

การทำให้พอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน-  
เทอเรพทาเลตเข้ากันได้ด้วยพอลิเมอร์ร่วมแบบเกิดปฏิกิริยา  
ของสไตรีน-เอทิล N-เมทาครีโลอิลคาร์บาเมต

COMPATIBILISATION OF PS/PET BLENDS WITH  
POLY(STYRENE-ETHYL N-METHACRYLOYL CARBAMATE)  
REACTIVE COPOLYMER



วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและทบวงมหาวิทยาลัย  
วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1180-9

การทำให้พอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน-  
เทอเรพทาเลตเข้ากันได้ด้วยพอลิเมอร์ร่วมแบบเกิดปฏิกิริยา  
ของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต

COMPATIBILISATION OF PS/PET BLENDS WITH  
POLY(STYRENE-ETHYL N-METHACRYLOYL CARBAMATE)  
REACTIVE COPOLYMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

รับการใช้ISBN 974-15-1180-9 นั้น ไม่นุญาตให้นำไป  
ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก

COMPATIBILISATION OF PS/PET BLENDS WITH  
POLY(STYRENE-ETHYL N-METHACRYLOYL CARBAMATE)  
REACTIVE COPOLYMER



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

2004

ISBN 974-15-1180-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำให้พอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตเข้ากันได้ด้วยพอลิเมอร์ร่วมแบบเกิดปฏิกิริยาของพอลิสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต
นักศึกษา	นางสาววิภา ลีลาเอกเลิศ
รหัสประจำตัว	43065603
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
พ.ศ.	2547
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) โดยใช้พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) เป็นสารช่วยผสมผ่านกระบวนการผสมแบบเกิดปฏิกิริยา ทำการสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC) และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (NMR) จากนั้นนำ MAC มาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบดิสเพอร์ชันกับสไตรีนมอนอเมอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวริเริ่ม 0.25 0.5 0.75 และ 1 % โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา คือ 24 และ 36 ชั่วโมง พบว่าปริมาณตัวริเริ่มที่ 0.25 % โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลและ % Yield ที่ดี จากนั้นทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง NMR เครื่องฟูเรีย-ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR) เครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) และทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาด้วยการเตรียมฟิล์มที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสม (0-10 % โดยน้ำหนัก PET) พบว่ามีความขรุขระซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET และหมู่คาร์บาเมตของ PSM มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม ทำการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 80/20 70/30 และ 60/40 ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเมื่อปริมาณ PET มากขึ้น และที่ความเร็วรอบของสกรูต่ำ สมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีแนวโน้มดีขึ้น ดังนั้นจึงเลือกพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาทีเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารช่วยผสม และจากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าวัฏภาคกระจายตัว (PET) มีการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาจากทรงกลมเป็นทรงกระบอกเมื่อเพิ่มสัดส่วน PET ในพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสม จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่เติมและที่เติมสารช่วยผสมใน ปริมาณต่าง ๆ คือ 1 2 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก PET พบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม ทำให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ สมบัติทางความร้อน เช่น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PET และ  $T_c$  มีค่าลดลง สันฐานวิทยาของภูมิภาคกระจายตัวมีขนาดของทรงกระบอกเล็กลง จากการศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อน โดยทำการเตรียมแผ่นฟิล์มที่มีการปรับเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อน (10-75 นาที) จากนั้นนำมาศึกษาสันฐานวิทยา พบว่าความขรุขระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Compatibilisation of PS/PET Blends with Poly styrene-co-ethyl N-methacryloyl Carbamate Reactive Copolymers
Student	Ms.Wipa Leelaeklert
Student ID.	43065603
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2004
Thesis Advisor	Dr. Chonlada Ritvirulh

### ABSTRACT

This research studied on polymer blends between polystyrene (PS) and poly (ethylene terephthalate) (PET) by using poly(styrene-co-ethyl N-methacryloyl carbamate) (PSM) as a reactive blending compatibiliser. Ethyl N-methacryloylcarbamate (MAC) was synthesised and characterised by NMR. Then MAC and styrene monomers were polymerised via dispersion polymerisation under condition of varying amount of benzoyl peroxide as an initiator from 0.25 to 1 % by weight of styrene monomer. The reaction time were varied from 24 to 36 hours. It was found that 0.25 % by weight of the initiator with reaction time of 36 hours resulted in required molecular weight and % Yield. The copolymer (PSM) was characterised by NMR, FT-IR and GPC. The reaction between PSM and functional group at the chain end of PET was investigated by the roughness of films. Films of PS and PET were prepared as a sandwich with various amounts of compatibiliser (0-10 % by weight of PET). It was found that the more compatibiliser, the more surface roughness of films were observed. The PS/PET blends, at ratio of 80/20, 70/30 and 60/40, were mixed in a twin-screw extruder using screw speeds of 10, 20 and 30 rpm, respectively. Then the PS/PET blends were moulded by an injection moulding machine. Mechanical and morphological properties of the blends were investigated. It was found that the mechanical properties were increased when increasing the ratio of PET at the lowest screw speed. Therefore, the blend ratio of 60/40 at 10 rpm was selected to study the influence of the compatibiliser. Morphological properties showed that the dispersed phase was changed from spherical to cylindrical shape when ratio of PET was increased. The properties of uncompatibilised blends and compatibilised

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

blends with varying amount of the compatibiliser from 1 to 10 % by weight of PET were compared. It was found that mechanical properties and thermal properties such as % crystallinity and crystallisation temperature were decreased when the compatibiliser was added. In addition, dispersed phase size was decreased when increasing the amount of compatibiliser. Films of PS and PET were prepared and annealed with various times (10-75 mins). Morphological study revealed that the longer annealing time, the more surface roughness of the films was observed.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความดูแล เอาใจใส่ของ ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และที่สำคัญคือความเข้าใจ คอยเอาใจใส่ในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย ที่ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ทั้งในระหว่างทำงานวิจัยและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ สมบูรณ์ ผศ.ดร.พัชนี เจริญยิ่ง ซึ่งสละเวลาเพื่อทดสอบสารตัวอย่าง รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ผู้คอยอนุเคราะห์ทั้งให้คำปรึกษา และกรุณาให้ยืมหนังสือมากมายเพื่อทำงานวิจัย และอาจารย์ ท่านอื่นที่ไม่สามารถกล่าวนามได้หมด นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาสละเวลาช่วยแก้ปัญหาและตรวจวิเคราะห์ รวมทั้งเดินทางมาเป็นกรรมการ

ขอขอบพระคุณพี่ปราณี และเจ้าหน้าที่ควบคุมห้องปฏิบัติการทั้งตึกเก่า ตึกใหม่ และตึก ปฏิบัติการพอลิเมอร์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและสอนใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณพี่วันดี เจ้าหน้าที่บริษัทโคคาโคล่า ที่ช่วยประสานงานขอความอนุเคราะห์ เม็ดพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต รวมทั้งบริษัทไทยชินกและพี่ ๆ ที่บริษัทไทยชินกที่ให้ความ อนุเคราะห์และให้ความอนุเคราะห์และคำปรึกษาเกี่ยวกับเม็ดพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต ขอขอบพระคุณบริษัทที่ พี ไอ โพลีน ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพอลิสไตรีน

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้วิจัย ที่ให้กำเนิด เลี้ยงมาจนโต คอยดูแล ให้การศึกษา คอยเป็นกำลังใจ สนับสนุนในทุก ๆ ด้านที่สนใจ และคอยห่วงใยอยู่เสมอ

ขอขอบพระคุณญาติ และพี่ ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือทุก ๆ อย่าง

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาที่คอยเป็นกำลังใจ คำปรึกษา ช่วยเหลือ และความเป็นเพื่อน ที่ดีต่อกัน

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็น ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัย

วิภา ลีลาเอกเลิศ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 พอลิเมอร์ผสม.....	4
2.2 ความสามารถในการเข้ากันได้.....	7
2.3 สารช่วยผสม.....	11
2.4 วิธีการทำให้เข้ากันได้.....	12
2.4.1 การแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสมเป็นองค์ประกอบที่ 3.....	12
2.4.2 มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสม เช่น การทำให้เกิดปฏิกิริยาขณะทำการผสม.....	13
2.5 การสังเคราะห์สารช่วยผสม.....	14
2.5.1 กลไกการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	14
2.5.2 องค์ประกอบของการสังเคราะห์สารช่วยผสม.....	15
2.5.3 ชนิดของถังปฏิกิริยา (Reactor types).....	18
2.5.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารช่วยผสม.....	19
2.6 พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET).....	22
2.7 พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS).....	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.3 วิธีการทดลอง.....	30
3.3.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสม.....	30
3.3.1.1 การทำให้สารตั้งต้นบริสุทธิ์.....	30
3.3.1.2 การสังเคราะห์เอทิล N-เมทาอะคริลอิลคาร์บาเมต (Ethyl N-methacryloyl carbamate; MAC).....	31
3.3.1.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาอะคริลอิล- คาร์บาเมต (Poly(styrene-co-methacryloyl carbamate); PSM).....	32
3.3.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform-Infrared Spectroscopy; FT-IR).....	34
3.3.3 การเตรียมฟิล์มเพื่อศึกษาการทำปฏิกิริยาของ PSM กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ ของ PET โดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM).....	34
3.3.4 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) และพอลิ- เอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET).....	35
3.3.4.1 การเตรียมสารตั้งต้นก่อนการผสม.....	35
3.3.4.2 การหาอัตราส่วนและความเร็วรอบสกรูที่เหมาะสม.....	35
3.3.4.3 การหาปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสม.....	35
3.3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อการทดสอบ.....	35
3.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	36
3.3.6.1 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Tester).....	36
3.3.6.2 ทดสอบความแข็งกด (Durometer hardness).....	36
3.3.6.3 ทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength).....	37
3.3.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	37
3.3.7.1 ทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC).....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	37
3.3.8.1 การเตรียมชิ้นงานจากเครื่องฉีดขึ้นรูป.....	37
3.3.8.2 การเตรียมชิ้นงานด้วยการเตรียมฟิล์ม.....	37
3.3.9 การทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์ (Thermal Gravimeter; TGA).....	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....</b>	<b>39</b>
4.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสม.....	39
4.1.1 การสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (Ethyl N-methacryloyl carbamate; MAC).....	39
4.1.2 การสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทา- คริลอิลคาร์บาเมต (Poly(styrene-co-methacryloyl carbamate); PSM).....	41
4.2 การเตรียมฟิล์มเพื่อศึกษาการทำปฏิกิริยาของ PSM กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสาย- โซ่ของ PET โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM).....	45
4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม.....	47
4.3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม.....	47
4.3.1.1 ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส.....	47
4.3.1.2 ความแข็งกด (Shore D).....	50
4.3.1.3 ความทนทานต่อแรงกระแทก.....	51
4.3.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม.....	52
4.3.2.1 ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส.....	52
4.3.2.2 ความแข็งกด (Shore D).....	54
4.3.2.3 ความทนทานต่อแรงกระแทก.....	55
4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สัณฐานวิทยา.....	58
4.5.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม.....	58
4.5.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม.....	61
4.5.3 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมสารช่วยผสม 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก PET ที่เวลาการให้ความร้อนต่าง ๆ .....	63
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ.....</b>	<b>67</b>
5.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิล- คาร์บาเมต (PSM).....	67
5.1.1 การสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (Ethyl N-methacryloylcarbamate; MAC).....	67
5.1.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิล- คาร์บาเมต (Poly(styrene-co-methacryloyl carbamate); PSM).....	67
5.2 สภาวะที่เหมาะสมในการผสม.....	68
5.3 การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและ เติมสารช่วยผสมที่ปริมาณต่าง ๆ.....	68
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก ก นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทร.....	73
ภาคผนวก ข โคโรมาโทแกรมจากเครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี.....	77
ภาคผนวก ค เทอร์โมแกรมจากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	84
ภาคผนวก ง สภาวะในการฉีดขึ้นรูป.....	88
ภาคผนวก จ เทอร์โมแกรมจากเครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 องค์ประกอบของ MAC จาก <sup>1</sup> H NMR.....	40
4.2 องค์ประกอบของ PSM จาก <sup>1</sup> H NMR.....	42
4.3 น้ำหนักโมเลกุลจากเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี.....	44
4.4 ค่า % Yield ของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่ม 0.25 % โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ที่เวลาใน การทำปฏิกิริยาต่าง ๆ.....	45
4.5 เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมต่าง ๆ.....	57
1 สภาวะในการฉีดขึ้นรูปที่อัตราส่วน PS/PET และความเร็วรอบของสกรูต่าง ๆ.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม .....	4
2.2 ลักษณะของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่ออัตราส่วนของพอลิเมอร์ในการผสมแตกต่างกัน.....	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทต่าง ๆ เมื่ออัตราส่วนในการผสมแตกต่างกัน.....	6
2.4 ศักยภาพการตอบสนองสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม.....	6
2.5 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระกิบส์ในการผสมพอลิเมอร์กับเศษส่วนโมลของพอลิเมอร์...9	
2.6 แผนภาพภูมิภาคแบบ LCST และ UCST ของพอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิด.....	10
2.7 พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และแบบตอกิ่งที่บริเวณระหว่างภูมิภาค.....	13
2.8 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลต.....	22
2.9 การผลิตพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลต.....	23
2.10 โครงสร้างของพอลิสไตรีน.....	24
3.1 อุปกรณ์ในการสังเคราะห์ PSM.....	32
4.1 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต.....	40
4.2 โครงสร้าง MAC.....	40
4.3 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของ PSM.....	42
4.4 โครงสร้างของ PSM.....	42
4.5 FT-IR สเปกตรัมของ a) PS และ (b) PSM.....	43
4.6 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมต่าง ๆ.....	46
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ.....	47
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ.....	48
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ.....	48
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ .....	51
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเมื่อเปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมแตกต่างกัน ที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	52
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสเมื่อเปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมแตกต่างกัน ที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	53
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเมื่อเปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมแตกต่างกัน ที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	53
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดเมื่อเปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมแตกต่างกัน ที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	55
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเมื่อเปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมแตกต่างกัน ที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	56
4.17 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลตต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	58
4.18 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลตต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 20 รอบต่อนาที.....	59
4.19 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลตต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาที.....	60
4.20 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางทิศทางการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วย และเติมสารช่วยผสมในปริมาณต่าง ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลตเท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	62
4.21 สัณฐานวิทยาขนานทิศทางการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วย และเติมสารช่วยผสมในปริมาณต่าง ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลตเท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที.....	63
4.22 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสม 5 % โดยน้ำหนัก PET ที่เวลาในการให้ความร้อนต่าง ๆ.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 % โดยน้ำหนัก PET ที่เวลาในการให้ความร้อนต่าง ๆ.....	65
ก-1 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของพอลิสไตรีน.....	74
ก-2 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 1% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง .....	74
ก-3 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.75% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง .....	75
ก-4 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง.....	75
ก-5 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง.....	76
ก-6 <sup>1</sup> H NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง.....	76
ข-1 โคโรมาโทแกรมของพอลิสไตรีน.....	78
ข-2 โคโรมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 1% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง.....	78
ข-3 โคโรมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.75% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง.....	79
ข-4 โคโรมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง.....	79
ข-5 โคโรมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง.....	80
ข-6 โคโรมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 1 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง.....	80
ข-7 โคโรมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 2 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง.....	81
ข-8 โคโรมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 3 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-9 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 4 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง.....	82
ข-10 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 5 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง.....	82
ข-11 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 6 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง.....	83
ค-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม.....	85
ค-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 1%.....	85
ค-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 2%.....	86
ค-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 5%.....	86
ค-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 10%.....	87
จ-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิสไตรีน.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย [1-2]

ปัจจุบันพลาสติกเข้ามามีบทบาทกับการดำเนินชีวิต และนับวันยังมีความสำคัญมากขึ้น โดยมีการนำพลาสติกมาใช้ทดแทนไม้ โลหะ และวัสดุอื่น ๆ ที่ได้จากธรรมชาติ เนื่องจากพลาสติกมีหลายชนิด มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทำให้น้ำหนักเบาเพราะความหนาแน่นต่ำ ไม่ผุกร่อน ทนทานต่อการใช้งาน และสามารถดัดแปลงให้มีสมบัติตามต้องการได้โดยง่าย เช่น การเติมสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อปรับปรุงสมบัติ ความสวยงามของพลาสติก และการเติมสารตัวเติม (Fillers) เพื่อประโยชน์ทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติได้โดยนำพลาสติกตั้งแต่ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาทำการผสมให้มีสมบัติตามต้องการได้อีกด้วย ทำให้พลาสติกมีความหลากหลาย และสามารถเลือกใช้ได้อย่างกว้างขวาง

พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) [1] คือพลาสติกชนิดหนึ่งซึ่งมีการนำมาใช้งานอย่างมาก เนื่องจากราคาที่ถูกลง และมีความใส เพราะมีสัณฐานวิทยา (Morphology) แบบอสัณฐาน (Amorphous) โดยมีการนำมาผลิตเป็นของเล่น บรรจุกัมมันต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้า และยังเป็นที่ยอมรับนำมาผลิตเป็นโฟมเพื่อเป็นวัสดุรับแรง แต่พอลิสไตรีนก็มีข้อเสียคือ ความเปราะ

พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) เป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติที่แตกต่างจากพลาสติกอื่น คือสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ ทั้งที่มีความใส เพราะพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตมีความเป็นผลึกสูง แต่ผลึกมีขนาดเล็ก อีกทั้งมีความเหนียวสูงด้วย จึงถูกนำมาผลิตเป็นขวดน้ำอัดลม บรรจุกัมมันต์ต่าง ๆ รวมทั้งการดึงเป็นเส้นใย แต่ราคาค่อนข้างแพง พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตจึงเป็นพลาสติกที่น่าสนใจในการนำมาผสมกับพอลิสไตรีน

อย่างไรก็ตามการนำพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิด มาผสมกันหรือเรียกว่าพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้มีสมบัติตามต้องการนั้น ต้องคำนึงถึงการผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) [2] มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวสูง แรงยึดติดระหว่างวัฏภาคไม่แข็งแรง ซึ่งทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมไม่ดี จึงต้องมีการเติมสารช่วยผสม (Compatibilisers) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายเป็นสะพานเชื่อมระหว่างวัฏภาคเพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างวัฏภาคทั้งสองให้ดีขึ้น เป็นผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต

โดยมีพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์หรือวัฏภาคหลัก และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิฏภาคกระจายตัว ในขั้นแรกได้ทำการผสมพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ที่อัตราส่วนในการผสมและความเร็วรอบสกรูที่แตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผสม จากนั้นทำการเติมสารช่วยผสม คือพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) ซึ่งในสายโซ่พอลิเมอร์ส่วนที่เป็นพอลิสไตรีนของสารช่วยผสมสามารถเกิดการเกี่ยวพันกับพอลิสไตรีนซึ่งเป็นวิฏภาคหลัก และส่วนของหมู่คาร์บาเมตสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตได้ ทำให้สามารถปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างวิฏภาค ซึ่งในการผสมเกิดผ่านการผสมแบบเกิดปฏิกิริยา (Reactive blending) โดยการผสมทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสม เพื่อหาปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างวิฏภาค

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM)
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต และความเร็วยรอบสกรูที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต
3. เพื่อศึกษาปริมาณสารช่วยผสมที่มีอิทธิพลต่อพอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งขอบเขตในการวิจัยได้ออกเป็น 2 ส่วนคือ

### 1.3.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสม

ศึกษาขั้นตอนการสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณตัวริเริ่มเพื่อให้สารช่วยผสมที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์หลักที่ใช้ในการผสม

### 1.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและศึกษาสมบัติต่าง ๆ

1.3.2.1 ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วน และความเร็วรอบสกรูในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและศึกษาพื้นฐานวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2.2 ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารช่วยผสม (1 25 และ 10 phr) แล้วเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนของพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม อีกทั้งอิทธิพลของปริมาณของพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) ซึ่งเป็นสารช่วยผสมที่มีผลต่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตให้ดียิ่งขึ้นหรือนำไปประยุกต์ใช้งานกับพอลิเมอร์ผสมระบบอื่นต่อไป



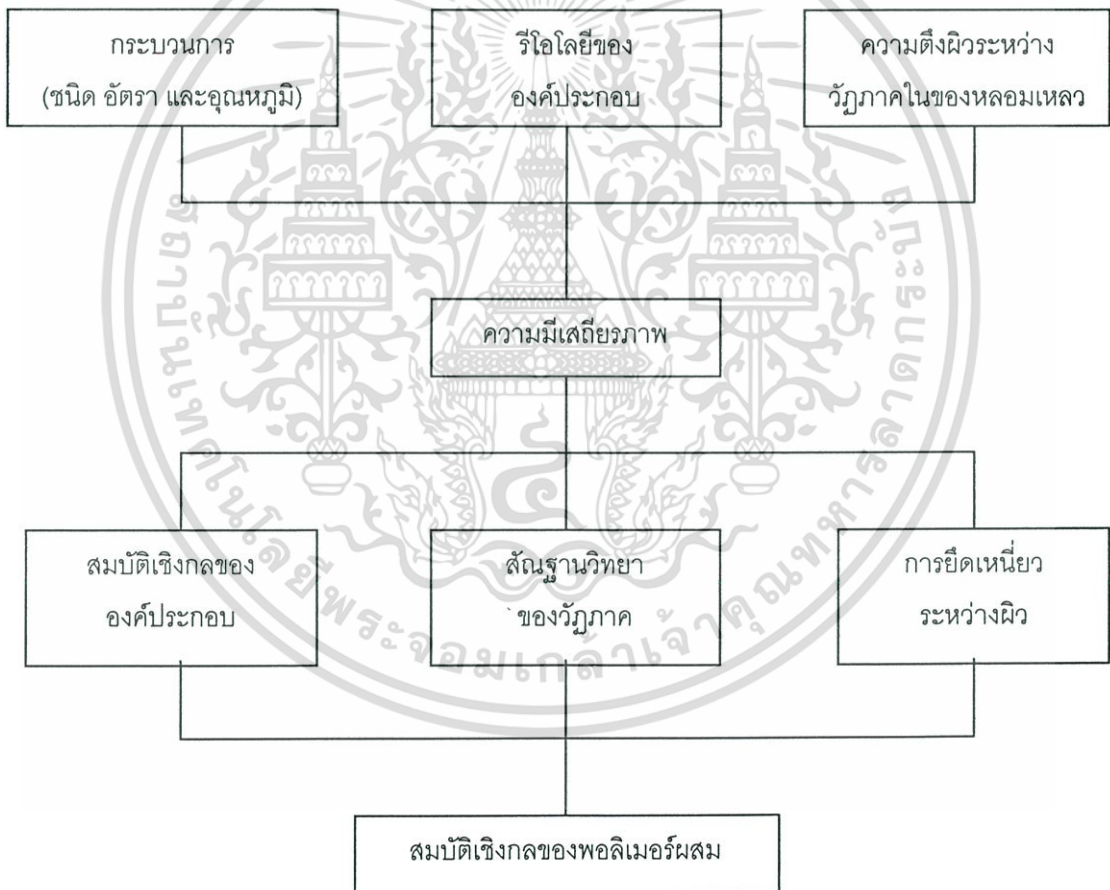
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) [3]

พอลิเมอร์ผสมเป็นการนำพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมเข้าด้วยกัน โดยโครงสร้างของพอลิเมอร์หลักทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันนี้อาจมีการเกิดหรือไม่เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างกัน ซึ่งสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้นี้จะแตกต่างจากสมบัติของพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประเภทของพอลิเมอร์ผสม [4-6]

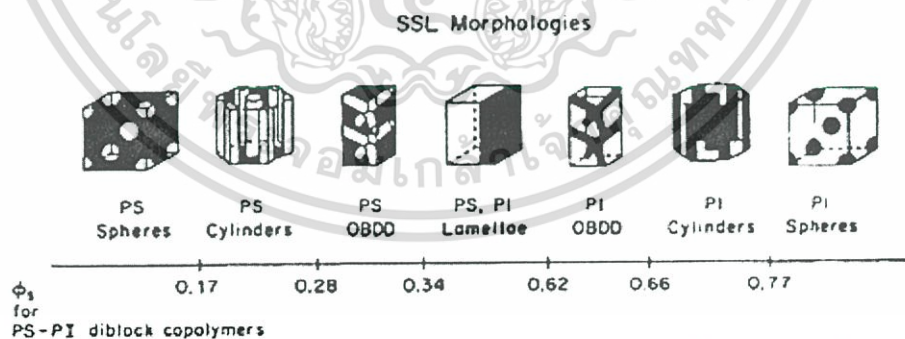
พอลิเมอร์ผสมแบ่งตามสัณฐานวิทยาได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

### 1 พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blends)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้ มีโมเลกุลของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B อยู่รวมกัน มองเห็นเป็นวัฏภาคเดียว โดยที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ A มีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ B ทำให้เกิดแรงดึงดูดกัน สมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีลักษณะคล้ายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม ซึ่งพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีน้อย เช่น ยางธรรมชาติกับพอลิบิวทาไดอิน พอลิสไตรีนกับพอลิฟีนิลีนออกไซด์

### 2 พอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends)

พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้แยกออกจากกันเป็น 2 วัฏภาคอย่างเห็นได้ชัดเจนในระดับจุลภาค โดยที่พอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยเป็นวัฏภาคกระจาย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนกับพอลิไอโซพรีน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของวัฏภาคกระจายตัวน้อย ๆ ทำให้มีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphere) เมื่ออัตราส่วนของวัฏภาคกระจายเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Cylinder) และ OBDD (Ordered Bicontinuous Double Diamond) จนกระทั่งมีอัตราส่วน 50/50 ทำให้มีลักษณะเป็นชั้น ๆ (Lamellae) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของวัฏภาคกระจายจนกระทั่งมากกว่าวัฏภาคหลัก จะเกิดการกลับวัฏภาคกัน ทำให้มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็น OBDD เปลี่ยนเป็นทรงกระบอก และทรงกลม



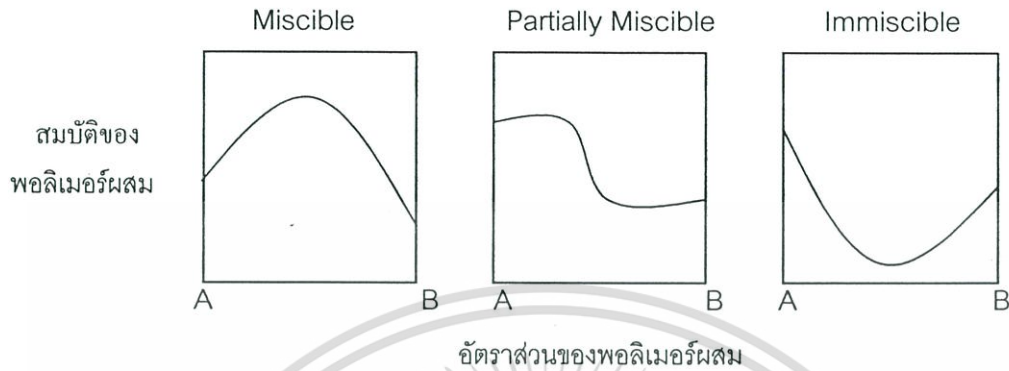
รูปที่ 2.2 ลักษณะของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่ออัตราส่วนของพอลิเมอร์ในการผสมแตกต่างกัน [5]

### 3 พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้บางส่วน (Partially miscible blends)

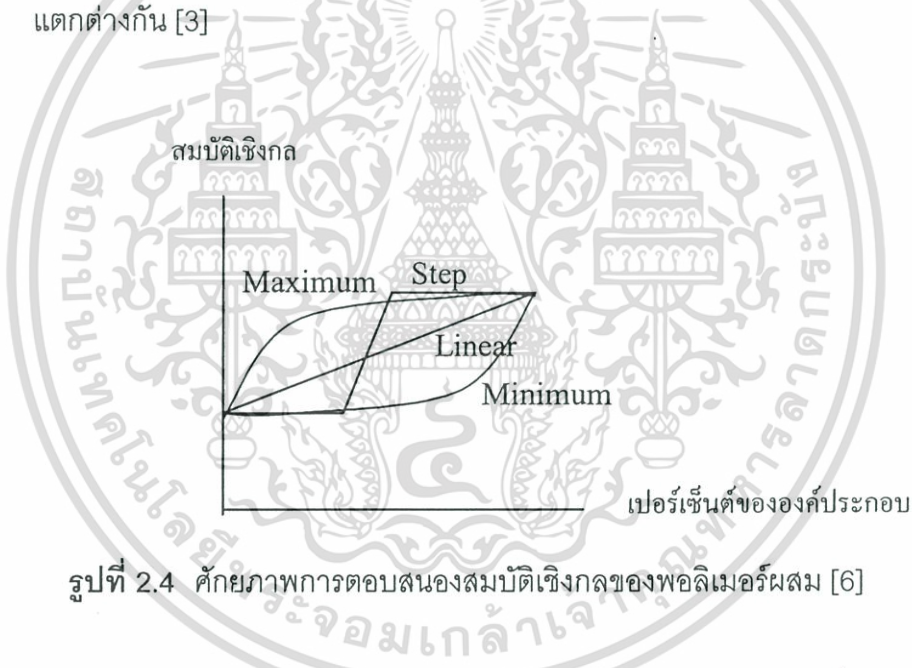
พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้อาจรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ถ้ามีปริมาณของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งน้อยกว่ามาก ๆ เนื่องจากถ้าอัตราส่วนของพอลิเมอร์เท่ากันจะเกิดการแยกออกเป็น

เอกสารเป็นเอกสาร ซึ่งในพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้พอลิเมอร์ A อาจเข้าไปแทรกอยู่ในระนาบผิวหน้าของตัวไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ B ซึ่งช่วยให้วัสดุภาคมีแรงยึดติดที่มากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้มีสมบัติที่ดี เช่น พอลิเอทิลีนกับพอลิไอโซบิวทิลีน



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมประเภทต่าง ๆ เมื่ออัตราส่วนในการผสมแตกต่างกัน [3]



รูปที่ 2.4 ศักยภาพการตอบสนองของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม [6]

จากรูป 2.4 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ นั้น มีได้หลายลักษณะ เช่น สมบัติอาจค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น (Linear) หรือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อัตราส่วนหนึ่ง (Step) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ความเข้ากันได้ และสภาวะในการผสม

วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

- 1 เพื่อปรับปรุงให้พอลิเมอร์มีสมบัติดีขึ้นในราคาที่เหมาะสม
- 2 เป็นการขยายขีดความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ของพอลิเมอร์ที่มีราคาแพง
- 3 เป็นการนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ให้เป็นประโยชน์
- 4 เพื่อสร้างวัสดุที่มีเอกลักษณ์พิเศษเหมาะที่จะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

## 2.2 ความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) [3, 7-10]

ความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) หมายถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน โดยที่สมบัติของพอลิเมอร์ผสมอาจมีแนวโน้มของสมบัติแตกต่างกันไป ขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งทราบได้จากการศึกษา และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมนั้น

การผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมสามารถพิจารณาได้จากค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ มีหน่วยเป็น  $J^{2/3} cm^{-3/2}$  ซึ่งอาจหาได้จากการคำนวณหรือจากการทดลอง

ถ้าค่าตัวบ่งชี้ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากันจะทำให้ค่า  $\Delta H_m = 0$  ดังสมการ 2.1 [7]

$$\Delta H_m = V_m \phi_1 \phi_2 (\delta_1 - \delta_2)^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\Delta H_m$  คือ เอนทาลปีในการผสม

$V_m$  คือ ปริมาตรของการผสม (Volume of mixture)

$\phi_1, \phi_2$  คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 และ 2

$\delta_1, \delta_2$  คือ ค่าบ่งชี้ความสามารถของการละลายของพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 และ 2

และจากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระกิบส์ เอนทาลปี และเอนโทรปี ดังสมการที่ 2.2 ถ้าค่า  $\Delta H_m$  มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G_m$ ) มีค่าติดลบ แสดงว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันนั้นสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\Delta G_m$  คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีในการผสมมีขนาดใหญ่มากพอให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta S_m$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของการผสม

สาเหตุและปัญหาที่ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

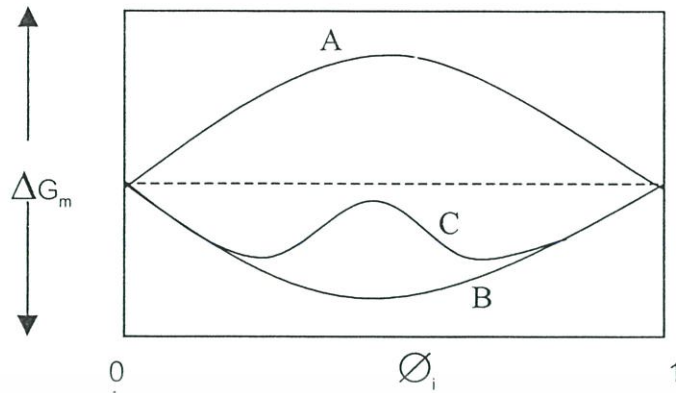
- 1 พลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing) มีค่าเป็นบวกทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์

เทอร์โมไดนามิกส์ของการละลายเข้ากันได้ เป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการผลิตพอลิเมอร์ผสม โดยที่ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ถูกกำหนดโดยสมดุลเอนโทรปี ซึ่งมีผลต่อค่าพลังงานอิสระกิบส์ในการผสม สารโมเลกุลขนาดเล็กมีค่าเอนโทรปีสูงจึงมีความสามารถในการละลายเข้ากันได้ แต่สำหรับพอลิเมอร์ซึ่งจัดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่มีค่าเอนโทรปีต่ำจนเกือบเป็นศูนย์ จึงทำให้ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมถูกกำหนดโดยเอนทาลปีเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการที่พอลิเมอร์จะสามารถผสมเข้ากันได้ พลังงานอิสระกิบส์ในการผสมต้องตรงตามเงื่อนไขตามสมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$\Delta G < 0 \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \Delta G}{\partial \phi^2}\right)_{p,T} > 0 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\phi$  เป็นเศษส่วนโมลของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานอิสระกิบส์ในการผสมกับเศษส่วนโมลต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ทั้งสอง ได้กราฟลักษณะตัวเอส (S) ในกรณีที่สามารถละลายเข้ากันได้บ้าง (C) และได้กราฟรูปพาราโบลาหงายในกรณีที่สามารถละลายเข้ากันได้ (B) และได้กราฟรูปพาราโบลาหงาคว่าในกรณีที่ไม่สามารถละลายเข้ากันได้ (A) ดังรูปที่ 2.5

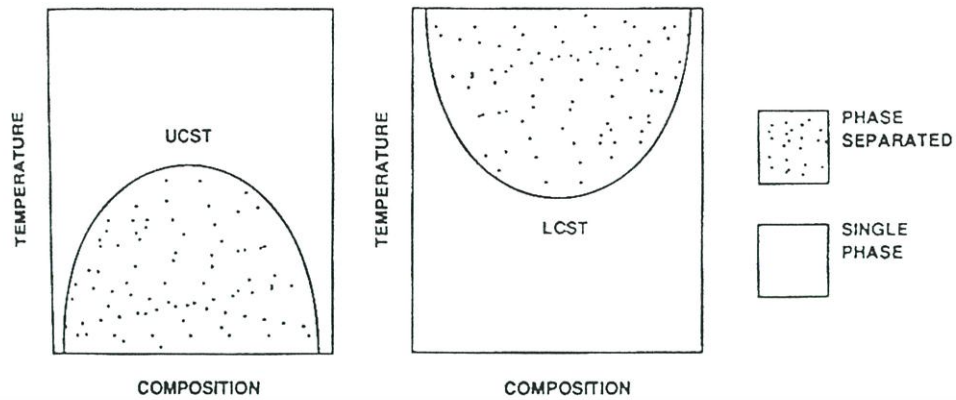


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระกิบส์ในการผสมพอลิเมอร์กับเศษส่วนโมลของพอลิเมอร์ [3] เมื่อ A แสดงถึงความเข้ากันไม่ได้ของพอลิเมอร์  
 B แสดงถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์  
 C แสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนของพอลิเมอร์

การผสมที่เข้ากันได้ (Spontaneous mixing) เกิดขึ้นเมื่อ  $\Delta G$  มีค่าเป็นลบ หรืออาจกล่าวได้ว่า

$$\Delta H - T\Delta S < 0 \quad (2.5)$$

แสดงว่าการผสมที่มีการคายพลังงาน ( $\Delta H < 0$ ) ทำให้สามารถเกิดการผสมเข้ากันได้ ในขณะที่การผสมที่มีการดูดพลังงานเกิดการผสมเข้ากันได้ที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น ดังรูปที่ 2.6 เป็นแผนภาพวิภาค (Phase diagram) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยปริมาตรที่มีลักษณะเป็นแบบ Lower critical solution temperature (LCST) และ Upper critical solution temperature (UCST)



รูปที่ 2.6 แผนภาพวัฏภาคแบบ LCST และ UCST ของพอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิด [9]

โดยทั่วไปแผนภาพวัฏภาค (Phase diagram) ของพอลิเมอร์ผสมเป็นแบบ LCST ซึ่งเกิดการแยกวัฏภาคเมื่ออุณหภูมิสูง เพราะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลหมดไป เนื่องจากพลังงานภายในของโมเลกุลสูงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น ตามหลักการนี้จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างแผนภาพวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมคู่ต่าง ๆ เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ ในทางปฏิบัติได้มีการพัฒนาการผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยการเติมองค์ประกอบที่ 3 (สารช่วยผสม) เพื่อทำให้ไม่เกิดการแยกวัฏภาค

2 ไม่สามารถอธิบายได้ว่าความสัมพันธ์ที่ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น แรงดึงดูดระหว่างขั้วและพันธะไฮโดรเจน เกิดขึ้นทั้งโมเลกุลของสายโซ่หรือเกิดขึ้น ระหว่างกลุ่มที่เฉพาะเจาะจงในสายโซ่พอลิเมอร์เท่านั้น

3 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไป

4 พบว่าการผสมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน อาจทำให้กระบวนการตกผลึกของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงมีผลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่องดังนี้ [10]

- มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี
- มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
- มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) จำเป็นต้องนำมาปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผิวของวัฏภาคพอลิเมอร์ทั้งสอง เพื่อให้สมบัติทางสัณฐานวิทยาดีขึ้น โดยทำการปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดติดระหว่างผิวของวัฏภาคทั้งสองดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 การกระจายตัวของวัฏภาคพอลิเมอร์หลักทั้งสองชนิด

2 รูปร่าง และขนาดของวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ในพอลิเมอร์ผสมซึ่งถูกควบคุมโดยปัจจัยต่าง ๆ คือสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ ลักษณะการไหลของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบทั้งสองชนิด รวมถึงวิธีการผสม สภาวะในการผสม และกระบวนการในการขึ้นรูปด้วย

โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียวเรียกว่า เฮตเทอโรจีเนียส (Heterogeneous) ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) ของพอลิเมอร์หลักชนิดหนึ่ง และมีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งกระจายตัวอยู่ภายในโดยแยกกันอยู่ มีขอบเขตวัฏภาค (Phase boundary) อย่างชัดเจนในระดับจุลภาค

### 2.3 สารช่วยผสม (Compatibiliser) [3,6]

สารช่วยผสมใช้เติมในพอลิเมอร์ผสมเพื่อช่วยให้มีความสามารถในการเข้ากันได้ และลดแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้ขนาดของอนุภาคของวัฏภาคกระจายลดลง และเป็นการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างพื้นผิว (Interfacial adhesion) ของแต่ละวัฏภาคด้วย ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรับและกระจายแรงมากขึ้น (Improved stress transfer) นอกจากนี้สารช่วยผสมจะช่วยทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ทำให้พอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดสามารถผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

สารช่วยผสมแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1 พอลิเมอร์ร่วมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา (Non-reactive copolymers) ได้แก่

พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก (Block copolymers) เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของพอลิบิวทิลีน เทอเรพทาเลตกับเอทิลีน (Poly(butylene terephthalate)/ethylene block copolymer; PB-b-PE) หรือพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random copolymers) เช่น พอลิเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต (Poly(ethylene vinyl acetate)) เป็นต้น

2 พอลิเมอร์ร่วมแบบที่เกิดปฏิกิริยา (Reactive copolymers) คือ นำพอลิเมอร์ที่ต้องการใช้เป็นสารช่วยผสมต่อกิ่งด้วยพอลิเมอร์ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polyethylene grafted maleic anhydride; MA-g-PE)

สารช่วยผสมที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ร่วม (Copolymers) เนื่องจากมีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดที่นำมาผสมกันทำให้สามารถเกิดการเกี่ยวพันหรือเกิดปฏิกิริยากับทั้งสองวัฏภาคได้ และทำหน้าที่คล้ายเป็นสะพานเชื่อมระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมมีแนวโน้มของสมบัติดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารช่วยผสม

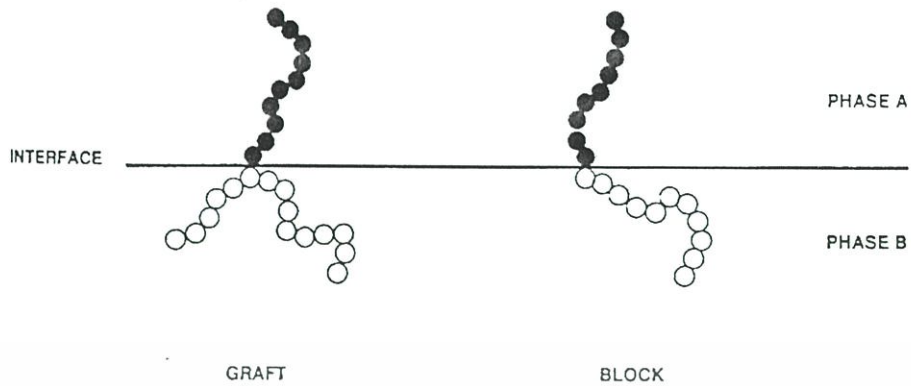
## 2.4 วิธีการทำให้เข้ากันได้ (Methods of compatibilisation) [9,11-12]

วิธีการทำให้เข้ากันได้สามารถแบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้ 2 วิธีดังนี้

- 1 การแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสมเป็นองค์ประกอบที่ 3 เช่น การเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก แบบสุ่มหรือแบบต่อกิ่ง
- 2 ไม่มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสม เช่น การทำให้เกิดปฏิกิริยาขณะทำการผสม

### 2.4.1 การแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสมเป็นองค์ประกอบที่ 3

งานวิจัยมากมายมีการเติมสารช่วยผสมที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก หรือการเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง เพื่อให้เกิดการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยพบว่าการเลือกสารช่วยผสม (Compatibilisers) จะเลือกพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกหรือแบบต่อกิ่งที่มีส่วนที่เหมือนกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ร่วมกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพอลิเมอร์ร่วมที่เติมลงไปทำให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) บริเวณพื้นผิวของวัฏภาคทั้งสอง ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะการเกี่ยวพันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วม โดยส่วนใหญ่พบว่าการใช้สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกเป็นที่นิยมมากกว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง เพราะเชื่อว่าจะให้ลักษณะการเกี่ยวพันระหว่างวัฏภาคที่แข็งแรงกว่า งานวิจัยของ Fayt และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างของสารช่วยผสมที่มีผลต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับพอลิสไตรีน โดยใช้สารช่วยผสมที่มีโครงสร้างต่างกัน และพิจารณาสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดพบว่า สารช่วยผสมแบบบล็อกมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบต่อกิ่ง สารช่วยผสมแบบโคปอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบโคปอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมที่มีรูปร่างเหมือนดาว และสารช่วยผสมแบบโคปอลิเมอร์ที่เป็น Tapered มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบโคปอลิเมอร์บริสุทธิ์ นอกจากนี้อิทธิพลของโครงสร้างของสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมแล้ว น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมก็มีอิทธิพลเช่นกัน จากงานวิจัยของ Paul [12] พบว่าการละลายของไฮโมพอลิเมอร์ที่เป็นวัฏภาคกระจายของพอลิเมอร์ผสมเข้าไปยังส่วนของพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกเกิดขึ้นได้ดี เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของไฮโมพอลิเมอร์น้อยกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก อย่างไรก็ตามในส่วนที่เป็นวัฏภาคหลักของพอลิเมอร์ผสมสามารถเกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกได้ ถึงแม้ว่าน้ำหนักโมเลกุลของทั้ง 2 ส่วนแตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และแบบต่อกิ่งที่บริเวณระหว่างวัฏภาค [9]

#### 2.4.2 ไม่มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสม เช่น การทำให้เกิดปฏิกิริยาขณะทำการผสม

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมอาจทำได้ โดยไม่มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสมซึ่งแตกต่างจากวิธีอื่น คือ องค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมถูกเลือกเพื่อทำการปรับปรุง โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างการผสมแบบหลอมเหลว โดยไม่มีขั้นตอนแยกเติมสารช่วยผสม วิธีนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางการค้า เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเตอร์ พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอไมด์กับพอลิโพลีเอทิลีนสไตรีนไคโบลอสที่มีการต่อกิ่งด้วยหมู่ฟังก์ชัน ทำให้ได้พอลิเอไมด์ที่มีความเหนียว

การทำให้เข้ากันได้โดยวิธีนี้อาจใช้การผสมแบบกะ (Batch) แต่ส่วนใหญ่นิยมการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น กระบวนการอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว และชนิดเกลียวหนอนคู่ เพราะการผสมแบบต่อเนื่องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า และสามารถออกแบบอุปกรณ์เพื่อกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการที่เกิดจากปฏิกิริยาได้โดยการระเหย

การผสมแบบไม่มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสม ถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ดังนี้

1 การทำให้เกิดโครงสร้างแบบต่อกิ่งหรือแบบบล็อกลงบนพอลิเมอร์ร่วม โดยเกิดพันธะเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดปฏิกิริยาขณะทำการผสม เช่น การเติมตัวริเริ่มแบบอนุมูลอิสระลงไประหว่างการผสม

2 การทำให้เกิดโครงสร้างแบบบล็อกบนพอลิเมอร์ร่วม โดยเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนที่สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ วิธีนี้เหมาะกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการแบบขั้น (Condensation polymerisation)

3 กลไกการตัดและรวมกันใหม่ของพอลิเมอร์องค์ประกอบ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งหรือแบบบล็อก วิธีนี้ต้องใช้แรงเฉือนสูงมากระหว่างการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การสังเคราะห์สารช่วยผสม [13-16]

ในงานวิจัยนี้ สารช่วยผสมที่ใช้ คือพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมตซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบที่เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากมีหมู่คาร์บาเมต ซึ่งสามารถสังเคราะห์ในระบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันแบบซัสเพนชันพอลิเมอไรเซชัน (Suspension polymerization)

### 2.5.1 กลไกการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

การพอลิเมอไรเซชันแบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

#### 2.5.1.1 อิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน (Emulsion polymerisation)

อิมัลชันพอลิเมอไรเซชันเริ่มจากการทำให้เกิดอิมัลชันของมอนอเมอร์ในน้ำโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ทำให้กระจายน้ำมันในน้ำได้ (Oil in water; o/w) แล้วจึงพอลิเมอไรซ์โดยเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งละลายได้ในน้ำ และเกิดอนุภาคมูลหุขึ้นเมื่อให้ความร้อน

#### 2.5.1.2 ซัสเพนชันพอลิเมอไรเซชัน (Suspension polymerisation)

ในซัสเพนชันพอลิเมอไรเซชัน ตัวริเริ่มปฏิกิริยาละลายในมอนอเมอร์ที่ทำให้เกิดการกระจายตัวอยู่ในน้ำในลักษณะหยดเล็ก ๆ ขนาด 100-10,000  $\mu\text{m}$  โดยทั่วไปการควบคุมขนาดของมอนอเมอร์ตอนเริ่มต้นทำได้โดยใช้สารช่วยในการกระจาย (Dispersing agent) และสารช่วยความเสถียร (Stabilising agent) ร่วมกับการปั่นกววนเชิงกล (Mechanical agitation) ผลิตรภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ด (Bead) ที่มีขนาดใกล้เคียงกับหยดของมอนอเมอร์ตอนเริ่มต้น ซึ่งปฏิกิริยาและจลนศาสตร์ของการเกิดพอลิเมอไรเซชันในหยดของมอนอเมอร์คล้ายกับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerisation)

#### 2.5.1.3 อินเวอร์อิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน (Inverse emulsion polymerisation)

กระบวนการอินเวอร์อิมัลชันพอลิเมอไรเซชันเป็นการทำให้เกิดการกระจายของมอนอเมอร์ที่ละลายได้ในน้ำ เช่น อะคริลาไมด์ (Acrylamide) ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว เช่น ไทลีน (Xylene) หรือ พาราฟินส์ (Paraffins) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวประเภทกระจายในน้ำมันได้ (Water in Oil; w/o) ซึ่งพบว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุ เช่น ซอร์บิทอน มอนอโอเลอเตต (Sorbitan monooleate) ทำให้อินเวอร์อิมัลชันมีความเสถียรมากกว่าเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุ และในปฏิกิริยานิยมใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ทำให้ได้อนุภาคของพอลิเมอร์ขนาด 50-300 nm แขนงลอยอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เรียกว่ารีเวอร์สลาเท็กซ์ (Reverse latex) ซึ่งมีความเสถียรน้อยกว่าลาเท็กซ์จากอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน ปัจจุบันได้มีการนำรีเวอร์สลาเท็กซ์ไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการค้าหลายชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์ผ้าอ้อมสำเร็จรูป ผ้าอนามัย การตกตะกอนน้ำเสีย หรือการดักจับโลหะ เป็นต้น

#### 2.5.1.4 ดิสเพอร์ชันพอลิเมอร์ไรเซชัน (Dispersion polymerisation)

ดิสเพอร์ชันพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นการพอลิเมอร์ไรเซชันโดยมอนอเมอร์ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ในลักษณะเดียวกับพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดในสารละลาย เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดยาวขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถละลายได้ในตัวกลางต่อไป จึงเกิดการรวมกันเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ขนาด 10-10,000 nm กระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ดังกล่าว โดยมีความเสถียรเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในตัวกลางนั้น

#### 2.5.2 องค์ประกอบของการสังเคราะห์สารช่วยผสม

ในงานวิจัยนี้สังเคราะห์สารช่วยผสมแบบดิสเพอร์ชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันนี้มีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญดังนี้คือ

##### 2.5.2.1 มอนอเมอร์

ความแตกต่างของความสามารถในการละลายของมอนอเมอร์ในตัวกลาง เป็นตัวกำหนดอัตราและกลไกของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในการเกิดพอลิเมอร์ มอนอเมอร์ส่วนมากที่ใช้ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย เช่น สไตรีน (ละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เท่ากับ 0.07 g/L) บิวทาไดอีน (0.8 g/L) รวมทั้งมอนอเมอร์ที่ละลายน้ำได้มากขึ้น เช่น ไวนิลคลอไรด์ (7 g/L) เมทิลเมทาคริเลต (1.6 g/L) และไวนิลอะซิเตต (25 g/L)

##### 2.2.5.2 สารลดแรงตึงผิว

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

##### 1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ (Ionic surfactants)

- สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactants)

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ ได้แก่ เกลือของโซเดียม โฟแทสเซียม แอมโมเนียม และกรดไขมัน สารอนุพันธ์ (Derivative) ซัลเฟต และซัลโฟเนตของอะลิฟาติก เอริลอะลิฟาติก หรือสารประกอบพวกแนพทีนิก

- สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactants)

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ได้แก่ เกลือของควอเทอร์นารี แอมโมเนียม (Quaternary ammonium)

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกมีราคาแพงกว่า และมีประสิทธิภาพต่ำกว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ เนื่องจากประจุบวกของสารลดแรงตึงผิวจำนวนหนึ่งเกิดการทำให้เป็นกลาง (Neutralise) กับประจุลบที่มาจากการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยา จึงคงเหลือสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกในการทำให้อนุภาคเสถียรน้อยกว่าเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่เท่ากันตอนเริ่มปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและบวก (Amphoteric surfactants หรือ Zwitterionics)

สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุลบและบวกเป็นสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเป็นได้ทั้งประเภทที่มีประจุลบหรือบวกขึ้นกับ pH ของตัวกลาง

## 2 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Non-ionic Surfactants)

สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ ได้แก่ สารที่โมเลกุลประกอบด้วย กรดไขมันเอทอกซิเลต (Ethoxylated fatty acid) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) แอลคิลฟีนอล (Alkylphenol) เอมีน (Amine) และ ไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส (Hydroxyethyl cellulose) นอกจากนี้พอลิเมอร์ร่วมแบบบลิคที่โมเลกุลมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อยู่ในสายโซ่ จัดได้ว่าเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุประเภทหนึ่ง เช่น Poly(propylene oxide)-*b*-poly(ethylene oxide) หรือ Polystyrene-*b*-poly(ethylene oxide)

สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ มีประสิทธิภาพในการทำให้อนุภาคเสถียรต่ำกว่าเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ โดยทั่วไปใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ 0.2-3 % โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับน้ำ ในขณะที่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ 2-10 % ในการเตรียมดังนั้นจึงนิยมใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ เช่น เพิ่มความเสถียรต่อ freeze-thaw และต่อแรงเฉือน (Shear) หรือช่วยในการควบคุมขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาค นอกจากนี้การใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีความเสถียรต่อการเปลี่ยน pH ในช่วงกว้าง

### 2.5.2.3 ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

#### 1 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวด้วยความร้อน (Thermal initiator)

ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น โปแทสเซียม หรือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ 2,2'-เอโซบิส (2-เอมิไดโนพโรเพน (2,2'-Azobis(2-amidinopropane)) ไดไฮโดรคลอไรด์ เมื่อได้รับความร้อนแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (Free radical) ในน้ำ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่ละลายได้บ้างเป็นอนุมูลอิสระที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า Oligoradical แล้วจึงเข้าไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในไมเซลล์

ตัวริเริ่มปฏิกิริยาอีกประเภทหนึ่งที่มีการใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ประเภทที่ละลายในน้ำได้บางส่วน เช่น คิวมีลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumyl hydroperoxide) กรดซัคซินิกเปอร์ออกไซด์ (Succinic acid peroxide) เทอร์เทียรีบิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (*t*-Butyl hydroperoxide) 1,1-ไดฟีนีลอีเทนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (1,1-Diphenylethane hydroperoxide) และสารประกอบเอโซ (Azo) เช่น กรด 4,4'-เอโซบิส (4-ไซยาโนเพนทาโนอิก) (4,4'-Azobis(4-cyanopentanoic acid) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

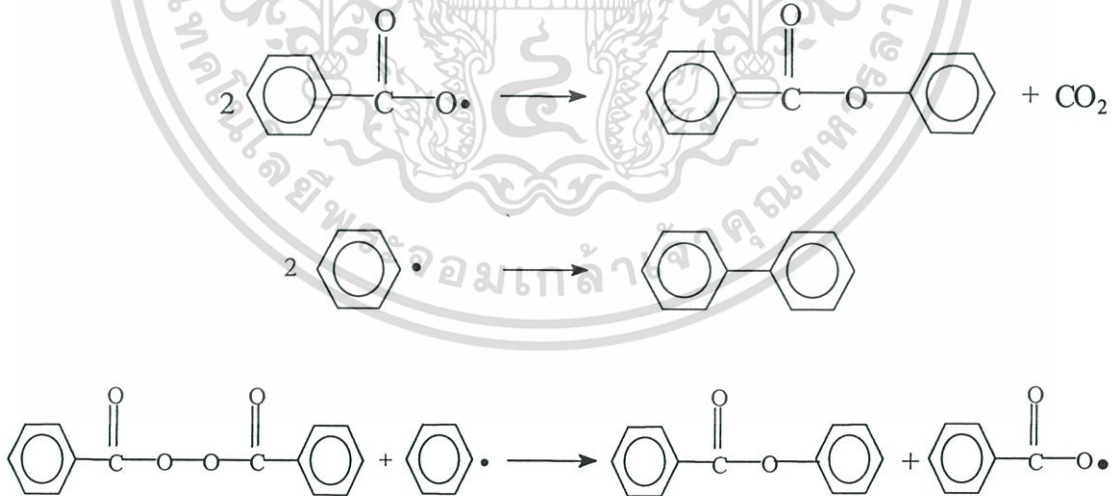
acid)) ตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทนี้กระจายอยู่ระหว่างในน้ำและในมอนอเมอร์ โดยมีอัตราของการแตกตัวต่างกันในแต่ละเฟส

นอกจากนี้ในบางกรณียังอาจมีการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ไม่ละลายในน้ำ ได้แก่ เอโซบิส-ไอโซบิวทีโรไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile; AIBN) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) และลอริลเปอร์ออกไซด์ (Lauryl peroxide) ซึ่งละลายในมอนอเมอร์ที่ไม่ละลายในน้ำ โดยอนุมูลอิสระเกิดขึ้นในหยดของมอนอเมอร์ที่มีขนาดเล็กมาก

เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เกิดการแตกตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermolysis) ในโมเลกุลประกอบด้วยหมู่เปอร์ออกไซด์ ซึ่งแตกตัวที่อุณหภูมิ 50-100 °C โดยเมื่อแตกตัวเกิดอนุมูลอิสระที่เหมือนกัน (Homolysis) ดังสมการ [13]



อย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีเพียงบางส่วนที่ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์เพราะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้สูญเสียไปดังสมการ [14]



## 2 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ (Redox initiator)

ตัวริเริ่มปฏิกิริยาในแบบรีดอกซ์มีส่วนประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่น เปอร์ซัลเฟต (Persulphate) หรือ คิวมิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumyl hydroperoxide) หรือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) กับไอออนของเฟอร์รัส (Ferrous) ซัลไฟท์ (Sulphite) หรือ

เอกสารนี้เป็นเพียงเอกสารตัวอย่างที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบซัลเฟต (Bisulphate) ซึ่งสามารถแตกตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $50^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้ส่วนประกอบทุกส่วน อาจละลายได้ในน้ำหรือส่วนประกอบหนึ่งละลายน้ำและอีกส่วนประกอบหนึ่งละลายในมอนอเมอร์

### 3 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวด้วยแสง (Photo initiator)

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระเกิดได้เมื่อให้แสง UV หรือรังสี  $\gamma$  แก่ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตัวอย่างของตัวริเริ่มที่แตกตัวได้เมื่อมีการฉายแสง เช่น เทตระเอทิลไทอูรามไดซัลไฟด์ (Tetraethylthiuram disulphide; TD) นอกจากนี้การฉายแสงอาจทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของมอนอเมอร์ และ/หรือของน้ำหรือสารลดแรงตึงผิว

#### 2.5.3 ชนิดของถังปฏิกิริยา (Reactor Types)

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์มี 3 ชนิด ได้แก่ แบบท่อต่อเนื่อง (Continuous tubular) แบบกะ (Batch reactor) แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) โดยสามารถใช้แบบใดก็ได้ แต่ต้องคำนึงถึงประโยชน์สูงสุดที่จะได้รับและข้อจำกัดต่าง ๆ ซึ่งขึ้นกับพอลิเมอร์แต่ละชนิด อาจมีการใช้ถังปฏิกิริยาหลายแบบผสมกันเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ โดยรายละเอียดของถังปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ มีดังนี้

2.5.3.1 แบบท่อต่อเนื่อง (Continuous tubular reactor) เมื่อทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดพอลิเมอร์ทำให้ความหนืดในท่อสูงขึ้น และเกิดความแตกต่างของระยะเวลาที่พอลิเมอร์อยู่ในท่อ เนื่องจากอัตราการไหลต่างกัน พอลิเมอร์บริเวณผิวสัมผัสกับท่อมีอัตราการไหลช้าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่บริเวณกึ่งกลางท่อ ซึ่งมีอัตราการไหลเร็ว ด้วยเหตุนี้ทำให้มีความแตกต่างของมวลโมเลกุลมาก (การกระจายมาก) อีกทั้งถังปฏิกิริยาแบบนี้มีปัญหาในเรื่องการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งความร้อนที่สะสมในท่ออาจทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงรวมถึงการสลายตัวของพอลิเมอร์ด้วย

2.5.3.2 แบบกะหรือแบบถังเดี่ยว (Batch reactor) ปฏิกิริยาลิ้นสุดในถังเป็นคราว ๆ ไป ระยะเวลาของพอลิเมอร์ในถังแต่ละครั้งกำหนดให้เท่ากันได้ ใบพัดที่นิยมใช้รูปร่างคล้ายริบบิ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวและปีกใหญ่ เพื่อกวนให้สารที่อยู่ด้านบนและล่างของถังผสมกันอย่างทั่วถึง

2.5.3.3 แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor) คล้ายแบบกะ แต่ระยะเวลาที่พอลิเมอร์อยู่ในถังแต่ละถังสั้นกว่า เป็นแบบที่รวมข้อดีของถังปฏิกิริยา 2 แบบแรกไว้ด้วยกัน นิยมใช้กับพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ เพราะองศาการเกิดพอลิเมอร์สัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการเกิดพอลิเมอร์และการที่ปลายโซ่พอลิเมอร์ทั้ง 2 โซ่มารวมกัน ถังปฏิกิริยาแบบนี้ให้พอลิเมอร์ที่มีการกระจายของมวลโมเลกุลแคบกว่าการใช้แบบกะ หรือถังเดี่ยว นอกจากนี้ยังเหมาะต่อการใช้เตรียมพอลิเมอร์ร่วมเพราะสามารถเตรียมพอลิเมอร์ร่วมที่มีองค์ประกอบในสายโซ่อย่างสม่ำเสมอ

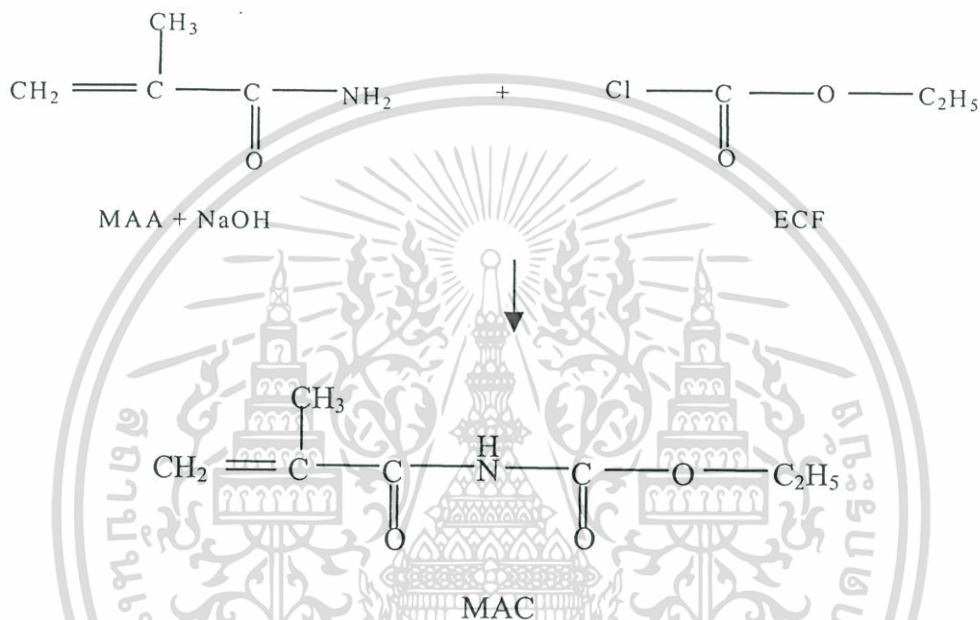
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารช่วยผสม [16]

### 2.5.4.1 การสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต

(Ethyl N-methacryloylcarbamate; MAC)

เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต โดยสามารถสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเมทาคริลลาไมด์ (MAA) และเอทิลคลอโรฟอร์มेटดังสมการ [16]

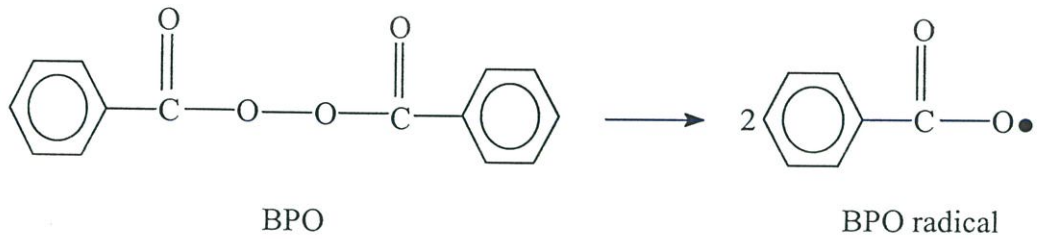


โดยหมู่คาร์บาเมตสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET ได้ในระหว่างกระบวนการผสมพอลิเมอร์ผสมได้

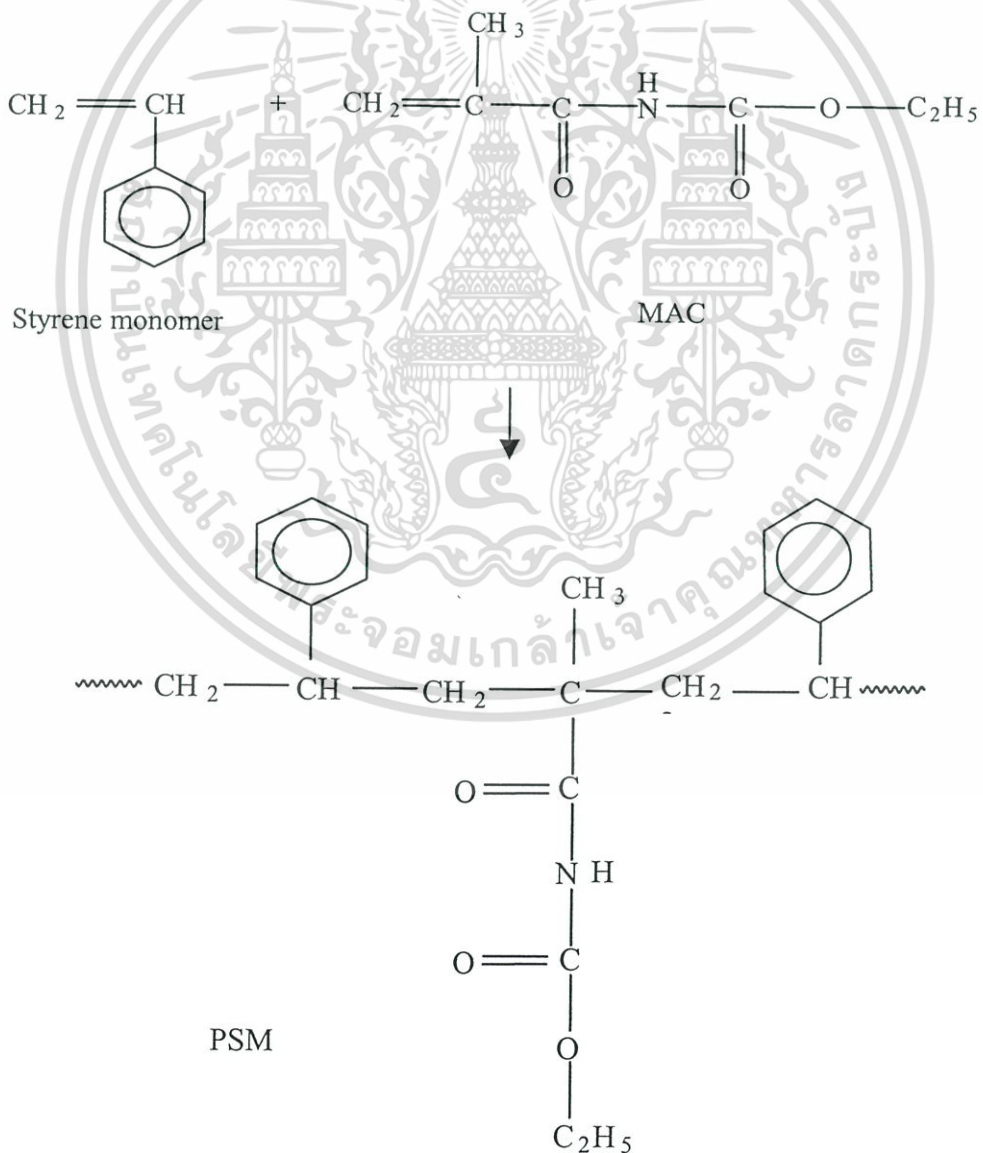
### 2.5.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (Poly(styrene-co-ethyl N-methacryloyl carbamate); PSM)

พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) เป็นสารช่วยผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีนมอนอเมอร์และ MAC โดยเกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม ดังสมการ [16]

- การแตกตัวของเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา



- การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีนมอนอเมอร์กับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC)

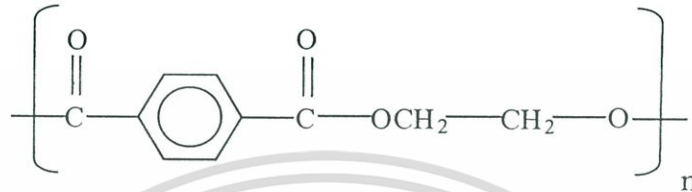


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 2.6 พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) [17-18]

พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตเป็นพลาสติกพอลิเอสเตอร์แบบเส้นตรง (Linear thermoplastic polyester) ที่ทางการค้าใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตเส้นใย พิล์มและวัสดุขึ้นรูปต่าง ๆ หน่วยซ้ำของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) เป็นเอสเตอร์ของกรดเทอเรพทาลิก (Terephthalic acid) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ดังรูปที่ 2.8

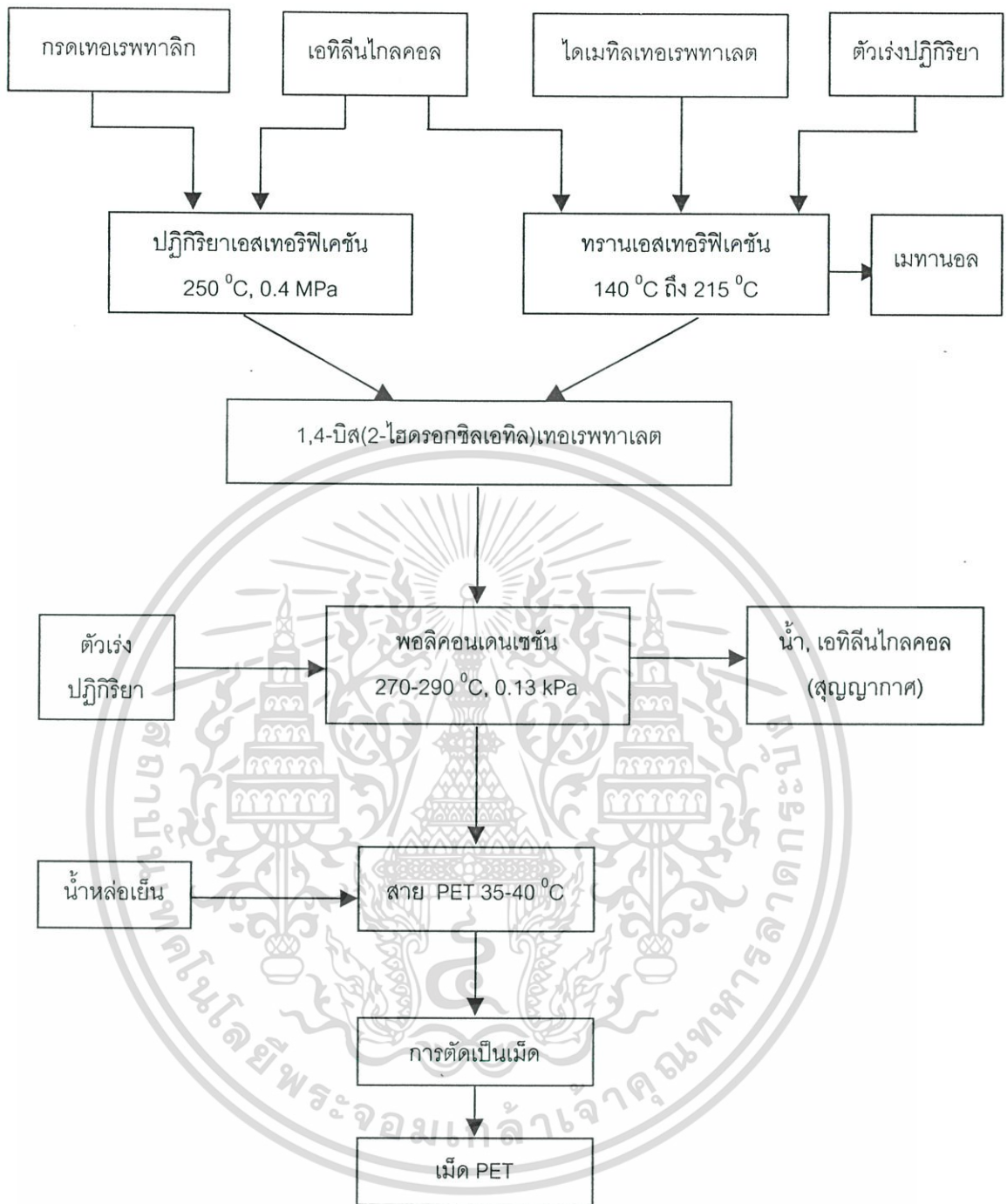


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต [17]

พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) สามารถอยู่ในรูปพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) หรือพอลิเมอร์ผลึก (Crystalline) ก็ได้ ค่าองศาความเป็นผลึกมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 60 % ซึ่งมีช่วงที่กว้างเนื่องมาจากพอลิเมอร์มีประสบการณ์ทางความร้อน (Thermal history) ที่ต่างกัน อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) 265 °C อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) 80 °C อัตราการเกิดผลึกสูงสุดเกิดขึ้นที่ 170-180 °C สิ่งเหล่านี้มีความสำคัญต่อสภาวะในการผลิตเส้นใยและแผ่นฟิล์ม ซึ่งสามารถผลิตได้จากการอัดรีด (Extrusion) และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิบรรยากาศเพราะมีภาคตัดขวางที่บาง การเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้อยู่ในรูปพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นจึงต้องนำมาผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) 80 -100 °C เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวและเกิดผลึก

ชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ สามารถอยู่ในรูปพอลิเมอร์อสัณฐานหรือผลึก ขึ้นกับอุณหภูมิในการขึ้นรูป ถ้าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และชิ้นงานบางเพียงพอที่ทำให้เกิดการเย็นตัวทำให้ได้วัสดุอสัณฐานและชิ้นงานโปร่งใส ชิ้นงานเหล่านี้ห้ามใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เพราะชิ้นงานหดตัวและขุ่น สำหรับชิ้นงานที่เป็นผลึกสามารถผลิตได้โดยการเติมสารเหนี่ยวนำให้เกิดผลึก (Ionomer nucleating agents) และพลาสติกไซเซอร์ (Plasticisers) ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ 130 °C เพื่อทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ (Rearrangement) เกิดเป็นผลึก การขึ้นรูปในรูปผลึกอาจใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เพื่อให้มีความเสถียรและคงรูปที่อุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลว ( $T_m$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การผลิตพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) [18]

ในตลาดมีการใช้พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตในการทำขวดน้ำอัดลมขนาด 2 ลิตร ซึ่งได้จากเทคนิคการดึงฟิล์มแบบ 2 ทิศทาง (Biaxial stretching) ในขั้นตอนแรกพาริสันอสัญฐาน (Amorphous parison) ถูกผลิตโดยการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่เย็น จากนั้นพาริสัน (Parison) ถูกให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และเป่าลมเกิดแรงดึง 2 ทิศทางภายใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

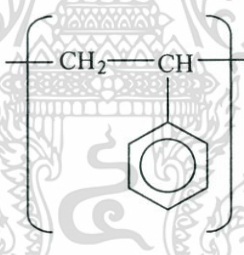
แม่พิมพ์ขวด ขวดที่ได้มีผนังบาง ความแข็งแรงดั่งสูง สามารถโค้งงอ เหนียวและป้องกันการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน

พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้ว แต่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ๓ คุณสมบัติ (Insulating properties) แม้ที่ความถี่สูงเพราะการจัดเรียงตัวของขั้วถูกจำกัดอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตมีความทนทานต่อน้ำและกรดแร่เจือจาง แต่ร่องไวดต่อเบส เสื่อมสภาพในกรด ไนตริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น มีความต้านทานการเสื่อมสภาพทางเคมีเนื่องจากแสง (Photochemical degradation) ดีมาก

พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) สามารถเสริมแรงได้ด้วยเส้นใยแก้ว เพื่อการขึ้นรูปแบบฉีดได้ชิ้นงานเป็นคอมโพสิต (Composites) ซึ่งทนต่อความร้อนได้ถึง  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 2.7 พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) [17-18]

พอลิสไตรีนเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนมอนอเมอร์ ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2$ ) โดยสามารถเกิดผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ ประจวบ และประจุลบได้ เนื่องจากสไตรีนมอนอเมอร์สามารถให้และรับอิเล็กตรอนได้ สูตรโครงสร้างของสไตรีนแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของพอลิสไตรีน [17]

พอลิสไตรีนมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงแบบอะแทกติก ไม่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลจึงอยู่ในรูปอสัณฐาน มีลักษณะแข็งเปราะ ไม่มีสี เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใส ไม่ดูดความชื้นและไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากพอลิสไตรีนไม่มีขั้วจึงสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว โดยการละลายขึ้นกับค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์กับตัวทำละลาย โดยทั่วไปค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายของพอลิสไตรีนมีค่าเท่ากับ  $18.6\text{ MPa}^{1/2}$  ( $9.1\text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ ) แต่พอลิสไตรีนสามารถละลายในตัวทำละลายที่มีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันประมาณ  $1.8\text{ MPa}^{1/2}$  ( $0.9\text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ ) ได้ พอลิสไตรีนชนิดไอโซแทกติกและซินดีโอแทกติกไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง แต่ชนิดอะแทกติกสามารถละลายได้ เมื่อถูกความร้อนเกิดการเสื่อมสภาพทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลง พอลิสไตรีนโดยทั่วไปมีมวลโมเลกุลประมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50,000–200,000 g/mol สามารถเกิดการแตกหักเนื่องจากความเค้นจากสารเคมี (Stress-cracking agents) ต่าง ๆ เช่น อะซิฟาทิกไฮโดรคาร์บอน ก๊าซโซลีน น้ำมันมะพร้าว และเทอร์เพน-ทาย การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนมีอิทธิพลมากต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการไหล ทนต่อแรงดึงได้ดี แต่ทนต่อความร้อนต่ำ เนื่องจากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ 80 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.05–1.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความถ่วงจำเพาะต่ำ ละลายได้ในตัวทำละลายพวกอะโรมาติก ผลิตภัณฑ์รูปต่าง ๆ ได้ง่าย ราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ เปราะ

การนำพอลิสไตรีนไปใช้งานมีอย่างกว้างขวาง โดยสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติโดยการเติมสารเติมแต่งบางชนิดลงไป ทำให้สมบัติของพอลิสไตรีนดีขึ้น เช่น การนำมาใช้เป็นถังพลาสติก ขวดพลาสติก ภาชนะใส่อาหารชนิดใส ชิ้นส่วนตู้เย็น ของเล่น เครื่องตัด ม้วนเทป เครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนในรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมทำเป็นโฟมสำหรับบรรจุสิ่งของป้องกันการแตก การกระเทือน โดยนำเอาเม็ดพลาสติกที่หลอมมาเติมเพนเทน แล้วให้ความร้อนด้วยไอน้ำ เม็ดขยายตัวถึง 40 เท่า แล้วอัดลงในแม่พิมพ์ได้โฟมตามต้องการ

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. S. Lee และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) โดยใช้พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) เป็นสารช่วยผสม โดยใช้กระบวนการผสมแบบปิด (Internal mixer) ในการผสมที่อัตราส่วน PET:PS เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก และทำการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC) ซึ่งใช้ในการสังเคราะห์ PSM จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) พบว่าหมู่คาร์บาเมตของ PSM สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) ของ PET ที่บริเวณพื้นผิว และจากการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ MAC พบว่าเมื่อปริมาณ MAC เพิ่มขึ้น ความขรุขระบริเวณพื้นผิวซึ่งแสดงถึงการทำปฏิกิริยาระหว่าง PSM และ PET มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และปริมาณ MAC ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 3.8 เปอร์เซ็นต์ และจากการเปรียบเทียบสมบัติระหว่างพอลิเมอร์ที่เติม PSM และไม่เติม PSM พบว่าการเติม PSM ทำให้การยึดติดที่พื้นผิว สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลดีขึ้น

M. Y. Ju และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) โดยใช้สารช่วยผสม 2 ชนิดร่วมกันคือ พอลิเมทิลีนฟีนอลีนไอโซไซยาเนต (PMPI) และสไตรีนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (SMA) เป็นสารช่วยผสม ในการผสมได้กำหนดให้อัตราส่วนของ PET คงที่ ๆ 75 เปอร์เซ็นต์ และทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ PS SMA และ PMPI โดยผสมด้วยกระบวนการอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นได้ทำการทดสอบสมบัติทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน ลักษณะพื้นผิว และสมบัติเชิงกล พบว่าการเติม SMA เป็นสารช่วยผสมเพียงชนิดเดียว นั้น ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แทบจะไม่แตกต่างจากการผสมด้วยการไม่เติมสารช่วยผสมเลย แต่เมื่อเติม PMPI ร่วมด้วย พบว่าการเติม PMPI เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้การยึดติดระหว่างพื้นผิวของ PS และ PET ดีขึ้น ซึ่งดูได้จากค่าความหนืดซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น และจากลักษณะพื้นผิว พบว่าเมื่อเติม PMPI ทำให้วัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กลง ไม่เกิดการแยกวัฏภาคที่ชัดเจน อีกทั้งยังพบว่าถ้าปริมาณ PMPI มากขึ้น วัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กลงมาก และมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการผสมโดยไม่เติมสารช่วยผสมอย่างมาก

C. R. Chiang และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอไมด์ 6 (PA6) และพอลิฟีนอลีนอีเทอร์ (PPE) โดยใช้พอลิเมทิลีนฟีนอลีนไอโซไซยาเนต (PMPI) เป็นสารช่วยผสม ด้วยการใส่หมู่ฟังก์ชันของ PMPI เป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) ระหว่างหมู่ปลายของ PA6 และ PPE ระหว่างกระบวนการหลอมเหลว เกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมที่บริเวณพื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 จากนั้นนำมาทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คกับเวลา อัตราการไหลขณะหลอมเหลว (MFR) สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน และศึกษาสัญญาณวิทยา โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม และพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม พบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม สมบัติต่าง ๆ ซึ่งแสดงถึงการเกิดแรงยึดติดที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม เช่น ความหนืด สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาสัญญาณวิทยาพบว่าที่อัตราส่วนของ PA6:PPE เท่ากับ 50:50 นั้น เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นขนาดของอนุภาคในวัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง

C. T. Maa และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) ผ่านการผสมแบบเกิดปฏิกิริยา โดยใช้พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-ไกลซิติดิเมทาคริลेट (SG) ซึ่งได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอยเป็นสารช่วยผสม พอลิเมอร์ร่วมนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายของ PET (หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิล) ได้ภายใต้สภาวะการหลอมเหลวได้พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง SG-g-PET โดยปฏิกิริยาถูกเร่งโดยเอทิลไตรฟีนิลฟอสฟอเนียมโบรมไนด์ (Ethyl triphenyl phosphonium bromide; ETPB) ในปริมาณเล็กน้อย (200 ppm) แต่สารตั้งต้นต่าง ๆ ต้องทำให้แห้งก่อนเพื่อป้องกันการถูกไฮโดรไลต์ของอีพอกซี หลังจากนั้นทำการผสมด้วยกระบวนการอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ นำไปทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คกับเวลา ค่าอัตราการไหลขณะหลอมเหลว (MFR) ศึกษาสัญญาณวิทยา โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสมบัติเชิงกลต่าง ๆ พบว่าพอลิเมอร์ร่วม SG-g-PET สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างพื้นผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ PET และ PS ได้ ไม่ว่าจะมีส่วนเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ โดยพอลิเมอร์ผสมที่ได้ อาจมีความเหนียวเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับการแข่งขันกันระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับความเหนียว คือการยึดติดที่ดีขึ้น และการกระจายตัวที่ดีขึ้น ซึ่งทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น ความเหนียวอาจมีค่าลดลงเนื่องจากองค์ประกอบที่นำมาผสม แต่จากระบบการผสมนี้พบว่าความเหนียวของ PET มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าเนื่องจากการยึดติดและการกระจายตัวที่ดีขึ้น

F. C. Chang และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) กับไนลอน 6,6 (Nylon 6,6) โดยใช้สไตรีนไกลซิดิลเมทาคริเลต (SG) และสไตรีนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (SMA) เป็นสารช่วยผสม โดยทำการปรับเปลี่ยนน้ำหนักโมเลกุลของ SMA ที่ใช้เป็นสารช่วยผสมเพื่อศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ศึกษาลำดับในการเติม PS และ Nylon 6,6 ขณะทำการผสม รวมทั้งเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการเติมสารช่วยผสม SG และ SMA จากนั้นทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สมบัติเชิงกลต่าง ๆ และสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ SMA ลดลง การผสมมีการกระจายตัวและความทนทานต่อการโค้งงอดีกว่า รวมทั้ง SG มีความสามารถในการทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นได้ดีกว่า SMA โดยใช้ SG 1 phr ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติใกล้เคียงกับการใช้ SMA 5 phr และพบว่าการผสม SMA ลงใน PS ก่อน ทำให้สมบัติเชิงกลดีกว่าการผสมใน Nylon 6,6 ก่อน สมบัติความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับการแข่งขันระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับความเหนียว คือการยึดติดที่ดีขึ้น และการกระจายตัวที่ดีขึ้น ซึ่งทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น ความเหนียวลดลงเนื่องจากองค์ประกอบที่นำมาผสม โดย SMA ที่เปราะจะอยู่ในวิภาคของไนลอนมากกว่าสไตรีน ดังนั้นความเข้มข้นของ SMA ในไนลอนทำให้ความเหนียวของไนลอนลดลง ถึงแม้ว่าการยึดติดที่พื้นผิวและการกระจายตัวดีขึ้น

I. D. Mvkey [23] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) โดยใช้พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของคาร์โบแลกโตน (PCL) และสไตรีน (PS-b-PCL) เป็นสารช่วยผสม โดยทำการผสมกับพอลิเมอร์ร่วมของ PET และ PS ด้วยกระบวนการอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ รวมทั้งปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง PET:PS:PS-b-PCL จากนั้นทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สมบัติทางความร้อนโดยทำการศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter และสมบัติเชิงกลต่าง ๆ พบว่าที่ปริมาณสารช่วยผสมต่ำ ๆ ค่าความต้านทานต่อการโค้งงอดีขึ้น และจากการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสม พบว่าค่าความแข็งแรง และสมบัติทางความร้อนมีแนวโน้มดีขึ้น แต่ความเหนียวมีค่าต่ำกว่า PS และ PET บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) เกรดอัดรีด (PORENE<sup>®</sup> GP 110) จากบริษัทไทยปิโตรเคมีคอลอินดัสทรีจำกัดมหาชน
2. พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) เกรดฉีดเป่าขึ้นรูป (SHINPET<sup>®</sup> PET X) จากบริษัทไทยชินก อินดัสทรีคอร์ปอเรชัน จำกัด
3. เมทาคริลลาไมด์ (Methacrylamide; MAA) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท MERCK
4. เอทิลอะซิเตต (Ethylacetate) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท CARLO
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท CARLO
6. ไดออกเซน (Dioxane) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Chemicals
7. เอทิลคลอโรฟอร์ม (Ethylchloroformate) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท MERCK
8. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท MERCK
9. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท MERCK
10. สไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene monomer) จากบริษัท Fluka
11. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Sodiumsulphate anhydrous) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka
12. เอทานอล (Ethanol) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท CARLO
13. พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Poly(vinylpyrrolidone)) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka
14. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท MERCK
15. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. กรวยบุนเนอร์
2. กรวยแยก
3. ขวด 3 คอ
4. ท่อนำก๊าซไนโตรเจน
5. คอนเดนเซอร์ (Condenser)
6. อ่างใส่น้ำ (Water bath)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. แท่งปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
8. กรวยหยดสาร (Dropping funnel)
9. โถดูดความชื้น
10. กระดาษวัดค่าความเป็นกรด-เบส
11. เครื่องให้ความร้อน (Heater)
12. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat)
13. เครื่องเซนทริฟิวส์ (Centrifuge) ของบริษัท SANYO รุ่น CENTAUR 2
14. เครื่องระเหยสุญญากาศชนิดหมุน (Rotary evaporator) ของบริษัท BÜCHI รุ่น Rotavapor R-114
15. ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven) ของบริษัท Isotemp รุ่น 282A
16. เครื่องทำน้ำเย็นแบบหมุนเวียน (Cooling circulator)
17. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer; NMR) ของบริษัท BRUKER รุ่น 300 Ultra Shield
18. เครื่องเจลเพอเมชันโครมาโทกราฟี (Gel Permeation Chromatograph; GPC) รุ่น Water 150-C ของบริษัท Millipore, MIXED B Column
19. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ของบริษัท EDAX รุ่น LEO 1450VP
20. เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ของบริษัท DIETHELM & CO, LTD. รุ่น HR-200
21. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Plastic grinder) ของบริษัท BOSCO รุ่น NEMA 600
22. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหวนคู่ (Twin-screw extruder) ของบริษัท Brabender รุ่น L2000
23. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection moulding machine) ของบริษัท COSMO รุ่น 220/80 HITECH
24. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal tester) ของบริษัท LLOYD INSTRUMENTS รุ่น LR30K
25. เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance machine) ของบริษัท INTRO รุ่น 258-PC IMPACT TESTER
26. เครื่องวัดความแข็งกด (Durometer hardness tester) shore D ของบริษัท Matsuzama รุ่น DXT
27. ตู้อบ ของบริษัท SHEL LAB รุ่น 1350FX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) ของบริษัท SHIMADZU รุ่น C-R4A CHROMATOPAC
29. เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น SPECTRUM GX
30. เครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์ (Thermal Gravimeter; TGA) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสม

##### 3.3.1.1 การทำให้สารตั้งต้นบริสุทธิ์

- 1) การตกผลึกใหม่ (Recrystalline) เมทาคริลาไมด์ (Methacrylamide; MAA)
  1. ชั่ง MAA ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน
  2. ละลายให้อิ่มตัวในเอทิลอะซิเตตที่อุณหภูมิ 60 °C
  3. กรองลดความดันขณะร้อนด้วยกรวยบุชเนอร์แล้วทิ้งไว้ให้เย็นอย่างช้า ๆ
  4. นำเข้าตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องนาน 8 ชั่วโมง
  5. เก็บสารในขวดพลาสติกและใส่ไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันความชื้น
- 2) การสกัดด้วยยั้งในสไตรีนมอนอเมอร์
  1. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% โดยน้ำหนัก และสไตรีนมอนอเมอร์ในอัตราส่วน 1:1 ลงในกรวยแยก
  2. ทำการสกัด และโซชันสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง
  3. ทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการสกัดซ้ำ 2-3 ครั้ง
  4. ล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ในชั้นสไตรีนมอนอเมอร์ด้วยน้ำ จนกระทั่งน้ำที่ล้างเป็นกลาง
  5. เติมแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous sodium sulphate) เพื่อดูดน้ำ แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง
  6. เก็บสไตรีนมอนอเมอร์ที่ได้ที่อุณหภูมิ 5 °C ก่อนนำไปใช้งาน
- 3) การตกผลึกเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) ใหม่
  1. ละลายเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 3 กรัมในคลอโรฟอร์ม 15 มิลลิลิตร
  2. กรองสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หยดสารละลายที่กรองได้อย่างช้า ๆ ลงในเมทานอล 15 มิลลิลิตร และปั่นกววนตลอดเวลา
4. กรองผลึกที่เกิดขึ้นด้วยกรวยบุชเนอร์
5. นำผลึกที่กรองได้ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง
6. เก็บสารในขวดพลาสติก และใส่ไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันความชื้น

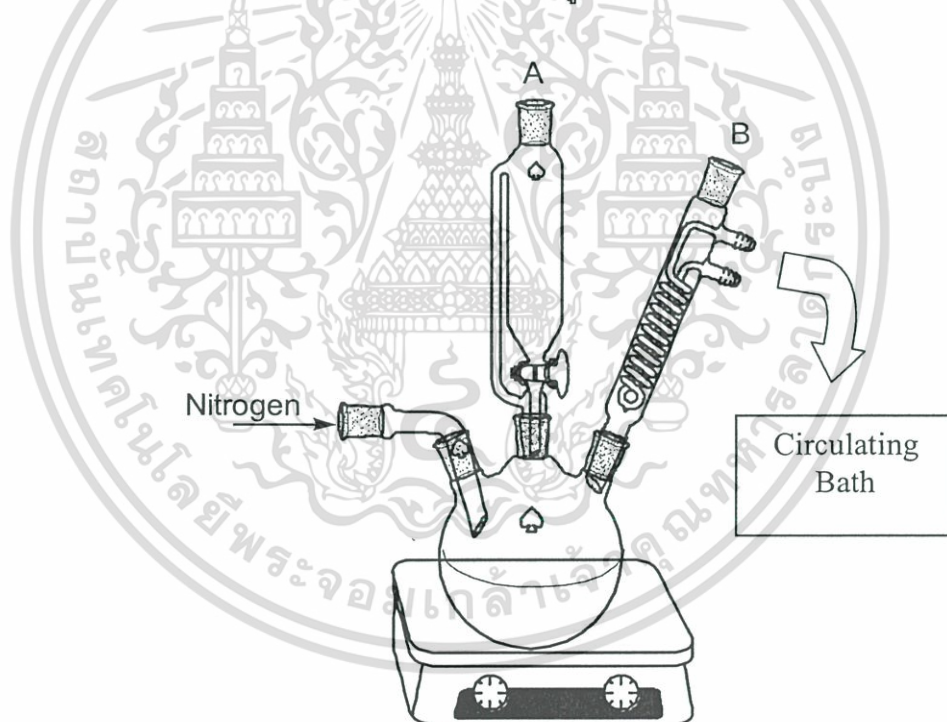
### 3.3.1.2 การสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (Ethyl N-methacryloylcarbamate; MAC)

1. ละลาย MAA 10 กรัมในไดออกเซน 100 กรัม เติมน้ำในขวด 3 คอ เต็มโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 14.4 กรัม
2. ทำการปั่นกววนด้วยแท่งปั่นกววนแม่เหล็กนาน 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25-27 °C
3. ผสมเอทิลคลอโรฟอร์มเมต (Ethylchloroformate) 16.6 กรัมกับไดออกเซน 30 กรัมในบีกเกอร์ และเทสารละลายลงในกรวยหยดสาร (Dropping funnel)
4. ต่อกกรวยหยดสารกับขวด 3 คอ และค่อย ๆ หยดสารละลายลงในขวด 3 คอเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25-30 °C หลังจากนั้นทำการปั่นกววนต่อไปอีก 20 นาที
5. เทสารจากขวด 3 คอใส่บีกเกอร์ เต็มน้ำเพื่อละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจนสารละลายใส จากนั้นค่อย ๆ หยดกรดไฮโดรคลอริกจนกระทั่งสารละลายเป็นกลาง
6. ทำการสกัดด้วยคลอโรฟอร์มครั้งละ 20 มิลลิลิตรประมาณ 5-7 ครั้ง ในกรวยแยก โดยทำการเก็บสารละลายชั้นคลอโรฟอร์มซึ่งอยู่ชั้นล่าง
7. นำชั้นคลอโรฟอร์มที่ได้ไประเหยด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศชนิดหมุน (Rotary evaporator)
8. นำสารที่ได้เทลงในจานเพาะเชื้อบาง ๆ และนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง
9. เก็บสารในขวดพลาสติก ซึ่งใส่อากาศภายในด้วยก๊าซไนโตรเจน และใส่ไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันความชื้น
10. นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิล-คาร์บาเมต (Poly(styrene-co-ethyl N-methacryloyl carbamate); PSM) [16]

1. ละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน (Poly(vinylpyrrolidone)) 4.424 กรัม (4 % โดยน้ำหนักทั้งหมด) ในเอทานอล 100 กรัมในขวด 3 คอที่ตั้งอยู่บนอ่างน้ำมันโดยควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) และทำการปั่นกวนตลอดเวลาที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC) 0.5 กรัม (5 % โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์) และเติมเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณคือ 0.25 0.5 0.75 และ 1 % โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ลงในขวด 3 คอ
2. ทำการต่อกรวยหยดสาร (Dropping funnel) ท่อนำก๊าซไนโตรเจน และคอนเดนเซอร์ที่ต่อกับเครื่องทำน้ำเย็น (Cooling) เพื่อป้องกันการระเหยของเอทานอล เข้ากับขวด 3 คอ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ในการสังเคราะห์ PSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปิดด้านบนของคอนเดนเซอร์ (B) และกรวยหยดสาร (A) ด้วยฟิล์มพาราฟิน
  4. เจาะรูขนาดเล็กที่ฟิล์มพาราฟินที่ปิดคอนเดนเซอร์ (B) ไล่อากาศภายในด้วยก๊าซไนโตรเจนปริมาณมาก
  5. ชั่งน้ำหนักสไตรีน 10 กรัม เติลงในกรวยหยดสาร และปิดด้านบน (A) ด้วยฟิล์มพาราฟินอีกครั้ง จากนั้นปิดรูบนฟิล์มพาราฟินที่ปิดคอนเดนเซอร์ (B) และเจาะรูที่ฟิล์มพาราฟินที่ปิดกรวยหยดสาร (A) ไล่อากาศภายในกรวยหยดสารด้วยก๊าซไนโตรเจนปริมาณมาก
  6. ค่อย ๆ หยดสไตรีนมอนอเมอร์พร้อมทั้งปั่นกวนตลอดเวลา จากนั้นปิดรูบนฟิล์มพาราฟินที่ปิดกรวยหยดสาร (A) และเจาะรูฟิล์มพาราฟินที่ปิดคอนเดนเซอร์ (B) อีกครั้ง เพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 °C ปั่นกวนอย่างแรง ปรับอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 60 มิลลิลิตรต่อนาที โดยปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไป 24 ชั่วโมง
  7. นำสารที่ได้มา centrifuge ที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาทีนาน 15 นาที เทสารละลายด้านบนออก ล้างตะกอนที่ได้ด้วยเอทานอล และ centrifuge ซ้ำอีก 5 ครั้ง
  8. เก็บตะกอนที่ได้ใส่จานเพาะเชื้อ และอบด้วยตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง
  9. เก็บสารในขวดพลาสติก และใส่ไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันความชื้น
  10. นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ และวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี GPC รุ่น Water 150-C ของบริษัท MILLIPORE ใช้พอลิสไตรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 5,460-1,290,000 กรัม/โมลเป็นสารมาตรฐาน
- สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

- สารละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (THF)	
- อุณหภูมิ Column	30 °C
- อุณหภูมิ Injector	30 °C
- อุณหภูมิ detector	30 °C
- อัตราการไหล	1.0 ml/min
- ปริมาณในการฉีด	100 µL
- เวลาในการวิเคราะห์	22 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เมื่อทราบปริมาณตัวริเริ่มที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการสังเคราะห์ PSM โดยเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 36 ชั่วโมง
12. คำนวณหา % Yield จากสมการ

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้} \times 100}{(\text{น้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์} + \text{น้ำหนัก MAC})}$$

### 3.3.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform-Infrared Spectroscopy; FT-IR)

1. นำชิ้นงาน PS ที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปมาแช่ในไนโตรเจนเหลว นาน 2 ชั่วโมง
2. บดให้ละเอียดจนเป็นผง นำไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง นาน 24 ชั่วโมง
3. นำผง PS ที่เตรียมได้มาผสมกับ KBr และอัดเป็นแผ่น
4. นำสารช่วยผสม PSM ผสมกับ KBr และอัดเป็นแผ่น
5. ทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-IR

### 3.3.3 การเตรียมฟิล์มเพื่อศึกษาการทำปฏิกิริยาของ PSM กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) ด้วยการหลอมเม็ด PET โดยใช้ฟอยล์รองบนเครื่องให้ความร้อนและใช้กระจกเกลี่ยให้เป็นฟิล์มบาง ๆ

ทำการเตรียมฟิล์มพอลิสไตรีน (PS) ด้วยการละลายในคลอโรฟอร์ม โดยทำการเติมสารช่วยผสม PSM ในอัตราส่วน 0 1 2 5 และ 10 % โดยน้ำหนักของ PET ที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 จากนั้นทำการหล่อฟิล์มในจานเพาะเชื้อ และอบในตู้อบสุญญากาศ นาน 24 ชั่วโมง

นำฟิล์มทั้งสองมาวางซ้อนทับกันในแม่พิมพ์และทำการให้ความร้อนในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 240 °C นาน 100 นาที จากนั้นนำมาสกัดพอลิสไตรีนออกด้วยการแช่ในคลอโรฟอร์ม นาน 1 ชั่วโมง อบด้วยตู้อบสุญญากาศ นาน 24 ชั่วโมง นำมาเคลือบด้วยทอง และศึกษาด้วยกล้อง SEM

### 3.3.4 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET)

#### 3.3.4.1 การเตรียมสารตั้งต้นก่อนการผสม

1. อบพอลิสไตรีนที่ 90 °C นาน 24 ชั่วโมง
2. อบพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตที่ 120 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 3.3.4.2 การหาอัตราส่วน และความเร็วรอบสกรูที่เหมาะสม

1. นำพอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตมาชั่งให้ได้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก PS:PET เท่ากับ 60:40 70:30 และ 80:20 เขย่าให้เม็ดพลาสติกผสมกันก่อน (Premix)
2. นำเม็ดพลาสติกที่ชั่งมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่อุณหภูมิ 270 280 285 และ 290 °C โดยปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรู คือ 10 20 และ 30 รอบต่อนาที
3. ปล่อยพอลิเมอร์ผสมที่ได้ให้เย็น แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติกเพื่อนำไปเตรียมชิ้นงาน

#### 3.3.4.3 การหาปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสม

1. นำพอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตมาชั่งให้ได้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก PS:PET ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.3.4.2 และเติมสารช่วยผสม 1 2 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PET
2. นำเม็ดพลาสติกในข้อ 1 ผสมกับสารช่วยผสมในปริมาณต่าง ๆ และผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่อุณหภูมิ 270 280 285 และ 290 °C โดยใช้ความเร็วรอบของสกรูที่เหมาะสมที่หาได้จากข้อ 3.3.4.2
3. ปล่อยพอลิเมอร์ผสมที่ได้ให้เย็น แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติกเพื่อนำไปเตรียมชิ้นงาน

### 3.3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อการทดสอบ

1. อบพอลิเมอร์ผสมที่บดได้ในข้อ 3.3.4.2-3.3.4.3 ด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ชิ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกเป็นรูปดัมเบลล์เพื่อทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่อุณหภูมิ 27 °C และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยบากเพื่อทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบหาสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 3.3.6.1 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Tester) มาตรฐาน ASTM D638 [24] โดยกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึง	50 มิลลิเมตรต่อนาที
ความยาวเกจ (Guage length)	7 เซนติเมตร
แรงดึงสูงสุด	30 กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ	6 ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้จะนำมาหาค่าต่าง ๆ ดังนี้

##### 1. ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง} = F/A \quad (3.1)$$

##### 2. ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = \frac{(L-L_0) \times 100}{L_0} \quad (3.2)$$

##### 3. ค่ามอดุลัสที่ 1 % strain หาได้จากสมการ

$$\text{ค่ามอดุลัสที่ 1 \% strain} = \text{ความเค้นที่ 1 \% strain} / \text{ความเครียด} \quad (3.3)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดขาด

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

L คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน

$L_0$  คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

#### 3.3.6.2 ทดสอบความแข็งกด (Durometer hardness)

โดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบน้ำหนักรัดที่ชนิด shore D มาตรฐาน ASTM D2240 [25] ที่อุณหภูมิห้อง โดยสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากเครื่องทำการทดสอบ 10 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6.3 ทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength)

นำชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยบาก มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) มาตรฐาน ASTM D256 [26] โดยกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

Load cell	30 กิโลกรัม
จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ	10 ชิ้น

### 3.3.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

3.3.7.1 ทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC)

นำชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปมาตัดเป็นชิ้นบาง ๆ และชั่งน้ำหนักอย่างแม่นยำประมาณ 5 มิลลิกรัม ทำการบรรจุใส่ภาชนะซึ่งทำจากอลูมิเนียม ทำการหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) และค่าองศาความเป็นผลึกในช่วงอุณหภูมิ 30-280 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการคำนวณค่าองศาความเป็นผลึกจากสมการ (อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40)

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H / 0.4 \times 100}{\Delta H_f}$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  (100% Crystallinity) ของ PET มีค่าเท่ากับ 121.2 mJ/mg [27]

3.3.8 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

3.3.8.1 การเตรียมชิ้นงานจากเครื่องฉีดขึ้นรูป

นำชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปมาแช่ในไนโตรเจนเหลวนาน 2 ชั่วโมง ทำการหักชิ้นงาน นำมาเคลือบด้วยทอง และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM

3.3.8.2 การเตรียมชิ้นงานด้วยการเตรียมฟิล์มเพื่อศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อน (Annealing)

นำฟิล์ม PS ที่มีสารช่วยผสม 5 และ 10 % โดยน้ำหนักของ PET มาวางซ้อนทับกับฟิล์ม PET ทำการให้ความร้อนในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 240 °C นาน 10 20 30 50 และ 75 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำมาสกัดพอลิสไตรีนออกด้วยการแช่ในคลอโรฟอร์มนาน 1 ชั่วโมง อบด้วยตู้อบสุญญากาศนาน 24 ชั่วโมง นำมาเคลือบด้วยทอง และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.9 การทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์ (Thermal Gravimeter; TGA)

1. นำชิ้นงาน PS/PET ที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกมาแช่ในไนโตรเจนเหลวนาน 2 ชั่วโมง
2. บดเป็นชิ้นเล็ก ๆ
3. นำ PSM และตัวอย่างที่เตรียมได้มาทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์ โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

อัตราการให้ความร้อน  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$

เพิ่มอุณหภูมิ  $50\text{-}280^{\circ}\text{C}$

ตั้งอุณหภูมิให้คงที่ที่  $280^{\circ}\text{C}$  นาน 3 นาที

เพิ่มอุณหภูมิ  $280\text{-}600^{\circ}\text{C}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

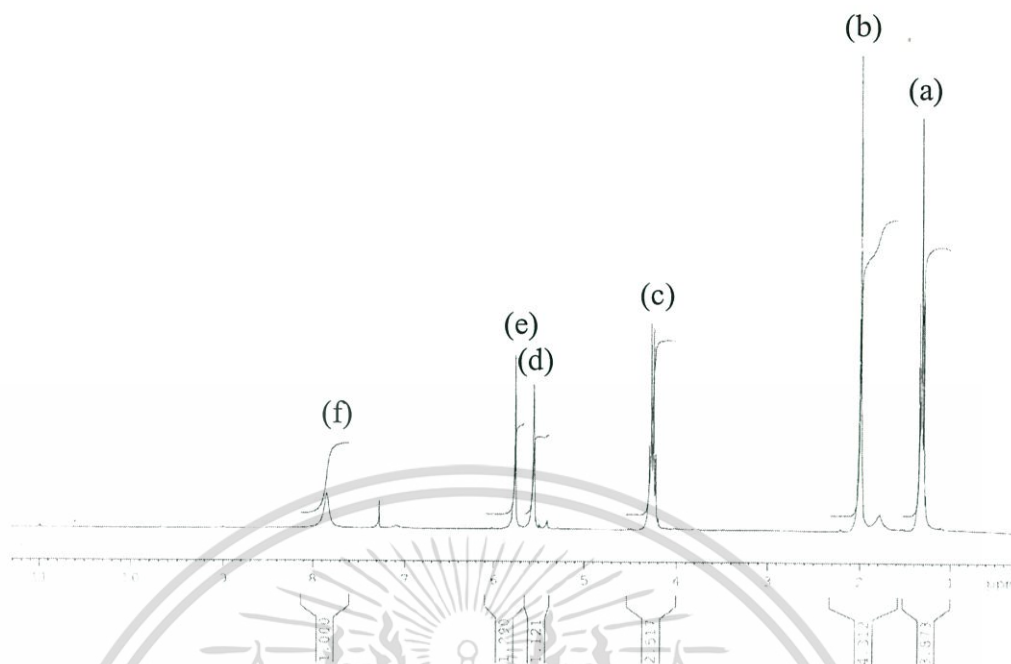
ผลการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลการสังเคราะห์สารช่วยผสมโดยเริ่มจากการสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต ((Poly(styrene-co-ethyl N-methacryloyl carbamate); PSM) โดยในการสังเคราะห์สารช่วยผสมได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณตัวริเริ่ม เพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับพอลิสไตรีนซึ่งเป็นวิภาคหลักในพอลิเมอร์ผสม และศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ % Yield มากที่สุด ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต ความเร็วรอบของสกรู และปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต จากนั้นทำการศึกษสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

#### 4.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสม

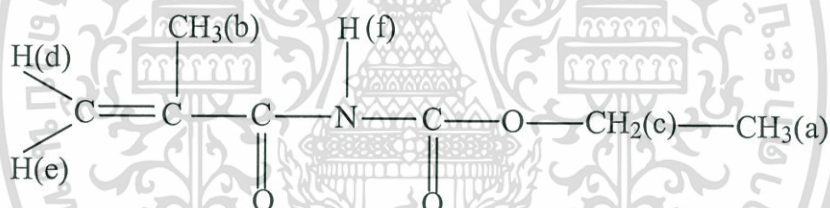
##### 4.1.1 การสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (Ethyl N-methacryloyl carbamate; MAC)

ทำการสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC) โดยใช้เมทาคริลลาไมด์ (MAA) ทำปฏิกิริยากับเอทิลคลอโรฟอर्मेटในไดออกเซนซึ่งเป็นตัวกลาง ทำการสกัด MAC ที่สังเคราะห์ได้ด้วยคลอโรฟอर्म ได้ผลิตภัณฑ์เป็นผลึกทรงกระบอกใส มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (% Conversion) เท่ากับ 54-60 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (NMR) ได้สเปกตรัมดังรูปที่

4.1



รูปที่ 4.1  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต



รูปที่ 4.2 โครงสร้าง MAC

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของ MAC จาก  $^1\text{H}$  NMR

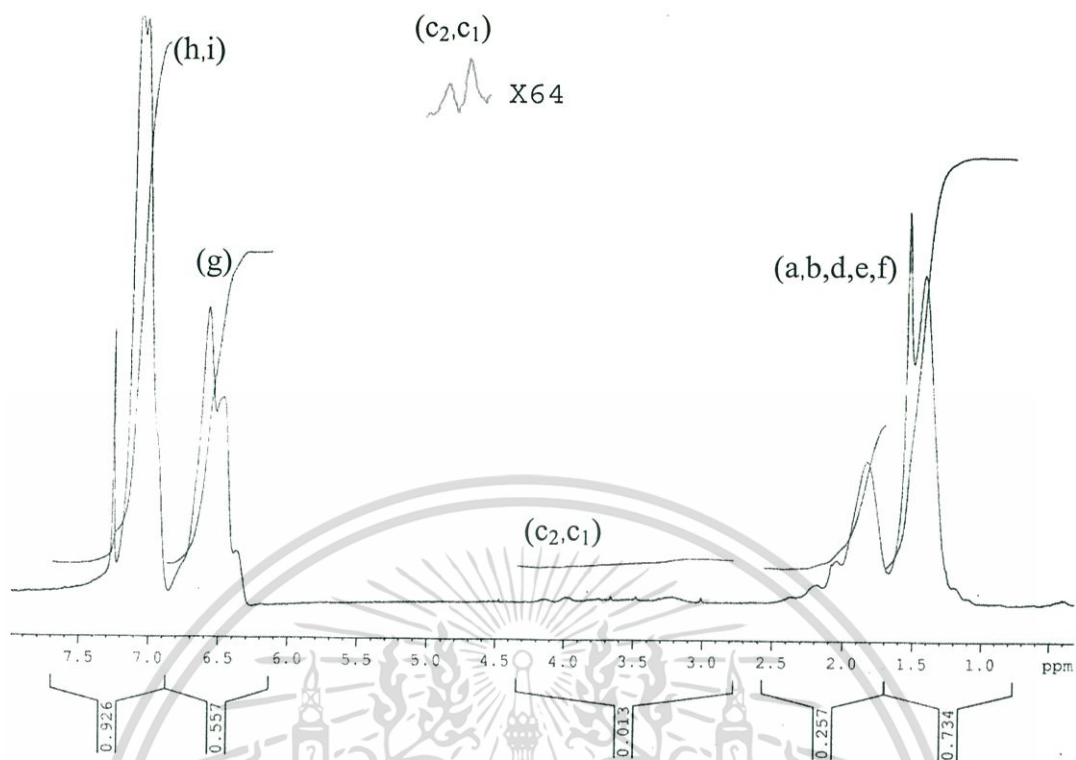
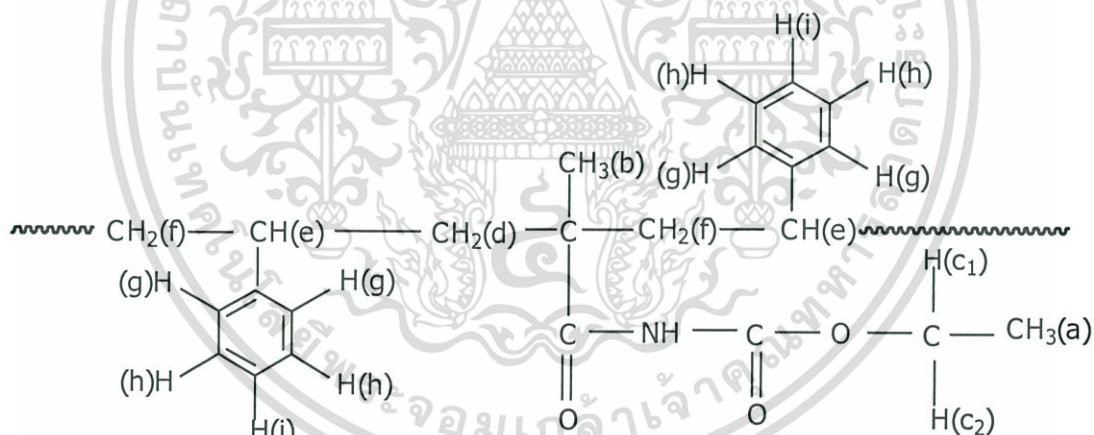
Chemical shift ( $\delta$ )	องค์ประกอบ
1.3	$\text{CH}_3(\text{a})$
1.6	$\text{CH}_3(\text{b})$
4.3	$\text{CH}_2(\text{c})$
5.4	$\text{CH}(\text{d})$
5.9	$\text{CH}(\text{e})$
8.5	$\text{NH}(\text{f})$

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 พบว่าเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต  
 เอกสารให้สัญญาณดังนี้ คือที่  $\delta$  เท่ากับ 1.3 เป็นพีคของโปรตอนของหมู่เมทิล ( $\text{CH}_3(\text{a})$ ) ที่ติดกับหมู่เมทิล  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลีนซึ่งให้อิเล็กตรอน ทำให้ค่า chemical shift ไปทาง high field (ค่า Chemical shift ต่ำ) ส่วนที่  $\delta$  เท่ากับ 1.6 เป็นพีคของโปรตอนของหมู่เมทิล ( $\text{CH}_3(\text{b})$ ) ที่ติดกับพันธะคู่ซึ่งดึงอิเล็กตรอนทำให้ค่า Chemical shift มีค่าสูงกว่า  $\text{CH}_3(\text{a})$  ที่  $\delta$  เท่ากับ 4.3 เป็นพีคของโปรตอนของหมู่เมทิลีน ( $\text{CH}_2(\text{c})$ ) ที่ต่อกับเอสเทอร์ เนื่องจากมีอิทธิพลของหมู่เอสเทอร์ซึ่งดึงอิเล็กตรอน ทำให้ค่า Chemical shift ไปทาง low field (ค่า Chemical shift สูง) ที่  $\delta$  เท่ากับ 5.4 และ 5.9 เป็นพีคของโปรตอนของเมทิลีน ( $\text{CH}(\text{d}), \text{CH}(\text{e})$ ) ซึ่งเป็นพันธะคู่ โดยโปรตอนทั้ง 2 ให้ค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากอิทธิพลของหมู่เมทิลซึ่งให้อิเล็กตรอน ทำให้ค่า Chemical shift ของ  $\text{CH}(\text{d})$  ต่ำกว่า  $\text{CH}(\text{e})$  และที่  $\delta$  เท่ากับ 8.5 เป็นพีคของโปรตอนของหมู่คาร์บาเมต ซึ่งมีหมู่คาร์บอนิลที่ดึงอิเล็กตรอน ทำให้ค่า Chemical shift สูงมาก จากผลของค่า Chemical shift และค่าอินทิเกรชันของแต่ละพีค สามารถสรุปได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้คือ เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต

#### 4.1.2 การสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (Poly(styrene-co-ethyl N-methacryloyl carbamate); PSM)

ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) โดยใช้ MAC ทำปฏิกิริยาดิสเพอร์ชันพอลิเมอไรเซชันกับสไตรีนมอนอเมอร์ มีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และเอทานอลเป็นตัวกลางได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น นำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง NMR FT-IR และวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC)

รูปที่ 4.3  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของ PSM

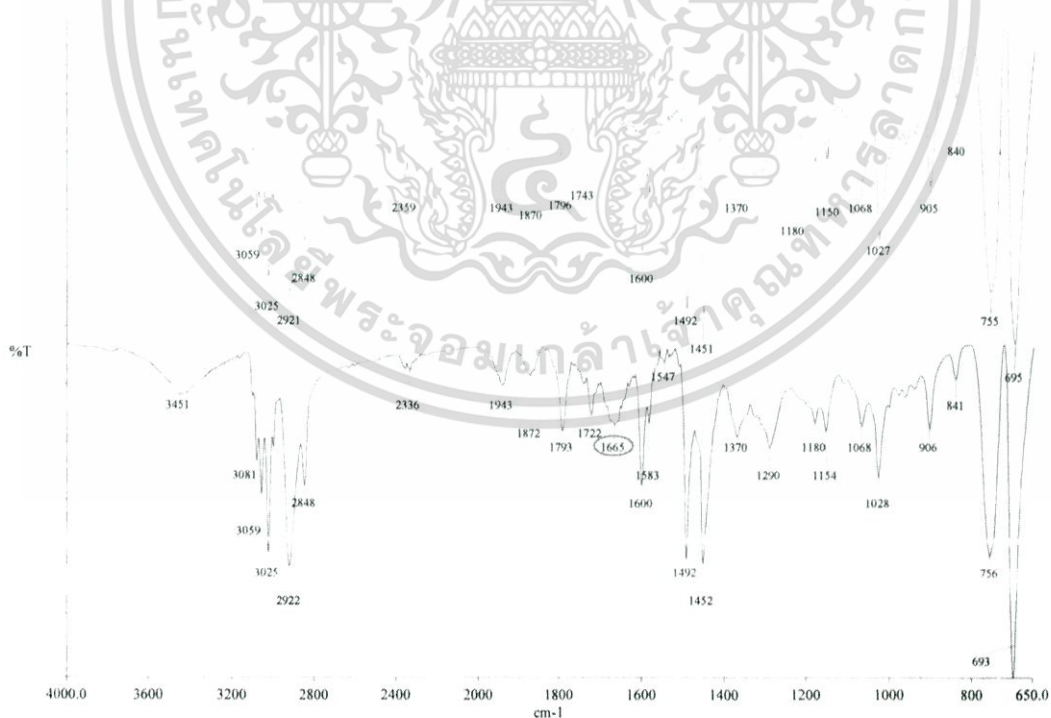
รูปที่ 4.4 โครงสร้างพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มของ PSM

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของ PSM จาก  $^1\text{H}$  NMR

Chemical shift ( $\delta$ )	องค์ประกอบ
1.3-2.2	$\text{CH}_3(\text{a,b})$ , $\text{CH}_2(\text{d})$ , $\text{CH}(\text{e})$ , $\text{CH}_2(\text{f})$
3.8	$\text{CH}(\text{c}_1)$
4.2	$\text{CH}(\text{c}_2)$
6.2	$\text{CH}(\text{g})$
7.2	$\text{CH}(\text{h,i})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 7.2 ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ PSM ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างสไตรีน และเอทิล N-เมทา-คริลอิลคาร์บาเมต (MAC) ด้วยเครื่อง NMR ได้สเปกตรัมดังรูปที่ 4.3 และจากตารางที่ 4.2 สรุปสัญญาณได้ดังนี้คือ ให้พีคที่  $\delta$  เท่ากับ 1.3–2.2 เป็นพีคของโปรตอนของ  $\text{CH}_3(\text{a,b})$ ,  $\text{CH}_2(\text{d})$ ,  $\text{CH}(\text{e})$ ,  $\text{CH}_2(\text{f})$  ซึ่งซ้อนทับกันอยู่ นอกจากนี้ยังให้พีคที่ 6.2 เป็นพีคของโปรตอนของ  $\text{CH}(\text{g})$  ในตำแหน่งออร์โท (Ortho) ของวงเบนซีนของพอลิสไตรีน และที่  $\delta$  เท่ากับ 7.2 เป็นพีคของโปรตอนของ  $\text{CH}(\text{h})$  ในตำแหน่งเมทา (Meta) และ  $\text{CH}(\text{i})$  ในตำแหน่งพารา (Para) เนื่องจากมีอิทธิพลของหมู่เอทิลีนซึ่งให้อิเล็กตรอน ทำให้เกิดการบดบังที่ตำแหน่งออร์โทที่อยู่ใกล้กว่าตำแหน่งเมทาและพารา ทำให้พีคของโปรตอนของ  $\text{CH}(\text{g})$  ในตำแหน่งออร์โทของวงเบนซีนในพอลิสไตรีน ไปทาง high field มากกว่า (ค่า Chemical shift ต่ำ) นอกจากนี้ยังพบพีคที่  $\delta$  เท่ากับ 3.8 และที่ 4.2 [16] ซึ่งเป็นพีคของ  $\text{CH}(\text{c}_1)$  และ  $\text{CH}(\text{c}_2)$  ตามลำดับ ค่าที่แตกต่างกันนั้นเกิดจากอิทธิพลของหมู่เอสเทอร์ซึ่งดึงอิเล็กตรอน ทำให้  $\text{CH}(\text{c}_1)$  มีค่า  $\delta$  ต่ำกว่า  $\text{CH}(\text{c}_2)$  จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า MAC ทำปฏิกิริยากับสไตรีนมอนอเมอร์เกิดเป็น PSM แต่อย่างไรก็ตามจากสเปกตรัมที่ได้ พีคของหมู่คาร์บาเมตซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ MAC ยังเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากมีสัดส่วนของ MAC ในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก ดังนั้นจึงนำ PSM มาตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งได้สเปกตรัมดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมของ a) PS และ b) PSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก FT-IR สเปกตรัมของ PS และ PSM พบว่า PSM มีพีกที่บริเวณความยาวคลื่น  $1665\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของหมู่คาร์บอนิลของเอไมด์ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์  $^1\text{H NMR}$  และ FT-IR แสดงว่าเกิดพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC)

การสังเคราะห์สารช่วยผสม PSM เพื่อให้ได้สารช่วยผสมที่เหมาะสมนั้น นอกจากต้องมีหมู่คาร์บาเมตซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET แล้ว น้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมก็มีอิทธิพลต่อการผสมเช่นกัน โดยสารช่วยผสมที่ดีควรมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์หลัก เพื่อทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่างพอลิเมอร์หลักและสารช่วยผสมที่ดี [11] ในงานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ PSM โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวริเริ่ม และนำสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้มานำน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่อง GPC ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ข รูปที่ ข-1-ข-5 ซึ่งสามารถนำมาสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลจากเทคนิคเจลเพอเมชันโครมาโทกราฟี

สารตัวอย่าง	$\overline{M}_w$	$\overline{M}_n$	MWD	% Yield
พอลิสไตรีน	297 k	107 k	2.8	-
PSM ซึ่งมีตัวริเริ่ม 1% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์	54 k	22 k	2.4	56.1
PSM ซึ่งมีตัวริเริ่ม 0.75% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์	69 k	27 k	2.5	38.6
PSM ซึ่งมีตัวริเริ่ม 0.5% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์	125 k	45 k	2.8	17.5
PSM ซึ่งมีตัวริเริ่ม 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์	169 k	61 k	2.8	13.2

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 พบว่าจากการสังเคราะห์ PSM โดยใช้ปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มเท่ากับ 0.25-1% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ พบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $\overline{M}_w$ ) และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $\overline{M}_n$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวริเริ่มลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวริเริ่มลดลง ทำให้จำนวนอนุมูลอิสระน้อยลงสายโซ่พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จึงยาวขึ้น น้ำหนักโมเลกุลจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณตัวริเริ่มลดลงทำให้ % Yield มีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งอาจเนื่องมาจากจำนวนอนุมูลอิสระมีน้อย ทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ได้ลดลง จึงต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น รวมทั้งจากการ centrifuge เพื่อแยกตะกอน PSM ออกจากตัวทำละลายเอทานอลนั้น พบว่าในชั้นเอทานอลยังมีสีขาวขุ่นอยู่ เนื่องจากตะกอน PSM มีขนาดเล็กมากทำให้มี PSM บางส่วนเหลืออยู่ในเอทานอล % Yield จึงมีค่าน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการสังเคราะห์สารช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมโดยใช้ปริมาณตัวริเริ่มเท่ากับ 0.25 % โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ และทำการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 24 ชั่วโมงเป็น 36 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4

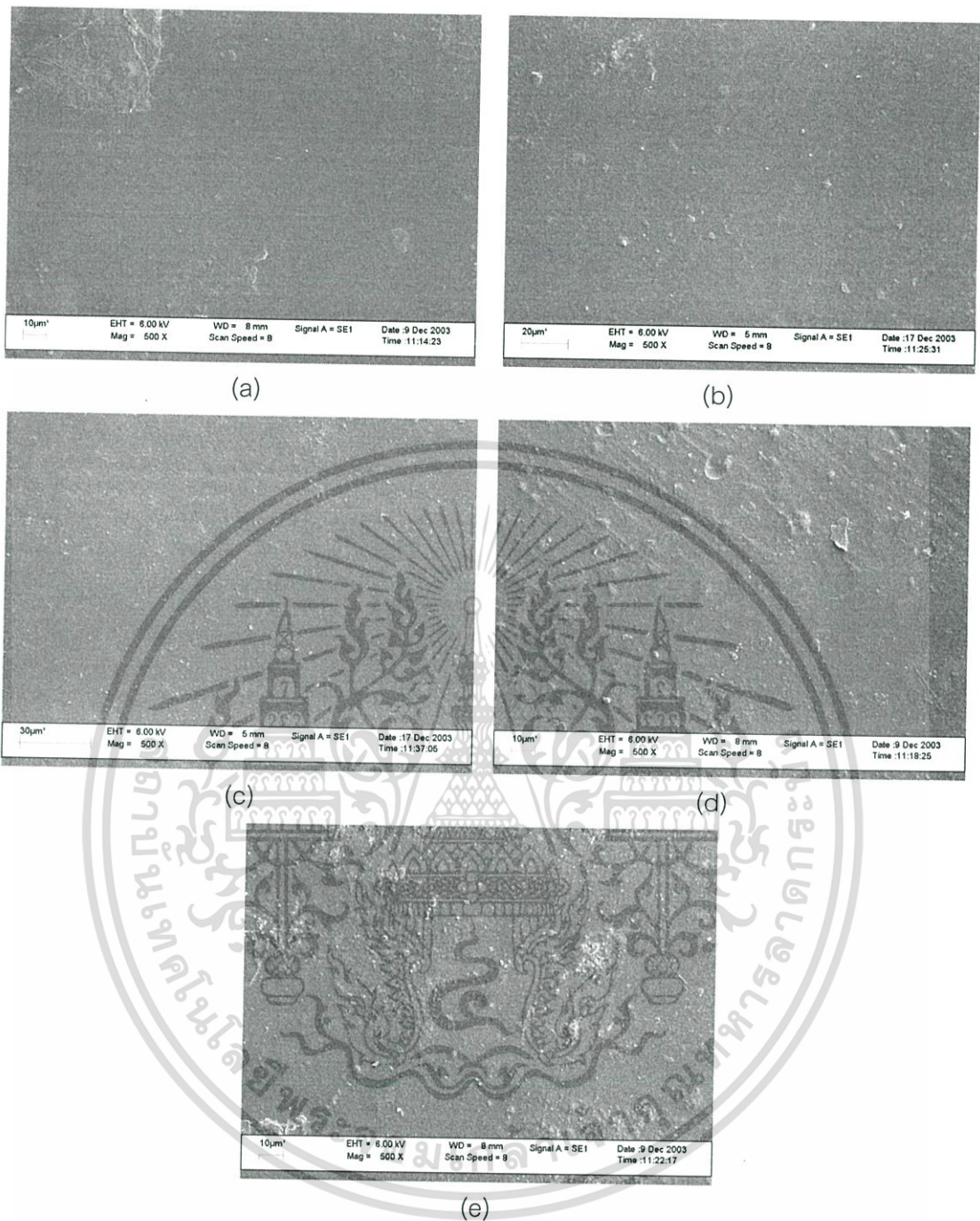
ตารางที่ 4.4 ค่า % Yield ของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่ม 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ

สารตัวอย่าง	% Yield
PSM ที่ 24 ชั่วโมง	13.2
PSM ที่ 36 ชั่วโมง	26.2

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของ PSM ทำให้ได้ % Yield มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมอนอเมอร์มีโอกาสในการทำปฏิกิริยามากขึ้น % Yield จึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาในการสังเคราะห์ PSM เป็น 36 ชั่วโมง และเนื่องจากต้องใช้สารช่วยผสมในปริมาณค่อนข้างมาก จึงต้องทำการสังเคราะห์หลายครั้ง โดยค่า % Yield ของสารช่วยผสม (PSM) ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 21-38 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำ PSM ไปหาน้ำหนักโมเลกุลที่แน่นอนด้วยเครื่อง GPC พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $\bar{M}_w$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 183,460-343,076 g/mol และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $\bar{M}_n$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 52120-94066 g/mol (ภาคผนวก ข รูปที่ ข-6-ข-11)

#### 4.2 การเตรียมฟิล์มเพื่อศึกษาการทำปฏิกิริยาของ PSM กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

จากการศึกษาเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของการนำฟิล์ม PET และ PS มาซ้อนทับกัน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสม และทำการให้อุณหภูมิที่ 240 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 นาน 100 นาที ทำการสกัดชั้น PS ออกด้วยคลอโรฟอร์ม จากนั้นนำมาศึกษาพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมต่าง ๆ

- (a) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม
- (b) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 1 %
- (c) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 2 %
- (d) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 5 %
- (e) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเกิดความขรุขระมากขึ้นเมื่อปริมาณสารช่วยผสมมากขึ้น ซึ่งความขรุขระที่เกิดขึ้นแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บาเมตของ PSM ซึ่งเป็นสารช่วยผสมกับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET [16] จึงสามารถช่วยสนับสนุนว่าสารช่วยผสมที่สังเคราะห์ได้คือ PSM

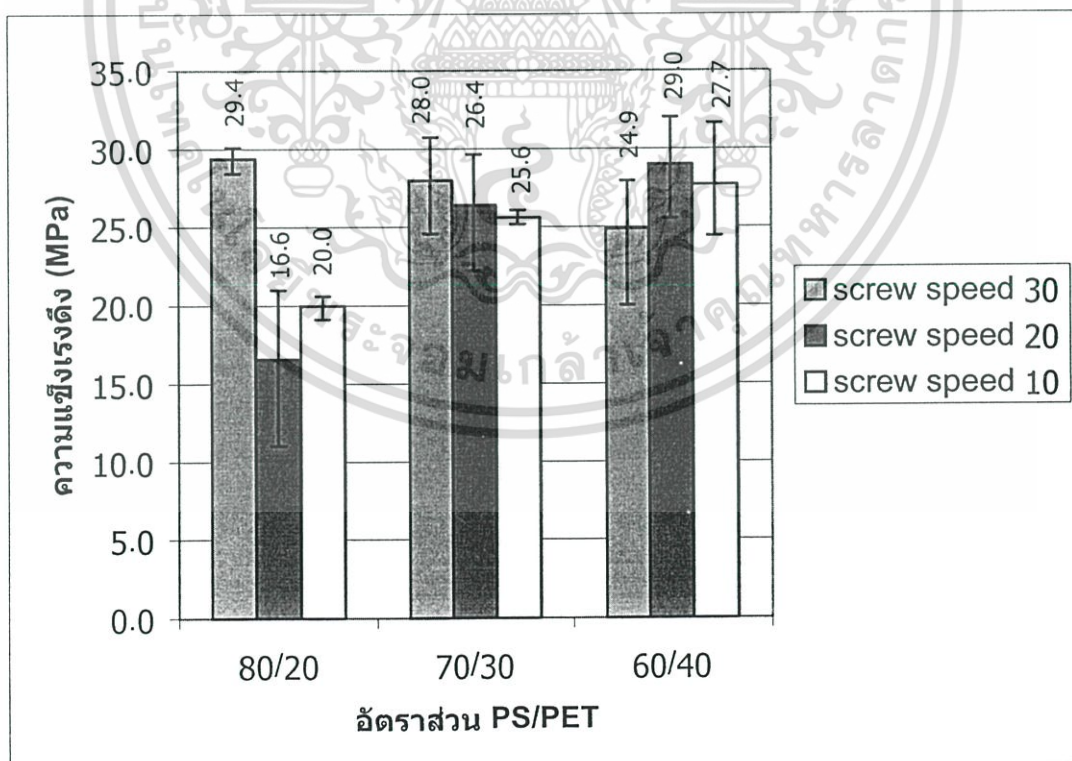
## 4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

### 4.3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม

ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PS/PET (80:20 70:30 และ 60:40) และความเร็วรอบในการผสม (10 20 และ 30 รอบต่อนาที) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผสม โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดังนี้

#### 4.3.1.1 ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส

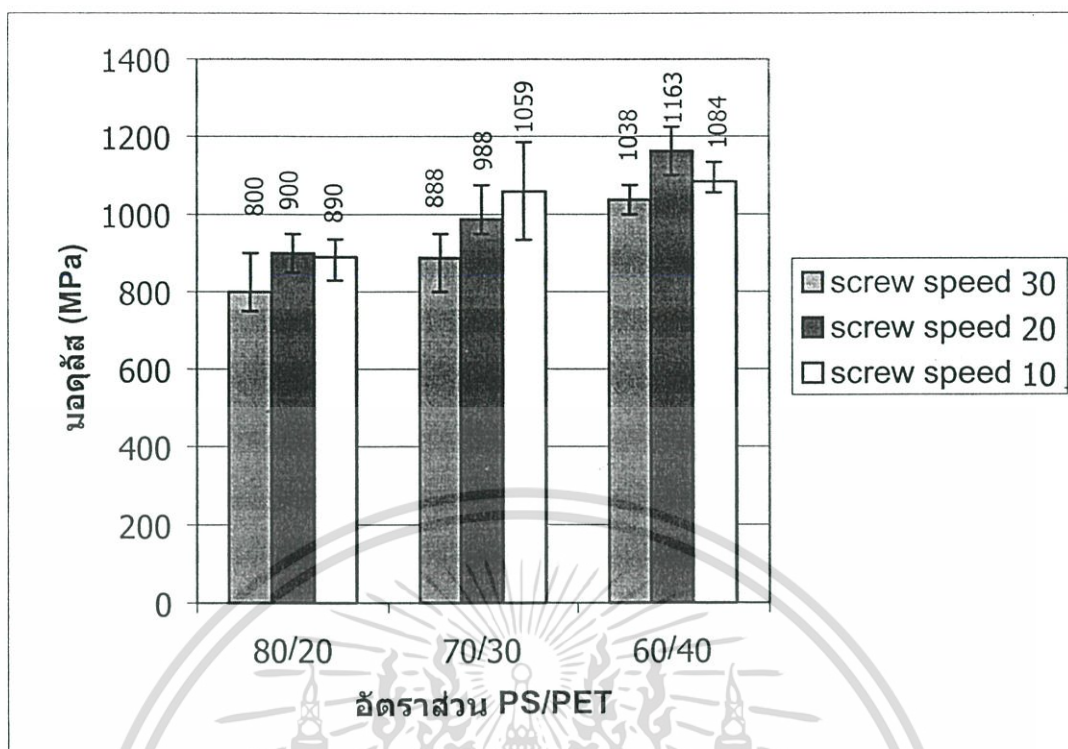
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PS/PET ที่อัตราส่วนและความเร็วรอบในการผสมต่าง ๆ ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด แสดงดังรูปที่ 4.7-4.9



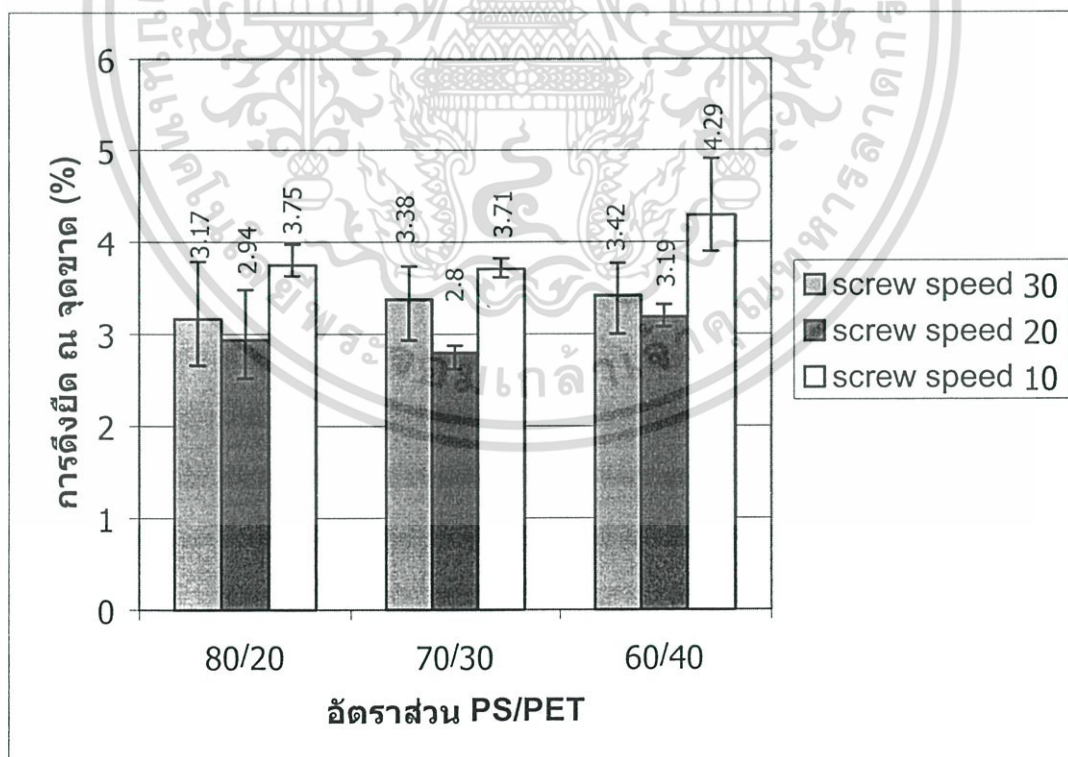
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็ว

รอบผสมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความอดุลล์กับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ

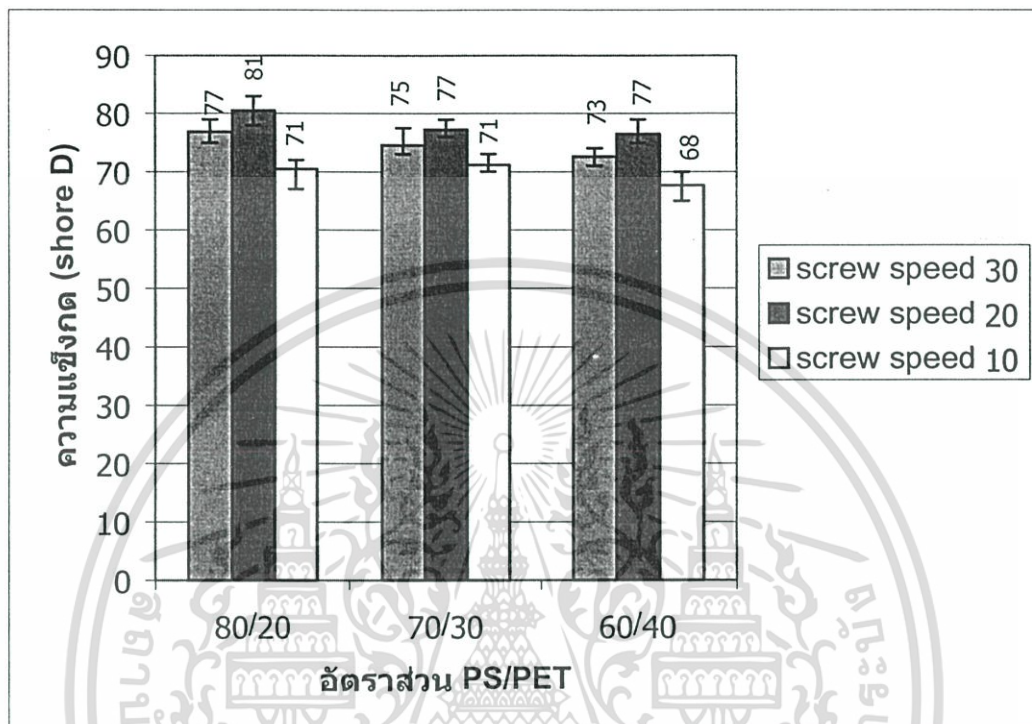
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ (PS และ PET) เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปที่สภาวะเดียวกับพอลิเมอร์ผสม โดยจากผลการทดลองในรูปที่ 4.7-4.9 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่อสมบัติเชิงกลต่าง ๆ พบว่าที่ความเร็วรอบของสกรูในการผสมเท่ากับ 10 และ 20 รอบต่อนาที สมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อปริมาณ PET มากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะฐานวิทยา (รูปที่ 4.17-4.19) ที่เป็นทรงกระบอกของ PET (70:30 และ 60:40) ซึ่งเรียงตัวไปตามแนวเครื่องจักร ดังนั้นเมื่อทำการให้แรงดึงในแนวเครื่องจักรจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มมากขึ้น [22] แต่ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30 รอบต่อนาทีกลับให้แนวโน้มที่ตรงข้ามกัน กล่าวคือเมื่ออัตราส่วน PET มากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ PET มากขึ้น จำเป็นต้องใช้เวลาในการหลอมเหลวและผสมที่มากขึ้น แต่เมื่อใช้ความเร็วรอบสูง เวลาในการผสมลดลง ทำให้การผสมไม่ดี ทำให้แนวโน้มแตกต่างกันไป ในส่วนของค่ามอดุลัสพบว่าเมื่ออัตราส่วน PET มากขึ้น ค่ามอดุลัสมีแนวโน้มมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าไม่แตกต่างกันมาก

จากนั้นเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบของสกรูในการผสมต่อสมบัติต่าง ๆ พบว่าจากการจับเวลาที่ความเร็วรอบของสกรูในการผสม 10 20 และ 30 รอบต่อนาที พบว่ามีค่าเวลาในการผสมเท่ากับ 128 67 และ 28 วินาทีตามลำดับ ดังนั้นเมื่อความเร็วรอบของสกรูเปลี่ยนไป จึงมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยจากค่าความแข็งแรงดึงที่ทดสอบได้ที่อัตราส่วน PS/PET 80/20 ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาทีให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ในขณะที่เมื่อความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 และ 20 รอบต่อนาทีมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะที่อัตราส่วนนี้สัดส่วนของ PS มีมาก หากทำการผสมที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน PS อาจเกิดการเสถียรภาพ โดยในระหว่างการผสมมีควันค่อนข้างมากและลักษณะชิ้นงานที่ได้มีสีเหลืองอ่อน และจากการหาอุณหภูมิในการสลายตัวของ PS ด้วยเครื่อง TGA พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นมีค่าประมาณ  $300^{\circ}\text{C}$  (ภาคผนวก จ รูปที่ จ-1) ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการผสมและฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน อาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง แต่เมื่ออัตราส่วน PET มากขึ้น ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 และ 20 รอบต่อนาทีมีค่าความแข็งแรงดึงที่ทดสอบได้มีแนวโน้มดีขึ้น ในขณะที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาทีกลับให้ค่าที่ต่ำกว่า เนื่องจากเมื่อปริมาณ PET มากขึ้น ต้องใช้เวลาในการหลอมเหลว PET ซึ่งหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงและต้องใช้เวลาในการผสม PET ให้เข้ากับ PS มากขึ้น ดังนั้นเมื่อความเร็วรอบของสกรูต่ำ เวลาในการหลอมเหลวและผสมมากขึ้น การผสมดีขึ้น สมบัติเชิงกลต่าง ๆ จึงมีแนวโน้มดีขึ้น

#### 4.3.1.2 ความแข็งกด (Shore D)

เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดชนิด shore D แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.10



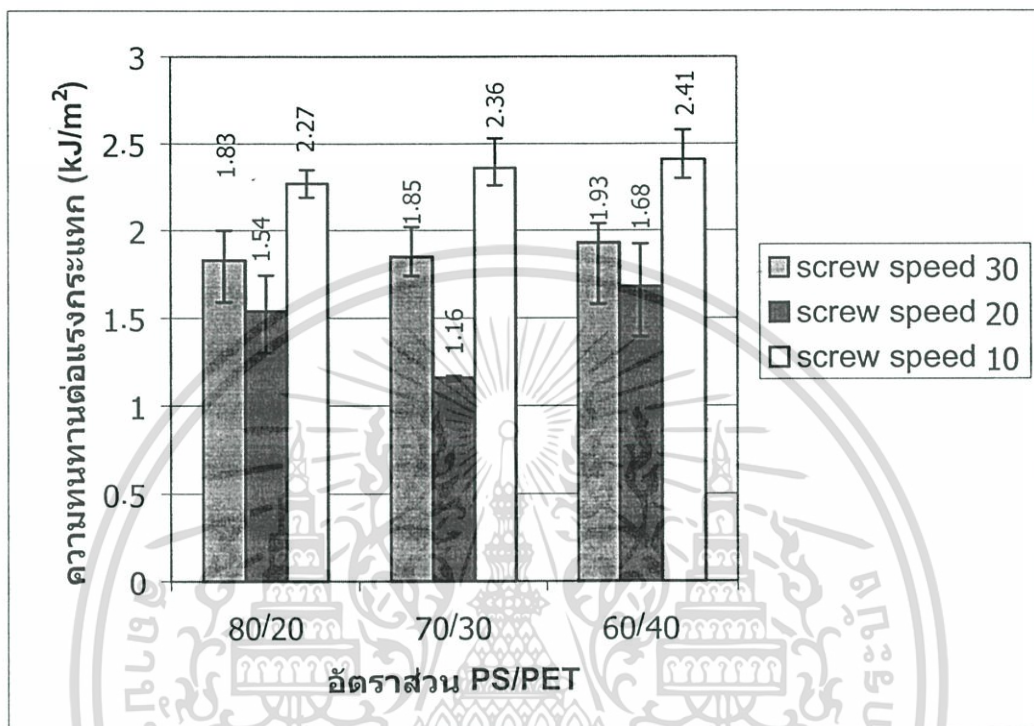
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อทำการทดสอบพอลิเมอร์ผสมโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ PS/PET พบว่าที่ความเร็วรอบของสกรูในการผสมเดียวกัน ค่าความแข็งกดที่ทดสอบได้เป็นไปตามกฎการผสม [33] โดยเมื่ออัตราส่วน PET มากขึ้นค่าความแข็งกดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก PET มีค่าความแข็งกดน้อยกว่า PS [27-30]

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบของสกรูในการผสมต่าง ๆ กัน พบว่าที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมเดียวกัน เมื่อความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 20 และ 30 รอบต่อนาทีค่าความแข็งกดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ค่าความแข็งกดลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของสกรูในการผสมต่ำ เวลาในการผสมเพิ่มขึ้น PET สามารถหลอมเหลวและผสมกับ PS ได้ดีกว่า ทำให้ค่าความแข็งกดลดลง

#### 4.3.1.3 ความทนทานต่อแรงกระแทก

เมื่อเตรียมชิ้นงานเป็นรูปไอซอดที่มีรอยบากแล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกกับอัตราส่วน PS/PET ที่ความเร็วรอบสกรูต่าง ๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนของ PS/PET พบว่าที่ความเร็วรอบเท่ากัน ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบของสกรูในการผสมต่อค่าความทนทานต่อแรงกระแทกพบว่า ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 20 และ 30 รอบต่อนาทีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงสุดในทุกอัตราส่วน เนื่องจากเวลาในการผสมนานขึ้น ทำให้พอลิเมอร์สามารถหลอมเหลวและผสมเข้ากันดีขึ้น การถ่ายเทพลังงานดีขึ้น ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกจึงสูงขึ้น ซึ่งค่าที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.9) ซึ่งแสดงถึงความเหนียว (Toughness) ของพอลิเมอร์ผสม

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุง PS ซึ่งแข็งเปราะให้สามารถรับแรงได้มากขึ้น และจากสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ทดสอบได้ พบว่าที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่าความทนทานต่อแรงกระแทกซึ่งแสดงถึงความเหนียวมากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามกฎการผสม [33] เนื่องจาก PET เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกซึ่งมีความเหนียวมากกว่า PS ที่เป็นพอลิเมอร์

ไม่ว้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

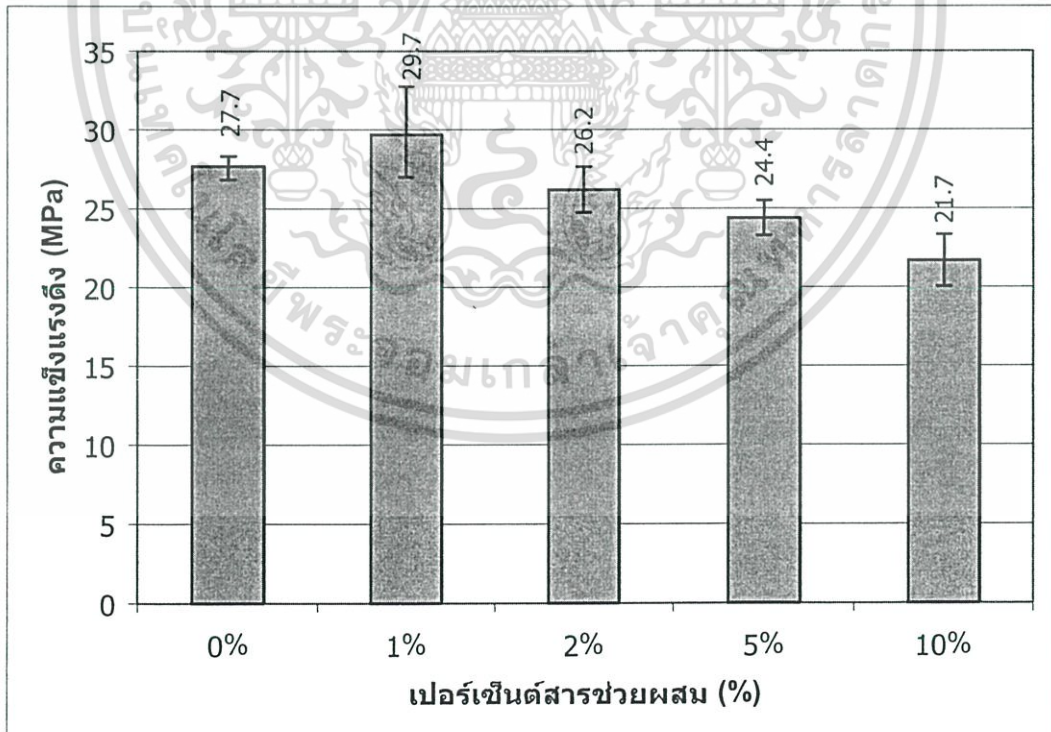
ลิเมอร์อัสฐาน เมื่อปริมาณ PET มาก สมบัติซึ่งแสดงถึงความเหนียวจึงมากขึ้น จากนั้นเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบของสกรูในการผสมพบว่า เมื่อทำการเลือกที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 ซึ่งมีปริมาณ PET ค่อนข้างมาก จึงต้องใช้เวลาในการหลอมเหลว PET และเวลาในการผสมพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้พอลิเมอร์ผสม PS/PET เท่ากับ 60/40 และใช้ความเร็วรอบของสกรูผสม 10 รอบต่อนาที เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมสารช่วยผสมต่อไป

#### 4.3.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม

เมื่อได้ทำการเลือกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ จึงทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมโดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสม 1 2 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก PET หลังจากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดังนี้

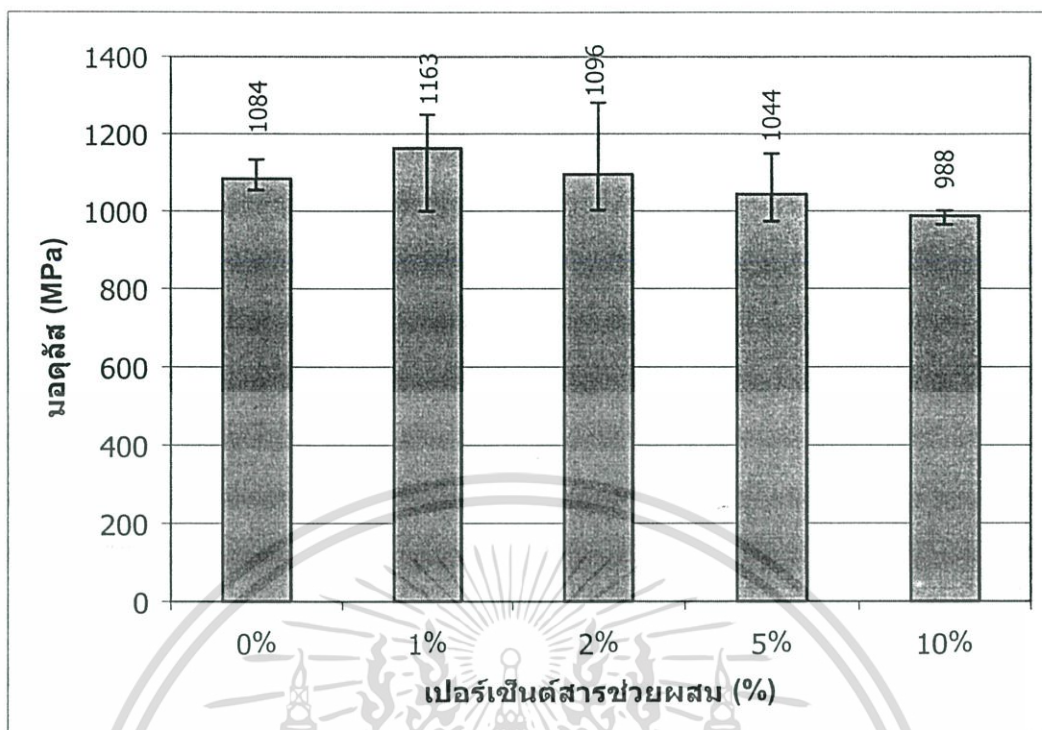
##### 4.3.2.1 ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส

เมื่อเตรียมชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ซึ่งได้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสมแสดงดังรูปที่ 4.12-4.14

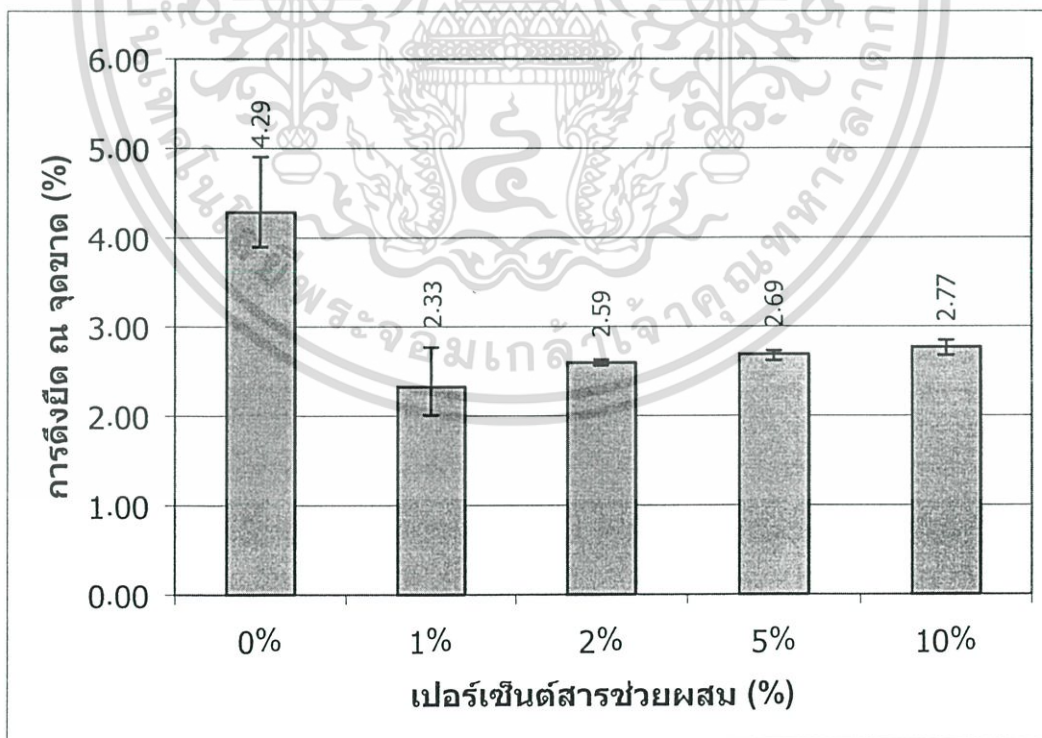


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ที่เปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ที่เปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมต่าง ๆ



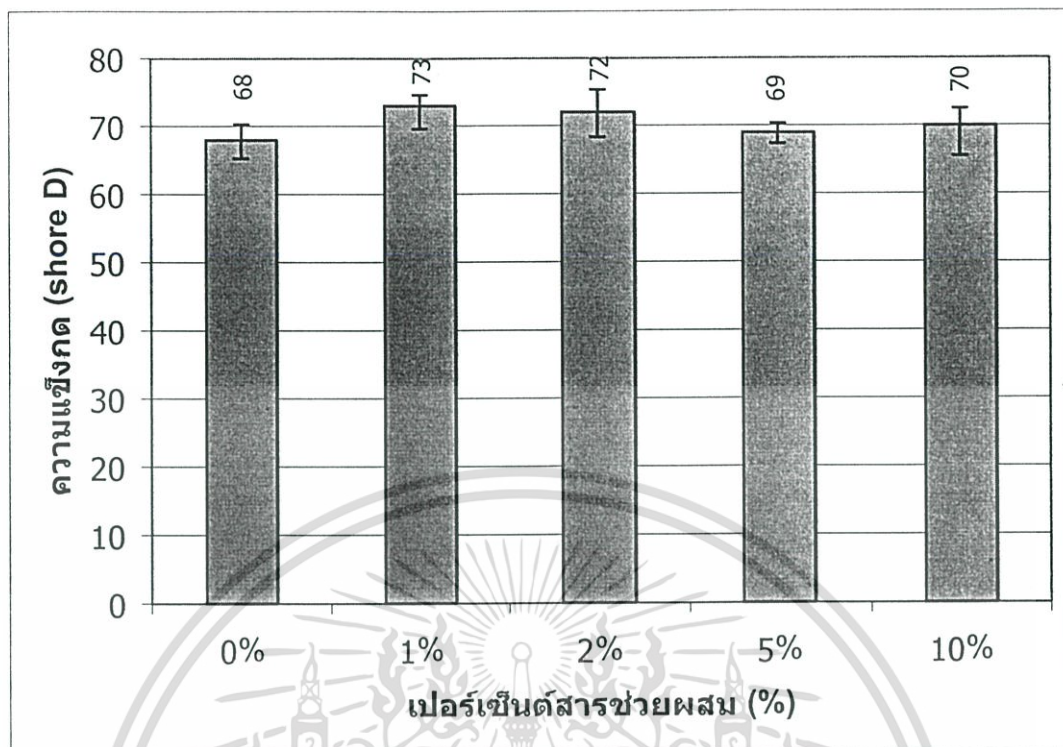
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ที่เปอร์เซ็นต์สาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารช่วยผสมต่าง ๆ กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม [21-23] พบว่าการเติมสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมช่วยให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นเมื่อการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายตัวและการยึดติดระหว่างวัฏภาคดี โดยในงานวิจัยนี้การยึดติดเกิดจากการเกี่ยวพันระหว่างส่วนที่เป็น PS ใน PSM กับวัฏภาค PS และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บาเมตของ PSM กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12-4.14 เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม พบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง โดยค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารช่วยผสมมากขึ้น ซึ่งอาจเนื่องจากการช่วยผสม PSM ทำให้วัฏภาคกระจายตัว PET เกิดการกระจายตัวในวัฏภาคของ PS ดีขึ้น (รูป 4.20-4.21) แต่เนื่องจากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ซึ่งมีค่า L/D เท่ากับ 6.5 ซึ่งค่อนข้างมาก ทำให้เวลาในการผสมค่อนข้างสั้น (128 วินาที) ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเวลาดังกล่าวอาจไม่เพียงพอต่อการผสมพอลิเมอร์ผสม และอาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บาเมตของ PSM กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET [32] ทำให้แรงยึดติดระหว่างวัฏภาคต่ำ รวมทั้งจากการศึกษาสมบัติทางความร้อน (ตารางที่ 4.5) พบว่าค่าองศาความเป็นผลึกลดลง อาจเนื่องจากการเติมสารช่วยผสมทำให้เกิดการขัดขวางการตกผลึกของ PET [19-20] สมบัติเชิงกลจึงมีแนวโน้มลดลง

#### 4.3.2.2 ความแข็งแรง (Shore D)

เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงชนิด shore D แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.15

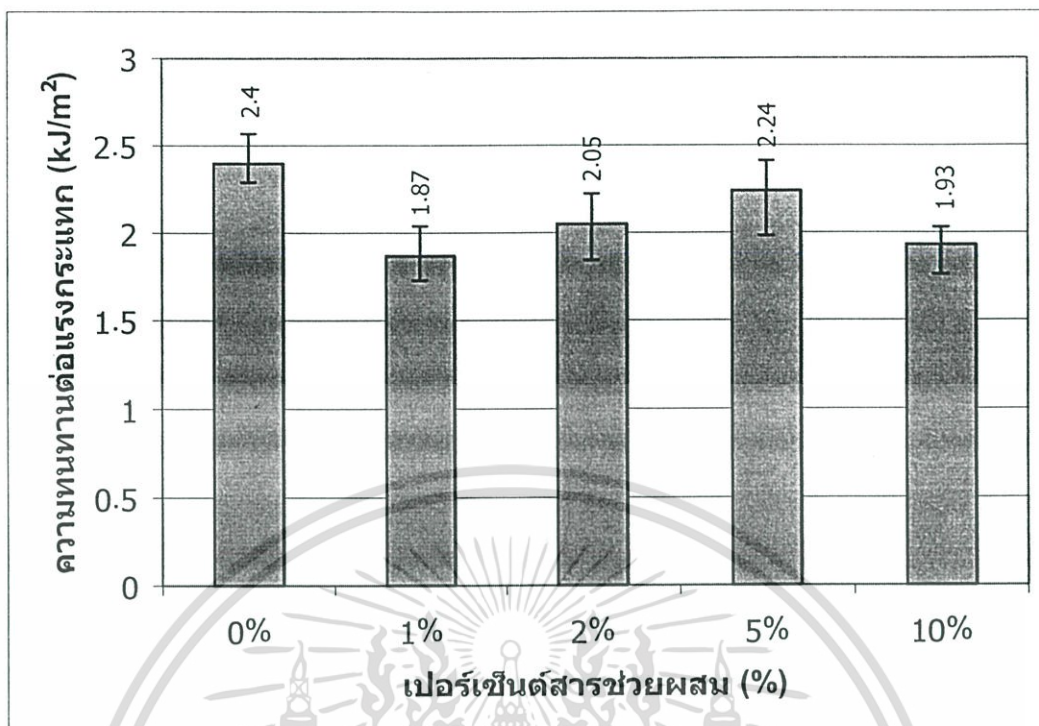


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ที่เปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมต่าง ๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.15 พบว่าการเติมสารช่วยผสมทำให้ค่าที่ทดสอบได้ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเติมสารช่วยผสมในปริมาณน้อย อีกทั้งการทดสอบความแข็งกดนี้เป็นการทดสอบเฉพาะที่พื้นผิว จึงมีปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจทำให้ผลที่ได้ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

#### 4.3.2.3 ความทนทานต่อแรงกระแทก

เมื่อเตรียมชิ้นงานเป็นรูปไอโซดที่มีรอยบากแล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทกที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่ออนาที ที่เปอร์เซ็นต์สารช่วยผสมต่าง ๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสมมีความทนทานต่อแรงกระแทกมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม อาจเนื่องมาจากสารช่วยผสมซึ่งกระจายตัวอยู่ระหว่างวัฏภาค โดยสารช่วยผสมในส่วนที่เป็น PS ซึ่งมีสัดส่วนมากสามารถเกิดการเกี่ยวพันกับ PS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์หลักของพอลิเมอร์ผสม และส่วนหมู่คาร์บาเมตของสารช่วยผสมซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET ได้ แต่การเกิดปฏิกิริยาต้องใช้เวลาที่เพียงพอ [32] ซึ่งในการผสมพอลิเมอร์ผสมนั้น ใช้เวลาค่อนข้างสั้น และอาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ทำให้แรงยึดติดระหว่างวัฏภาคต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมพบว่าค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มมากขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องจากการเกิดการเกี่ยวพันระหว่างส่วนที่เป็น PS ของสารช่วยผสมกับ PS ซึ่งเป็นวัฏภาคหลักในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น อีกทั้งมีส่วนของหมู่คาร์บาเมตซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET ได้มากขึ้น อาจทำให้แรงยึดติดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติมสารช่วยผสมในปริมาณ 1-10 % นี้ พบว่าการเติมสารช่วยผสมมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ลดลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากเอกลักษณ์ของสารช่วยผสม PSM ไม่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสม PS/PET เกิดการยึดติดระหว่างวัฏภาคได้ดีกว่าไม่ทราบแน่ชัด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น เนื่องจากเวลาในการผสมไม่เพียงพอเพื่อให้เกิดการผสมและการทำปฏิกิริยาของหมู่คาร์บาเมตของ PSM กับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบได้โดยการศึกษาสัณฐานวิทยาต่อไป

#### 4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

เตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยผสม แล้วตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกและค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ผสมแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกและอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ผสม PS/PET ที่อัตราส่วน 60:40 ที่ปริมาณสารช่วยผสมต่าง ๆ

เปอร์เซนต์สารช่วยผสม	เอนทาลปี (J/g)	เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกของ PET ในพอลิเมอร์ผสม** (%)	$T_m$ ( $^{\circ}$ C)	$T_c$ ( $^{\circ}$ C)
0	29.1	60.1	238.6	200.6
1	28.6	58.5	239.0	197.2
2	27.6	57.0	239.4	197.5
5	24.6	50.7	238.5	196.1
10	22.4	46.3	239.5	198.3

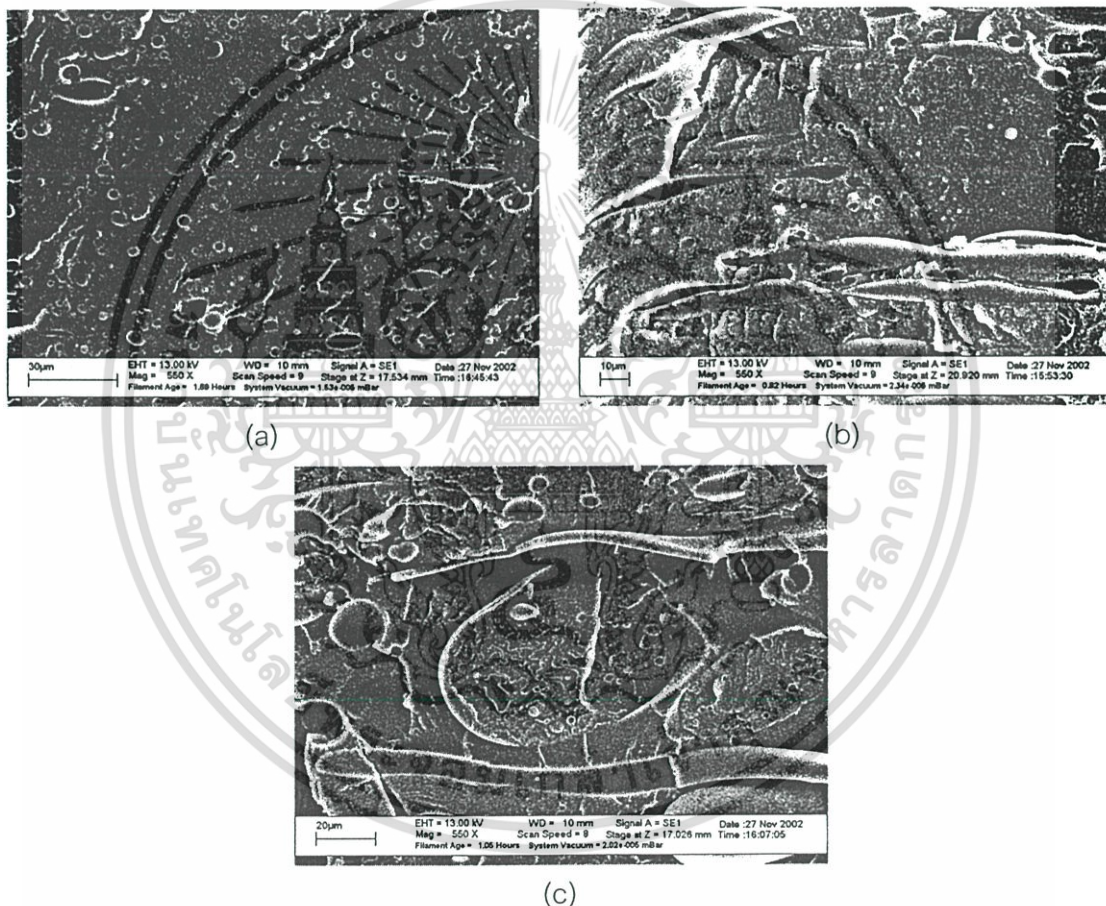
\*\* Normalise ด้วยน้ำหนัก PET ในพอลิเมอร์ผสม

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 พบว่าการเติมสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม PS/PET ไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ซึ่งแสดงว่าการเติมสารช่วยผสมไม่มีผลต่อขนาดผลึกของ PET ในพอลิเมอร์ผสม และพบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม ค่าเปอร์เซนต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเกิดจากสารช่วยผสมกระจายตัวไปยังบริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาคทั้ง 2 ทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่าง PS ของสารช่วยผสมกับ PS ซึ่งเป็นวัฏภาคหลัก และ PSM ที่มีหมู่คาร์บาเมตอาจเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET ปริมาตรอิสระมีน้อยลง ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ค่อนข้างยาก ส่งผลให้ขัดขวางการเกิดผลึก เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกจึงลดลง โดยค่า  $T_c$  ก็มีแนวโน้มแสดงว่า PET มีโอกาสในการตกผลึกยากขึ้น จึงมีอุณหภูมิการตกผลึกต่ำลง [19-20]

## 4.5 สัณฐานวิทยา

### 4.5.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปมาแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการหักชิ้นงาน นำมาเคลือบด้วยทองและทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยทำการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตและความเร็วรอบของสกรูต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.19

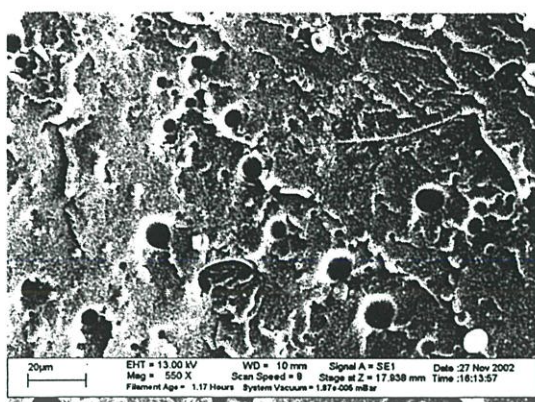


รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

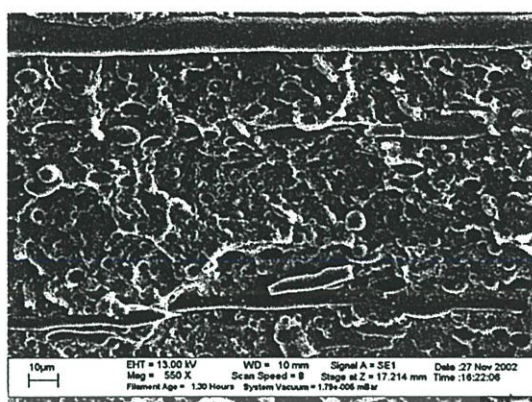
(a) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 80/20 (b) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 70/30

(c) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40

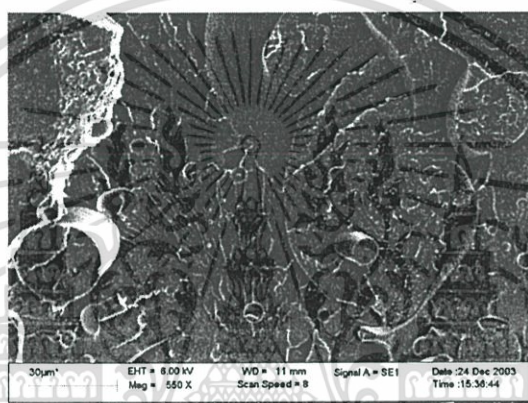
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



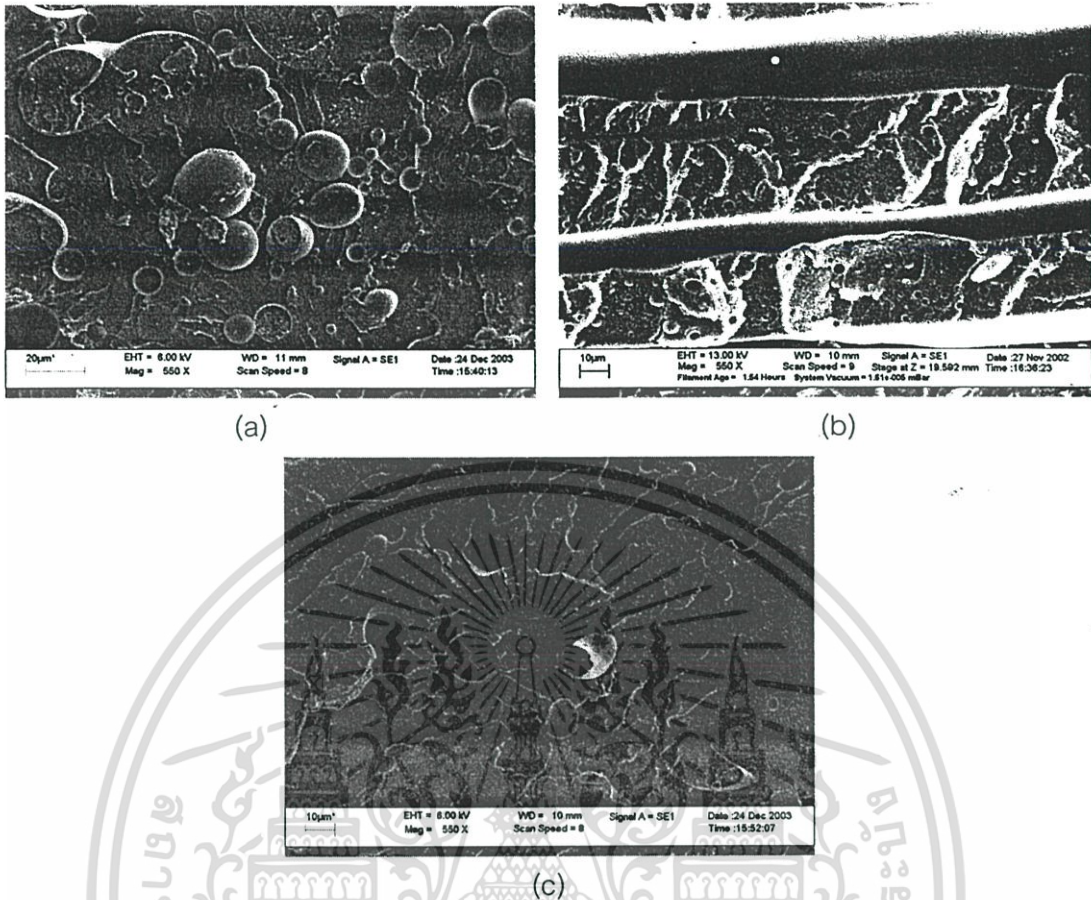
(b)



(c)

รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 20 รอบต่อนาที  
 (a) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 80/20 (b) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 70/30  
 (c) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



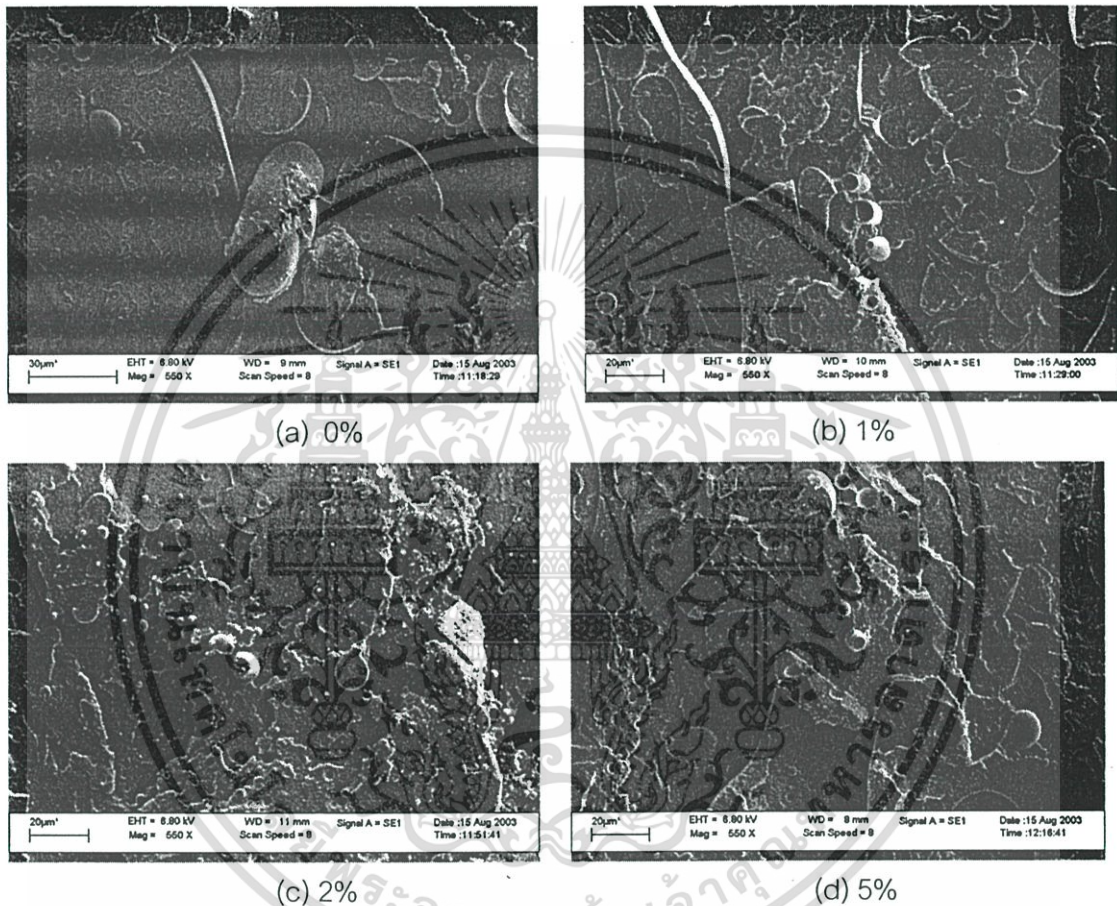
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาที  
 (a) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 80/20 (b) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 70/30  
 (c) อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17-4.19 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่อสัณฐานวิทยาที่ความเร็วรอบของสกรูในการผสมเดียวกัน พบว่าสัณฐานวิทยาของ PET ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัวมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะจากทรงกลม (Sphere) เป็นทรงกระบอก (Cylinder) [2,22] เมื่ออัตราส่วนของ PET มากขึ้นอย่างชัดเจนในทุกความเร็วรอบสกรู ซึ่งสอดคล้องกับผลสมบัติเชิงกล เมื่อมีปริมาณ PET มากขึ้น สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มดีขึ้น เนื่องจากสัณฐานวิทยาแบบทรงกระบอกทำให้สามารถรับและกระจายแรงตามแนวแรงดึงได้ดีขึ้น

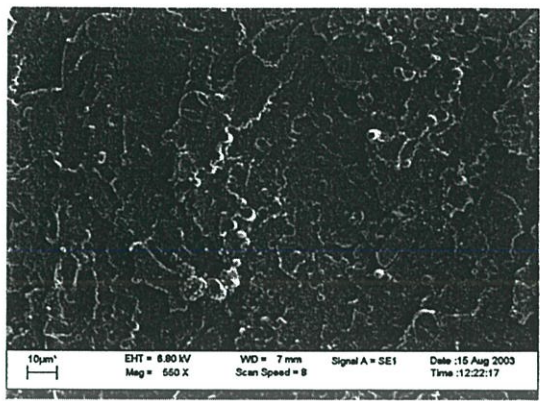
เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมเดียวกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบของสกรูในการผสมพบว่าที่ความเร็วรอบของสกรูต่ำ ๆ ขนาดของอนุภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีเวลาในการผสมเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของ PET ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า PS ได้ดีกว่า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยทำการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมและไม่เติมสารช่วยผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตเท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20



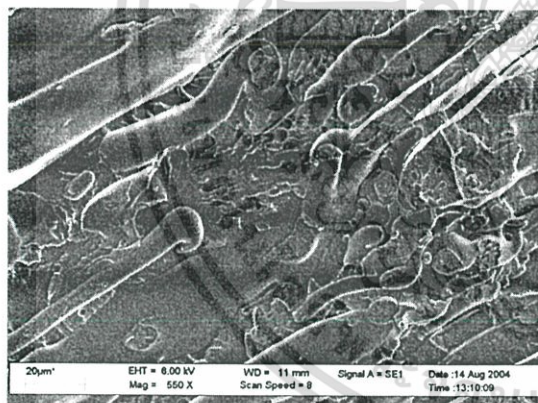
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



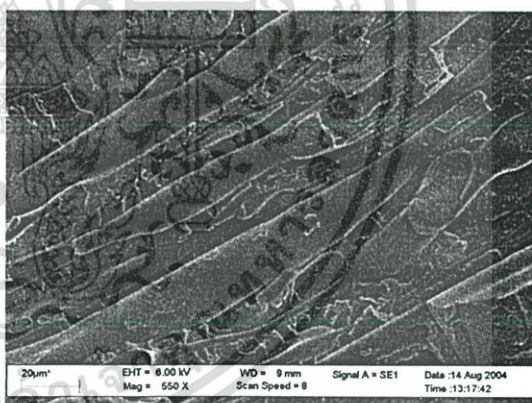
(e) 10%

รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางทิศทางการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยและเติมสารช่วยผสมในปริมาณต่าง ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตเท่ากับ 60/40 และความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

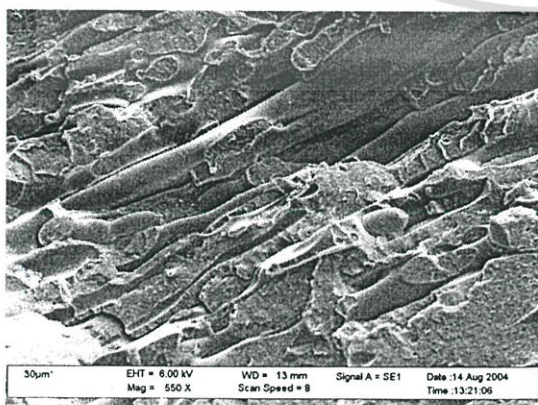
- (a) พอลิเมอร์ที่ไม่เติมสารช่วยผสม
- (b) พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 1 %
- (c) พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 2 %
- (d) พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 5 %
- (e) พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 10 %



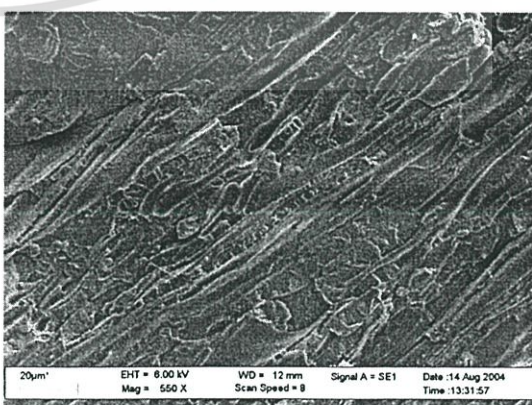
(a) 0%



(b) 1%

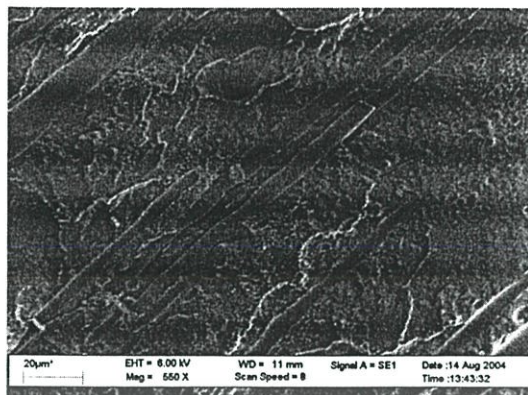


(c) 2%



(d) 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) 10%

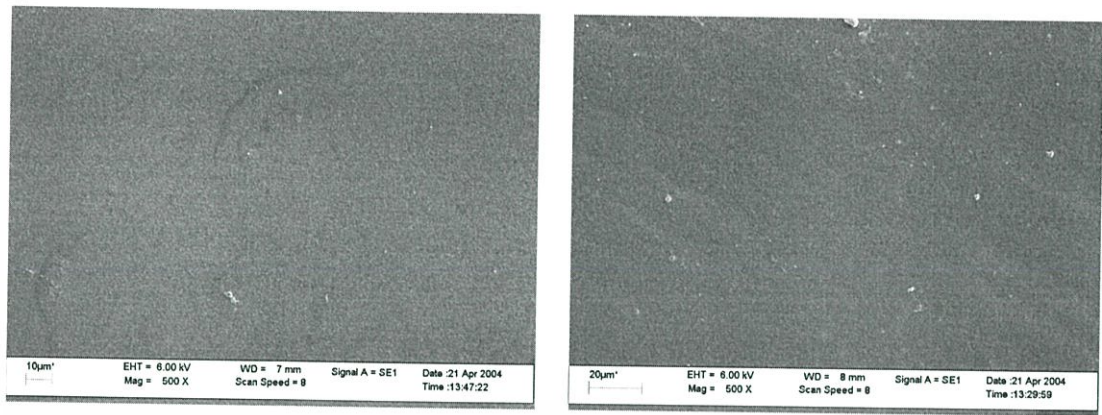
รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยและเติมสารช่วยผสมในปริมาณต่าง ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลตเท่ากับ 60/40 และความเร็วยอบสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

- (a) พอลิเมอร์ที่ไม่เติมสารช่วยผสม (b) พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 1 %  
 (c) พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 2 % (d) พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 5 %

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.20-4.21 พบว่าพอลิเมอร์ผสม PS/PET (60:40) ที่เติมสารช่วยผสมมากขึ้น มีสัณฐานวิทยาของ PET ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัวที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Cylinder) มีขนาดเล็กลง เนื่องจากสารช่วยผสมมีผลช่วยให้เกิดการกระจายตัวของวัฏภาคกระจายตัวที่ดีขึ้น แต่ไม่สามารถทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น อาจเนื่องมาจากแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคไม่ดี เพราะเวลาในการผสมสั้นทำให้ไม่เพียงพอต่อการผสมและการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บาเมตของสารช่วยผสมและหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET

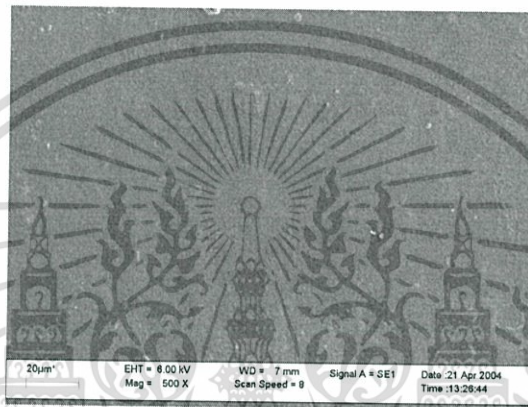
4.5.3 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมสารช่วยผสม 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก PET ที่เวลาในการให้ความร้อนต่าง ๆ

จากการศึกษาเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของการนำฟิล์ม PET และ PS มาซ้อนทับกัน โดยใช้ปริมาณสารช่วยผสม 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก PET ทำการให้อุณหภูมิที่ 240 °C เป็นเวลา 10 20 30 50 และ 75 นาที เพื่อศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อนที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของหมู่คาร์บาเมตของสารช่วยผสมกับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET โดยสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.22-4.23



(a)

(b)

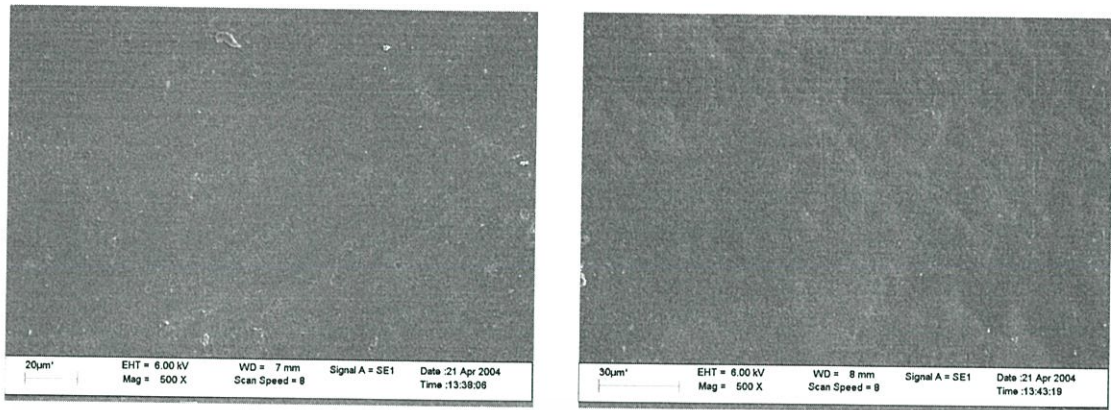


(c)

รูปที่ 4.22 ลักษณะผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 5 % โดยน้ำหนัก PET ที่เวลาในการให้ความร้อนต่าง ๆ

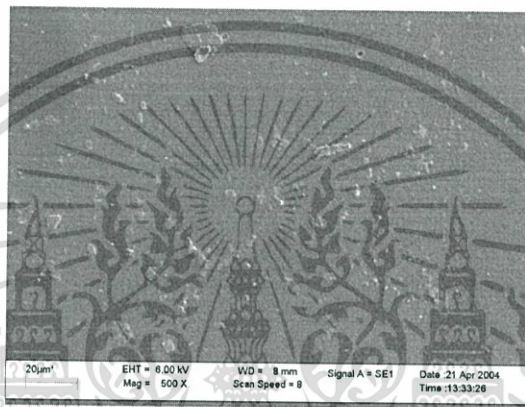
- (a) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เวลาการให้ความร้อนเท่ากับ 30 นาที
- (b) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เวลาการให้ความร้อนเท่ากับ 50 นาที
- (c) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เวลาการให้ความร้อนเท่ากับ 75 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)



(c)

รูปที่ 4.23 ลักษณะผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 10 % โดยน้ำหนัก PET ที่เวลาในการให้ความร้อนต่าง ๆ

(a) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เวลาการให้ความร้อนเท่ากับ 30 นาที

(b) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เวลาการให้ความร้อนเท่ากับ 50 นาที

(c) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เวลาการให้ความร้อนเท่ากับ 75 นาที

จากการศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อน พบว่าที่เวลาในการให้ความร้อนเท่ากับ 10 และ 20 นาที แผ่นฟิล์ม PS และ PET ไม่เกิดการยึดติดกัน จึงไม่สามารถนำมาศึกษาลักษณะวิทยา แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนเป็น 30 50 และ 75 นาที พบว่าฟิล์มเกิดการยึดติดกัน ทำให้หมุ่คาร์บาเมตของสารช่วยผสมและหมุ่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของฟิล์ม PET มีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยา และเมื่อนำมาศึกษาลักษณะวิทยาดังรูปที่ 4.22-4.23 โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสมเดียวกัน พบว่าเมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเวลาในการให้ความร้อนนานขึ้น ทำให้หมุ่คาร์บาเมตมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับหมุ่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET มากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบที่เวลาในการผสมเดียวกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารช่วยผสม พบว่าเมื่อสารช่วยผสมมากขึ้น ฟิล์มมีความขรุขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณสารช่วยผสมมากขึ้น ทำให้มีปริมาณของหมู่คาร์บาเมตเพิ่มขึ้น โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาจึงมากขึ้น ทำให้เกิดความขรุขระที่พื้นผิวมากขึ้น

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ อาจทำให้สันนิษฐานได้ว่า เวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของหมู่คาร์บาเมตกับหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET ซึ่งในการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ใช้เวลาในการผสมน้อย (128 วินาที) ทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บาเมตของ PSM และหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET อาจไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาจึงอาจเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ลดลงเล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) เพื่อนำมาใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) โดยผ่านกระบวนการผสมแบบเกิดปฏิกิริยา (Reactive Blending) โดยการสรุปผลการทดลองนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือ การสังเคราะห์ PSM และพิสูจน์เอกลักษณ์ ส่วนที่สองคือ การผสมพอลิเมอร์ผสมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผสมและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ส่วนที่สามคือ การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสมและเติมสารช่วยผสมที่ปริมาณต่าง ๆ

### 5.1 การสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีน-เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM)

#### 5.1.1 การสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (Ethyl N-methacryloyl-carbamate; MAC)

ในการสังเคราะห์เอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (MAC) โดยใช้เมทาคริลลาไมด์ (MAA) ทำปฏิกิริยากับเอทิลคลอโรฟอร์มेट พบว่า MAC ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นผลึกทรงกระบอกใส ดูดความชื้นสูง เมื่อถูกอากาศเป็นเวลานานจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (% Conversion) เท่ากับ 54-60 % ซึ่งสามารถตรวจเอกลักษณ์ได้ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR)

#### 5.1.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต- (Poly(styrene-co-methacryloyl carbamate); PSM)

ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) ด้วยปฏิกิริยาดิสเพอร์ชันพอลิเมอไรเซชัน โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีนมอนอเมอร์และ MAC ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารช่วยผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสม พบว่าเมื่อลดปริมาณตัวริเริ่ม น้ำหนักโมเลกุลมีค่ามากขึ้น แต่ % Yield มีค่าลดลงมาก และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ PSM คือเมื่อปริมาณตัวริเริ่มเท่ากับ 0.25 % โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน 36 ชั่วโมง PSM ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีค่า % Yield

เท่ากับ 21-38 % ซึ่งสามารถตรวจเอกลักษณ์ได้ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์-ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกโทรสโกปี (NMR) เทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) และเทคนิค เจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) และทดสอบการเกิดปฏิกิริยาด้วยการเตรียมฟิล์มและศึกษา ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม

## 5.2 สภาวะที่เหมาะสมในการผสม

เมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนและความเร็วรอบของสกรูในการผสม ที่แตกต่างกันพบว่า สมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตมากขึ้น และทำการผสมที่ความเร็วรอบของสกรูต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณวิทยา คือ สัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่อัตราส่วนพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตต่ำ ๆ มีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphere) เมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตเพิ่มมากขึ้น ลักษณะของสัญญาณวิทยา เปลี่ยนเป็นทรงกระบอก (Cylinder) ซึ่งรับแรงตามทิศทางการดึงได้ดีกว่า รวมทั้งที่ความเร็วรอบของสกรูต่ำ มีการกระจายของวิภาคกระจายตัวดีขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดและความทนทานต่อแรงกระแทกที่ดีที่สุดคือที่อัตราส่วน PS/PET เท่ากับ 60/40 โดยใช้ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 10 รอบต่อนาที

## 5.3 การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติมสารช่วยผสมที่ปริมาณต่าง ๆ

สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม โดยเมื่อทำการเติมสารช่วยผสมมากขึ้น สมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลง ซึ่งจากผลทางสัญญาณวิทยา พบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสมมากขึ้น PET ซึ่งเป็นวิภาคกระจายตัวมีขนาดของสัญญาณวิทยาซึ่งเป็นทรงกระบอก (Cylinder) เล็กลง แสดงถึงการกระจายตัวที่ดี แต่เวลาในการผสมน้อย ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการผสมและการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บาเมตและหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET การยึดติดระหว่างวิภาคไม่แข็งแรงทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

จากการทดสอบฟิล์มเพื่อศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม พบว่าเมื่อปริมาณสารช่วยผสมมากขึ้น ความขรุขระเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากการศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อนฟิล์ม พบว่าเมื่อเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้น ความขรุขระมีแนวโน้มมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าเวลามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของหมู่คาร์บาเมตและหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PET

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษากระบวนการในการผสมพอลิเมอร์ผสม โดยเพิ่มความยาวของสกรูในการผสม และควบคุมอุณหภูมิในการผสม รวมทั้งใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยให้การผสมมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากนั้น ทำการศึกษาและออกแบบในส่วนของแม่พิมพ์ของเครื่องฉีดขึ้นรูปให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้เพื่อให้ PET มีเวลาเพียงพอต่อการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้มากขึ้น
2. ศึกษาการผสมแบบหลายขั้นตอน เช่น การผสมสารช่วยผสมกับพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งก่อน จากนั้นจึงทำการผสมอีกครั้งกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง
3. ทำการสังเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมตกับมอนอเมอร์ชนิดอื่นที่สนใจนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET) เพื่อสามารถนำไปใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมระบบอื่นต่อไป
4. ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนกับเอทิล N-เมทาคริลอิลคาร์บาเมต (PSM) กับหมู่ฟังก์ชันของ PET ที่อุณหภูมิต่าง ๆ
5. ศึกษาการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเพื่อป้องกันการเสียสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Raul E. "Polystyrene a growing growing concern or not." [Online]. Available : <http://members.aol.com/profchm/escalant.html>. 1998.
- [2] Fayt R., Hadjiandreou P. and Teyssie P. "Molecular design of multicomponent polymer systems. VII. Emulsifying effect of poly(ethylene-b-styrene) copolymer in high density polyethylene/polystyrene blends." J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed., vol. 23, 1985. pp. 337-342.
- [3] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [4] Fox D.W. and Allen R.B. High Performane and Composited Encyclopedia. New York : John Wiley & sons. 1991.
- [5] Frank S.B. and Glenn H.F. "Block Copolymer Thermodynamics : Theory and Experiment." Annu. Rev. Physic. Chem., vol. 40, 1990. pp. 525-557.
- [6] Leszek A.U. Introduction to Polymer Alloys and Blends. New York : Hanser Publishers, 1990. pp. 1-27.
- [7] Brandrup J. Polymer handbook. 4<sup>th</sup> ED. New York : A Wiley-interscience Publication, 1998. pp. VII/676.
- [8] Eisele U. Introduction to polymer Physics. New York : Springer-Verlag. 1990. pp. 158.
- [9] Folkes M.J. and Hope P.S. Polymer Blends and Alloys. London : Chapman & Hall, 1993. pp. 46-54.
- [10] ชลลดา ฤตวิรุฬห์ "พอลิเมอร์ผสม" วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, ฉบับที่ 10, เล่ม 1, 2543. หน้า 14-17.
- [11] Fayt R., Jerome R. and Teyssie. "Molecular Design of Multicomponent Polymer Systems. I. Emulsifying Effect of Poly(hydrogenated-b-styrene) Copolymer in Low Density Polyethylene/polystyrene Blends." J. Polym. Sci., Polym. Lett. Ed., vol. 19, 1981. pp. 79-84.
- [12] Paul D.R. Polymer blends. Vol. 2, London : Academic Press. 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างขึ้นไว้เพื่อใช้ในการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 [13] ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์ พอลิเมอร์คอลลอยด์ กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยา-  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2545.

- [14] Young R.J. and Lovell P.A. Introduction to Polymers. London : Chapman & Hall. 1991. pp. 44-46.
- [15] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ เคมีพอลิเมอร์ กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [16] Lee J.S. and Park K.Y. "In Situ Compatibilization of PET/PS Blends Through Carbamate-Functionalized Reactive Copolymers." *J. Polym. Sci.*, vol. 38, 2000. pp. 1396-1404.
- [17] Feldmand D. and Barbalata A. Synthetic Polymers Technology, Properties, Application. London : Chapman & Hall. 1996. pp. 177-183.
- [18] Jerry L.H. and Brian D.D. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. New York : John Wiley & Sons. 1992. pp. 62-64.
- [19] Ju M.Y. and Chang F.C. "Compatibilization of PET/PS blends through SMA and PMPI dual compatibilizers." *Polymer*, Vol. 41, 1999. pp. 1719-1730.
- [20] Chiang C.R. and Ju M.Y. "Polymer Blends of PPE Compatibilized by Poly[methylene(phenylene isocyanate)] (PMPI) Coupler." *Polym. Eng. Sci.*, vol. 38, 1998. pp. 622-633.
- [21] Maa C.T. and Chang F.C. "In situ Compatibilization of PET/PS Blends through Reactive Copolymers." *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 49, 1993. pp. 913-924.
- [22] Chang F.C. and Hwu Y.C. "Styrene Maleic Anhydride and Styrene Glycidyl Methacrylate Copolymers as In Situ Reactive Compatibilizers of Polystyrene/Nylon 6,6 Blends." *Polym. Eng. Sci.*, vol. 31, 1991. pp. 1509-1519.
- [23] Mvkey I.D. "Polystyrene/Polyethylene Terephthalate/Polystyrene-block-Polycaprolactone Blends : Emulsification and Mechanical Performance." *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 43, 1991. pp. 1593-1603.
- [24] ASTM D 638 Committee on Standard. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1993.
- [25] ASTM D 2240 Committee on Standard. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. Philadelphia : American Society for Testing and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] ASTM D 256 Committee on Standard. Standard Test Method for Determining the Pendulum Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1993.
- [27] Roberts R.C. "Poly(ethylene terephthalate) I-Heat of Fusion." *Polymer*, vol. 10, 1969. pp. 113-116.
- [28] Jaquiss D.B. Encyclopedia of Chemical Technology. Vol. 18, New York : John Wiley and Sons. 1982. pp. 549.
- [29] Brozenick N.J. Modern Plastics Encyclopedia. New York : McGraw-Hill. 1986-1987. pp. 464.
- [30] Rubin I.I. Handbook of Plastics Materials and Technology. New York : John Wiley and Sons. 1992. pp. 644-645.
- [31] Van Krevelen D.W. Properties of Polymers : Correlations with Chemical Structure. Amsterdam : Elsevier Publishing Company. 1972.
- [32] Su W.Y. "In situ Copolymerization and Compatibilization of Polyester and Polystyrene Blend. I. Synthesis of Functionalized Polystyrenes and the Reactions with Polyester." *Polymer*, Vol. 42, 2001. pp. 5107-5119.
- [33] Gottfried W.E. Polymeric Materials. Munich : Hanser Publishers. 2001. pp. 98-99, 168.

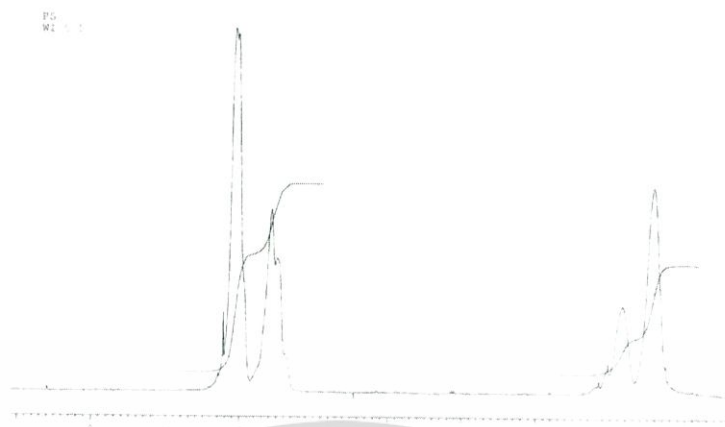
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

## นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกทรา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

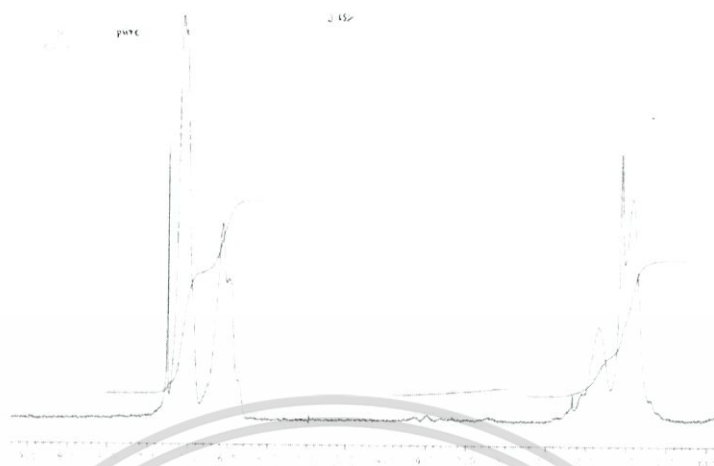


รูปที่ ก-1  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของพอลิสไตรีน



รูปที่ ก-2  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก มอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.75% โดยน้ำหนัก มอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง

รูปที่ ก-4  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5% โดยน้ำหนัก มอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-5  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนัก  
มอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง



รูปที่ ก-6  $^1\text{H}$  NMR สเปกตรัมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนัก  
มอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง

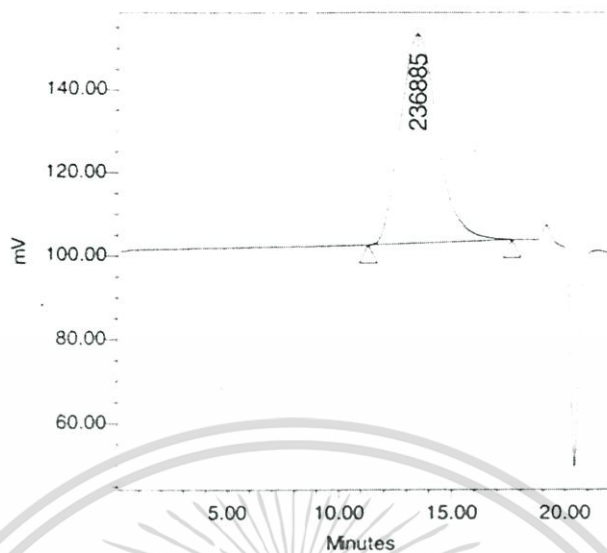
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

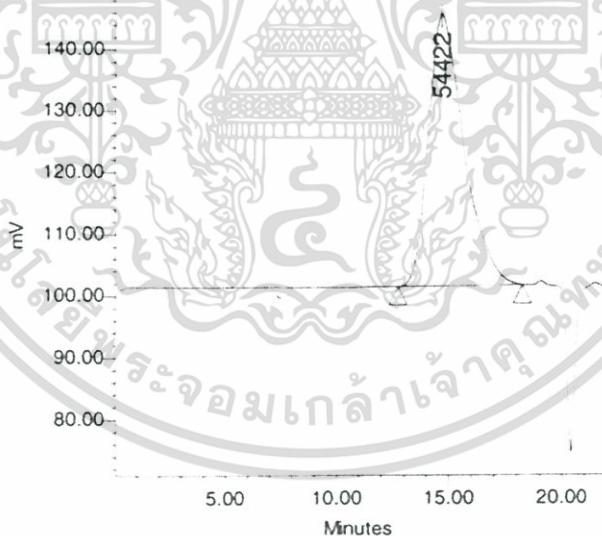
## โครมาโทแกรมจากเครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

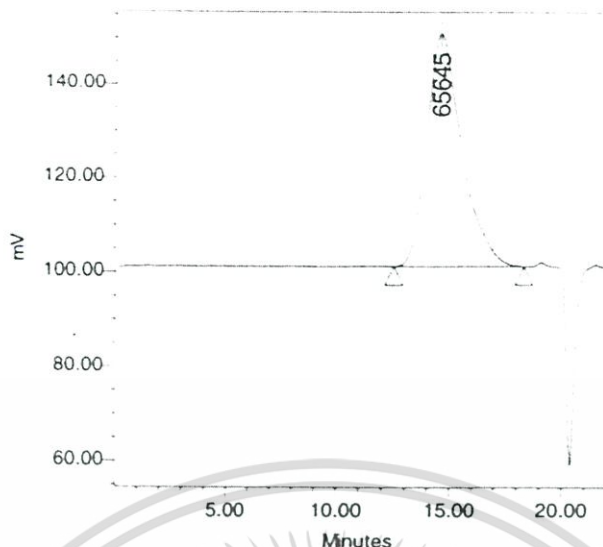


รูปที่ ข-1 โคโรมาโทแกรมของพอลิเอทิลีน

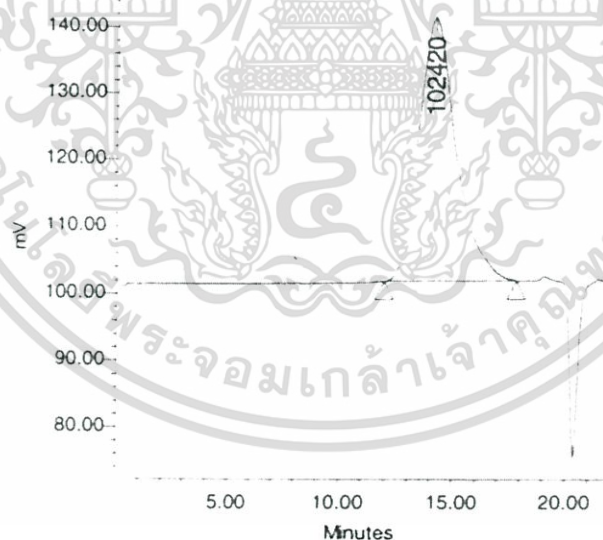


รูปที่ ข-2 โคโรมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 1% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

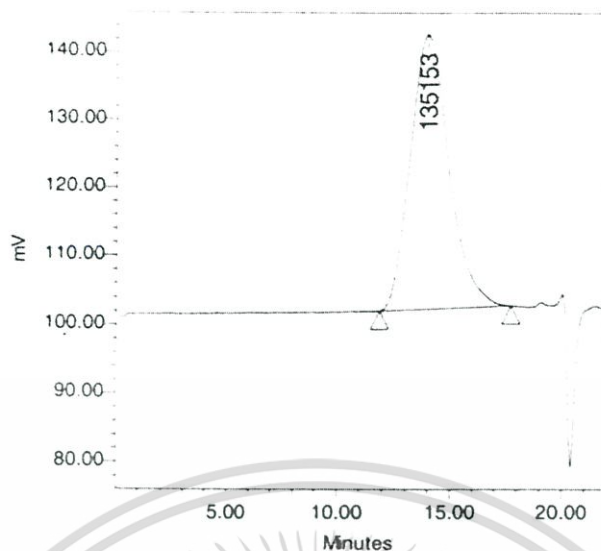


รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.75% โดยน้ำหนักมอนอ-เมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง



รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5% โดยน้ำหนักมอนอ-เมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

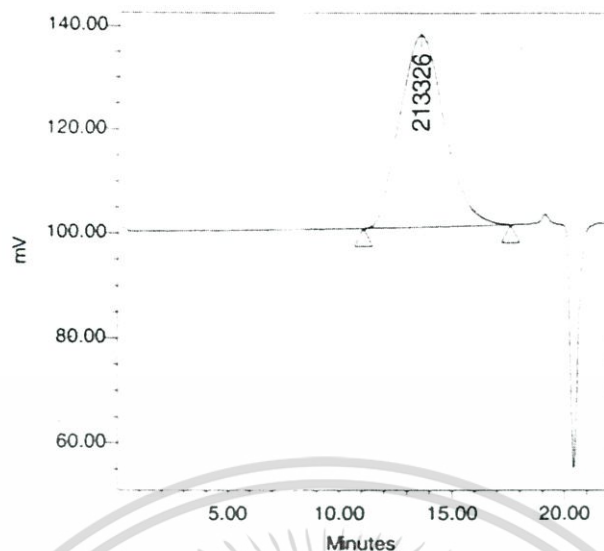


รูปที่ ข-5 โคโรมาโทแกรมของ PSM ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง

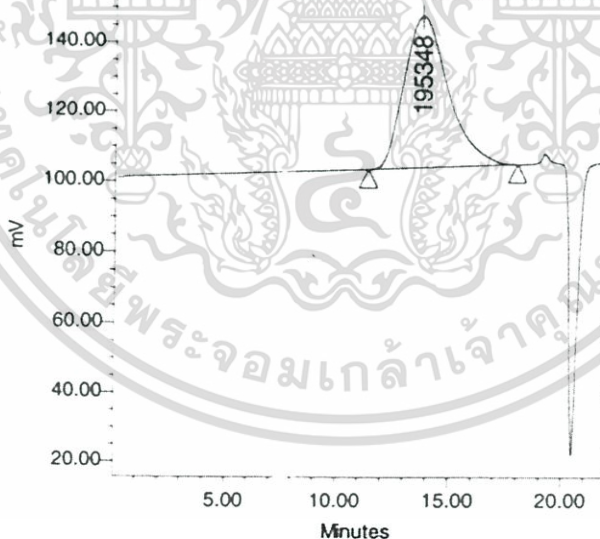


รูปที่ ข-6 โคโรมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 1 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

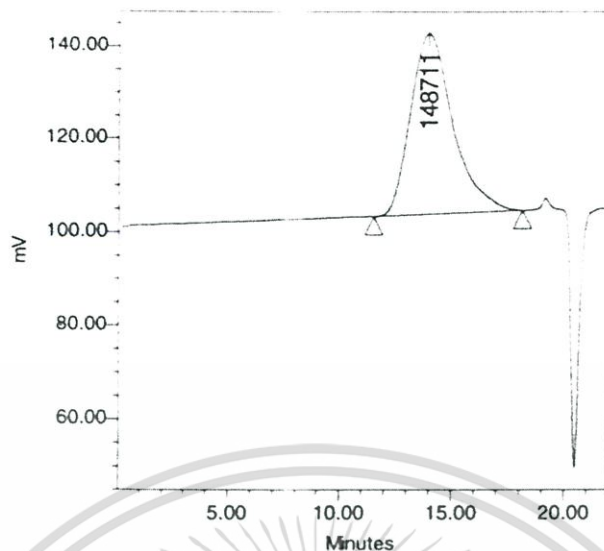


รูปที่ ข-7 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 2 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง

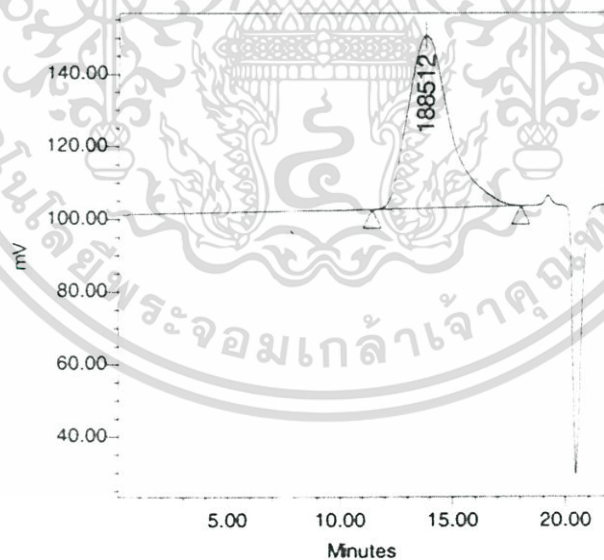


รูปที่ ข-8 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 3 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

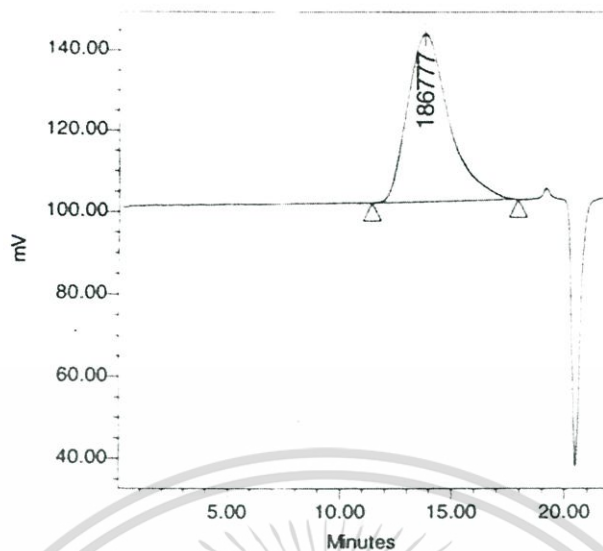


รูปที่ ข-9 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 4 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง

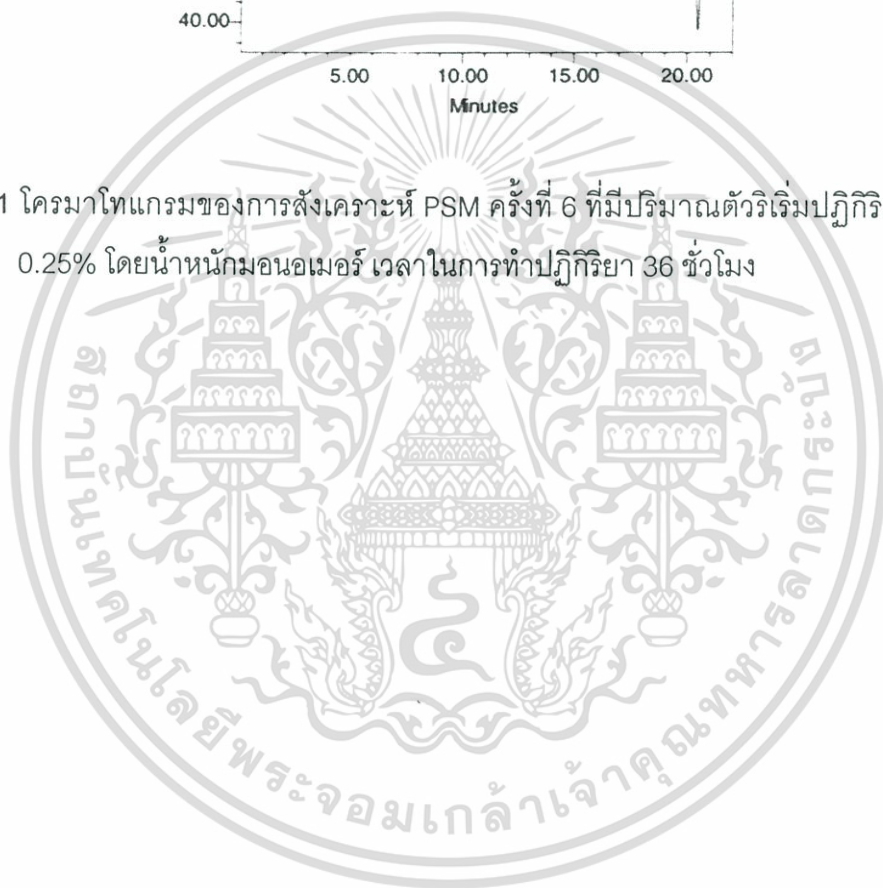


รูปที่ ข-10 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 5 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-11 โครมาโทแกรมของการสังเคราะห์ PSM ครั้งที่ 6 ที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 36 ชั่วโมง



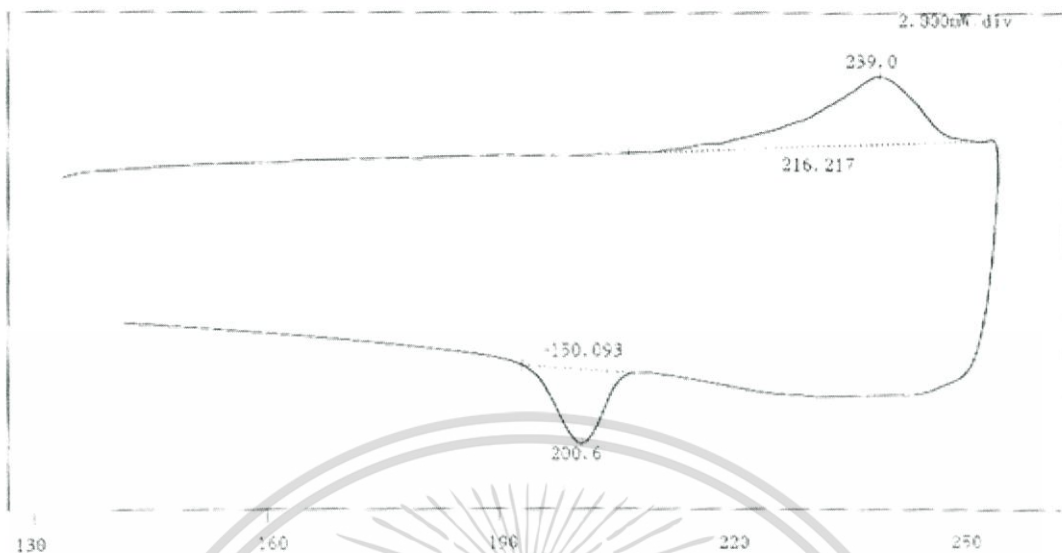
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เทอร์โมแกรมจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียล  
สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

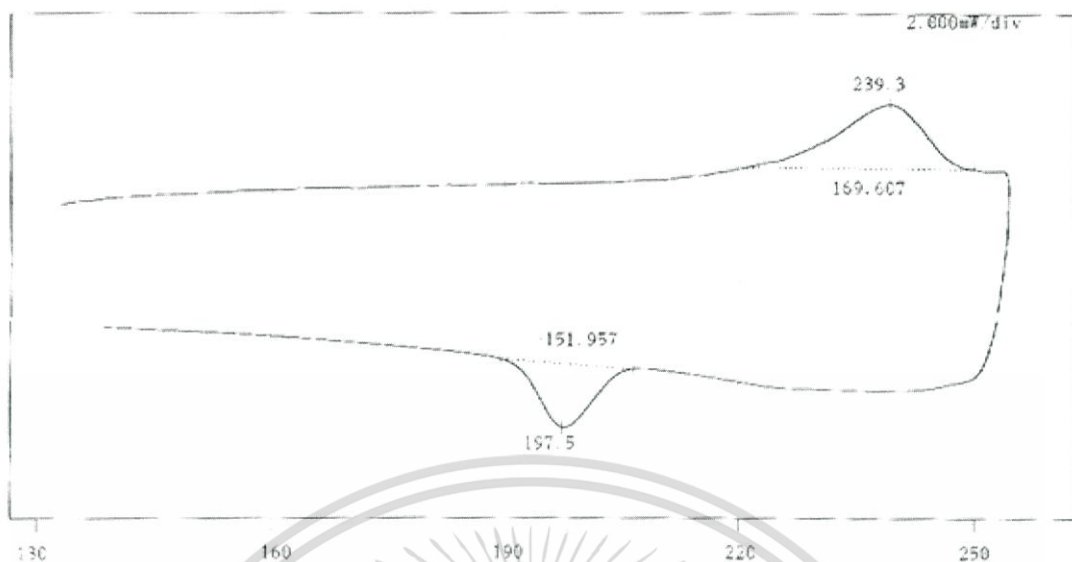


รูปที่ ค-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม



รูปที่ ค-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

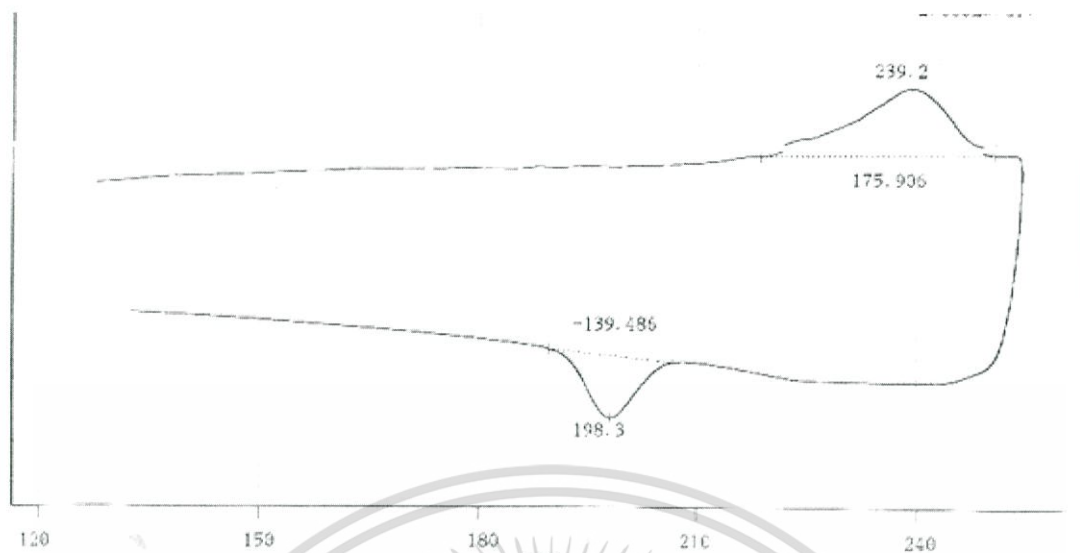


รูปที่ ค-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 2%



รูปที่ ค-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม 10%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

## สภาวะในการจัดขึ้นรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 สภาวะในการฉีดขึ้นรูปที่อัตราส่วน PS/PET และความเร็วรอบของสกรูต่าง ๆ

TIME PROGRAMMING

DIE CLS/OPN TIME : 40	MELTING TIME :255
STD COR ACT TIME : 20	DECOMPRS TIME : 30
1 ST STG INJ TIME :20	COOLING TIME : 35
2 ND STG INJ TIME : 0	EJECTOR COUNT : 1
3 RD STG INJ TIME : 0	SCW FWD TIME : 0
EJE FWD DLY TIME : 0	SCW BWD TIME 1 : 0
MELTING DLY TIME : 0	SCW BWD TIME 2 : 0
EJE BKD DLY TIME : 0	ALARM TIME : 400

PRESSURE PROGRAMMING

DIE CLS PRESR : 30	DECOMP PRESR : 30
CLS LOW PRESR : 25	PLUNGER PRESR : 30
CLS HI PRESR : 20	EJECTOR PRESR : 5
DIE OPEN PRESR : 20	SCW-IN PRESR : 20
1 ST INJ PRESR : 40	DIE ADJ PRESR : 60
2 ND INJ PRESR : 0	
3 RD INJ PRESR : 0	
MELTING PRESR : 40	

PROGRAMMING FLOW SPEED

RAPID CLS SPD : 40	1 ST STG INJ SPD : 50
HIGH CLS SPD : 40	2 ND STG INJ SPD : 50
CLAMPING SPD : 40	3 RD STG INJ SPD : 50
DIE OPN SLW 1 : 20	MELTING SPD : 40
RAPID OPN SPD : 40	DECOMP SPD : 40
DIE OPN SLW 2 : 40	EJECTOR SPD : 40
PLUNGER SPD : 40	SCREW-IN SPD : 40
DIE ADJ SPD : 40	DIE CHANGE SPD : 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PROGRAMMING TEMPERATURE

PROGRAMED TEMP		CURRENT TEMP
NOZZLE	:	275
ZONE 1	:	270
ZONE 2	:	260
ZONE 3	:	0
ZONE 4	:	0
ZONE 5	:	0
ZONE 6	:	0

## PROGRAMMING OPTIONS

DIE CLS SPD	: 1	1 = HI SPD	2 = FAST SPD
PLUNGER SPD	: 1	1 = USE	2 = NO USE
ROBOTS	: 1	1 = USE	2 = NO USE
SCRW	: 1	1 = USE	2 = NO USE 3 = SID-COR
EJECTOR	: 1	1 = STAL	2 = MULTI 3 = FIXD NB
SID-COR	: 1	1 = TIME	2 = TRAVEL

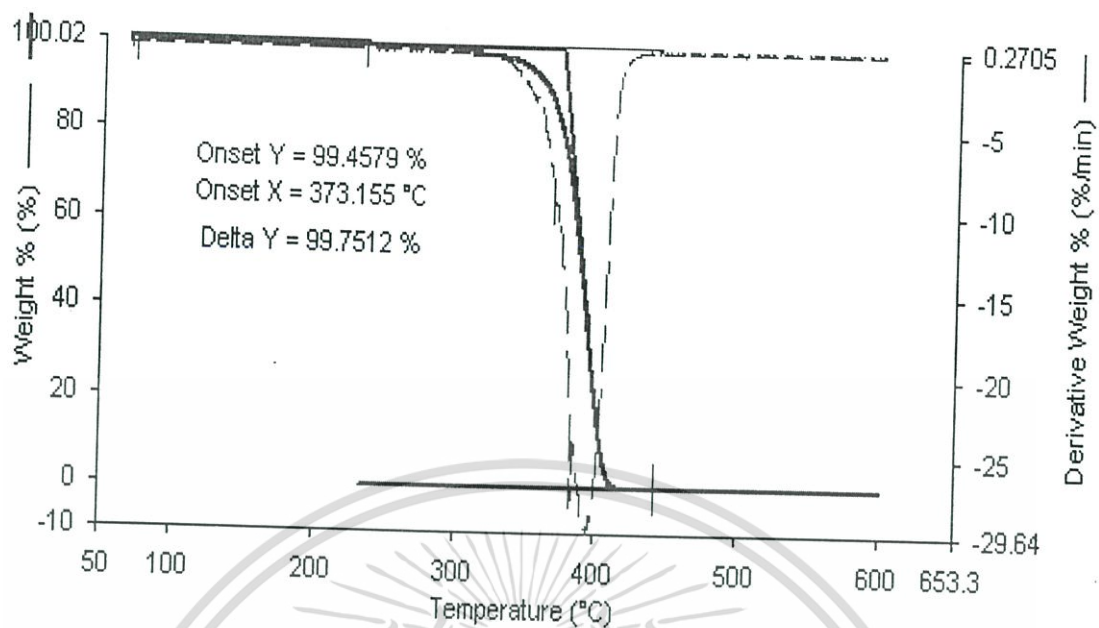
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## เทอร์โมแกรมจากเครื่องเทอร์มัลกราฟิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิสไตรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาววิภา สีลาเอกเลิศ  
 วัน เดือน ปีเกิด 15 มีนาคม 2521 ที่กรุงเทพมหานคร  
 ที่อยู่ 346 ซอยสุขุมวิท 54  
 แขวงบางจาก เขตพระโขนง กรุงเทพฯ 10260 โทร 0-2311-0062  
 ประวัติการศึกษา 2543 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้