะที่เสียบ ME set	ปริมาณสารละลายที่ไหลหลังดึง ME set (ml)	
			ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย
BIIR	1	No	10	
	2	No	9	
	3	No	7	8±2
	4	No	5	
	5	No	8	
PEm30	1	No	787	
	2	No	854	
	3	No	886	818±48
	4	No	792	
	5	No	775	
PEm40	1	No	861	
	2	No	843	
	3	No	897	851±39
	4	No	865	
	5	No	790	
PEm50	1	No	783	
	2	No	892	
	3	No	874	855±43
	4	No	849	
	5	No	881	

4.2 ศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสม

สารช่วยผสม (Compatibilizer) คือสารที่มีหน้าที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยการช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นที่ผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจายตัวที่มีขนาดเล็กแล้วทำให้สมบัติยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาที่อัตราส่วนผสมระหว่าง BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w) ในเบื้องต้น พบว่าอัตราส่วนผสมที่ตรงตามเป้าหมายของงานวิจัยมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือพอลิเมอร์ผสมระหว่าง BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30 w/w แต่เนื่องจากการทดสอบการรั่วซึมเบื้องต้น พบว่าชิ้นงานทดสอบมีการคืนตัวที่ช้าเกินไปทำให้น้ำเกลือที่ใช้ทดสอบไหลออกมาหมดขวด ดังนั้นประเด็นศึกษาต่อไป คือชนิดสารช่วยผสม สำหรับสารช่วยผสมมีหลากหลายชนิด แต่มีประเภทหลักๆ อยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยา (Reactive compatibilizer) และชนิดที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยา (Non-reactive compatibilizer) ดังนั้นการการศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสม จึงเลือกสารช่วยผสมชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยา ได้แก่ Fusabond® E MB-226DY และ SP-1045 และชนิดที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยา ได้แก่ Engage® 8407 และ Vestenamer® 8012 โดยโครงสร้างของสารช่วยผสมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [29, 31, 33] พบว่าปริมาณสารช่วยผสมที่ให้ผลสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าการเสียรูปถาวรที่ต่ำที่สุด คือ 5% ของปริมาณพลาสติก ดังนั้นจึงได้เลือกศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสมที่ปริมาณ 5% ของปริมาณพลาสติก

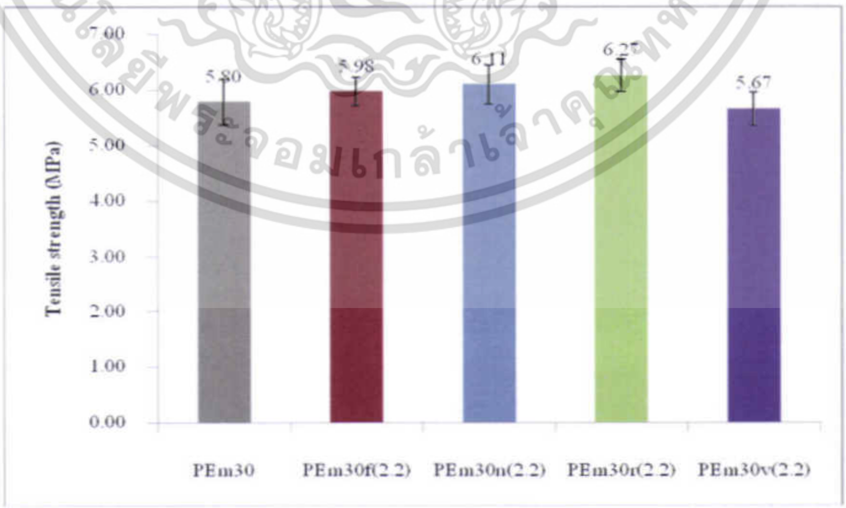


รูปที่ 4.10 โครงสร้างของสารช่วยผสม (ก) Fusabond® E MB-226DY (ข) SP-1045 (ค) Vestenamer® 8012 และ (ง) Engage® 8407

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

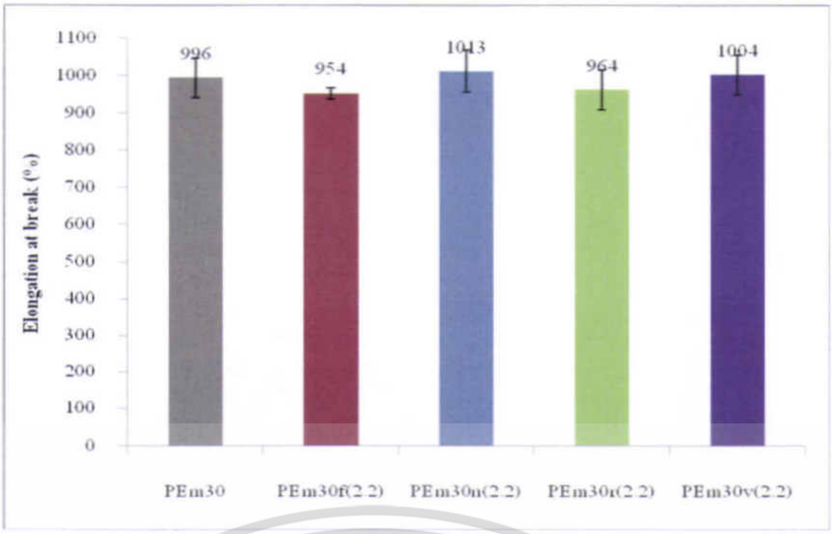
4.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสม โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30 (w/w) และใช้ปริมาณสารช่วยผสมที่ 2.2 phr (5% ของปริมาณพลาสติก) ที่มีต่อสมบัติเชิงกล จากรูปที่ 4.11-4.15 พบว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 4 ตัวอย่าง มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลเล็กน้อยต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืด (M300) และค่าความแข็งกด เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมชนิดที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม แสดงว่าสารช่วยผสมทั้งชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยา และชนิดที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในระบบนี้ (BIIR/LDPE) ทำให้ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมอย่างเด่นชัด ทั้งนี้การที่ผู้วิจัยเลือกสารช่วยผสมทั้งชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยา และไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้นั้น เนื่องจากผู้วิจัยคาดหวังว่าสารช่วยผสมที่สามารถทำปฏิกิริยาได้นั้นจะมีโอกาสที่จะทำปฏิกิริยากับ BIIR ในตำแหน่งพันธะคู่ของโครงสร้างดังเช่นงานวิจัยของเจริญ นาคะสรรค์ [31] ที่กล่าวถึงความสามารถของสารช่วยผสม SP-1045 ที่เกิดปฏิกิริยากับยางธรรมชาติ ดังรูปที่ 2.25 ในขณะที่สารช่วยผสมชนิดไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้จะมีโอกาสเกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่ LDPE (Chain entanglement) แต่จากการศึกษาสมบัติเชิงกลที่พอลิเมอร์ผสมชนิดที่เติมสารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม อาจเนื่องมาจากโอกาสการพบกันของพันธะคู่ของ BIIR กับหมู่ฟังก์ชันของสารช่วยผสมมีน้อยมาก เพราะว่าโดยทั่วไปโครงสร้างของ BIIR จะมีโครงสร้างของไอโซพรีน (Isoprene) ที่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง 1.9-2.1% เท่านั้น จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง BIIR กับสารช่วยผสมมีน้อยด้วย

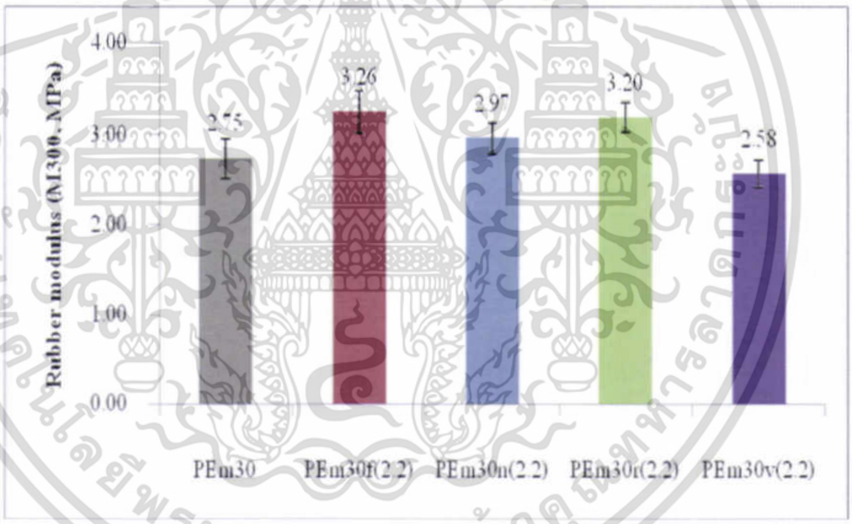


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

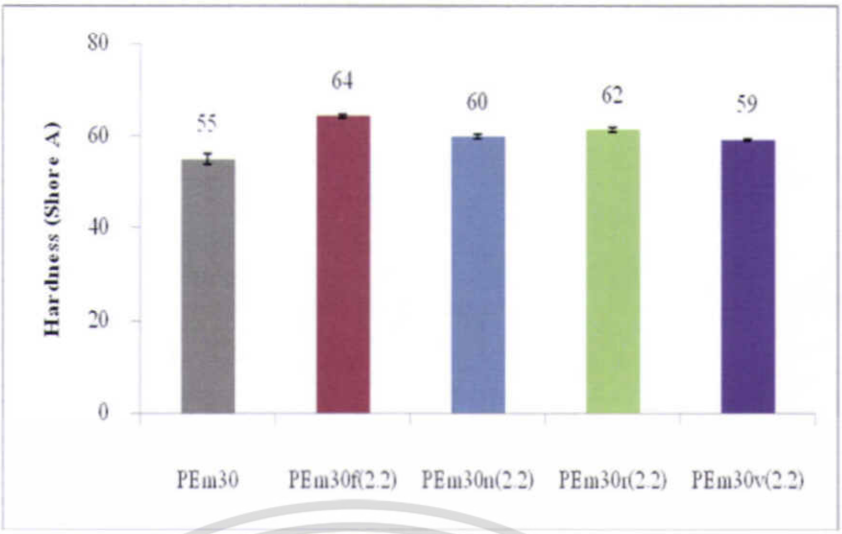


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)

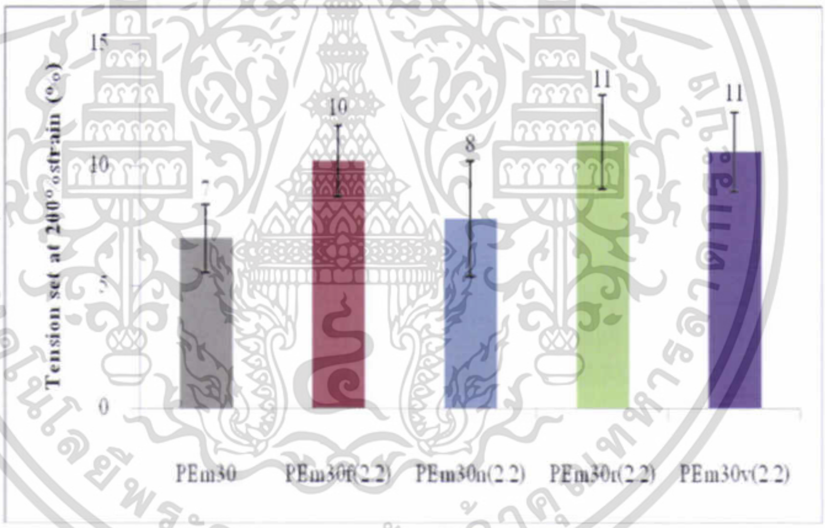


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)



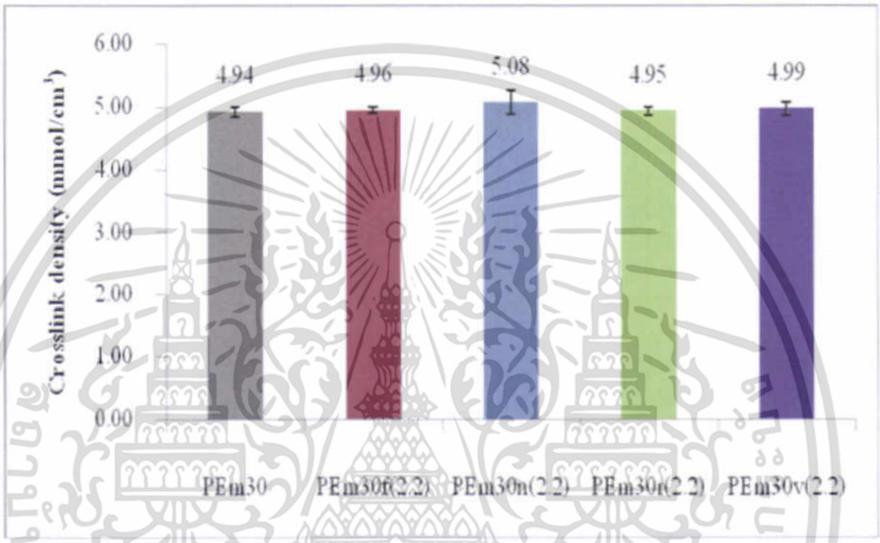
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับชนิดของสารช่วยผสม เมื่อเทียบกับชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30)

4.2.2 ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยง

ความหนาแน่นเชื่อมโยง (n) ของยาง เป็นสมบัติที่ใช้บ่งบอกถึงสมบัติการเสียรูปถาวรของยาง โดยยางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงจะทำให้ยางคงสมบัติของยาง อันได้แก่ ความยืดหยุ่นแข็งแรง มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ดังนั้นเมื่อยางได้รับแรงกระทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง และเมื่อปล่อยแรงกระทำจะทำให้ยางสามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้ดีกว่ายางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงด้วยเทคนิคการบวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวด้วยตัวทำละลาย (Solvent swelling method) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 วัน โดยเลือกใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย (Solvent) เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของสารช่วยผสมเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม (PEm30) พบว่าสารช่วยผสมที่ใช้ไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.16 โดยค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงทั้งหมดที่คำนวณได้ ได้แสดงในภาคผนวก ก ดังนั้นสารช่วยผสมทั้งชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยาและชนิดที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาไม่ได้ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของยางเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับสารช่วยผสมชนิดที่ไม่เติมสารช่วยผสม



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสม กับพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ

4.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน

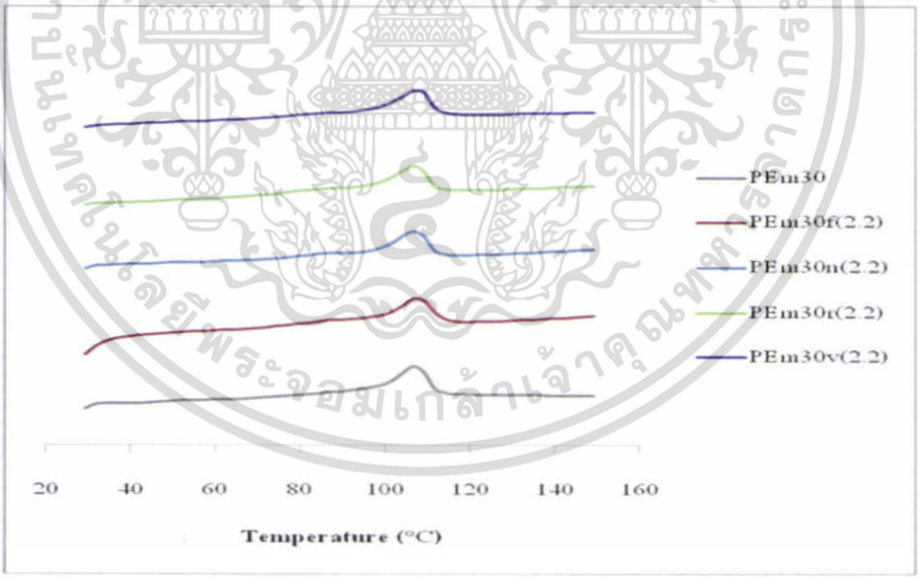
ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ค่าผลต่างเอนทาลปีของการหลอมเหลวผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเมื่อทำการเติมสารช่วยผสมแล้วมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม ในขณะที่ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการหลอมเหลวผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ทั้งที่ไม่เติมสารช่วยผสมและที่เติมสารช่วยผสม ดังรูปที่ 4.17 พบว่าลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าสารช่วยผสมไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน เนื่องจากสารช่วยผสมยังไม่มีปริมาณที่มากพอที่จะเข้าไปขัดขวางการเกิดผลึกของวัฏภาค LDPE ในพอลิเมอร์ผสมและไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Nucleating agent) ทั้งนี้เทอร์โมแกรม DSC ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ได้แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30) กับชนิดที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ

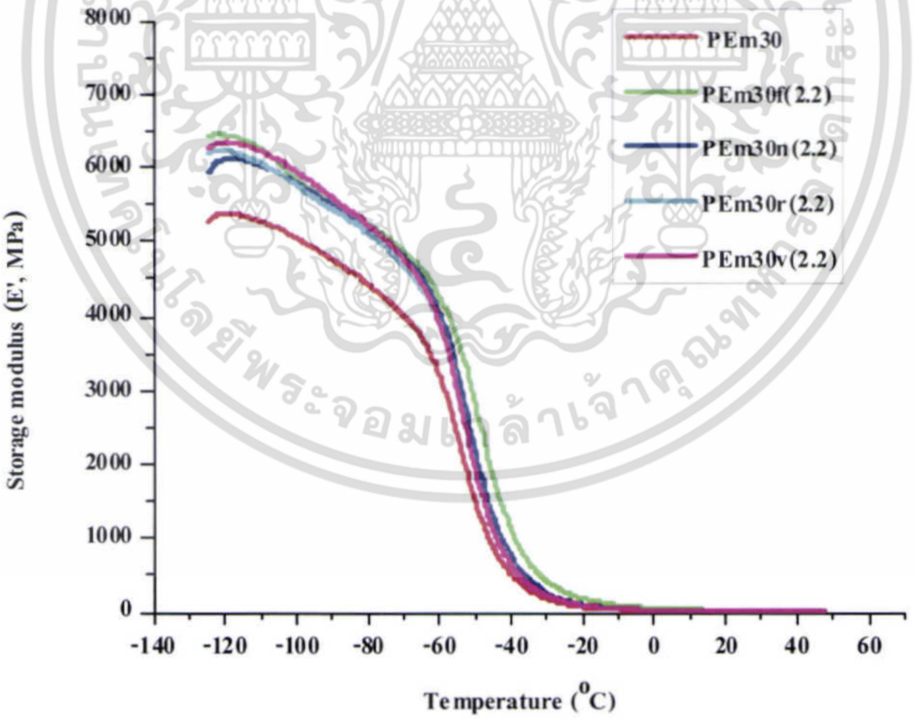
สูตร	T_m(°C)	T_c(°C)	ΔH_f(J/g)	%Crystallinity
PEm30	107.4	84.9	9.15	16.44
PEm30f(2.2)	108.4	89.7	7.46	13.40
PEm30n(2.2)	108.1	87.8	8.00	14.37
PEm30r(2.2)	107.9	88.4	6.97	12.52
PEm30v(2.2)	108.4	87.5	9.14	16.42



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสมกับพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC

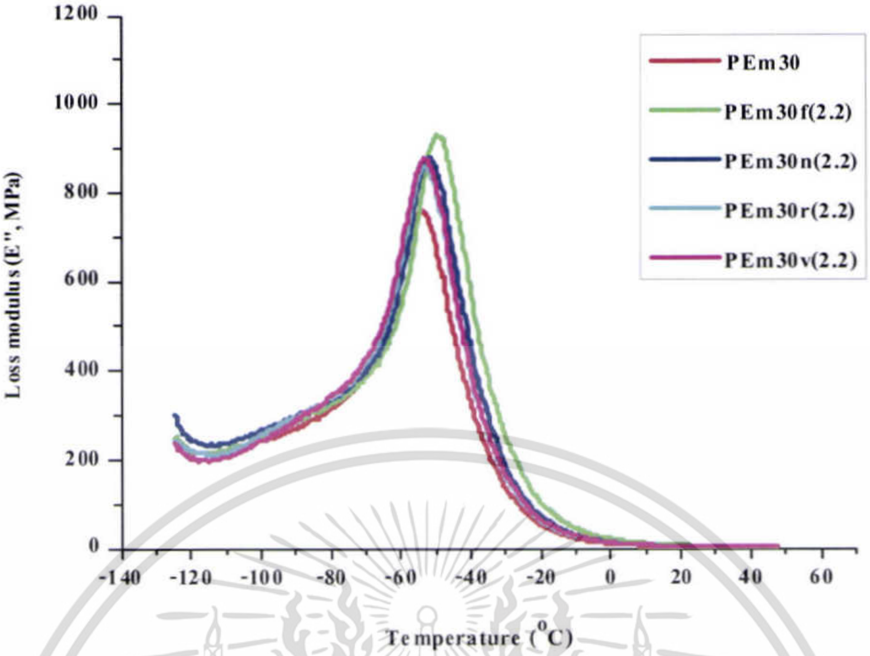
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA ซึ่งเป็นการศึกษาความร้อนเชิงกลของวัสดุเมื่อได้รับแรงสั่นอย่างต่อเนื่อง ที่ใช้หาค่ามอดุลัสสะสม (E') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (E") ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่กับอุณหภูมิ และจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียและค่ามอดุลัสสะสม (Loss modulus/ Storage modulus; E"/E') ซึ่งได้เป็นค่า tan δ สามารถหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของวัสดุได้ ซึ่งหาได้จากจุดสูงสุดของกราฟ tan δ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสมกับที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่า ณ ช่วงอุณหภูมิ -45 ถึง -55°C ที่ความถี่คงที่ ค่ามอดุลัสสูญเสีย (E") ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสม เพราะการสูญเสียพลังงานในรูปแบบอื่น เช่น พลังงานความร้อนที่มากกว่า และจากรูป 4.18 (ค) ปรากฏ ค่า T_g ณ ตำแหน่งสูงสุดของกราฟ tan δ ที่ช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -32°C ซึ่งเป็น T_g ของ BIIR ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก BIIR และ LDPE ไม่สามารถผสมเข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวได้ ไม่มีการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง BIIR และ LDPE

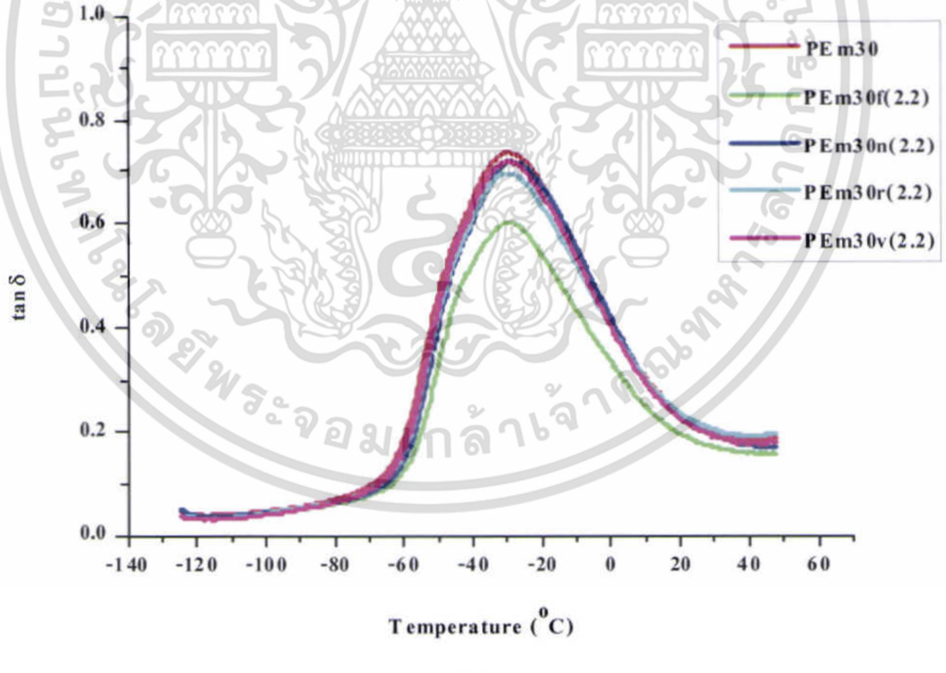


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



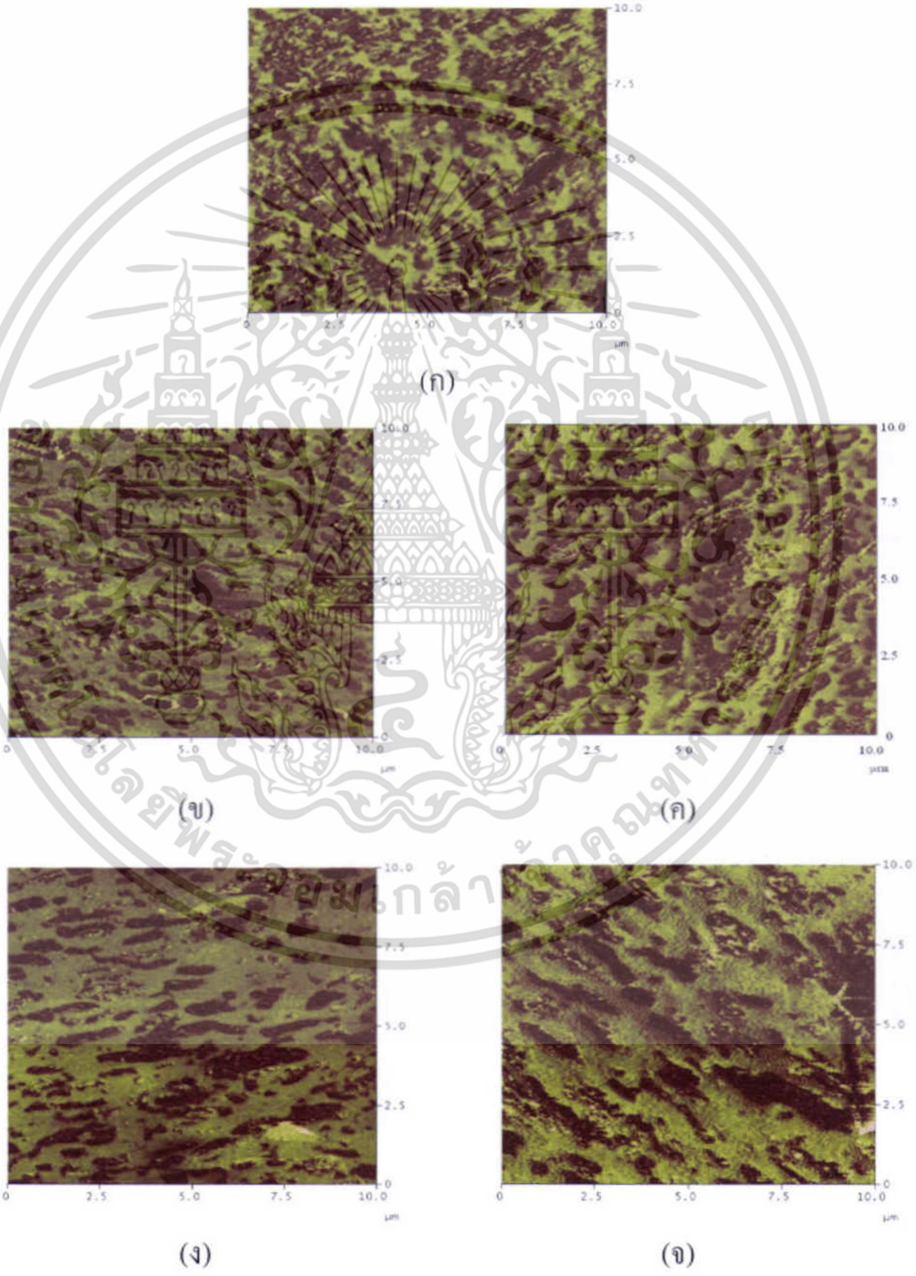
(ค)

รูปที่ 4.18 เทอร์โมแกรม DMA ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เติมสารช่วยผสมกับตัวอย่างที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ (ก) ค่ามอดุลัสสะสม (E') (ข) ค่ามอดุลัสสูญเสีย (E") และ (ค) ค่า tan δ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ด้วยเทคนิค AFM โดยทำการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสมกับพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 70/30 (w/w) จากรูปที่ 4.19 พบว่าพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ (ข-จ) วัฏภาคกระจายตัวของ BIIR มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นกว่าพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสม (ก) โดยที่วัฏภาคของ BIIR มีลักษณะทั้งเป็นก้อนกลม และวงรี



รูปที่ 4.19 AFM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE (ก) PEm30 (ข) PEm30f(2.2) (ค) PEm30n(2.2) (ง) PEm30r(2.2) และ (จ) PEm30v(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสมของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30 w/w โดยใช้ปริมาณสารช่วยผสม 2.2 phr (5% ของ LDPE) พบว่าผลการทดสอบเชิงกล ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม ซึ่งกล่าวได้ว่าสารช่วยผสมที่เลือกใช้ไม่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE อย่างมีนัยสำคัญ

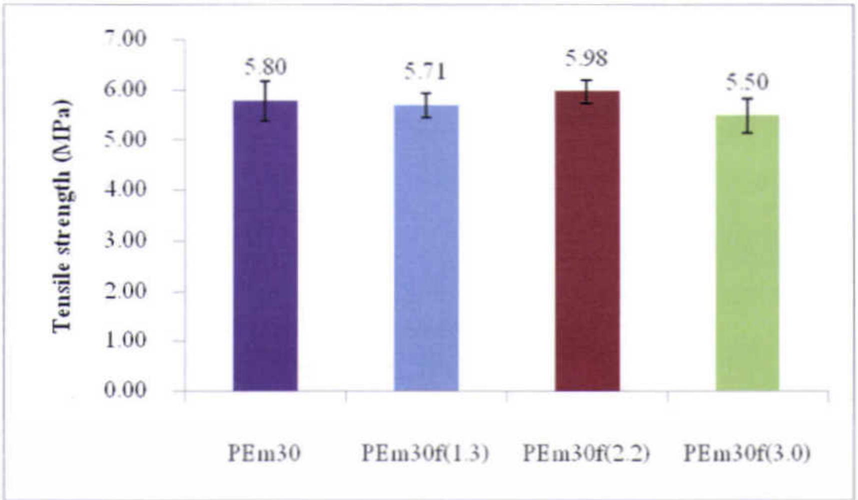
4.3 ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม

4.3.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

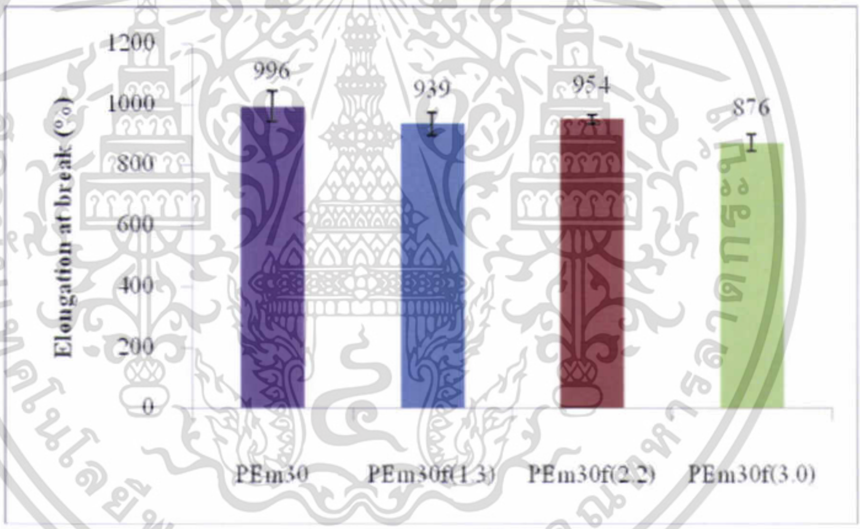
จากการศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสม โดยศึกษาที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30 w/w ที่ปริมาณสารช่วยผสม 2.2 phr พบว่าผลการทดสอบเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม อาจเนื่องมาจากปริมาณสารช่วยผสมยังไม่เหมาะสมกับระบบพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ดังนั้นประเด็นศึกษาต่อไป คือปริมาณสารช่วยผสม ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับพอลิเอทิลีนนั้น ส่วนใหญ่มักใช้พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (PE-g-MA) [29] เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮดรายด์เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มความมีขั้วให้กับ พอลิเมอร์ชนิดไม่มีขั้ว เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิพรอพิลีน (PP) ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาปริมาณสารช่วยผสมชนิด PE-g-MA เพื่อคาดหวังว่าความมีขั้วของมาเลอิกแอนไฮดรายด์จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง BIIR/LDPE โดยเลือกใช้ Fusabond®E MB-226DY ที่ปริมาณ 1.3, 2.2 และ 3.0 phr ซึ่งผลต่อสมบัติเชิงกล แสดงได้ดังรูปที่ 4.20-4.24

จากรูปที่ 4.20-4.24 พบว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืด และค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืด มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมชนิด LLDPE-g-MA (Fusabond®E MB-226DY) ที่ปริมาณ 1.3, 2.2 และ 3.0 phr อาจเนื่องมาจากโอกาสที่มาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA) จะทำปฏิกิริยากับ BIIR ในตำแหน่งพันธะคู่ของโครงสร้าง ในขณะที่โอกาสที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) จะเกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่กับ LDPE (Chain entanglement) มีน้อย เพราะว่าโดยทั่วไปโครงสร้างของ BIIR จะมีโครงสร้างของไอโซพรีน (Isoprene) ที่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง 1.9-2.1% เท่านั้น จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง BIIR กับสารช่วยผสมมีน้อยด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสารช่วยผสม Fusabond®E MB-226DY ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE อย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากสารช่วยผสมชนิดนี้ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบนี้ (BIIR/LDPE) จึงยังทำหน้าที่ในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่าง 2 วัฏภาคได้ไม่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

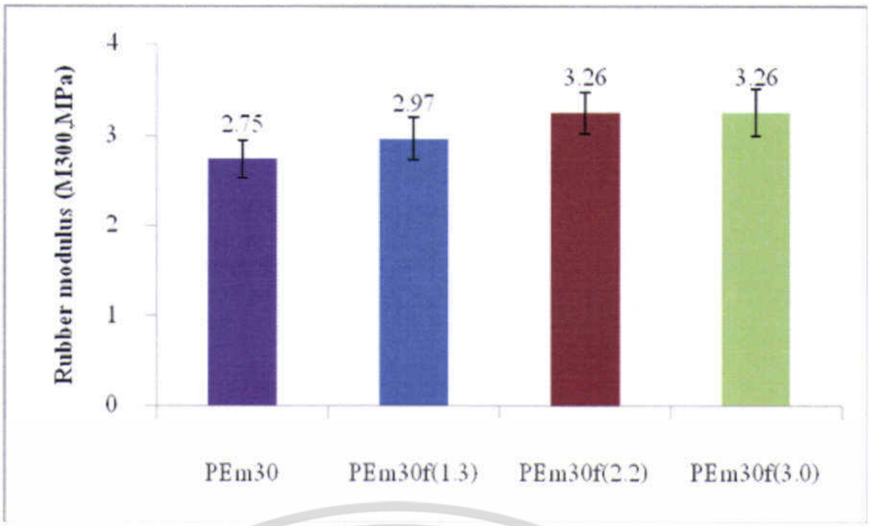


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr

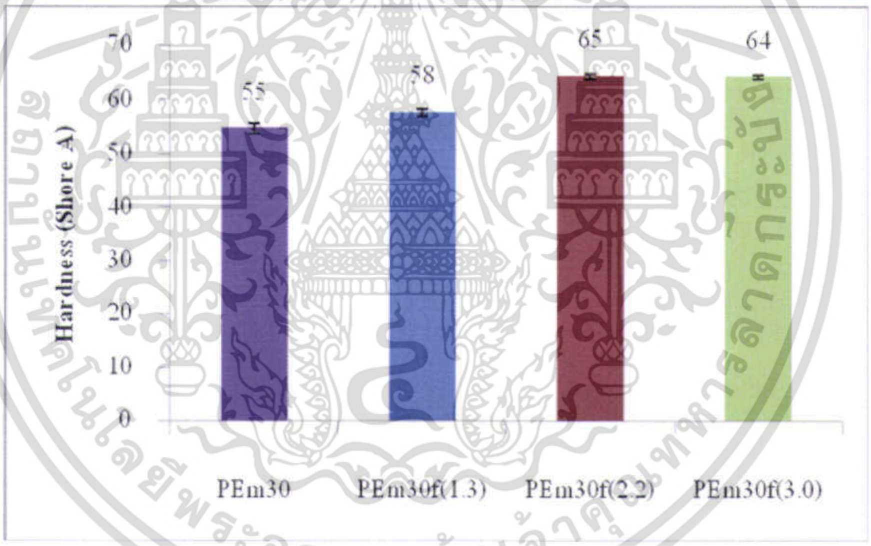


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

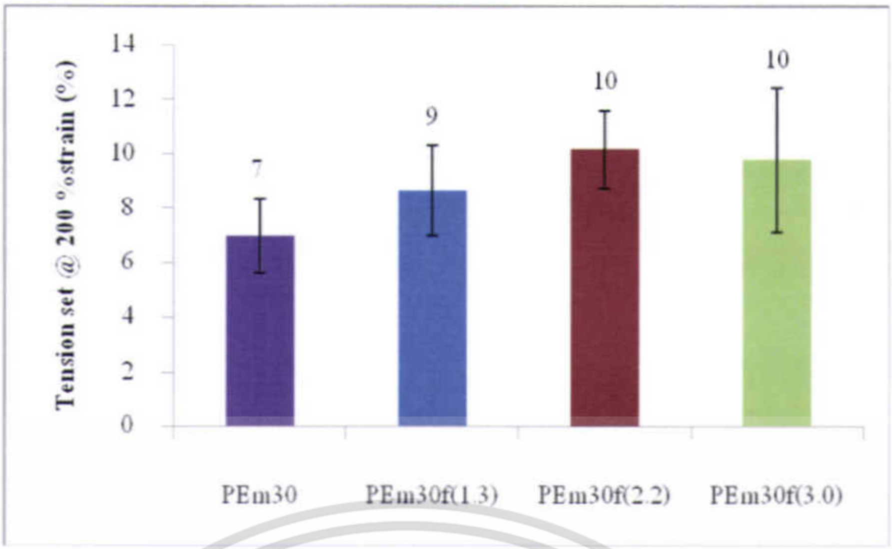


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE กับปริมาณ Fusabond® ที่อัตราส่วน 1.3, 2.2 และ 3.0 phr

4.3.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อน

ปกติสารช่วยผสมจะอยู่ ณ บริเวณระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ 2 ชนิด ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ของพอลิเมอร์ขณะผ่านกระบวนการแปรรูป ณ บริเวณนั้นลำบาก ทำให้การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ยากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ลดลง ตารางที่ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30) กับชนิดที่เติมสารช่วยผสม (PEm30f(2.2)) ซึ่งคำนวณได้จากกราฟของผลสมบัติทางความร้อน DSC จากภาคผนวก ข พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเมื่อทำการเติมสารช่วยผสมแล้วมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม ดังนั้นผลที่ได้จึงสอดคล้องกับผลสมบัติเชิงกลเบื้องต้นที่แสดงให้เห็นว่าสารช่วยผสม Fusabond® ไม่ส่งผลต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่าง BIIR/LDPE จากการศึกษาปริมาณของสารช่วยผสมชนิด LLDPE-g-MA พบว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อปริมาณของ Fusabond®E MB-226DY เพิ่มขึ้นจาก 1.3, 2.2 และ 3.0 phr ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PEm30) กับชนิดที่เติมสารช่วยผสม (PEm30f(2.2))

สูตร	T_m(°C)	T_c(°C)	ΔH_f(J/g)	%Crystallinity
PEm30	107.4	84.9	9.15	16.44
PEm30f(2.2)	108.4	89.7	7.46	13.40

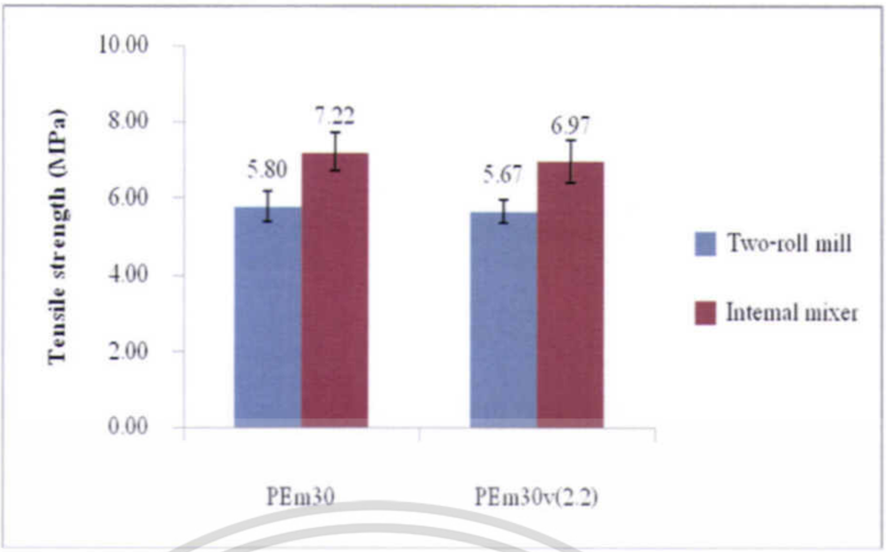
4.4 ศึกษาผลของวิธีการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด

4.4.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

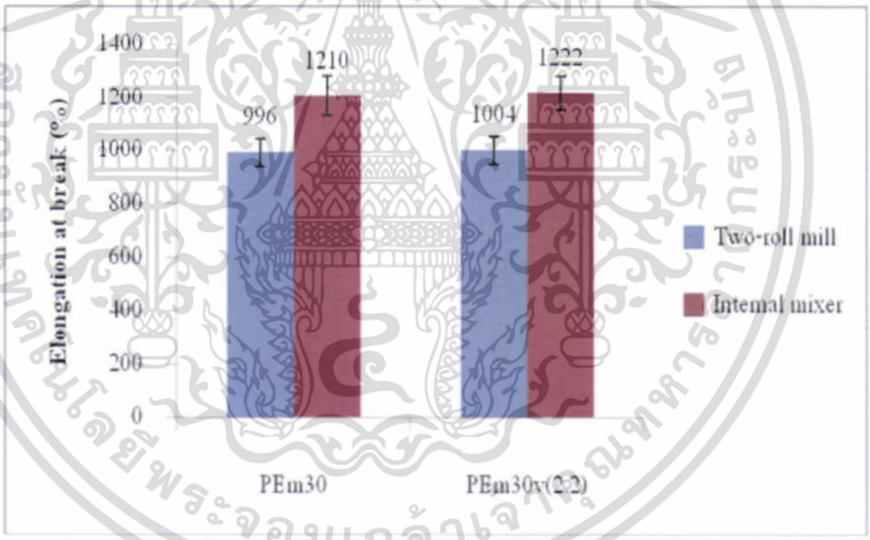
สำหรับวิธีการผสม สามารถแบ่งออกได้เป็นการผสมระบบเปิดและการผสมระบบปิด ได้แก่ เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบวิธีการผสมทั้ง 2 ระบบ ซึ่งได้ทำการเลือกสูตรพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ในอัตราส่วน 70/30 (w/w) มา 2 สูตร คือ สูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม (PEm30) กับสูตรที่เติมสารช่วยผสม Vestenamer (PEm30v(2.2)) ซึ่งเป็นสูตรที่ให้ค่าความแข็งกดต่ำสุดและเป็นสารที่ไม่มีความเป็นพิษเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมสูตรอื่น

จากรูปที่ 4.25-4.29 พบว่าการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดจะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าเครื่องผสมระบบเปิด เนื่องมาจากเกิดการผสมและการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคดีกว่า เป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องผสมระบบปิด เช่น Internal mixer มีประสิทธิภาพการผสม (Mixing efficiency) สูง เพราะเกิดแรงเฉือน (Shear force) ช่องว่างระหว่างผนังเครื่องโรเตอร์ นอกจากนี้เครื่องผสมระบบเปิดยังมีข้อเสียในเรื่องความสม่ำเสมอในการผสมที่ขึ้นกับผู้ผสม การปนเปื้อนของฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกขณะทำการผสม การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องที่ส่งต่อพอลิเมอร์ผสมขณะทำการผสม ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมจากระบบเปิดมีค่าต่ำกว่าการผสมจากระบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

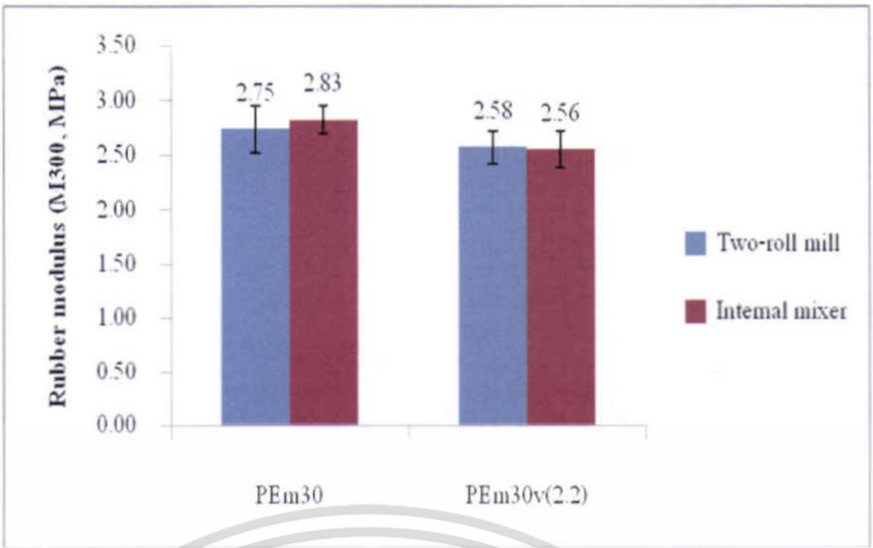


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer

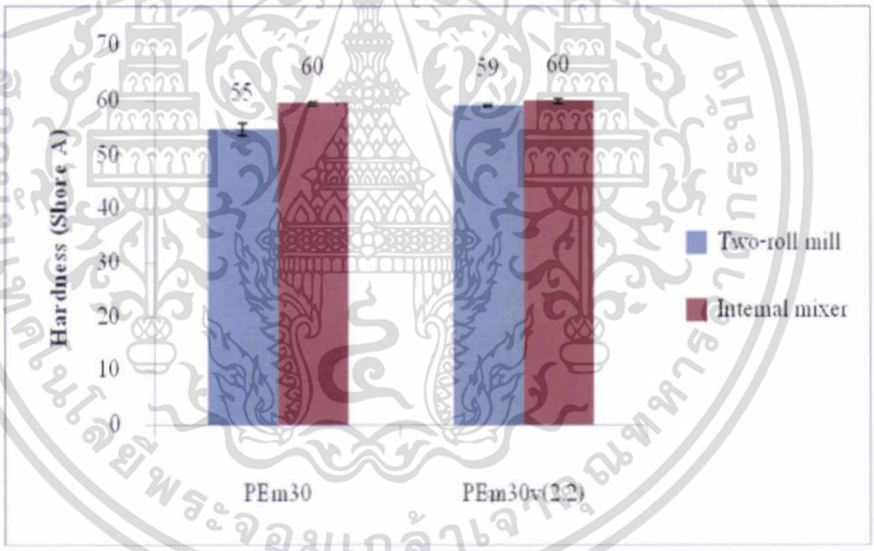


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

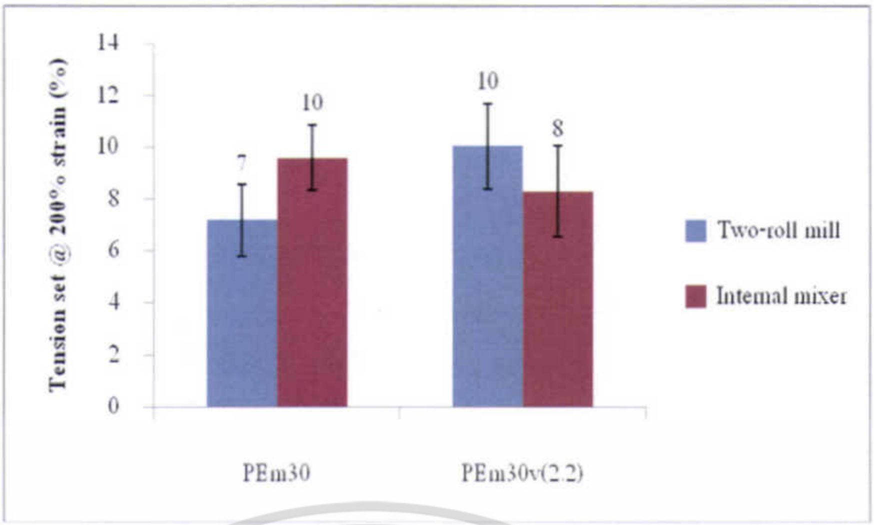


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer



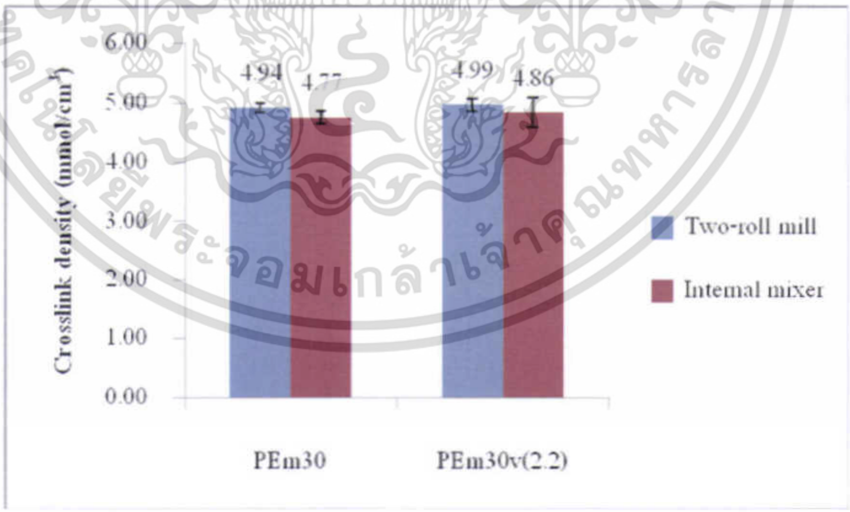
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมระหว่าง Two-roll mill กับ Internal mixer

จากรูปที่ 4.30 ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากวิธีการผสมระบบปิดจะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าแต่ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง (n) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นวิธีการผสมจึงถือว่าไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการผสมทั้ง 2 วิธีเป็นสภาวะเดียวกันจึงไม่ช่วยประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

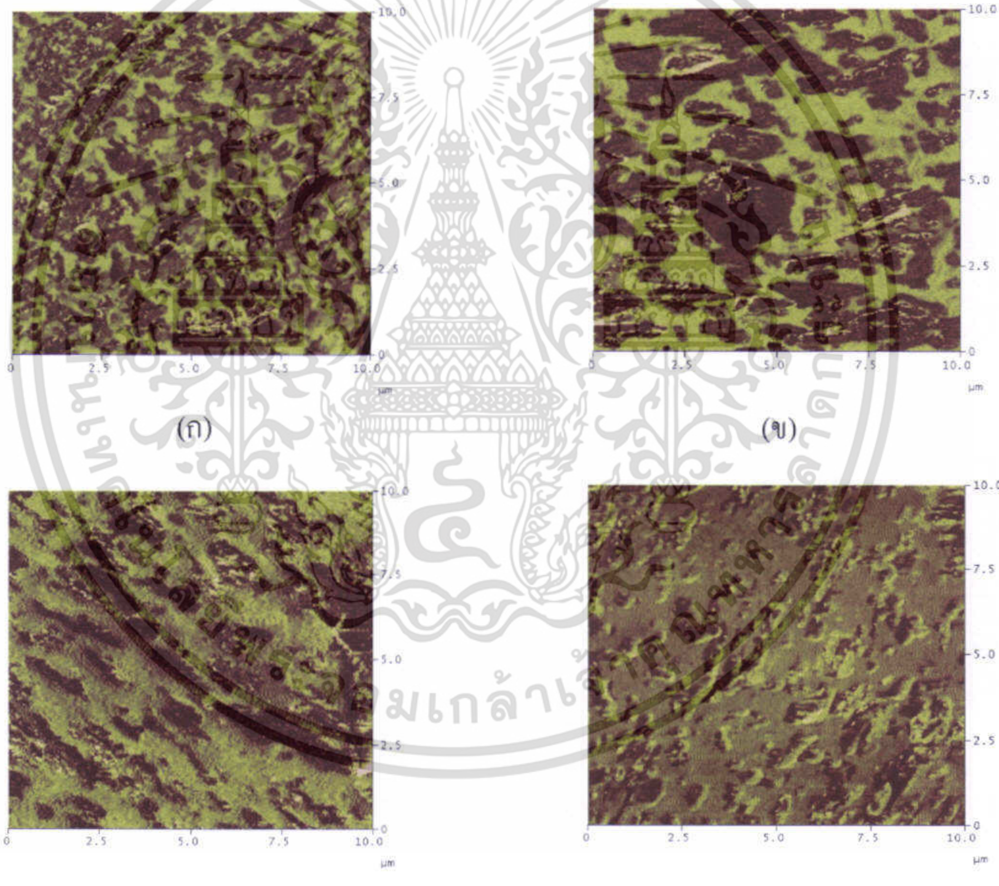


รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบความหนาแน่นเชื่อมโยง (n) ของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ไม่เติมสารช่วยผสม กับพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่เติมสารช่วยผสม Vestenamer จากวิธีการผสมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา

ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ด้วยเทคนิค AFM ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมด้วยเครื่องมือต่างชนิดกันทั้งชนิดที่เติมสารช่วยผสมและชนิดที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม จะเห็นว่าการกระจายตัวของวัฏภาคยาง (สีแดง) ของ InPEm30 จากเครื่องผสมแบบปิด มีขนาดของวัฏภาคใหญ่ขึ้นและเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น อาจเนื่องมาจากการคืนตัวแล้วจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของวัฏภาคยางในพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE หลังจากได้รับแรงเฉือนขณะทำการผสมแล้ว ในขณะที่การกระจายตัวของวัฏภาคยางของ InPEm30v(2.2) มีขนาดที่เล็กลง เนื่องมาจากการที่มีสารช่วยผสมในการช่วยเพิ่มการเกี่ยวพันระหว่างสองวัฏภาคและขวางกั้นการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของวัฏภาคยาง



รูปที่ 4.31 AFM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE (ก) PEm30 (ข) InPEm30 (ค) PEm30v(2.2) และ (ง) InPEm30v(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 อัตราส่วนผสมระหว่างยางโบรโมบิวทิลกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่ 70/30, 60/40 และ 50/50 (w/w) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ LDPE เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการที่มีวัฏภาคของยางลดลงและการที่มีวัฏภาคของพลาสติกเข้าไปผสมกับวัฏภาคของยาง จะทำให้เกิดการขัดขวางการยืดตัวของยางเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่งผลให้ความสามารถในการดึงยืดของชิ้นงานลดลง แต่ทำให้ค่ามอดุลัสของยางที่ 300% ดึงยืดและค่าความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติดังกล่าว เป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixtures) จากสมบัติของวัฏภาคของพลาสติกที่มีความแข็งมากกว่าวัฏภาคของยาง สำหรับค่าการเสียรูปถาวรหลังการดึงที่ 200% ดึงยืดมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการลดลงของวัฏภาคของยาง ทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงของยางมีน้อยลงเมื่อพลาสติกเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อให้แรงดึงกับชิ้นงานในระยะเวลาหนึ่ง ส่งผลให้เกิดการเลื่อนหลุดของสายโซ่ (Chain disentanglement) ของวัฏภาคพลาสติก จึงส่งผลให้สมบัติการคืนตัวของยางลดต่ำลง

5.1.2 ชนิดและปริมาณสารช่วยผสม

จากการศึกษาผลของชนิดสารช่วยผสมของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE ที่อัตราส่วน 70/30 w/w โดยใช้ปริมาณสารช่วยผสม 2.2 phr (5% ของ LDPE) พบว่าผลการทดสอบเชิงกล ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม ซึ่งกล่าวได้ว่าสารช่วยผสมที่เลือกใช้ไม่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE อย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสมที่อัตราส่วนผสมระหว่าง BIIR/LDPE เท่ากับ 70/30 w/w โดยเลือกใช้ Fusabond® E MB-226DY ที่ปริมาณ 1.3, 2.2 และ 3.0 phr พบว่าไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองดังกล่าวของผลจากการศึกษาชนิดและปริมาณสารช่วยผสม อาจเนื่องมาจากโอกาสที่สารช่วยผสมสามารถทำปฏิกิริยากับ BIIR ในตำแหน่งพันธะคู่ของโครงสร้างมีน้อย เพราะว่าโดยทั่วไปโครงสร้างของ BIIR จะมีโครงสร้างของไอโซพรีน (Isoprene) ที่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง 1.9-2.1% เท่านั้น จึงทำให้การเติมสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางและสมบัติทางความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม

ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการผสมโดยปรียบเทียบเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่สภาวะการผสมเดียวกัน ทำการเลือกสูตรพอลิเมอร์ผสมมา 2 สูตร คือ สูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม (PEm30) กับสูตรที่เติมสารช่วยผสม Vestenamer (PEm30v(2.2)) พบว่าการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดจะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าเครื่องผสมระบบเปิด เนื่องมาจากเครื่องผสมระบบเปิดมีข้อเสียในเรื่องความสม่ำเสมอในการผสมที่ขึ้นกับผู้ผสม การปนเปื้อนของฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกขณะทำการผสม การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องที่ส่งต่อพอลิเมอร์ผสมขณะทำการผสม ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมจากระบบเปิดมีค่าต่ำกว่าการผสมจากระบบปิด แต่ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการผสมทั้ง 2 วิธีเป็นสภาวะเดียวกันจึงไม่ช่วยประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของสารเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการศึกษาปริมาณสารช่วยผสมไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาปริมาณสารช่วยผสมในช่วงที่กว้างขึ้น เพื่อจะได้เห็นแนวโน้มของผลที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ชัดเจนขึ้น

2. เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วการเติมสารช่วยผสมชนิดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้นั้น จะช่วยให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคมีความแข็งแรงมากกว่าสารช่วยผสมชนิดที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาสารช่วยผสมชนิดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาตัวอื่นที่เหมาะสมกับระบบพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE

3. เนื่องจากการศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการผสม จะเห็นว่าพอลิเมอร์ผสม BIIR/LDPE จากการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด จะให้สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาที่ค่อนข้างดีกว่าการใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้งเมื่อมีการเติมสารช่วยผสม ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรใช้เครื่องผสมระบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันวิจัยยาง. **"ข้อมูลวิชาการยางพารา 2553."** [Online]. Available : http://www.rubberthai.com/about/data.php. 2554.

[2] กรุงเทพธุรกิจ ออนไลน์. **"แนวโน้วราคายางปี 55 มีโอกาสขยับขึ้น."** [online]. Available : http://www.bangkokbiznews.com/home/detail/finance/research/20120123/431485/แนวโน้วราคายางปี 55 มีโอกาสขยับขึ้น.html. 2555.

[3] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. **"สถิติยางโลก."** [Online]. Available : http://www.rubbercenter.org/index.php/worldrubberindustry/statistic-world. 2554.

[4] The Freedonia Group. **"World Thermoplastic Elastomers."** [Online]. Available : http://www.freedonia.com/brochure/25xx/2551smwe.pdf. 2011.

[5] Shandong Pharmaceutical Glass Co., Ltd. **"Rubber stopper product."** [Online]. Available : http://en.trade2cn.com/detail/supply. action?supplyId=27082762. 2011.

[6] Youlyy Industrial Co., Ltd. **"Rubber stopper product."** [Online]. Available : http://www.youlyy.com/productDesc.aspx?ProductsCateId=1654. 2011.

[7] Changfu Pharm. **"Bottle of saline."** [Online]. Available : http://www.china-injection.cn/sodium_chloride_injection.html. 2011.

[8] U. S. Environmental Protection Agency. **"Manufacture of Rubber."** [Online]. Available : http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/draft/d04s12.pdf. 2010.

[9] Utrachi, L.A. **Polymer Alloys and Blends : Thermodynamics and Rheology.** New York : Hanser Publishers. 1990.

[10] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. **เอกสารประกอบการสอน เรื่อง Mixing of Polymer Blends.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

[11] Loon, L.K. "**Morphological, mechanical and thermal properties of amorphous copolyester / polyoxymethylene blends.**" [Online]. Available : eprints.usm.my/6366/1/MORPHOLOGICAL,_MECHANICAL_AND.pdf. 2011.

[12] Folkes, M.J. and Hope, P.S. **Polymer Blends and Alloys.** Blackie Academic & Professional, London.1993.

[13] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท บุ๊คเน็ท จำกัด. 2546.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Vyas, H.A. **"Synthesis and Characterization of Ionomers as Compatibilizer for Polymer Blends."** [Online]. Available : http://www.msubaroda.ac.in/phd2010/ HariduVyasPhDThesis2.pdf. 2011.

[15] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. **เอกสารประกอบการสอน เรื่อง Compatibilisation of Polymer Blends.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

[16] อิทธิพล แจ้งชัด. **เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

[17] Brydson, J.A. **Rubber Materials and Their Compounds.** London : Elsevier Science Publishers Ltd. 1998.

[18] Morton, M. **Rubber Technology.** 3rd ed. London : Chapman & Hall. 1995.

[19] Exxon Mobil Chemical. "**Tire Halobutyl Rubbe Innerliner Processing Guidelines**." [Online]. Available : https://www.exxonmobilchemical.com/Chem-English/ Registration/Login.aspx?ReturnUrl=/Chem-English/Files/Resources/Registered/exxon-halobutyl-rubber-tire-innerliner-processing-guidelines.pdf. 2010.

[20] พงษ์ธร แซ่อุย. **สารเคมียาง.** กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2548.

[21] Exxon Mobil Chemical. **"Model Vulcanization Systems for Butyl Rubber, Halobutyl Rubber and BIMSM Elastomer."** [Online]. Available : https://www.exxonmobilchemical.com/Chem-English/Registration/Login.aspx? ReturnUrl=/Chem-English/Files/Resources/Registered/model-vulcanization-systems-for-butyl-rubber-halobutyl-rubber-and-bimsm-elastomer.pdf. 2010.

[22] Brydson, J.A. **Plastics Materials.** 6th ed London : Butterworth-Heinemann.Ltd. 1995.

[23] แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครวิทยา. **วัสดุวิศวกรรม.** กรุงเทพฯ : บริษัท ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2546.

[24] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. **เคมีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

[25] Wikipedia, the free encyclopedia. **"Polyethylene."** [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene. 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[26] Istvan, C. **"LDPE Technology 2010."** [Online]. Available : http://www.tvk.hu/repository/615515.pdf. 2012

[27] Markovic, G., Suzana, V.J., Milena, S.J., Jaroslava, M.C., and Simendic, B. "Curing and Mechanical Properties of Chlorosulphonated Polyethylene rubber Blends." **Chem.Ind.Chem.Eng.Q.,** vol 3, 2011. pp.315-321.

[28] Chatterjee, K. and Naskar, K. "Development of Thermoplastic Elastomers based on Maleated Ethylene Propylene Rubber (m-EPM) and Polypropylene(PP) by Dynamic Vulcanization." **eXPRESS Polymer Letters.,** vol 1, 2007. pp. 527-534.

[29] Pichiyut, S., Nakason, C., Kaesaman, A. and Kiatkamjornwong, S. "Influences of Blend Compatibilizers on Dynamic, Mechanical, and Morphological Properties of Dynamically Cured Maleated Natural Rubber and High-Density Polyethylene Blends." **Polymer Testing.,** vol 27, 2008. pp.566-580.

[30] Basuli, U., Chaki,.T.K. and Naskar, K. "Influence of Engage® Copolymer Type on The Properties of Engage®/Silicone Rubber-based Thermoplastic Dynamic Vulcanizates." **eXPRESS Polymer Letters.,** vol 2, 2008. pp. 846-854.

[31] Nakason, C., Nuansomsri, K., Kaesaman, A. and Kiatkamjornwong, S. "Dynamic Vulcanization of Natural Rubber/High-Density Polyethylene Blends: Effect of Compatibilization, Blend Ratio and Curing System." **Polymer Testing.,** vol 25, 2006. pp.782-796.

[32] Li, J. **"Blends of EPDM rubber/Thermoplastics."** [Online]. Available : http://epulb.ltu.se/1653-0187/2008/106/LTU-PB-EX-08106-SE.pdf. 2010.

[33] Joseph, A., Joseph, K. and Thomas, S. **" Morphology crystallization and ultimate properties of thermoplastic dynamic vulcanizates from isotactic polypropylene and acrylonitrile butadiene rubber."** [Online]. Available : http://210.212.24.72/~kscsteuse/digital- library/digital/KSC/ksc19/01-Physical sciences/01-General/01-07.pdf. 2011.

[34] Sperling, L.H. **Introduction to Physical Polymer Science.** 2nd ed. New York : Jonh Wiley & Sons. 1992.

[35] Brandrup, J., Immergut, E.H., and Grulke, E.A. **Polymer Handbook.** 4th ed. New York : Jonh Wiley & Sons. 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[36] Mark, H. F. **Encyclopedia of Polymer Science & Engineering.** 4th ed. New York : Jonh Wiley & Sons. 1986.

[37] Thanawan, S., Radabutra, S., Thamasirianunt, P., Amornsakchai, T. and Suchiva, K. "Origin of phase shift in atomic force microscopic invertigation of the surface morphology of NR/NBR blend film." **Ultramicroscopy.,** vol 109, 2009. pp.189-192.

[38] Plymouth University. **"Composite design."** [Online]. Available : http://www.tech.plym.ac.uk/sme/MATS324/MATS324B%20powerpoint/rules%20of%20mixture.ppt. 2012.

[39] Richardson, D. **"The Fundamental Principles of Composite Material Stiffness Predictions."** [Online]. Available : http://www.swcompositesgateway.co.uk/Propoty-Prediction.pdt. 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณหาค่าปริมาตรโมล่าร์ (Molar volume, V_s)

จากสมการฟลอรี-ไรเนอร์ (Flory-Rehner equation)

$$-[\ln(1 - \nu_r) + \nu_r + \chi_1 \nu_r^2] = V_s\, n\, [\nu_r^{1/3} - \nu_r/2]$$

เมื่อ n = ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง (mol/cm^3)

V_s = ปริมาตรโมล่าร์ (Molar volume) ของตัวทำละลาย (cm^3/mol)

ν_r = สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของยางในเจลยางที่บวมตัว (Swellen gel) (ไม่มีหน่วย)

χ_1 = ตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (Polymer-Solvent interaction parameter) (ไม่มีหน่วย) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.56

จากการทดลองใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งมีค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, Mw)	=	92.14 g/mol
ความหนาแน่น (Density, ρ)	=	0.8669 g/mol
การทดลอง โทลูอีน 30 ml มีน้ำหนัก	=	25.3860 g

การคำนวณ

โทลูอีน	92.14 g	=	1 mol
	25.3860 g	=	25.3860/92.14 mol
		=	0.2755 mol
โทลูอีน	0.2755 mol	=	30 ml
	1 mol	=	30/0.2755 ml/mol
		=	108.89 ml/mol
		=	108.89 cm^3/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลผลการทดลองหาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density)

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลก่อนแช่สารละลายโทลูอีน

สูตร	ชิ้น	กว้าง(mm)	ยาว(mm)	หนา(mm)	ปริมาตร	
					(mm^3)	(cm^3)
PEm30	1	10.20	20.10	2.15	440.79	0.4408
	2	10.55	20.35	2.09	448.70	0.4487
	3	10.35	20.40	2.11	445.50	0.4455
	4	10.15	20.25	2.13	437.79	0.4378
	5	10.30	20.45	2.07	436.01	0.4360
PEm30f(2.2)	1	11.25	20.60	1.88	435.69	0.4357
	2	10.65	20.35	1.88	407.44	0.4074
	3	9.90	20.65	1.89	386.38	0.3864
	4	10.95	20.65	1.91	431.88	0.4319
	5	10.20	20.65	1.96	412.83	0.4128
PEm30n(2.2)	1	9.95	20.25	2.34	471.48	0.4715
	2	10.35	19.25	2.33	464.22	0.4642
	3	10.15	21.70	2.37	522.00	0.5220
	4	10.15	20.35	2.18	450.28	0.4503
	5	10.75	20.50	2.35	517.88	0.5179
PEm30r(2.2)	1	10.45	20.50	2.10	449.87	0.4499
	2	10.75	20.10	2.14	462.40	0.4624
	3	10.95	20.45	2.16	483.68	0.4837
	4	11.00	20.25	2.14	476.68	0.4767
	5	11.40	20.45	2.09	487.24	0.4872
PEm30v(2.2)	1	8.90	20.45	2.03	369.47	0.3695
	2	9.25	19.55	2.10	379.75	0.3798
	3	9.10	18.55	2.17	366.30	0.3663
	4	9.50	20.20	2.12	406.82	0.4068
	5	9.35	20.05	2.09	391.80	0.3918

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

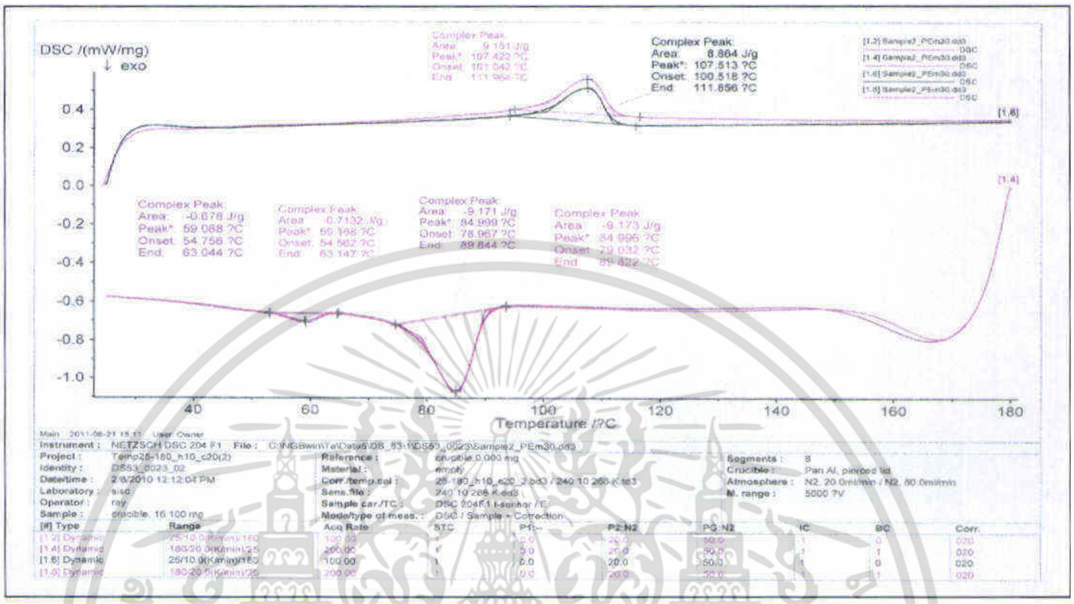
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลหลังแช่สารละลายโทลูอีน 4 วัน

สูตร	ชิ้น	กว้าง(mm)	ยาว(mm)	หนา(mm)	ปริมาตร	
					(mm^3)	(cm^3)
PEm30	1	11.85	25.40	3.08	927.04	0.9270
	2	12.60	25.10	3.07	970.91	0.9709
	3	12.00	25.75	2.94	908.46	0.9085
	4	12.25	24.90	3.01	918.12	0.9181
	5	12.45	25.30	2.98	938.65	0.9387
PEm30f(2.2)	1	14.30	23.80	2.71	922.32	0.9223
	2	13.30	23.45	2.69	838.97	0.8390
	3	12.60	23.70	2.69	803.28	0.8033
	4	13.70	23.90	2.76	903.70	0.9037
	5	13.10	23.70	2.84	881.73	0.8817
PEm30n(2.2)	1	12.45	23.90	3.39	1008.71	1.0087
	2	12.85	22.85	3.37	989.50	0.9895
	3	12.40	24.50	3.40	1032.92	1.0329
	4	11.70	24.95	3.14	916.61	0.9166
	5	11.95	24.40	3.34	973.87	0.9739
PEm30r(2.2)	1	13.15	24.15	3.02	959.06	0.9591
	2	13.25	23.90	3.09	978.52	0.9785
	3	13.40	24.20	3.17	1027.96	1.0280
	4	13.50	24.10	3.09	1005.33	1.0053
	5	13.45	24.10	3.05	988.64	0.9886
PEm30v(2.2)	1	10.60	25.60	2.96	803.22	0.8032
	2	11.05	24.45	2.98	805.11	0.8051
	3	10.75	23.45	3.01	758.78	0.7588
	4	10.85	24.70	3.03	812.02	0.8120
	5	10.90	25.00	2.95	803.87	0.8039

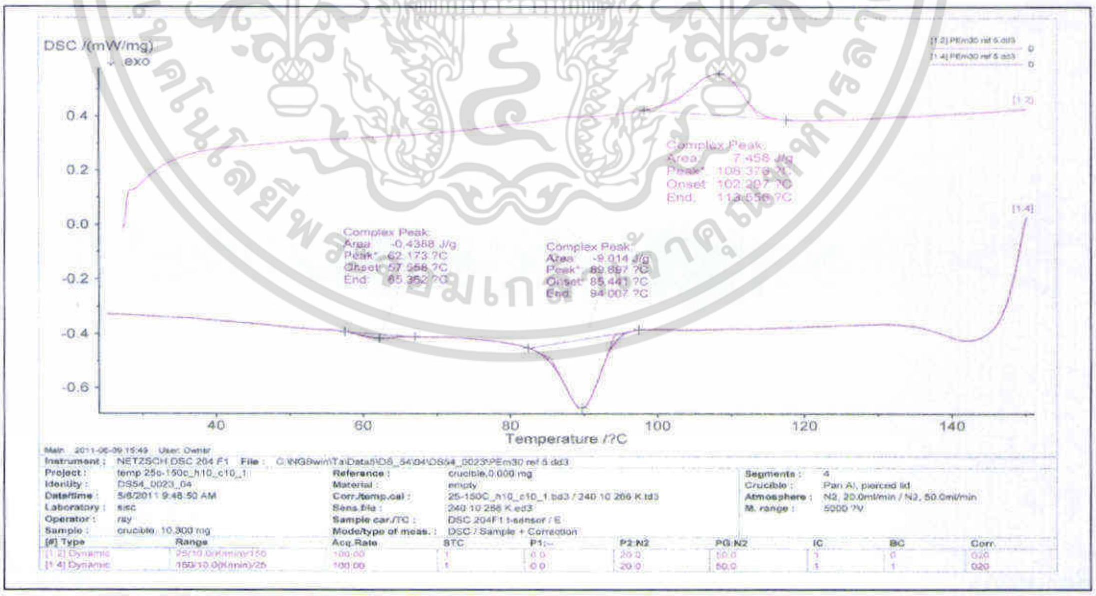
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

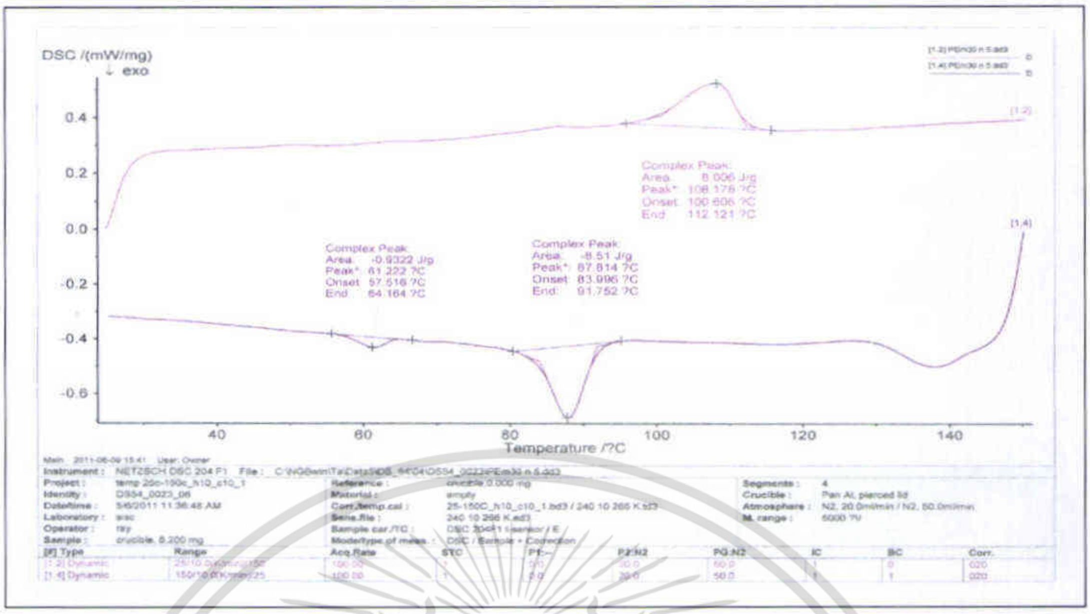


รูปที่ ข.1 เทอร์โมแกรม DSC ของ PEm30

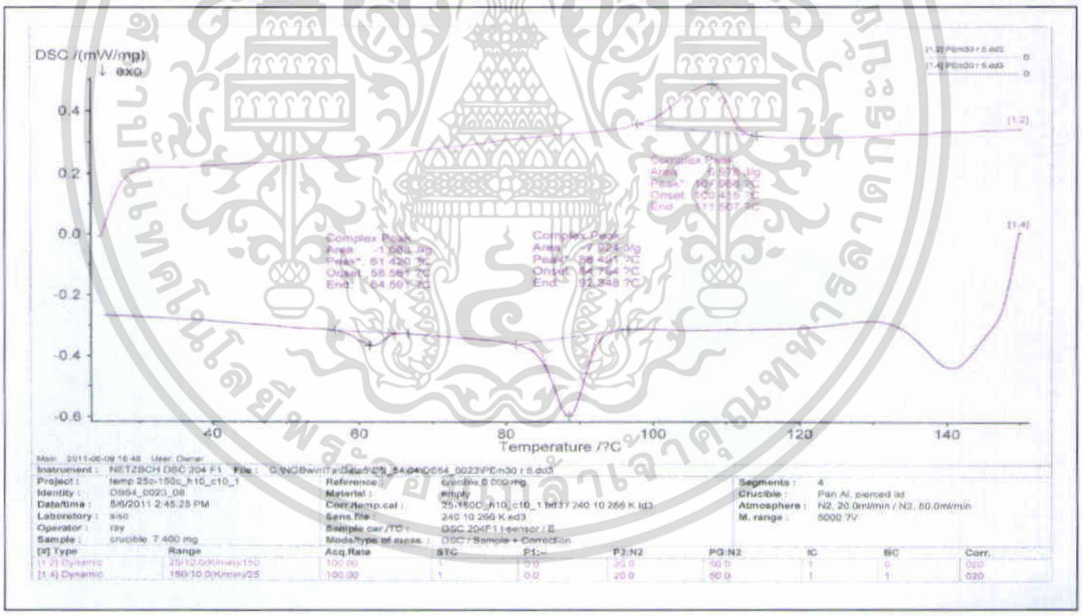


รูปที่ ข.2 เทอร์โมแกรม DSC ของ PEm30f(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

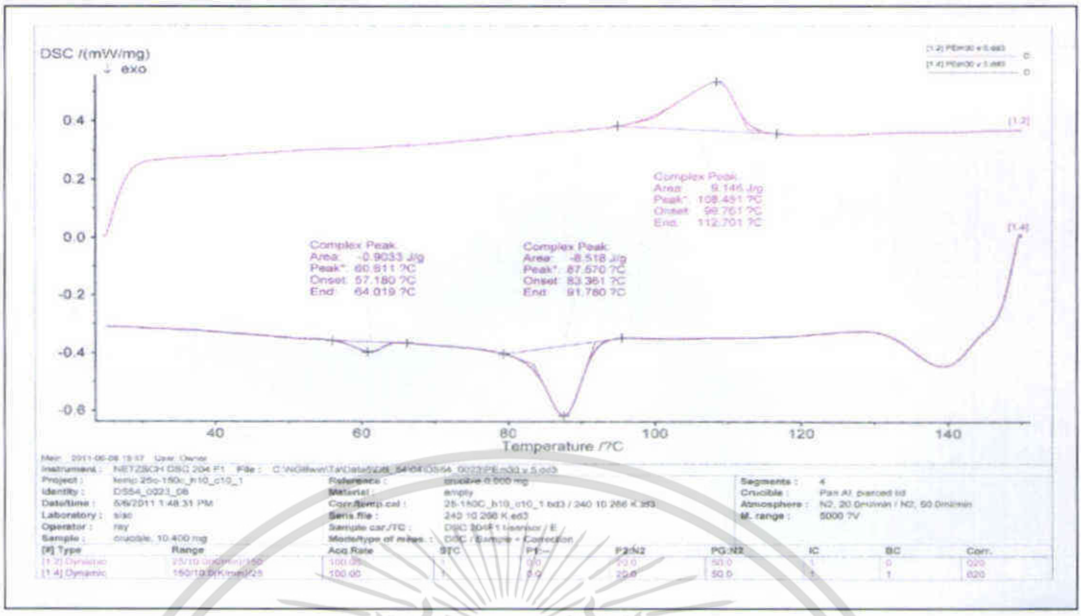


รูปที่ ข.3 เทอร์โมแกรม DSC ของ PEm30n(2.2)



รูปที่ ข.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ PEm30r(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

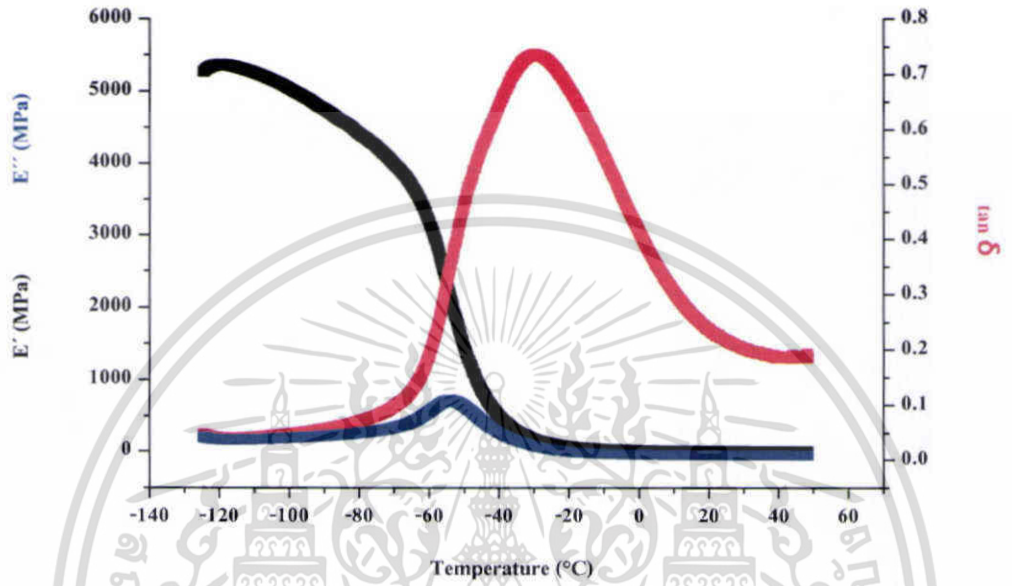


รูปที่ ข.5 เทอร์โมแกรม DSC ของ PEm30v(2.2)

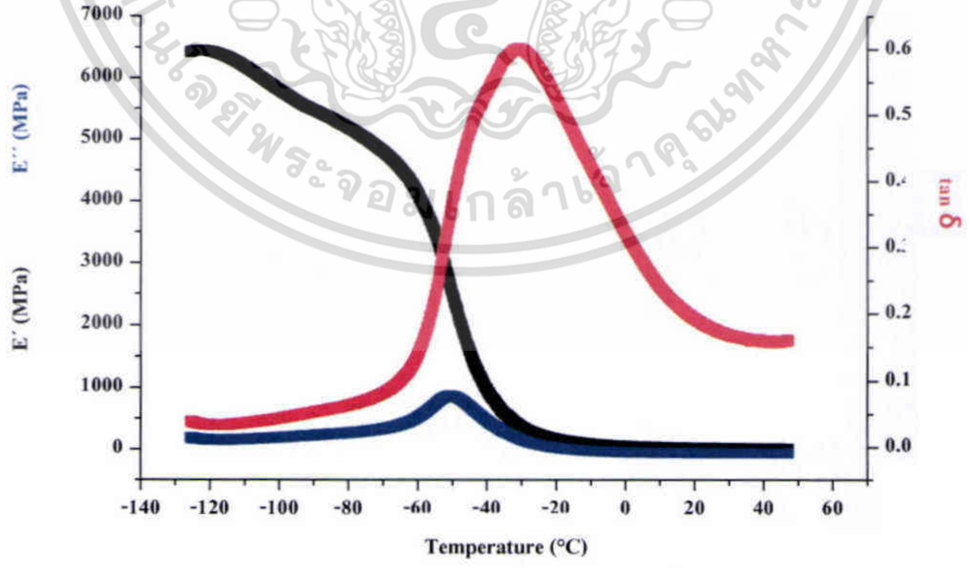
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA

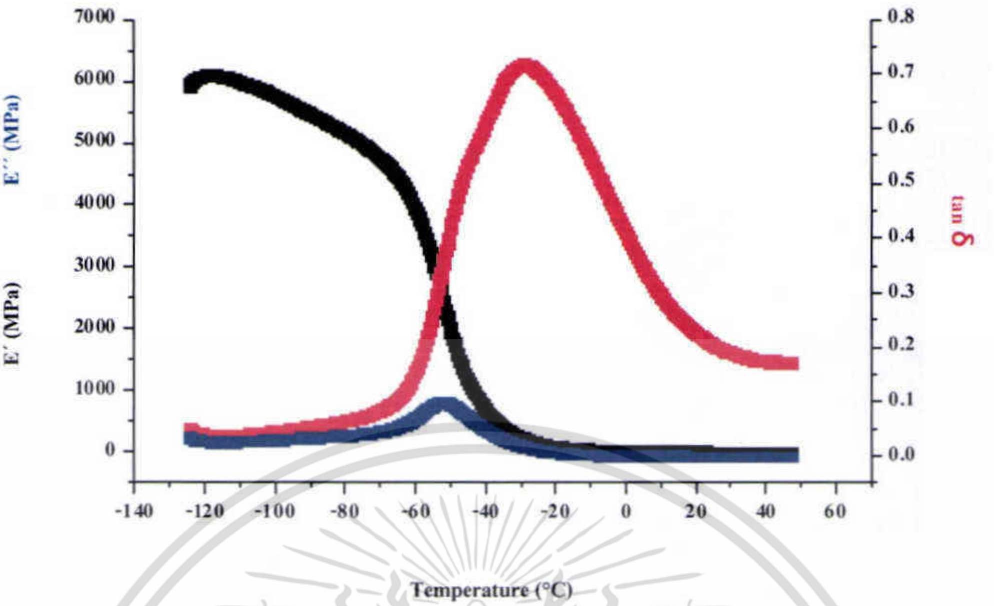


รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรม DMA ของ PEm30

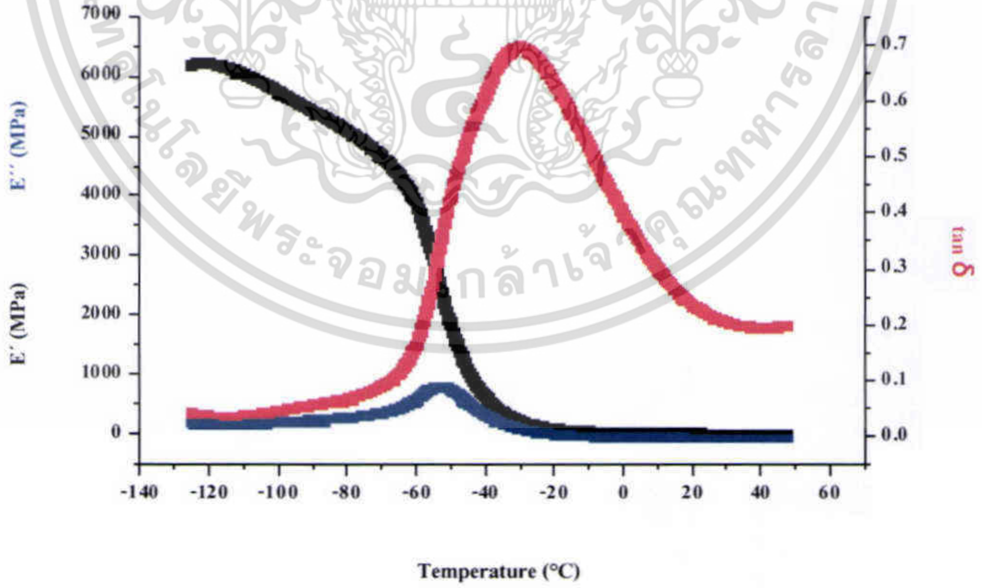


รูปที่ ค.2 เทอร์โมแกรม DMA ของ PEm30f(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

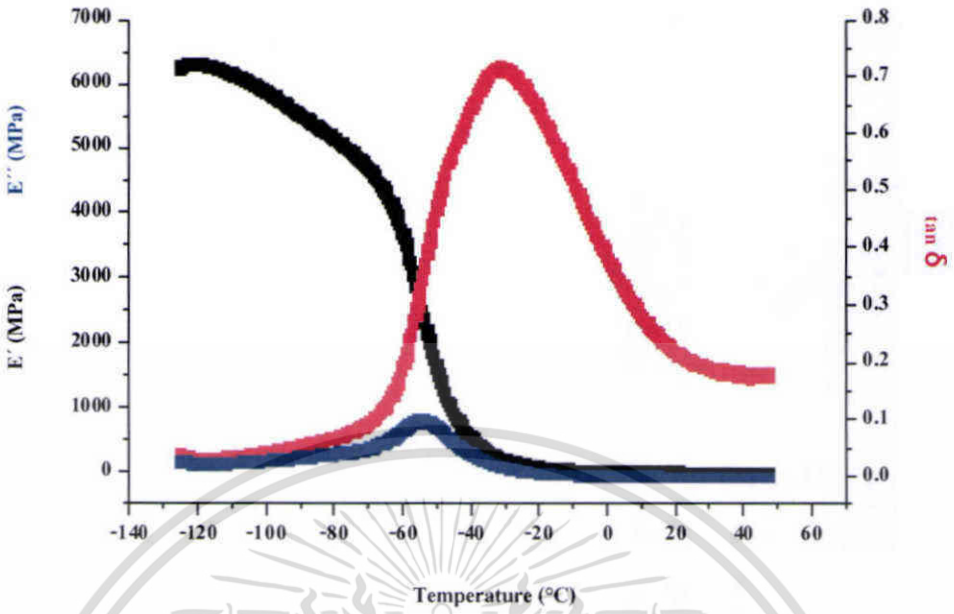


รูปที่ ค.3 เทอร์โมแกรม DMA ของ PEm30n(2.2)



รูปที่ ค.4 เทอร์โมแกรม DMA ของ PEm30r(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 เทอร์โมแกรม DMA ของ PEm30v(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ น.ส. พรหมพร พิมพ์เสน

วันเกิด 17 มีนาคม พ.ศ. 2529

สถานที่เกิด ขอนแก่น ประเทศไทย

การศึกษา -ระดับมัธยมจากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน พ.ศ. 2541-2546

-ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2547-2550

ผลงานวิจัย การนำเสนอผลงานภาคโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36 (วทท 36) ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 26-28 ตุลาคม พ.ศ. 2553 เรื่อง "Study of BIIR/LDPE blends: Effects of polyethylene grafted maleic anhydride on mechanical and thermal properties"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้