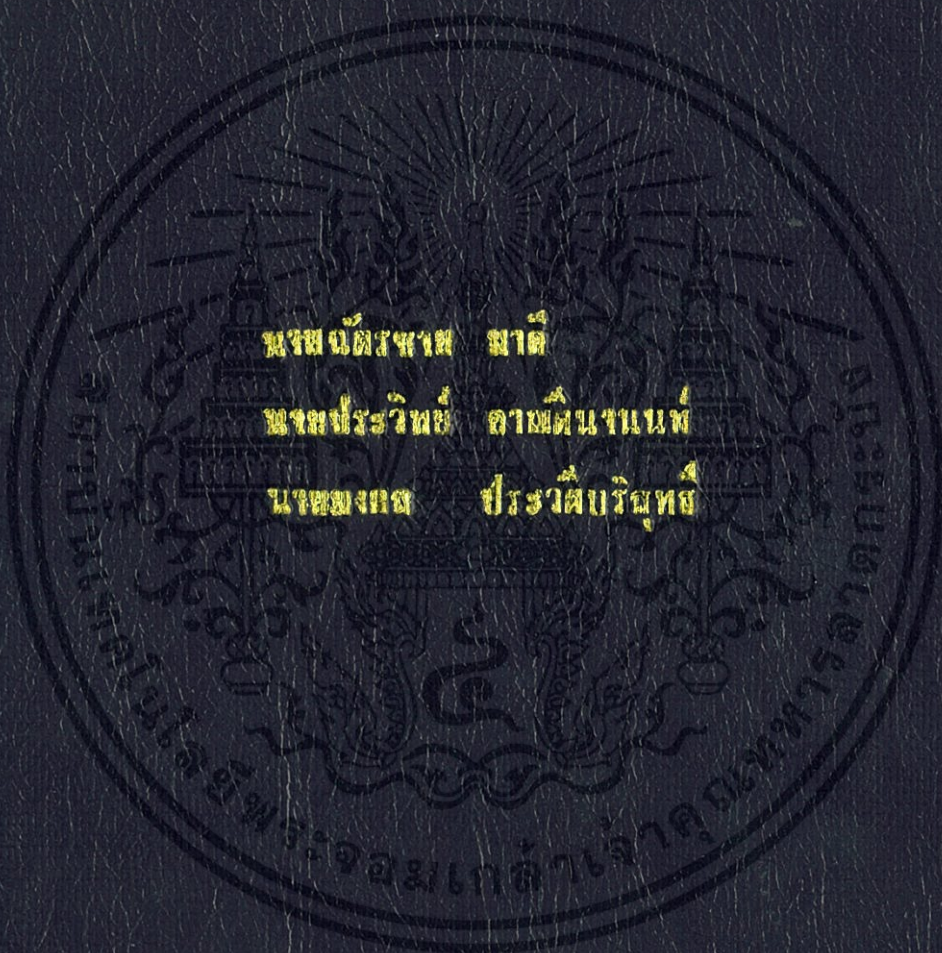


การสังเคราะห์สารช่วยผสม P(S-ran-MMA-ran-MAA)

สำหรับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA

SYNTHESIS OF P(S-ran-MMA-ran-MAA) COMPATIBILIZERS  
FOR PS/EVA BLENDS



มหาวิทยาลัยราชภัฏนครพนม

คณะวิทยาศาสตร์

ภาควิชาเคมี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การสังเคราะห์สารช่วยผสม P(S-ran-MMA-ran-MAA)

สำหรับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA

SYNTHESIS OF P(S-ran-MMA-ran-MAA) COMPATIBILIZERS

FOR PS/EVA BLENDS



นายฉัตรชาย

มาดี

นายประวิทย์

อาณัตินันท์

นายมงคล

ประวัตินิสุทธิ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

**SYNTHESIS OF P(S-ran-MMA-ran-MAA) COMPATIBILIZERS  
FOR PS/EVA BLENDS**



**Mr. CHATCHAI MADEE  
Mr. PRAWIT ARNUTNANON  
Mr. MONGKHOL PRAWATBORISUT**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY**

**FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์สารช่วยผสม P(S-ran-MMA-ran-MAA) สำหรับ  
พอลิเมอร์ผสม PS/EVA  
Synthesis of P(S-ran-MMA-ran-MAA) compatibilizers for  
PS/EVA blends

ชื่อนักศึกษา	นายฉัตรชาย	มาดี	53050198
	นายประวิทย์	อาณัตินันท์	53050261
	นายมงคล	ประวัตินิรุทธิ์	53050307





ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์  
รศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์แจ้งเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์สารช่วยผสม P(S-ran-MMA-ran-MAA) สำหรับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA	
ชื่อนักศึกษา	นายฉัตรชาย	มาดี
	นายประวิทย์	อาณัตินันท์
	นายมงคล	ประวัตินิสุทธิ์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทธวูธ	มนตรีวิเศษ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชลลดา	ฤทธิวิรุฬห์
	รศ.ดร.ตะวัน	สุชน้อย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สังเคราะห์สารช่วยผสมจาก P(S-ran-MMA-ran-MAA) โดยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลายสำหรับใช้ในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของ S:MMA:MAA เป็น 70/30/0 70/29/1 70/27/3 70/25/5 และ 70/20/10 จากนั้นนำสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบสมบัติการละลาย เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาคำแนะนำค่าบ่งชี้การละลายด้วยโปรแกรม HSPiP<sup>©</sup> และหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่องเจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) จากนั้นนำสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิด แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด จากนั้นศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม ผลจากการปรับเปลี่ยนชนิดของสารช่วยผสมปริมาณ 2.5 wt% ในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก พบว่าสารช่วยผสม S70M27A3 เป็นสารช่วยผสมที่ให้ผลดีที่สุด โดยทำให้  $T_g$  ของ PS ในพอลิเมอร์ผสมลดลง และทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงนำ S70M27A3 มาปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสมเป็น 2.5 และ 5 wt% ในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีการนำ S70M27A3 ปริมาณ 2.5 wt% มาใส่ในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก พบว่าสารช่วยผสมทำให้สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น โดยเฉพาะความทนทานต่อแรงกระแทก

**คำสำคัญ** : สารช่วยผสม, พอลิสไตรีน, เอทิลีน ไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์, การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย

<b>Title</b>	Synthesis of P(S-ran-MMA-ran-MAA) compatibilizers for PS/EVA blends	
<b>Students</b>	Mr. Chatchai	Madee
	Mr. Prawit	Arnutnanon
	Mr. Mongkhol	Prawatborisut
<b>Degree</b>	Bachelor of Science	
<b>Major Program</b>	Industrial Chemistry	
<b>Academic Year</b>	2013	
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Pathavuth	Monvisade
<b>Co-Advisors</b>	Asst. Prof. Dr. Chonlada	Ritvirulh
	Assoc. Prof. Dr. Tawan	Sooknoi

### ABSTRACT

This special project studied on synthesizing P(S-ran-MMA-ran-MAA) compatibilizers for PS/EVA blends by solution polymerization. The mole ratios of S: MMA: MAA monomers were varied at 70/30/1, 70/29/1, 70/27/3, 70/25/5 and 70/20/10. Solubility test of compatibilizers was done to obtain solubility data for calculating solubility parameter by HSPiP<sup>®</sup> program. Molecular weight of compatibilizers was also determined by gel permeation chromatograph (GPC). The compatibilizers were blended with PS/EVA at ratios of 80/20 and 70/30 by weight using internal mixer then shaped by compression molding machine. The effect of types and loading of compatibilizer were then investigated. The results from varying compatibilizer types at 2.5 wt% in PS/EVA 80/20 blends indicated that S70M27A3 provided the most applicable results by lowering  $T_g$  of PS in the blends as well as slightly increasing tensile strength. S70M27A3 was then used to vary compatibilizer content (2.5 and 5 wt%) in PS/EVA 80/20 blends. The results suggested that adding compatibilizer slightly enhanced tensile strength and Young's modulus of the blend. In addition, S70M27A3 at 2.5 wt% was also added to PS/EVA 70/30 blend. The results indicated that compatibilizer was still applicable to enhance properties of the blend especially impact strength.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

**Keywords :** Compatibilizer, Polystyrene, Ethylene-vinyl acetate copolymer, Solution polymerization

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผศ.ดร.ชลดดา ฤทธิวิรุฬห์ และ รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและแนะแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดี ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากกับงานวิจัย และช่วยตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด และ บริษัท ไทยมิทซูยสเปเชียลตีเคมีคอล จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีต่างๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการติดต่อขอยืมอุปกรณ์ การเบิกสารเคมีในการทดลอง รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยไถ่ถามและให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบพระคุณพี่ๆ ปริญญาเอกและปริญญาโทในหน่วยวิจัยการสังเคราะห์พอลิเมอร์และวัสดุเฉพาะทาง ที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือให้คำแนะนำและคอยดูแลเวลาที่มีปัญหาในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในสาขาเคมีอุตสาหกรรมรุ่น 29 ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ยังมิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นายฉัตรชาย มาดี

นายประวิทย์ อาณัตินานนท์

นายมงคล ประวัตินิสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
คำย่อและสัญลักษณ์	XIV
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 พอลิสไตรีน (PS)	4
2.1.1 สมบัติของพอลิสไตรีน	4
2.1.2 การประยุกต์ใช้งาน	5
2.2 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA)	5
2.2.1 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์	6
2.2.2 การประยุกต์ใช้งาน	6
2.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยการผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบเติม	6
ด้วยอนุมูลอิสระ (Addition polymerization)	
2.3.1 ขั้นริเริ่ม (Initiation)	6
2.3.2 ขั้นขยายสายโซ่ (Propagation)	7
2.3.3 ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Termination)	7
2.4 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์	8
2.4.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ (Bulk polymerization)	8
2.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution polymerization)	9

## สารบัญ (ต่อ)

2.4.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย (Suspension polymerization)	11
2.4.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)	13
2.5 โคพอลิเมอร์	14
2.5.1 จลนศาสตร์และสมการโคพอลิเมอร์	16
2.5.2 อิทธิพลของโครงสร้างที่มีต่อค่าอัตราส่วนความว่องไว	17
2.5.2.1 ผลของเรโซแนนซ์ (Resonance effect)	17
2.5.2.2 ผลของความมีขั้ว (Polarity effect)	18
2.5.2.3 ผลของความเกะกะ (Steric effect)	18
2.6 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends)	18
2.6.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม	19
2.6.1.1 พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blends)	19
2.6.1.2 พอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends)	19
2.6.2 ค่าบ่งชี้การละลาย (Solubility parameter)	20
2.6.2.1 ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์	20
2.6.2.2 การประมาณค่าการละลายของพอลิเมอร์	22
2.6.3 สาเหตุและปัญหาที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน	24
2.6.4 วิธีการทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันมากขึ้น	24
2.7 สารช่วยผสม (Compatibilizer)	25
2.8 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	29
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3 การสังเคราะห์สารช่วยผสม	30
3.3.1 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์	30
3.3.2 การตกตะกอนพอลิเมอร์	32
3.4 การศึกษาสมบัติของสารช่วยผสม	33
3.4.1 สมบัติการละลายของสารช่วยผสม	33
3.4.2 น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมโดยใช้เทคนิค GPC	33

## สารบัญ (ต่อ)

3.5 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA	33
3.5.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม	33
3.5.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมต่างๆ	33
3.5.1.2 การศึกษาปริมาณของสารช่วยผสมใน PS/EVA	34
3.5.2 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	34
3.6 การทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	34
3.6.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DMTA	34
3.6.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM	35
3.6.3 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	35
3.6.4 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก	36
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสม	37
4.1.1 การทดสอบการละลายของสารช่วยผสม	38
4.1.2 การวัดน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมโดยใช้เทคนิค GPC	40
4.2 การผสมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม	41
4.2.1 ผลชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	42
4.2.1.1 สมบัติทางความร้อน	42
4.2.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา	43
4.2.1.3 สมบัติการรับแรงดึง	44
4.2.1.4 ความทนทานต่อแรงกระแทก	47
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของสารช่วยผสม	48
4.2.2.1 สมบัติทางความร้อน	48
4.2.2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา	49
4.2.2.3 สมบัติการรับแรงดึง	50
4.2.2.4 ความทนทานต่อแรงกระแทก	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

4.2.3 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมื่อปรับเปลี่ยน	
ปริมาณของภูมิภาคกระจาย	53
4.2.3.1 สมบัติทางความร้อน	53
4.2.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา	53
4.2.3.3 สมบัติการรับแรงดึง	54
4.2.3.4 ความทนทานต่อแรงกระแทก	57
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	61
<b>ภาคผนวก</b>	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	มอนอเมอร์ที่ผ่านกลไกอนุมูลอิสระและใช้เทคนิคสารละลาย	10
2.2	ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้เทคนิคแบบแขวนลอยในการสังเคราะห์	12
2.3	ค่าอัตราส่วนความว่องไว (Reactivity ratio) ของโคพอลิเมอร์บางชนิด	17
2.4	ค่าบ่งชี้การละลายของ Hansen ของตัวทำละลายและพอลิเมอร์ที่สำคัญบางชนิด	22
3.1	อัตราส่วนของมอนอเมอร์ในโคพอลิเมอร์	31
3.2	ตัวทำละลายช่วยตกตะกอนที่ใช้ในแต่ละสูตร	32
3.3	สูตรของพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ	34
4.1	ร้อยละผลผลิตที่ได้ของสารช่วยผสมจาก P(S- <i>ran</i> -MMA- <i>ran</i> -MAA)	37
4.2	การละลายของสารช่วยผสมในตัวทำละลายชนิดต่างๆ	38
4.3	ค่าบ่งชี้การละลายของสารช่วยผสม	39
4.4	การละลายของสาร PS และ EVA ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ	39
4.5	ค่าบ่งชี้การละลายของพอลิเมอร์	40
4.6	ค่า RED ของสารช่วยผสม	40
4.7	น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสม	41
4.8	$T_g$ ของ PS และ EVA และพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ อยู่ปริมาณ 2.5 wt%	42
4.9	$T_g$ ของ PS และ EVA ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณแตกต่างกัน	49
4.10	$T_g$ ของ PS และ EVA ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การสังเคราะห์พอลิสไตรีน	4
2.2	การสังเคราะห์เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์	5
2.3	องค์ประกอบของเทคนิคบัลค์	9
2.4	องค์ประกอบของเทคนิคแบบสารละลาย	10
2.5	องค์ประกอบในเทคนิคแบบแขวนลอย	12
2.6	ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม	19
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทต่างๆ เมื่ออัตราส่วนในการผสมแตกต่างกัน	20
2.8	หน้าจอของโปรแกรม HSPiP <sup>©</sup>	23
2.9	เครื่องผสมแบบปิด	26
3.1	แผนผังการสังเคราะห์ P(S-ran-MMA-ran-MAA)	31
4.1	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt% ที่กำลังขยาย 3500 เท่า	43
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังกับพอลิเมอร์ PS EVA และ S8E2	44
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ PS EVA และ S8E2	45
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ PS EVA และ S8E2	45
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%	46
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%	46
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%	47
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณแตกต่างกันที่กำลังขยาย 3500 เท่า	49
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยังกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณ 2.5 wt% และ 5 wt%	50
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณ 2.5 wt% และ 5 wt%	51
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณ 2.5 wt% และ 5 wt%	51
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทก กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณแตกต่างกัน	52
4.14	ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน และใส่สารช่วยผสมที่กำลังขยาย 3500 เท่า	53
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยังกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัฏภาคกระจาย	54
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด กับชนิดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัฏภาคกระจาย	55
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด กับชนิดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัฏภาคกระจาย	55
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยังกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%	56
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด 56 การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาดกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%	57
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัฏภาคกระจาย	57
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%	58
ก-1	ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M30A0	65
ก-2	ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M29A1	65
ก-3	ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M27A3	65
ก-4	ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M25A5	66
ก-5	ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M20A10	66
ก-6	ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ PS	66
ก-7	ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ EVA	67
ก-8	ผลการทำนายสารช่วยผสมที่เข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA มากที่สุด	67
ข-1	โครมาโทแกรมของ S70M30A0	68
ข-2	โครมาโทแกรมของ S70M29A1	68
ข-3	โครมาโทแกรมของ S70M27A3	69
ข-4	โครมาโทแกรมของ S70M27A5	69
ข-5	โครมาโทแกรมของ S70M25A10	70
ค-1	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(E')$ กับอุณหภูมิของ PS	71
ค-2	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(E'')$ กับอุณหภูมิของ PS	71
ค-3	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\tan \delta)$ กับอุณหภูมิของ PS	72
ค-4	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(E')$ กับอุณหภูมิของ EVA	72
ค-5	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(E'')$ กับอุณหภูมิของ EVA	73
ค-6	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\tan \delta)$ กับอุณหภูมิของ EVA โชนันค่า	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ค-7	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt%	74
ค-8	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E'')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt%	74
ค-9	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (\tan \delta)$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt%	75
ค-10	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณ 2.5 และ 5 wt%	75
ค-11	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E'')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณ 2.5 และ 5 wt%	76
ค-12	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (\tan \delta)$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณ 2.5 และ 5 wt%	76
ค-13	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	77
ค-14	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E'')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	77
ค-15	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (\tan \delta)$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	78
ค-16	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณที่แตกต่างกัน	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ค้า 78 การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ค-17	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (E'')$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณที่แตกต่างกัน	79
ค-18	เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (\tan \delta)$ กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณที่แตกต่างกัน	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
S	สไตรีน (Styrene)
M, MMA	เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate)
A, MAA	กรดเมทาคริลิก (Methacrylic acid)
PS	พอลิสไตรีน (Polystyrene)
EVA	เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymers)
GPC	เจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatograph)
DMTA	เครื่องทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกและ ความร้อน (Dynamic mechanical thermal analyzer)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
S70M27A3	โคพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน โดยโมลของสไตรีน เมทิลเมทาคริเลต และกรดเมทาคริลิก 70/27/3 (ตัวเลขสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสูตร)
S8E2	พอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วนของ PS และ EVA 80/20 โดยน้ำหนัก
S7E3	พอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วนของ PS และ EVA 70/30 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พอลิสไตรีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างหลากหลาย อาทิเช่น บรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ งานหรือถาดพลาสติกใส่ออาหาร เป็นต้น โดยจัดเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ได้จากสไตรีนมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม [1] ข้อดีของพอลิสไตรีนคือ (1) มีความโปร่งใสและมันวาว (2) ทนทานกรดและด่างได้ดี (3) คงรูปได้ดี (4) ดูดซึมน้ำได้น้อย ทำให้ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด และ (5) มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี จึงเก็บได้นานโดยไม่กรอบหรือเปลี่ยนสี [2] ส่วนข้อเสียที่สำคัญของพอลิสไตรีนคือเปราะและแตกหักง่ายเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีผู้ทำการคิดค้นพอลิสไตรีนชนิดใหม่คือพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก (High impact polystyrene, HIPS) ซึ่งทำได้โดยการผสมบิวทาไดอินกับพอลิสไตรีนในสัดส่วนร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนัก หรือนำมอนอเมอร์บางชนิด เช่น บิวทาไดอิน ทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมกับสไตรีนมอนอเมอร์ ทำให้โคพอลิเมอร์ดังกล่าวมีความความทนทานต่อแรงกระแทกมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีวัฏภาคของบิวทาไดอินช่วยในการรับแรง [3] หรืออีกวิธีหนึ่งที่มีผู้คิดค้นคือการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่างอะครีโลไนไทรล์ บิวทาไดอินและสไตรีน (ABS) โดยพบว่าพอลิเมอร์ดังกล่าวมีความทนทานต่อแรงกระแทก และทนความร้อนได้ดี [4] อย่างไรก็ตาม แม้กระบวนการดังกล่าวสามารถทำให้พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่เพราะในโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังมีพันธะคู่จากบิวทาไดอินอยู่ จึงทนต่อออกซิเจนและโอโซนได้ไม่ดีเท่าที่ควร และเมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป (Process temperature) มากกว่า 250°C พบว่าพอลิเมอร์เกิดออกซิเดชันเนื่องจากความร้อน (Thermal oxidation) ได้ ดังนั้นหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) แทนบิวทาไดอิน [5] อย่างไรก็ตามจากการศึกษาโดย Soares และคณะ [6] พบว่าวัฏภาคกระจายซึ่งคือ EVA นั้นมีขนาดใหญ่ ทำให้สมบัติเชิงกลไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการแก้ปัญหาโดยการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ลงไป เพื่อทำให้ขนาดวัฏภาคกระจายเล็กลงเป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

งานวิจัยที่ศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ได้แก่ Tang และคณะ [7] ได้ใช้บล็อกโคพอลิเมอร์ 3 ชนิด ได้แก่ Polystyrene-block-poly(ethylene-ran-butylene)-block-polystyrene-graft-maleic anhydride, Polystyrene-block-polyisoprene-block-polystyrene และ Polystyrene-block-polybutadiene ผสมกับ PS/EVA ที่มีอัตราส่วน 90/10 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนต่างกัน พบว่าสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งหากใช้ Polystyrene-block-polybutadiene เป็นสารช่วยผสมใน

อัตราส่วน 15 wt% พบว่าความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงสุด ส่วน Cheng และคณะ [5] เตรียมแผ่นซีทโดยใช้สไตรีน-มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Styrene-maleic anhydride, SM) ทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ (*In situ* polymerization) กับ EVA ได้เป็น EVA-g-PS โดยหากใช้ EVA ปริมาณ 10 wt% พบว่าความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 5 เท่าเมื่อเทียบกับพอลิสไตรีน อย่างไรก็ตาม พบว่าสมบัติเชิงกลลดลงหากใช้ EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยเกินไป นอกจากนี้ Soares และ Cario [8] ได้ใช้ EVA ที่มีการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันโดยเมอร์แคปเทน (Mercapto-functionalized EVA, EVASH) และบล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (SBS) ในอัตราส่วนแตกต่างกันเป็นสารช่วยผสม พบว่าขนาดของภูมิภาคกระจายเล็กกลง ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาสารช่วยผสมชนิดใหม่ ซึ่งเป็น โคพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือสไตรีน (Styrene, S) เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, M) และกรดเมทาคริลิก (Methacrylic acid, A) เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA โดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution polymerization) จากนั้นนำสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding) จากนั้นศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สังเคราะห์สารช่วยผสมจาก P(S-*ran*-MMA-*ran*-MAA)
2. ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม PS/EVA

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งขอบเขตการวิจัยได้เป็น 2 ส่วนคือ

### 1. การสังเคราะห์สารช่วยผสม

ทำการสังเคราะห์สารช่วยผสมจาก P(S-*ran*-MMA-*ran*-MAA) โดยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย ในอัตราส่วนโดยโมล 70/30/0 70/29/1 70/27/3 70/25/5 และ 70/20/10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและศึกษาสมบัติต่างๆ

ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ในอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิด จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด แล้วศึกษาฟิล์มที่เตรียมได้ในด้านสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานทางวิทยา โดยศึกษาใน 2 ประเด็นดังนี้

- ก. ปรับเปลี่ยนชนิดของสารช่วยผสมที่ใช้เติมในพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ปริมาณสารช่วยผสม 2.5 wt% จากนั้นศึกษาสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้
- ข. ปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสมที่ใช้เติมในพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ปริมาณสารช่วยผสม 0, 2.5 และ 5 wt% จากนั้นศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ทั้งทางด้านสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน และสามารถนำความรู้ที่ได้เป็นแนวทางในการปรับปรุงพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ให้มีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น หรือนำไปประยุกต์ใช้งานกับพอลิเมอร์ผสมระบบอื่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พอลิสไตรีน (PS) [1-2, 9]

พอลิสไตรีน เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น การใช้งานในบรรจุภัณฑ์ โดยจัดว่าเป็นเทอร์โมพลาสติก ได้จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยระบบอนุมูลอิสระ เริ่มต้นจากสไตรีนมอนอเมอร์ โดยมีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หรือออกซิเจนเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การสังเคราะห์พอลิสไตรีน [9]

โครงสร้างของพอลิสไตรีนมีหมู่เบนซีนอิสระบนสายโซ่หลักของคาร์บอน เบนซีนเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขนาดใหญ่กว่าหมู่เมทิลและคลอรีน จึงทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่สายโซ่ ดังนั้นจึงมีโอกาสจัดตัวเป็นผลึกน้อย ทำให้พอลิสไตรีนจัดเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) 100% โดยจากการเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน ทำให้มีปริมาตรอิสระขนาดใหญ่ในโครงสร้าง เป็นผลทำให้เมื่อแสงตกกระทบแล้วสามารถเกิดการส่งผ่านทั้งหมดโดยไม่มีการสะท้อนกลับ พอลิสไตรีนจึงโปร่งใส มีลักษณะแวววาวดังนั้นจึงมักเรียกพอลิสไตรีนว่าผลึกพอลิสไตรีน ซึ่งการเรียกชื่อนี้จะเกี่ยวข้องกับลักษณะการมองเห็นมากกว่าระดับผลึกจริงใน โครงสร้าง

#### 2.1.1 สมบัติของพอลิสไตรีน

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะใสและมันวาว
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 1.05-1.07
- สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอะโรมาติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งหม่อมมีการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ประมาณ  $100^\circ\text{C}$  สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

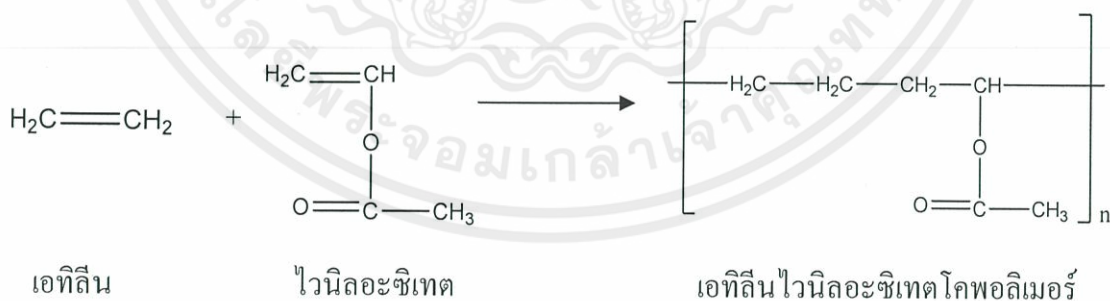
- อุณหภูมิการอ่อนตัวประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิสลายตัวประมาณ  $250^{\circ}\text{C}$
- สามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่ชิ้นงานที่ได้มีความเปราะ
- มีความคงรูปดี
- ดูดซึมน้ำได้น้อย ทำให้ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาด
- ความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมดี จึงเก็บได้นานโดยไม่กรอบหรือเปลี่ยนสี

### 2.1.2 การประยุกต์ใช้งาน

1. ใช้ทำแก้ว โฟม งานหรือถาดพลาสติกใส่อาหาร
2. ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์กันกระแทกสำหรับใส่ขวดไวน์ ผลไม้ คอมพิวเตอร์ เป็นต้น
3. ใช้ทำเป็นวัสดุช่วยพยุงให้ลอยน้ำ
4. ใช้ทำเป็นแผ่นฉนวนกันความร้อนในอาคาร
5. อื่นๆ เช่น ไม้บรรทัด ไม้แขวนเสื้อ ม้วนวีดีโอ ตลับเทป เป็นต้น

## 2.2 เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ (EVA) [10]

เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน เนื่องจากเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนและไวนิลอะซิเตท มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90 % และมีไวนิลอะซิเตทเป็นตัวเสริมแรงทำให้เกิดความยืดหยุ่น โดยลดการเกิดผลึก ซึ่ง EVA เกิดจากการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตท โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่ากรณีปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ของเอทิลีนเพียงตัวเดียว ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ EVA แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 สมบัติของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะใสจนถึงขุ่น
- มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926-0.95
- สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอะโรมาติกและคลอริเนตไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง
- จุดเปราะ (Brittle point) อยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-70^{\circ}\text{C}$  และ จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง  $60-80^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) มีค่าตั้งแต่  $-20^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $20^{\circ}\text{C}$
- มีความยืดหยุ่น โคงงอได้ดี
- มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเชื่อมโยง
- ทนต่อสภาพการใช้งาน การซักล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย

### 2.2.2 การประยุกต์ใช้งาน

1. ใช้ทำ Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ
2. ใช้ทำสารยึดติด
3. ใช้ทำพลาสติกไซเซออร์
4. ใช้ทำงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์
5. อื่นๆ เช่น ส่วนประกอบในรองเท้าและเบาะรองนั่ง

## 2.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยการผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ (Addition polymerization) [11-12]

การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ จะเริ่มต้นจากมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง เช่นเอทิลีน ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ) โดยพันธะไพ ( $\pi$ -Bond) ของคาร์บอนในพันธะคู่สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบเติมเมื่อได้รับการกระตุ้นจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทอนุมูลอิสระ โดยจะเหนี่ยวนำให้มอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่เกิดพอลิเมอร์ขึ้น

สำหรับกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่

### 2.3.1 ขั้นริเริ่ม (Initiation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ขั้นริเริ่มเป็นขั้นที่เกิดบริเวณว่องไว (Active center) ทำหน้าที่ริเริ่มสายโซ่ โดยตัวริเริ่มที่มีอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของมอนอเมอร์



อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาอาจสูญหายจากระบบโดยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

1. อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มเกิดการสลายตัวโดยยังอยู่เป็นคู่ เมื่อมีมอนอเมอร์หรือตัวทำละลายล้อมรอบอยู่ อนุมูลอิสระจะมีโอกาสรวมตัวกลับไปเป็นตัวริเริ่มตั้งต้นก่อนแพร่กระจายแยกจากกัน
2. อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มอาจสูญหายไปในช่วงขยายสายโซ่ โดยรวมกับปลายโซ่ของพอลิเมอร์ที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว

### 2.3.2 ขั้วขยายสายโซ่ (Propagation)

ขั้วขยายสายโซ่เป็นขั้นที่เกี่ยวข้องกับการขยายความยาวของสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยการเพิ่มมอนอเมอร์เข้าไปในสายโซ่ เริ่มจากมอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยากับปลายสายโซ่ด้านที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่และเกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวตำแหน่งใหม่อีก



ในกรณีที่โซ่พอลิเมอร์กำลังขยายอยู่ดึงไฮโดรเจนอะตอมจากโมเลกุลที่อยู่ใกล้ๆ พบว่าโซ่พอลิเมอร์จะเป็นกลางและโมเลกุลที่สูญเสียอะตอมไปจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ที่พร้อมเริ่มต้นสายโซ่ของพอลิเมอร์ใหม่ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การถ่ายโอนสายโซ่ (Chain transfer) โมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมให้กับพอลิเมอร์อาจเป็นมอนอเมอร์หรือตัวทำละลาย ทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวโซ่ของพอลิเมอร์ลดลง ถ้าโมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมเป็นพอลิเมอร์สายโซ่อื่นอาจทำให้เกิดโซ่กิ่ง

### 2.3.3 ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Termination)

ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยาเป็นขั้นที่หยุดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนเดี่ยวที่ปลายสายโซ่ทำปฏิกิริยากัน มี 2 ประเภทได้แก่

1. ปฏิกิริยาสิ้นสุดแบบรวมกัน (Combination) โดยเกิดจากอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ที่ปลายสายโซ่ 2 สายโซ่มาทำปฏิกิริยากัน



2. ดิสพรอพพอนันชัน (Disproportionation) โดยเกิดจากปลายสายโซ่ที่วงวៃของพอลิเมอร์หนึ่งดึงไฮโดรเจนอะตอมจากคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างบริเวณวงวៃของพอลิเมอร์อีกโซ่หนึ่ง พอลิเมอร์ที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมจะเกิดพันธะคู่ที่ปลายสายโซ่



โอกาสที่พอลิเมอร์เกิดแบบรวมกันหรือแบบดิสพรอพพอชันเนชัน เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{k_{tc}}{k_{td}} = \frac{A_{tc} e^{(E_d - E_c)/RT}}{A_{td}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่สมดุลอัตราของปฏิกิริยา,  $A$  บัญญัติความถี่ของการชนกัน (Collision frequency factor) และ  $E$  = พลังงานกระตุ้น

## 2.4 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์ [11-13]

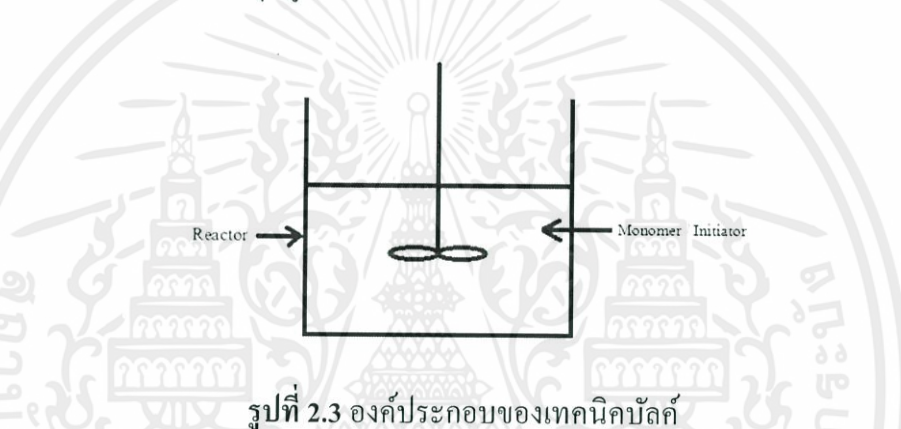
ในการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์มีสิ่งที่จะต้องคำนึงหลายประการ เช่น การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ การถ่ายโอนความร้อนจากการเกิดของพอลิเมอร์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงต้องนำมาพิจารณาเพื่อเลือกใช้ระบบการสังเคราะห์ ส่วนปัญหาความหนืดของระบบที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเกิดพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นการถ่ายโอนมวล ซึ่งสำคัญมากเพราะเกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของสารตั้งต้นในถังปฏิกิริยา และการถ่ายโอนความร้อนเพื่อระบายความร้อนของปฏิกิริยา จึงเป็นสิ่งสำคัญในการตัดสินใจเลือกเทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์

ระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบ่งเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบสารเนื้อเดียว (Homogeneous) โดยที่สารตั้งต้นทั้งหมดรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นพอลิเมอร์จะแยกตัวออกมาจากตัวกลาง ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่ บัลค์ (Bulk) และ สารละลาย (Solution) ส่วนระบบสารเนื้อผสม (Heterogeneous) มีสารตัวกลางคือน้ำ ส่วนมอนอเมอร์เป็นสารอินทรีย์ ทำให้สารเริ่มต้นทั้งหมดจึงไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน แบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่ แขนวลอย (Suspension) และอิมัลชัน (Emulsion) มอนอเมอร์ทุกชนิดสามารถสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคใดๆ ก็ได้ โดยเลือกเทคนิคที่ดีที่สุดสำหรับมอนอเมอร์ชนิดนั้นๆ

### 2.4.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ (Bulk polymerization)

เทคนิคบัลค์ เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดในการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ล้วนๆ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความหนืดของระบบจะเพิ่มขึ้น และเกิดการคายความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่ดี หากความร้อนในระบบสูงเกินไปจะทำให้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเสื่อมสภาพหรือเกิดสี และเกิดการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างเนื่องจากเกิดการถ่ายโอนโซ่ (Chain transfer) ในอุตสาหกรรมเทคนิคบัลค์ไม่นิยมนำไปใช้ผลิตพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ

เนื่องจากควบคุมความร้อนและความหนืดยาก ดังนั้นจึงเหมาะกับพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกปฏิกิริยาควบแน่น ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพอลิเมอร์แบบเชิงเส้นมากกว่า เพราะในการเกิดพอลิเมอร์ดังกล่าวมีการคายความร้อนเพียงเล็กน้อย โดยปัญหาที่พบจากเทคนิคบัตช์ คือ ระบบมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการส่งผ่านความร้อนลดลง โดยหากไม่มีการขจัดความร้อนส่วนนี้ออก ปฏิกิริยาจะเกิดการเร่งตัวเอง (Auto-acceleration) ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวหรือเสื่อมสภาพ ดังนั้นสำหรับการเกิดพอลิเมอร์ของพวกไวนิลมอนอเมอร์โดยใช้ถังปฏิกิริยาเดี่ยว (Batch) ควรต้องมีระบบทำความร้อนและความเย็น ระบบทำความร้อนใช้ตอนเริ่มต้นเพื่อทำให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยา หลังปฏิกิริยาเกิดขึ้นแล้ว ความร้อนจะถูกกำจัดออกเพื่อควบคุมการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์และหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์ Trommsdorff-Norrish effect ซึ่งทำให้พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากผิดปกติ



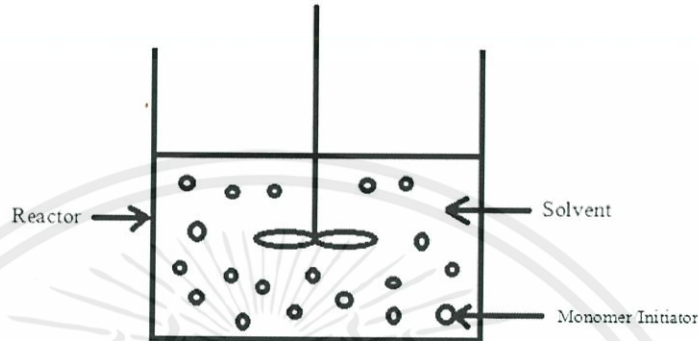
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของเทคนิคบัตช์

ข้อดีของการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัตช์คือ ไม่ใช้ตัวทำละลาย ทำให้ลดปัญหาในการกำจัดตัวทำละลายในพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ไม่นิยมใช้กับพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ เพราะมีความร้อนเกิดขึ้นรวดเร็ว และไม่มีตัวช่วยระบายความร้อน ดังนั้นเทคนิคนี้ควรใช้สำหรับสังเคราะห์พอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกที่เกิดผ่านกลไกปฏิกิริยาควบแน่น

#### 2.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution polymerization)

เทคนิคนี้ช่วยแก้ปัญหาของเทคนิคบัตช์ เนื่องจากมีตัวทำละลายส่งผ่านความร้อนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ความหนืดลดลง และการควบคุมความร้อนทำได้ง่าย เมื่อเทียบกับเทคนิคบัตช์ แต่การใช้ตัวทำละลายก่อให้เกิดปัญหาใหม่โดยอาจเกิดการถ่ายโอนโซ่ จึงจำเป็นต้องเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม นอกจากนี้ตัวทำละลายอาจตกค้างอยู่ในพอลิเมอร์ ทำให้สมบัติเปลี่ยนไป การใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจึงเป็นทางเลือกอีกทางที่น่าสนใจ โดยน้ำไม่ถือว่าเป็นสิ่งเอกสารนี้เป็นเพื่อนในพอลิเมอร์เพราะไม่มีผลต่อสุขภาพและสถานะแวดล้อมนอกจากนี้การมีน้ำอยู่จะทำให้ไม่ว่ากรณีความว่องไวของมอนอเมอร์ในระบบลดลง ทำให้กำจัดออกได้ง่าย เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคนี้สามารถใช้ได้ทั้งกับกลไกปฏิกิริยาที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระและไอออนิก โดยถ้าใช้ถังปฏิกิริยาแบบ Batch จะมีข้อดีมากกว่าเทคนิคแขวนลอย กล่าวคือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และตัวเร่งกระจายตัวในตัวกลางตลอดเวลาของการทำปฏิกิริยาจึงสามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์และควบคุมองค์ประกอบของโคพอลิเมอร์ได้แน่นอน โดยในการเลือกใช้ตัวทำละลายนิยมใช้ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถกำจัดออกจากพอลิเมอร์ได้ง่าย



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของเทคนิคแบบสารละลาย

การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลายมีข้อแตกต่างจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ คือ การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลายใช้ตัวทำละลายลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายจึงมีความสำคัญมาก เพราะอาจเกิดปัญหาเนื่องจากการถ่ายโอนโซ่ไปยังตัวทำละลายหากเลือกตัวทำละลายไม่เหมาะสม

ตารางที่ 2.1 มอนอเมอร์ที่ผ่านกลไกอนุมูลอิสระและใช้เทคนิคสารละลาย [11]

มอนอเมอร์	บริษัทผู้ผลิต	ตัวทำละลาย	
		อินทรีย์	น้ำ
Acrylic acid	Rohm & Haas BASF	+	+
	Hoechst-Celanese		
Methacrylic acid	Rohm & Haas	+	+
Methyl methacrylate	Rohm & Haas	+	-
Methyl acrylate	Rohm & Haas	+	+
Ethyl acrylate	Rohm & Haas	+	-
Butyl acrylate	Rohm & Haas	+	-
Maleic acid	Monsanto	+	+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) มอนอเมอร์ที่ผ่านกลไกอนุมูลอิสระและใช้เทคนิคสารละลาย [11]

มอนอเมอร์	บริษัทผู้ผลิต	ตัวทำละลาย	
		อินทรีย์	น้ำ
Itaconic acid	Pfizer	+	+
Acrylonitrile	American Cyanamid	+	+
Styrene	Dow		
	USX Corporation	+	-
Vinyl acetate	Hoechst-Celanese	+	+
Methyl vinyl ether	GAF	+	+
Butadiene	Exxon	+	-
$\alpha$ -methylstyrene	USX Corporation	+	-
Vinyl pyrrolidinone	GAF	+	+
Vinyl chloride	Dow	+	-
Vinylidene chloride	Dow	+	-

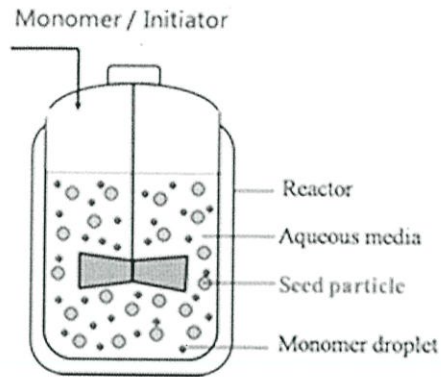
+ ละลาย - ไม่ละลาย

ข้อดีของวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย คือ ความหนืดในระบบต่ำ ทำให้ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นได้ง่าย ยิ่งตัวทำละลายมีความจุความร้อนมากจะช่วยควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ดีขึ้น และลดการเกิดปรากฏการณ์ Trommsdorff-Norrish effect

ส่วนข้อเสียของเทคนิคการสังเคราะห์ชนิดนี้ได้แก่ อุณหภูมิของปฏิกิริยามีข้อจำกัดอยู่เท่ากับจุดเดือดของตัวทำละลาย และเป็นได้ไปยากที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ปราศจากตัวทำละลาย นอกจากนี้การเลือกตัวทำละลายที่ไม่ว่องไวทั้งต่อมอนอเมอร์และพอลิเมอร์เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก โอกาสในเกิดการถ่ายโอนโซ่ไปสู่ตัวทำละลายเกิดขึ้นได้เสมอ ทำให้ความยาวและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกจำกัด

#### 2.4.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย (Suspension polymerization)

การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอยเป็นเทคนิคที่หลีกเลี่ยงตัวทำละลายอินทรีย์ วิธีนี้มอนอเมอร์จะแขวนลอยเป็นหยดเล็กๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-500  $\mu\text{m}$  ในของเหลวที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น น้ำ ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำ : มอนอเมอร์จะอยู่ในช่วง 1:1 ถึง 4:1 โดยหยดของมอนอเมอร์จะถูกปั่นกวอย่างรวดเร็วจนเพื่อป้องกันการเกาะเป็นก้อน และมีการเติมสารคงสภาพ (Dispersants หรือ Surfactants) ด้วย โดยสารคงสภาพจะละลายปนอยู่ในชั้นน้ำด้วยเพื่อป้องกันการเกิดเจลของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบในเทคนิคแบบแขวนลอย [13]

สำหรับวิธีการสังเคราะห์ชนิดนี้ ปริมาณสารคงสภาพจะใช้น้อยกว่า 0.1 wt% ของน้ำ ซึ่งสารคงสภาพที่ใช้ในวิธีนี้จะไม่เกิดเป็นไมเซลล์ หากต้องการสังเคราะห์ให้พอลิเมอร์มีลักษณะคล้ายน้ำยาง (Latex) ซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.5-10  $\mu\text{m}$  จะใช้ปริมาณสารคงสภาพมากกว่า 1% เรียกการสังเคราะห์นี้ว่า Dispersion polymerization แต่ถ้าขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1  $\mu\text{m}$  หรือน้อยกว่า เรียกการสังเคราะห์แบบนี้ว่า Microsuspension polymerization

มอนอเมอร์ที่สามารถเกิดเป็นพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคแบบแขวนลอยนี้ ควรเกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ และละลายน้ำได้น้อยมาก สำหรับตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ ต้องละลายมอนอเมอร์ได้ดีกว่าในชั้นน้ำ ขนาดของอนุภาคที่แขวนลอยขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ และปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ โดยหยดมอนอเมอร์ไม่มีความเสถียรสามารถจับกันเป็นก้อนแล้วตกตะกอนถึงแม้ว่าจะปั่นกววนตลอดเวลา การกระจายตัวของอนุภาคจึงถูกควบคุมโดยสารลดแรงตึงผิวและการปั่นกววน โดยอนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้จากวิธีนี้ใหญ่กว่าเทคนิคที่ได้จากอิมัลชัน ซึ่งสารลดแรงตึงผิวส่วนมากนั้นอยู่ระหว่างผิวของมอนอเมอร์กับน้ำ ช่วยให้หยดมอนอเมอร์กระจายแขวนลอยอยู่ในชั้นน้ำตั้งแต่เริ่มต้นปฏิกิริยาจนถึงขั้นที่หยดมอนอเมอร์กลายเป็นพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้เทคนิคแบบแขวนลอยในการสังเคราะห์ [11]

พอลิเมอร์	สารคงสภาพ	การนำไปใช้ประโยชน์
พอลิไวนิลอะซิเตต	พอลิไวนิลอัลกอฮอล์	ไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียมเมทอกไซด์เป็นพอลิไวนิลอัลกอฮอล์
พอลิเมทิลเมทาคริเลต	โซเดียมพอลิอะคริเลตในน้ำ	นำไปอัดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้เทคนิคแบบแขวนลอยในการสังเคราะห์ [11]

พอลิเมอร์	สารคงสภาพ	การนำไปใช้ประโยชน์
พอลิไวนิลคลอไรด์	พอลิไวนิลอัลกอฮอล์ และ เมทิลเซลลูโลสในน้ำ	นำไปฉีดขึ้นรูป
พอลิสไตรีน	-	ใช้ในงานแลกเปลี่ยนไอออน และทำโฟม
พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์	-	ใช้ทำฟิล์ม

ข้อดีของการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย คือระบายความร้อนได้ง่าย จึงนิยมใช้กับไวนิลมอนอเมอร์ที่ผ่านกลไกอนุมูลอิสระ เพราะมีการคายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกมา มาก การใช้น้ำเป็นตัวกลางนอกจากระบายความร้อนได้ดีแล้วยังมีราคาถูก ช่วยทำให้ต้นทุนที่ใช้ลดลง ข้อเสียอยู่ที่สารคงสภาพมักถูกจับที่ผิวของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการปนเปื้อน

#### 2.4.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)

เทคนิคนี้พัฒนามาจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย ใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ เทคนิคนี้ต่างจากแบบแขวนลอยตรงที่ตัวริเริ่มไม่ละลายในมอนอเมอร์ แต่ละลายในตัวกลางคือน้ำ แล้วแพร่เข้าไปยังหยดของมอนอเมอร์ มอนอเมอร์จะถูกปั่นกววนเป็นหยดเล็กๆ ขนาดหยดของมอนอเมอร์มีขนาดเล็กกว่าแบบแขวนลอย คืออยู่ในช่วง 0.05-5  $\mu\text{m}$  หยดมอนอเมอร์จะแขวนลอยอยู่ในชั้นน้ำและมีความเสถียรเนื่องจากการเติมสารลดแรงตึงผิว อนุภาคในระบบแบบอิมัลชันไม่ตกตะกอนทันทีที่หยุดการปั่นกววน เพราะสารก่ออิมัลชันซึ่งอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากมอนอเมอร์ไม่ละลายในตัวกลาง วัตถุประสงค์ในเทคนิคนี้จึงแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water) ซึ่งมอนอเมอร์แขวนลอยเป็นอนุภาคเล็กๆ อยู่ในชั้นน้ำ และประเภทที่สองคือน้ำในน้ำมัน (Water-in-oil) ใช้กับมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ เช่น กรดอะคริลิก

ในเทคนิคนี้จะใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจำแนกได้ 3 ประเภทได้แก่

1. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ เช่น สารประกอบซัลเฟต สบู่ของกรดไขมัน
2. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก เช่น Dodecyl ammonium chloride ไม่นิยมใช้มากนักเมื่อเทียบกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ เพราะประสิทธิภาพการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ไม่ดี และยังส่งผลเสียโดยทำลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้อีกด้วย
3. สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ เช่น พอลิไวนิลอัลกอฮอล์ สามารถนำมาใช้ควบคู่กับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ เพื่อช่วยควบคุมขนาดอนุภาคของไมเซลล์ ไม่นิยมใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุตามลำพัง เพราะประสิทธิภาพในการเกิดอิมัลชันนั้นไม่ดี

ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคแบบอิมัลชันนั้นประกอบไปด้วยน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลาง, มอนอเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ และสารก่ออิมัลชัน ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวผสมบัฟเฟอร์เพื่อควบคุมระดับ pH โดยปริมาณสารลดแรงตึงผิวต้องถึงระดับค่าความเข้มข้นวิกฤติ (Critical micelle concentration หรือ CMC) ของโมเลกุลจึงทำให้เกิดเป็นไมเซลล์แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งหันปลายด้านที่มีขั้วน้ำและปลายด้านที่ไม่มีขั้วเข้าสู่ศูนย์กลางไมเซลล์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาควรละลายในชั้นน้ำมากกว่าละลายในมอนอเมอร์

ข้อดีของเทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันคือ สามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลและอุณหภูมิของระบบได้ ความหนืดของระบบต่ำ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดคืออาจมีสารลดแรงตึงผิวตกค้างอยู่ในพอลิเมอร์ ดังนั้นการทำให้พอลิเมอร์นั้นบริสุทธิ์จึงทำได้ยาก

## 2.5 โคพอลิเมอร์ (Copolymers) [11-12, 14-16]

โคพอลิเมอร์ หมายถึงการนำเอามอนอเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดมาทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมกัน ซึ่งทำให้สมบัติดีกว่าโฮโมพอลิเมอร์เดิม ยกตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีน เป็นโฮโมพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเปราะ ทนแรงกระแทกได้น้อย และไม่ทนสารเคมี แต่โคพอลิเมอร์ของสไตรีนกับบิวทาไดอีนซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีชื่อว่า ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (SBR) นั้นมีความยืดหยุ่นคล้ายยางและทนแรงกระแทกได้มากกว่าพอลิสไตรีน หรือโคพอลิเมอร์ของสไตรีนกับอะครีโลไนไตรล์ ที่มีชื่อว่า SAN นั้นมีสมบัติในการทนสารเคมี ทนแรงกระแทก และต้านทานการแตกหักจากความเค้นได้มากกว่าพอลิสไตรีน เป็นต้น

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์คือเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติรวมข้อดีของมอนอเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้ตามต้องการ และสมบัติดังกล่าวจะต่างไปจากการนำโฮโมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมาผสมกันด้วยวิธีกายภาพ การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์อาจทำในตัวทำละลายหรือในสารละลายที่มีมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ปนอยู่ โดยเลือกมอนอเมอร์ที่เหมาะสมเช่น  $M_1$  และ  $M_2$  และริเริ่มปฏิกิริยาด้วยอนุมูลอิสระ ไอออน หรือแบบอื่น โดยสามารถสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ได้ 4 ประเภทดังนี้

### ก. โคพอลิเมอร์แบบสลับ (Alternating copolymers)

โคพอลิเมอร์แบบสลับ เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิดกระจายอยู่สลับกันอย่างเป็นระเบียบตลอดสายโซ่ มีหลักการอ่านชื่อคือ Poly(A-alt-B) ยกตัวอย่างโคพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น Poly(styrene-alt-maleic anhydride) (SMA) เป็นต้น โดยลักษณะของโคพอลิเมอร์แบบสลับที่มีมอนอเมอร์เป็น  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นดังนี้





### 2.5.1 จลนศาสตร์และสมการโคพอลิเมอร์

ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ถึงแม้ว่าจะใช้มอนอเมอร์ต่างชนิดกัน โดยให้อัตราส่วนของมอนอเมอร์เป็น 1:1 แต่พบว่าโคพอลิเมอร์ที่ได้มีอัตราส่วนของแต่ละมอนอเมอร์ในสายโซ่โมเลกุลของโคพอลิเมอร์ไม่เป็นอัตราส่วน 1:1 ด้วย นอกจากนี้การจัดตัวของมอนอเมอร์อาจอยู่ในลักษณะต่างกัน โดยไม่ขึ้นกับอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ใส่เข้าไปตอนเริ่มปฏิกิริยา และมอนอเมอร์ต่างชนิดมีแนวโน้มเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ต่างกัน โดยขึ้นกับความว่องไวของมอนอเมอร์แต่ละชนิดซึ่งสมการโคพอลิเมอร์แสดงได้ดังสมการที่ 2.6

$$\frac{d[M_1]}{d[M_2]} = \frac{[M_1] r_1 [M_1] + [M_2]}{[M_2] [M_1] + r_2 [M_2]} \quad (2.6)$$

ค่า  $r_1$  และ  $r_2$  คืออัตราส่วนความว่องไวของมอนอเมอร์ (Monomer reactivity ratio) เมื่อค่า  $k_{11}$  และ  $k_{22}$  คือค่าคงที่การเกิดการแผ่ขยายกับมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน (Self-propagation) ส่วน  $k_{12}$  และ  $k_{21}$  คือค่าคงที่การเกิดการแผ่ขยายกับมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง (Cross-propagation) ดังสมการที่ 2.7-2.8

$$r_1 = \frac{k_{11}}{k_{12}} \quad (2.7)$$

$$r_2 = \frac{k_{22}}{k_{21}} \quad (2.8)$$

หาก  $r_1$  มีค่ามากกว่า 1 กลไกการเกิดพอลิเมอร์มักเป็นการแผ่ขยายกับมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน ในขณะที่หากค่า  $r_1$  มีค่าน้อยกว่า 1 กลไกการเกิดพอลิเมอร์มักเป็นการแผ่ขยายกับมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยตารางที่ 2.3 ได้แสดงค่าอัตราส่วนความว่องไวของโคพอลิเมอร์บางชนิดดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราส่วนความว่องไว (Reactivity ratio) ของโคพอลิเมอร์บางชนิด [12]

$M_1$	$M_2$	$r_1$	$r_2$	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
Styrene	Methyl methacrylate	0.52	0.46	60
Styrene	Acrylonitrile	0.40	0.04	60
Styrene	Vinyl acetate	55	0.01	60
Styrene	Maleic anhydride	0.041	0.01	60
Styrene	Vinyl chloride	17	0.02	60
Styrene	1,3-Butadiene	0.58	1.35	50
Styrene	Isoprene	0.54	1.92	80
Methyl methacrylate	Vinyl chloride	10	0.1	68
Methyl methacrylate	Vinyl acetate	20	0.015	60
Methyl methacrylate	Acrylonitrile	1.20	0.15	60
Methyl methacrylate	1,3-Butadiene	0.25	0.75	90
Ethylene	Tetrafluoroethylene	0.38	0.1	25
Ethylene	Acrylonitrile	0	7	20
Ethylene	Vinyl acetate	0.97	1.02	130

## 2.5.2 อิทธิพลของโครงสร้างที่มีต่อค่าอัตราส่วนความว่องไว

### 2.5.2.1 ผลของเรโซแนนซ์ (Resonance effect)

ความว่องไวของอนุมูลอิสระขึ้นกับธรรมชาติของหมู่ที่ต่อกับตำแหน่งที่เป็นอนุมูลของไวนิลมอนอเมอร์ ( $\text{CH}_2=\text{CHR}$ ) โดยหมู่ R ที่ช่วยให้อนุมูลเสถียรเรียงลำดับได้ดังนี้



จากลำดับความเสถียรของหมู่ R ในไวนิลมอนอเมอร์ดังแสดง พบว่าสไตรีน (เมื่อ R =  $-\text{C}_6\text{H}_5$ ) มีความเสถียรมาก ในขณะที่ไวนิลอะซิเตต (เมื่อ R =  $-\text{O}-\text{COCH}_3$ ) มีความเสถียรน้อยสุด แสดงว่าอนุมูลที่เสถียรเกิดจากมอนอเมอร์ที่ว่องไวและอนุมูลที่ว่องไวจะมาจากมอนอเมอร์ที่เสถียร ซึ่งส่วนมากเป็นมอนอเมอร์ที่มีพันธะเชื่อมต่อเนื่อง (Conjugated) เช่น บิวทาไดอีน และ อะคริเลต เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.2 ผลของความมีขั้ว (Polarity effect)

ถ้ามอนอเมอร์มีความแตกต่างระหว่างขั้วมาก โคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นแบบสลับ โดยมอนอเมอร์ที่มีหมู่ดึงอิเล็กตรอน เช่น  $-\text{COOR}$ ,  $-\text{CN}$  และ  $-\text{COCH}_3$  พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพันธะคู่ลดลง ในขณะที่หมู่  $-\text{OR}$ ,  $-\text{OCOCH}_3$  เพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนด้วยเหตุนี้ Acrylonitrile กับ Methyl vinyl ketone ( $r_1 r_2 = 1$ ) โคพอลิเมอร์ที่ได้เป็นแบบสลับ ในขณะที่ Acrylonitrile กับ Vinyl ether โคพอลิเมอร์โครงสร้างแบบสลับ ( $r_1 r_2 = 0.0004$ ) เป็นต้น

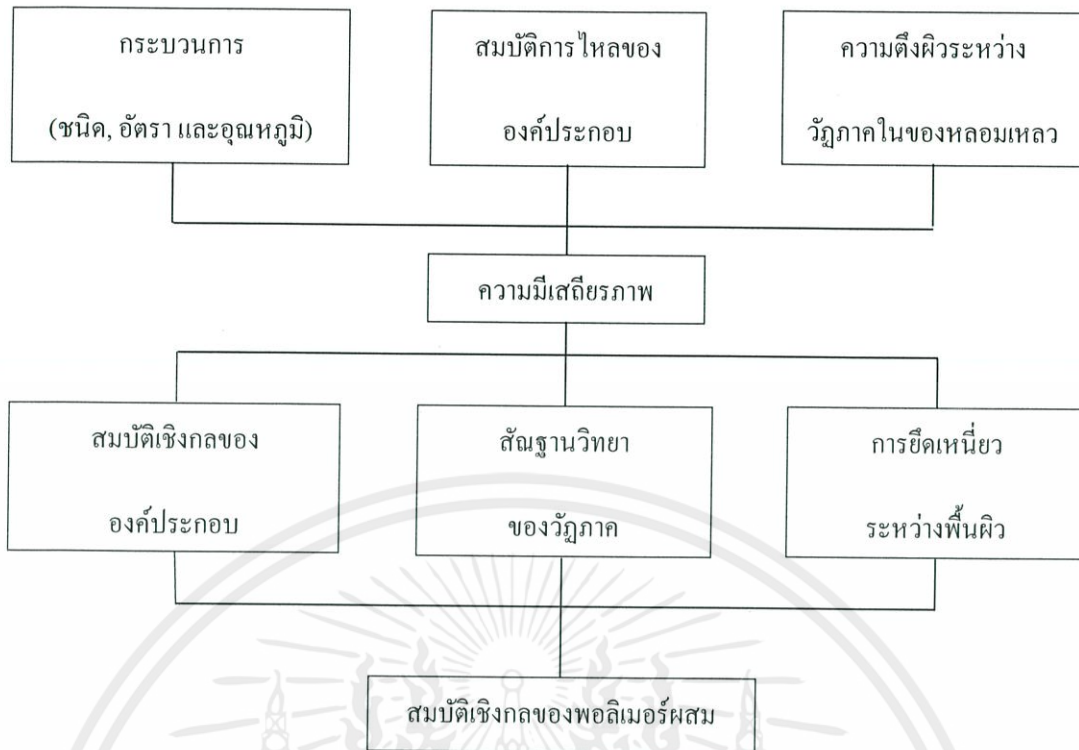
### 2.5.2.3 ผลของความเกาะกะ (Stearic effect)

ความเกาะกะจะลดความว่องไวของมอนอเมอร์ เปรียบเทียบ โอลิฟินที่มีหมู่แทนที่ตำแหน่ง 1,1 และ 1,2 พบว่าโอลิฟินที่มีหมู่แทนที่อยู่ตำแหน่งที่ 1 ทั้งสองหมู่จะเพิ่มความว่องไว 3-10 เท่า แต่ถ้าหมู่แทนที่อยู่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 จะลดความว่องไวลง 2-20 เท่า เป็นต้น

## 2.6 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) [17-22, 25-29]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) คือการนำพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน (Combining) โดยวิธีทางกายภาพซึ่งส่วนมากเมื่อนำพอลิเมอร์สองชนิดมาผสมกันจะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกัน โดยสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้พบว่ามีแตกต่างจากพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงพอลิเมอร์ให้มีเอกลักษณ์ตามที่ต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ และขยายขีดความสามารถในการนำไปใช้ของพอลิเมอร์ที่มีราคาแพง โดยผสมกับพอลิเมอร์ที่มีราคาถูกกว่า ทำให้มีราคาเหมาะสมมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วเป็นไปได้ยาก และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีข้อบกพร่อง (Defects) ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมด้อยกว่าพอลิเมอร์เดิมได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน และนอกจากนี้ยังรวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม [17]

### 2.6.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมแบ่งตามสัณฐานวิทยาได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

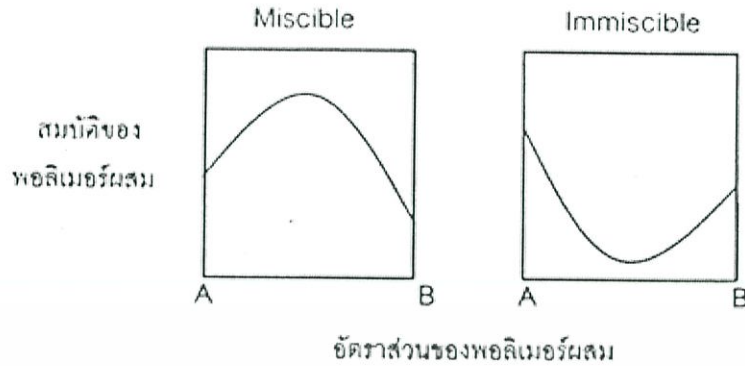
#### 2.6.1.1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blends)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะเห็นพอลิเมอร์ที่ได้อยู่รวมกันเป็นภูมิภาคเดียวโดยสมบัติของพอลิเมอร์ประเภทนี้มีลักษณะคล้ายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มและโดยทั่วไปสมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้พบว่าขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสม

#### 2.6.1.2. พอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้แยกออกจากกันเป็น 2 ภูมิภาคอย่างเห็นได้ชัดเจนในระดับจุลภาคโดยพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่าเป็นภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) และพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่าเป็นภูมิภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยระหว่างพื้นผิวของภูมิภาค (Interphase) มีแรงดึงดูดระหว่างกันน้อยมาก ดังนั้นอาจทำให้สมบัติของพอลิเมอร์นั้นต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม ซึ่งสมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีหลายรูปแบบขึ้นกับความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทต่างๆ เมื่ออัตราส่วนในการผสมแตกต่างกัน [17]

### 2.6.2 ค่าบ่งชี้การละลาย (Solubility parameter)

ในบางสถานการณ์ เรามีความต้องการที่จะทราบความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility หรือ Miscibility) ระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย เช่น เพื่อเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ หรือเพื่อเลือกพอลิเมอร์สำหรับใช้งานในบางสิ่งแวดล้อม เพื่อไม่ให้ละลายหรือบวมตัว (Swell) เป็นต้น โดยตัวแปรที่สามารถบ่งชี้ความสามารถในการละลายคือค่าบ่งชี้การละลาย “Solubility parameter” ( $\delta$ )

#### 2.6.2.1 ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์

พฤติกรรมของการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งตามปกติแล้วพอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่มีค่าบ่งชี้การละลายไม่ต่างจากพอลิเมอร์มาก กล่าวคือเป็นไปตามหลักการ “Like dissolves like”

ทั้งนี้ หากอธิบายพฤติกรรมของการละลายด้วยทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ สิ่งที่เป็นทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่ทำให้สารสองชนิด ซึ่งคือพอลิเมอร์และตัวทำละลายสามารถเกิดเป็นสารละลายได้คือพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) โดยค่า Gibbs free energy ของของผสม ( $G_{12}$ ) ต้องน้อยกว่าผลรวมของ Gibbs free energy ของสารทั้งสอง ( $G_1 + G_2$ ) กำหนดให้  $\Delta G_m$  คือ Gibbs free energy ของการผสมดังสมการที่ 2.9

$$\Delta G_m = G_{12} - (G_1 + G_2) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือค่า  $G_m$  ต้องเป็นลบ ( $G_m < 0$ ) จึงเกิดเป็นสารละลายได้ โดยค่า Gibbs free energy นั้นมีความสัมพันธ์กับเอนทาลปี (Enthalpy, H) และเอนโทรปี (Entropy, S) ดังสมการที่ 2.10

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad (2.10)$$

โดย  $\Delta H_m$  คือเอนทาลปี (หรือความร้อน) ของการผสม (Enthalpy or Heat of mixing) และ  $\Delta S_m$  คือเอนโทรปีของการผสม (Entropy of mixing) ซึ่ง  $\Delta H_m$  นั้นมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Gibbs free energy อย่างมากโดยการผสมแบบเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันเกิดเมื่อ  $\Delta H_m \leq 0$

นอกจากนี้ การพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมยังพิจารณาจากค่าบ่งชี้การละลาย ( $\delta$ ) ได้อีกด้วย โดยหนึ่งในผู้พัฒนาค่าบ่งชี้การละลายคือ Hansen ซึ่ง Hansen ได้นำอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมาพิจารณาในค่าบ่งชี้การละลายด้วย โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังต่อไปนี้

**กลุ่มที่ 1** อันตรกิริยาแบบดิซเพอร์ซิฟ (Dispersive interaction,  $E_D$ )

อันตรกิริยานี้เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมแต่ละอะตอมมีอิเล็กตรอนโคจรอยู่รอบนิวเคลียส โดยการโคจรของอิเล็กตรอนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) ซึ่งทำให้แต่ละอะตอมเกิดการดึงดูดระหว่างกันได้ โดยโมเลกุลทุกชนิดจะมีอันตรกิริยาประเภทนี้เสมอ

**กลุ่มที่ 2** แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Polar cohesive force,  $E_P$ )

อันตรกิริยานี้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงไดโพล – ไดโพลภายในโมเลกุล โดยเป็นอันตรกิริยาที่พบในสารที่มีขั้ว

**กลุ่มที่ 3** พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding,  $E_H$ )

อันตรกิริยานี้พบในสารที่มีขั้วเช่นกัน มีความแข็งแรงกว่าแรงไดโพล – ไดโพล แต่มีความอ่อนแอกว่าพันธะโควาเลนต์

ดังนั้นพลังงานของการดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Cohesive energy) ตามหลักการของ Hansen จึงขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาทั้ง 3 กลุ่มที่เสนอไปดังสมการที่ 2.11

$$E = E_D + E_P + E_H \quad (2.11)$$

เมื่อหารสมการที่ 2.11 ด้วยปริมาตรโมลาร์ (Molar volume) จะได้ค่า Cohesive energy density (CED) ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{E}{V} = \frac{E_D}{V} + \frac{E_P}{V} + \frac{E_H}{V} \quad (2.12)$$

และเพราะค่าบ่งชี้การละลาย ( $\delta$ ) มีค่าเท่ากับรากที่สองของค่า Cohesive energy density ดังนั้น

$$\delta^2 = \delta_D^2 + \delta_P^2 + \delta_H^2 \quad (2.13)$$

โดยตารางที่ 2.4 แสดงค่าบ่งชี้การละลายของ Hansen (Hansen solubility parameter, HSP) ของตัวทำละลายและพอลิเมอร์บางชนิด

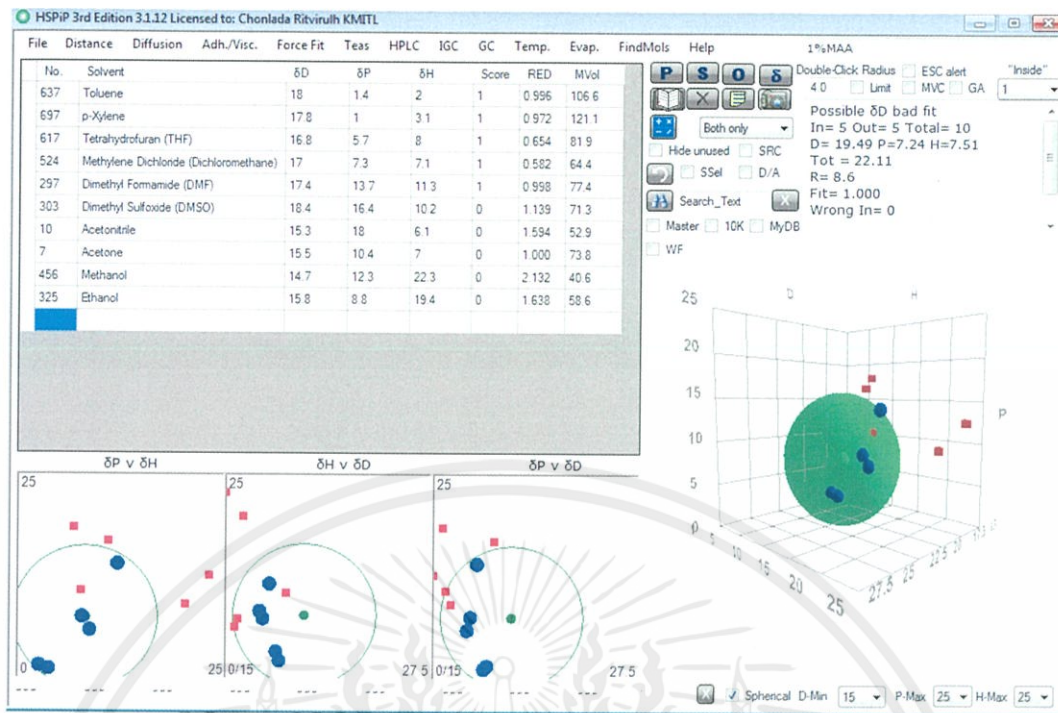
ตารางที่ 2.4 ค่าบ่งชี้การละลายของ Hansen ของตัวทำละลายและพอลิเมอร์ที่สำคัญบางชนิด [27]

Chemical	Hansen solubility parameter (MPa) <sup>1/2</sup>			
	$\delta_D$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta$
MEK	16	9.0	5.1	19.05
THF	16.8	5.7	8.0	19.46
Xylene	17.8	1.0	3.1	17.9
Acetone	15.5	10.4	7.0	19.94
Methanol	15.1	12.3	22.3	29.61
Water	15.5	16	42.3	47.81
PA6	18.9	7.9	11.7	23.59
Polystyrene	22.28	5.75	4.3	23.41
Desmophen 651	17.7	10.6	11.6	23.67
Desmophen 1700	17.9	9.6	5.9	21.15

### 2.6.2.2 การประมาณค่าการละลายของพอลิเมอร์

การประมาณค่าการละลายของพอลิเมอร์สามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีดังกล่าวพัฒนาโดย Hansen ซึ่งใช้วิธีการสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติโดยปัจจุบันมีโปรแกรมที่ช่วยในการประมาณค่าการละลายของพอลิเมอร์ เช่น โปรแกรม HSPiP<sup>©</sup> ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 หน้าจอของโปรแกรม HSPiP<sup>©</sup>

ในโปรแกรมดังกล่าวจะมีแบบจำลองการละลายอยู่ ซึ่งประกอบด้วยแกน 3 แกน คือ  $\delta_D$ ,  $\delta_P$  และ  $\delta_H$  ตามลำดับ และมีทรงกลม (Sphere) อยู่ภายในแบบจำลอง โดยทรงกลมดังกล่าวบ่งบอกพฤติกรรมการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่ดี (Good solvent) ซึ่งค่าบ่งชี้การละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่ดีนั้นอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลม และรัศมีของทรงกลมคือค่า  $R_0$  มีชื่อว่า Interaction radius โดยตัวทำละลายจะเป็นตัวทำละลายที่ดีได้เมื่อค่า  $R_a$  ซึ่งคือระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมน้อยกว่าค่า  $R_0$  โดยค่า  $R_a$  มีที่มาจากสมการต่อไปนี้

$$R_a^2 = 4(\delta_{D,p} - \delta_{D,s})^2 + (\delta_{P,p} - \delta_{P,s})^2 + (\delta_{H,p} - \delta_{H,s})^2 \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\delta_{D,p}$ ,  $\delta_{P,p}$  และ  $\delta_{H,p}$  คือตัวแปรในค่าบ่งชี้การละลายของ Hansen ของพอลิเมอร์ และ  $\delta_{D,s}$ ,  $\delta_{P,s}$  และ  $\delta_{H,s}$  คือตัวแปรในค่าบ่งชี้การละลายของ Hansen ของตัวทำละลาย โดยจากค่า  $R_a$  และ  $R_0$  สามารถนำไปใช้ในสมการ Relative energy difference (RED) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายคุณภาพของตัวทำละลายในการละลายพอลิเมอร์ให้เข้าใจง่ายขึ้นดังสมการ

$$RED = R_a/R_0 \quad (2.15)$$

โดยหากค่า RED มีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่าตัวทำละลายนั้นเป็นตัวทำละลายที่ดี หากค่า RED มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 หมายความว่าตัวทำละลายนั้นอาจเป็นได้ทั้งตัวทำละลายที่ดีหรือไม่ดี และหากค่า RED มีค่ามากกว่า 1 หมายความว่าตัวทำละลายนั้นเป็นตัวทำละลายที่ไม่ดีสำหรับพอลิเมอร์ตัวอย่าง

### 2.6.3 สาเหตุและปัญหาที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 1. พลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing)

สมมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการผลิตพอลิเมอร์ผสมซึ่งความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ถูกกำหนดโดยสมมูลของเอนทัลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy) สำหรับสารที่มีโมเลกุลใหญ่อย่างพอลิเมอร์นั้นค่าเอนโทรปีใกล้เคียงกับศูนย์ทำให้โอกาสความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจึงถูกกำหนดโดยค่าเอนทัลปีเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้มีค่าพลังงานอิสระในการผสมเป็นบวกจึงมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

#### 2. ค่าบ่งชี้การละลาย (Solubility parameter, $\delta$ ) มีค่าแตกต่างกันมาก

ค่าความสามารถในการละลายเป็นค่าที่มีความเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว (Surface tension) ของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงต้องเลือกให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน โดยหากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความสามารถในการละลายต่างกันมาก แรงตึงผิวระหว่างกันจะสูงทำให้ผสมเข้ากันได้ยากและเกิดวฏภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดพื้นผิวสัมผัสระหว่างวฏภาค จึงควรเลือกคู่พอลิเมอร์ผสมที่มีค่าความสามารถในการละลายที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี

### 2.6.4 วิธีการทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันมากขึ้น [25]

วิธีการทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันมากขึ้นมีหลายวิธี ได้แก่

1. เติมพอลิเมอร์เส้นตรง (Linear polymers) หรือพอลิเมอร์รูปร่างดาว (Star-shaped polymers)
2. เติมโคพอลิเมอร์แบบต่อกิ่ง (Graft copolymers) หรือโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random copolymers)
3. ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็น Ether copolymer หรือ Interacting polymer
4. ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดเป็น Interpenetrating Networks (IPN)
5. ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการเชื่อมโยง
6. ปรับปรุงมอนอเมอร์ให้มีหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น หมู่กรด-เบส, หมู่ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน, สารเชิงซ้อนที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนสายโซ่, หมู่ไอออนิก เป็นต้น
7. เติมตัวทำละลายร่วม (Co-solvent)
8. ใช้แรงเฉือนสูงๆ ในการผสมพอลิเมอร์ผสม
9. อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [17, 22-26, 30]

สารช่วยผสมใช้ในการเติมลงในพอลิเมอร์ผสมเพื่อช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น และช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป และช่วยเพิ่มแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของแต่ละวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรับและกระจายแรงได้มากขึ้น นอกจากนี้สารช่วยผสมยังช่วยทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ทำให้พอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

สารช่วยผสมแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

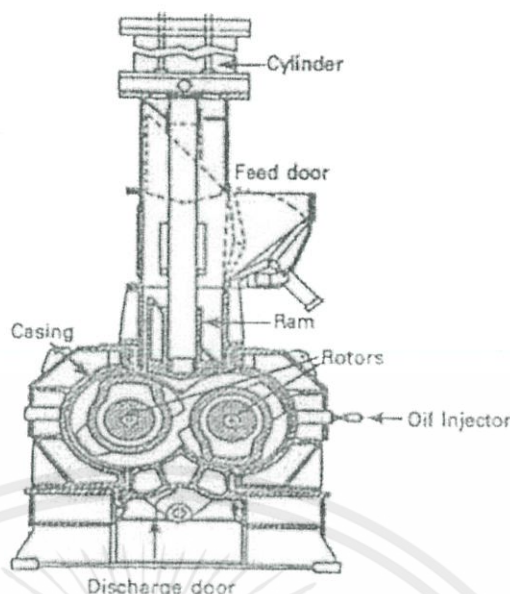
1. โคพอลิเมอร์แบบไม่เกิดปฏิกิริยา (Non-reactive copolymers) ได้แก่ โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymers) หรือ โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random copolymers) โดยเติมสารช่วยผสมชนิดนี้แยกไปเป็นองค์ประกอบที่ 3 ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสถูรโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) ที่บริเวณพื้นผิวของวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม

2. โคพอลิเมอร์แบบที่เกิดปฏิกิริยา (Reactive copolymers) คือ การนำพอลิเมอร์ที่ต้องการใช้เป็นสารช่วยผสมต่อกิ่งด้วยหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยใช้วิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนการเตรียมสารช่วยผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะผสม หรืออาจต่อกิ่งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งก็ได้

สารช่วยผสมที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็น โคพอลิเมอร์ เนื่องจากมีองค์ประกอบของพอลิเมอร์สองชนิดที่นำมาผสมกันทำให้เกิดการเกี่ยวพันหรือปฏิกิริยาทั้งสองวัฏภาคได้ และทำหน้าที่คล้ายกับเป็นสะพานเชื่อมระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมมีแนวโน้มดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารช่วยผสม

## 2.8 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [31]

เครื่องผสมแบบปิดประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ที่มีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้งจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ โรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมที่สูงทำให้พอลิเมอร์และสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปกระจายตัวได้ดี ซึ่งเครื่องผสมแบบปิดมีข้อดีได้แก่ ใช้เวลาในการผสมสั้น ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อนขณะผสม ขนาดและความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน และผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง อย่างไรก็ตามเครื่องผสมแบบปิดมีข้อเสียได้แก่ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้ และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก



รูปที่ 2.9 เครื่องผสมแบบปิด [31]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย ซึ่ง Guadalupe และคณะ [32] ได้สังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบโคบิล็อคระหว่างสไตรีน, เมทิลเมทาคริเลตและกรดเมทาคริลิก (Poly(styrene)-*block*-(methyl methacrylate/methacrylic acid)) โดยใช้ BPO และ CuBr เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและใช้เทคนิค ATRP ในการสังเคราะห์ รวมถึงใช้ 2,2'-bipyridine complex เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ส่วน Guozheng และคณะ [33] ได้สังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบสุ่มระหว่างสไตรีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Styrene-maleic anhydride, SMA) โดยมีมาเลอิกแอนไฮไดรด์อยู่ 7.5 mol% โดยใช้การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีการแบบบัลค์และสารละลาย ซึ่งวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลายได้ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายและใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์พบว่า SMA ที่ได้เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มอย่างเดียวนั้น นำ SMA ที่สังเคราะห์ได้ไปเป็นสารช่วยผสมระหว่าง Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether) (PPE) และ Bromide epoxy (BEP) พบว่า SMA ช่วยทำให้ PPE และ BEP เข้ากันได้ดีขึ้น

Lee และคณะ [34] ได้ศึกษาการใช้โคพอลิเมอร์แบบสุ่มเป็นสารช่วยผสม โดยทำการสังเคราะห์ P(S-*ran*-MMA) (SMMA) ในอัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาผสมกับพอลิเมอร์ผสม PS/MMA โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด ผลจากการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่า SMMA เคลื่อนมาที่ผิวระหว่าง PS และ MMA และเกิดเป็นชั้นหุ้มระหว่างสองภูมิภาค (Encapsulating layer) ซึ่งเป็นผลทำให้ขนาดภูมิภาคกระจายเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษามากับ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก PS และ EVA ผสมเข้ากันได้ไม่ดี จึงทำให้ต้องมีการใส่สารช่วยผสมลงไปด้วย โดย Tang และคณะ [35] ได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมของเอทิลีนไวนิลอะซิเตดกับพอลิสไตรีนโดยปรับน้ำหนักโมเลกุลของ EVA โดยใช้ EVA ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตด 27.2-28.8 wt% และใช้ EVA ที่มีค่า MFI ต่างกันคือ 365-440 g/10 min, 38.0-48.0 g/10 min และ 2.6-3.4 g/10 min ตามลำดับ และใช้พอลิสไตรีนที่มีค่า MFI 8.0 g/10 min โดยเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ กับพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก (HIPS) จากนั้นผสม PS/EVA ในอัตราส่วน 5, 10, 15, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวทวนคู่ (Co-rotating twin screw extruder) ด้วยความเร็วรอบ 10 rev/min และตั้งค่าอุณหภูมิในแต่ละช่วงของเครื่องเป็น 80, 100, 140, 170 และ 180°C ตามลำดับ พบว่า EVA ที่มีค่า MFI 38.0-48.0 g/10 min มีค่าความแข็งแรงดึงและความเหนียวมากที่สุด ซึ่งปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ EVA ช่วยเพิ่มค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break), ค่าความเหนียวดึงยึด (Tensile toughness) และค่าความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) แต่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัส (Modulus) ลดลง นอกจากนี้ค่าการไหลตัวของ EVA มีผลต่อขนาดวิภาคกระจาย โดยพบว่าสูตรที่ผสมกับ EVA ที่มีค่า MFI 2.6-3.4 g/10 min มีขนาดวิภาคกระจายเล็กที่สุด และให้สมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากมีมวลโมเลกุลที่สูงและที่ปริมาณ EVA 20 wt% พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก แต่ค่าอื่นๆ ได้แก่ ค่าความเหนียวและค่าการทนแรงกระแทกยังมีค่าที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ปริมาณของไวนิลอะซิเตดยังมีผลทำให้ความมีขั้วเพิ่มมากขึ้นด้วย

Soares และ Cario [8] ได้ทำการเพิ่มหมู่ Mercapto เข้าไปที่เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (EVASH) เพื่อใช้เป็นสารช่วยผสมโดยมีปริมาณหมู่ Mercapto อยู่  $64.7 \pm 5$  mmol/100 g และใช้ร่วมกับบล็อกโคพอลิเมอร์ของ Styrene-butadiene-styrene (SBS) ซึ่งมีสไตรีนอยู่ 30 wt% โดยทำการผสม PS ที่มีค่า MFI 6.13 g/10 min (ที่ 200°C/2.16 kg) กับ EVA ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตดอยู่ 18 wt% และมีค่า MFI 2.1 g/10 min (ที่ 200°C/2.16 kg) ด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 160°C และใช้ความเร็วโรเตอร์เป็น 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที ทำให้ขนาดของวิภาคกระจายของเอทิลีนไวนิลอะซิเตดในพอลิสไตรีนมีขนาดเล็กลงและมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพันธะคู่ของ SBS กับหมู่ Mercapto ของ EVASH ทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่มากขึ้น

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการใช้สารช่วยผสมตัวอื่น โดย Soares [6] ได้ทำการศึกษาสารช่วยผสมจาก Poly[(ethylene-co-vinyl acetate)-g-polystyrene] (EVA-g-PS) โดยพบว่าเมื่อเติม EVA-g-PS ลงไปเล็กน้อยสมบัติเชิงกลจะเพิ่มขึ้น เช่น ความสามารถในการทนทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น Tang และคณะ [7] ได้ศึกษาสารช่วยผสมคือ Polystyrene-block-poly(ethylene-ran-butylene)-block-polystyrene-graft-maleic anhydride, Polystyrene-block-polyisoprene-block-polystyrene และ Polystyrene-block-polybutadiene โดยผสมพอลิสไตรีนต่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตดในอัตราส่วน 90/10 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมสารช่วยผสมลงไปทำให้สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดย

สังเกตได้จากขนาดของวัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กลงและมีความทนทานต่อแรงกระแทกมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้ Polystyrene-*block*-polybutadiene เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 15 wt% พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก (HIPS)

Norimasa และคณะ [36] ได้ใช้สารช่วยผสมคือโคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนกับ กรดเมทาคริลิก (Poly(styrene-*co*-methacrylic acid) (P(S-*co*-MAA)) ในการผสมระหว่าง พอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PS/PEG) พบว่าเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง MAA กับออกซิเจนที่หมู่ไฮดรอกซิลของ PEG ทำให้ PS/PEG เข้ากันได้ดีขึ้นโดยสังเกตจากวัฏภาคกระจายของ พอลิเมอร์ผสมมีขนาดเล็กลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) : เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck จำกัด
2. สไตรีน (Styrene, S) บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด และ บริษัท ไทยมิทซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด
3. เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด และ บริษัท ไทยมิทซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด
4. กรดเมทาคริลิก (Methacrylic acid, MAA) บริษัท ไทยมิทซุสเปเชียลตี้เคมีคอล จำกัด
5. โทลูอีน (Toluene) : เกรดการค้า บริษัท Lab System จำกัด
6. ไซลีน (Xylene) : เกรดการค้า บริษัท Lab System จำกัด
7. เมทานอล (Methanol) : เกรดการค้า บริษัท Lab System จำกัด
8. เอทานอล (Ethanol) : เกรดวิเคราะห์ บริษัท RCI Labscan จำกัด
9. เททระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) : เกรดวิเคราะห์ บริษัท RCI Labscan จำกัด
10. เฮกเซน (Hexane) : เกรดการค้า บริษัท Lab System จำกัด
11. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) : เกรดการค้า บริษัท Lab System จำกัด
12. เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N-Dimethylformamide, DMF) : เกรดวิเคราะห์ บริษัท Labscan จำกัด
13. ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide, DMSO) : เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด
14. อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile) : เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific จำกัด
15. อะซิโตน (Acetone) : เกรดการค้า บริษัท Lab System จำกัด
16. ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas) บริษัท Praxair (ประเทศไทย) จำกัด
17. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N<sub>2</sub>) บริษัท Linde (ประเทศไทย) จำกัด
18. พอลิสไตรีน (PS) : เกรด STYRON 656-D บริษัท Styron จำกัด
19. เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-Vinyl acetate Copolymer, EVA) : ปริมาณ Vinyl acetate 27.5 wt% บริษัท Exxonmobil Chemical จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. บริษัทเครื่องแก้ว
2. ตู้อบความร้อน ของบริษัท Memmert จำกัด
3. แผ่นปั่นกวนพร้อมให้ความร้อน ของบริษัท IKA จำกัด รุ่น RCT basic
4. เครื่องเจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatograph, GPC) ของบริษัท Waters จำกัด รุ่น Waters 2414
5. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ของบริษัท Brabender จำกัด รุ่น PL 2000/PL 2001
6. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) ของบริษัท Bosco Engineering จำกัด รุ่น NEMA 600
7. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ของบริษัท Labtech Engineering จำกัด รุ่น LP20
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท Carl Zeiss จำกัด รุ่น EVO<sup>®</sup> MA10
9. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM) ของบริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR5K
10. เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact Tester) ของบริษัท Yasuda Seiki Seisakusho จำกัด รุ่น 258-OC
11. เครื่องทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกและความร้อน (Dynamic mechanical thermal analyzer, DMTA) บริษัท Rheometric Scientific จำกัด รุ่น DMTA-V

### 3.3 การสังเคราะห์สารช่วยผสม

#### 3.3.1 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์

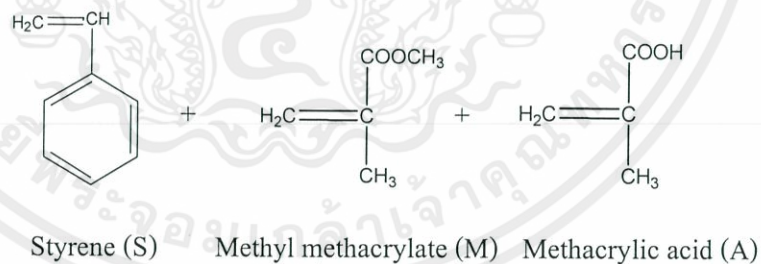
1. กำหนดปริมาณสารเคมีในหน่วยปริมาตร โดยอัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์กับตัวทำละลายเป็น 40:60 และใช้ Styrene (S), Methyl methacrylate (M) และ Methacrylic acid (A) เป็นมอนอเมอร์ โดยอัตราส่วนของมอนอเมอร์ในโคพอลิเมอร์แสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

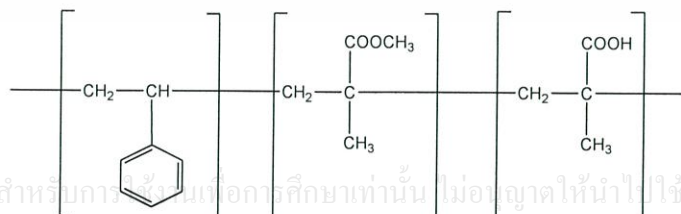
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของมอนอเมอร์ในโคพอลิเมอร์

โคพอลิเมอร์	S (mol%)	M (mol%)	A (mol%)
S70M30A0	70	30	-
S70M29A1	70	29	1
S70M27A3	70	27	3
S70M25A5	70	25	5
S70M20A10	70	20	10

2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของมอนอเมอร์ตามอัตราส่วนแล้วปิดผนึกด้วยฟิล์มยืด
3. ชั่งน้ำหนักของตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.01 wt% แล้วปิดด้วยกระดาษฟอยล์เพื่อป้องกันแสง
4. เทตัวทำละลายและตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงในขวดก้นกลม โดยเขย่าขวดก้นกลมให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาละลายในตัวทำละลาย
5. เติมมอนอเมอร์ลงในขวดก้นกลม แล้วพ่นก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที
6. ต่อลูกโป่งก๊าซไนโตรเจนกับขวดก้นกลม ผ่านข้อต่อที่สามารถเปิด-ปิดให้ก๊าซผ่านได้ โดยขณะที่ทำการเชื่อมต่อให้เปิดวาล์วข้อต่อด้วย
7. ปิดวาล์ว แล้วพันปิดด้วยฟิล์มยืด และกระดาษฟอยล์
8. นำขวดก้นกลมไปแช่ในอ่างน้ำมัน (Oil bath) ที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



↓  
BPO, 85°C, 24 hours



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แผนผังการสังเคราะห์ P(S-ran-MMA-ran-MAA)

### 3.3.2 การตกตะกอนพอลิเมอร์

1. นำสารละลายพอลิเมอร์ที่ได้เทลงในบีกเกอร์พร้อมทั้งปิดผนึกด้วยฟิล์มยืด
2. เตรียมอุปกรณ์การตกตะกอนโดยใช้วงแหวน ขาตั้ง กรวยแยก และเครื่องปั่นกวน โดยให้กรวยแยกเป็นตัวยกสารละลายพอลิเมอร์ลงในตัวทำละลายช่วยตกตะกอนดังแสดงในตารางที่ 3.2
3. เทสารละลายพอลิเมอร์ครั้งละ 10 mL ลงในกรวยแยก
4. เทตัวทำละลายช่วยตกตะกอนลงในบีกเกอร์โดยใช้อัตราส่วนต่อสารละลายพอลิเมอร์เป็น 10:1
5. ไขสารละลายพอลิเมอร์จากกรวยแยกให้สารหยดอย่างช้าๆ ลงในตัวทำละลายช่วยตกตะกอนที่มีการปั่นกวน
6. ใช้ที่คีบคีบพอลิเมอร์ออกจากบีกเกอร์แล้วนำไปวางในกระจกนาฟีกาตะกอนส่วนที่เหลือนำไปกรองแบบลดความดัน
7. ล้างตะกอนด้วยตัวทำละลายช่วยตกตะกอน

ตารางที่ 3.2 ตัวทำละลายช่วยตกตะกอนที่ใช้ในแต่ละสูตร

สูตรที่	โคพอลิเมอร์	ตัวทำละลายช่วยตกตะกอน
1	S70M30A0	เมทานอล
2	S70M29A1	เมทานอล:เอทานอล (9:1)
3	S70M27A3	เมทานอล:เอทานอล (9:1)
4	S70M25A5	เมทานอล:เอทานอล (9:1)
5	S70M20A10	เฮกเซน

8. นำพอลิเมอร์ที่ได้ไปอบในตู้อบความร้อน ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
9. ชั่งน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ได้ แล้วคำนวณร้อยละผลผลิตที่ได้

$$\text{ร้อยละผลผลิตที่ได้} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้}}{(\text{น้ำหนัก S} + \text{น้ำหนัก M} + \text{น้ำหนัก A})} \times 100 \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การศึกษาสมบัติของสารช่วยผสม

#### 3.4.1 สมบัติการละลายของสารช่วยผสม

การศึกษาการละลายของสารช่วยผสมทำได้โดยการชั่งสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้จำนวน 0.05 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมตัวทำละลายจำนวน 5 mL ลงในหลอดทดลองแต่ละหลอด เขย่าและตั้งทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมงแล้วบันทึกลักษณะการละลายของสารช่วยผสมในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

โดยตัวทำละลายที่เลือกใช้ประกอบด้วย โทลูอิน, ไซลีน, เทตระไฮโดรฟูราน, ไดคลอโรมีเทน, เอ็น,เอ็น - ไดเมทิลฟอร์มามิด, ไดเมทิลซัลฟอกไซด์, อะซิโตไนไตรล์, อะซิโตน, เมทานอล และเอทานอล

#### 3.4.2 น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมโดยใช้เทคนิค GPC

ใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

- |                      |          |
|----------------------|----------|
| - ตัวทำละลายที่ใช้   | THF      |
| - อัตราการไหล        | 1 mL/min |
| - อุณหภูมิในการทดสอบ | 30°C     |

โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของพอลิสไตรีนเพื่อหาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ( $PDI = M_w/M_n$ )

### 3.5 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA

#### 3.5.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมสูตรพอลิเมอร์ผสมใช้อัตราส่วน PS/EVA เป็น 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งการเตรียมได้ดังนี้

##### 3.5.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมต่างๆ

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมต่างๆ ทำได้โดยผสมสารช่วยผสมกับพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ในปริมาณ 2.5 wt% โดยสารช่วยผสมที่ใช้ในการผสมคือ S70M30A0, S70M29A1, S70M27A3, S70M25A5 และ S70M20A10

ซึ่งสภาวะในการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดเป็นดังนี้

- |                           |        |
|---------------------------|--------|
| - เวลาในการอุ่นพอลิสไตรีน | 2 นาที |
|---------------------------|--------|

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการเผยแพร่ข้อมูลใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- |                          |         |
|--------------------------|---------|
| - เวลาที่ใช้ในการผสม     | 10 นาที |
| - ความเร็วโรเตอร์        | 80 rpm  |
| - อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม | 180°C   |

จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการกดอัดในหัวข้อที่ 3.5.2 แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและสถานะวิทยา ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.6 เพื่อหาชนิดสารช่วยผสมที่เหมาะสม

### 3.5.1.2 การศึกษาปริมาณของสารช่วยผสมใน PS/EVA

การหาปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมกับพอลิเมอร์ผสมทำได้โดยการนำสารช่วยผสมชนิดที่มีความเหมาะสมจากการทดลองหัวข้อ 3.5.1.1 มาผสมกับ PS/EVA ตามวิธีการที่แสดงในหัวข้อดังกล่าว โดยสูตรของพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรของพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ

สูตรที่	ปริมาณสารช่วยผสม (wt%)	ปริมาณสารช่วยผสม (g)	ปริมาณพอลิเมอร์ (g)		
			PS	EVA	รวม
1	0	0	32	8	40
2	2.5	1	31.2	7.8	39
3	5	2	30.4	7.6	38

### 3.5.2 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตรทำได้โดยการใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) โดยกำหนดสภาวะในการขึ้นรูปดังนี้

- ความดันในการกดอัด 130 bar
- อุณหภูมิในการกดอัดร้อน 190°C
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 5 นาที
- เวลาในการอุ่นพอลิเมอร์ผสม 5 นาที
- เวลาในการกดอัดร้อน 6 นาที
- อุณหภูมิในการกดอัดเย็น 12°C
- เวลาในการกดอัดเย็น 6 นาที

## 3.6 การทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

### 3.6.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DMTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกและความร้อน (DMTA) โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 50 x 6 x 2 mm<sup>3</sup> ใช้โหมคดียึด

(Tension mode) ในการทดสอบ โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -100 – 150°C ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5°C ต่อนาที และใช้ความถี่ 1 Hz

### 3.6.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM

การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้านตัดขวางทำได้โดยการตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 1 x 3 cm<sup>2</sup> แล้วนำมาแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่เย็น (Cryogenic crack) จากนั้นนำไปเคลือบทองคำ แล้วศึกษารูปร่างของวัฏภาคกระจายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

### 3.6.3 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

ทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มตัวอย่าง ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด 10 x 80 mm<sup>2</sup> และใช้สภาวะการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 100 N
- ความเร็วในการดึง (Test speed) 5 mm/min
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) 30 mm

ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ร้อยละการยืด ณ จุดขาด, ความเค้น ณ จุดคราก และมอดุลัสของยัง สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = \frac{F_{\text{at break}}}{A} \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)} = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield)} = \frac{F_{\text{at yield}}}{A} \quad (3.4)$$

$$\text{มอดุลัสของยัง (Young's modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $F$  = แรงดึงชิ้นงาน ณ จุดนั้น

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm<sup>2</sup>)

$I$  = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด

$I_0$  = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : มอดุลัสของยัง หาในช่วงร้อยละการยืด 0.5 - 1

### 3.6.4 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

ทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกของตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact tester) ด้วยวิธีของไอซอด (Izod impact testing) โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยแม่แบบให้มีขนาด  $13.5 \times 62 \times 2 \text{ mm}^3$  แล้วจึงนำไปทดสอบ โดยความทนทานต่อแรงกระแทกที่ได้จากการทดสอบนั้นอยู่ในหน่วย  $\text{J/m}^2$  ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$\text{Impact strength} = \text{Impact energy} / \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างไม่รวมรอยบาก} \quad (3.6)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การสังเคราะห์สารช่วยผสมจาก P(S-*ran*-MMA-*ran*-MAA) ทำได้โดยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution polymerization) จากนั้นจึงนำสารช่วยผสมที่เตรียมได้มาตรวจสอบสมบัติต่างๆ แล้วผสมกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วน 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาการปรับเปลี่ยนชนิดของสารช่วยผสมและปริมาณของสารช่วยผสม

โดยการรายงานผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลการสังเคราะห์สารช่วยผสม ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ได้ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น เพื่อให้ได้สารช่วยผสมที่มีปริมาณของ MMA และ MAA ต่างกัน แล้วศึกษาสมบัติการละลาย ค่าบ่งชี้การละลายของสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้ สมบัติทางความร้อน รวมถึงน้ำหนักโมเลกุล และส่วนที่สองเป็นผลการผสมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสม และชนิดของสารช่วยผสม แล้วศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

#### 4.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสม

การสังเคราะห์สารช่วยผสม P(S-*ran*-MMA-*ran*-MAA) ทำได้โดยการเตรียมสไตรีน เมทิลเมทาคริเลต และกรดเมทาคริลิกในอัตราส่วนแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยมี BPO เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งร้อยละผลผลิตที่ได้จากการสังเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ของสารช่วยผสมจาก P(S-*ran*-MMA-*ran*-MAA)

โคพอลิเมอร์	ร้อยละผลผลิตที่ได้
S70M30A0	30
S70M29A1	26
S70M27A3	22
S70M25A5	28
S70M20A10	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 สรุปได้ว่าการสังเคราะห์สารช่วยผสม P(S-ran-MMA-ran-MAA) ได้ร้อยละผลผลิตที่ได้อยู่ในช่วง 22-30 โดยประมาณ

#### 4.1.1 การทดสอบการละลายของสารช่วยผสม

การทดสอบการละลายของสารช่วยผสมทำได้โดยการชั่งสารช่วยผสมใส่หลอดทดลอง จากนั้นเติมตัวทำละลายให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 %w/v แล้วเขย่า จากนั้นปิดฉีกด้วยฟิล์มยืด ตั้ทิ้งไว้แล้วสังเกตการละลาย โดยผลการละลายของสารช่วยผสมในตัวทำละลายแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การละลายของสารช่วยผสมในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	โคพอลิเมอร์				
	S70M30A0	S70M29A1	S70M23A3	S70M25A5	S70M20A10
Toluene	S	S	S	S	I
Xylene	S	S	S	S	I
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	S	S	S	S	I
THF	S	S	S	S	S
DMF	I	S	S	S	S
Acetone	I	I	I	I	S
DMSO	I	I	I	I	I
CH <sub>3</sub> CN	I	I	I	I	I
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	I	I	I	I	I
CH <sub>3</sub> OH	I	I	I	I	I

หมายเหตุ S คือ ละลายในตัวทำละลาย (Soluble) และ I คือ ไม่ละลายในตัวทำละลาย (Insoluble)

จากนั้นนำข้อมูลการละลายที่ได้มาหาค่าบ่งชี้การละลาย (Solubility parameter) ด้วยโปรแกรม HSPiP<sup>©</sup> โดยผลการหาค่าบ่งชี้การละลายแสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าบ่งชี้การละลายของสารช่วยผสม

โคพอลิเมอร์	ค่าบ่งชี้การละลายของ Hansen (MPa) <sup>1/2</sup>			
	$\delta_D$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_T$
S70M30A0	17.51	4.08	4.86	18.63
S70M29A1	19.49	7.24	7.51	22.11
S70M27A3	19.45	6.97	7.85	22.10
S70M25A5	19.49	7.23	7.49	22.10
S70M25A10	16.30	9.11	11.77	22.07

ทั้งนี้ ผลที่ได้จากทดสอบค่าบ่งชี้การละลายจากโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณ MAA เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้  $\delta_P$  และ  $\delta_H$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้มีขั้วมากขึ้น

เพื่อทำนายสารช่วยผสมที่เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA มากที่สุด จึงนำเม็ด PS และ EVA มาทดสอบการละลายโดยเติมตัวทำละลายให้มีความเข้มข้น 1 % w/v แล้วตั้งทิ้งไว้ข้ามคืน โดยได้ผลการละลายดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การละลายของ PS และ EVA ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	พอลิเมอร์	
	PS	EVA
Hexane	I	I
Toluene	S	I
Xylene	S	I
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	S	S
CHCl <sub>3</sub>	S	S
THF	S	I
DMF	S	I
Acetone	S	I
DMSO	I	I
CH <sub>3</sub> CN	I	I
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	I	I
CH <sub>3</sub> OH	I	I

หมายเหตุ S คือ ละลายในตัวทำละลาย (Soluble) และ I คือ ไม่ละลายในตัวทำละลาย (Insoluble)

จากนั้นนำข้อมูลการละลายที่ได้มาหาค่าบ่งชี้การละลาย (Solubility parameter) ด้วยโปรแกรม HSPiP<sup>©</sup> โดยผลการหาค่าบ่งชี้การละลายแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าบ่งชี้การละลายของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์	ค่าบ่งชี้การละลายของ Hansen				รัศมี
	$\delta_D$	$\delta_P$	$\delta_H$	$\delta_T$	
PS	17.55	7.41	6.74	20.21	7.8
EVA	17.53	5.40	6.08	19.32	2.4

ทั้งนี้ ผลที่ได้จากทดสอบค่าบ่งชี้การละลายจากโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ก (รูปที่ ก-6 และรูปที่ ก-7) โดยเมื่อทำนายหาสารช่วยผสมที่เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA มากที่สุด จากโปรแกรมพบว่าได้ค่า RED ดังตารางที่ 4.6 และได้แสดงผลการทดสอบไว้ในภาคผนวก ก (รูปที่ ก-8)

ตารางที่ 4.6 ค่า RED ของสารช่วยผสม

RED	โคพอลิเมอร์				
	S70M30A0	S70M29A1	S70M27A3	S70M25A5	S70M20A10
RED	0.98	1.13	1.11	1.12	1.77

จากผลการทำนายหาสารช่วยผสมที่เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA โดยพิจารณาจากค่า RED พบว่า S70M30A0 มีแนวโน้มเข้ากับพอลิเมอร์ผสมได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น S70M29A1 S70M25A5 และ S70M23A3 ส่วน S70M20A10 มีแนวโน้มเข้ากับพอลิเมอร์ผสมได้ไม่ดีนัก เพราะมีค่า RED เกินกว่า 1 มากกว่าสูตรอื่นๆ ทั้งนี้ ผลที่ได้จากโปรแกรมเป็นเพียงการทำนายเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงชนิดสารช่วยผสมที่ทำให้พอลิเมอร์ผสม PS/EVA มีสมบัติที่ดีที่สุด จึงต้องมีการทดสอบอื่นๆ ประกอบด้วย ซึ่งจะแสดงในส่วนถัดไป

#### 4.1.2 การวัดน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมโดยใช้เทคนิค GPC

การวัดน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมทำได้โดยเทคนิค GPC ซึ่งใช้ THF เป็นตัวทำละลาย โดยค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ( $PDI = M_w/M_n$ ) แสดงในตารางที่ 4.7 และโครมาโทแกรมที่ได้จากการ

เอกสารนี้เป็นทดสอบแสดงในภาคผนวก ข การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสม

โคพอลิเมอร์	$M_n$ (Daltons)	$M_w$ (Daltons)	PDI
S70M30A0	$1.17 \times 10^5$	$2.27 \times 10^5$	1.61
S70M29A1	$1.26 \times 10^5$	$2.34 \times 10^5$	1.62
S70M27A3	$1.26 \times 10^5$	$2.2 \times 10^5$	1.74
S70M25A5	$1.28 \times 10^5$	$2.3 \times 10^5$	1.53
S70M20A10	$1.36 \times 10^5$	$2.48 \times 10^5$	1.61

ผลจากการวัดน้ำหนักโมเลกุลโดยเทคนิค GPC พบว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (PDI) ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.2 การผสมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม

การผสมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ทำโดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด ใช้ความเร็ว 80 rpm โดยอุ่น PS ก่อนเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจึงใส่ EVA และสารช่วยผสมลงไปแล้วผสมเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ผสมได้มาบด แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มหนา 200  $\mu\text{m}$  ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการศึกษาดังต่อไปนี้

##### ตัวแปรที่ 1 ชนิดของสารช่วยผสม

ทำการปรับเปลี่ยนชนิดของสารช่วยผสมโดยใช้ S70M30A0, S70M29A1, S70M27A3, S70M25A5 และ S70M20A10 ผสมในปริมาณ 2.5 wt% ลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก

##### ตัวแปรที่ 2 ปริมาณของสารช่วยผสม

ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสมคือ S70M27A3 เพราะจากข้อมูลในตัวแปรที่ 1 พบว่า S70M27A3 เป็นสารช่วยผสมที่ทำให้สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมดีที่สุด โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสมเป็น 2.5 และ 5 wt% ลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสารช่วยผสมสูตร S70M27A3 มีไม่เพียงพอในการทดลองต่อ จึงได้ทำการสังเคราะห์สารช่วยผสมขึ้นมาใหม่ ในที่นี้ใช้ชื่อ S70M27A3 (B) ซึ่งมีที่มาของมอนอเมอร์ต่างกัน แต่ให้สมบัติใกล้เคียงกับสารช่วยผสมเดิม จึงใช้สารช่วยผสมชนิดนี้ทำการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวแปรที่ 3 การเพิ่มปริมาณของวัฏภาคกระจาย

ทำการเพิ่มปริมาณของวัฏภาคกระจาย (EVA) เป็น 30 wt% แล้วผสมสารช่วยผสม S70M27A3 (B) ลงไปในปริมาณ 2.5 wt% จากนั้นเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ระหว่างการใส่และไม่ใส่สารช่วยผสม

#### 4.2.1 ผลชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการปรับเปลี่ยนชนิดของสารช่วยผสมคือ S70M30A0, S70M29A1, S70M27A3, S70M25A5 และ S70M20A10 โดยผสมเป็นปริมาณ 2.5 wt% ได้ถูกนำมาศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์และสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA และศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM พบว่าสมบัติต่างๆ เป็นดังต่อไปนี้

##### 4.2.1.1 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ อยู่ปริมาณ 2.5 wt% พบว่าได้ค่า  $T_g$  ของ PS และ EVA ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8  $T_g$  ของ PS และ EVA และพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ อยู่ปริมาณ 2.5 wt%

พอลิเมอร์	$T_g$ (EVA) ( $^{\circ}$ C)	$T_g$ (PS) ( $^{\circ}$ C)
S8E2	-54	99
PS	-	93
EVA	-42	-

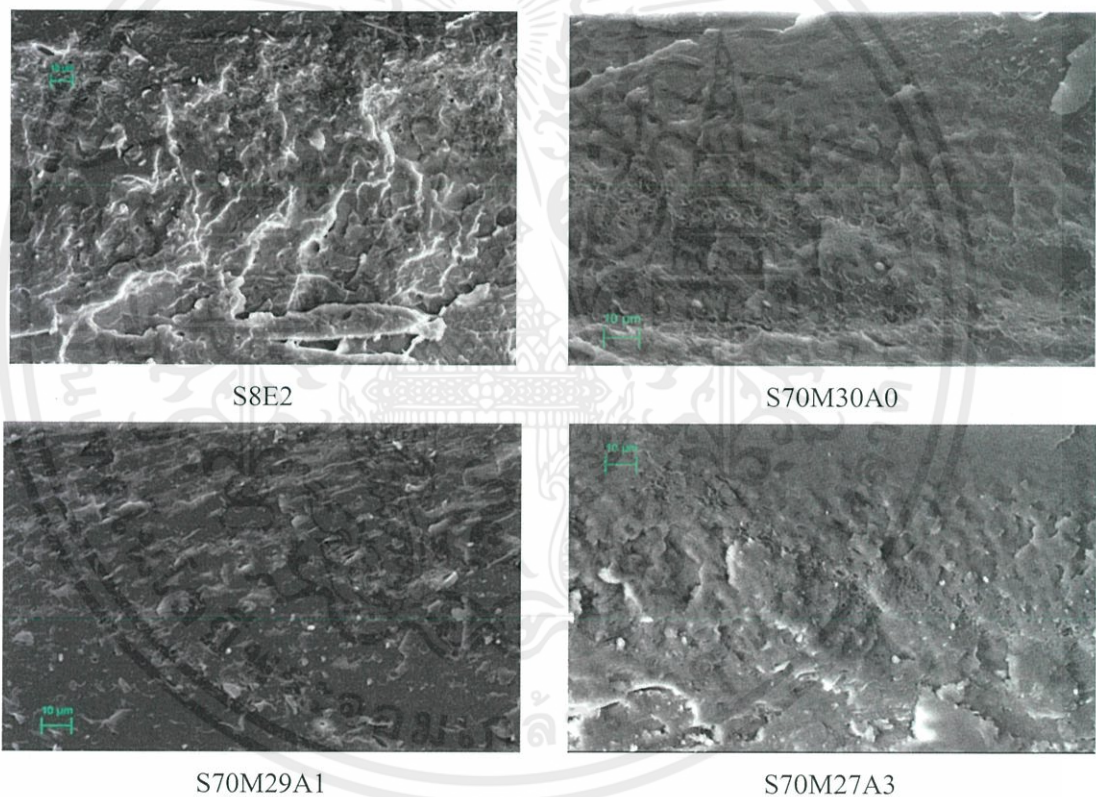
สารช่วยผสม	$T_g$ (EVA) ( $^{\circ}$ C)	$T_g$ (PS) ( $^{\circ}$ C)
S70M30A0	-51	97
S70M29A1	-55	95
S70M27A3	-53	92
S70M25A5	-51	96
S70M20A10	-51	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลในตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อใส่สารช่วยผสม พบว่า  $T_g$  ของ EVA ในพอลิเมอร์ผสมมีความแตกต่างกันอย่างไม่ชัดเจน แต่  $T_g$  ของ PS ในพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดต่ำลง กล่าวคือสารช่วยผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 พบว่าค่า  $T_g$  ของ PS ลดลงอย่างชัดเจนอยู่ที่  $92^\circ\text{C}$  ในขณะที่  $T_g$  ของ EVA ของทุกสูตรที่ใส่สารช่วยผสมอยู่ประมาณ  $-55$  ถึง  $-51^\circ\text{C}$  จึงสรุปได้ว่าสารช่วยผสม S70M27A3 ทำให้พอลิเมอร์ผสม PS/EVA มีความเข้ากันได้มากที่สุด

#### 4.2.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาด้านตัดขวางโดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3500 เท่า เพื่อดูการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย

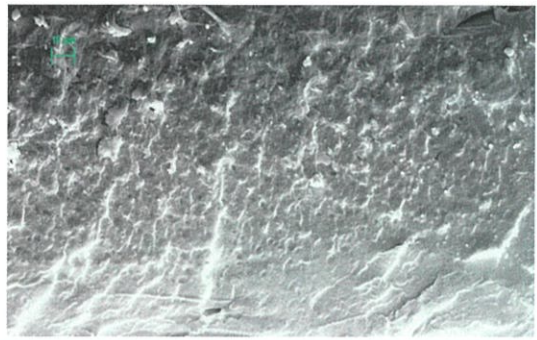


รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt% ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



S70M25A5

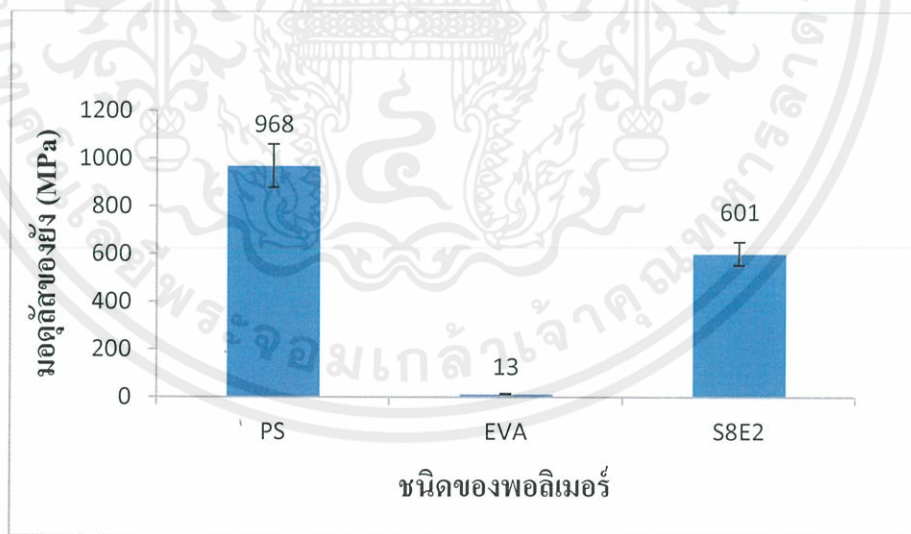


S70M20A10

รูปที่ 4.1 (ต่อ) สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt% ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

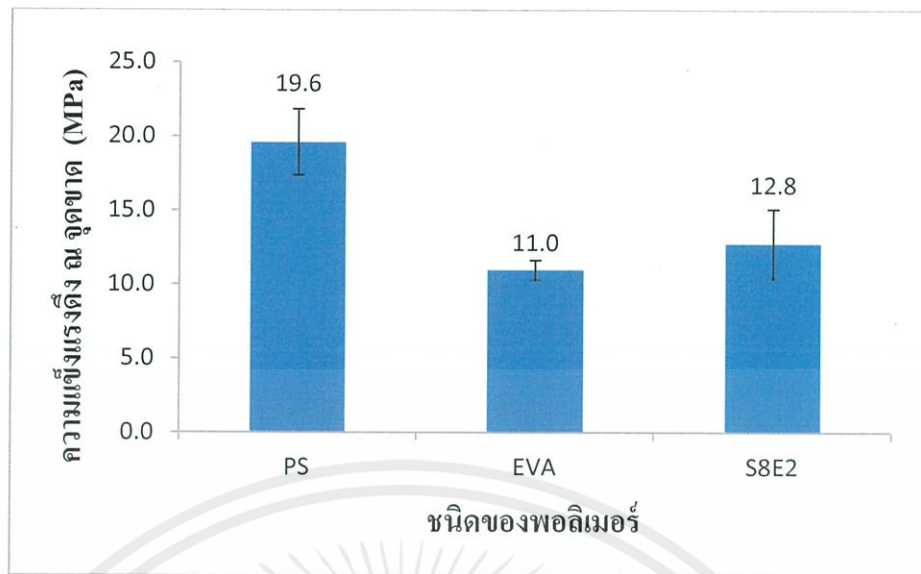
ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ อยู่ปริมาณ 2.5 wt% พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะพื้นที่ภาคตัดขวางคล้ายคลึงกัน โดยผลของสารช่วยผสมต่อสัณฐานวิทยาไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากประสิทธิภาพในการผสมยังไม่ดีพอ นอกจากนี้ยังไม่สามารถหาตัวทำลายที่สามารถสกัดวัฏภาคกระจายออกเพื่อให้เห็นความแตกต่างของวัฏภาคได้อย่างชัดเจน

4.2.1.3 สมบัติการรับแรงดึง

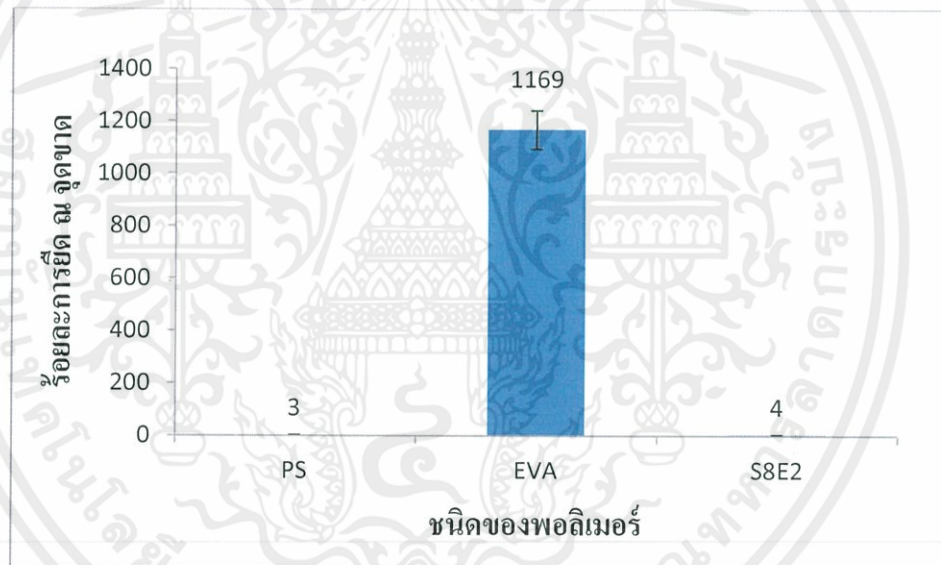


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังกับพอลิเมอร์ PS EVA และ S8E2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

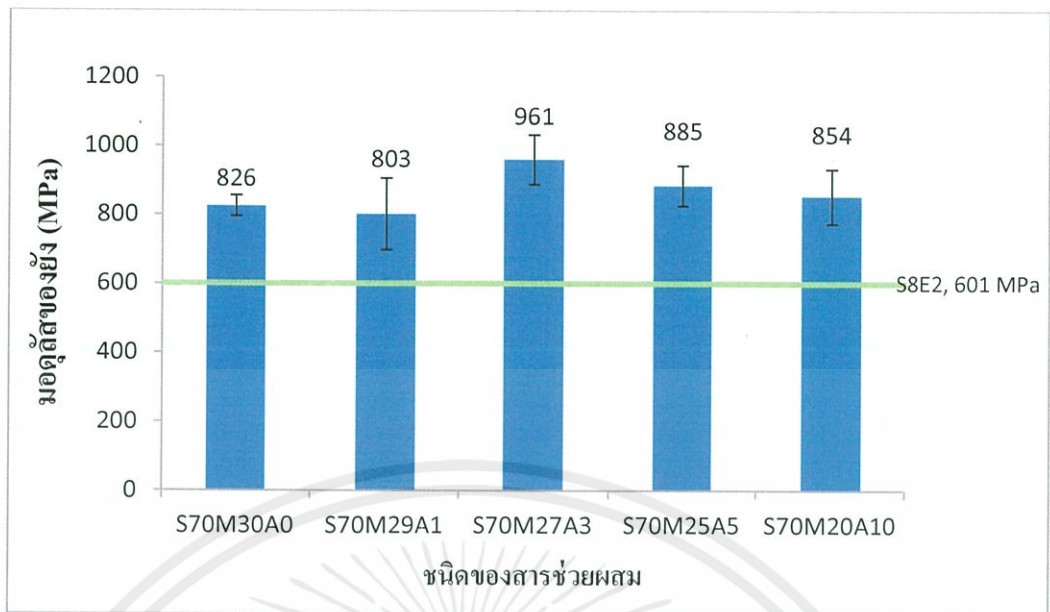


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ PS EVA และ S8E2

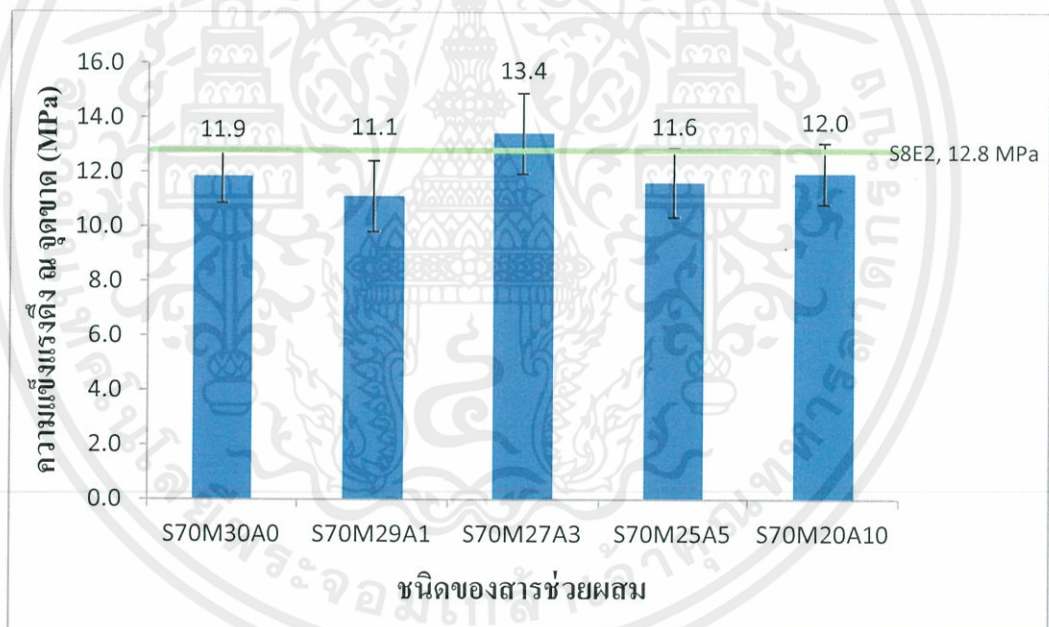


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ PS EVA และ S8E2

เนื่องจาก PS มีความแข็งแรงเปราะ จึงมีค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดสูง แต่มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำ ในขณะที่ EVA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูง แต่มีค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสม S8E2 จึงมีสมบัติอยู่ระหว่าง PS และ EVA แต่เนื่องจาก PS เป็นวัสดุภาคหลัก ทำให้ S8E2 มีค่ามอดูลัสของยังใกล้เคียงกับ PS แต่จากการที่มีวัสดุกระจายเป็น EVA ทำให้ค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมน้อยกว่า PS แต่สำหรับค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมนั้นยังมีค่าใกล้เคียงกับ PS

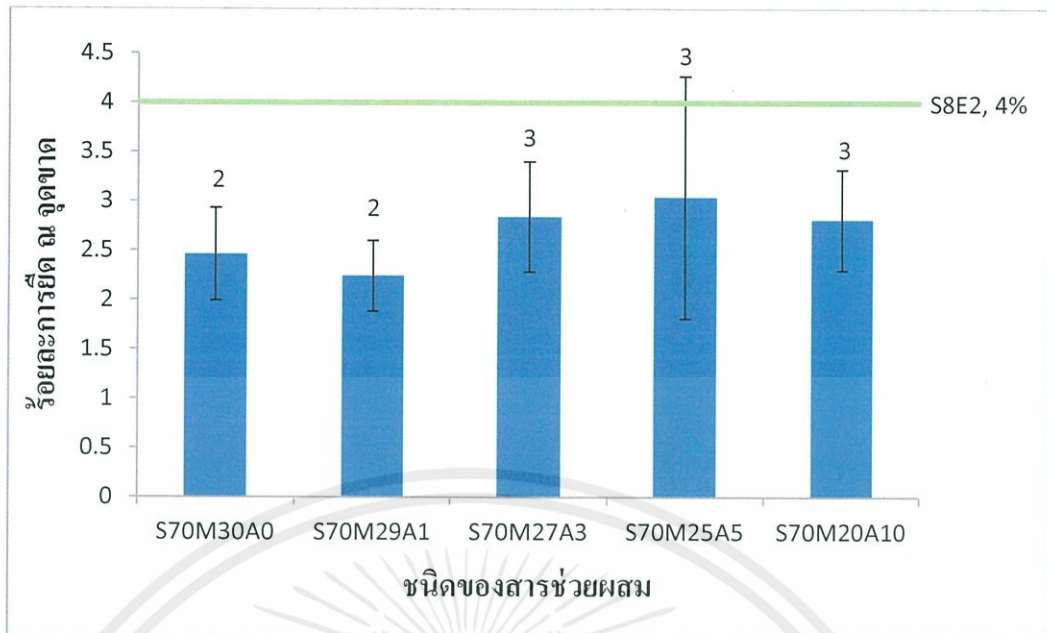


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



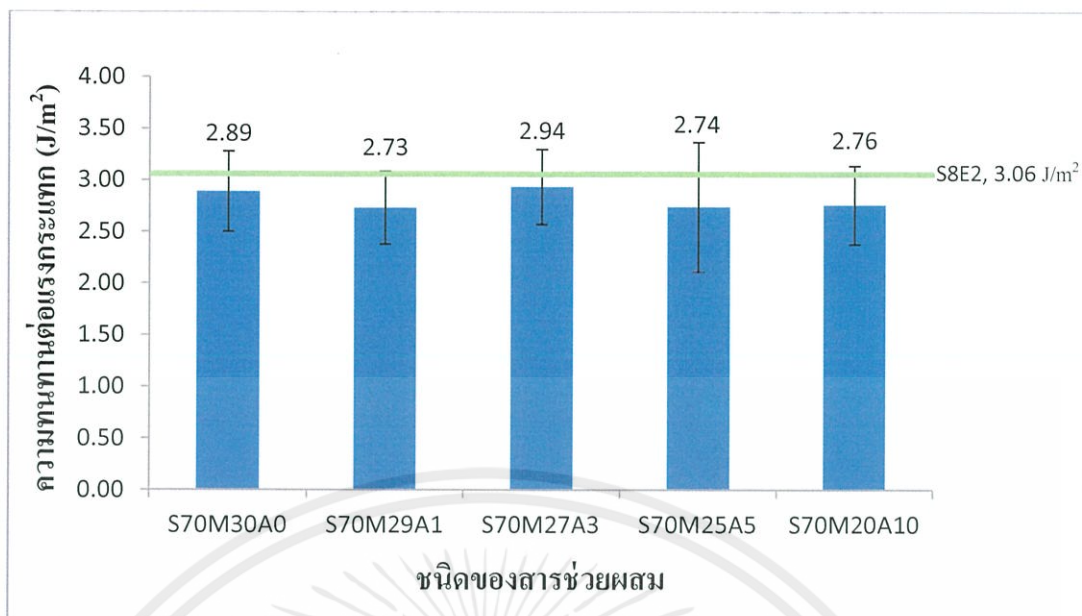
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%

ผลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง พบว่าเมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสของยัง พลาสติกที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 ให้ค่ามอดูลัสของยังสูงสุดที่ 961 MPa ซึ่งสูงกว่าการใช้สารช่วยผสมชนิดอื่นๆ และสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม S8E2 ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ให้ผลเช่นเดียวกับค่ามอดูลัสของยัง คือพลาสติกที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 ให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดสูงสุดที่ 13.4 MPa ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการใส่สารช่วยผสมในสูตรต่างๆ ทำให้สมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น และชนิดของสารช่วยผสมมีผลต่อสมบัติการรับแรงดึงเช่นเดียวกัน โดยในกรณีนี้สาเหตุที่ S70M27A3 ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมที่ดีที่สุด เพราะเมื่อพิจารณาค่า RED ดังที่ได้ทำนายเอาไว้ในตอนที่ 4.1.1 ค่า RED ไม่ต่างจากพอลิเมอร์ผสมมากนัก และการที่มี MAA อยู่ในโครงสร้าง สันนิษฐานว่ามีผลทำให้มีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ MAA และ EVA เป็นผลทำให้สมบัติการรับแรงดึงดีขึ้น

#### 4.2.1.4 ความทนทานต่อแรงกระแทก

การวัดความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม ทำได้โดยการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมด้วยการขึ้นรูปแบบกดอัด โดยใช้แม่แบบที่มีรอยบาก ซึ่งมีความหนา 2 มิลลิเมตร เมื่อขึ้นรูปเสร็จจึงนำไปทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกด้วยวิธีการ Izod โดยใช้เครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt%

ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม มีความทนทานต่อแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกับ S8E2 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.73-3.06 J/m<sup>2</sup> ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก สันนิษฐานว่าปริมาณสารช่วยผสมที่เติมอาจไม่เพียงพอ หรืออาจเป็นไปได้ว่าน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้ยังไม่สูงพอที่ทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่างโมเลกุลได้ดี

#### 4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของสารช่วยผสม

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของสารช่วยผสมเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารช่วยผสมพบว่า พอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 ในปริมาณ 2.5 wt% มีค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่นๆ จึงได้ทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสมจาก 2.5 wt% เป็น 5 wt% ลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก

##### 4.2.2.1 สมบัติทางความร้อน

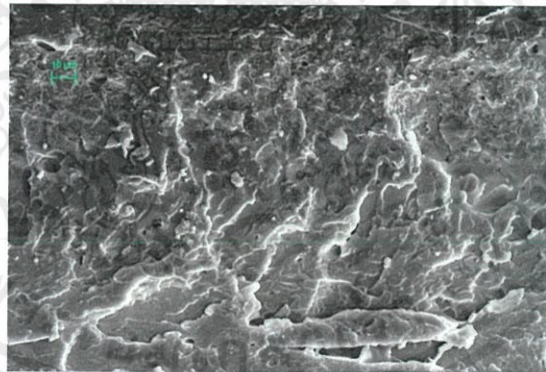
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มี S70M27M3 (B) อยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันได้ค่า  $T_g$  ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9  $T_g$  ของ PS และ EVA ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณแตกต่างกัน

สารช่วยผสม	$T_g$ (EVA) ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_g$ (PS) ( $^{\circ}\text{C}$ )
S8E2 (Blank)	-54	99
2.5 wt%	-51	96
5 wt%	-51	98

จากผลในตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อใส่สารช่วยผสม ค่า  $T_g$  ของ PS และ EVA ของพอลิเมอร์ผสมมีการลดลงเล็กน้อย โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่ S70M27A3 (B) ลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ปริมาณ 2.5 wt% และ 5 wt% พบว่าการใส่ S70M27A3 (B) ลงไป 2.5 wt% ทำให้ค่า  $T_g$  ของ PS ลดลงมาอยู่ที่  $96^{\circ}\text{C}$  ส่วน  $T_g$  ของ EVA ทั้งในสูตรที่ใส่สารช่วยผสม 2.5 wt% และ 5 wt% พบว่าค่า  $T_g$  เท่ากันอยู่ที่  $-51^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใส่ S70M27A3 (B) ลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ปริมาณ 2.5 wt% นั้นเพียงพอในการทำให้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น

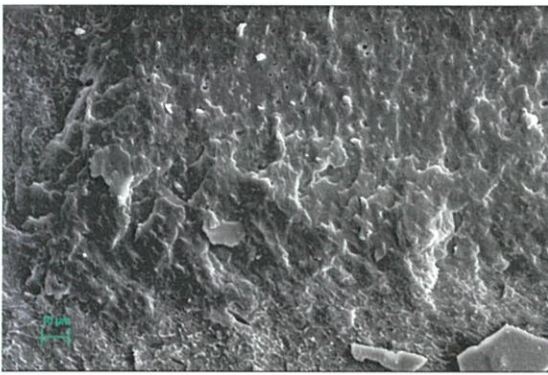
#### 4.2.2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา



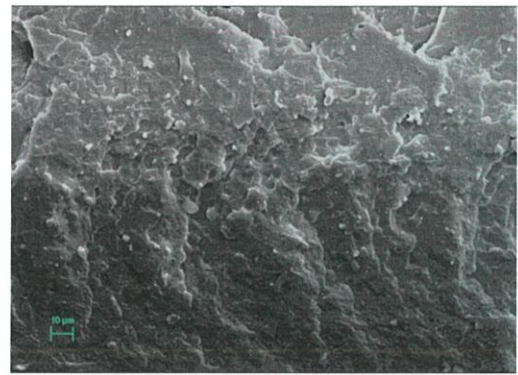
S8E2

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณแตกต่างกันที่กล้องขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



S70M27A3 (B) 2.5 wt%

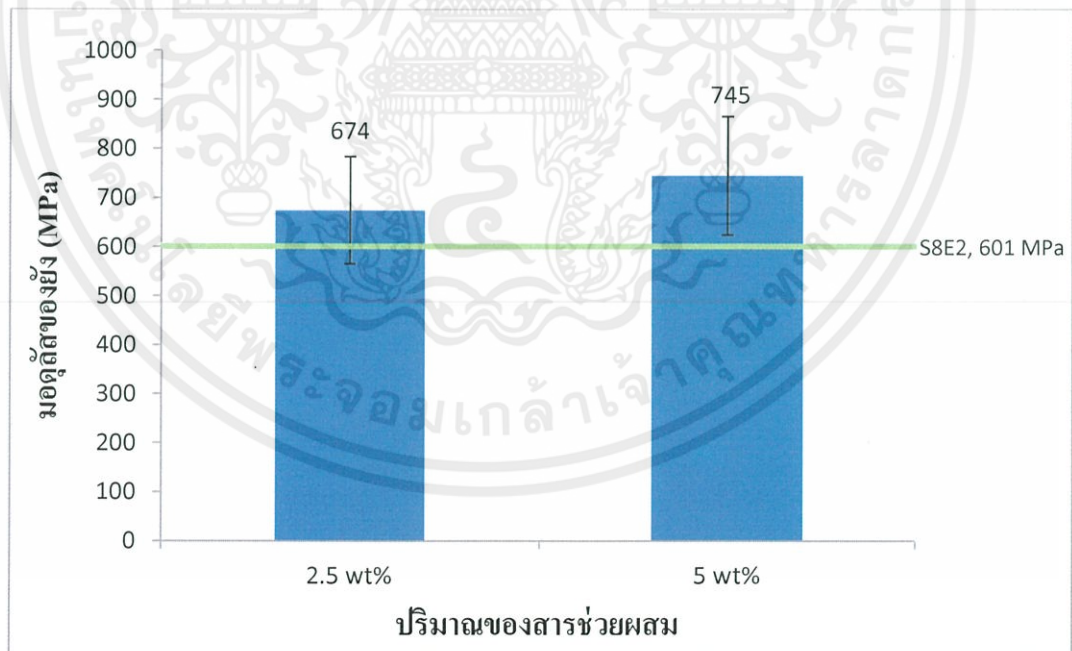


S70M27A3 (B) 5 wt%

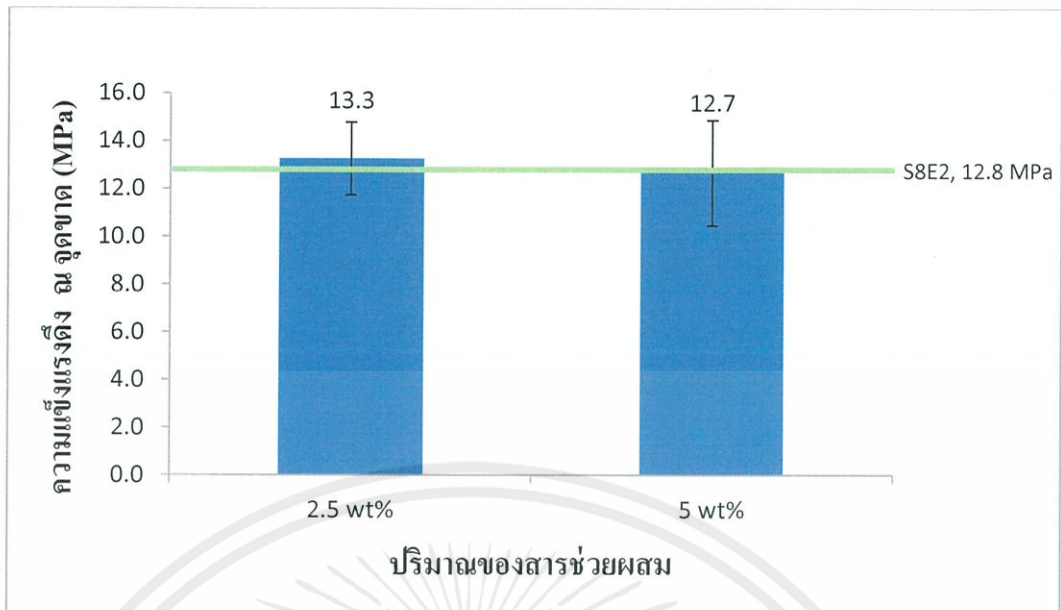
รูปที่ 4.9 (ต่อ) สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณแตกต่างกันที่กำลังขยาย 3500 เท่า

ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีสารช่วยผสมปริมาณแตกต่างกัน พบว่าพื้นที่ภาคตัดขวางของฟิล์มที่มีสารช่วยผสมปริมาณ 2.5 และ 5 wt% มีลักษณะคล้ายกันและไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ S8E2 ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากการผสมที่ไม่ดี ดังอธิบายในหัวข้อ 4.2.1.2

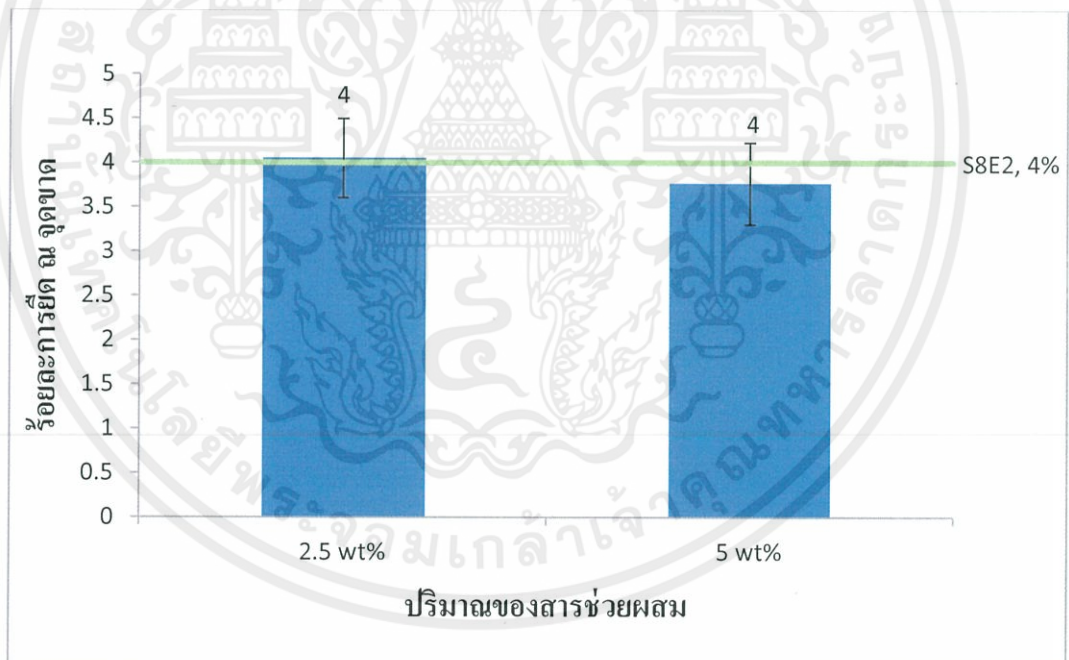
#### 4.2.2.3 สมบัติการรับแรงดึง



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณ 2.5 wt% และ 5 wt% ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณ 2.5 wt% และ 5 wt%

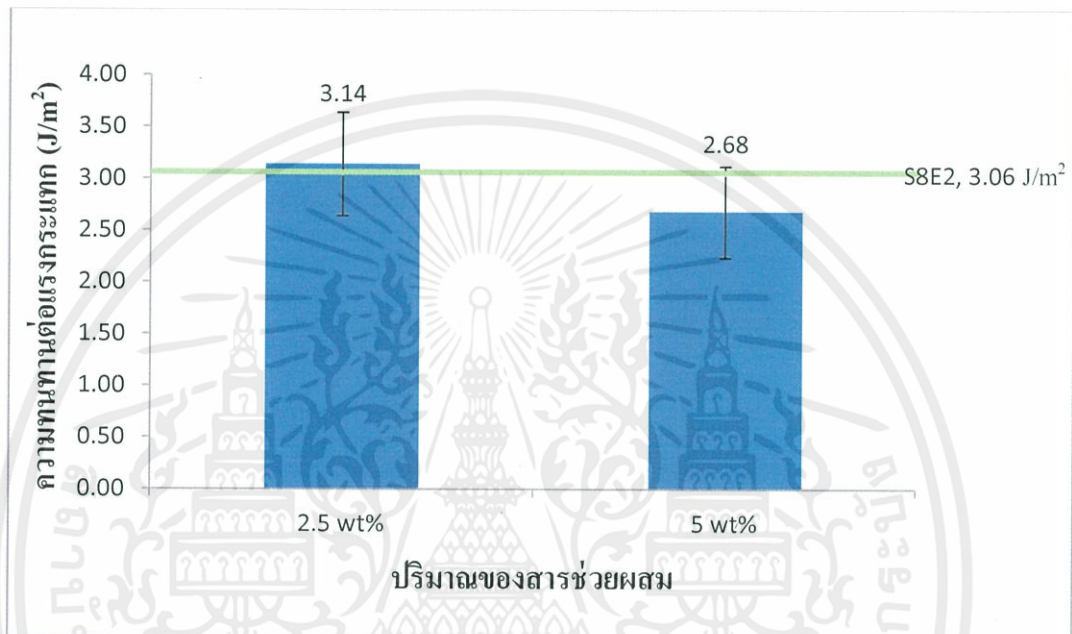


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณ 2.5 wt% และ 5 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง พบว่าฟิล์มที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 5 wt% มีค่ามอดูลัสของยัง ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกับฟิล์มที่มีสารช่วยผสมปริมาณ 2.5 wt% สันนิษฐานได้ว่า น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมมีค่าน้อย จึงทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่างสองวัฏภาคที่ไม่ดี ทำให้สมบัติการรับแรงดึงไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสม

#### 4.2.2.4 ความทนทานต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทก กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M27A3 (B) อยู่ในปริมาณแตกต่างกัน

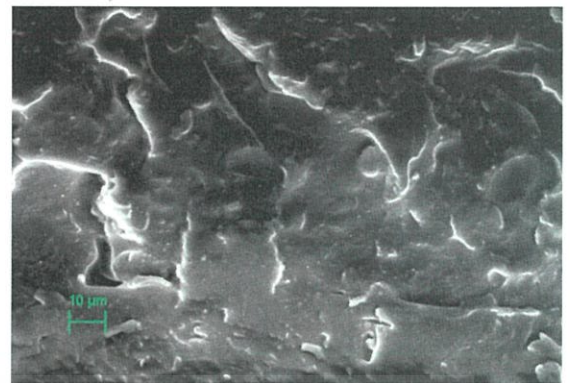
ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม ปริมาณ 2.5 wt% มีค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม 5 wt% เล็กน้อย โดยให้ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ 3.14 J/m<sup>2</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปริมาณสารช่วยผสมไม่ส่งผลต่อค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของ S8E2 อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้มีค่าน้อย ดังที่อธิบายมาข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





S7E3

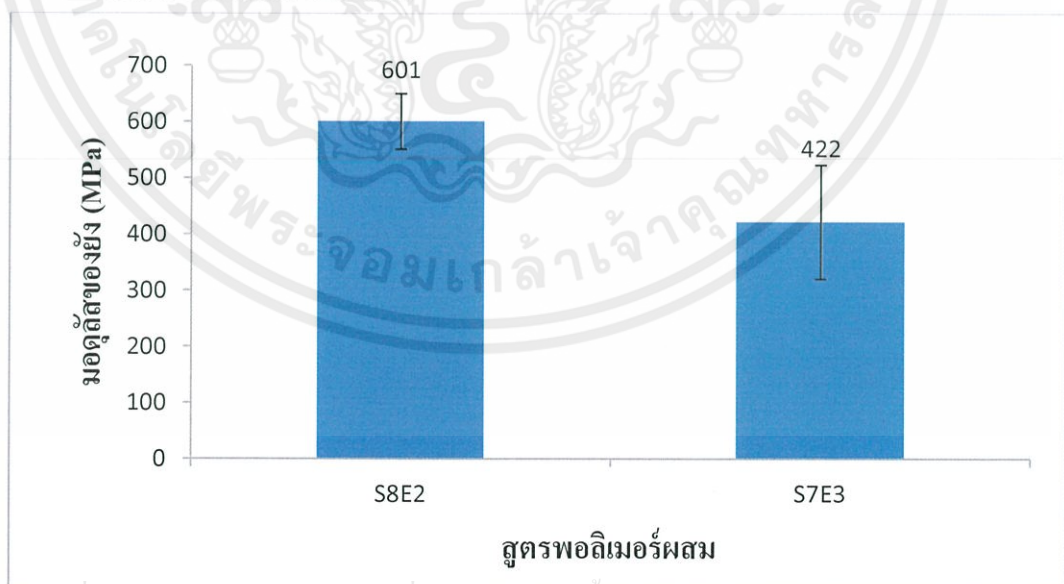


S70M27A3 (B) 2.5 wt%

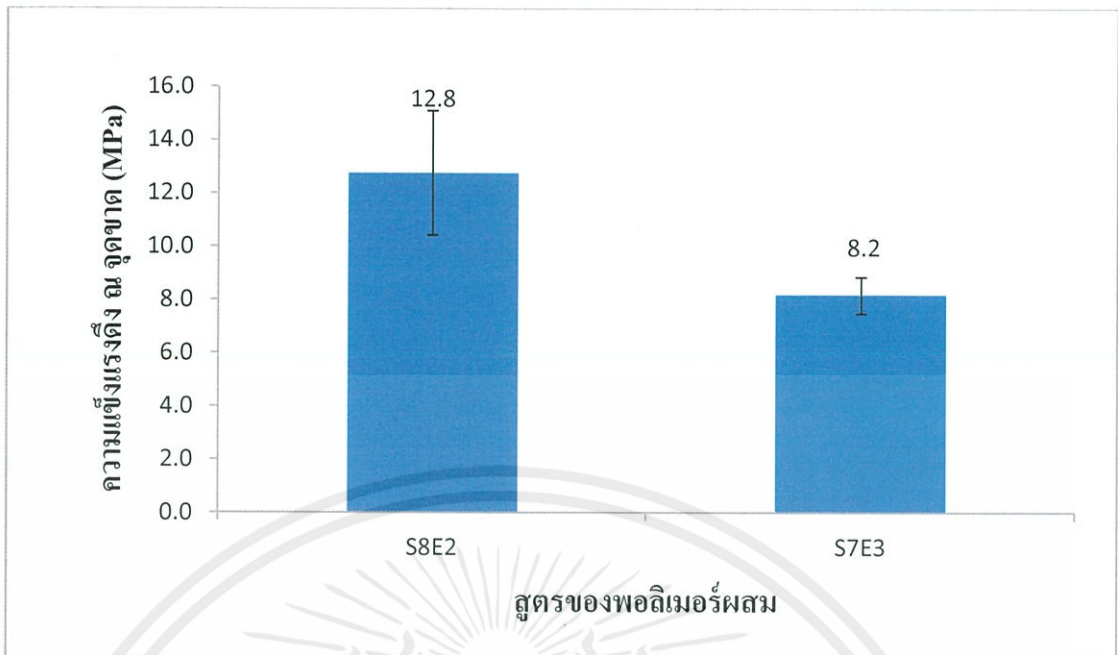
รูปที่ 4.14 (ต่อ) สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน และใส่สารช่วยผสม ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่มีอัตราส่วนของวัฏภาคกระจายแตกต่างกัน ในทางทฤษฎี การมีอัตราส่วนของวัฏภาคกระจายที่มากขึ้น (S7E3) ทำให้ขนาดของวัฏภาคกระจายมีแนวโน้มใหญ่กว่าที่มีอัตราส่วนที่น้อยกว่า (S8E2) แต่จากผลการทดสอบนั้นเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากอาจมีการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ โดยผลการทดสอบสัณฐานวิทยาเมื่อใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt% ลงในพอลิเมอร์ผสม S7E3 พบว่าไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ระหว่างสูตรที่ใส่สารช่วยผสมและไม่ใส่สารช่วยผสม อาจเนื่องมาจากการผสมที่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ

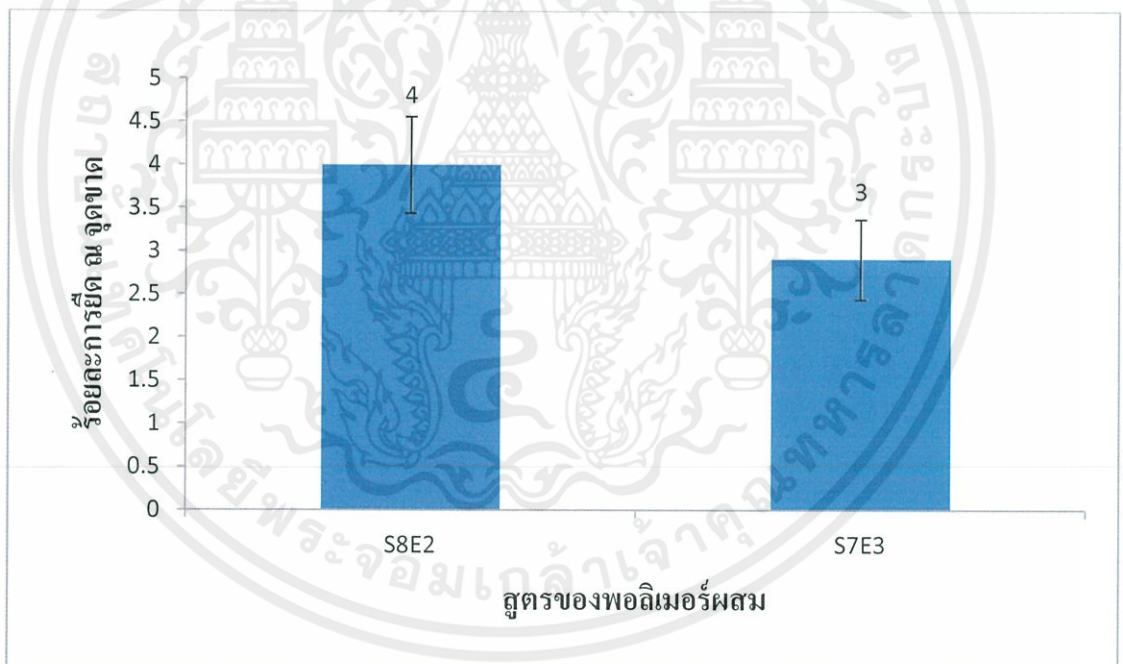
#### 4.2.3.3 สมบัติการรับแรงดึง



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัฏภาคกระจาย



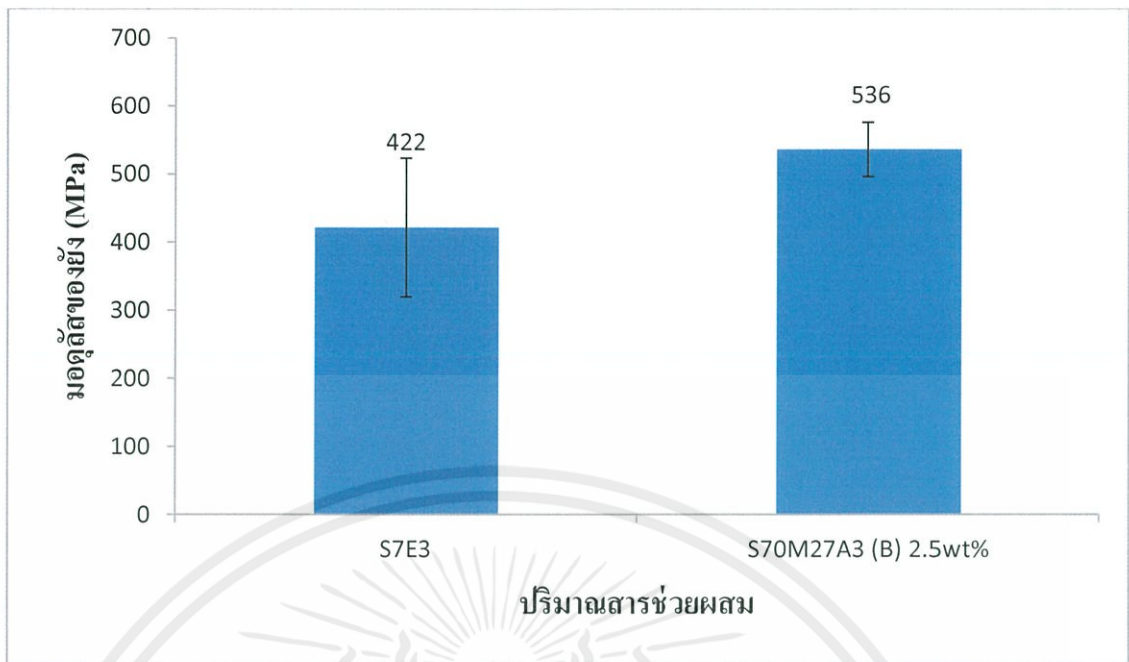
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด กับชนิดของพอลิเมอร์ผสม ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัฏภาคกระจาย



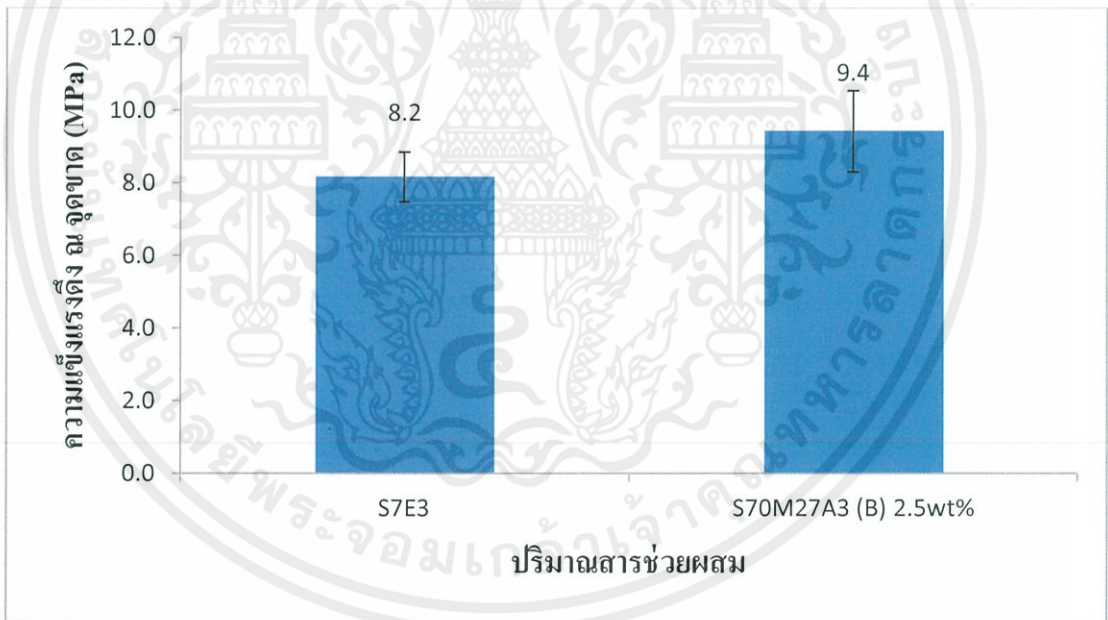
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาด กับชนิดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัฏภาคกระจาย

ผลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง พบว่าเมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสของยัง

และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด พอลิเมอร์ผสม S8E2 มีค่าสูงกว่า S7E3 เนื่องจาก S8E2 มีปริมาณวัฏภาคหลักที่เป็น PS มากกว่า จึงสามารถรับแรงดึงได้มากกว่า S7E3 อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะมี PS เป็นวัฏภาคหลัก ซึ่งมีค่าร้อยละการยืดที่ต่ำ

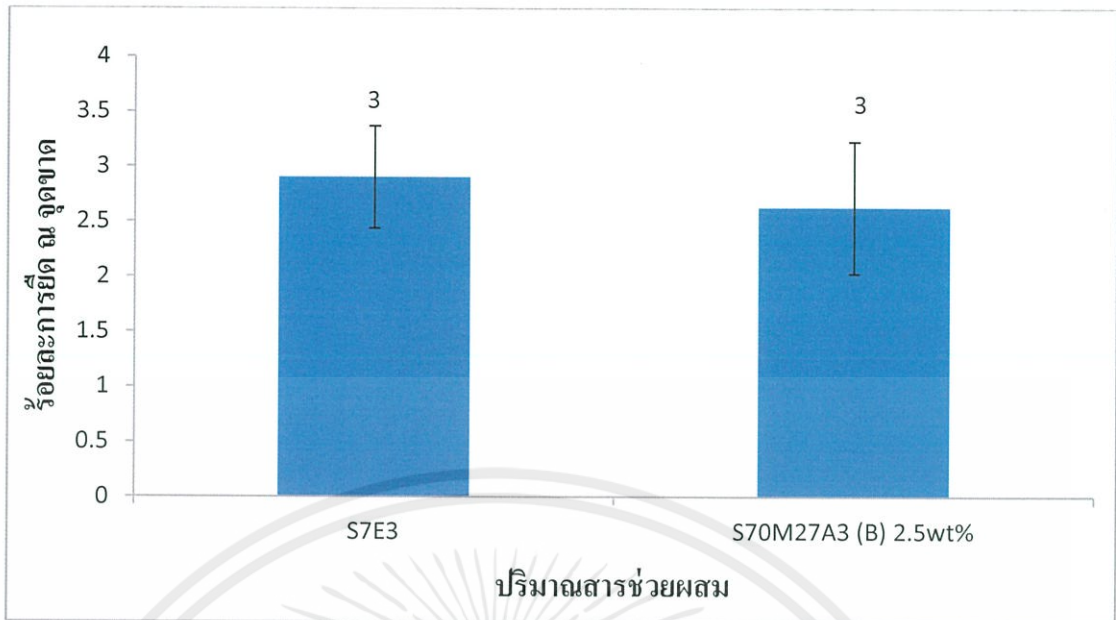


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%

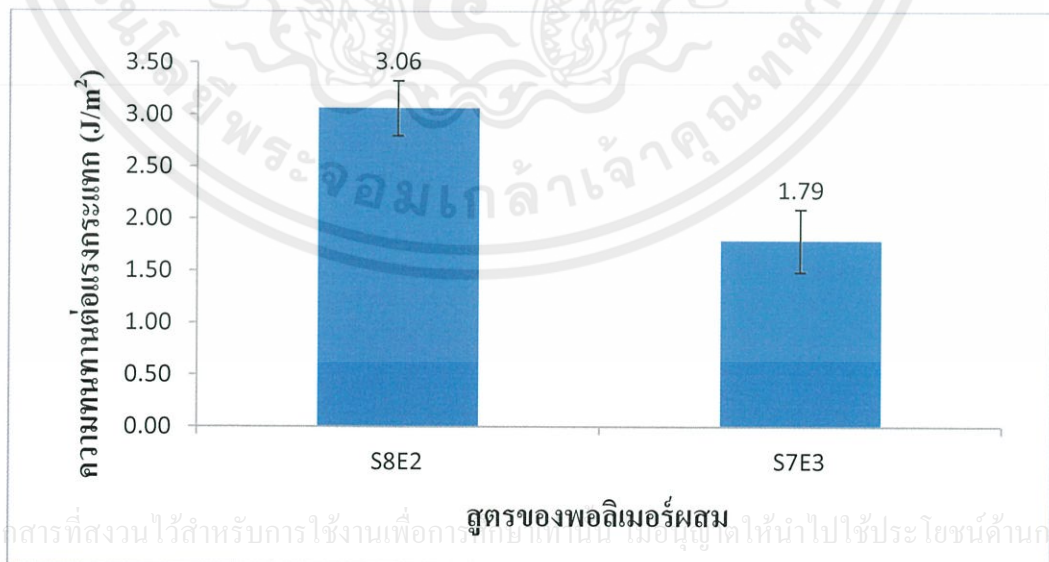
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยืด ณ จุดขาดกับชนิดของพอลิเมอร์ผสม สูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%

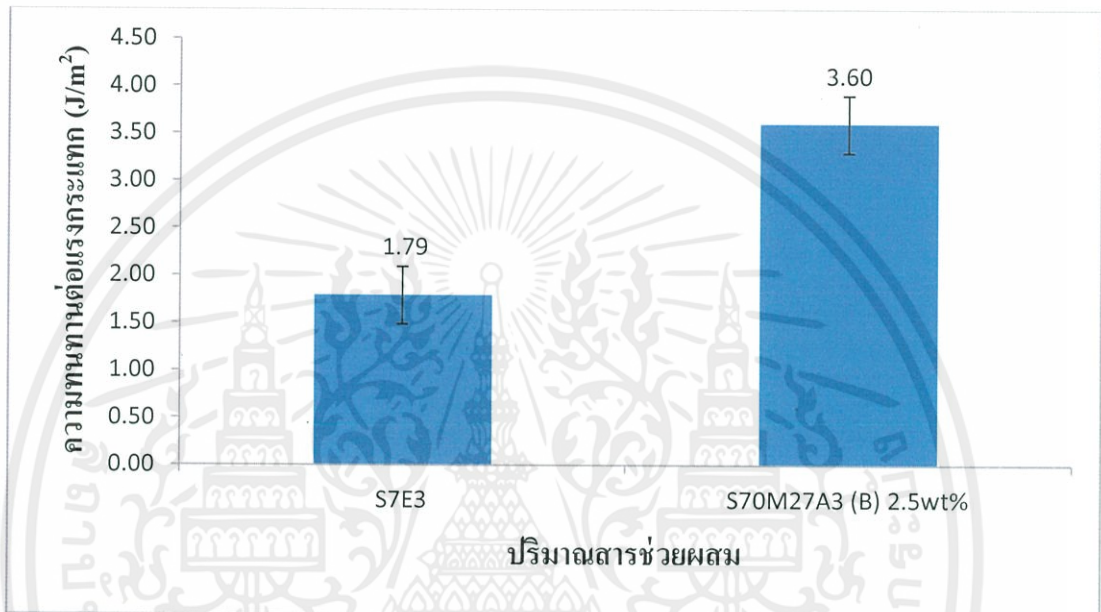
ผลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงเมื่อใส่สารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 ปริมาณ 2.5 wt% พบว่ามีสมบัติต่างๆ คือ ค่าโมดูลัสของยังและความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ผสม S7E3 ที่ไม่ใส่สารช่วยผสมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารช่วยผสมนั้นเข้าไปเกี่ยวพันระหว่างสองวัสดุ ทำให้ความแข็งแรงระหว่างรอยต่อวัสดุมากขึ้น จึงเป็นผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวไม่สามารถสังเกตได้จากสัณฐานวิทยา

#### 4.2.3.4 ความทนทานต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทก กับชนิดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของวัสดุกระจาย

ผลจากการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกพบว่า S7E3 มีค่าความทนทานต่อแรงกระแทกที่ต่ำกว่า S8E2 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่เมื่อปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้นค่าความทนทานต่อแรงกระแทกควรเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดลองนี้จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าเนื่องจากการผสมยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ ทำให้วัฏภาคกระจายกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทำให้บางบริเวณของชิ้นงานอาจไม่มีวัฏภาคกระจายอยู่เลย บริเวณนั้นจึงรับแรงได้น้อยกว่าบริเวณอื่น



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระแทกกับชนิดของพอลิเมอร์ผสมสูตร S7E3 และพอลิเมอร์ผสมที่ใส่สารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt%

ผลจากการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกพบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt% ลงในพอลิเมอร์ผสม S7E3 ทำให้สมบัติการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้นมาก แสดงว่าสารช่วยผสมอาจเข้าไปทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

การสังเคราะห์สารช่วยผสมจาก P(S-*ran*-MMA-*ran*-MAA) ทำได้โดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของมอนอเมอร์เป็น 70/30/0, 70/29/1, 70/27/3, 70/25/5 และ 70/30/10 ได้ร้อยละผลผลิตที่ได้อยู่ในช่วง 22-30 โดยประมาณ จากนั้นนำโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบสมบัติการละลายและหาค่าบ่งชี้การละลายโดยใช้โปรแกรม HSPiP<sup>©</sup> เมื่อพิจารณาค่า RED เทียบกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA พบว่าโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่า RED ใกล้เคียงกัน ยกเว้น S70M20A10 ที่มีค่า RED มากกว่าโคพอลิเมอร์ตัวอื่นมาก เนื่องจากความมีขั้วจาก MAA จากการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค GPC พบว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (PDI) ไม่ต่างกันมากนัก

การศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ทำโดยการนำโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิด แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติต่างๆ

ผลการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก ที่มีการใส่สารช่วยผสมชนิดต่างๆ ปริมาณ 2.5 wt% พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่สารช่วยผสม S70M27A3 ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับสารช่วยผสมตัวอื่นๆ โดยทำให้สมบัติการรับแรงดึงและความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ MAA และ EVA นอกจากนี้ยังทำให้  $T_g$  ของ PS ในพอลิเมอร์ผสมลดลงอีกด้วย

การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสมทำโดยการผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 และ 5 wt% ลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA 80/20 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าการใส่สารช่วยผสมปริมาณ 2.5 และ 5 wt% ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้ไม่สูงมาก

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม S70M27A3 (B) ปริมาณ 2.5 wt% ลงในพอลิเมอร์ผสม PS/EVA 70/30 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าการใส่สารช่วยผสมทำให้ค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่ปรับเปลี่ยนรค่าปริมาณวิฤภาคกระจายเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ยกเว้นค่าความทนทานต่อแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ S7E3

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรหาสภาวะในการผสมพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ด้วยเครื่องผสมแบบปิดให้เหมาะสมกว่านี้ เช่น เพิ่มความเร็วโรเตอร์ หรือ เพิ่มเวลาผสม เป็นต้น
2. ควรมีการสังเคราะห์สารช่วยผสมจาก P(S-ran-MAA) ด้วย เพื่อเปรียบเทียบผลของการมีและไม่มี MMA อยู่ในสารช่วยผสม
3. ควรมีการสังเคราะห์สารช่วยผสม S70M27A3 ให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่านี้
4. ควรมีการศึกษาผลของความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม โดยปรับเปลี่ยนพอลิเมอร์ให้มีค่า MFI แตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. วลัยพร मुखสุวรรณ. “พลาสติกในชีวิตประจำวัน : ตอนที่ 1 โพลีสไตรีน.” [Online]. Available : <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=11>. 2556.
2. สุภารัตน์ รัชชสิทธิ์. “เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการบรรจุหีบห่อ เรื่อง **Plastic packaging I.**” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556.
3. กฤษณะ พจน์เสถียร. “สมบัติเชิงกลของพลาสติกโคพอลิเมอร์พอลิสไตรีนกับยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549.
4. บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน). “เอกสารประกอบการสอน วิชาการประยุกต์ใช้งานพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม เรื่อง **Polystyrene plant (PS).**” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2555.
5. Cheng S., Chen P., Wang C and Chen C. “**Mechanical properties of ethylene-vinyl acetate/polystyrene blends studied by *in situ* polymerization.**” Journal of applied polymer science. 88(2003) 699-705.
6. Soares B. G., Barbosa R. V. and Covas J. C. “**Polystyrene/EVA melt blends compatibilized with EVA-graft-polystyrene.**” 65(1997) 2141-2149.
7. Tang W. L., Tam C. K., Yue Y. C., Hu X., Lam C. Y. and Li L. “**Rheological and mechanical properties of compatibilized polystyrene/ethylene vinyl acetate blends.**” Journal of applied polymer science. 94(2004) 2071-2082.
8. Soares G. B. and Cario O. F. “**Reactive compatibilization of polystyrene/poly (ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) blends.**” Journal of applied polymer science. 99(2006) 14-22.
9. ตรีนตร แจบไรสง, ทิพิตยา มะลิรัตน์ และ ทิพย์วิภา มีไชย. “การกำจัดสารแขวนลอยและไอออนโลหะหนักในน้ำเสียด้วยโฟมพอลิสไตรีนดัดแปร.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
10. ธนาคม ไวยติดต่อ, ศิริวรรณ ปิ่นสกุล และ สรชา สมบัติภัทรโชค. “การพัฒนาสีพลาสติก-ชอลจาก EVA สำหรับงานพิมพ์สกรีน.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้งานด้านการค้า  
อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งทั้งการนำไปใช้

2554.

11. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์. “เคมีพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
12. Stevens P. M. “**Polymer chemistry : an introduction.**” Connecticut : Oxford university press. 1998.
13. Lin W. “**Specialty polymer process - semi-batch suspension polymerization process.**” [Online]. Available : <http://www.kyloo.net/lweijie/research.html>. 2010.
14. Enrique S. and Eduardo V. “**Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing.**” New Jersey : John Wiley & Sons. 2013.
15. ปรีชา พหลเทพ. “โพลีเมอร์” กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2540.
16. ภัทรารุช มนต์วิเศษ. “เอกสารประกอบการสอน วิชาปฏิบัติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ เรื่องการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและมาเลอิกแอนไฮไดรด์.” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2555.
17. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “เทคโนโลยีพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
18. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรี. “เอกสารประกอบการสอน วิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1.” ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2541.
19. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “เอกสารประกอบการสอน วิชาสารปรับแต่งพอลิเมอร์.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
20. Fox D.W. and Allen R.B. “**High performance and composited encyclopedia.**” New York : John Wiley & Sons. 1991.
21. Frank S.B. and Glenn H.F. “**Block copolymer thermodynamics : theory and experiment.**” Annual Review of Physical Chemistry. 40(1990) 525-557.
22. Leszek A.U. “**Introduction to polymer alloys and blend.**” New York : Hanser Publisher. 1990.
23. Folke M.J. and Hope P.S. “**Polymer blends and alloys.**” London : Chapman & Hall. 1993.
24. Fayt R., Jerome R. and Teyssie Ph. “**Molecular design of multicomponent polymer systems. I. emulsifying effect of poly(hydrogenated-*b*-styrene) copolymer in low density polyethylene/polystyrene Blends.**” Journal of applied polymer science. 19(1981) 79-84.
25. Paul D.R. “**Polymer blends.**” Vol. 2, London : Academic Press. 1993.
26. Leszek A. U. “**Polymer alloy and blend : thermodynamics and rheology.**” New York : Hanser Publisher. 1989.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27. อธิพิพล แจ่มชัด. “เอกสารประกอบการสอน วิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ เรื่องพอลิเมอร์เทอร์โมไดนามิกส์เบื้องต้น.” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556.
28. ชลลดา ฤตวิรุพห์. “เอกสารประกอบการสอน วิชาพอลิเมอร์ผสม เรื่อง Thermodynamic.” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556.
29. Miller-Chou A. B. and Koenig L. J. “A review of polymer dissolution.” Progress in polymer science. 28(2003) 1223-1270.
30. ชลลดา ฤตวิรุพห์. “เอกสารประกอบการสอนเรื่อง Compatibilisation of polymer blend.” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
31. ดร.รชนี พัทธวรกร. “เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์.” ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2555.
32. Guadalupe del C. P., Manuel J., Oscar G. M., Andres F. O., Daniela T. V. and Kurt E. G. “Synthesis of functional poly(styrene)-block-(methyl methacrylate/methacrylic acid) by homogeneous reverse atom transfer radical polymerization: Spherical nanoparticles, thermal behavior, self-aggregation, and morphological properties.” Journal of applied polymer science. 129(2013) 2076-2085.
33. Guozheng L., Jiru M. and Lei Z. “Synthesis of styrene-maleic anhydride random copolymer and its compatibilization to poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether)/brominated epoxy resin.” Polymer International. 52(2003) 966-972.
34. Lee S. M., Lodge P. T. and Macosko W. C. “Can random copolymers serve as effective polymeric compatibilizers?.” Journal of polymer science: Part B: Polymer physics. 35(1997) 2835-2842.
35. Tang W. L., Tam C. K., Yue Y. C., Hu X., Lam C. Y. and Li L. “Influence of the molecular weight of ethylene vinyl acetate copolymers on the flow and mechanical properties of uncompatibilized polystyrene/ethylene-vinyl acetate copolymer blends.” Polymer international. 50(2001) 95-106.
36. Norimasa W., Isamu A. and Saburo A. “Compatibilizing effects of poly(styrene-co-methacrylic acid) on immiscible blend of polystyrene and polyethylene glycol.” European Polymer Journal. 37(2001) 1837-1842.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

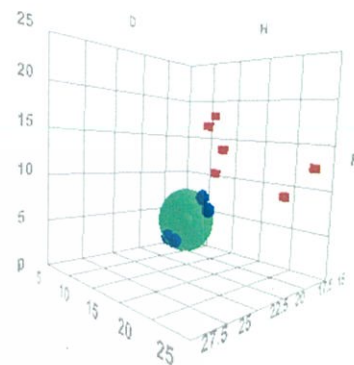


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

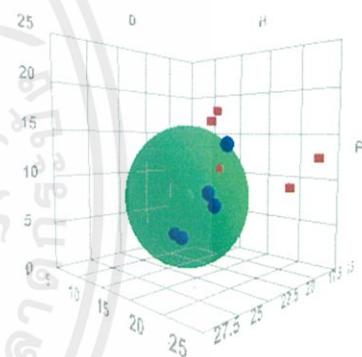
ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายในโปรแกรม HSPiP<sup>®</sup>

Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	Score	RED
Toluene	18	1.4	2	1	0.985
p-Xylene	17.8	1	3.1	1	0.877
Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	1	0.929
Methylene Dichloride (Dichloromethane)	17	7.3	7.1	1	0.988
Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	0	2.823
Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0	3.303
Acetonitrile	15.3	18	6.1	0	3.575
Acetone	15.5	10.4	7	0	1.901
Methanol	14.7	12.3	22.3	0	4.898
Ethanol	15.8	8.8	19.4	0	3.821



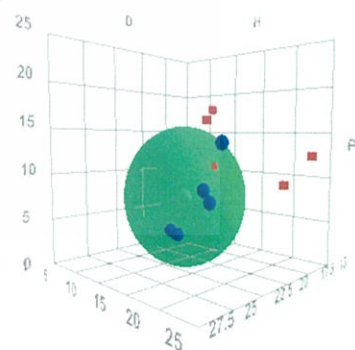
รูปที่ ก-1 ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M30A0

Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	Score	RED
Toluene	18	1.4	2	1	0.996
p-Xylene	17.8	1	3.1	1	0.972
Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	1	0.654
Methylene Dichloride (Dichloromethane)	17	7.3	7.1	1	0.582
Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	1	0.998
Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0	1.139
Acetonitrile	15.3	18	6.1	0	1.594
Acetone	15.5	10.4	7	0	1.000
Methanol	14.7	12.3	22.3	0	2.132
Ethanol	15.8	8.8	19.4	0	1.638



รูปที่ ก-2 ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M29A1

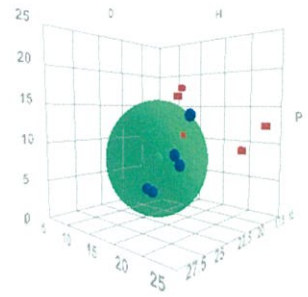
Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	Score	RED
Toluene	18	1.4	2	1	0.998
p-Xylene	17.8	1	3.1	1	0.967
Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	1	0.633
Methylene Dichloride (Dichloromethane)	17	7.3	7.1	1	0.577
Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	1	1.000
Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0	1.156
Acetonitrile	15.3	18	6.1	0	1.617
Acetone	15.5	10.4	7	0	1.006
Methanol	14.7	12.3	22.3	0	2.103
Ethanol	15.8	8.8	19.4	0	1.602



รูปที่ ก-3 ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M27A3

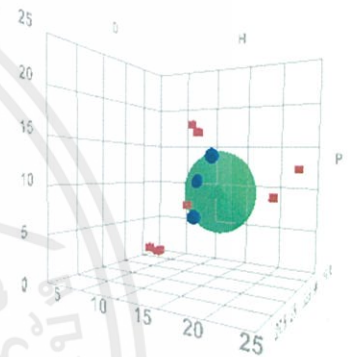
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	Score	RED	MVol
637	Toluene	18	1.4	2	1	0.994	106.6
697	p-Xylene	17.8	1	3.1	1	0.970	121.1
617	Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	1	0.654	81.9
524	Methylene Dichloride (Dichloromethane)	17	7.3	7.1	1	0.582	64.4
7	Acetone	15.5	10.4	7	0	1.001	73.8
297	Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	1	0.999	77.4
303	Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0	1.140	71.3
10	Acetonitrile	15.3	18	6.1	0	1.595	52.9
325	Ethanol	15.8	8.8	19.4	0	1.639	58.6
456	Methanol	14.7	12.3	22.3	0	2.134	40.6



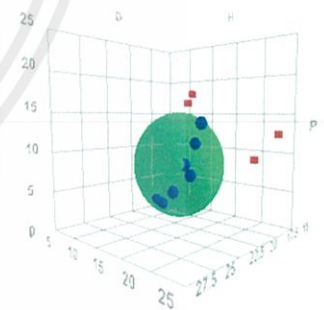
รูปที่ ก-4 ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M25A5

Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	$\delta HD/A$	Score	RED
Hexane	14.9	0	0	0.0/0.0	0	2.912
Toluene	18	1.4	2	0.0/2.0	0	2.482
p-Xylene	17.8	1	3.1	0.0/3.1	0	2.355
Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	0.0/8.0	1	0.997
Methylene Dichloride (Dic...	17	7.3	7.1	5.8/4.0	0	1.000
Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	1.0/11.3	1	0.983
Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0.0/10.2	0	1.646
Acetonitrile	15.3	18	6.1	0.8/6.1	0	2.063
Acetone	15.5	10.4	7	0.0/7.0	1	0.998
Ethanol	15.8	8.8	19.4	11.8/15.4	0	1.481
Methanol	14.7	12.3	22.3	14.0/17.4	0	2.203



รูปที่ ก-5 ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ S70M20A10

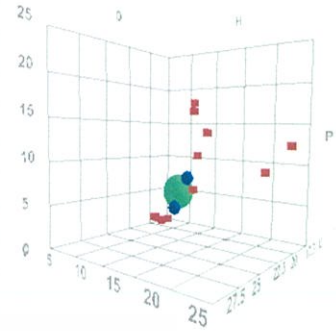
No.	Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	Score	RED	MVol
417	Hexane	14.9	0	0	0	1.453	131.4
637	Toluene	18	1.4	2	1	0.988	106.6
697	p-Xylene	17.8	1	3.1	1	0.948	121.1
617	Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	1	0.333	81.9
524	Methylene Dichloride (Dichloromethane)	17	7.3	7.1	1	0.149	64.4
156	Chloroform	17.8	3.1	5.7	1	0.572	80.5
297	Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	1	0.996	77.4
303	Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0	1.254	71.3
7	Acetone	15.5	10.4	7	1	0.651	73.8
325	Ethanol	15.8	8.8	19.4	0	1.693	58.6
456	Methanol	14.7	12.3	22.3	0	2.215	40.6
10	Acetonitrile	15.3	18	6.1	0	1.477	52.9



รูปที่ ก-6 ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ PS

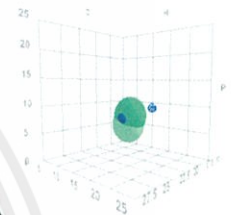
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	Score	RED	MVol
417	Hexane	14.9	0	0	0	4.025	131.4
637	Toluene	18	1.4	2	0	2.411	106.6
697	p-Xylene	17.8	1	3.1	0	2.222	121.1
617	Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	0	1.004	81.9
524	Methylene Dichloride (Dichloromethane)	17	7.3	7.1	1	1.000	64.4
156	Chloroform	17.8	3.1	5.7	1	0.994	80.5
297	Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	0	4.091	77.4
303	Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0	4.955	71.3
7	Acetone	15.5	10.4	7	0	2.707	73.8
325	Ethanol	15.8	8.8	19.4	0	5.904	58.6
456	Methanol	14.7	12.3	22.3	0	7.711	40.6
10	Acetonitrile	15.3	18	6.1	0	5.571	52.9



รูปที่ ก-7 ผลการหาค่าบ่งชี้การละลายของ EVA

No.	Solvent	$\delta D$	$\delta P$	$\delta H$	Score	RED	MVol
1	0%Maa	17.51	4.08	4.86	-	0.98	100
3	3%Maa	19.45	6.97	7.85	-	1.11	100
4	5%Maa	19.49	7.23	7.49	-	1.12	100
2	1%Maa	19.49	7.24	7.51	-	1.13	100
5	10%Maa	16.30	9.11	11.77	-	1.77	100

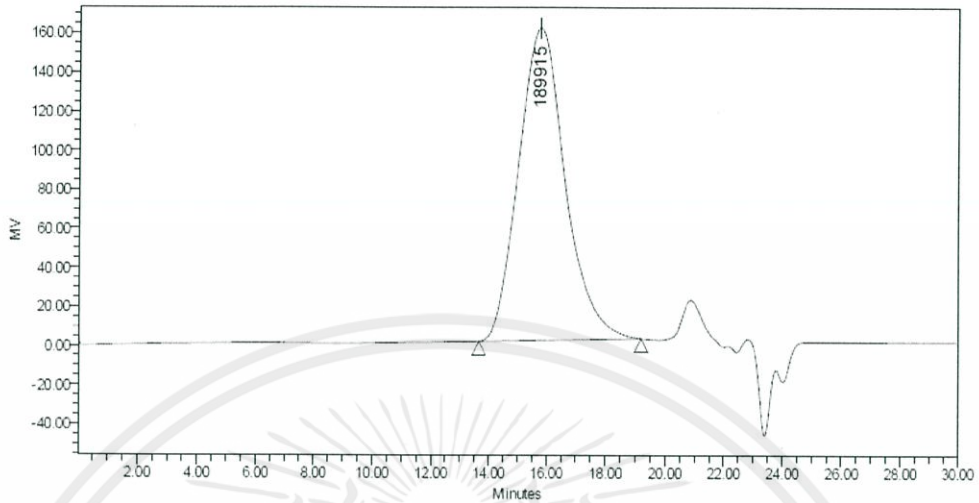


รูปที่ ก-8 ผลการทำนายสารช่วยผสมที่เข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสม PS/EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

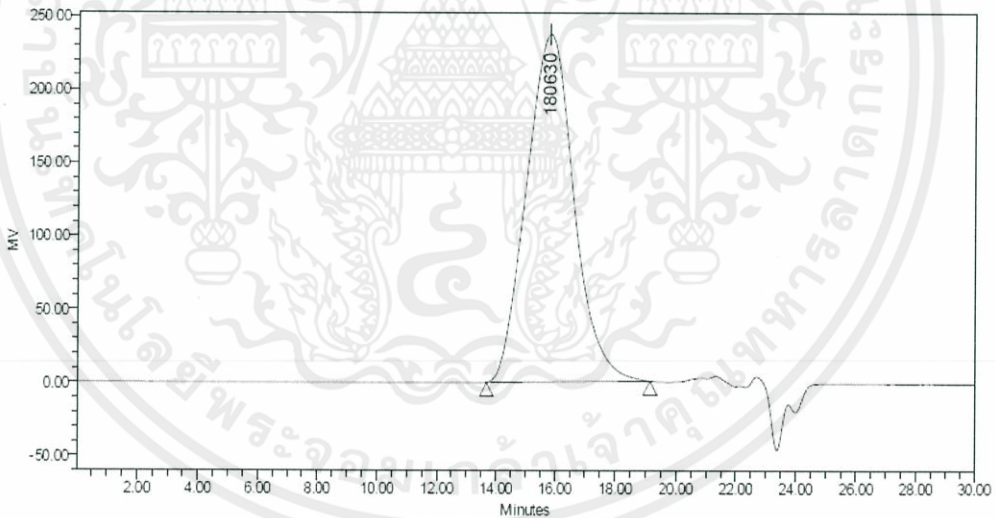
โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่อง GPC



Broad Unknown Relative Peak Table

Distribution Name	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	MP (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity	Mz/Mw	Mz+1/Mw
1	117649	227496	189915	366373	524700	1.933679	1.610458	2.306413

รูปที่ ข-1 โครมาโทแกรมของ S70M30A0

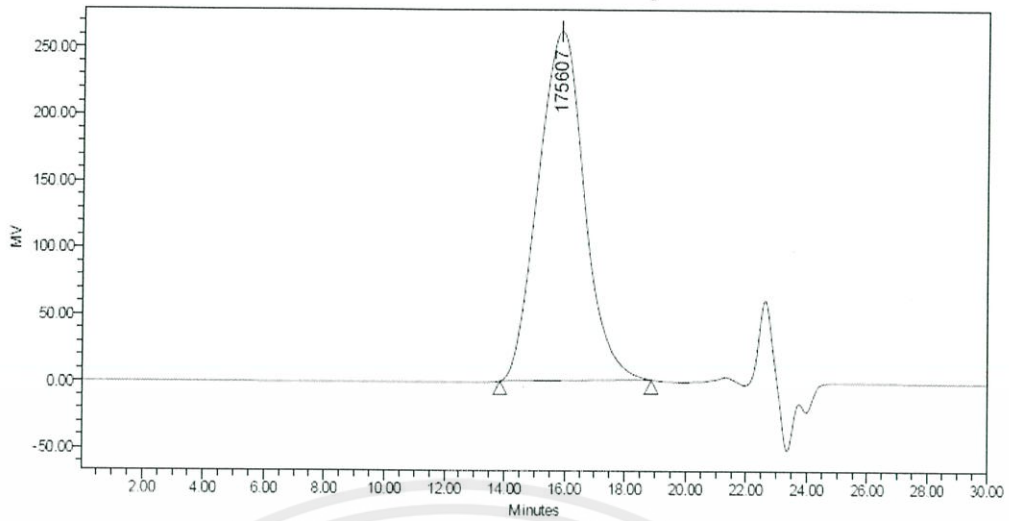


Broad Unknown Relative Peak Table

Distribution Name	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	MP (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity	Mz/Mw	Mz+1/Mw
1	125745	233919	180630	378055	544363	1.860240	1.616182	2.327146

รูปที่ ข-2 โครมาโทแกรมของ S70M29A1

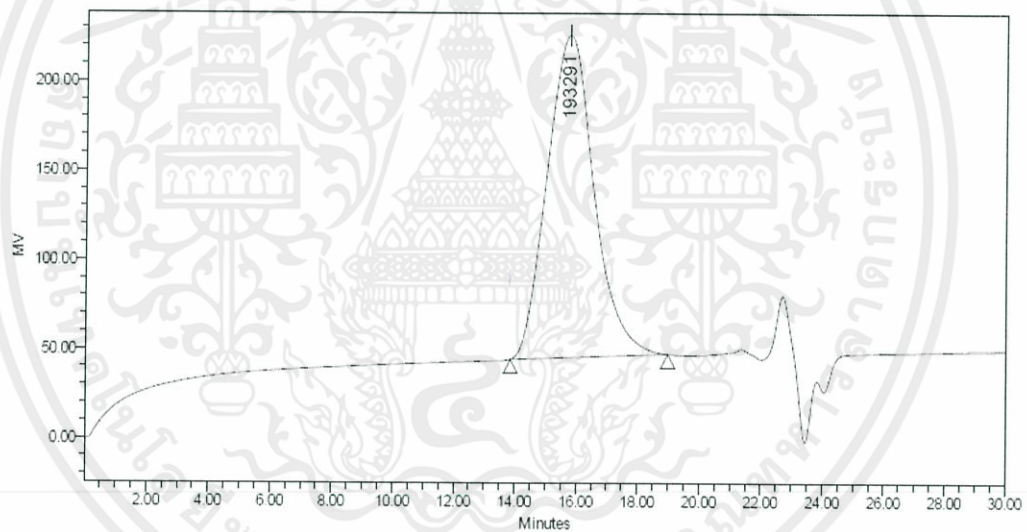
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Broad Unknown Relative Peak Table

Distribution Name	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	MP (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity	Mz/Mw	Mz+1/Mw
1	126307	219882	175607	340242	475903	1.740853	1.547389	2.164359

รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมของ S70M27A3

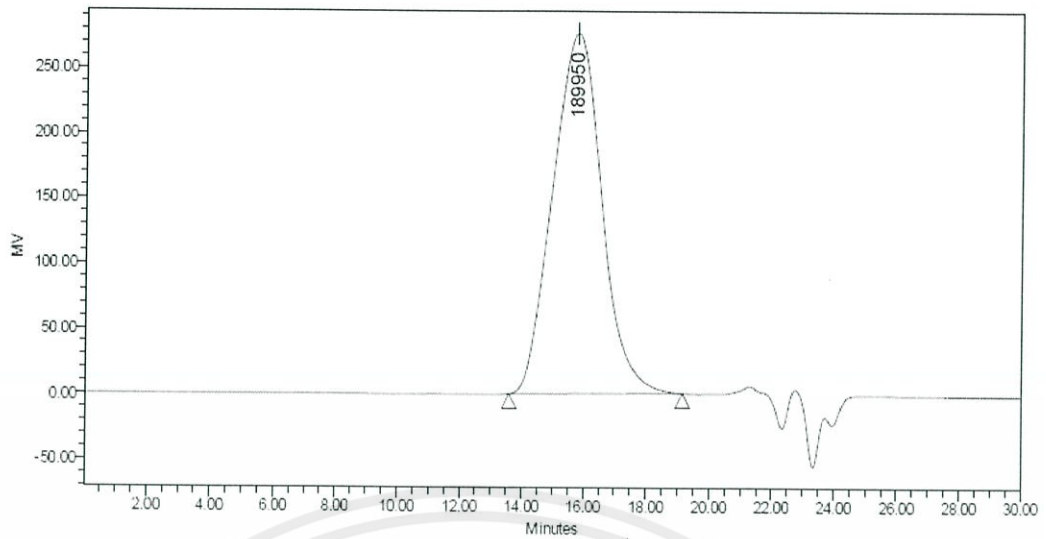


Broad Unknown Relative Peak Table

Distribution Name	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	MP (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity	Mz/Mw	Mz+1/Mw
1	128442	229372	193291	351834	485593	1.785609	1.533903	2.117054

รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมของ S70M25A5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Broad Unknown Relative Peak Table

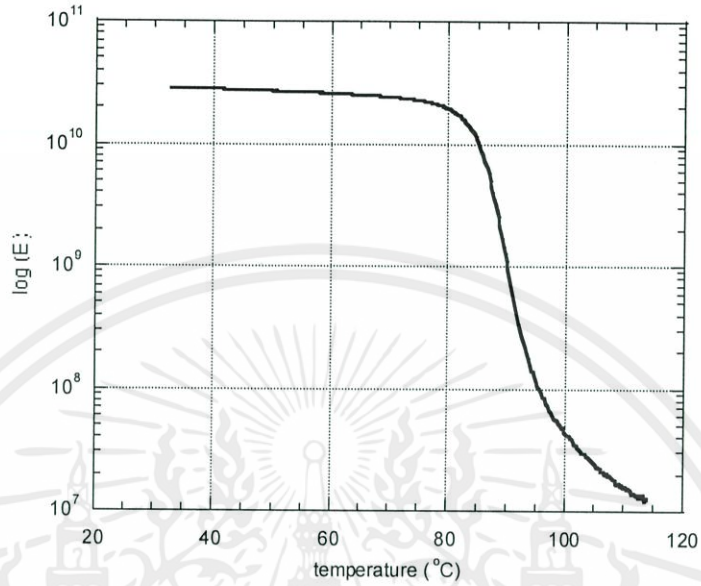
Distribution Name	Mn (Daltons)	Mw (Daltons)	MP (Daltons)	Mz (Daltons)	Mz+1 (Daltons)	Polydispersity	Mz/Mw	Mz+1/Mw
1	136422	248362	189950	399423	576631	1.820546	1.608227	2.321735

รูปที่ ข-5 โครมาโทแกรมของ S70M20A10

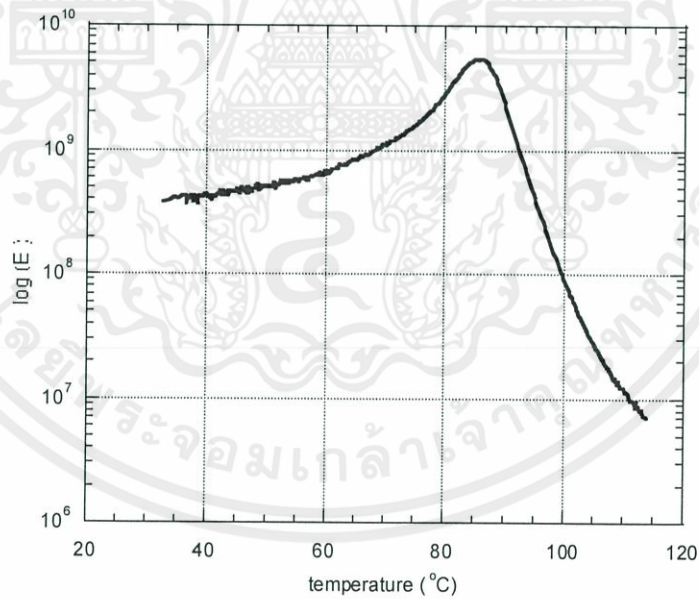
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เทอร์โมแกรมที่ได้จากเครื่อง DMTA

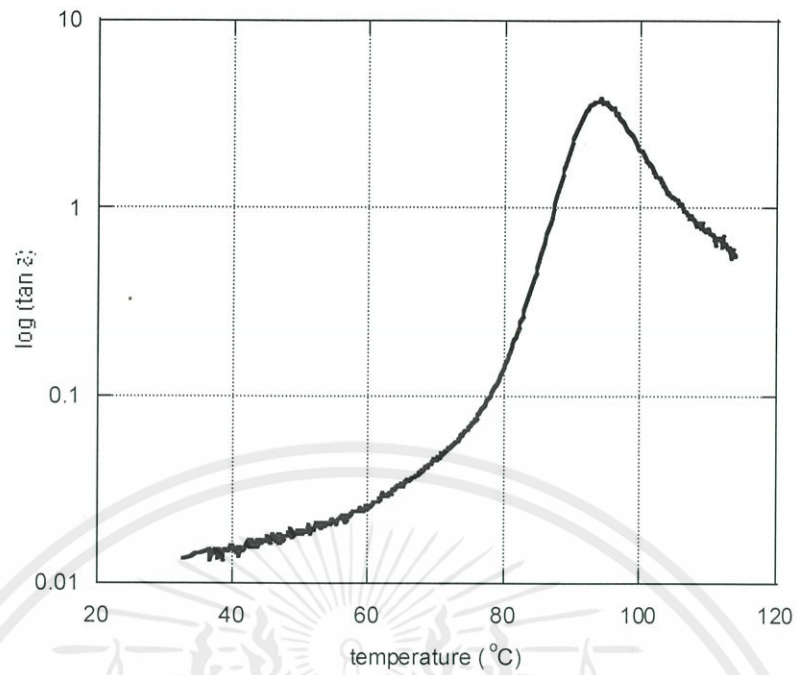


รูปที่ ค-1 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E')$  กับอุณหภูมิของ PS

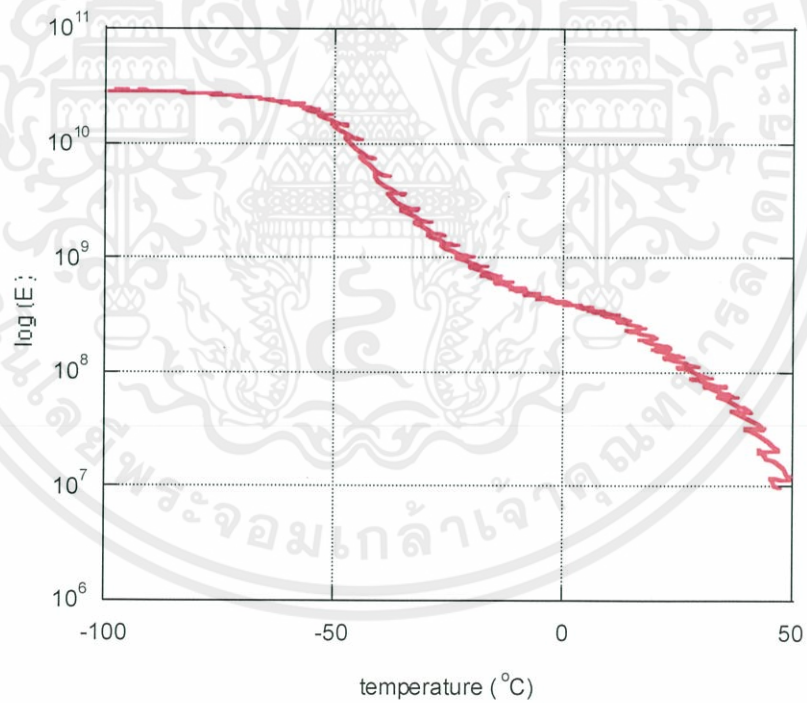


รูปที่ ค-2 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E'')$  กับอุณหภูมิของ PS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

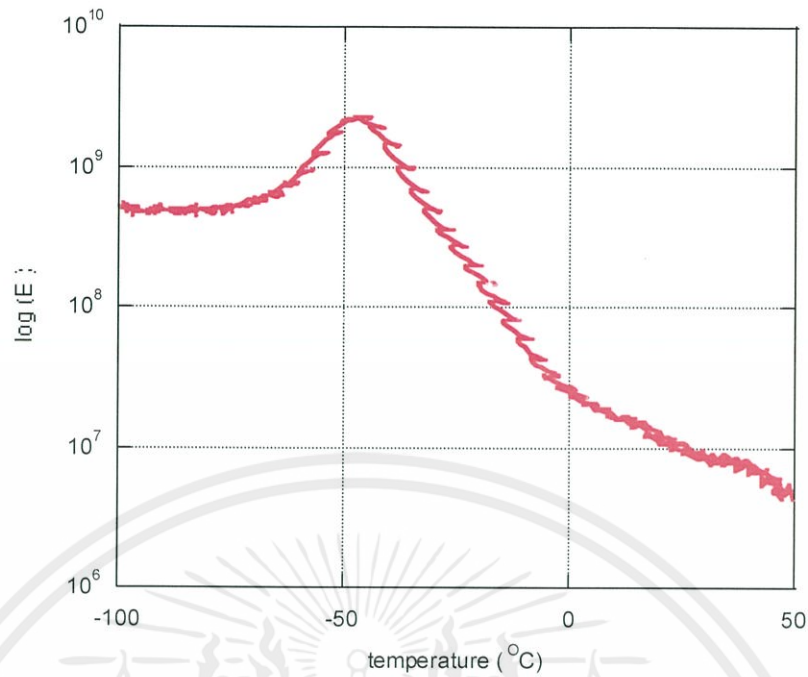


รูปที่ ๓-3 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\tan \delta)$  กับอุณหภูมิของ PS

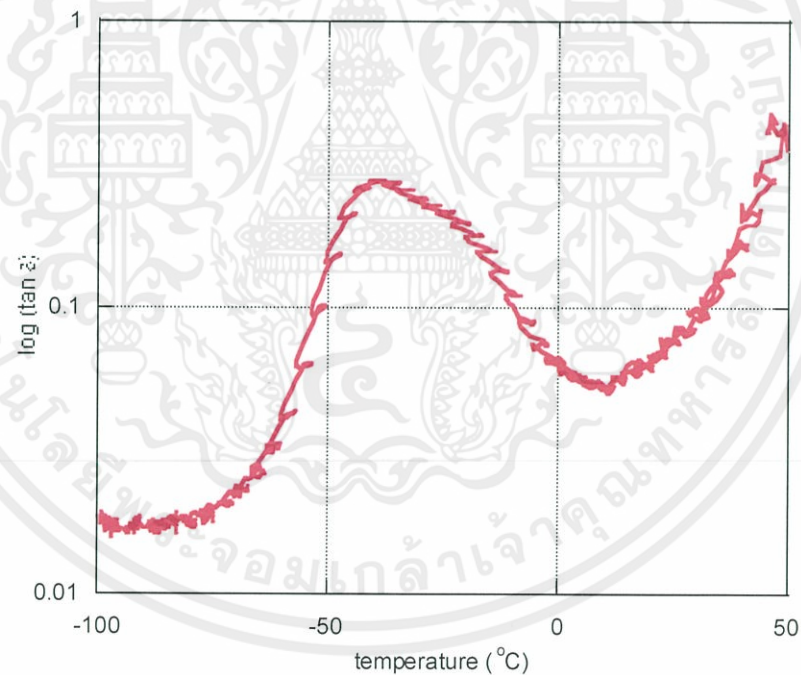


รูปที่ ๓-4 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E')$  กับอุณหภูมิของ EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

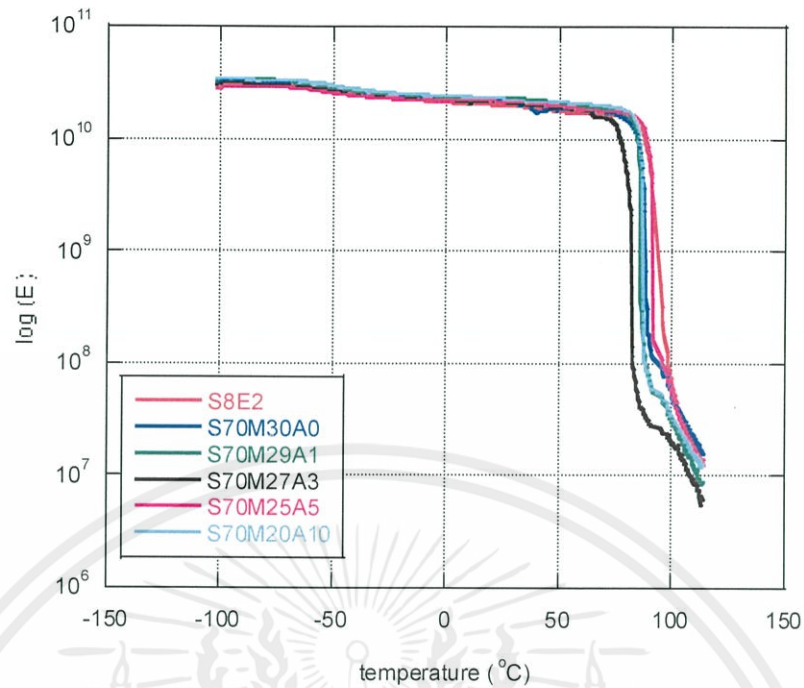


รูปที่ ๕-5 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E')$  กับอุณหภูมิของ EVA

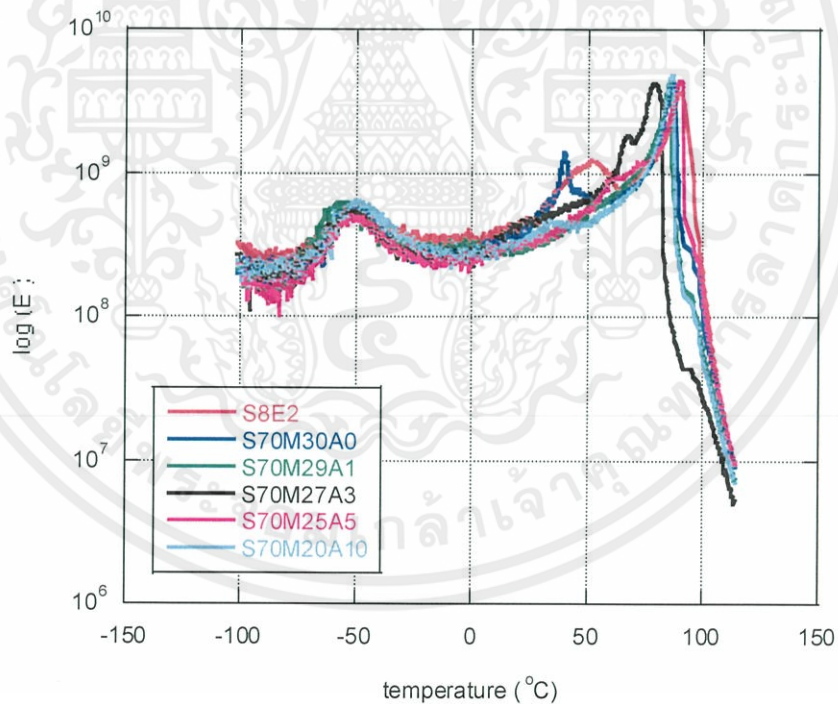


รูปที่ ๕-6 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\tan \delta)$  กับอุณหภูมิของ EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

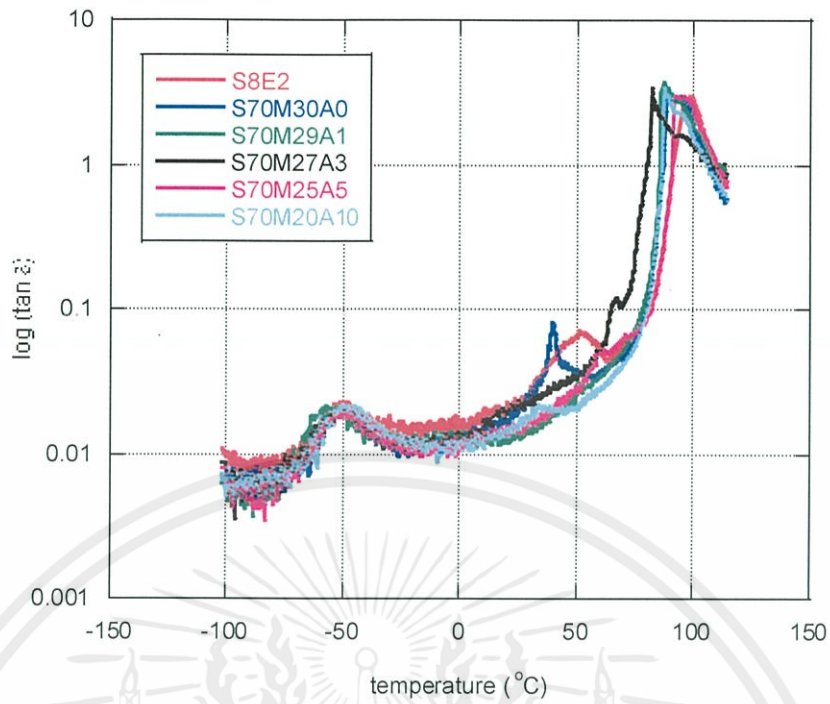


รูปที่ ค-7 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log (E')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt%

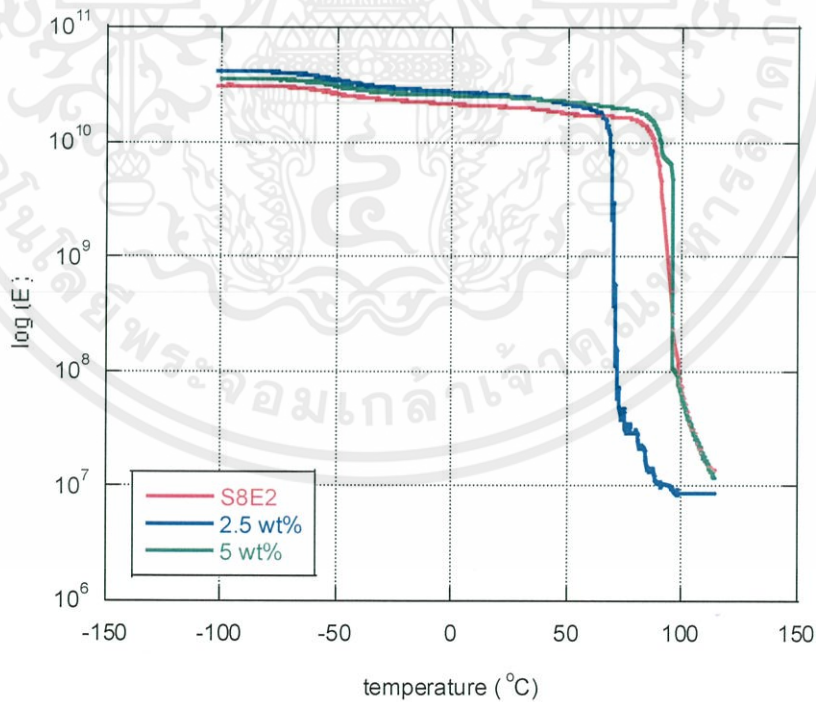


รูปที่ ค-8 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log (E'')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt%

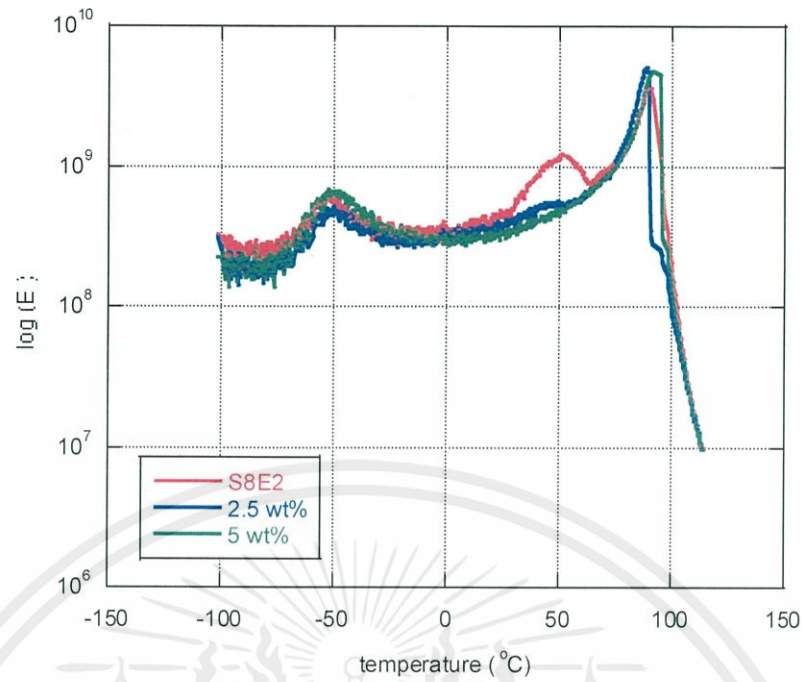
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



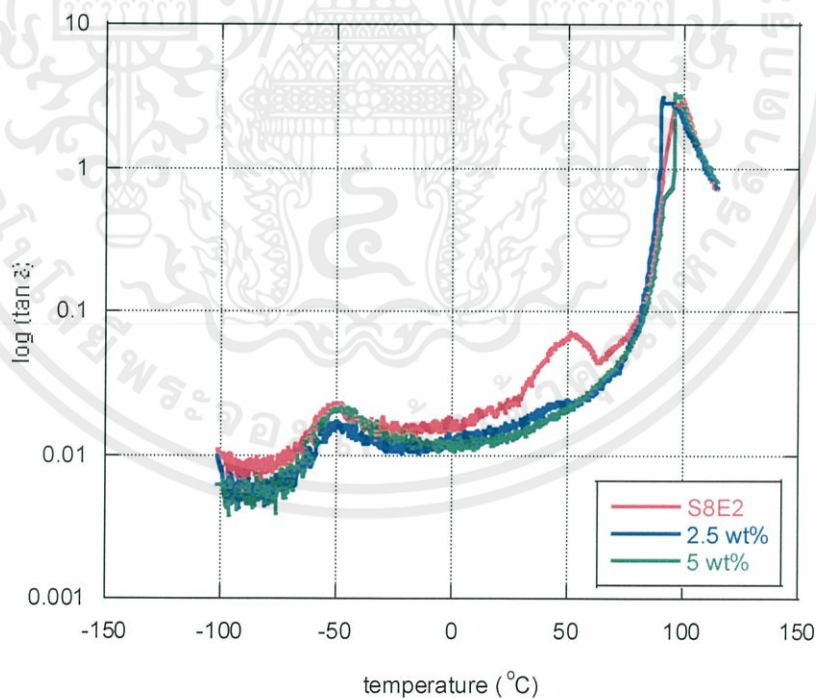
รูปที่ ๙-๙ เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\tan \delta)$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 2.5 wt%



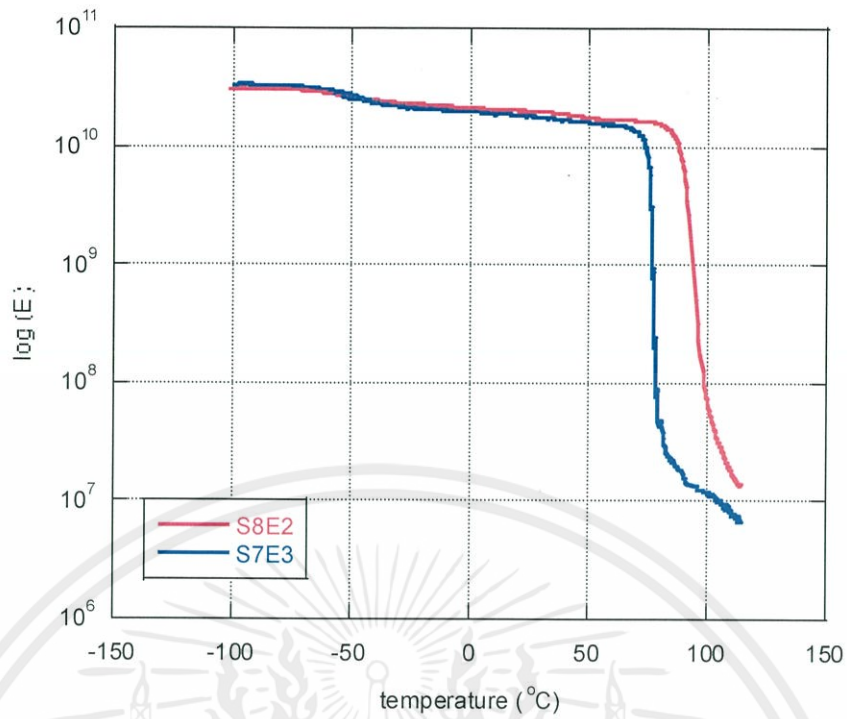
เอกสารนี้เป็นรูปที่ ๙-10 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M29A1 (A) อยู่ 2.5 และ 5 wt%



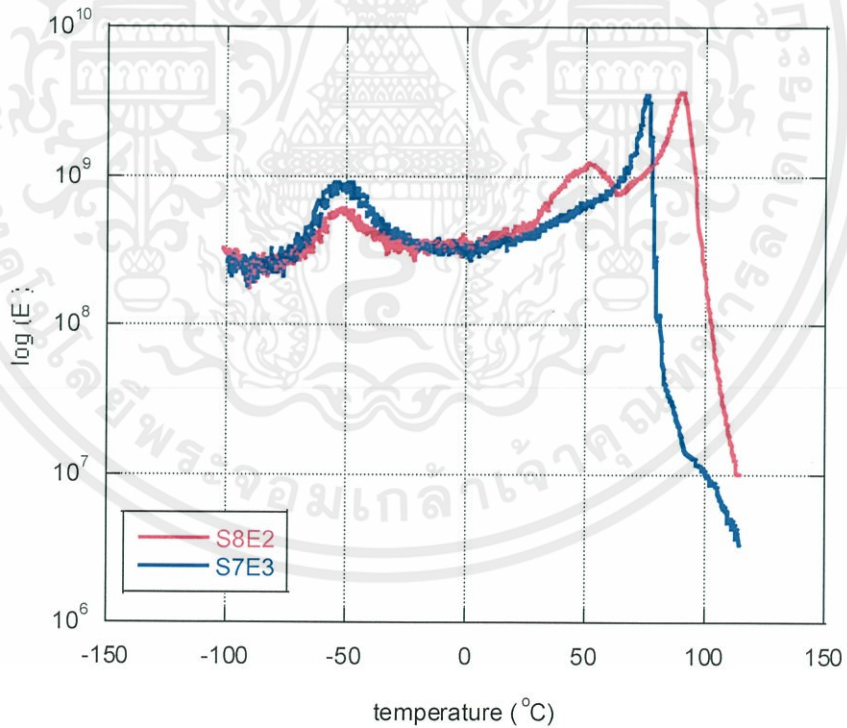
รูปที่ ค-11 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) อยู่ 2.5 และ 5 wt%



รูปที่ ค-12 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\tan \delta)$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) อยู่ 2.5 และ 5 wt%



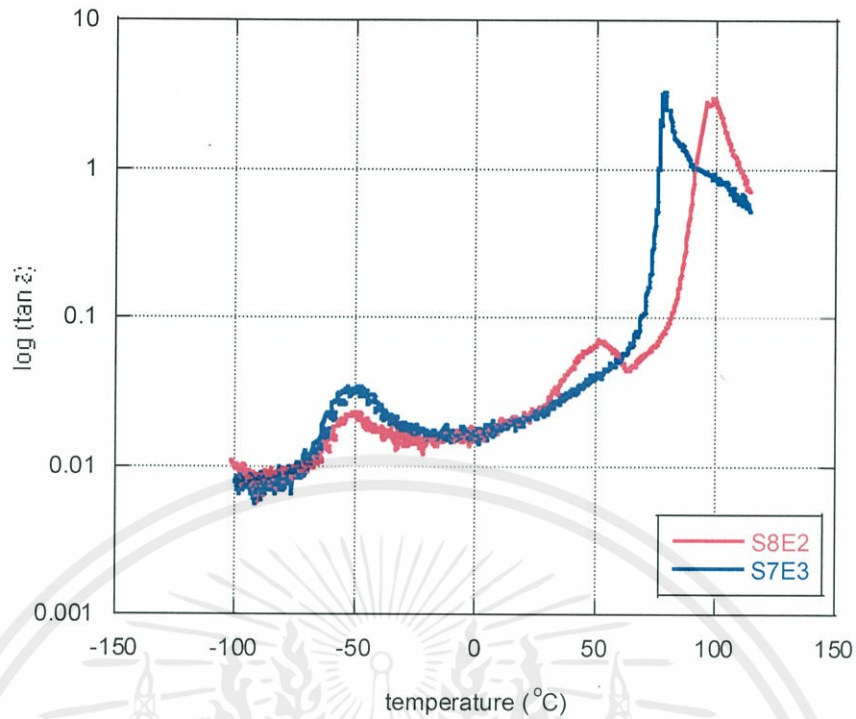
รูปที่ ค-13 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน



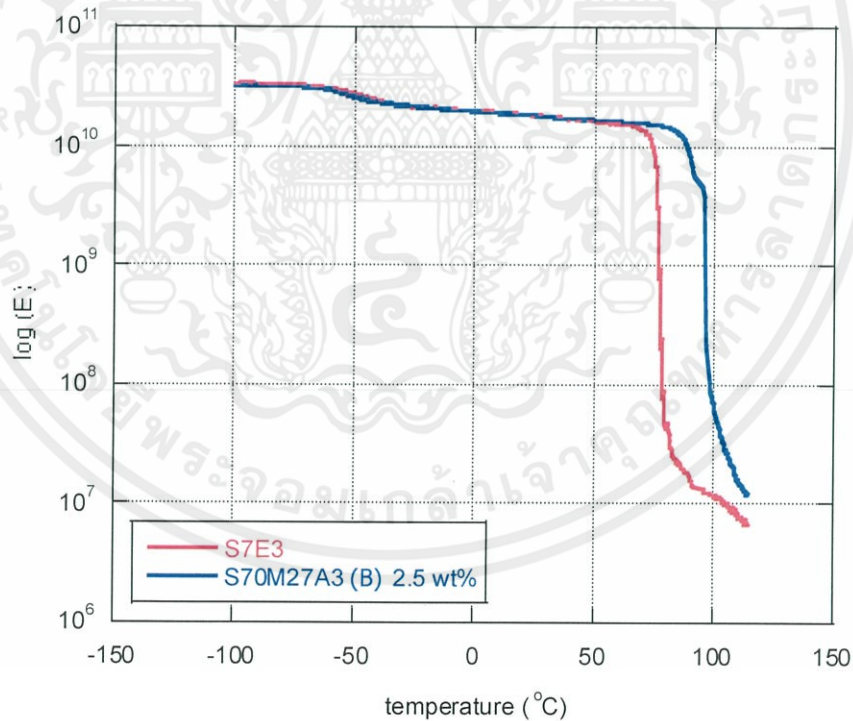
รูปที่ ค-14 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E'')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

PS/EVA ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



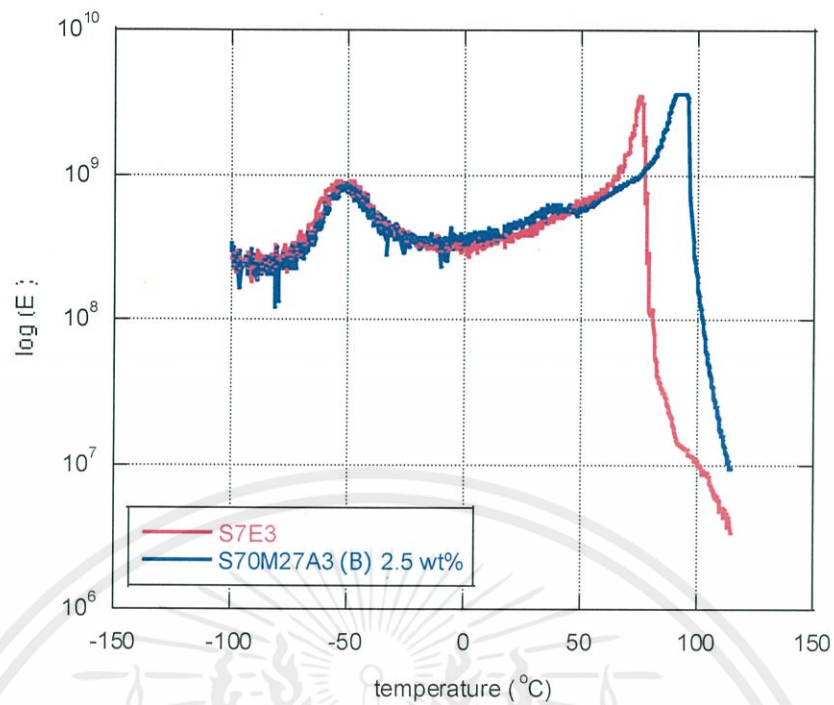
รูปที่ ค-15 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\tan \delta)$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน



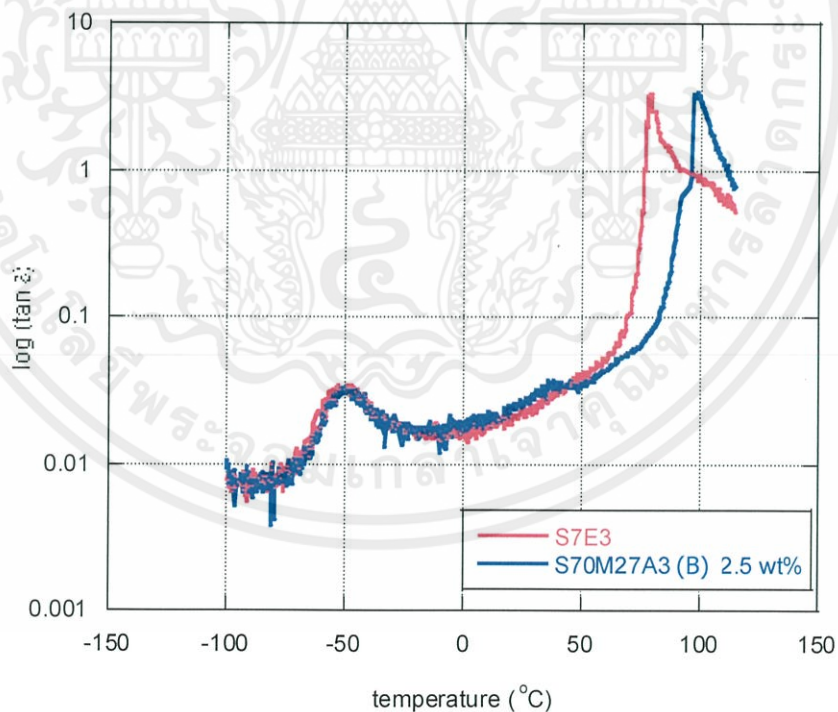
รูปที่ ค-16 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

PS/EVA อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ใดเห็นใจลิขสิทธิ์ของงานนี้ กรุณา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-17 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(E'')$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณแตกต่างกัน



รูปที่ ค-18 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\tan \delta)$  กับอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PS/EVA อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักที่มีสารช่วยผสม S70M37A3 (B) ในปริมาณแตกต่างกัน