

การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตแอลแอลดีพีอี/แบเรียมซัลเฟต
ด้วยสารช่วยผสมและอีวีเอ

PROPERTY IMPROVEMENT OF LLDPE/BARIUM SULFATE
COMPOSITES USING COMPATIBILIZER AND EVA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-014-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTY IMPROVEMENT OF LLDPE/BARIUM SULFATE
COMPOSITES USING COMPATIBILIZER AND EVA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-SC-M-014-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

“การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตแอลแอลดีพีอี/แบเรียมซัลเฟต
ด้วยสารช่วยผสมและอีวีเอ”

“PROPERTY IMPROVEMENT OF LLDPE/BARIUM SULFATE
COMPOSITES USING COMPATIBILIZER AND EVA”

ชื่อนักศึกษา

นางสาวเมธาวิ อุตตสุรดี

รหัสประจำตัว

56605047

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)

ภาควิชา

เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภรัตน์ รักชลี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

-

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทธารุช มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบันฯ	
ผศ.ดร.สุภรัตน์ รักชลี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 302 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตฤณี ธนะบริพัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 20 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของแอลแอลดีพีอี/แบเรียมซัลเฟตด้วย สารช่วยผสมและอีวีเอ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเมธาวี อุตตสุรดี
รหัสประจำตัว	56605047
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ผสมแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) ซึ่ง $BaSO_4$ ที่นำมาใช้มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) 1% โดยน้ำหนัก การใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (LLDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม และการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ในคอมโพสิต LLDPE/ $BaSO_4$ การเตรียมสูตรผสม LLDPE/ $BaSO_4$ ใช้ปริมาณ $BaSO_4$ เป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ (php) และใช้ LLDPE-g-MA ในปริมาณ 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนักของ $BaSO_4$ การผสมสูตรทำได้โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด จากนั้นนำไปขึ้นรูปขึ้นงานคอมโพสิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของคอมโพสิต LLDPE/ $BaSO_4$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ $BaSO_4$ เพิ่มขึ้น เป็นไปตามกฎของของผสม จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า คอมโพสิตทุกสูตรผสมมีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึก อุณหภูมิในการตกผลึกใหม่ และปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE ใกล้เคียงกัน และการเพิ่มปริมาณ $BaSO_4$ ทำให้ยังมอดูลัส และความแข็งกตเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ผลจากการศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นเนื่องจากสภาพแวดล้อม (ESCR) พบว่าค่า ESCR เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ $BaSO_4$ เพิ่มขึ้น สำหรับการใส่ SA สามารถช่วยให้ $BaSO_4$ มีการแตกกระจายใน LLDPE ดีขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต การใช้ LLDPE-g-MA ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงดึง ยังมอดูลัส และความแข็งกตเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง การใช้ EVA ในระบบ LLDPE/EVA/ $BaSO_4$ พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทก โดยมีค่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EVA ที่เพิ่มขึ้น ค่า ESCR ของวัสดุมีค่าสูงขึ้นในกรณีที่ใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA หรือใช้ EVA ในคอมโพสิต LLDPE/ $BaSO_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : คอมโพลิต แบบเรียบซัลเฟต พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น สารช่วยผสม
เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Property Improvement of LLDPE/Barium Sulfate Composites using Compatibilizer and EVA
Student Name	Miss Maetawee Uttasuradee
Student ID	56605047
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee

Abstract

This research studied on property improvement of linear low density polyethylene (LLDPE)/barium sulfate (BaSO_4). BaSO_4 was surface treated with 1 %wt of stearic acid (SA). Maleic anhydride grafted linear low density polyethylene (LLDPE-g-MA) was used as a compatibilizer. Ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) was also used in LLDPE/ BaSO_4 composites. BaSO_4 contents were varied at 5, 10, 15, 20 and 25 parts per hundred of polymer (php) and LLDPE-g-MA was used at 1, 2 and 3 %wt of BaSO_4 . All compounds were prepared using an internal mixer and the composite samples were shaped using an injection molding process. The results revealed that the density of LLDPE/ BaSO_4 composites was increased with increasing BaSO_4 contents, following the rule of mixture. From thermal properties, the crystalline melting temperature, recrystallization temperature and %crystallinity of LLDPE in all samples were similar. From mechanical properties, the results indicated that Young's modulus and hardness were increased with increasing BaSO_4 contents but %elongation at break and impact strength of LLDPE/ BaSO_4 composites were decreased. Environmental stress cracking resistance (ESCR) of the composites increased with increasing BaSO_4 contents. Surface treatment on BaSO_4 with SA could help better dispersion of BaSO_4 ; however, mechanical properties of LLDPE/ BaSO_4 composites did not significantly changed. The incorporation of LLDPE-g-MA resulted in the increase of tensile strength, Young's modulus and hardness but the decrease in %elongation at break and impact strength of the composites. The addition of EVA to LLDPE/EVA/ BaSO_4 could improve impact strength and the impact strength of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LLDPE/EVA/BaSO₄ composites was increased with increasing EVA contents. Moreover, the presence of LLDPE-g-MA compatibilizer or EVA improved the ESCR of LLDPE/BaSO₄ composites.

Keywords : Composite, BaSO₄, LLDPE, Compatibilizer, EVA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่ เป็นอย่างดีจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ขอขอบคุณ คณะกรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ซึ่ง ได้ให้คำแนะนำถึงประเด็นต่างๆ ในการศึกษาและชี้แนวทางในการแก้ปัญหา การค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม อันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ และสรุปผลการศึกษา รวมทั้งการแก้ไขงานให้สมบูรณ์ และผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุน การเสนอผลงานวิชาการ

ขอขอบคุณ คุณอัสชิ งามล้ำยอง ผู้จัดการอาวุโส ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ทีโอเอแพนซ์ (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการสนับสนุนแบบเรียนซัลเฟตที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบคุณ ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจให้ทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา หากวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ นับเป็นความปิติยินดีอย่างยิ่งที่ได้ทำงานวิจัยฉบับนี้ขึ้น และหากมี ข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้

นางสาวเมธาวี อุตตสุรดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คอมโพลีเมอร์.....	5
2.1.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพลีเมอร์.....	5
2.1.1.1 ส่วนเสริมแรง.....	5
2.1.1.2 เมทริกซ์.....	5
2.1.2 การแบ่งชนิดของคอมโพลีเมอร์.....	6
2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะส่วนเสริมแรง.....	6
2.1.2.2 การแบ่งตามลักษณะการเกิดคอมโพลีเมอร์.....	7
2.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพลีเมอร์.....	7
2.2 พอลิเมอร์ผสม.....	8
2.2.1 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม.....	8
2.2.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม.....	9
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	10
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของ LLDPE.....	11
2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE.....	11
2.3.3 การใช้งาน LLDPE.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA).....	12
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ EVA.....	12
2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVA.....	13
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน EVA.....	14
2.5 แบเรียมซัลเฟต.....	14
2.5.1 ลักษณะทั่วไปของ BaSO ₄	14
2.5.2 การแบ่งประเภทของ BaSO ₄	15
2.5.3 กระบวนการแต่งแร่แบไรต์.....	16
2.5.4 สมบัติโดยทั่วไปของ BaSO ₄	17
2.5.5 การใช้งาน BaSO ₄	18
2.6 กรดสเตียริก.....	19
2.6.1 ลักษณะทั่วไปของกรดสเตียริก.....	19
2.6.2 สมบัติโดยทั่วไปของ SA.....	20
2.6.3 การใช้งาน SA.....	20
2.7 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	21
2.7.1 ความเป็นมา.....	21
2.7.2 กระบวนการผลิต.....	21
2.7.3 สมบัติโดยทั่วไปของ PE-g-MA.....	21
2.7.4 การใช้งาน PE-g-MA.....	22
2.8 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	22
2.8.1 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	23
2.8.2 รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	23
2.8.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	23
2.8.3.1 อุณหภูมิ (พลาสติกหลอมเหลวและแม่พิมพ์).....	23
2.8.3.2 เวลา (ฉีด ย้ำรักษาความดันและหล่อเย็น).....	23
2.8.3.3 ความดัน (ฉีด ย้ำรักษาความดันและแม่พิมพ์).....	24
2.8.3.4 ความเร็ว (ฉีดและปิด-เปิดแม่พิมพ์).....	24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 สารเคมี.....	37
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	40
3.3.1 การวิเคราะห์ BaSO ₄	40
3.3.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ BaSO ₄	40
3.3.1.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของ BaSO ₄	40
3.3.2 การเคลือบผิว BaSO ₄ ด้วย SA 1% โดยน้ำหนัก.....	40
3.3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์.....	41
3.3.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	42
3.3.5 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง.....	42
3.3.6 การตรวจสอบหุมฟังก์ชันของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO ₄	44
3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณกรดสเตียริก.....	44
3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ ในชิ้นงานตัวอย่าง.....	45
3.3.9 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก.....	45
3.3.10 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต.....	46
3.3.10.1 การกระจายตัวของ BaSO ₄	46
3.3.10.2 การกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE.....	46
3.3.11 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง.....	46
3.3.12 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก.....	47
3.3.13 การทดสอบความแข็งกด.....	48
3.3.14 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	49
4.1 การศึกษาผลของปริมาณ BaSO ₄	49
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ และความหนาแน่นของคอมโพสิต.....	49
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	50
4.1.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	50
4.1.3.1 สัณฐานวิทยาของ BaSO ₄	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3.2 สัณฐานวิทยาของตัวอย่างคอมโพสิต.....	51
4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต.....	53
4.1.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	57
4.2 การศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัว SA และการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA.....	58
4.2.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ BaSO ₄ ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก.....	59
4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริก.....	59
4.2.1.2 ผลการตรวจสอบปริมาณกรดสเตียริก.....	60
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ และความหนาแน่นของคอมโพสิต.....	60
4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	61
4.2.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต.....	61
4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต.....	64
4.2.6 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	67
4.3 การศึกษาผลของการใช้ EVA.....	69
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ และความหนาแน่นของคอมโพสิต.....	69
4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	70
4.3.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต.....	71
4.3.3.1 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE.....	71
4.3.3.2 การศึกษาการกระจายตัวของ BaSO ₄ ในคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄	71
4.3.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต.....	73
4.3.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก.....	86
ภาคผนวก ข.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค.....	97
ภาคผนวก ง.....	105
ภาคผนวก จ.....	106
ภาคผนวก ฉ.....	108
ภาคผนวก ช.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	110



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	7
2.2 ตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	8
2.3 ชนิดและสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ.....	10
2.4 คุณสมบัติของแบเรียมซัลเฟตสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรมตามมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.846-2532).....	16
2.5 ตัวแปรทางจลนศาสตร์ของ Avrami จากสมการของ Avrami สำหรับกระบวนการ ตกผลึกแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal).....	25
2.6 สมบัติทางความร้อนของ HDPE สูตรต่างๆ.....	27
2.7 สูตรผสม PP/BaSO ₄ ที่เตรียม.....	28
2.8 ความเป็นผลึก และสมบัติเชิงกลของ Neat PP และ PP/BaSO ₄	32
2.9 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมโดยรายงานเป็นเวลาที่มีตัวอย่าง 50% เกิดรอยแตกเกิดขึ้น.....	34
3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE.....	37
3.2 สมบัติบางประการของ EVA.....	38
3.3 สมบัติบางประการของ BaSO ₄	38
3.4 สมบัติบางประการของ LLDPE-g-MA.....	38
3.5 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์.....	41
4.1 ปริมาณของ BaSO ₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	49
4.2 T _m , T _c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มี ปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	50
4.3 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกันใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C.....	58
4.4 ปริมาณของ BaSO ₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้ สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	61
4.5 T _m , T _c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มี การใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพลีเมอร์ตัวอย่างที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารส่วยผสมใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C.....	68
4.7 ปริมาณของ BaSO ₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพลีเมอร์ LLDPE/BaSO ₄ และ LLDPE/EVA/BaSO ₄	70
4.8 T _m , T _c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพลีเมอร์ LLDPE/BaSO ₄ และ LLDPE/EVA/BaSO ₄	70
4.9 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/EVA/BaSO ₄ ใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C.....	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A (____) และ พอลิเมอร์ B (____) โดย (a) Miscible (b) Immiscible และ (c) Partially miscible.....	10
2.2 โครงสร้างทางเคมีของ LLDPE.....	11
2.3 เอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA).....	13
2.4 ภาพขยายของ BaSO ₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14
2.5 ภาพตัวอย่างการใช้งาน BaSO ₄	19
2.6 โครงสร้างทางเคมีของ PE-g-MA.....	21
2.7 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	22
2.8 Stress-Deformation ของตัวอย่างต่างๆ.....	25
2.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) กับ Axial strain สำหรับตัวอย่างคอมโพสิตที่ 10% โดยปริมาตรของ BaSO ₄	26
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{IC} กับปริมาณ BaSO ₄ (% โดยน้ำหนัก) ในคอมโพสิต HDPE.....	27
2.11 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO ₄	28
2.12 Wide angle X-ray diffractograms ของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก.....	29
2.13 ปริมาณความเป็นผลึกของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	30
2.14 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	30
2.15 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	30
2.16 SEM micrographs พื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระแทกของ PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก.....	31
2.17 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักของ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ ที่มี BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก.....	32
2.18 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ EVA ใน HDPE หรือ LDPE ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	33
2.19 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA และ LDPE/EVA.....	34
2.20 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA และ LDPE/EVA หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่าง HE3 หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ที่เวลาต่างๆ (a. 10 h และ b. 1000 h).....	35
2.22 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่าง LE3 หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ที่เวลาต่างๆ (a. 10 h และ b. 1000 h).....	36
3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น.....	44
3.2 ลักษณะและการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ESCR.....	48
4.1 SEM micrograph แสดงสัญญาณวิทยาของ BaSO ₄ (กำลังขยาย 10,000 เท่า).....	51
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์ในการกระจายตัวของขนาด.....	51
4.3 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO ₄ ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	52
4.4 Stress-strain curve ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	53
4.5 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	54
4.6 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	56
4.7 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	56
4.8 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	58
4.9 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค DRIFTS-FTIR.....	59
4.10 การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง LLDPE และ BaSO ₄ เมื่อมีการใช้ SA หรือ LL-g-MA.....	62
4.11 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (ภาพซ้าย : กำลังขยาย 6000 เท่า และภาพขวา : กำลังขยาย 20000 เท่า).....	63
4.12 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	65
4.13 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	66
4.14 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่าง LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า)	68
4.16 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	71
4.17 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO ₄ และ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	72
4.18 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄	73
4.19 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄	75
4.20 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้พอลิเมอร์เป็นที่รู้จักกันดีเพราะได้รับความนิยมและมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย พอลิเมอร์มีบทบาทต่อชีวิตประจำวัน และอุตสาหกรรมหลายๆ ด้าน ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์สามารถผลิต ดัดแปลง แปรรูปได้ง่าย มีความแข็งแรง ทนทาน ทำให้สินค้าที่ผลิตจากพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามการใช้พอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้สมบัติตามที่ต้องการได้ ในผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จึงต้องมีการผสมสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน หรือสมบัติการแปรรูป เพื่อให้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

การมีค่าความหนาแน่นต่ำถือเป็นจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหรือเซรามิกส์ อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้งานบางกรณีที่ต้องการวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะสูง เพื่อนำไปใช้ในงานถ่วงน้ำหนัก ทำให้พอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้สมบัติตามที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงมีการนำเอาพอลิเมอร์มาผสมกับวัสดุชนิดหนึ่งๆ ที่เรียกว่า สารตัวเติม (Fillers) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะมีความหนาแน่นสูงกว่าพอลิเมอร์ จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ ทำให้วัสดุมีสมบัติเหมาะสมกับงานที่ต้องการนำไปใช้ เช่น การผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ลงไปในยาง ในการผลิตยางหุ้มท่อหรือผลิตภัณฑ์ถ่วงน้ำหนัก เพื่อช่วยยึดให้ท่ออยู่กับที่หรือช่วยให้ท่อไม่เกิดการลอยเมื่อใช้งานในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่ายาง สารตัวเติมเหล่านี้ยังใช้ในการผลิตยางรองฐานกรวยป้ายจราจร และฐานยางหรือฐานพลาสติกยึดเสาสำหรับแบ่งเขตแดน เพื่อไม่ให้วัสดุลื่นได้ง่ายเมื่อลมนพัด นอกจากความต้องการปรับปรุงสมบัติต่างๆ แล้ว การใส่สารตัวเติมลงไปยังมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิตอีกด้วย ทั้งนี้เพราะสารตัวเติมส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์

การเลือกชนิดและปริมาณของสารตัวเติมขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้สารตัวเติม สมบัติและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยการใช้สารตัวเติมมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณการใช้ เนื่องจากการเติมสารตัวเติมในปริมาณมากทำให้มีโอกาสที่สารตัวเติมจะกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ไม่ดี ส่งผลให้สารตัวเติมมีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และถ้าใส่สารตัวเติมในปริมาณมากเกินไปจนกระทั่งพอลิเมอร์เมตริกซ์มีไม่มากพอที่จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานสารตัวเติม จะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลดต่ำลง นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมยังมีข้อจำกัดในเรื่องความแตกต่างระหว่างขั้วพอลิเมอร์เมตริกซ์ และสารตัวเติม ในกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างขั้วมาก ทำให้ใส่สารตัวเติมได้ในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงต้องใช้สารตัวเติมในปริมาณที่พอเหมาะ และนิยมใช้สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เช่น กรดสเตียริกมาเคลือบอนุภาคของสารตัวเติมเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น [1] นอกจากนี้ยังมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้สารเติมแต่งประเภทอื่นๆ เพิ่ม เช่น สารช่วยผสม (Compatibilizer) เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่มีสารตัวเติมเป็นองค์ประกอบ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) เนื่องจากในปัจจุบัน LLDPE เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ และใช้กันอย่างแพร่หลาย ลักษณะการใช้งานของ LLDPE ส่วนใหญ่ นิยมใช้ทำเป็นแผ่นฟิล์ม หรือแผ่นพลาสติก เนื่องจาก LLDPE มีสมบัติเด่นคือ มีความสามารถในการทนต่อแรงดึงได้มาก ทำให้สามารถผลิตฟิล์มที่มีความบางโดยไม่เกิดการฉีกขาด มีความทนทานต่อการเจาะทะลุสูง เนื่องจากการมีผลึกในโครงสร้าง [2] นอกจากนี้ LLDPE นิยมใช้ในงานที่ต้องการความเหนียว หรืองานที่ต้องการสมบัติการรับแรงกระแทก เช่น ใช้ในการผลิตขวดพลาสติก และภาชนะบรรจุของอื่นๆ เช่น เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง ใช้ทำของใช้ในครัวเรือน ผลิตภัณฑ์ด้านการกีฬาและของเล่นเด็ก นอกจากการใช้งานดังกล่าวข้างต้นแล้ว ในปัจจุบัน LLDPE นิยมนำมาใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ในการประมงทางทะเลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติในเรื่องความแข็งแรงคงทน และมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถทนต่อแรงกดที่เกิดจากน้ำหนักหรือแรงดันน้ำในปริมาณมากๆ ได้ดี และ LLDPE ไม่ปล่อยสารพิษออกมาแม้โดนความร้อนสูง ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ปอเก็บน้ำ กระชังสำหรับเพาะเลี้ยงปลา เป็นต้น

สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัย คือ แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate, BaSO_4) ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีสมบัติเด่น คือ มีความหนาแน่นสูงมาก (ประมาณ 4.5 g/cm^3) เป็นสารที่มีพื้นผิวที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี สามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรดต่างได้ดี [3] ดังนั้นจึงนิยมใช้ผสมกับยางหรือพอลิเมอร์เพื่อปรับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ซึ่งสมบัติดังกล่าวทำให้ BaSO_4 นิยมใช้เป็นสารตัวเติมที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนัก จึงใช้ผสมกับพอลิเมอร์ที่ถูกผลิตเป็นกระชังเพาะเลี้ยงปลา จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Wang, K. [4-5] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) โดยใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม โดยจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO_4 (0-24% โดยน้ำหนัก) ทำให้ค่า Young's modulus และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม BaSO_4 ในปริมาณที่มาก (24% โดยน้ำหนัก) ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการกระจายตัวไม่ดี จึงมีการนำกรดสเตียริก (Stearic acid, SA) มาเคลือบอนุภาคของ BaSO_4 เพื่อให้ BaSO_4 มีการกระจายตัวใน PP คอมโพสิตดีขึ้น ช่วยให้ความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ Young's modulus มีค่าลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted polypropylene, PP-g-MA) จากผลการทดลองพบว่าการใช้ PP-g-MA ทำให้ค่า Young's modulus ของวัสดุเพิ่มขึ้น และสามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคได้

จากงานวิจัยของ Bianchi, F. [6] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมจาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) โดยใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และศึกษาผลของสารปรับปรุงพื้นผิวชนิดต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า การเติม BaSO_4 ทำให้ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) และ Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าการใช้ BaSO_4 ที่เคลือบผิวด้วยกรดไขมันทำให้ Yield stress และ Young's modulus ของ HDPE คอมโพสิตมีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจการใช้พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) มากขึ้นและมีการผลิตเป็นการค้ากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกัน ทำให้สามารถปรับสมบัติของพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้หลากหลายตามความต้องการขึ้นกับการเลือกสมบัติเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาใช้ [7] สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามที่ต้องการ นอกจากข้อดีและข้อด้อยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาใช้ผสมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (Miscibility) หรือความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่นำมาผสม เนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค (Interfacial interaction) ที่ไม่แข็งแรงมักจะส่งผลให้วัสดุที่ได้มีสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ไม่ดี นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงวิธีการผสม เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการผสมเข้ากันได้ดี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมคอมโพสิตจาก LLDPE ที่มีการใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม โดยศึกษาผลของปริมาณ BaSO_4 และมีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยกระจายตัว SA สารช่วยผสม LLDPE-g-MA และใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 โดยการใช้สารช่วยกระจายตัว SA สารช่วยผสม LLDPE-g-MA และ EVA ให้มีความหนาแน่นสูง และมีสมบัติเชิงกลที่ดี

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) เตรียมสูตรผสม LLDPE/ BaSO_4 โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ BaSO_4 ให้เป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 php (Part per hundred of polymer)
- 2) ทำการเคลือบผิว BaSO_4 ด้วยกรดสเตียริก 1% โดยน้ำหนัก เพื่อเตรียมสูตรผสม LLDPE/ BaSO_4 โดยใช้ BaSO_4 ในปริมาณ 25 php และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ BaSO_4 ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก โดยใช้ Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFTS-FTIR)
- 3) เตรียมสูตรผสม LLDPE/ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในปริมาณ 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนักของ BaSO_4 โดยใช้ BaSO_4 ในปริมาณ 25 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เตรียมสูตรผสม LLDPE/EVA ในอัตราส่วน 95/15, 90/10 และ 85/15 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณ BaSO₄ 25 php
- 5) ขึ้นรูปชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป
- 6) ศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ Density kit
- 7) ศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)
- 8) ศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
- 9) ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วยเครื่อง Izod impact tester
- 10) ศึกษาความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester)
- 11) ศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
- 12) ศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ของชิ้นงานคอมโพสิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถขึ้นรูปคอมโพสิต และทราบถึงปริมาณของ LLDPE, BaSO₄, SA, LLDPE-g-MA และ/หรือ EVA ที่ทำให้ได้คอมโพสิตที่มีความหนาแน่นสูง และสมบัติเชิงกลที่ดี
- 2) เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่ผลิตพอลิเมอร์ที่ต้องการความถ่วงจำเพาะสูงหรือผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่นำไปใช้ในงานถ่วงน้ำหนัก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอมโพสิต [8]

คอมโพสิต (Composite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน และมีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุคอมโพสิตชนิดพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ที่หลากหลายประการ ที่สำคัญที่สุด คือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ปัจจุบันจึงมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่หลากหลาย เนื่องจากมีคอมโพสิตหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทได้

2.1.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต

คอมโพสิตประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ

2.1.1.1 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforced part) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง โดยที่ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (Fiber) ชนิดต่างๆ นอกจากเส้นใยแล้ว ในปัจจุบันนิยมใช้ส่วนเสริมแรงแบบผงที่มีขนาดเล็กเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคขนาดนาโนเมตร (Nanoparticles) เนื่องจากเมื่อเติมลงไปวัสดุจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีค่ามอดูลัส และความแข็งแรงสูง และมีสมบัติทางแสง (Optical property) ที่ดี ไม่กระเจิงแสง ทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความใสได้ นอกจากนี้การใช้ส่วนเสริมแรงแบบผงจะทำให้วัสดุมีสมบัติในทุกทิศทางเหมือนกันหรือ Isotropic property ซึ่งแตกต่างจากการใช้เส้นใย ซึ่งมักจะมีความแข็งแรงตามแนวเส้นใยมากกว่าตามขวางเส้นใย

2.1.1.2 เมตริกซ์

เมตริกซ์ (Matrix) คือ ส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด มักมีความแข็งแรงและมอดูลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง นอกจากนี้เมตริกซ์ทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น วัสดุเมตริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย ซึ่งอาจแบ่งชนิดของวัสดุเมตริกซ์ได้ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์ พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับส่วนเสริมแรง ขึ้นรูปได้ง่าย ตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl esters) ฟีนอลิก (Phenolics) และพอลิอิมิด (Polyimides) เริ่มจากการใช้มอนอเมอร์ (Monomers) หรือ โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกนิยมใช้เป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิต เนื่องจากการใช้งานบางประเภทต้องการความเหนียวหรือต้องการสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุ เช่น การผลิตกันชนรถยนต์โดยใช้ PP เสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส (Fiber glass) [9] หรือใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียว และมีความทนทาน หรือนำไปอัดซ้อนกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง [10] เป็นต้น การที่พอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง ทำให้สามารถนำวัสดุเศษหรือของเสียจากการผลิตมาบดหรือนำผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วมาผสมกับพอลิเมอร์ใหม่ และหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิต และเป็นหนทางหนึ่งในการช่วยลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุโลหะเป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิตนิยมใช้กับเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่มีข้อจำกัด คือ น้ำหนักของวัสดุสูง ตัวอย่างเมตริกซ์โลหะที่นิยมใช้ คือ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไททาเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) และทองแดง (Copper) ซึ่งการใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมตริกซ์นิยมใช้กับคอมโพสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อสารเคมี

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนชนิดของเมตริกซ์จะทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้เมตริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

2.1.2 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

การแบ่งชนิดของคอมโพสิตสามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบ โดยสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็น เส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) มักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก

2.1.2.2 การแบ่งตามลักษณะการเกิดคอมโพสิต

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจากพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมตริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite) อยู่ในเมตริกซ์ของสารอินทรีย์ เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต [8, 11]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ 2. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก 3. สามารถทำให้มีสมบัติแข็งแรงเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้ 4. มีอายุการใช้งานนาน ต้านทานการสึกกร่อน 5. สามารถเพิ่มหรือลดสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า	1. วัสดุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูป คอมโพสิตมีราคาสูง 2. มีสมบัติในแนวขวางของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงต่ำ กรณีใช้เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรง 3. มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ 4. มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อมเมื่อส่วนที่เป็นเมตริกซ์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เกิดการเสียดสภาพ 5. ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต [8]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิตสามารถประยุกต์ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 2.2) เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aerospacecraft) และ อุปกรณ์กีฬา (Sporting goods) เป็นต้น การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตรถยนต์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้นไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ [8]

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ สถานีอวกาศ
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ ดาดฟ้า
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝาผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โต๊ะ เก้าอี้ บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจรไฟฟ้า กล่องคอมพิวเตอร์

2.2 พอลิเมอร์ผสม [12]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกันเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิม ซึ่งไม่สามารถใช้สารเติมแต่ง (Additives) ในการปรับปรุงสมบัติเหล่านั้นได้ โดยในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น และมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำให้ได้สมบัติที่ต้องการของพอลิเมอร์ผสม คือ วิธีการผสม เครื่องมือ และเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือมากกว่าให้ผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

การทำพอลิเมอร์ผสมมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้สมบัติดีขึ้น พัฒนาสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ และทำให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น

ในการเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

2.2.1 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม [13]

- พอลิเมอร์ผสม คือ พอลิเมอร์ที่ได้จากการผสมพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวิฏภาคเดียว (Miscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันไปจนถึงระดับโมเลกุลซึ่งมีพลังงานอิสระของการผสม ($\Delta G_m < 0$)

- พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวิฏภาค (Immiscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่มี $\Delta G_m > 0$

- พอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้ากันได้ (Compatible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวิฏภาคเดียวแต่มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมดีโดยไม่คำนึงถึงพลังงานอิสระของการผสม

- กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้ (Compatibilization) คือ วิธีที่ใช้ในการดัดแปรผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นวิฏภาคเดียวโดยการเติมพอลิเมอร์ร่วมหรือสารดัดแปรพื้นผิวเพื่อให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

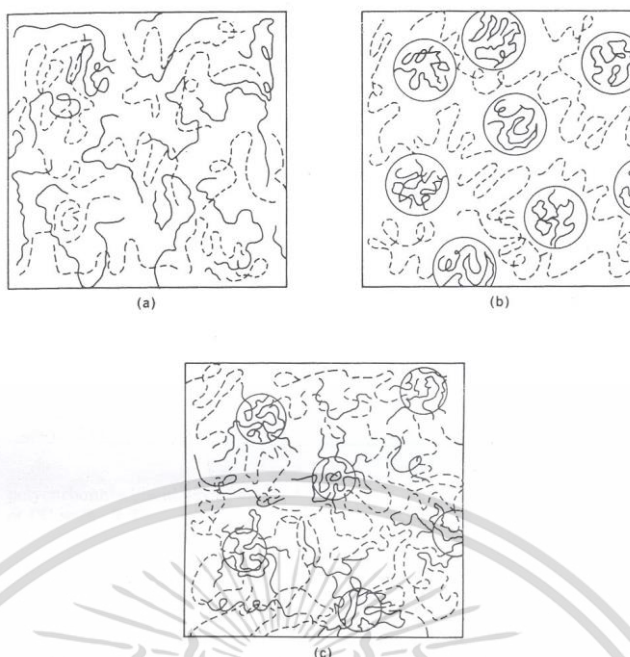
- สารช่วยผสม (Compatibilizer) คือ พอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมซึ่งใช้ในการเติมในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวิฏภาคเดียว เพื่อทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

2.2.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม [14]

โดยทั่วไปสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมี 3 แบบ ซึ่งใช้ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเป็นหลักเกณฑ์ในการจำแนก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในรูปที่ 2.1 (a) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวิฏภาคเดียวไปจนถึงระดับโมเลกุล ลักษณะของสันฐานวิทยาคลายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบอิสระ (Random copolymer) การที่พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B รูปที่ 2.1 (b) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวิฏภาค ซึ่งเป็นแบบที่พบบากในพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยพื้นฐานต่างๆ เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด สมบัติความมีขั้ว สมบัติการละลาย นอกจากนี้ยังมีสันฐานวิทยาแบบที่เข้ากันได้ดีบางส่วนและแยกวิฏภาคกันอย่างชัดเจน (Partially miscible) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (c)

สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล จากสันฐานวิทยาในรูปที่ 2.1 (b) และ (c) การกระจายตัวและการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมไม่ดี ทำให้เกิดรอยตำหนิระหว่างวิฏภาค ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นในการผสมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทราบความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ถ้าพอลิเมอร์ที่เลือกมีการละลายต่างกันมากจะทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ไม่ดี ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลไม่ดี ดังนั้นเพื่อให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น จึงมีการใช้สารช่วยผสม เช่น พอลิเมอร์ร่วม ซึ่งส่วนใหญ่พอลิเมอร์ร่วมที่เลือกจะมีโครงสร้างส่วนหนึ่งที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์เมตริกซ์และอีกส่วนหนึ่งที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับวิฏภาคกระจาย ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A () และ พอลิเมอร์ B () โดย (a) Miscible (b) Immiscible และ (c) Partially miscible [14]

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [15]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ชนิดหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเอทิลีนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated aliphatic hydrocarbon) พอลิเอทิลีน ผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 เป็นพอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขาชนิดความหนาแน่นต่ำ เรียกว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนถูกค้นพบขึ้นในครั้งแรกในปี ค.ศ. 1933 โดย Dawcett และ Gibson ที่ Imperial chemical industries Ltd., (ICI) ประเทศอังกฤษ โดยจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่มีความดันสูงๆ และได้ค้นพบพอลิเอทิลีนโดยบังเอิญจากปฏิกิริยาของเอทิลีนกับเบนซัลดีไฮด์ ภายใต้ความดันบรรยากาศหลายบรรยากาศ ปัจจุบันมีการผลิตพอลิเอทิลีนให้เหมาะสมกับการใช้งาน พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งตามโครงสร้างทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดและสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ [16]

พอลิเมอร์	โครงสร้างทั่วไป	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความเป็นผลึก (%)
LDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งมาก	0.92-0.94	ประมาณ 50
LLDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งน้อย	0.92-0.94	ประมาณ 50
HDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งน้อยมาก	0.95	ประมาณ 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -130 ถึง 60°C พอลิเอทิลีนจึงมีลักษณะทั้งยืดหยุ่น และแข็งที่สภาวะปกติ สำหรับอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของพอลิเอทิลีนมีค่าประมาณ $108-133^{\circ}\text{C}$

2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE

LLDPE เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีโซ่กิ่ง แต่ต่างจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีจำนวนโซ่กิ่งน้อยกว่า และลักษณะของกิ่งจะสั้น LLDPE สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วมระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์กับสายโซ่ยาวๆ ของโอลิฟิน เช่น บิวทีน (Butene) เฮกซีน (Hexene) และออกทีน (Octene) โดยใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ สมบัติของ LLDPE จะอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ LLDPE [17]

2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE

- ความต้านทานต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ -40°C พลาสติก LLDPE ที่มีดัชนีการไหลเดียวกันกับ LDPE จะมีความต้านทานแรงกระแทกดีกว่า
- มีความต้านทานแรงเจาะทะลุดีกว่า LDPE ถึง 60%
- LDPE จะค่าแรงต้านการดึงต่ำกว่า LLDPE ประมาณ 50% ซึ่งถ้าผสม LLDPE ใน LDPE จะทำให้ค่าแรงต้านการดึงของพลาสติกสูงขึ้น
- มีความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Seal strength) สูงกว่า LDPE มาก ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำฟิล์มหลายชั้น
- มีความต้านทานสารเคมี (Chemical resistance) สูงกว่า LDPE เนื่องจากมีปริมาณผลึกสูงกว่า
- มีสมบัติ ESCR ที่ดี เนื่องจาก LLDPE มีโซ่กิ่งที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกับโอลิฟิน ค่า ESCR จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีจำนวนโซ่กิ่งเพิ่มขึ้น หรือมีความยาวของโซ่กิ่งเพิ่มขึ้น [18]

- เมื่อนำ LLDPE ไปเกิดพันธะเชื่อมโยงโดยใช้สารเคมี เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) หรือผ่านรังสี สามารถทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีสมบัติ ESCR เพิ่มขึ้น [19]

2.3.3 การใช้งาน LLDPE [20]

- फिल्म และชีท (Film and sheet) ในการบรรจุหีบห่อฟิล์ม และชีทจะต่างกันตรง ความหนา โดยสามารถใช้ได้ทั้งในลักษณะเป็นฟิล์มเดี่ยวๆ และฟิล์มหนาหลายชั้น

- นิยมใช้ทำเป็นฟิล์มเคลือบเมทัลโลซ์ (Metalized film) โดยการนำฟิล์ม LLDPE ฟันเคลือบด้วยละอองอะลูมิเนียมในระบบสุญญากาศ นิยมใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์ เช่น ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และซองขนมขบเคี้ยว

- ใช้ทำฟิล์มป้องกันรอยขีดข่วน (Protection film) เช่น ฟิล์มติดหน้าปัดนาฬิกา หรือติดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

- ผลิตภัณฑ์แบบเป่า (Blow molding product) เช่น ขวดปิบ

- ผลิตภัณฑ์แบบฉีด (Injection molding product) เช่น ฝาขวด ตะกร้า ภาชนะบรรจุใช้ในตู้เย็น เครื่องใช้ในบ้าน และในครัวเรือน

- ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational molding process) เช่น ถังเก็บน้ำมันดิน ถังแช่แข็ง ถังบำบัดน้ำเสีย ของเล่น กรวยจราจร เรือคายัค ของตกแต่งต่างๆ ตลอดจนถังน้ำมันเครื่องยนต์

- นำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบสายไฟและสายเคเบิล เนื่องจาก LLDPE มีสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี

- ใช้งานในทางการแพทย์ เช่น แผงบรรจุยา และสายน้ำเกลือ

- ใช้ผลิตท่อส่งน้ำชลประทาน เนื่องจาก LLDPE มีความเหนียวสูงและสามารถรับแรงดันน้ำได้ดี

- ใช้ทำบ่อพลาสติกสำหรับการเกษตร หรือการเพาะเลี้ยงสัตว์ และทำพลาสติกสำหรับบ่อน้ำ หรือบ่อน้ำดินสำหรับเก็บน้ำ

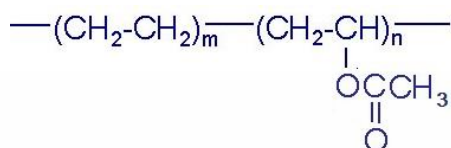
2.4 เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ (EVA) [21]

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ EVA

EVA เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ เนื่องจากเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตท มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90% และไวนิลอะซิเตทเป็นตัวเสริมแต่งทำให้เกิดความยืดหยุ่นโดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) พบว่า ถ้าปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EVA เกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตต โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่าของกรณีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนตัวเดียว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulfates โครงสร้างของ EVA แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) [22]

2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVA

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926-0.95
- สามารถละลายได้ในสารละลายอะโรมาติก (Aromatic) และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง
- จุดเปราะ (Brittle point) อยู่ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า -20°C
- จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง $60\text{-}80^{\circ}\text{C}$
- มีค่า T_g ตั้งแต่ -20°C (ของโฮโมพอลิเมอร์) จนถึง 20°C
- ค่าความแข็งกด (Hardness) Shore D เท่ากับ 17-45
- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ 2.9-19.6 MPa
- ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) เท่ากับ 500-700%
- มีความโค้งงอที่อุณหภูมิสูง
- มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน
- ทนต่อสภาวะการใช้งาน การชะล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- มีความยืดหยุ่นและโค้งงอได้ดี โดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน EVA

- EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัว (Softening point) ต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดติด และพลาสติกไซเซอร์
- EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์
- EVA ใช้ในงานผลิตรองเท้าและเบาะรองนั่ง
- ปริมาณไวนิลอะซิเตตน้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียว ใส และมีความมันวาว

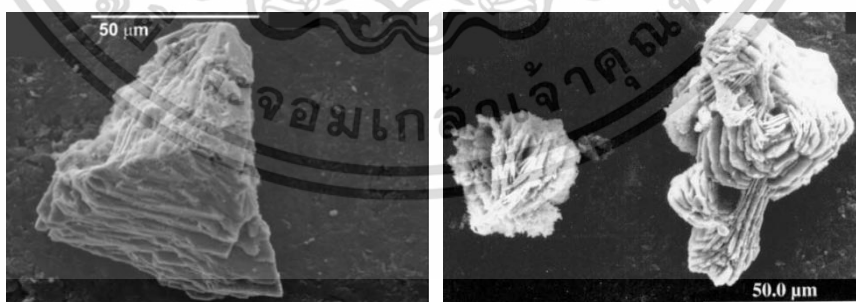
2.5 แบเรียมซัลเฟต [23]

2.5.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ BaSO₄

แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate, BaSO₄) มีสูตรเคมีคือ BaSO₄ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 233.34 g/mol ประกอบด้วย

	ธาตุ (%wt)	สารประกอบออกไซด์ (%wt)
Barium	Ba 58.84	BaO 65.70
Sulfur	S 13.74	SO ₃ 34.30
Oxygen	O 27.42	

BaSO₄ เป็นกากแร่ในสายแร่โลหะ มักเกิดร่วมกับเงิน ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส และแอนติโมนี บางครั้งอาจพบเกิดเป็นสายแร่ตัดผ่านหินปูนมีแคลไซต์ปะปน หรือพบการเกิดเป็นก้อนแร่ตกค้าง (Residual messes) ในดินเหนียวที่ซ้อนอยู่บนหินปูนหรือเป็นวัตถุประสานในหินทราย



รูปที่ 2.4 ภาพขยายของ BaSO₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การแบ่งประเภทของ BaSO₄ [25-26]

แบเรียมซัลเฟตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

ประเภท 1 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากธรรมชาติ มี 2 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 1 และ ชั้นคุณภาพ 2

ประเภท 2 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งแบเรียมซัลเฟตในเชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมดได้จากการนำแร่แบไรต์ (Mineral barite) ซึ่งมักจะมีสิ่งเจือปนสูงมาผ่านกระบวนการปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอล รีดักชัน (Carbothermal reduction : heating with coke) เพื่อให้ได้แบเรียมซัลไฟด์ (Barium sulfide, BaS) ดังแสดงในสมการที่ 2.1



จากนั้นเป็นขั้นการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ซึ่ง BaS สามารถละลายได้ในน้ำ และถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์ (Oxide) ในรูปของ คาร์บอเนต และเฮไลด์ (Halide) จากนั้นเติม H₂SO₄ เพื่อตกตะกอน BaSO₄ ทำให้ได้ BaSO₄ ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดย BaSO₄ ที่ตกตะกอนได้เรียกว่า บลิ่งฟิซซ์ (Blanc fixe)



โดยคุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีเป็นไปตามตารางที่ 2.4

การผลิตแร่แบไรต์ในประเทศมีการผลิตหลายเกรดตามความต้องการใช้ [27] ได้แก่

1. เกรดเคมี (Chemical grade) คือ แบไรต์บดที่มีส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟตตั้งแต่ร้อยละ 91 ขึ้นไปและมีความขาว ตั้งแต่ร้อยละ 80 ขึ้นไป
2. เกรดโคลนเจาะ (Drilling mud grade) คือ แบไรต์บดที่มีส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟต ต่ำกว่าร้อยละ 91 หรือมีความขาวต่ำกว่าร้อยละ 80
3. แบไรต์ก้อน (Unground grade) คือ แบไรต์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่ได้มากจากการทำเหมืองแร่ดิบ และถูกจัดส่งไปยังโรงงานเพื่อลดขนาด แบไรต์ชนิดนี้มีความบริสุทธิ์ต่ำ มีสิ่งเจือปนสูง

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของแบเรียมซัลเฟตสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์
อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.846-2532) [26]

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			วิธีการ ทดสอบ ตาม
		ประเภท 1		ประเภท 2	
		ชั้น คุณภาพ 1	ชั้น คุณภาพ 2		
1	แบเรียมซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า	95	95	97	ASTM 715
2	เกลือแบเรียมที่ละลายได้ในกรด (คำนวณเป็น แบเรียมคาร์บอเนต) ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	2.24	2.24	-	-
3	ความเป็นกรด-ด่าง ไม่น้อยกว่า	3.5	3.5	3.5	ASTM D1208
4	สารที่ละลายได้ในน้ำ ร้อยละโดย น้ำหนักไม่เกิน	0.2	0.2	0.2	ASTM D1208
5	ความชื้นและสารที่ระเหยได้ ร้อย ละโดยน้ำหนักไม่เกิน	0.5	0.5	0.5	ASTM D280
6	ขนาด	เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับ ผู้ขาย			
7	ซิลิกาอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนักไม่ เกิน	2.0	2.0	2.0	ASTM D7 ถ
8	การดูดกลืนน้ำมัน กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม	< 12	<12	12-14	ISO 787/5
9	ความขาวสว่าง ร้อยละไม่น้อยกว่า	85	80	95	-

2.5.3 กระบวนการแต่งแร่แบไรต์ [28]

ในกระบวนการแต่งแร่แบไรต์เพื่อส่งให้กับลูกค้าซึ่งมีข้อกำหนดเกี่ยวกับสมบัติของแร่ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การกำหนดขนาดอนุภาคแร่และการกำหนดปริมาณต่างๆ คือ $BaSO_4$, Fe_2O_3 , $SrSO_4$, SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นต้น สำหรับกระบวนการแต่งแร่แบไรต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์มีอยู่ 3 วิธีหลักๆ คือ

1. Hand sorting methods เป็นการคัดแยกแร่แบไรต์ออกจากมลทินหรือกากแร่ด้วยมือ การคัดแยกแร่ด้วยวิธีนี้จะใช้กับแร่แบไรต์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ($BaSO_4$ สูงประมาณ 80-90%) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมากนัก เช่น นำไปใช้ในการทำโคลนผงที่ใช้ในการขุดเจาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น

2. Gravity methods การแต่งแร่ด้วยวิธีนี้อาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของแร่แปรไรต์เพื่อแยกแร่แปรไรต์ออกจากมลทินอื่นๆ การแต่งแร่ด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัดในเรื่องของขนาดอนุภาคซึ่งควรมีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน ข้อดีของการแต่งแร่ด้วยวิธีนี้คือลงทุนน้อย เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการแต่งแร่ด้วยวิธีนี้ แร่ที่มีความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะมากจะสามารถแยกตัวออกจากกันได้ดี โดยการปล่อยให้จมตัวลงผ่านตัวกลาง เช่น น้ำหรืออากาศ อัตราการแยกตัวเนื่องจากความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะทำให้มีอัตราการแยกตัวแตกต่างกันซึ่งสามารถหาค่าพิภคที่จะแยก (Concentration criterion) ได้ดังนี้

$$\text{Concentration criterion} = (D_n - D_f) / (D_l - D_f) \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้

D_n คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่หนัก

D_f คือ ความถ่วงจำเพาะของตัวกลางที่เป็นของไหล

D_l คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่เบา

3. Flotation methods สำหรับการแต่งแร่แปรไรต์ โดยวิธีลอยแร่เป็นวิธีการแต่งแร่ที่ทำให้ผิวแร่แปรไรต์มีสภาพไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) โดยการเคลือบด้วยสารหรือน้ำยาเคมี เมื่อผิวแร่แปรไรต์สัมผัสกับอากาศหรือฟองอากาศจะทำให้แร่แปรไรต์ลอยขึ้น สำหรับขั้นตอนของการลอยแร่แปรไรต์มีดังนี้

- ทำให้ผิวแร่แปรไรต์ไม่เปียกน้ำ
- ทำให้แร่แปรไรต์เกิดการกระจายตัวและเกิดฟองอากาศ
- ทำให้เกิดการแยกและกวาดเอาแร่แปรไรต์ที่ลอยได้ออก

2.5.4 สมบัติโดยทั่วไปของ BaSO_4 [23]

สี	ขาว ไม่มีสี เหลือง แดง น้ำเงินอ่อน
ความวาว	วาวแบบแก้ว - ไข่มุก
โครงสร้างผลึก	ผลึกรูปแผ่นในระนาบ (001) และผลึกรูปเพชร มักแสดงลักษณะ 1 st และ 2 nd Order prism ผลึกรูปแผ่นแบบ Crested barite หรือ Barite rose
ความแข็ง	3-3.5 Mohs
ความถ่วงจำเพาะ	4.5

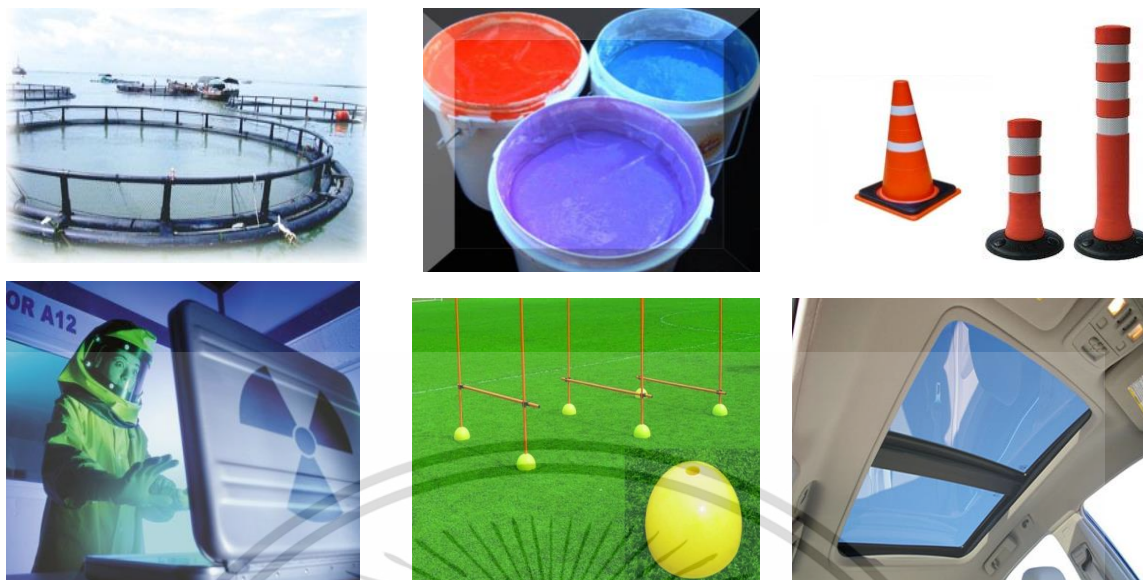
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดหลอมเหลว	1580°C
ค่าการละลาย (K_{sp})	1.0842×10^{-10} (25°C)
ความสามารถในการละลายในน้ำ	0.0002448 g/100 mL (20°C)
ความสามารถในการละลาย	ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ สามารถละลายในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (Concentrated sulfuric acid)

2.5.5 การใช้งาน BaSO₄ [29]

- ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก เช่น ในงานฟิล์ม งานเป่า และงานฉีดขึ้นรูป เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อกรดต่าง
- นำไปผสมกับยางเพื่อผลิตภัณฑ์หนักสำหรับถ่วงท่อ ยางแผ่น ยางหุ้มฉนวน ยางรองฐานกรวยป้ายจราจร
- ผสมไปในพอลิเมอร์สำหรับทำฐานพลาสติกยึดเสาสำหรับแบ่งเขตแดน
- นำไปผสมใน PE เพื่อผลิตเป็นกระชังเพาะเลี้ยงปลาสำหรับใช้ในงานประมง
- นำไปผสมกับซีเมนต์เพื่อทำบรรจุภัณฑ์เก็บสารกัมมันตภาพรังสี
- ใช้ในงานเคลือบเงา เพื่อลดการแผ่รังสีจากจอคอมพิวเตอร์ และโทรทัศน์
- นำไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) สำหรับทำเป็นสารเคลือบภาพวาด [30]
- ใช้ผลิตเป็นเส้นใยนาโนคอมโพสิตโดยใช้พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) และพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) สำหรับทำอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีในงานรังสีวินิจฉัย [31]
- ส่วนผสมของ BaSO₄ ใช้เป็นพื้นสีขาวสำหรับการผลิตสี โดยจะนำไปผสมกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄)
- ใช้ BaSO₄ เกรตนาโน ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความโปร่งใส (Transparent polymer) สำหรับทำเป็นกระจกด้านข้างรถ (Side windows) และกระจกหลังคารถ (Sunroof) แทนการใช้กระจก โดย BaSO₄ จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วน และสามารถกันรังสี UV ได้บางส่วน [32]
- เป็นส่วนผสมที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้ของเหลวที่ใช้ในการผลิตบ่อน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ภาพตัวอย่างการใช้งาน BaSO₄ [3, 23, 29]

2.6 กรดสเตียริก

2.6.1 ลักษณะโดยทั่วไปของกรดสเตียริก [33]

กรดสเตียริก (Stearic acid, SA) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอน (C₁₇H₃₅-) และมีปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิก (-COOH) กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้มาจากกลีเซอไรด์ซึ่งพบในไขมันสัตว์ และพืชหลายชนิด

กระบวนการผลิตกรดสเตียริก เริ่มจากนำไตรกลีเซอไรด์มากำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น ฟอสฟาไทด์ โลหะหนัก สี กลิ่น โดยการล้าง (Washing) ต่อมานำไตรกลีเซอไรด์ที่ได้มาผ่านไอน้ำแรงดันสูงเพื่อแยกกรดไขมันออกจากกลีเซอริน เรียกกระบวนการนี้ว่า Splitting process กรดไขมันที่ได้นำไปผ่านการกลั่น (Distillation) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมี สี กลิ่น และเป็นการแยกกรดไขมันแต่ละชนิดออกจากกัน แบ่งเป็น 2 วิธีคือ

- Frictionation วิธีนี้ใช้กระบวนการกลั่นด้วยไอน้ำ สามารถแยกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้ (C₆-C₁₄)
- Separation เนื่องจากกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (C₁₆ - C₁₈) แยกออกจากกันได้ยากด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ เพราะมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงต้องใช้การแยกเชิงกายภาพ (Physical separation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 สมบัติโดยทั่วไปของ SA

กรดสเตียริกมีสูตรทางเคมีคือ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ [34]

- น้ำหนักโมเลกุล	284.48
- จุดเดือด	361°C
- จุดหลอมเหลว	70°C
- ความถ่วงจำเพาะ	0.847
- ความสามารถในการละลายน้ำ	0.1-1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23°C

2.6.3 การใช้งาน SA

กรดสเตียริกนิยมใช้เป็นสารช่วยการกระจายตัวและเป็นสารเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมพาวด์ โดยกรดสเตียริกมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือเม็ดสีต่างๆ อีกทั้งยังช่วยให้กระบวนการผลิตเกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากกรดสเตียริกเป็นสารโมเลกุลเล็กทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของยาง พอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์คอมโพสิต และช่วยให้การอัดขึ้นรูปหรือฉีดขึ้นรูปเป็นไปได้อย่างขึ้นด้วย นอกจากนี้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในกระบวนการวัลคาไนเซชันยาง และใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stabilizer) ในรูปของสารประกอบสเตียเรต (Sterate compound)

กรดสเตียริกนิยมใช้เติมลงไปเป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบของพอลิเมอร์ที่ไม่มีหัวที่มีการใช้สารตัวเติมที่มีหัวซึ่งมักจะก่อให้เกิดปัญหาการกระจายตัวที่ไม่ดีของสารตัวเติม เช่น ในระบบของ PE ที่มีการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม [35] จากงานวิจัยพบว่าการเติมกรดสเตียริกทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้น โดยกรดสเตียริกจะหันด้านที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเข้าหา PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ และจะหันด้านที่เป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกเข้าหา CaCO_3 ทำให้ช่วยลดการรวมตัวของอนุภาค CaCO_3 จึงช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่าย และทั่วถึงในพอลิเมอร์
2. การปรับปรุงพื้นผิวช่วยทำให้ระยะห่างระหว่างพื้นผิวระหว่างสารตัวเติม และพอลิเมอร์เมตริกซ์ใกล้กันมากขึ้น
3. ช่วยในเรื่องการป้องกันพื้นผิวเกิดรอยแตก รอยบวม และอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งาน
4. ช่วยลดรอยขีดข่วนบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [36]

2.7.1 ความเป็นมา

ในการผสมพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วกับสารตัวเติมที่มีขั้ว ความแตกต่างกันของขั้วระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์กับสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปผสมเข้ากันได้ยาก การยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวทั้งสองของวัสดุไม่ดี ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีสมบัติเชิงกลไม่ดี เพื่อจะแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการใช้สารช่วยผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม [37] โดยสารช่วยผสมที่เลือกใช้ในระบบนี้จะต้องมีส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน เช่น การใช้กราฟโคพอลิเมอร์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่ของพอลิเอทิลีน เช่น พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted polyethylene, PE-g-MA) [38] หรือการใช้กราฟโคพอลิเมอร์ของอะคริลิกบนสายโซ่ของพอลิเอทิลีน เช่น พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยอะคริลิกแอซิด (Polyacrylic acid grafted polyethylene, PE-g-AA) [39] เป็นต้น

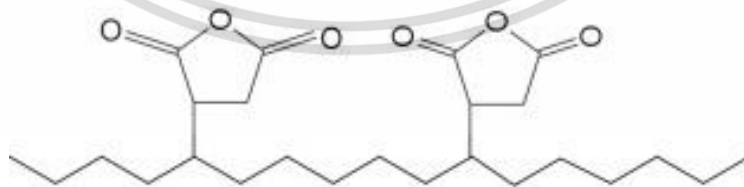
ในงานวิจัยนี้ใช้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์และใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม จึงเลือก LLDPE-g-MA มาใช้เป็นสารช่วยผสม โดย LLDPE-g-MA จะช่วยลดความแตกต่างระหว่างขั้ว ทำให้ LLDPE ผสมเข้ากับ BaSO_4 ได้ดีขึ้น

2.7.2 กระบวนการผลิต

PE-g-MA สามารถผลิตได้ 3 วิธี คือ

- พอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization)
- พอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerization)
- พอลิเมอไรเซชันด้วยรังสีอุลตราไวโอเลต (UV radiation)

การผลิต PE-g-MA ทำได้โดยการผสมพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ PE-g-MA [40]

2.7.3 สมบัติโดยทั่วไปของ PE-g-MA

- เมื่อเติมลงไปในระบบของ PE ที่มีการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม PE-g-MA จะช่วย

เพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำให้ PE มีความมีขี้วเพิ่มขึ้น (Hydrophilicity)
- ทำให้ความสามารถในการเปียกดีขึ้น (Wettability)
- ทนต่อความร้อนได้ดี (Heat resistance)

2.7.4 การใช้งาน PE-g-MA

PE-g-MA นิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยผสมในระบบของพอลิเมอร์ PE กับสารตัวเติมที่มีขี้ว เช่น CaCO_3 หรือ BaSO_4 โดยส่วนของพอลิเอทิลีนจะเข้ากันได้ดีและเกิดการเกี่ยวพันกับ PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ และในส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งมีความเป็นขี้วจะเข้าได้ดีกับสารตัวเติมที่มีความเป็นขี้ว ทำให้มีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น นอกจากนี้ PE-g-MA ยังนิยมใช้ในระบบพอลิเมอร์ผสมพอลิเอไมด์ 6 (Polyamide 6, PA6)/PE โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีที่แข็งแรง โดยสร้างพันธะโควาเลนต์กับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนใน PA6 และส่วนของ PE ใน PE-g-MA จะเกิดการเกี่ยวพันกับ PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ ทำให้ PA6/PE มีแรงยึดติดที่ผิวสัมผัสดีขึ้น และมีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น [41]

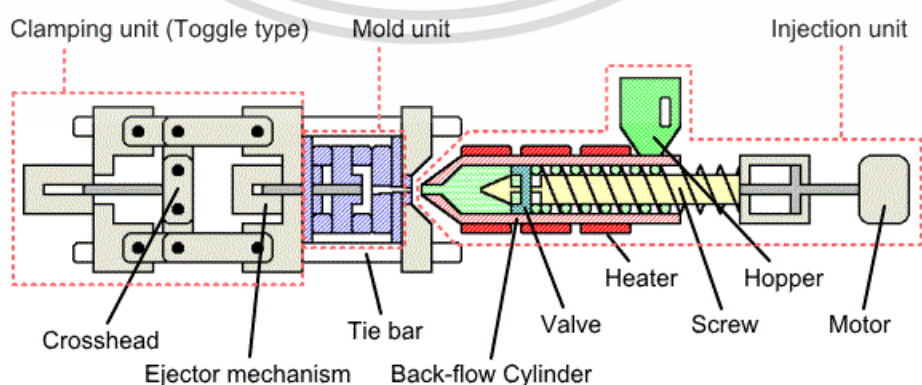
2.8 กระบวนการฉีดขึ้นรูป [42]

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปที่นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง และสะดวกในการเปลี่ยนเม็ดพลาสติก และอิลาสโตเมอร์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป วิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีรายละเอียดมากได้ ทำได้ทั้งชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและใหญ่ สามารถทำการผลิตได้ในอัตราเร็วสูง และใช้แรงงานในการควบคุมดูแลต่ำ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปสามารถประยุกต์ใช้งานแปรรูปวัสดุพอลิเมอร์ได้ทุกชนิด ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซต วัสดุประกอบอิลาสโตเมอร์ และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

2.8.1 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป [43]

โดยทั่วไปกระบวนการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วยหน่วยที่สำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หน่วยการฉีด (Injection unit) ทำหน้าที่ในการหลอมพลาสติก และฉีดพลาสติกที่หลอมนั้นเข้าไปสู่แม่พิมพ์
- หน่วยแม่พิมพ์ (Mold unit) เป็นบริเวณที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัว และกำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- หน่วยยึดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่ทำหน้าที่เคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ในจังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก และยึดแม่พิมพ์ให้ปิดสนิทขณะที่มีการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ และขณะที่พลาสติกเย็นตัว

2.8.2 รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูป

รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วย 9 ขั้นตอน เริ่มต้นจากแม่พิมพ์ปิด หน่วยการฉีดเคลื่อนที่เข้ามาฉีดหน่วยแม่พิมพ์ ฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ ย้ำรักษาความดัน (Hold on pressure) หล่อเย็น หลอม และป้อนพลาสติกใหม่ หน่วยการฉีดถอยหลังกลับ แม่พิมพ์เปิด และปลดชิ้นงานเป็นขั้นตอนสุดท้าย

2.8.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ พบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งมีอิทธิพลต่อรอบการทำงาน รวมทั้งคุณภาพของชิ้นงานขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลัก 4 ประการ คือ

2.8.3.1 อุณหภูมิ (พลาสติกหลอมเหลวและแม่พิมพ์)

อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวส่วนใหญ่จะใช้เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด หรืออาจสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต เนื่องจากถ้าใช้อุณหภูมิในการแปรรูปต่ำเกินไป อาจทำให้พลาสติกไม่ไหลเข้าหัวฉีด ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้พลาสติกเกิดการเสียสภาพได้ ส่วนอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เลือกขึ้นกับชนิดของพลาสติกเช่นกัน กล่าวคือถ้าเป็นเทอร์โมพลาสติกจะใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำ แต่ถ้าเป็นเทอร์โมเซตใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูง

2.8.3.2 เวลา (ฉีด ย้ำรักษาความดันและหล่อเย็น)

เวลาในการฉีดพลาสติกขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของเกลียวหนอน ส่วนเวลาในการย้ำรักษาความดัน ถ้าใช้เวลาด้านนี้อาจทำให้ชิ้นงานเกิดรอยยุบที่ผิวได้ แต่ถ้าใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในชิ้นงาน เวลาในการหล่อเย็นมีความสำคัญในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะพลาสติกที่มีความเป็นผลึก เนื่องจากถ้าเวลาในการหล่อเย็นสั้นทำให้เกิดผลึกไม่สมบูรณ์อาจทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่ดี

2.8.3.3 ความดัน (ฉีด ย้ำรักษาความดันและแม่พิมพ์)

ความดันในการฉีดพลาสติกมีผลต่อการเติมเต็มในแม่พิมพ์ ความดันย้ำคือความดันของพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่ด้านหน้าของปลายเกลียวหนอน ซึ่งควรมีค่าเท่าใดขึ้นกับความหนืดของพลาสติก ความดันของแม่พิมพ์ คือความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์เมื่อมีการฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์

2.8.3.4 ความเร็ว (ฉีดและปิด-เปิดแม่พิมพ์)

ความเร็วในการฉีดเป็นตัวควบคุมความดันฉีด กล่าวคือถ้าใช้ความเร็วในการฉีดสูง ความดันฉีดจะมีค่ามากเช่นกัน ส่วนความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ไม่ค่อยมีผลต่อแม่พิมพ์ แต่จะมีผลต่อชิ้นงาน คือถ้าเปิดแม่พิมพ์เร็วเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานถูกครูดเป็นรอย

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

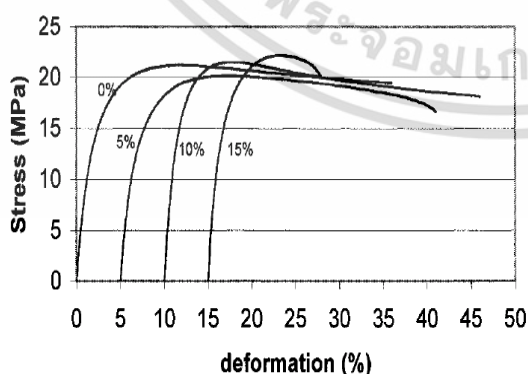
Chen, X. และคณะ [45] ศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลว และการตกผลึกของ HDPE ที่มี BaSO₄ เป็นสารตัวเติม โดยใช้ BaSO₄ เกรดนาโน ที่มีขนาดอนุภาค 40 nm และเคลือบด้วย Sodium stearate เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยผสม HDPE กับสารตัวเติมที่ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งแทนด้วย HDPE1, HDPE2, HDPE3, HDPE4 และ HDPE5 ตามลำดับ ในการทดสอบ Isothermal crystallization process ได้กำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) ที่อุณหภูมิ 113, 116, 119 และ 122°C

จากผลการทดลอง (แสดงในตารางที่ 2.5) พบว่าการเติมอนุภาค BaSO₄ ทำให้ Crystallization kinetic constant (K) เพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการตกผลึกเพื่อให้ได้ปริมาณผลึก 50% (t_{1/2}) ลดน้อยลง เนื่องจาก BaSO₄ ทำหน้าที่เป็น Heterogeneous nucleating agent ทำหน้าที่เร่งให้เกิดการตกผลึกใน HDPE และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ จาก 1 เป็น 2% โดยน้ำหนัก ค่า K มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ t_{1/2} มีแนวโน้มลดลง แสดงว่า BaSO₄ ทำหน้าที่เร่งให้เกิดการตกผลึกใน HDPE ที่มีปริมาณสารตัวเติมต่ำๆ และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติม BaSO₄ ที่ 1 และ 2% โดยน้ำหนัก จะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าผลึกของ HDPE มีความสมบูรณ์มากขึ้น แต่เมื่อเติม BaSO₄ 3% โดยน้ำหนัก กลับทำให้ค่า T_m ลดลง แสดงว่า HDPE มีความหนาของชั้นลามลาลดลง หรือผลึกมีความสมบูรณ์น้อยลง

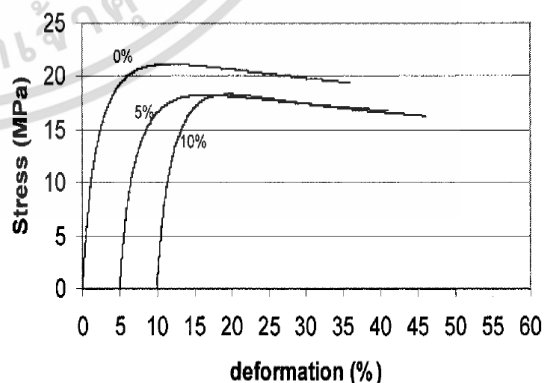
ตารางที่ 2.5 ตัวแปรทางจลนศาสตร์ของ Avrami จากสมการของ Avrami สำหรับกระบวนการตกผลึกแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) [45]

Sample	T_m (°C)	T_c (°C)	K (min)	$t_{1/2}$ (min)
HDPE1	139.4	122	0.02	0.78
		119	1.04	0.22
		116	1.27	0.14
		113	1.54	0.11
HDPE2	149.5	122	0.09	0.70
		119	1.09	0.20
		116	1.44	0.13
		113	1.71	0.10
HDPE3	141.1	122	0.04	0.74
		119	1.05	0.21
		116	1.34	0.13
		113	1.59	0.11

Bianchi, F. และคณะ [6] ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของ HDPE ที่มี BaSO₄ ที่มีขนาดอนุภาค 0.25 μm เป็นสารตัวเติม โดยผสม HDPE กับ BaSO₄ ในช่วง 5-15% โดยปริมาตร และศึกษาผลของ Surface agent ชนิดต่างๆ ได้แก่ Surfactant (DA), Fatty acid (AS) และ Salt of fatty acid (ST) โดยกำหนดให้ชื่อย่อ PEXXY เมื่อ XX คือชนิดของ Surface agent, YY คือปริมาณของ Surface agent เป็น % โดยน้ำหนัก และให้ 1s แทน BaSO₄ ที่ไม่ได้เคลือบด้วย Surface agent



(a) PE1s

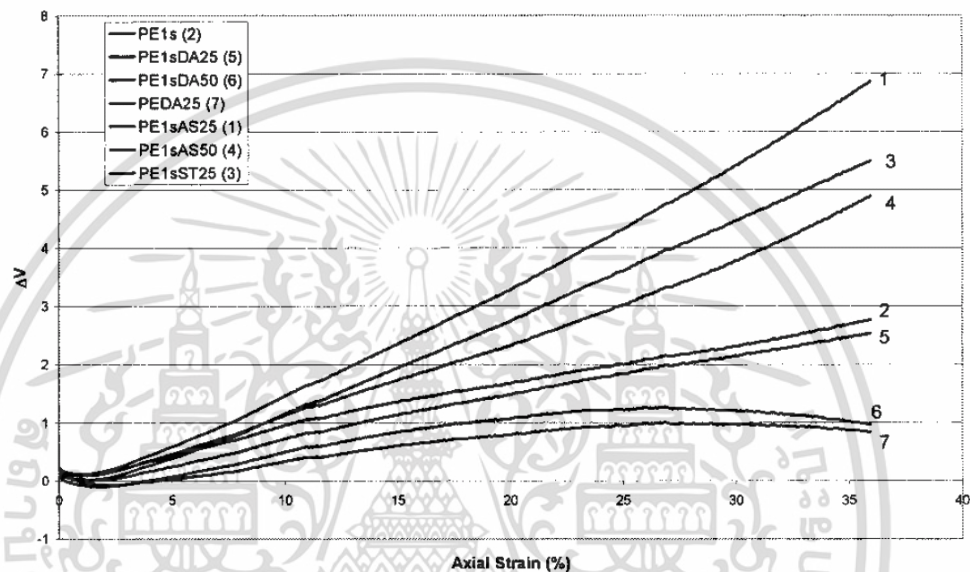


(b) PE1sAS25

รูปที่ 2.8 Stress-Deformation ของตัวอย่างต่างๆ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง (รูปที่ 2.9) พบว่า PE1s เมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Yield stress และ Young's modulus เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่มีการเติม BaSO₄ แต่ในสูตร PE1sAS25 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Yield stress และ Young's modulus ลดลง เนื่องจากการเคลือบอนุภาค BaSO₄ ด้วย Fatty acid ทำให้เกิดการหลุดออก (Debonding) ระหว่าง Matrix กับสารตัวเติมบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคก่อนที่จะเริ่มเกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation)



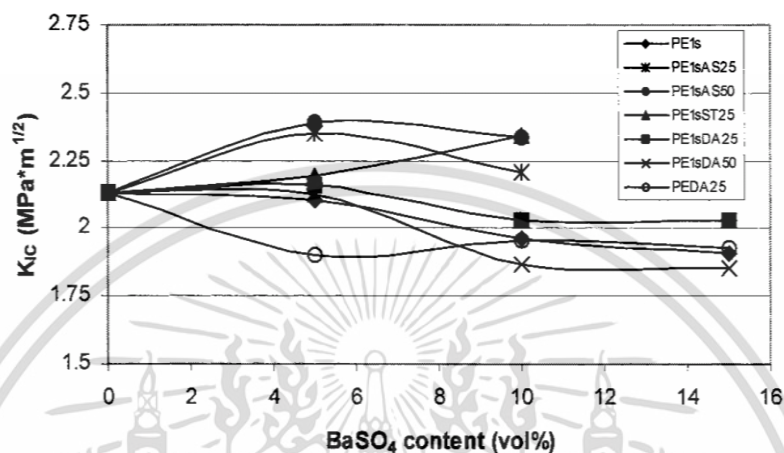
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) กับ Axial strain สำหรับคอมโพสิตสูตรต่างๆ ที่ 10% โดย ปริมาตรของ BaSO₄ [6]

จากผลการทดลอง (รูปที่ 2.9) พบว่า PE1sAS25 (1), PE1sST25 (3) และ PE1sAS50 (4) มีลักษณะกราฟค่อนข้างเป็นเส้นตรง คือมีการเพิ่ม Axial strain ไปพร้อมกับการเพิ่มของ ΔV แสดงว่าเมื่อตัวอย่างถูกดึงยืดจะเกิดเครซ (Craze) ขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นช่องว่าง (Microvoids) และจะมีขนาดเพิ่มขึ้น (ΔV เพิ่มขึ้น) เมื่อมีการหลุดออกระหว่าง Matrix กับสารตัวเติม ภายในช่องว่างประกอบไปด้วยเส้นใยขนาดเล็ก (Microfibril) การเกิด Microfibril ทำให้วัสดุสามารถรับและกระจายแรงได้ เนื่องจากเกิดการเสียสภาพแบบ Shear yielding

จากผลการทดสอบ Linear elastic fracture mechanism (LEFM) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 พบว่า PE1sAS25, PE1sST25 และ PE1sAS50 มีค่า Fracture toughness (K_{IC}) ที่สูงกว่าการใช้ BaSO₄ ที่ไม่มีการเคลือบผิวในสูตร PE1s เนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาคดีกว่า ทำให้วัสดุสามารถรับ และกระจายแรงได้ดีก่อนเกิดการแตกหัก และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนจาก DSC (ดังแสดงในตารางที่ 2.6) พบว่าตัวอย่างทุกสูตรมี T_m และ T_c ใกล้เคียงกับ HDPE แสดงว่า

Surface agent ทุกชนิดไม่มีผลในการช่วยทำให้เกิดการตกผลึกของ HDPE แต่การเติม BaSO₄ มีผล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ปริมาณความเป็นผลึก (X_c) ของ HDPE เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่า $BaSO_4$ ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกใน HDPE และในสูตร PE1sAS25, PE1sST25 และ PE1sAS50 พบว่าการเติม $BaSO_4$ ลงไปใน HDPE โดยการเคลือบ $BaSO_4$ ด้วย Fatty acid และ Salt of fatty acid ส่งผลให้วัสดุสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{1c} กับปริมาณ $BaSO_4$ (% โดยน้ำหนัก) ในคอมโพสิต HDPE [6]

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางความร้อนของ HDPE สูตรต่างๆ [6]

Name	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	X_c
HDPE	132.5	171.9	116.2	172.9	0.58
PE1s	131.6	192.4	116.7	183.7	0.66
PE1sDA25	131.0	172.0	116.2	173.9	0.59
PE1sDA50	131.5	196.4	116.2	183.5	0.67
PE1sDA25	130.7	196.3	115.7	178.7	0.67
PE1sAS25	132.9	202.0	117.4	185.4	0.68
PE1sAS50	132.4	196.5	116.7	193.5	0.67
PE1sST25	133.2	197.5	116.3	188.8	0.67

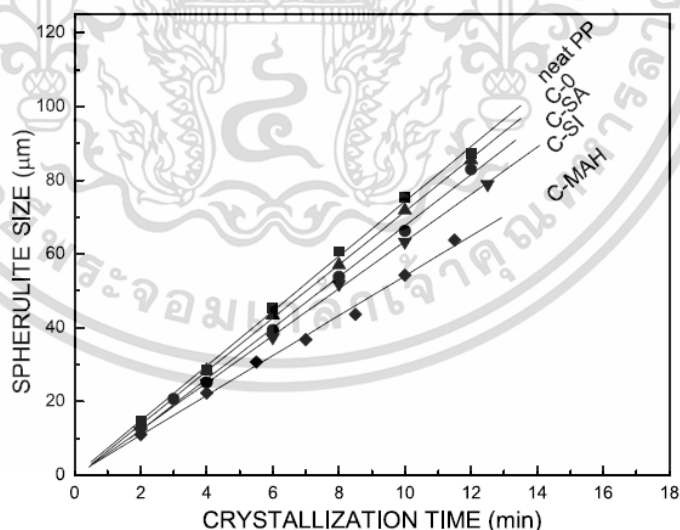
Wang, K. และคณะ [46] ศึกษาเกี่ยวกับขนาดของผลึกและอัตราการเติบโตของผลึก PP ที่มี $BaSO_4$ ขนาดอนุภาค $1.29 \mu m$ เป็นสารตัวเติม โดยใช้ชนิดของสารปรับปรุงพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยในทุกตัวอย่างจะประกอบด้วย $BaSO_4$ 0.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมผ่านสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเตรียมสูตรเข้มข้นโดยใช้ PP หรือ PP-g-MA เติม $BaSO_4$ 80% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งในการผสม จากนั้นนำ Virgin PP ไปผสมกับสูตรเข้มข้น โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนตามกันในการผสม จะได้สูตรดังแสดงในตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 สูตรผสม PP/BaSO₄ ที่เตรียม [46]

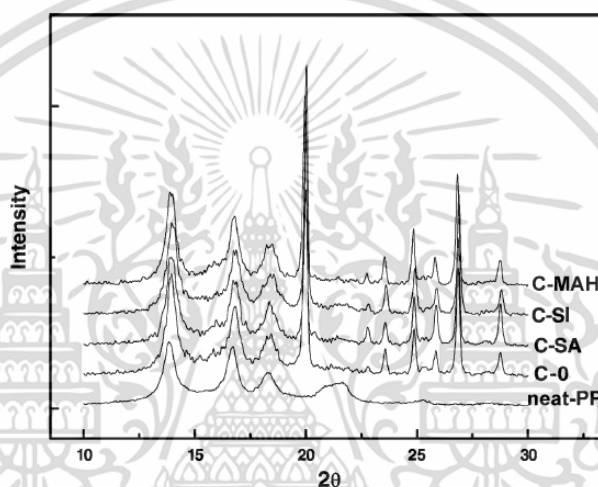
Formula	Composition
C-0	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt
C-SA	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/SA 1 %wt
C-SI	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/Silane 1 %wt
C-MAH	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/PP-g-MA 1 %wt

จากผลการทดลอง (รูปที่ 2.11) พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกสเฟียรูไลต์มีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และจะหยุดเมื่อผลึกเกิดการชนกัน ซึ่งพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึก PP ทุกสูตรผสมมีค่าน้อยกว่าใน Neat PP เนื่องจากการเติม BaSO₄ ลงไปจะไปลดอัตราการเติบโตของผลึก โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่มีค่าลดลง เนื่องจาก BaSO₄ จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ ทำให้มีการจัดเรียงตัวยากขึ้น นอกจากนี้การใช้สารปรับปรุงพื้นผิวต่างชนิดกันส่งผลถึงอัตราการเกิดผลึกของ PP คือถ้าสารปรับปรุงพื้นผิวมีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคที่มีความแข็งแรงมาก จะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลึกลดน้อยลง เนื่องจากบริเวณที่มีอันตรกิริยาที่แข็งแรงจะเหมือนกับการถูกเชื่อมโยงทางกายภาพ ส่งผลให้สายโซ่โพลิเมอร์ของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดเล็ก

รูปที่ 2.11 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO₄ [46]

จากการศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ [4] ในช่วง 0-32 %โดยน้ำหนัก และผลของสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความเป็นผลึก สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล จากผลการทดลอง Wide-angle x-ray diffraction (WAXD) (รูปที่ 2.12) พบว่า Neat PP มีพีคผลึกแบบ α -form 3 พีค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้

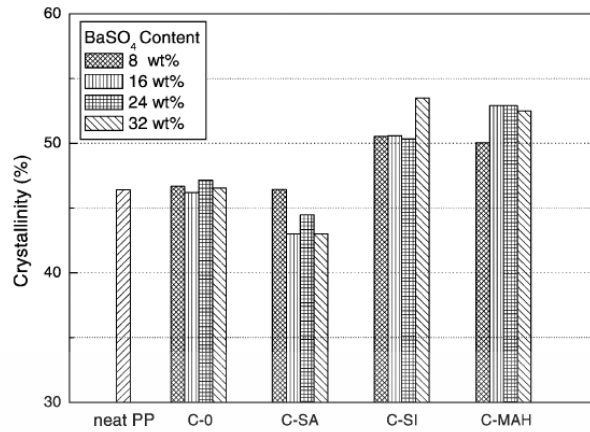
(110), (040), และ (130) ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 13.95° , 16.90° และ 18.40° ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีความสมบูรณ์ ส่วนใน PP/BaSO₄ จะพบพีคที่ 2θ เท่ากับ 20.05° และที่มากกว่า 22.75° ซึ่งเป็นการ Reflection ที่ (300) ที่เกิดจากผลึกแบบ β -form ของ PP ซึ่งเป็นผลึกขนาดเล็กและมีความสมบูรณ์ของผลึกน้อยกว่า และพบว่าเมื่อมีอันตรกิริยาระหว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interfacial interaction) มากจะทำให้ได้ผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก เนื่องจาก PP ที่อยู่บริเวณรอบๆ BaSO₄ จะมีการเกี่ยวพันกันบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ความสมบูรณ์ของผลึกลดน้อยลง โดยความแข็งแรงตรงบริเวณรอยต่อของ C-MA > C-SI > C-SA > C-0



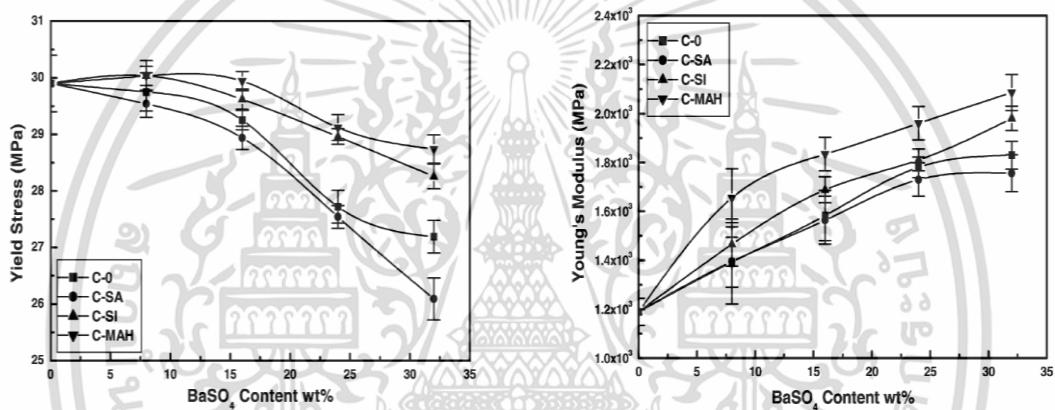
รูปที่ 2.12 Wide angle X-ray diffractograms ของ Neat PP และ PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก [4]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกล (รูปที่ 2.13-2.15) [4-5] พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ในช่วงตั้งแต่ 16% โดยน้ำหนักเป็นต้นไป จะส่งผลให้ค่า Yield stress ลดลง เนื่องจากค่า Yield stress เกี่ยวข้องอย่างมากกับการยึดติดระหว่างวัฏภาค การเติม BaSO₄ ที่มีขั้วลงใน PP ที่ไม่มีขั้ว ทำให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคไม่ดี ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงยึดแล้วเกิดการเสียหายตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคได้ง่าย แต่การเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก BaSO₄ มีความแข็งมากกว่า PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ สำหรับการใส่สารปรับปรุงพื้นผิวต่างชนิดกันมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดย C-MAH และ C-SI มีค่า Yield stress และ Young's modulus ที่สูงกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ดี โดยหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์ ไนมาเลอิก (Maleic anhydride, MAH) หรือหมู่ไซลันอล (Silanol) ในไซเลน สามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole force) กับ BaSO₄ ได้ ประกอบกับ C-MAH และ C-SI เป็นสูตรที่มีความเป็นผลึกสูงกว่าสูตรอื่นๆ (ดังแสดงในตารางที่ 2.8)

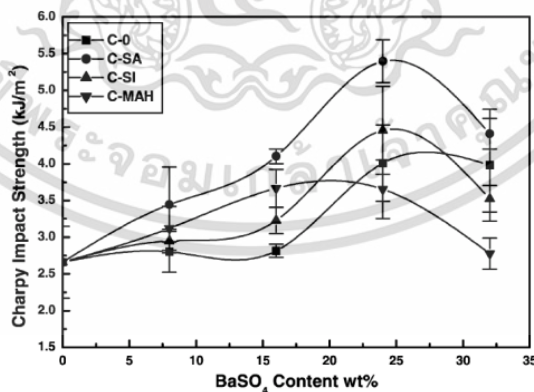
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ปริมาณความเป็นผลึกของ Neat PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [4]



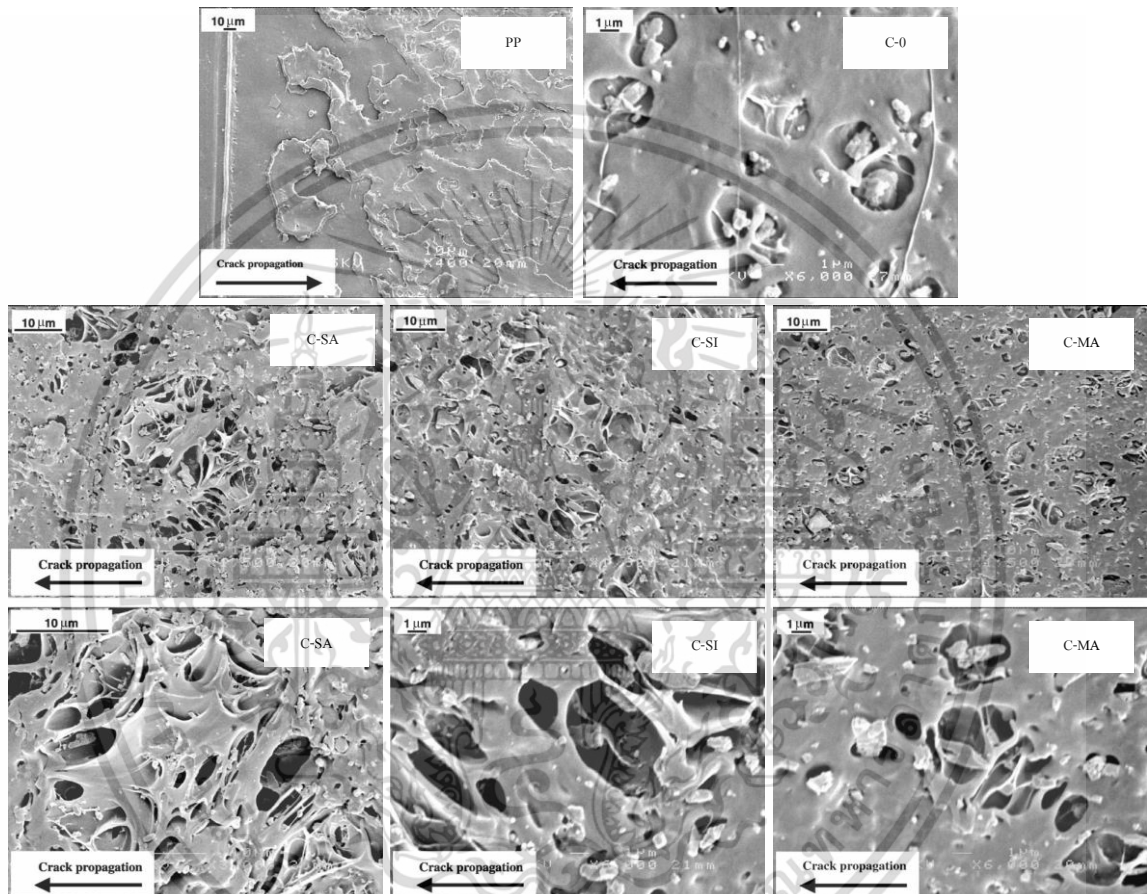
รูปที่ 2.14 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [4]



รูปที่ 2.15 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ Neat PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [4]

การทดสอบความแข็งแรงกระแทกพบว่า PP/BaSO₄ ทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงกระแทกมากกว่า Neat PP เนื่องจาก Neat PP เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle failure) ซึ่งยืนยันได้จาก SEM micrographs ในรูปที่ 2.16 ในขณะที่ PP/BaSO₄ เมื่อได้รับแรงกระแทกจะเกิดครีซ และเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหลุดออกระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม (Debonding-cavitation) ใน PP Matrix ที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ส่งผลให้เกิดเส้นใย (Ligament) ระหว่างช่องว่าง ซึ่งยืนยันได้จาก SEM micrographs ในรูปที่ 2.15 เส้นใยที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยกว่าพอลิเมอร์บริเวณอื่น ทำให้เมื่ออยู่ภายในระนาบเดียวกันกับแรงเค้น (Plane-stress) จะชอบเกิดการเสียสภาพแบบ Shear yielding โดยจะเกิดการยืดออกของเส้นใยซึ่งสามารถกระจายพลังงานได้สูงก่อนเกิดการแตกหัก



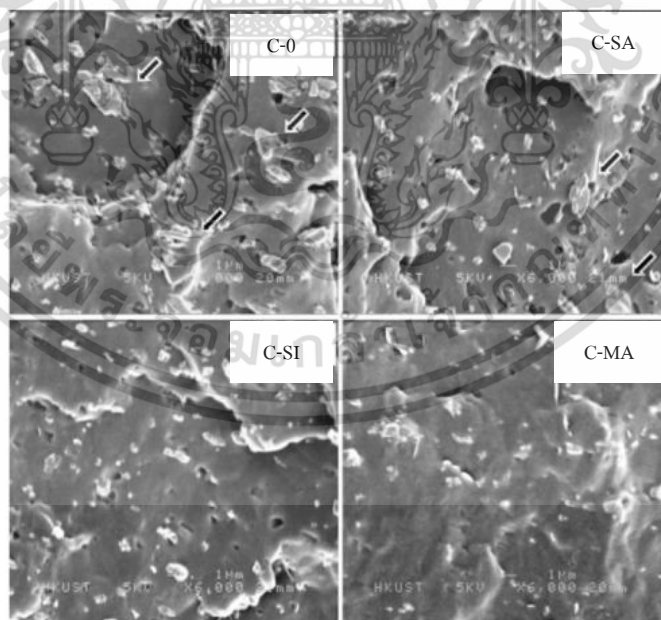
รูปที่ 2.16 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระแทกของ PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก [4]

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารปรับปรุงผิวต่างชนิดกันส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของวัสดุ โดย C-SA มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคปานกลาง (Moderate adhesion) และเป็นสูตรที่มีความเป็นผลึกต่ำที่สุดทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในรูปที่ 2.16 จะเห็นว่า C-SA มีช่องว่างที่เกิดจาก Debonding-cavitation จำนวนมาก นอกจากนี้การใช้ SA เป็นสารช่วยกระจายตัว ทำให้อนุภาคของ BaSO₄ มีการกระจายตัวได้ดี ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในรูปที่ 2.17 ส่งผลให้วัสดุมีความต่อเนื่องในการส่งผ่านแรงกระทำที่ได้รับก่อนเกิดการเสียสภาพ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ C-SA สามารถรับแรงกระแทกได้สูงที่สุด ในขณะที่ C-MAH และ C-SI มีการยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ดี ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่า BaSO₄ มีการกระจายตัวที่ดี และฝังแน่นอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ มี BaSO₄ จำนวนน้อยมากที่ถูกดึงออกมา การยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ดี ประกอบกับความเปราะสูง ส่งผลให้วัสดุเกิดการเสีรูบได้ยากเมื่อได้รับแรงกระแทก ทำให้ Debonding-cavitation เกิดขึ้นได้ช้ากว่า C-SA ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในรูปที่ 2.16 พบว่ามีช่องว่างที่เกิดขึ้นน้อยกว่า C-SA ทำให้ C-MAH และ C-SI รับแรงกระแทกได้น้อยกว่า C-SA

ตารางที่ 2.8 ความเป็นผลึก และสมบัติเชิงกลของ Neat PP และ PP/BaSO₄ [5]

Sample code	X _c (%)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m ²)
Neat PP	46.4	29.9	1.19	2.7
C-0	47.1	27.7	1.78	4.0
C-SA	44.5	27.5	1.73	5.4
C-SI	50.3	28.3	1.81	4.5
C-MAH	52.9	28.7	1.96	3.7

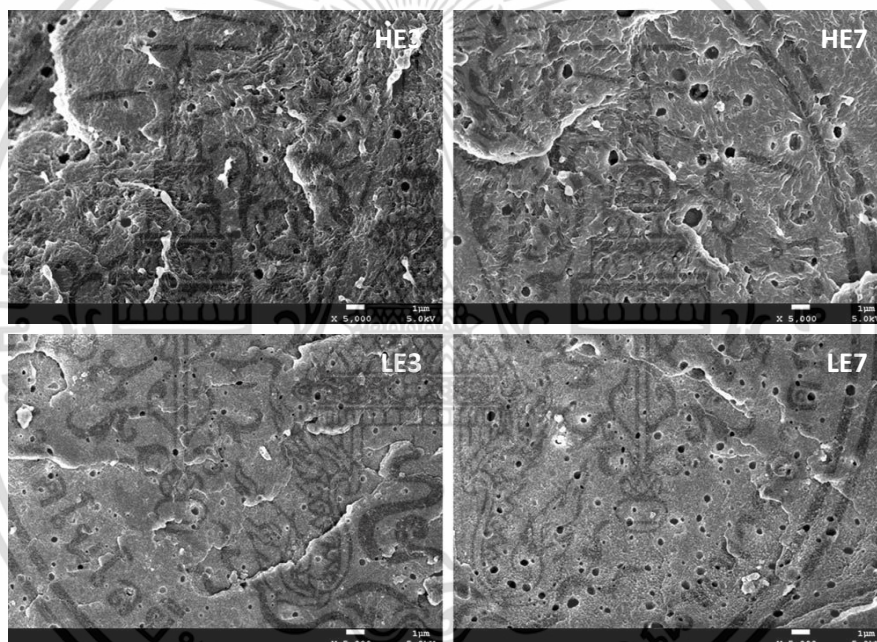


รูปที่ 2.17 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักของ PP/BaSO₄ ที่มี BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chen, Y. [47] ศึกษาสมบัติเชิงกล ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) โดยใช้การทดสอบแบบ Bell-telephone ที่อุณหภูมิ 50°C และศึกษาการเสื่อมสภาพ ของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA และ LDPE/EVA ในอัตราส่วน 100/0, 99/1, 97/3, 95/5, 93/7 และ 90/10 wt/wt ซึ่งแทนด้วย HE0, HE1, HE3, HE5, HE7 และ HE10 สำหรับสูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA และ LE0, LE1, LE3, LE5, LE7 และ LE10 สำหรับสูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA

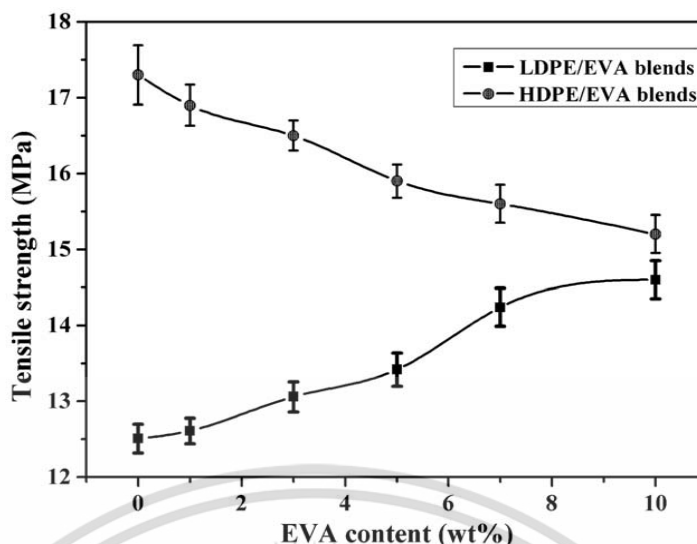
จากผลการทดสอบสัณฐานวิทยา พบว่าอนุภาคของ EVA (ช่องว่างที่แสดงในรูปที่ 2.18) เป็นวัฏภาคกระจายใน LDPE มีขนาดเล็กกว่าใน HDPE แสดงว่า LDPE/EVA มีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ดี (Compatibility) มากกว่าใน HDPE/EVA เนื่องจาก LDPE มีโครงสร้างแบบโซ่กิ่ง (Branch structure) ซึ่งคล้ายคลึงกับ EVA ในขณะที่ HDPE มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง (Linear structure) ส่งผลให้มีความเข้ากันกับ EVA น้อยกว่า



รูปที่ 2.18 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ EVA ใน HDPE หรือ LDPE ของพื้นผิวแตกหักที่กำลังขยาย 5000 เท่า [47]

จากผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง (รูปที่ 2.19) พบว่าในสูตร LDPE/EVA เมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ HDPE/EVA มีค่า Tensile strength ลดลง เป็นผลมาจากการที่ LDPE กับ EVA มีความเข้ากันได้ดีทำให้เกิดการแพร่บริเวณระหว่างวัฏภาค (Inter-diffusion) ได้ดี มีการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มาก ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคมีความแข็งแรงสามารถรับและส่งต่อแรงกระทำได้สูงกว่า LDPE ก่อนเกิดการเสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



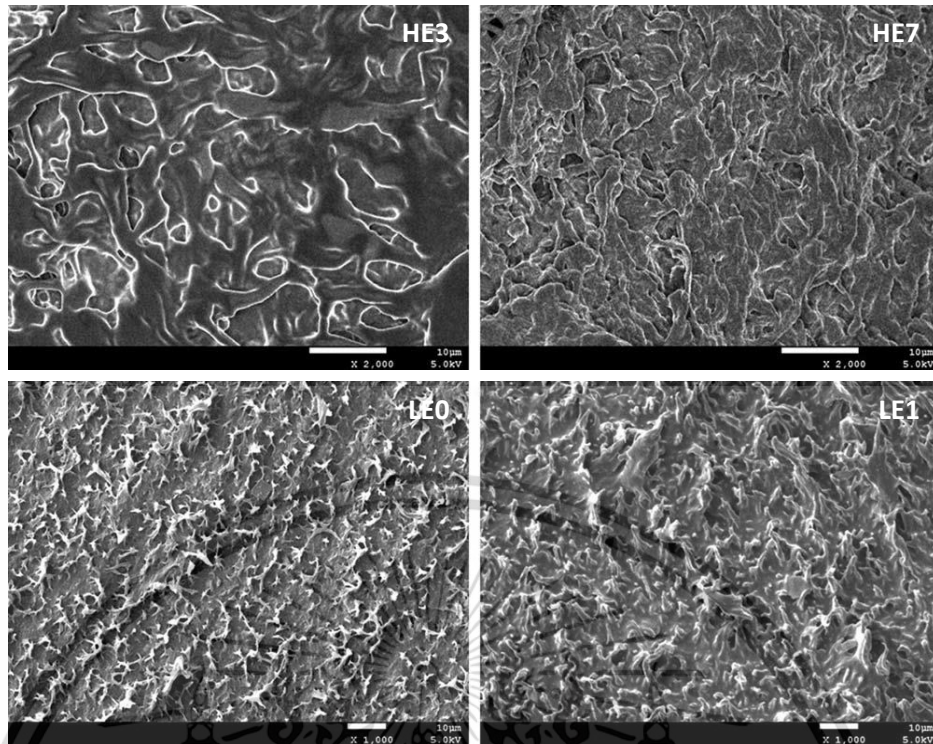
รูปที่ 2.19 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA และ LDPE/EVA [47]

จากการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อสภาพแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 2.9 พบว่าการเพิ่มปริมาณ EVA ส่งผลให้ค่า ESCR เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก EVA มีความยืดหยุ่นสูง สามารถป้องกันการเกิดรอยแตกและการขยายของรอยแตกได้ และจากการศึกษาพบว่าการใช้ LDPE/EVA มีค่า ESCR สูงกว่า HDPE/EVA เนื่องจากระบบพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA มีความสามารถในการเข้ากันได้ดีมากกว่า HDPE/EVA ทำให้การเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคสูง ทำให้ LDPE สามารถส่งต่อแรงเค้นที่ได้รับไปยัง EVA ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายได้ดี ทำให้สามารถชะลอการขยายของรอยแตกหรือหยุดการขยายรอยแตกได้ดีกว่าในระบบพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA

ตารางที่ 2.9 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมโดยรายงานเป็นเวลาที่มีตัวอย่าง 50% เกิดรอยแตกเกิดขึ้น [47]

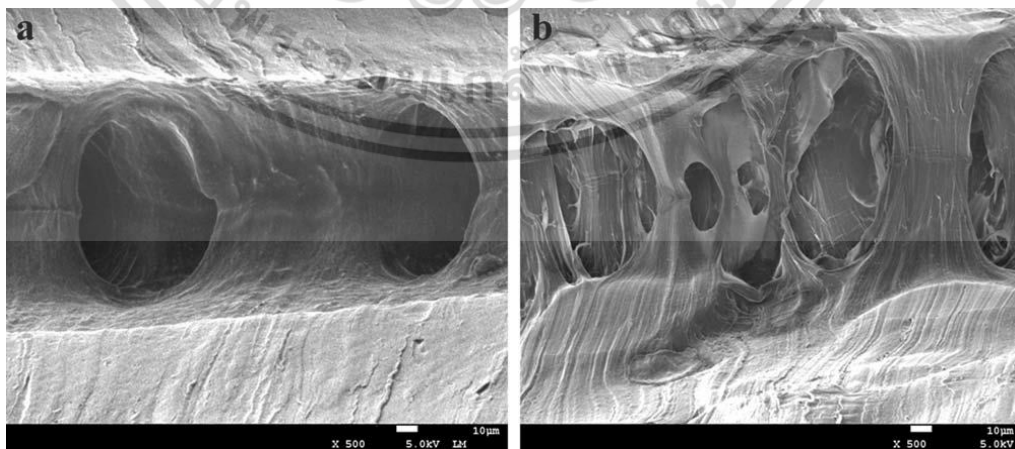
Sample	ESCR (h)	Sample	ESCR (h)
HE0	3	LE0	5
HE1	4	LE1	20
HE3	6	LE3	>1000
HE5	8	LE5	>1000
HE7	10	LE7	>1000
HE10	12	LE10	>1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



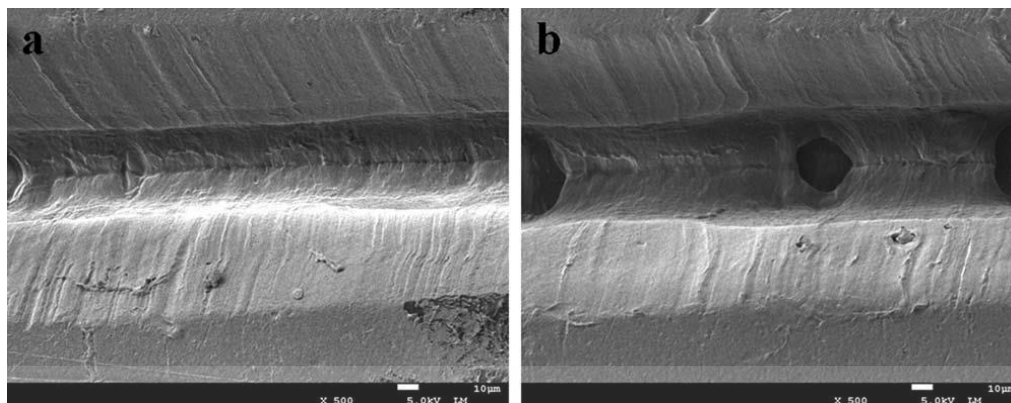
รูปที่ 2.20 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA และ LDPE/EVA หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR [47]

จากภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ ESCR ในรูปที่ 2.20 พบว่า HDPE/EVA มีการแตกหักแบบเรียบไม่เกิด Yielding ขึ้น ในขณะที่ LDPE/EVA มี Yielding เกิดขึ้นจำนวนมาก การที่วัสดุรับแรงเค้นและเกิดการเสียรูปโดยมีพฤติกรรมการเสียรูปแบบ Yielding จะช่วยให้การขยายรอยแตกมีค่าลดลง ซึ่งยืนยันได้จากภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่างในรูปที่ 2.21 และ 2.22 พบว่า ตัวอย่าง HDPE/EVA มีอัตราการขยายรอยแตกมากกว่า LDPE/EVA



รูปที่ 2.21 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่าง HE3 หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ที่เวลาต่างๆ (a. 1 h และ b. 5 h) [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่าง LE3 หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ที่เวลาต่างๆ (a. 10 h และ b. 1000 h) [47]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเติม BaSO_4 ในปริมาณที่เหมาะสมลงไปในพอลิเมอร์สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตได้ การใช้สารปรับปรุงพื้นผิว SA สามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวทำให้วัสดุมีสมบัติการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น การใช้ PE-g-MA สามารถช่วยให้เกิดการผสมที่ดี และยังสามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารตัวเติมที่มีความแตกต่างระหว่างขั้วได้ ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนการผสม EVA ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงลงไปในพอลิเมอร์สามารถเพิ่มความแข็งแรงดึงได้ในกรณีที่ระบบพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถเข้ากันได้ดี และมีสัดส่วนของภูมิภาคกระจายในปริมาณต่ำๆ นอกจากนี้การใช้ EVA ยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติ ESCR ของวัสดุในงานวิจัยนี้จึงเตรียมคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว SA หรือสารช่วยผสม PE-g-MA หรือการใช้ EVA เพื่อศึกษาค่าความหนาแน่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และศึกษา ESCR ของวัสดุ

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เกรดฉีดขึ้นรูป LL8420A, บริษัท พีทีที โพลีเอทิลีน จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE*

สมบัติ	InnoPlus LL8420A	หน่วย	วิธีการ ทดสอบ
ดรรชนีการไหล (Melt Index, 190°C, 2.16 kg)	20	g/10min	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	0.924	g/cm ³	ASTM D792
จุดหลอมเหลว (Melting point)	123	°C	ASTM D3418
จุดอ่อนตัว (Vicat softening point)	92	°C	ASTM D1525
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	12	MPa	ASTM D638
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	8	MPa	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield)	20	%	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	300	%	ASTM D638
มอดุลัส (1% Secant modulus)	310	MPa	ASTM D638
ความแข็ง (Hardness, shore D)	53	-	ASTM D2240
ความแข็งแรงกระแทก (Notched izod impact strength)	400	J/m	ASTM D256
ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR, 100% Igepal, F ₅₀ Bent strip test : 100% Igepal, 3.2 mm. specimen, no slit, 50°C)	150	Hours	ASTM D1693

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) เกรด UL00728CC, บริษัท ExxonMobile Chemical จำกัด

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EVA*

สมบัติ	UL00728CC	หน่วย
ไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate)	27.5	wt%
ดรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C /2.16 kg)	7	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.952	g/cm ³
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	100	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

3. แบริยมซัลเฟต เกรดตกตะกอน SY 1250 (ไม่มีการเคลือบผิว), บริษัท TITANOS จำกัด

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ BaSO₄*

สมบัติ	SY 1250	หน่วย
ลักษณะ (Appearance)	ผงสีขาว	-
ขนาด (Median diameter)	3.0	µm
ความหนาแน่น (Specific gravity)	4.5	g/cm ³
ค่า pH	6.5-9.0	-
ค่าคงที่การละลายน้ำ (Water soluble substances)	<0.3	%
การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption)	15-30	g/cm ³
ปริมาณ BaSO ₄	>98	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต (สามารถดูเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก จ)

4. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดไรด์ (LLDPE-g-MA) เกรด SCONA TSPE 1112 GALL, บริษัท บี. วาย. เค. ซัพพลาย แอนด์ เซอร์วิส จำกัด

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ LLDPE-g-MA*

สมบัติ	SCONA TSPE 1112 GALL	หน่วย
ปริมาณมาเลอิกแอนไฮดไรด์ (MA content)	2	%
ดัชนีหลอมการไหล (Melt Index, 190°C, 5 kg)	5	g/10min
Drying loss (3 h, 110°C)	0.5	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรดสเตียริก เกรดการค้า, บริษัท เอสเค โพลีเมอร์ จำกัด
6. โนนิลฟีนอล พอลิเอทิลีน ไกลคอล อีเทอร์ (Nonylphenol polyethylene glycol ether) เกรด Tergitol[®] NP-9, บริษัท ซิกม่า-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด
7. โทลูอีน เกรดการค้า, บริษัท แล็บซีสเต็มส์ จำกัด
8. ไนโตรเจนเหลว
9. Surfactant Pervitro 75% เกรด ARTNR ME-72409, บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด
10. เททระไฮโดรฟูแรน (THF), เกรดวิเคราะห์, Thermo fisher scientific Inc.

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd.)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น 5HP, Bosco Engineering Co., Ltd.)
3. เครื่องบดลม (รุ่น Bebicon 400, Hitachi Co., Ltd.)
4. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine, รุ่น TTI 200/80, บริษัท ประทานกิจถาวร จำกัด)
5. เครื่อง Density kit (รุ่น ML-DNY-43, Mettler-toledo Co., Ltd.)
6. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA, รุ่น TG 209 F3 Tarsus[®], Netzsch Co., Ltd.)
7. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, รุ่น DSC 204 F1-Phoenix[®] (ASC), Netzsch Co., Ltd.)
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM, รุ่น LR5K, Lloyd Instrument Ltd.)
9. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester, รุ่น DSTFDDR, Italia Co., Ltd.)
10. เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (Izod impact tester, รุ่น Yasuda 199311, Yasuda seiki seisakusho Ltd.)
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM. รุ่น JSM-5410LV, JEOL Co., Ltd.)
12. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonik[™] Cleaner model , Output frequency : 44-48 KHz, Fisher scientific worldwide Co., Ltd.)
13. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, รุ่น ISOTEMP 228, Fisher scientific Co., Ltd.)
14. ตู้อบลมร้อน (Universal oven, รุ่น ML204, Memmert (Germany) Co., Ltd.)
15. เครื่องทำรอยบาก (Ceast, รุ่น Yasuda No. 7686, Yasuda seiki seisakusho Ltd.)
16. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer χ , รุ่น MSX15, Malvern Instruments Ltd.)

17. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR, รุ่น FTIR Spectrum Gx, Perkin Elmer)
18. เตาเผา (Furnace, รุ่น 6000, BARNSTEAD THERMOLYNE Co., Ltd.)
19. ปีกเกอร์ขนาด 100 ml, 150 ml และ 3000 ml
20. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียร์คาลิเปอร์
21. เดซิเคเตอร์
22. โกร่งบดสาร
23. เครื่องชั่งละเอียด
24. ตะเกียงบุนเสน
25. หลอดหยด
26. แท่งแล้วคนสาร
27. เทอร์โมมิเตอร์
28. แท่งจับยึดชิ้นงาน (ใช้ในการทดสอบ ESCR)
29. ฟอर्सเซป (Forceps)
30. อลูมิเนียมฟอยล์

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์ $BaSO_4$

3.3.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ $BaSO_4$

นำตัวอย่าง $BaSO_4$ ไปโรยบนคาร์บอนเทป ก่อนนำไปติดบนสตัป (Stub) และเคลือบทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ด้วย SEM

3.3.1.2 การวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคของ $BaSO_4$

นำตัวอย่าง $BaSO_4$ ไปวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาค โดยใช้เครื่อง Mastersizer χ ใช้วิธีวิเคราะห์แบบเปียก (Wet analysis) มีน้ำกลั่นเป็นตัวกลาง จากนั้นนำตัวอย่าง $BaSO_4$ เเทลงใน Recirculator ที่มีน้ำกลั่นอยู่จนถึงระดับ Obscuration ที่ประมาณ 15-30% กดปุ่มให้เครื่องทำงาน เครื่องจะทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

3.3.2 การเคลือบผิว $BaSO_4$ ด้วย SA 1% โดยน้ำหนัก

นำ $BaSO_4$ 20 กรัมใส่ในปีกเกอร์แรก (ขนาด 150 ml) และใช้โกลูอินเป็นตัวกลางประมาณ 75 มิลลิลิตร นำไปวางในเครื่องอัลตราโซนิก โซนิกเคชันเป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิห้องในตู้ดูดควัน นำกรดสเตียริก 0.2 กรัมใส่ในปีกเกอร์ที่สอง (ขนาด 100 ml) ค่อยๆ ละลายด้วยโกลูอินประมาณ 50 ml จนกระทั่งกรดสเตียริกละลายสมบูรณ์ จากนั้นค่อยๆ หยดสารละลายกรดสเตียริกลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมในการใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปีเกอร์ที่ 1 จนหมด โชนิคเคชันต่อเป็นเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตัวทำละลายระเหยในตู้ดูดควัน ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดโดยใช้โกร่งบดสาร

3.3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

เตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.5

ซึ่งส่วนผสม LLDPE, EVA, BaSO₄ และ LLDPE-g-MA ตามตารางที่ 3.5 โดยเตรียมสูตรละ 700 กรัม ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 350 กรัม เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 170 °C
- ความเร็วรอบ (Rotor speed) 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 30 min

นำสูตรผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็ก เพื่อนำไปฉีดขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3.5 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์

สูตร	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง (php)				
	LLDPE	EVA	BaSO ₄	SA	LLDPE-g-MA
LL	100	-	-	-	-
LLB5	100	-	5	-	-
LLB10	100	-	10	-	-
LLB15	100	-	15	-	-
LLB20	100	-	20	-	-
LLB25	100	-	25	-	-
LLB25S1	100	-	25	0.25	-
LLB25G1	100	-	25	-	0.25
LLB25G2	100	-	25	-	0.50
LLB25G3	100	-	25	-	0.75
LL90EA10	90	10	-	-	-
LL95EA5B25	95	5	25	-	-
LL90EA10B25	90	10	25	-	-
LL85EA15B25	85	15	25	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) โดยโดยตั้งสถานะของเครื่องดังนี้

อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป (°C)

Nozzle Temp. 190

Zone 1 Temp. 180

Zone 2 Temp. 170

เวลาในการฉีดขึ้นรูป (s)

1st STG INJ 20

2nd STG INJ 20

3rd STG INJ 20

COOLING 300

ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (%)

1st STG ING 30

2nd STG ING 30

3rd STG ING 30

ความดันในการฉีดขึ้นรูป (kg/cm²)

1st INJ 30

2nd INJ 30

3rd INJ 30

3.3.5 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง

หาความหนาแน่นของตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method A) [48] ด้วยการใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ประกอบกับ Density kit ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างจะถูกกำหนดจากของเหลวที่ทราบความหนาแน่น (ρ_0) โดยในการทดลองใช้น้ำกลั่น และทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 22.4°C ($\rho_0 = 0.9977 \text{ g/cm}^3$ at 22.4°C)

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ [49]

1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละสูตรขนาดประมาณ $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a)
3. หยด Surfactant Pervitro 75% ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เปียก (Wetting agent) ประมาณ 3 หยด ซึ่ง Wetting agent จะทำให้น้ำกลั่นแพร่ไปบนชิ้นงานตัวอย่างได้ดีขึ้นโดย Surfactant จะไปลดความตึงผิวของน้ำกลั่น

4. ก่อนทำการทดสอบต้องรอจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกลั่นคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชั่งชิ้นงานตัวอย่างในอากาศโดยวางชิ้นงานตัวอย่างบน Pan ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b) กดบันทึกค่าน้ำหนักที่ชั่งได้

6. หลังจากนั้นชั่งชิ้นงานตัวอย่างในน้ำกลั่น

6.1 กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบคว่ำ Basket ดังรูปที่ 3.1 (c) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปใต้น้ำกลั่นโดยค่อยๆ ใช้แท่งแก้วคน ดันตัวอย่างให้อยู่ภายใต้ Basket ก่อนทำการกดบันทึกน้ำหนัก ต้องมั่นใจว่าวัสดุที่นำมาทดสอบไม่ลอยอยู่บนน้ำกลั่น และไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น

6.2 กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบหงาย ดังรูปที่ 3.1 (d) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปบน Basket และกดบันทึกน้ำหนัก

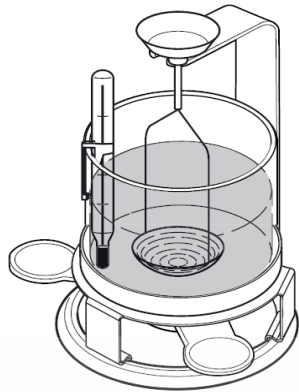
7. หลังจากวัดน้ำหนักของตัวอย่างในตัวอย่างที่เป็นอากาศและในตัวอย่างที่เป็นน้ำกลั่นแล้ว กดปุ่มคำนวณ เครื่อง Density kit จะแสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง (ρ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง : } \rho = \frac{A}{A-B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (3.1)$$

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง : } V = \frac{\alpha (A-B)}{(\rho_0 - \rho_L)} \quad (3.2)$$

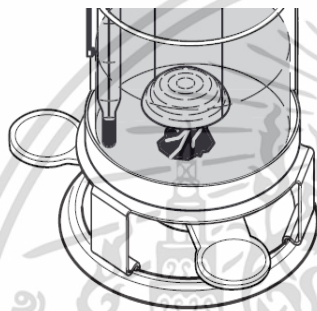
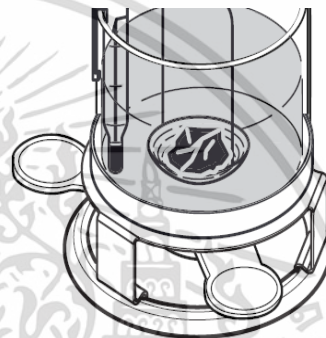
- เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่าง
 A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ
 B = น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในของเหลว
 V = ปริมาตรของตัวอย่าง
 ρ_0 = ความหนาแน่นของของเหลวที่ทราบความหนาแน่น
 ρ_L = ความหนาแน่นของอากาศ (0.0012 g/cm^3)
 α = Weight correction factor (0.99985)



(a) ลักษณะการจัดวางเครื่องมือ



(b) การชั่งตัวอย่างในตุ้กลางอากาศ

(c) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ
การชั่งตัวอย่างที่มี ρ น้อยกว่าน้ำกลั่น(d) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ
การชั่งตัวอย่างที่มี ρ มากกว่าน้ำกลั่น

รูปที่ 3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น [49]

3.3.6 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO_4

นำ BaSO_4 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก มาตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริก โดยใช้เทคนิค Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFTS-FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1}

3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณกรดสเตียริก

หาปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO_4 ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เพื่อกำจัดกรดสเตียริกออกไป ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ตอนที่ 1 นำครุซีเบลแบบถ้วยมาเผาด้วยเตาเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600°C หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำครุซีเบลที่ผ่านการเผาแล้วมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) พร้อมทั้งจดบันทึกค่า โดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุซีเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 นำครุชิวเบลที่ผ่านการเผาแล้วมาใส่ BaSO₄ ที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก โดยให้มีน้ำหนักประมาณ 5 กรัม จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งเครื่องชั่งละเอียด พร้อมทั้งจดบันทึกค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชิวเบลก่อนเผา

ตอนที่ 3 นำครุชิวเบลที่มีตัวอย่างที่ผ่านการชั่งแล้วมาเผาด้วยตะเกียงเบนเซนจนกระทั่งไม่เห็นเปลวไฟในครุชิวเบล จากนั้นทำการทดลองซ้ำตอนที่ 1 ค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชิวเบลหลังเผา

ปริมาณของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO₄ สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

น้ำหนักสารที่เหลือ = น้ำหนักของครุชิวเบลหลังเผา - น้ำหนักของครุชิวเบล

น้ำหนักสารทั้งหมด = น้ำหนักของครุชิวเบลก่อนเผา - น้ำหนักของครุชิวเบล

$$\text{กรดสเตียริก (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่เหลือ} \times 100}{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด}} \quad (3.3)$$

3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ ในชิ้นงานตัวอย่าง

นำชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปมาหาปริมาณ BaSO₄ โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้ น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากอุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 800°C เพื่อกำจัดสารอินทรีย์อื่นๆ ออกไป ภายใต้บรรยากาศของอากาศ (Air) นำข้อมูลที่ได้จากกราฟมาหาปริมาณ BaSO₄ ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM D1131 [50]

3.3.9 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

ตัวอย่างจากชิ้นงานฉีดขึ้นรูปมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่ง น้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [51]

$$\text{Heat of fusion, } \Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง } T_m \text{) (J)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)}} \quad (3.4)$$

$$\text{Heat of fusion } \Delta H_{\text{Normalised}} \text{ (J/g)} = \frac{\Delta H_f \times 100 \text{ (J/g)}}{100\% - \% \text{ โดยน้ำหนักของสารที่ไม่ใช่ PE}} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (\%)} = \frac{\Delta H_{\text{Normalised}} \times 100}{\Delta H_f^0} \quad (3.6)$$

- เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง T_m)
- ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 293 J/g [52]
- $\Delta H_{\text{Normalised}}$ คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนในของผสมโดยคิดเทียบปริมาณของพอลิเอทิลีน 100% โดยน้ำหนัก

3.3.10 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

3.3.10.1 การกระจายตัวของ BaSO₄

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำชิ้นงานส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของ BaSO₄ ด้วยเครื่อง SEM

3.3.10.2 การกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ แล้วนำชิ้นงานที่หักไปแช่ในบีกเกอร์ขนาด 100 ml ที่บรรจุตัวทำละลาย THF 50 ml ที่อุณหภูมิ 55°C ปิดบีกเกอร์ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ พร้อมกับทำโซนิกเคชันด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของ EVA ด้วยเครื่อง SEM

3.3.11 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ค่าYoung's Modulus และค่าร้อยละการดึงยืด ตามมาตรฐาน ASTM D638 [53] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

- | | | |
|---------------------------------------|-----|--------|
| - โหลดเซลล์ (Load cell) | 5 | kN |
| - ความเร็วในการดึง (Test speed) | 300 | mm/min |
| - ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) | 35 | mm |

หมายเหตุ ใช้ความเร็วในการดึง 300 mm/min เนื่องจาก LLDPE ที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดฉีดขึ้นรูป (MFI = 20 g/10min) การทดสอบที่ความเร็วต่ำกว่านี้ พบว่าชิ้นงานไม่ขาดในระยะการยึดที่ถูกต้องด้วยความสูงของเครื่องมือทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ายังมอดุลัส และร้อยละการดึงยืด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = F_{\text{at yield}} / A \quad (3.7)$$

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}} / A \quad (3.8)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)} = \frac{(l_{\text{at yield}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.9)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)} = \frac{(l_{\text{at break}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.10)$$

$$\text{ค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.11)$$

เมื่อ	$F_{\text{at yield}}$	=	แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดคราก
	$F_{\text{at break}}$	=	แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดขาด
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
	$l_{\text{at yield}}$	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
	$l_{\text{at break}}$	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l_0	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานก่อนดึงขึ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 35 mm

หมายเหตุ ค่ายังมอดุลัสคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 0.5 และ 1% การดึงยืด)

3.3.12 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปดั่งมาตรฐาน ASTM D 256 [54] โดยในการทดสอบใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละสูตร ทำการบากชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นรูปตัววี (V notch) โดยมีรัศมีรอบบาก (Root radius) 0.254 mm และมีความลึก 2.54 mm ด้วยเครื่องทำรอยบาก ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (Notched samples) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (} W_k \text{)} = W/A_k \quad (3.12)$$

W_k = ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (kJ/m^2)

W = ค่าพลังงานกระแทกที่วัดได้ (kJ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

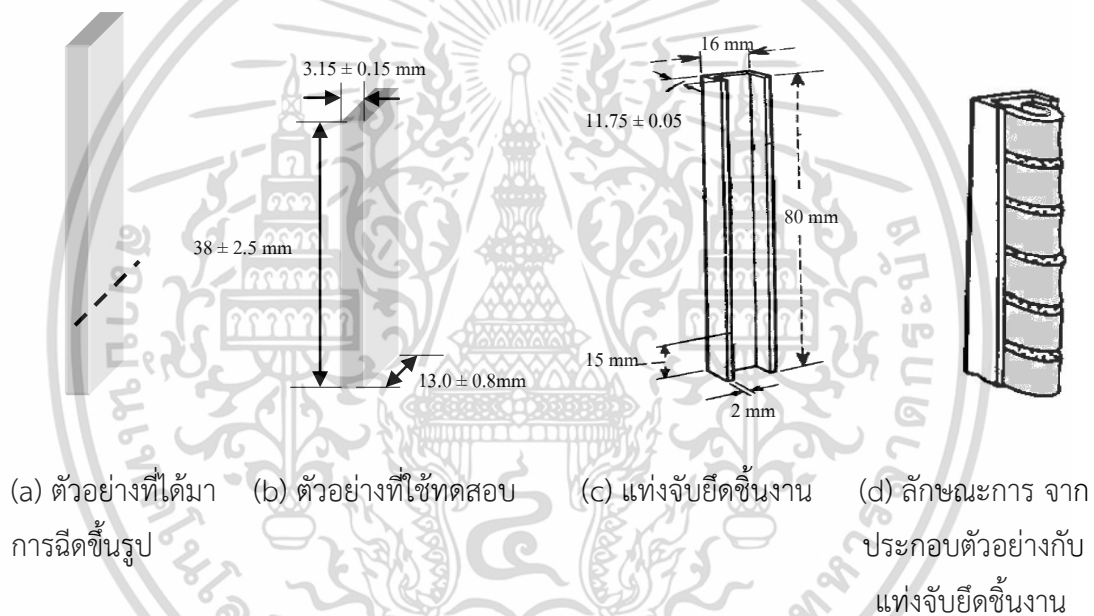
$$A_k = \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่หักรอยรอยบากแล้ว (m}^2\text{)}$$

3.3.13 การทดสอบความแข็งกด

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปที่มีความหนาประมาณ 3.15 mm มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้อง กดตัวอย่างเป็นเวลา 3 วินาที แล้วอ่านค่าที่วัดได้ ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [55]

3.3.14 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป (รูปที่ 3.2 (a)) จำนวน 10 ชิ้นต่อ 1 สูตร มาตัดปลายด้านหนึ่งออกให้มีความยาวของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 38 ± 2.5 mm ดังรูปที่ 3.2 (b) โดยใช้คัตเตอร์



รูปที่ 3.2 ลักษณะและการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ESCR [56]

จากนั้นค่อยๆ งดชิ้นงานตัวอย่าง และนำไปใส่ในที่แห่งจับยึดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.2 (c) แخذตัวอย่างในบีกเกอร์ขนาด 3000 ml ที่มี 100% Nonylphenol polyethylene glycol ether ปริมาณ 700 ml บรรจุอยู่ จากนั้นนำภาชนะไปใส่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C สังเกตการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่าง และจดบันทึกเวลาเมื่อสังเกตเห็นรอยแตกเกิดขึ้นในตัวอย่าง เพื่อนำไปหาค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ตามมาตรฐาน ASTM D1693 [57] โดยรายงานค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม F_{50} คือ เวลาที่มีตัวอย่าง 5 ชิ้นเกิดรอยแตกขึ้น

หลังจากที่ตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการแตกหัก ให้นำตัวอย่างไปศึกษาลักษณะการเสีย

สภาพของชิ้นงานบริเวณภาคตัดขวางโดยใช้เทคนิค SEM เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ และความหนาแน่นของคอมโพสิต

ปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ ในคอมโพสิตตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.1 (จากผลการทดลองด้วย TGA แสดงผลในภาคผนวก ก) เนื่องจาก BaSO₄ มีการฟุ้งกระจาย ในขั้นตอนการผสมจึงเติม BaSO₄ โดยเพื่อปริมาณมากกว่าประมาณ 1 กรัมของปริมาณ BaSO₄ ที่ต้องการ พบว่าปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ เนื่องจากเป็นการผสมในระบบปิดโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของ BaSO₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ต่างกัน

สูตรผสม	ปริมาณ BaSO ₄ ที่ต้องการ		ปริมาณ BaSO ₄ ที่พบ		ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	php	%wt	php	%wt	ค่าจากการทดลอง	ค่าตามทฤษฎี
LL	-	-	-	-	0.926±0.001	0.924
LLB5	5	4.76	6.68	6.36	0.964±0.001	0.973
LLB10	10	9.09	10.33	9.39	0.998±0.000	0.999
LLB15	15	13.04	14.03	12.20	1.027±0.001	1.023
LLB20	20	16.67	19.61	16.34	1.058±0.000	1.062
LLB25	25	20.00	23.53	18.82	1.090±0.002	1.086

ค่าความหนาแน่นจากการทดลองของชิ้นงานคอมโพสิตที่ทำได้จากเครื่อง Density kit และความหนาแน่นทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข) แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความหนาแน่นของแต่ละสูตรผสมในทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลของการเติม BaSO₄ ซึ่งมีความหนาแน่น (4.5 g/cm³) สูงกว่าความหนาแน่นของ LLDPE (0.924 g/cm³) ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ เป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 php ให้ค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มสัดส่วนของวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าลงใน LLDPE ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุเพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่าความหนาแน่นไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (g/cm³) กับปริมาณ BaSO₄ (%wt) ดังแสดงในรูปที่ ข-1 ในภาคผนวก ข พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แสดงว่าความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นเป็นไปตามกฎของการผสม (Rule of mixture)

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.2 พบว่าคอมโพลีเมอร์ LLDPE/BaSO₄ ทุกสูตรมีค่า T_m และความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน และมีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE แสดงว่าการเติมอนุภาค BaSO₄ ไม่เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ผลึกที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาจากค่า T_c พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า BaSO₄ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) สำหรับ LLDPE ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chen, X. [46] ซึ่งพบว่า BaSO₄ สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ใน HDPE อาจเนื่องจากการใช้ BaSO₄ เกรดนาโน (ขนาดอนุภาค 40 nm) ซึ่งแตกต่างจากขนาดของ BaSO₄ (4.64 μm) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.2 T_m, T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพลีเมอร์ LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน

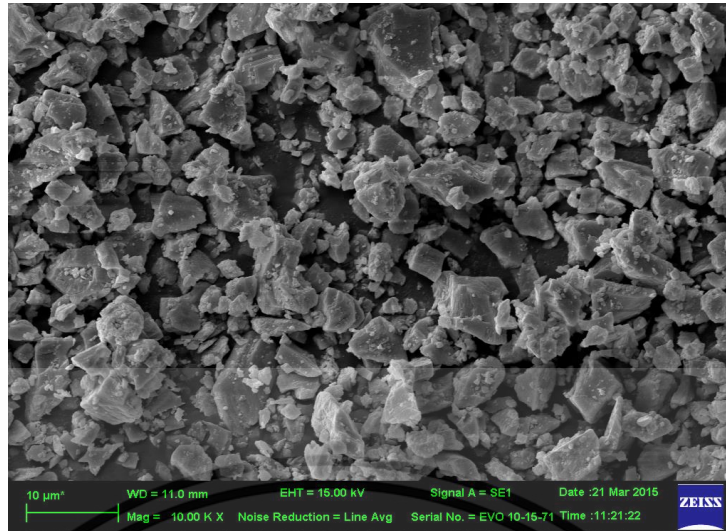
สูตร	T _m (°C)	T _c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL	129.6	107.9	35
LLB5	130.6	107.3	35
LLB10	129.6	107.9	33
LLB15	127.6	109.7	33
LLB20	127.7	109.0	34
LLB25	128.4	108.9	34

4.1.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

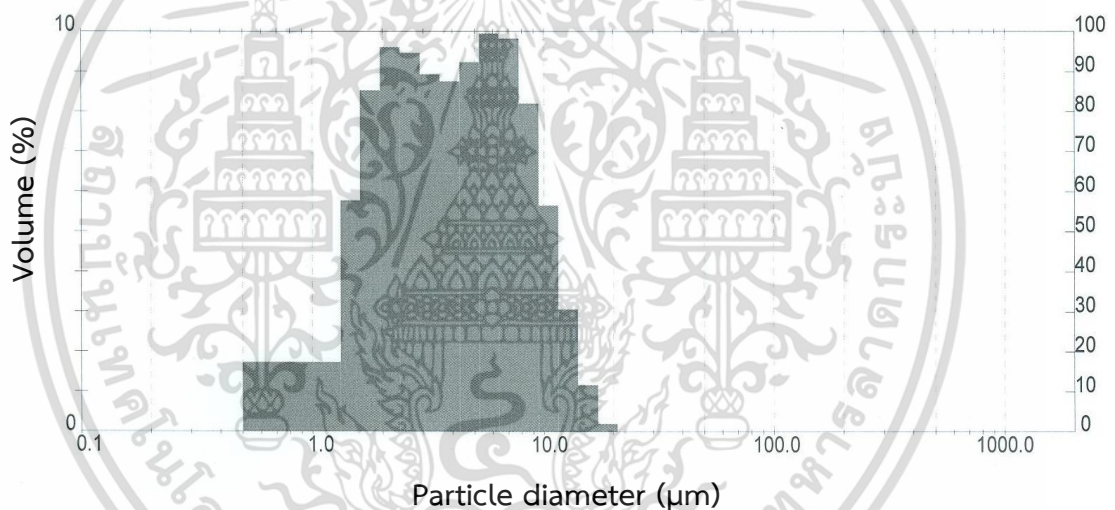
4.1.3.1 สัณฐานวิทยาของ BaSO₄

จากรูปที่ 4.1 พบว่า BaSO₄ มีลักษณะเป็นผลึกแผ่นหนา ยาวขนานไปกับฐานผลึกหรือเป็นผลึกรูปแท่งเหลี่ยมๆ บางส่วนพบเป็นแผ่นบางซ้อนกันค่อนข้างหนา (Coarsely laminated plate) หรือเป็นเม็ดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมๆ และพบว่าขนาดอนุภาคของ BaSO₄ มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันไปมีทั้งที่อยู่แบบก้อนเดี่ยวๆ และเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม เมื่อนำ BaSO₄ ไปวิเคราะห์ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาค โดยใช้เครื่อง Mastersizer X ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1.95-6.39 μm ซึ่งมีปริมาณของขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วงนี้ประมาณ 70% โดยปริมาตร (แสดงในภาคผนวก ง) โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเป็น 4.64 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 SEM micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของ BaSO₄ (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

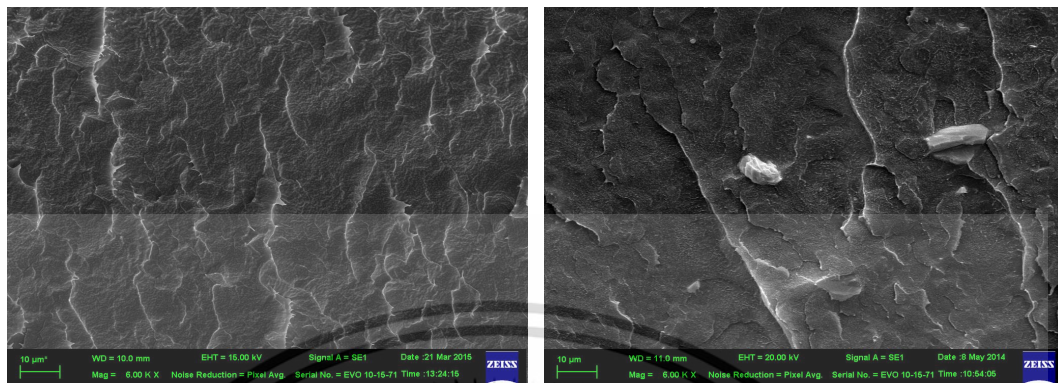


รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์ในการกระจายตัวของขนาด

4.1.3.2 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

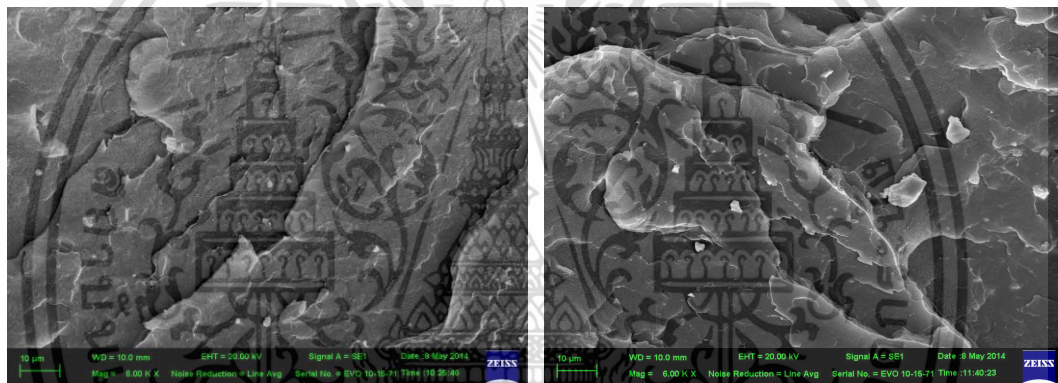
การศึกษาการกระจายตัวของ BaSO₄ ใน LLDPE ที่ปริมาณต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อผสม BaSO₄ ในปริมาณ 5, 10 และ 15 php ลงใน LLDPE อนุภาค BaSO₄ มีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ โดยส่วนใหญ่ และไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แสดงว่า BaSO₄ มีการแตกตัวและการกระจายตัวที่ดี (Good dispersion and distribution) ใน LLDPE แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ เป็น 20 และ 25 php พบว่าอนุภาค BaSO₄ มีทั้งส่วนที่แตกตัวออกเป็นอนุภาคเดี่ยว และบางส่วนเกิดการกระจุกกัน แสดงว่ามีโอกาสสูงขึ้นที่การแตกตัวและการกระจายตัวไม่ดี (Poor dispersion and distribution) เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันระหว่าง LLDPE ซึ่งเป็นวัสดุภาคที่ไม่มีขั้ว กับ BaSO₄ ซึ่งมีขั้ว ส่งผลให้มีการยึดติดระหว่างวัสดุภาคที่ไม่ดี ซึ่งสามารถสังเกตได้จากอนุภาค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BaSO₄ ส่วนใหญ่ไม่เกิดการฝังตัวลงไป ใน LLDPE และมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของอนุภาค BaSO₄ (โดยเฉพาะในรูปที่ 4.3 (e) และ (f))



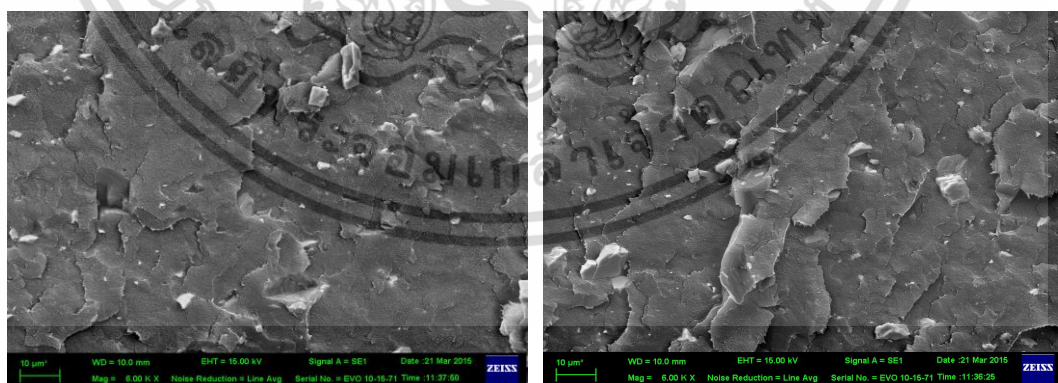
(a) LLDPE

(b) LLB5



(c) LLB10

(d) LLB15



(e) LLB20

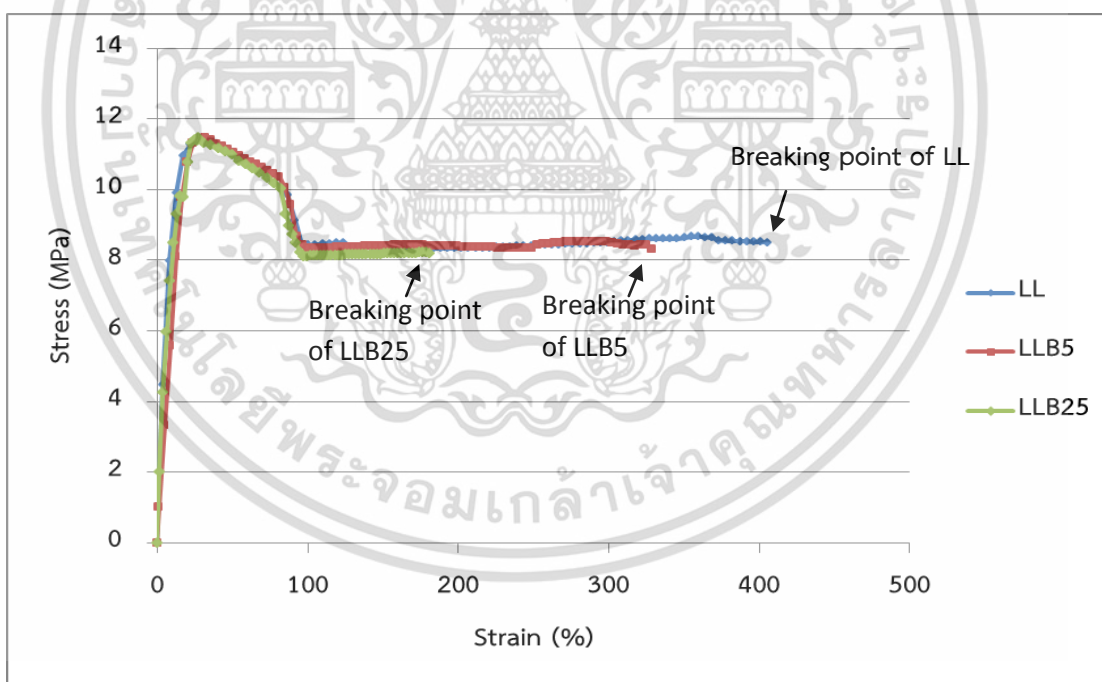
(f) LLB25

รูปที่ 4.3 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO₄ ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และการดึงยืด ณ จุดคราก เนื่องจากพฤติกรรมการเสียรูปของพอลิเมอร์ทุกสูตรผสมมีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งสามารถดูได้จาก Stress-strain curve ในรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าเมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะมี Necking เกิดขึ้น และยืดยาวไปเรื่อยๆ โดยที่ค่าความเค้น (Stress) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขณะดึงจนถึงสิ้นสุดความยาวของวัสดุ (ซึ่งให้ผลคล้ายกับงานวิจัยของ Wang, K. [4] ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ในช่วง 0-16 %wt ในคอมโพสิต PP/BaSO₄ ให้ค่า Yield stress ไม่มีเปลี่ยนแปลง) แต่การดึงยืด ณ จุดขาดของ LLDPE/BaSO₄ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ BaSO₄ เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก LLDPE เป็นวัสดุที่ไม่มีขีด ในขณะที่ยืด BaSO₄ เป็นวัสดุที่มีขีดจึงไม่มีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ (ซึ่งสามารถดูได้จากผลของ SEM ในรูปที่ 4.3) และไม่สามารถเข้ากันได้ดี ส่งผลให้ BaSO₄ ที่เติมลงไปมีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเมื่อมีปริมาณ BaSO₄ มากขึ้น เปรียบเสมือนการมีจุดบกพร่องในชิ้นงานหรือเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้น (Stress concentrator) ส่งผลให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะเกิดการแยกออกบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุได้ง่าย ทำให้วัสดุยืดได้น้อยลงก่อนเกิดการฉีกขาดหรือเกิดการเสียหาย

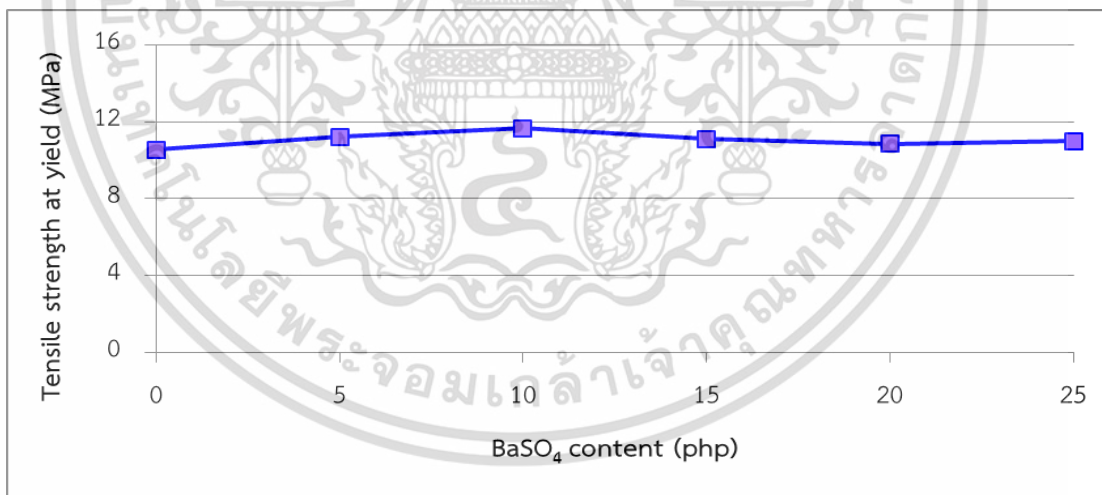


รูปที่ 4.4 Stress-strain curve ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.5 (e) และ 4.6 พบว่าการเติมอนุภาค BaSO_4 ลงไปทำให้ค่ายังมอดุลัส และค่าความแข็งของวัสดุเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค BaSO_4 มีค่าความแข็ง (ประมาณ 3.5 Mohs) มากกว่าความแข็งของ LLDPE

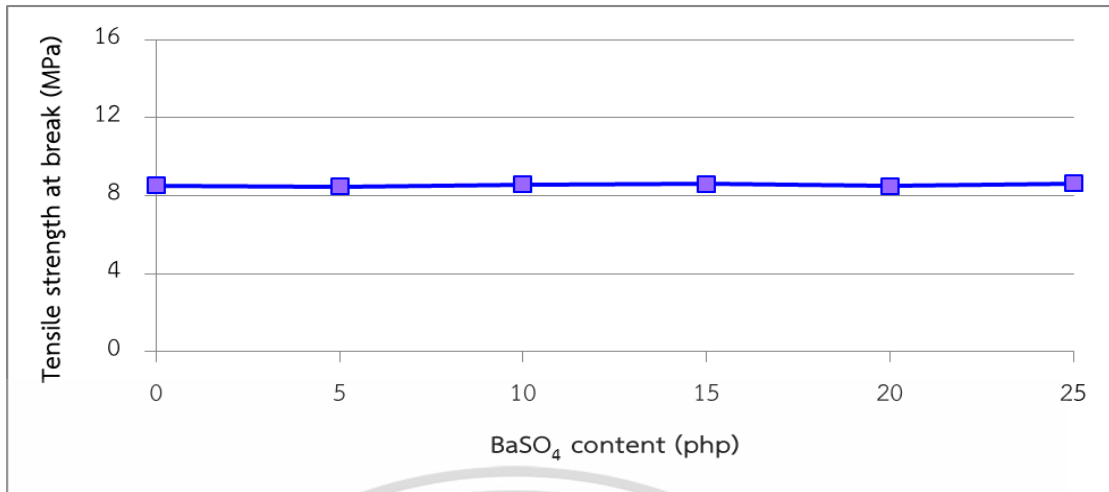
ผลการศึกษสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าการเติมอนุภาค BaSO_4 ลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อย (5 ph) ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากรูปร่างทางสัณฐานวิทยาของ BaSO_4 มีลักษณะเป็นก้อนที่มีความเหลี่ยม ซึ่งดูได้จากผลของ SEM ในรูปที่ 4.1 และ 4.3 โดยบริเวณที่เป็นเหลี่ยมจะเป็นเหมือนจุดศูนย์รวมแรงเค้นทำให้วัสดุรับแรงกระแทกได้ไม่ดี และการเติม BaSO_4 เป็นการเพิ่มมวลของแข็ง และทำให้ความต่อเนื่องของวัสดุ LLDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ลดลง ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE ดังนั้นคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ทุกสูตรผสมจึงแตกหักได้ง่ายกว่า LLDPE

การเพิ่มปริมาณ BaSO_4 ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มส่วนที่ส่งผ่านแรงหรือกระจายแรงได้ไม่ดีในพอลิเมอร์เมตริกซ์ การเติม BaSO_4 ในปริมาณสูง (20 และ 25 ph) พบว่ามีอนุภาค BaSO_4 บางส่วนเกิดการกระจุกตัวกันหรือมีการกระจายตัวที่ไม่ดี ซึ่งยืนยันจากผลของ SEM ในรูปที่ 4.3 (e) และ (f) การกระจุกตัวกันของอนุภาค BaSO_4 เป็นเหมือนจุดบกพร่องในชิ้นงานทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง

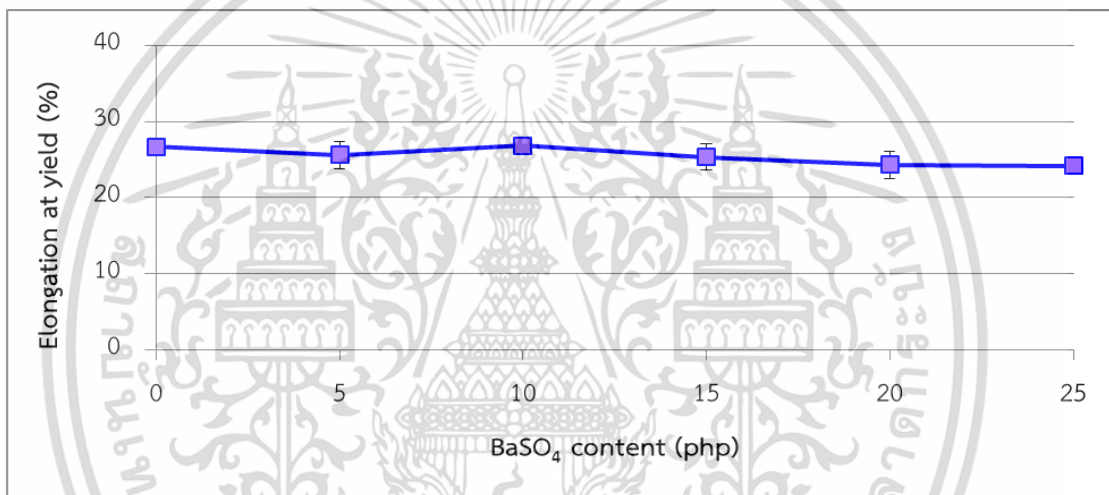


(a) ความแข็งแรง ณ จุดคราก

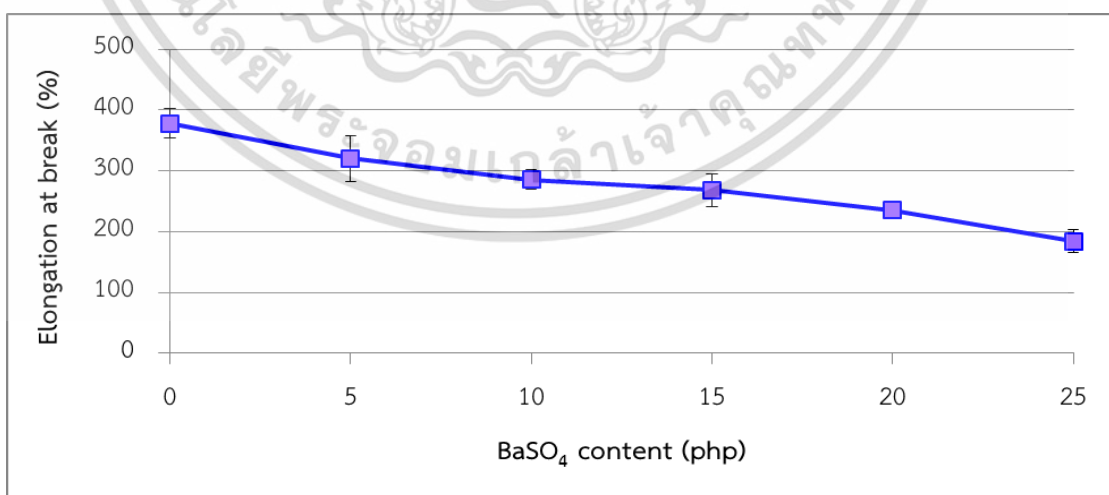
รูปที่ 4.5 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีปริมาณ BaSO_4 ต่างกัน



(b) ความแข็งแรง ณ จุดขาด



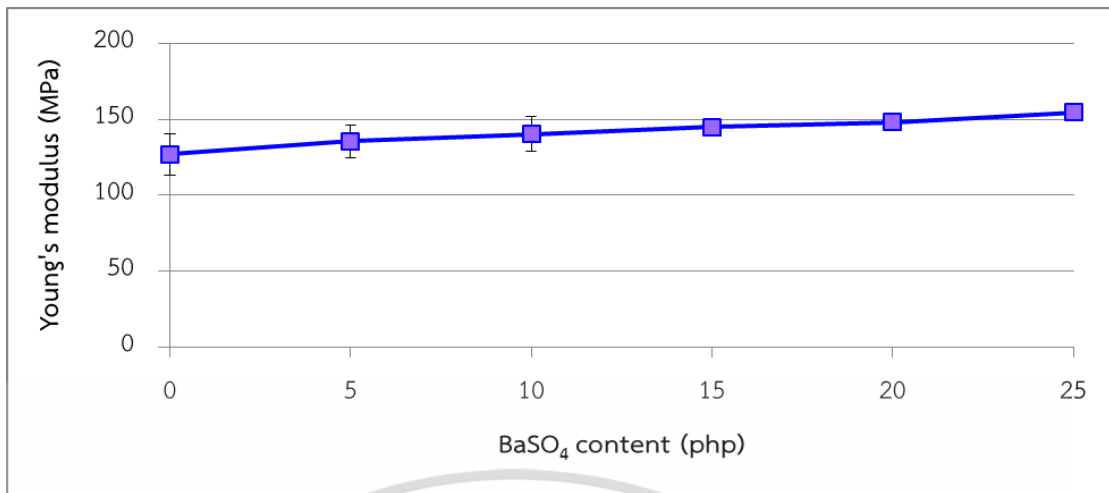
(c) การดัดยัด ณ จุดคราก



(d) การดัดยัด ณ จุดขาด

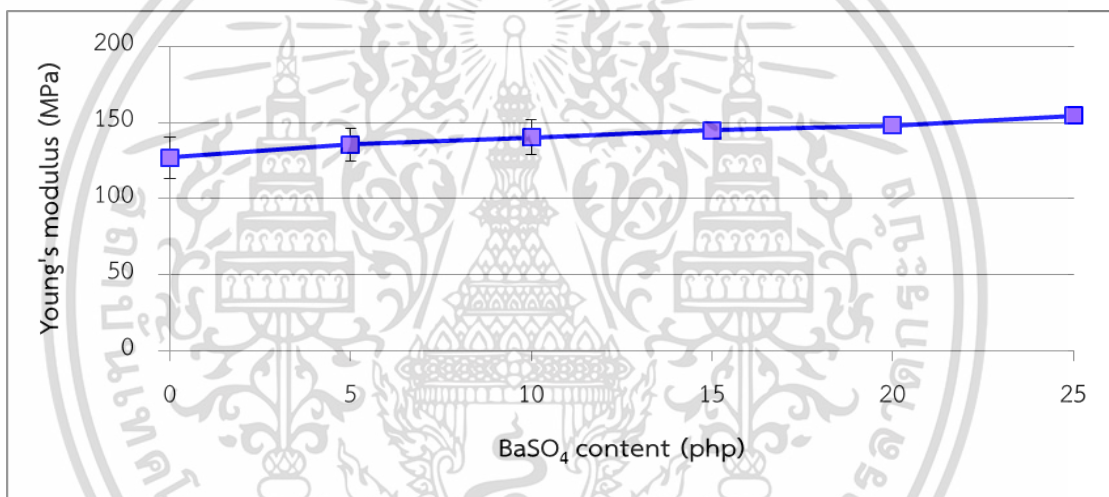
รูปที่ 4.5 (ต่อ) สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

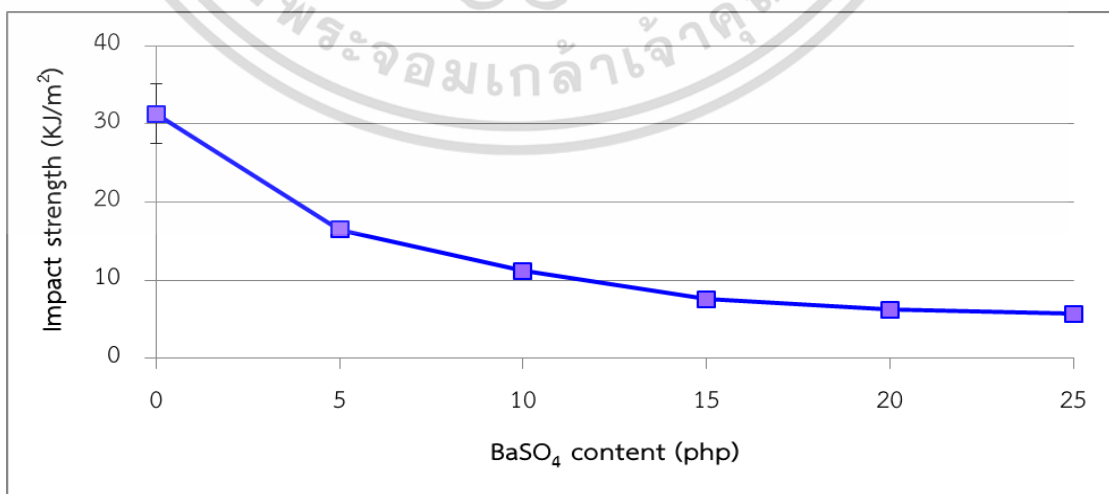


(e) ย้งมอดุลัส

รูปที่ 4.5 (ต่อ) สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน



รูปที่ 4.7 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

การเสียดสภาพเนื่องจากความเค้นทางสภาพแวดล้อม (Environmental stress cracking, ESC) เกิดขึ้นเมื่อมีความเค้นภายนอก (External stress) กระทำกับวัสดุ ในขณะที่วัสดุสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ได้แก่ ของเหลวหรือไอทำให้วัสดุเสียดสภาพก่อนเวลาอันควร (Premature failure) แต่การทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ตามมาตรฐาน ASTM D1693 [57] ออกแบบมาเพื่อใช้ทดสอบกับ PE เป็นหลัก เนื่องจาก PE เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้บรรจุสารชำระล้าง (Surfactant) เช่น สบู่ แชมพูสระผม และน้ำยาทำความสะอาดพื้น เป็นต้น ทำให้บรรจุภัณฑ์ PE พบปัญหาการเกิดรอยแตกในระหว่างการใช้งานมากที่สุด ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติ ESCR ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ เพื่อที่จะได้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อ ESCR และทราบถึงลักษณะการเสียดสภาพของวัสดุที่เกิดขึ้น

การทดสอบทำได้โดยเตรียมตัวอย่างดังรูปที่ 3.2 จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ผลที่ได้จากการทดลองแสดงในภาคผนวก จ นำผลที่ได้มารายงานค่าความต้านทานแรงเค้นต่อสภาพแวดล้อม (ESCR, F₅₀) คือ เวลาที่มีตัวอย่าง 50% มีรอยแตกเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

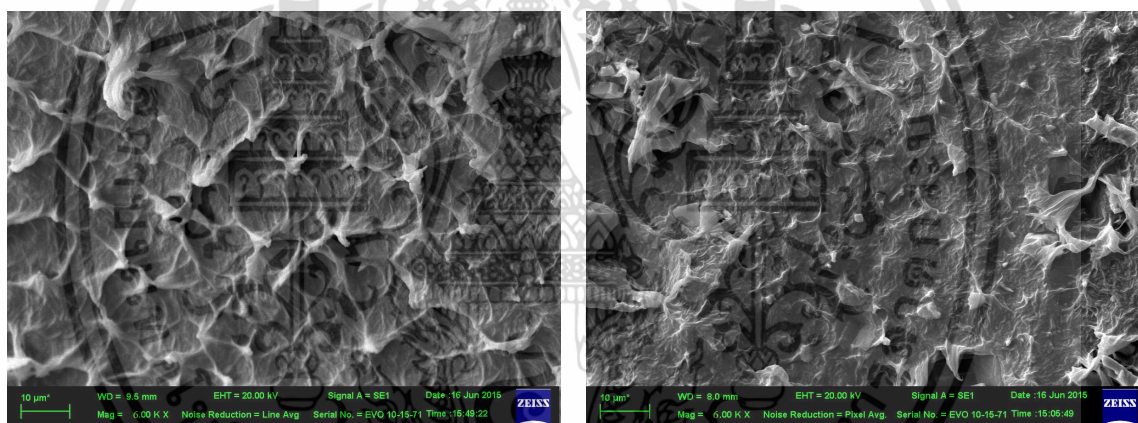
ในทางทฤษฎีการเสียดสภาพจากแรงเค้นจากสิ่งแวดล้อม เกิดเนื่องจากการดูดซับ (Absorption) Stress cracking agent เข้าไปในบริเวณที่เป็นจุดบกพร่องหรือบริเวณที่มีความเค้นสะสมในชิ้นงาน เช่น Micro-yield, Micro-void, Stress-dilated zone หรือ เครซ จากนั้นโมเลกุลของ Stress cracking agent จะแพร่ไปยังสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ และทำหน้าที่คล้ายกับพลาสติกไซเซออร์ โดยเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์คลายสายโซ่โมเลกุลที่เกี่ยวข้องกัน (Chain disentanglement) ได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณ Tie molecule การหลุดออกของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการขยายรอยแตก และเกิดการเสียดสภาพของวัสดุในเวลาต่อมา [57]

จากการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมพบว่าการเติมอนุภาค BaSO₄ ลงไปทำให้ค่า ESCR ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ในรูปที่ 4.8 พบว่าสูตร LLDPE มีช่องว่างหรือรอยแตกเกิดขึ้นจำนวนมาก และรอยแตกมีการกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ในขณะที่ LLB25 พบว่ามีรอยแตกเกิดขึ้นน้อยกว่า อาจจะมีสาเหตุมาจากการมีอยู่ของ BaSO₄ ทำให้รอยแตกต้องเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ทำให้มีพื้นที่หรือระยะทางในการขยายรอยแตกเพิ่มขึ้น และการเติม BaSO₄ เป็นการลดวัฏภาคในส่วน of LLDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการเสียดสภาพ ทำให้การเสียดสภาพของวัสดุเกิดขึ้นได้ช้าลง หรืออาจจะมีสาเหตุมาจาก BaSO₄ ไปเปลี่ยนพฤติกรรมของการเสียดสภาพของวัสดุ โดย BaSO₄ ทำให้โอกาสในการเกิดการเสียดสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation) ในวัสดุเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมักจะเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ดังนั้นยังมีปริมาณ BaSO₄ เพิ่มขึ้น ค่า ESCR ของวัสดุจะดีขึ้น

นอกจากนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเติม BaSO_4 ที่มีขั้วสูงลงไปทำให้สภาพขั้วของวัสดุเพิ่มขึ้น ทำให้การแทรกของ Stress cracking agent เข้าไปในวัสดุเกิดได้ยาก

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีปริมาณ BaSO_4 แตกต่างกันใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C

สูตร	ESCR, F_{50} (h)
LL	2
LLB5	3
LLB10	6
LLB15	68
LLB20	213
LLB25	244



(a) LL

(b) LLB25

รูปที่ 4.8 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า)

4.2 การศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัว SA และการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าการเติมสารตัวเติม BaSO_4 ลงใน LLDPE ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น และยัง能够帮助ปรับปรุงสมบัติ ESCR ของวัสดุให้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ต้องการวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง จึงต้องเลือกสูตรคอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามการใช้สารตัวเติมในปริมาณสูงทำให้เกิดปัญหาเรื่อง

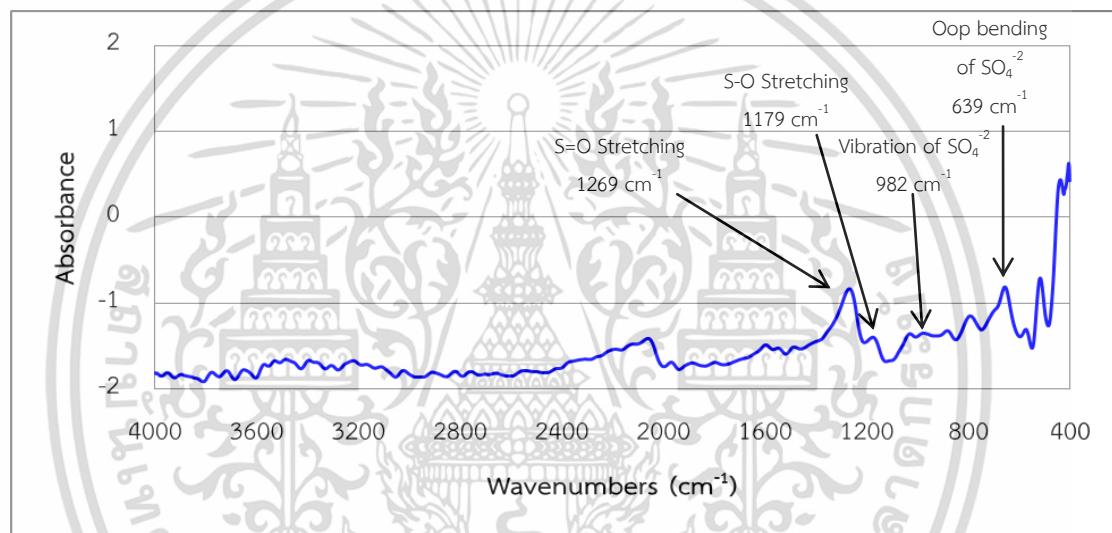
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวที่ไม่ดีของ BaSO₄ ใน LLDPE เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันของทั้ง 2 วัสดุ และ ยังส่งผลให้มีการยึดติดระหว่างวัสดุที่ไม่ดี

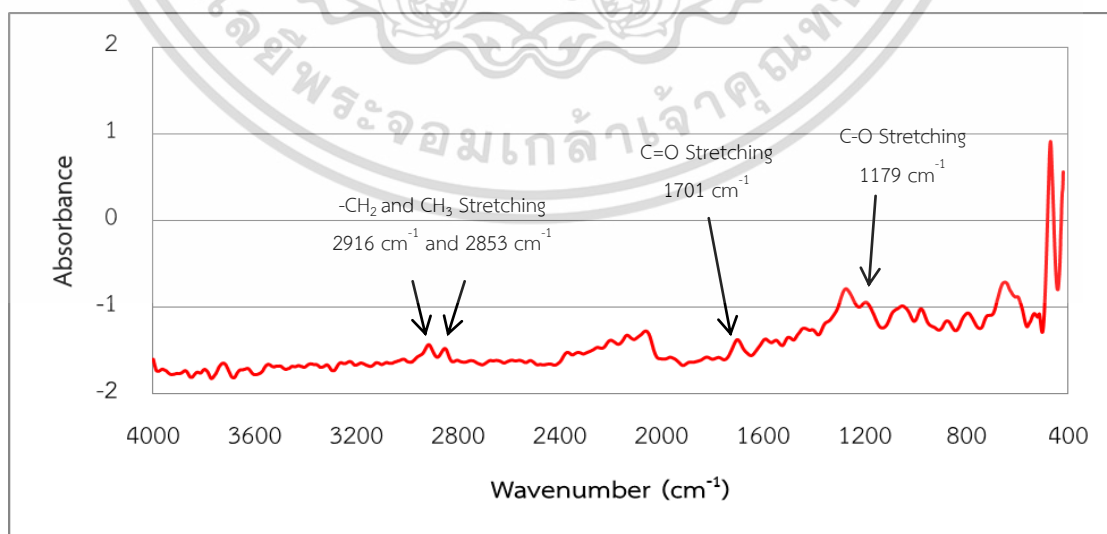
ในงานวิจัยนี้จึงเลือกสูตร LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 25 ph (LLB25) มาแก้ไข ปัญหาดังกล่าวโดยใช้สารช่วยกระจายตัว SA ในปริมาณ 1 %wt ของสารตัวเติมมาเคลือบผิว BaSO₄ เพื่อให้ BaSO₄ สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น และเลือกใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในปริมาณ 1, 2 และ 3 %wt ของสารตัวเติม เพื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัสดุ

4.2.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ BaSO₄ ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก

4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริก



(a) BaSO₄



(b) BaSO₄ ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก

รูปที่ 4.9 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค DRIFTS-FTIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 (a) เป็นสเปกตรัมของ BaSO₄ ซึ่งพบพีคการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น 639, 982, 1179 และ 1269 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคการสั่นของ Out-of-plane bending ของหมู่ซัลเฟต (Sulfate, -SO₄²⁻), พีคการสั่นแบบสมมาตรของ SO₄²⁻, พีคการสั่นของ S-O Stretching และพีคการสั่นของ S=O Stretching [58] ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเคลือบผิว BaSO₄ ด้วยกรดสเตียริกจากรูปที่ 4.8 (b) สังเกตพบการมีหมู่ฟังก์ชันของ C=O Stretching ที่ 1701 cm⁻¹, C-O Stretching ที่ 1179 cm⁻¹, -CH₂- และ CH₃- Stretching ที่ 2916 และ 2853 cm⁻¹ ตามลำดับ [59] ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้ยืนยันการมีกรดสเตียริกเคลือบอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค BaSO₄ จริง

4.2.1.2 ผลการตรวจสอบปริมาณกรดสเตียริก

ในการทดลองได้ใช้สารช่วยกระจายตัว SA มาเคลือบผิวอนุภาค BaSO₄ โดยใช้ปริมาณกรดสเตียริก 1 %wt ของสารตัวเติม ผ่านกระบวนการโซนิเคชัน เมื่อนำ BaSO₄ ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดสเตียริก โดยนำไปเผาด้วยครุชีเบิล และคำนวณตามสมการที่ 3.3 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO₄ มีค่าเท่ากับ 1.2 %wt ของสารตัวเติม

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ และความหนาแน่นของคอมโพลีต

จากตารางที่ 4.4 การหาปริมาณ BaSO₄ ด้วยเทคนิค TGA พบว่าปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพลีตทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ (25 phr) เมื่อนำตัวอย่างไปหาค่าความหนาแน่นโดยใช้ Density kit จากผลการทดลองพบว่าสูตรที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว SA (LLB25S1) มีค่าความหนาแน่นมากกว่า LLB25 เล็กน้อย เนื่องจาก LLB25S1 มีปริมาณ BaSO₄ ที่แท้จริงมากกว่าสูตร LLB25 เล็กน้อย ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วความหนาแน่นของคอมโพลีตทั้งสองน่าจะมีความใกล้เคียงกัน แม้ว่า SA มีความหนาแน่น (0.847 g/cm³) น้อยกว่าความหนาแน่นของ LLDPE (0.924 g/cm³) แต่ในการทดลองใส่ SA ไปในปริมาณน้อย (1 %wt)

สำหรับสูตรที่มีการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA (LLB25G1, LLB25G2 และ LLB25G3) มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับ LLB25 เนื่องจาก LLDPE-g-MA มีค่าความหนาแน่น (0.975 g/cm³) ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของ LLDPE

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของ BaSO₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

สูตรผสม	ปริมาณ BaSO ₄ ที่ต้องการ		ปริมาณ BaSO ₄ ที่พบ		ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	php	%wt	php	%wt	ค่าจากการทดลอง	ค่าทางทฤษฎี
LLB25	25	20.00	23.53	18.82	1.090±0.002	1.086
LLB25S1	25	19.84	16.09	20.15	1.096±0.001	1.100
LLB25G1	25	19.84	17.24	21.59	1.089±0.003	1.208
LLB25G2	25	19.69	15.67	19.67	1.088±0.001	1.179
LLB25G3	25	19.53	16.14	20.29	1.091±0.001	1.254

4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.5 พบว่าสูตรที่มีการใช้ BaSO₄ ที่มีการเคลือบผิวด้วย SA และสูตรที่มีการเติม LLDPE-g-MA ลงไปให้ค่า T_m, T_c และความเป็นผลึกใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE แสดงว่า SA และ LLDPE-g-MA ไม่รบกวนการตกผลึกของ LLDPE จึงไม่ส่งผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นใน LLDPE

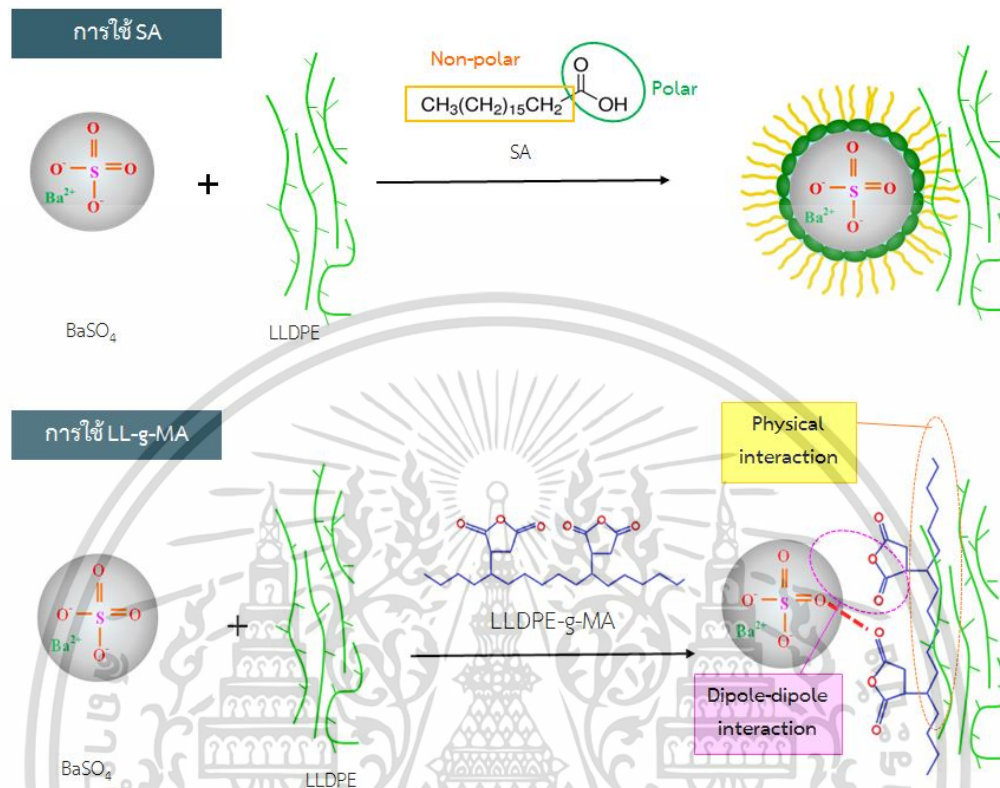
ตารางที่ 4.5 T_m, T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

สูตร	T _m (°C)	T _c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL	129.6	107.9	35
LLB25	128.4	108.9	34
LLB25S1	128.4	108.8	37
LLB25G1	129.4	108.3	39
LLB25G2	130.7	108.3	38
LLB25G3	130.3	107.9	39

4.2.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

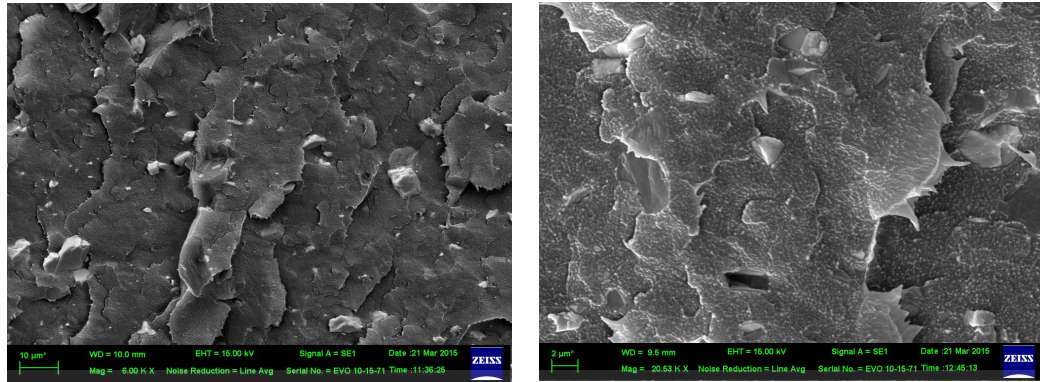
จากการศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในรูปที่ 4.11 (c), (d) และ (e) พบว่าอนุภาค BaSO₄ ส่วนใหญ่มีการฝังตัวได้ดีใน LLDPE และมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของ BaSO₄ น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร LLB25 และ LLB25S1 ในรูปที่ 4.11 (a) และ (b) ตามลำดับ เนื่องจาก LLDPE-g-MA ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาค LLDPE และ BaSO₄ ดีขึ้น โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MA เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole force) กับ BaSO_4 และ LLDPE เกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

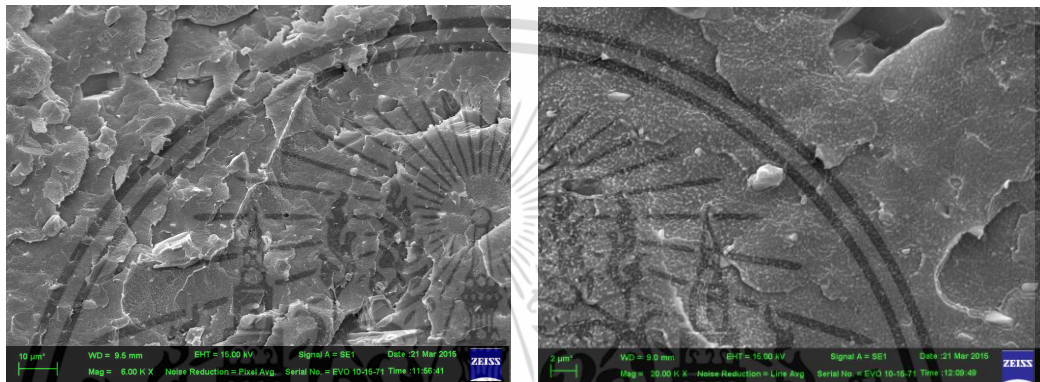


รูปที่ 4.10 การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง LLDPE และ BaSO_4 เมื่อมีการใช้ SA หรือ LL-g-MA

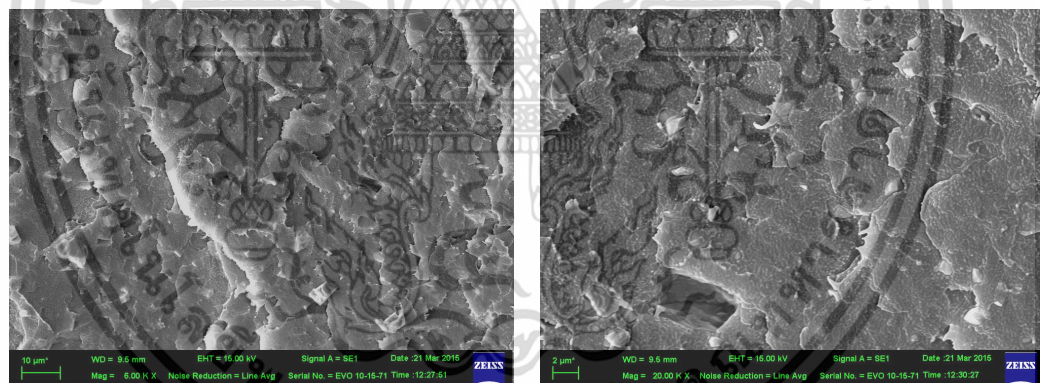
เมื่อพิจารณาสูตรที่ใช้ BaSO_4 ที่มีการเคลือบผิวของ SA (LLB25S1) กับ LLB25 พบว่ามีอนุภาค BaSO_4 ที่เกิดการกระจุกตัวน้อยลง อนุภาค BaSO_4 ส่วนใหญ่อยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ แสดงว่าการกระจายตัวของอนุภาค BaSO_4 ดีขึ้น เนื่องจาก SA จะช่วยลดความมีขั้วของ BaSO_4 ลง โดยจะหันส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกที่มีขั้วเข้าหา BaSO_4 และหันส่วนปลายของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วเข้าหาพอลิเมอร์เมตริกซ์ [1] ทำให้อนุภาค BaSO_4 มีโอกาสรวมตัวกันเองน้อยลง อย่างไรก็ตามการใช้ SA ไม่ได้ช่วยให้การยึดติดระหว่างภูมิภาคของ LLDPE และ BaSO_4 ดีขึ้น โดยสังเกตได้จาก SEM ในรูปที่ 4.11 (b) พบว่ามีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของอนุภาค BaSO_4 มากกว่าในสูตรที่มีการใช้ LLDPE-g-MA



(a) LLB25



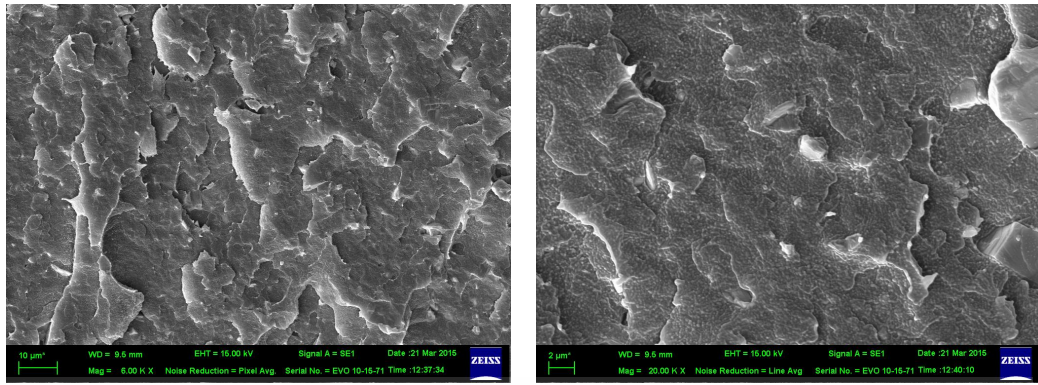
(b) LLB25S1



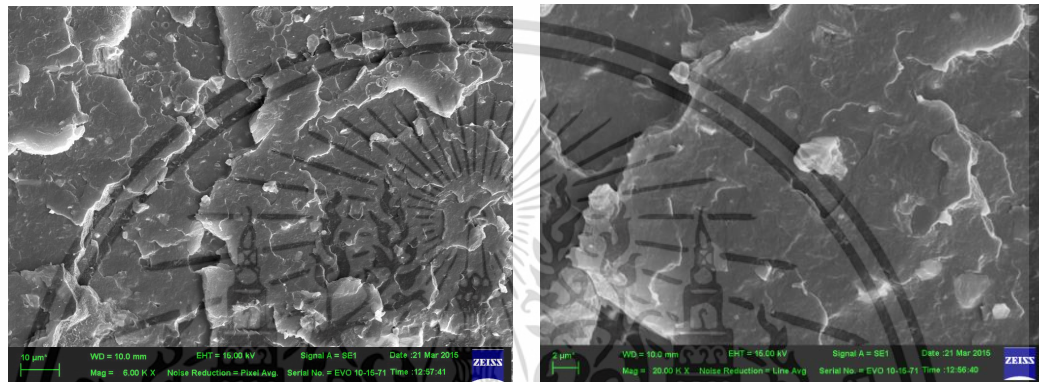
(c) LLB25G1

รูปที่ 4.11 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (ภาพถ่าย : กำลังขยาย 6000 เท่า และภาพขวา : กำลังขยาย 20000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) LLB25G2



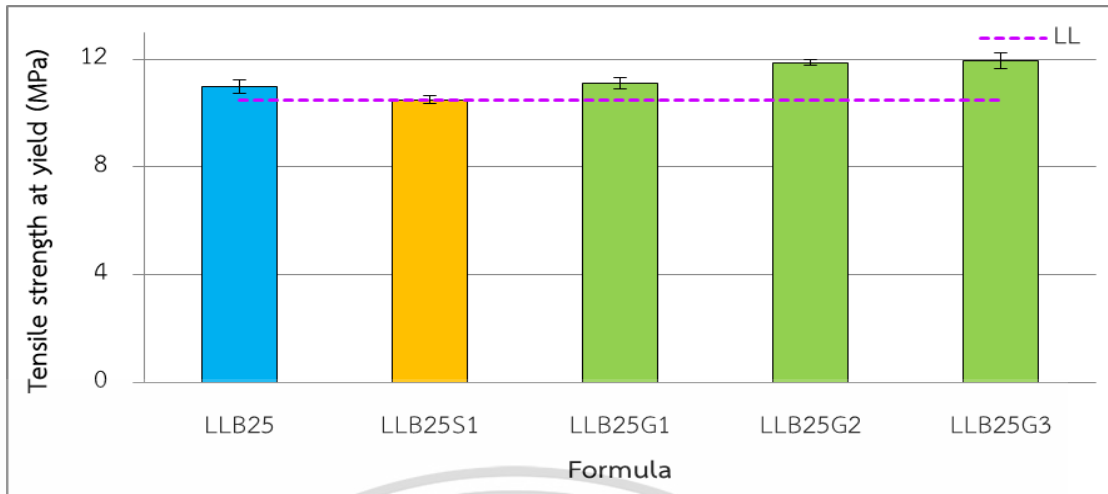
(e) LLB25G3

รูปที่ 4.11 (ต่อ) SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว และสารช่วยผสมใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (ภาพซ้าย : กำลังขยาย 6000 เท่า และ ภาพขวา : กำลังขยาย 20000 เท่า)

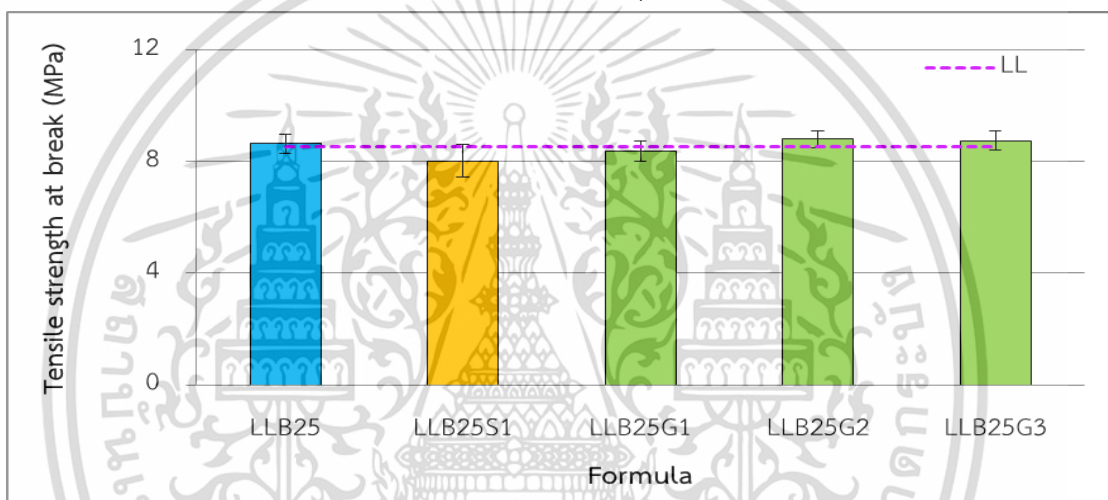
4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพลีต

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง LLB25S1 ซึ่งใช้ BaSO_4 ที่มีการเคลือบผิวด้วย SA กับสูตร LLB25 ที่ไม่มีเคลือบผิวด้วย SA พบว่าให้ค่าสมบัติการรับแรงดึงใกล้เคียงกัน เนื่องจาก SA ทำหน้าที่เป็นเพียงสารช่วยกระจายตัว ไม่ได้ช่วยปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาค ส่วนการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ทำให้มีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค LLDPE และ BaSO_4 ที่แข็งแรงขึ้น ทำให้วัสดุเสียรูปได้ยากขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่งผลให้ค่าการดึงยืด ณ จุดคราก และการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่า Young's Modulus และความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ LLDPE-g-MA เพิ่มขึ้น แต่พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (รูปที่ 4.12 (b)) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเมื่อวัสดุถูกดึงยืดจนกระทั่งเลยจุดคราก การเกี่ยวพันของสายโซ่โพลีเมอร์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคเกิดการหลุดออกไปแล้ว ดังนั้นความแข็งแรงของวัสดุมาจาก LLDPE ที่เป็นโพลีเมอร์เมทริกซ์

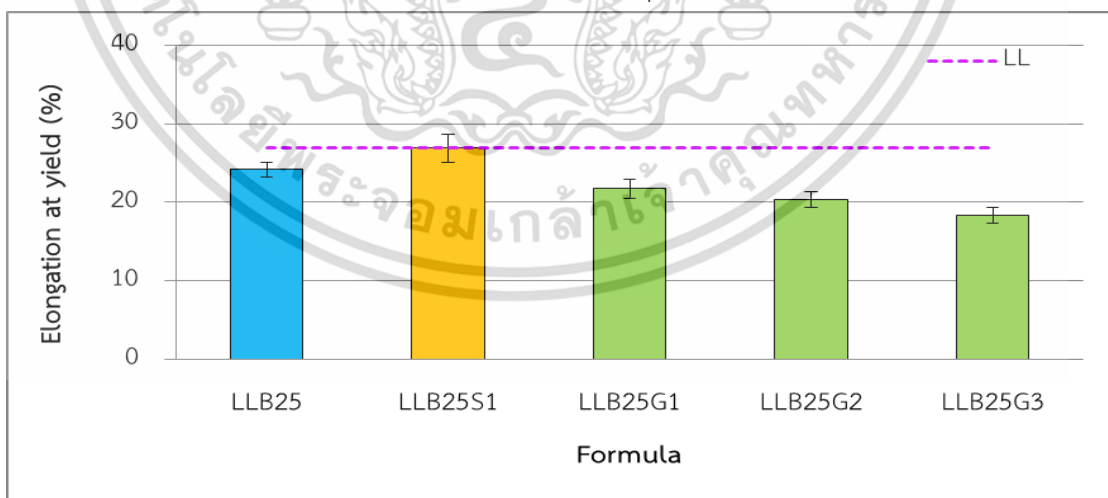
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ความแข็งแรง ณ จุดคราก



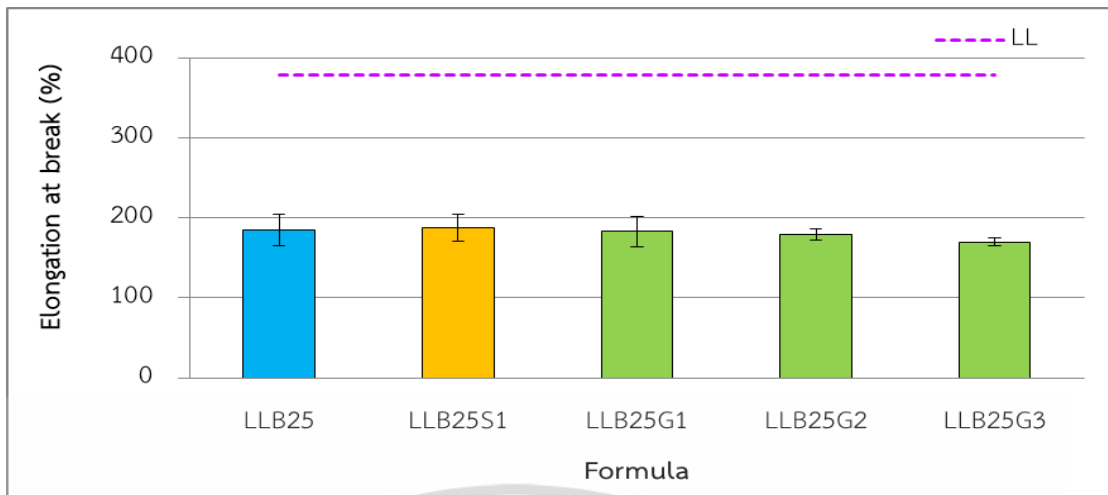
(b) ความแข็งแรง ณ จุดขาด



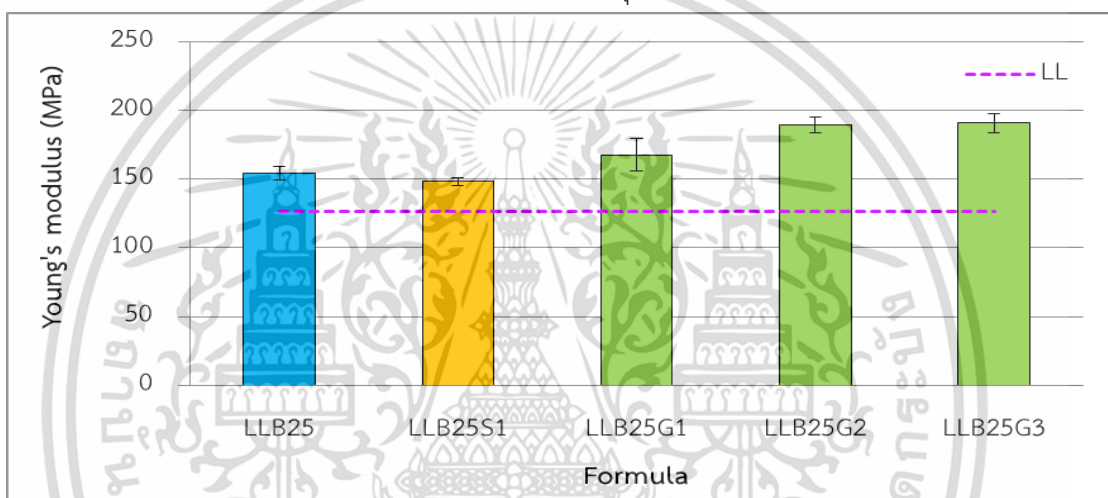
(c) การดัดยัด ณ จุดคราก

รูปที่ 4.12 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

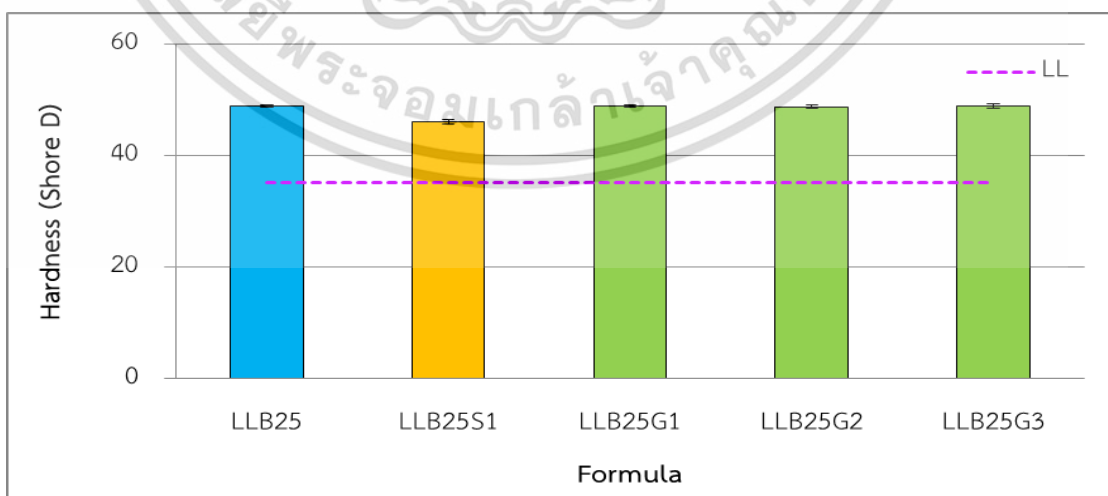


(d) การดึงยืด ณ จุดขาด



(e) ยืดมอดุลัส

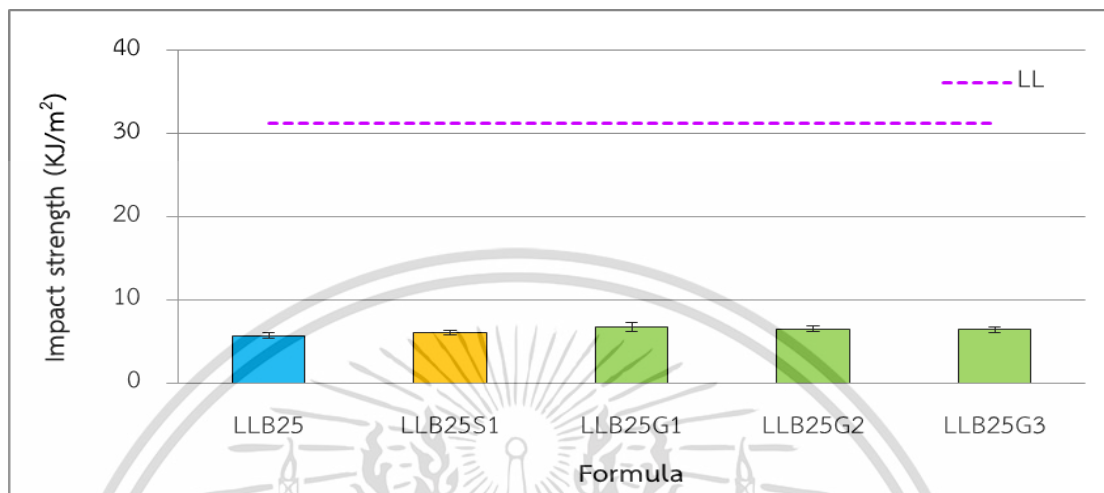
รูปที่ 4.12 (ต่อ) สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม



รูปที่ 4.13 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการเคลือบผิว BaSO₄ ด้วย SA และการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง เนื่องจากผสมเข้าไปในปริมาณน้อยมาก และ LLDPE-g-MA มีวิธภาคหลักเป็น LLDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันกับเมทริกซ์ทำให้มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.14 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

การศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าการเคลือบผิว BaSO₄ ด้วย SA ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุ อาจมีสาเหตุมาจากการทดลองมีการใช้ SA ในปริมาณน้อยเพียง 1 %wt ในการเคลือบผิว BaSO₄ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Bianchi, F. [6] ซึ่งพบว่าการใช้ Fatty acid 25 %wt ของสารตัวเติม เคลือบผิว BaSO₄ สามารถช่วยเพิ่มสมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต HDPE/BaSO₄ ได้ โดย SA จะทำหน้าที่คล้ายสารหล่อลื่นในคอมโพสิตทำให้วัสดุสามารถขยับสายโซ่ได้ง่าย และส่งผ่านแรงกระทำได้ดี

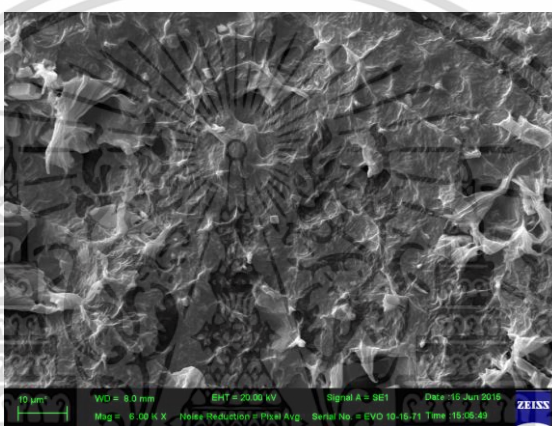
จากผลการทดลองพบว่าการเติม LLDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุ เนื่องจากปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติในการรับแรงกระแทกคือการมีอยู่ของอนุภาคของแข็งซึ่งเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหัก ซึ่งปริมาณ BaSO₄ มีค่าพอๆ กันทุกสูตร

4.2.6 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

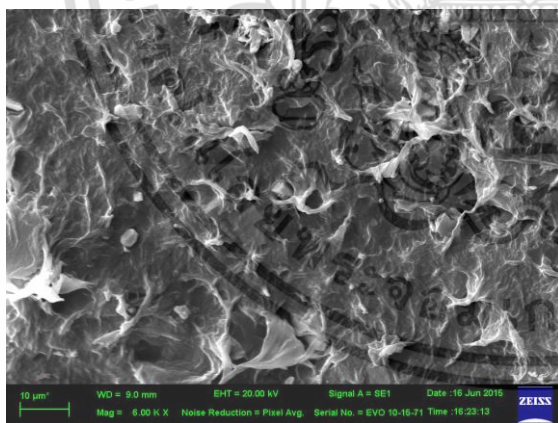
จากตารางที่ 4.6 พบว่าการใช้ BaSO₄ ที่เคลือบผิวด้วย SA มีค่า ESCR ใกล้เคียงกับ LLB25 แต่การใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ให้ค่า ESCR ของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก จากภาพพื้นผิวที่แตกหักของสูตร LLB25G3 หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ในรูปที่ 4.15 (c) พบว่ามีช่องว่างหรือรอยแตกเกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร LLB25 และ LLB25S1

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิตที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C

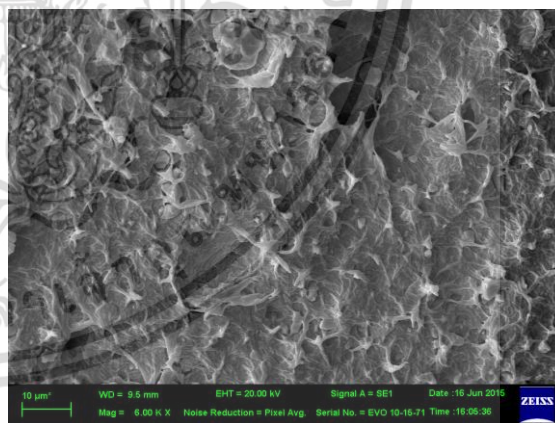
สูตร	ESCR, F ₅₀ (h)
LLB25	244
LLB25S1	250
LLB25G1	2230
LLB25G2	2254
LLB25G3	2424



(a) LLB25



(b) LLB25S1



(c) LLB25G3

รูปที่ 4.15 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของ LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ ESCR ในสูตรที่มีการใช้ LLDPE-g-MA มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก อาจมีสาเหตุเนื่องจากการเติม LLDPE-g-MA ทำให้พฤติกรรมการเสียสภาพของวัสดุเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.15 พบว่ามีบริเวณที่เกิด Yielding ขนาดเล็กจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับ LLB25 และ LLB25S1 อาจมีสาเหตุมาจากการใช้ LLDPE-g-MA ทำให้สภาพผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และทำให้วิฏภาคของ LLDPE กับ BaSO₄ มีการเข้ากันได้มากขึ้น ช่วยหน่วงการแพร่ของ Stress cracking agent เข้ามาภายในวัสดุได้

4.3 การศึกษาผลของการใช้ EVA

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าการเติม BaSO₄ ทำให้ค่าการดึงยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกของวัสดุลดลงอย่างมาก และในหัวข้อที่ 4.2 ได้มีการใช้สารช่วยกระจายตัว SA และสารช่วยผสม LLDPE-g-MA จากผลการทดลองพบว่า การใช้ SA ช่วยให้ BaSO₄ กระจายตัวได้ดีขึ้นใน LLDPE ในขณะที่การใช้ LLDPE-g-MA สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างวิฏภาคและเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุคอมโพสิตได้ แต่การใช้ SA และ LLDPE-g-MA ไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุให้ดีขึ้นได้ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ EVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ความยืดหยุ่นสูง ซึ่งน่าจะช่วยให้วัสดุคอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงกระแทกที่สูงขึ้นได้ โดยนำ LLDPE มาผสมกับ EVA ในอัตราส่วน 95/15, 90/10 และ 85/15 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และมีปริมาณ BaSO₄ 25 php และทำการศึกษสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ และความหนาแน่นของคอมโพสิต

จากตารางที่ 4.7 การหาปริมาณ BaSO₄ ด้วยเทคนิค TGA พบว่าปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ (25 php) เมื่อนำตัวอย่างไปหาค่าความหนาแน่น พบว่าสูตร LL กับ LL90EA10 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เนื่องจาก EVA มีความหนาแน่น (0.952 g/cm³) ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของ LLDPE (0.924 g/cm³)

เมื่อพิจารณาสูตรคอมโพสิตที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากันคือ 25 php แต่มีปริมาณ EVA แตกต่างกัน (LL95EA5B25, LL90EA10B25 และ LL85EA15B25) พบว่ามีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับ LLB25 เนื่องจากความหนาแน่นของ LLDPE และ EVA มีค่าใกล้เคียงกันดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.7 ปริมาณของ BaSO₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ และ LLDPE/EVA/BaSO₄

สูตรผสม	ปริมาณ BaSO ₄ ที่ต้องการ		ปริมาณ BaSO ₄ ที่พบ		ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	php	%wt	php	%wt	ค่าจากการทดลอง	ค่าตามทฤษฎี
LL	-	-	-	-	0.926±0.001	0.924
LL90EA10	-	-	-	-	0.932±0.002	0.929
LLB25	25	20.00	23.53	18.82	1.090±0.002	1.086
LL95EA5B25	25	20.00	23.93	19.14	1.090±0.001	1.092
LL90EA10B25	25	20.00	25	24.61	1.091±0.002	1.101
LL85EA15B25	25	20.00	24	24.13	1.091±0.002	1.100

4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.8 พบว่าสูตรคอมโพสิตที่มีการเติม EVA ทุกสูตร มี T_m ของ LLDPE แต่ไม่พบ T_m ของ EVA (T_m = 76.8°C) (ดูได้จากภาคผนวก ค) แสดงว่า EVA ไม่สามารถเกิดผลึกเมื่ออยู่ในระบบของคอมโพสิตนี้ นั่นคือ EVA แสดงความเป็นอสัณฐานในระบบ LLDPE/EVA และเนื่องจาก LLDPE และ EVA เป็น Immiscible blend ซึ่ง EVA ไม่เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ LLDPE ซึ่งยืนยันได้จากค่า T_m และความเป็นผลึกของคอมโพสิตที่มีการเติม EVA ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันกับ LLDPE แม้ว่ามีการวิจัย [60] ที่มีการระบุการเกิดผลึกร่วม (Co-crystallization) ของ PE กับ EVA (ที่มีปริมาณหมู่ไวนิลอะซิเตต (VA) เท่ากับ 9 %wt) ในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน PE/EVA เท่ากับ 90/10 แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ EVA ที่มีปริมาณ VA เท่ากับ 27.5 %wt ความเข้ากันได้ของ EVA กับ LLDPE จึงน้อย ทำให้ไม่เกิดผลึกร่วมขึ้นในระบบที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 4.8 T_m, T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ และ LLDPE/EVA/BaSO₄

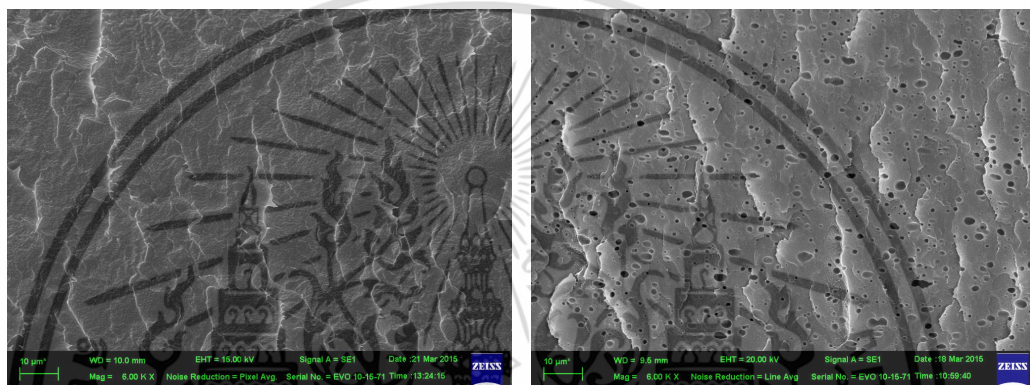
สูตร	T _m (°C)	T _c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL	129.6	107.9	35
LL90EA10	128.1	108.2	39
LLB25	128.4	108.9	34
LL95EA5B25	131.2	107.3	33
LL90EA10B25	127.9	108.1	37
LL85EA15B25	128.6	107.9	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพลิต

4.3.3.1 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE

จากการศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE จากรูปที่ 4.16 (a) แสดงพื้นที่ตัดขวางของ LLDPE/EVA ก่อนสกัด จะเห็นว่าไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น ไม่เห็นการแยกวัฏภาค การสกัดเพื่อดูการกระจายตัวของ EVA ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจาย ทำให้เกิดช่องว่างที่แสดงในรูป 4.16 (b) ซึ่งเป็นบริเวณที่เคยมีวัฏภาคของ EVA อยู่ พบว่า EVA มีรูปร่างส่วนใหญ่เป็นทรงกลม และมีการกระจายตัวที่ดีใน LLDPE จากการที่เห็นเป็น 2 วัฏภาคเป็นการยืนยันว่าระบบพอลิเมอร์ผสมของ LLDPE/EVA เป็นแบบ Immiscible blend



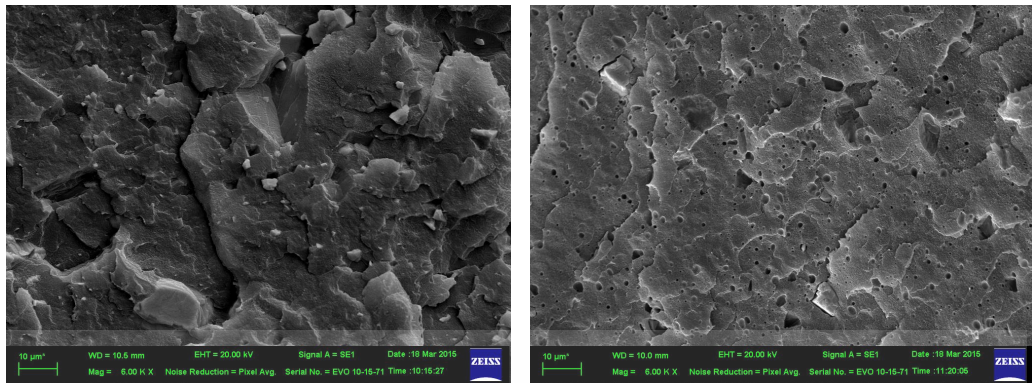
(a) LL90EA10 ก่อนสกัด

(b) LL90EA10 หลังสกัด

รูปที่ 4.16 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า)

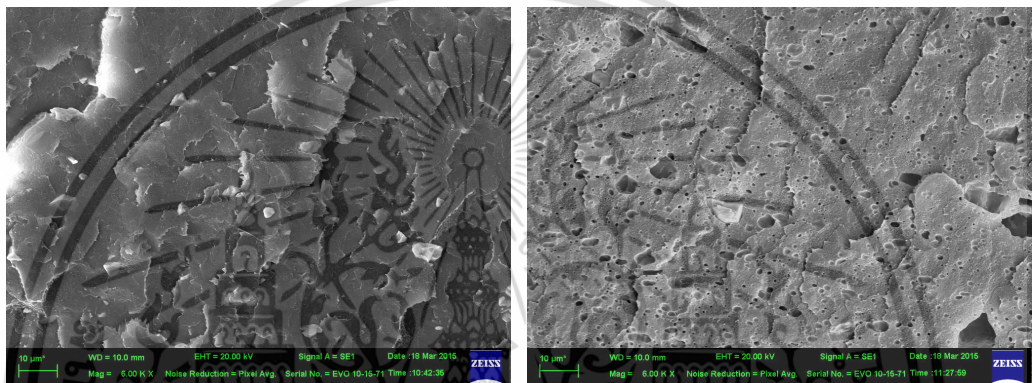
4.3.3.2 การศึกษาการกระจายตัวของ BaSO₄ ในคอมโพลิต LLDPE/EVA/BaSO₄

จากรูปที่ 4.17 (a), (c) และ (e) แสดงรูปก่อนสกัด EVA พบว่าอนุภาค BaSO₄ มีการกระจายตัวดี เนื่องจากการเพิ่ม EVA ซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีขั้วเข้าไปใน LLDPE ทำให้เกิดการผสมเข้ากันที่ดีขึ้น โดย EVA มี VA ซึ่งมีขั้วสูงสามารถเข้ากันได้ดีกับ BaSO₄ และมี PE ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ไม่มีขั้ว ซึ่งสามารถเข้ากันได้ดีกับ LLDPE หลังจากทำการสกัดวัฏภาคของ EVA ออก (รูปที่ 4.17 (b), (d) และ (f)) พบว่าไม่เห็นอนุภาค BaSO₄ เหลืออยู่ แสดงว่าอนุภาค BaSO₄ เกิดการหลุดออกไปในระหว่างการสกัดพร้อมกับ EVA



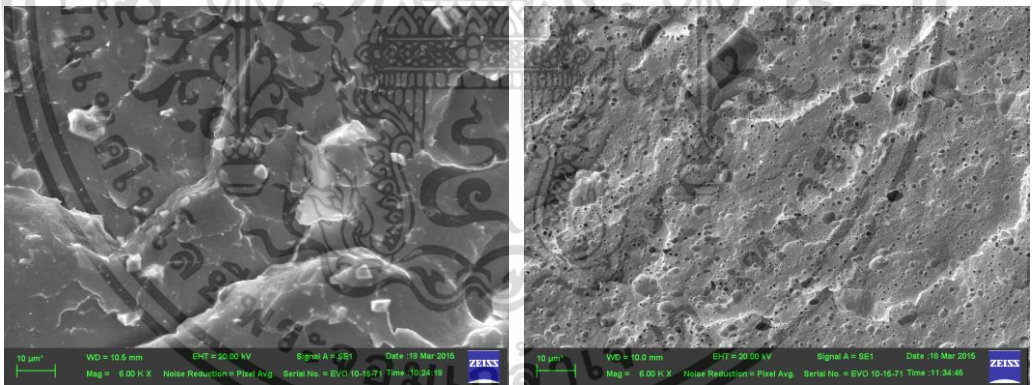
(a) LL95EA5B25 ก่อนสกัด

(b) LL95EA5B25 หลังสกัด



(c) LL90EA10B25 ก่อนสกัด

(d) LL90EA10B25 หลังสกัด



(e) LL85EA15B25 ก่อนสกัด

(f) LL85EA15B25 หลังสกัด

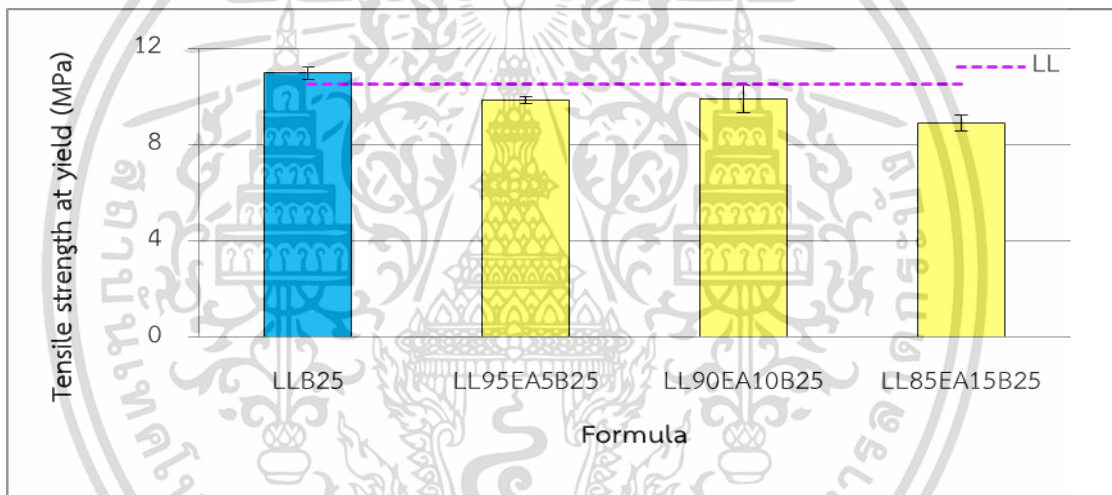
รูปที่ 4.17 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 และ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

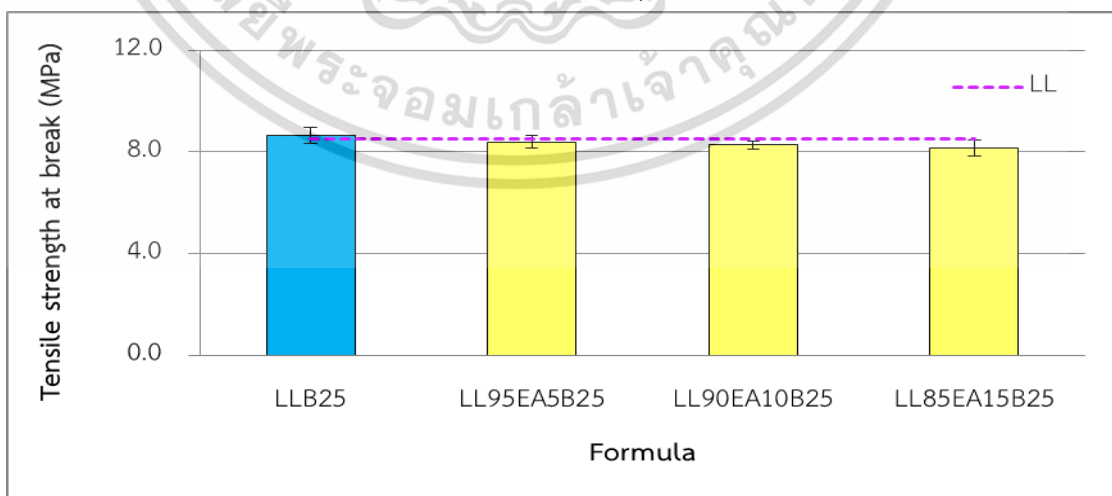
4.3.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.20 พบว่าการเติม EVA ลงไปใน LLDPE/BaSO₄ ทำให้ความเข้ากันได้ของ LLDPE กับ BaSO₄ ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการที่ EVA แสดงความเป็นอสัณฐานที่มีความยืดหยุ่นในระบบพอลิเมอร์ผสม ทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปได้ง่ายทำให้มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และยังมีมอดูลัสมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความสามารถในการดึงยืมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกในรูปที่ 4.20 พบว่าการเติม EVA ลงไป ทำให้ความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางที่มีความยืดหยุ่น มีความแข็งน้อยกว่า LLDPE และ BaSO₄ เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็ว EVA สามารถรับแรงกระทำและใช้แรงกระทำที่ได้รับไปใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง นอกจากนี้การใช้ EVA ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของ LLDPE กับ BaSO₄ ส่งผลให้มีจุดบกพร่อง (Defects) ของคอมโพสิตลดลง ทำให้มีความต่อเนื่องในการรับส่งแรงกระทำได้ดีขึ้น



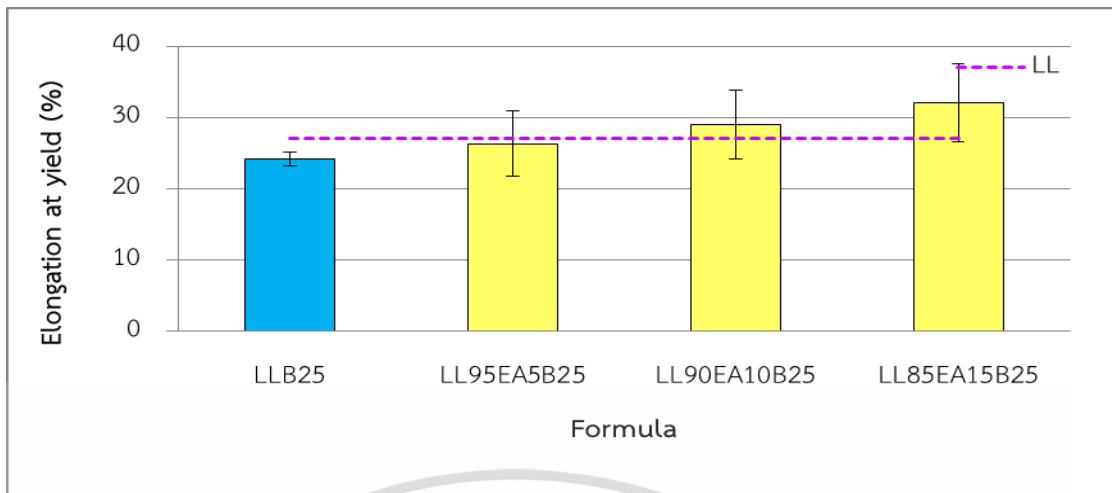
(a) ความแข็งแรง ณ จุดคราก



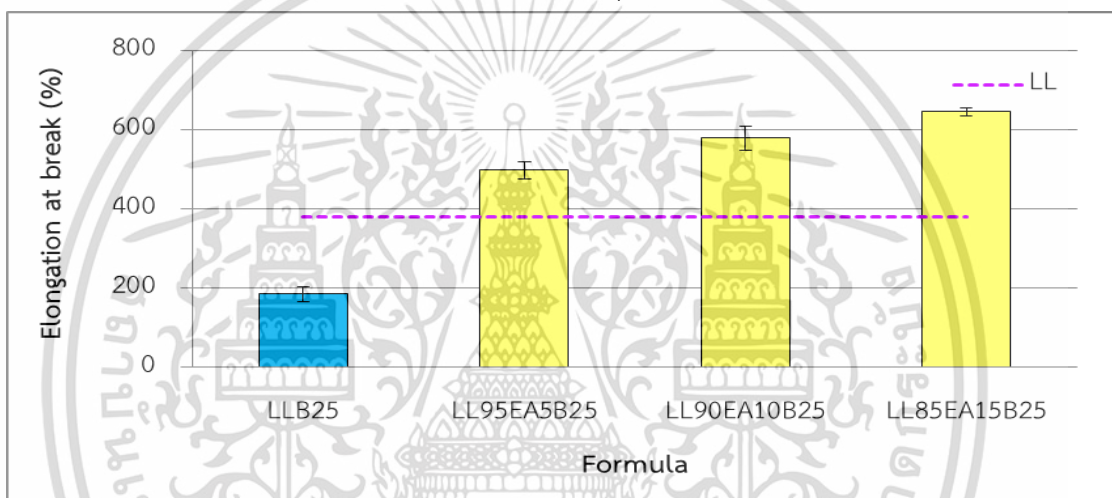
(b) ความแข็งแรง ณ จุดขาด

รูปที่ 4.18 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄

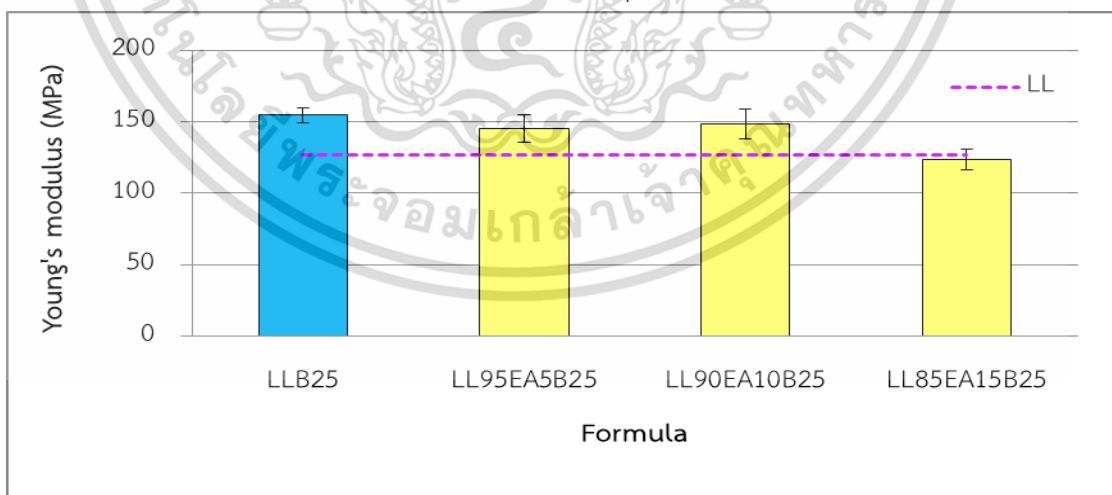
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) การดึงยืด ณ จุดคราก



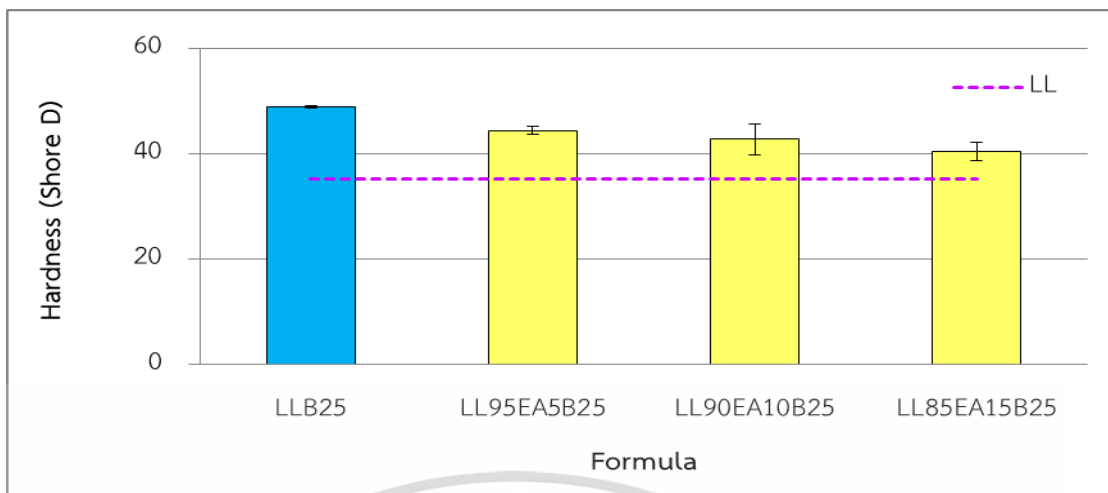
(d) การดึงยืด ณ จุดขาด



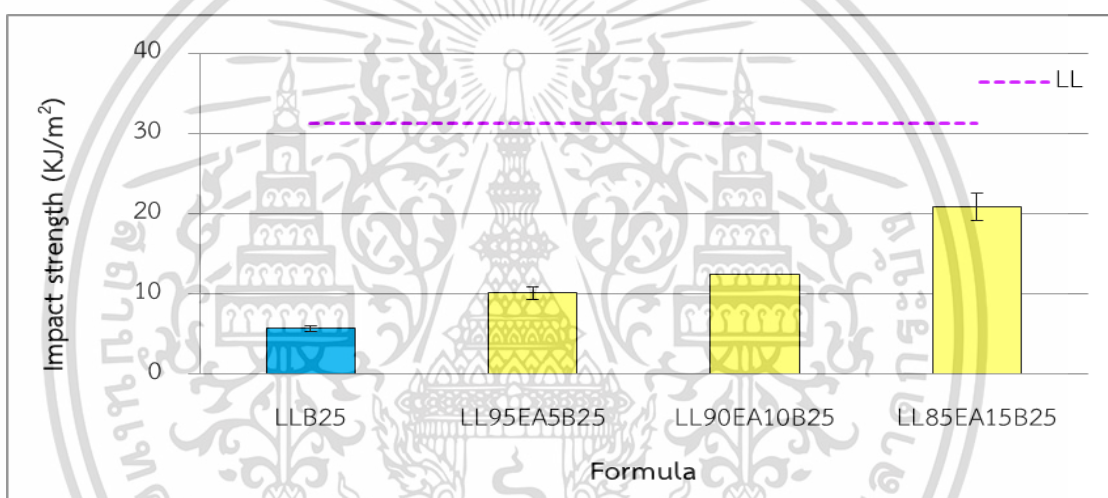
(e) ย้่งมอดุลัส

รูปที่ 4.18 (ต่อ) สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄



รูปที่ 4.20 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄

4.3.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตที่ผสม EVA ลงไป ไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (ESCR, $F_{50} > 3,200$ ชั่วโมง) เป็นผลมาจากการมีอยู่ของวัฏภาค EVA ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงสามารถทนต่อแรงเค้นจากการดัดงอได้ดี ทำให้จุดศูนย์รวมแรงเค้นของวัสดุมีน้อยลง ทำให้เกิดรอยแตกได้ยากขึ้น และนอกจากนี้สาเหตุมาจาก EVA ทำให้สภาพผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ Stress cracking agent ต้องใช้เวลานานในการแพร่เข้ามาในวัสดุส่งผลให้ ESCR ของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ตารางที่ 4.9 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/EVA/BaSO₄ ใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C

สูตร	ESCR, F ₅₀ (h)
LL	2
LL90EA10	>3200
LLB25	244
LL95EA5B25	>3200
LL90EA10B25	>3200
LL85EA15B25	>3200



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมคอมโพสิตจาก LLDPE ที่มีการใช้ BaSO₄ เป็นสารตัวเติม โดยศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ และมีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยกระจายตัว SA สารช่วยผสม LLDPE-g-MA และใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ให้ดีขึ้น จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ พบว่าค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO₄ เพิ่มขึ้นตามกฎของของผสม และพบว่าคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกเคียงใกล้กัน เมื่อปริมาณ BaSO₄ เพิ่มขึ้นอนุภาค BaSO₄ มีการกระจายตัวไม่ดีใน LLDPE โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตรที่มีปริมาณ BaSO₄ สูงๆ และมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคไม่ดี เนื่องจากความแตกต่างของความมีขั้วระหว่าง 2 วัฏภาค และพบว่าเมื่อปริมาณ BaSO₄ เพิ่มขึ้น ยังมอดูลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ผลจากการศึกษา ESCR พบว่าค่า ESCR เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO₄ เพิ่มขึ้น

2. การศึกษาผลของสารช่วยกระจายตัว SA และสารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 25 php พบว่าการใช้ SA (1 %wt) และ LLDPE-g-MA (1, 2 และ 3 %wt) ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของคอมโพสิต และพบว่าคอมโพสิตทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกเคียงใกล้กัน การใช้ SA ช่วยให้ BaSO₄ มีการแตกกระจายใน LLDPE ดีขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และค่า ESCR ไม่แตกต่างจากสูตร LLB25 และพบว่าสูตรที่มีการใช้ LLDPE-g-MA ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคดีขึ้น โดย MA เกิดแรงระหว่างขั้วกับ BaSO₄ และ LLDPE เกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และพบว่าเมื่อปริมาณ LLDPE-g-MA เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และยังมีมอดูลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง จากผล ESCR พบว่าค่า ESCR เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อปริมาณ LLDPE-g-MA เพิ่มขึ้น

3. การศึกษาผลของการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA ที่มีปริมาณ BaSO₄ 25 php พบว่า EVA ไม่เกิดผลึกในคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄ คอมโพสิตทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน และพบว่า EVA กระจายตัวได้ดีใน LLDPE และช่วยให้ความสามารถในการผสมเข้ากันระหว่าง LLDPE และ BaSO₄ ดีขึ้น โดยหมู่ VA ใน EVA จะทำให้ความมีขั้วของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น การดึงยืด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ความแข็งแรงดึง ยังมีมอดูลัส และความแข็งแรงลดลง เนื่องจาก EVA มีสมบัติยืดหยุ่นคล้าย

ยาง ทำให้เสียรูปได้ง่ายกว่า LLDPE ผลจากการศึกษา ESCR พบว่าวัสดุไม่เกิดการเสียหายในระหว่างการทดสอบ (ESCR, $F_{50} > 3,200$ ชั่วโมง)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกใช้ $BaSO_4$ เกรดนาโน เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/ $BaSO_4$ ให้ดีขึ้น
2. ควรเพิ่มความเร็วย้อน และเวลาในการผสม เพื่อให้อนุภาค $BaSO_4$ มีการแตกตัว และมีการกระจายตัวได้ดีขึ้นใน LLDPE แต่ควรระวังเพราะอาจจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียหายได้
3. ควรปรับเปลี่ยนชนิดของ Stress cracking agent ให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบ ESCR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Paul, S. 1996. **Surface Coatings : Science & Technology**. 2nd ed. Michigan : John Wiley & Sons.
- [2] Hui, Y.H. and Sherkat, F. 2006. **Handbook of Food Science Technology, and Engineering**. 3. the United states of America : CRC Press.
- [3] Ariffin, K.S. 2001. **Mineral Perindustrian : Barite (Barium)**. [Online]. Available : <http://lidarmax.altervista.org/lidar/SCIE%20CHIMICHE/BARIO%20generici/Baryte.pdf>.
- [4] Wang, K. Jingshen, W. Ye, L. and Zeng, H. 2003. "Mechanical Properties and Toughening Mechanisms of Polypropylene/Barium Sulfate Composites." *Composites : Part A*. 34 : 1199-1205.
- [5] Wang, K. Jingshen, W. Ye, L. and Zeng, H. 2005. **Microstructure and Fracture Behavior of Polypropylene/Barium Sulfate Composites**. [Online]. Available : <http://www.interscience.wiley.com>.
- [6] Bianchi, F. Lazzeri, A. Pracella, M. D'Aquino, A. and Ligeri, G. 2004. "Physical-Mechanical and Thermal Properties of Polyethylene Toughened with Submicron BaSO₄ Particles." *Macromol. Symp.* 218 : 191-200.
- [7] Utracki, L.A. 2002. **Polymer Blends Handbook**. 1. Dordrecht : Kluwer Academic.
- [8] อธิธิพล แจ่มชัด. 2544. **เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] Sami, M.D. 2012. "Using of Fiber Composite of Polypropylene to Manufacturing Cars Bumpers." *IJANS*. 3(2) : 111-113.
- [10] ทฤทท์ กิรีเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. 2552. **ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ**. [Online]. Available : http://www.eng.ku.ac.th/e-journal_th/download.php?name=zoXKryVMon21201.pdf&file_basename=18-32%20%CB%4%B7%20%D1%A4.pdf.
- [11] Schwartz, M.M. 1996. **Composite Materials**. 1. New Jersey : Prentice Hall PTR.
- [12] Paul, D.R. and Bucknall, C.B. 2000. **Polymer Blends**. 1. New York : John Wiley & Son.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Work, W.J. 2004. "Definition of Terms Related to Polymer Blends, Composites, and Multiphase Polymeric Materials." *Pure Appl. Chem.* 76 : 1985-2007.
- [14] Jacqueline, I. and Kroschwitz, J. 1995. **High performance Polymers and Composite.** New York : Plenum press.
- [15] Billmeyer, F.W. 1984. **Textbook of Polymer Science.** New York : John Wiley & Sons.
- [16] Seymour, R.B. 1992. **Polymer Chemistry an Introduction.** 3rd ed. New York : Dekker.
- [17] วันชาติ ปรีชาติวงศ์. 2554. **พอลิเมอร์ (Polymer).** [Online]. Available : www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt.
- [18] Soares, J. Abbott, R. and Kim, J. 2000. "Environmental Stress Cracking Resistance of Polyethylene : The Use of CRYSTAF and SEC to Establish Structure–Property Relationships." *J. Polym. Sci., Polym. Phys.* 38 : 1267-1275.
- [19] Richardson, T.L. 1989. **Industrial Plastics: Theory and Application.** 2nd ed. New York : Delmar.
- [20] Lotte Chemical Titan Holding Sdn. Bhd. 2012. **Product – PE and PP.** [Online]. Available : <http://www.lottechem.my/products/>.
- [21] Brydson, J.A. 1999. **Plastic Materials.** 7th ed. Oxford : Butterworth Heinemann.
- [22] Armstrong, R.B. 2012. **New EVAL[®] EVOH Resins for Flexible Packaging.** [Online]. Available : <http://www.tappi.org/content/enewsletters/eplace/2004/27-1Armstrong.pdf>.
- [23] Ariffin, K.S. 2015. **Mineral Perindustrian.** [Online]. Available : <http://mineral.engusm.my/web%20halaman%20mineral/Baryte.pdf>.
- [24] Paytan, A. Mearon, S. Cobb, K. and Kastner, M. 2002. **Origin of Marine Barite Deposits : Sr and Isotope Characterization.** [Online]. Available : http://eesc.columbia.edu//w4937/Readings/paytan_etal_2002.pdf.
- [25] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 846-2548. แบเรียมซัลเฟตสำหรับอุตสาหกรรม.** [Online]. Available : <http://www2.rid.go.th/research/vijais/moa/fulltext/TIS846-2548.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] Kresse, R. Baudis, U. Jager, P. Riechers, H.H. Wagner, H. Winkler, J. and Wolf, H.U. 2007. **Barium and Barium Compounds**. Weinheim : Wiley-VCH.
- [27] กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีสำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กระทรวงอุตสาหกรรม. 2552. การเปรียบเทียบความเหมือน-ความต่างระหว่างแร่แบไรต์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศกับแร่ที่ผลิตได้ในประเทศไทย. [Online]. Available : <http://www1.dpim.go.th/dt/ppper/000001266810852.pdf>.
- [28] สุขชัย คะเรรัมย์. 2546. กระบวนการแต่งแร่ Barite. [Online]. Available : <http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/Barite2/process.htm>.
- [29] P & S Barite Mining Co., Ltd. 2555. **Barite/Baryte (BaSO₄)**. [Online]. Available: <http://http://pandsgroup.com/th/products.htm>.
- [30] Hadi, A.G. Lafta, F. Hashim, A. Hakim, H. Al-Zuheiry, A.I.O. Salman, S.R. and Ahmed, H. "Study the Effect of Barium Sulphate on Optical Properties of Polyvinyl Alcohol (PVA)." 2013 *J. Appl. Polym. Sci.* 1(2) : 52-55.
- [31] นพวรรณ ชนัญพานิช และอุทุมมา มัชชะเนมิ. 2554. แผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตป้องกันรังสีเอกซ์. [Online]. Available : http://www.nst.or.th/nst-conf/nst/nst12/PC/final_full_PC10_Noppavan_Chanunpanich_23Jun2011.pdf.
- [32] Tawansi, A. El-Khodary, A. and Abdelnaby, M.M. 2005. "A Study of the Physical Properties of FeCl₃ Filled PVA." *Curr. Appl. Phys.* 5 : 572-578.
- [33] Riegel, E.R. 1992. **Handbook of Industrial Chemistry**. 9th ed. New York : VNR, C.
- [34] Wade, L.G. 1995. **Organic Chemistry**. New Jersey : Prentice-Hill.
- [35] Lazzeria, A. Zebarjadb, S.M. Pracellac, M. Cavalierd, K. and Rosad, R. 2005. "Filler Toughening of Plastics. Part 1—The Effect of Surface Interactions on Physico-Mechanical Properties and Rheological Behaviour of Ultrafine CaCO₃/HDPE Nanocomposites." *J. Polym. Mater.* 46 : 827-844.
- [36] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ต.
- [37] Kahar, A.W.M. Ismail, H. and Othman, N. 2012. "Effects of Polyethylene-Grafted Maleic Anhydride as a Compatibilizer on the Morphology and Tensile Properties of (Thermoplastic Tapioca Starch)/(High Density Polyethylene)/(Natural Rubber) Blends." *J. Vinyl. Addit. Tech.* 18(1) : 65-70.

- [38] Warya., Romli, M. Suryani, A. Yuliasih, I. and Johan, S. 2013. “Using of a Compatibilizer to Improve Morphological, Physical and Mechanical Properties of Biodegradable Plastic from Thermoplastic Starch/LLDPE Blends.” *IJET-IJENS*. 13(01) : 115-122.
- [39] Pankai, A. Araujo, E.M. and Tomas, J.A.M. 2015. **Rheological Behavior of PA6/PEGAA/LDPE Blend and the Effect of the Mixing Sequence on the Mechanical Properties and Morphology.** [Online]. Available : http://www.researchgate.net/profile/Tomas_Melo/publication/OGICAL_267559243_RHEOL_BEHAVIOR_OF_PA6PEGAALDPE_BLEND_AND_THE_EFFECT_OF_THE_MIXING_SEQUENCE_ON_THE_MECHANICAL_PROPERTIES_AND_MORPHOLOGY/links/54e791d00cf25ba91c797809.pdf.
- [40] Zhanhai, Y. Zhihui, Y. Guoen, S. Chaozhong, L. Jin, T. Luquan, R. and Jinghua, Y. 2002. “Morphology, Thermal Behavior, and Mechanical Properties of PA6/UHMWPE Blends with HDPE-g-MAH as a Compatibilizing Agent.” *J. Appl. Polym. Sci.* 75(2) : 232-238.
- [41] Pankaj, A. Andre, W.B. Edcleide, M. and Tomas, J.A. 2010. “Influence of Reactive Compatibilizers on the Rheometrical and Mechanical Properties of PA6/LDPE and PA6/HDPE Blends.” *J. Mater. Sci.* 45(2) : 496.
- [42] Douglas, M.B. 1996. **Plastic Injection Molding : Manufacturing Process Fundamentals.** Dearborn : Society of Manufacturing Engineers.
- [43] อธิพิณ แจ่มชัด, ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์, จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ, สุภารัตน์ รักชลธี และสมศักดิ์ วรรณมงคลชัย. 2553. **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [44] Polyplastics Co., Ltd. 2001. **Polyplastics Solution Platform for Engineering Plastics.** [Online]. Available : <http://www.xcentricmold.com/aboutinjectmold.php>.
- [45] Chen, X. Shi, J. Wang, L. Shi, H. Liu, Y. and Wang, L. 2010. “Isothermal Crystallization Kinetics and Melting Behavior of Modified High-Density Polyethylene/Barium Sulfate Nanocomposites.” *Polym. Compos.* 32(2) : 177-184.
- [46] Wang, K. Wu, J. and Zeng, H. 2003. “Radial Growth Rate of Spherulites in Polypropylene Barium Sulfate Composites.” *Eur. Polym. J.* 39 : 1647-1652.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [47] Chen, Y. 2014. “Investigations on Environmental Stress Cracking Resistance of HDPE/EVA and LDPE/EVA Blends.” *J. Appl. Polym. Sci.* 131(4) : 39880(1-8).
- [48] American Standard for Testing and Materials. 2007. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement : ASTM D792-08.** Annual Book of ASTM Standards. 08.01.
- [49] Mettler-Toledo, LLC. 2010. **Density Kit for Solids and Liquids Determination.** [Online]. Available : [http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/jcr_content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_\(OP-EN\).pdf](http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/jcr_content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_(OP-EN).pdf).
- [50] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standards Test Method for Composition Analysis by Thermogravimetry : ASTM D1131.** Annual Book of ASTM Standards. 14(02) : 712-716.
- [51] American Standard for Testing and Materials. 2006. **Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis : ASTM E794.** Annual Book of ASTM Standards. 4.02.
- [52] Billmeyer, F.W. 1984. **Text book of Polymer Science.** New York : John Wiley & Sons.
- [53] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standards Test Method for Tensile Properties of Plastics : ASTM D638.** Annual Book of ASTM Standards. 8.02 : 226-229.
- [54] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Method for Impact Resistance for Plastics and Electrical Insulating Material : ASTM D256.** Annual Book of ASTM Standards. 8.03 : 201-210.
- [55] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness: ASTM D2240.** Annual Book of ASTM Standards. 8.02 : 226-229.
- [56] Lustiger, A. and Corneliusen, R.D. 1987. “The Role of Crazes in the Crack Growth of Polyethylene.” *J. Mater. Sci.* 22 : 2470-2476.
- [57] Shah, V. 1998. **Handbook of Plastic Testing Technology.** 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.

- [58] Adler, H.H. and Kerr, P.F. 1965. "Variations in Infrared Spectra, Molecular Symmetry, and Site Symmetry of Sulfate Minerals." *Am. Min.* 50 : 132-147.
- [59] Manam, J. and Das, S. 2009. "Thermally Stimulated Luminescence Studies of Undoped, Cu and Mn Doped BaSO₄ Compounds." *Indian J. Pure Ap. Phy.* 47(6) : 435-438.
- [60] Faker, M. Aghjeh, R. Ghaffari, M. and Seyyedi, A. 2008. "Rheology, Morphology and Mechanical Properties of Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (PE/EVA) Blends." *Polymer.* 44 : 1834-1842.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



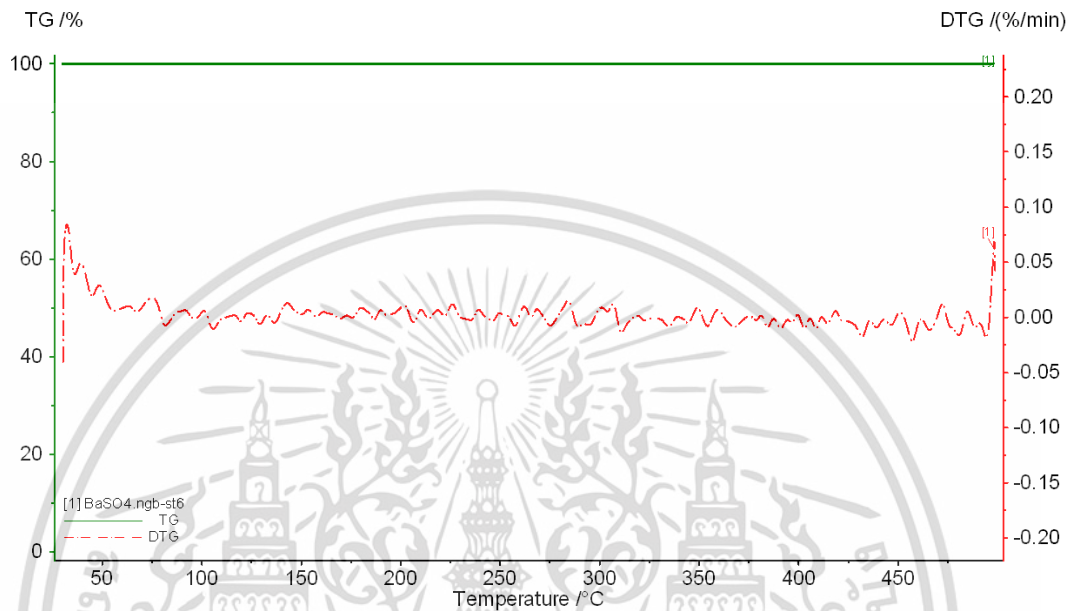
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

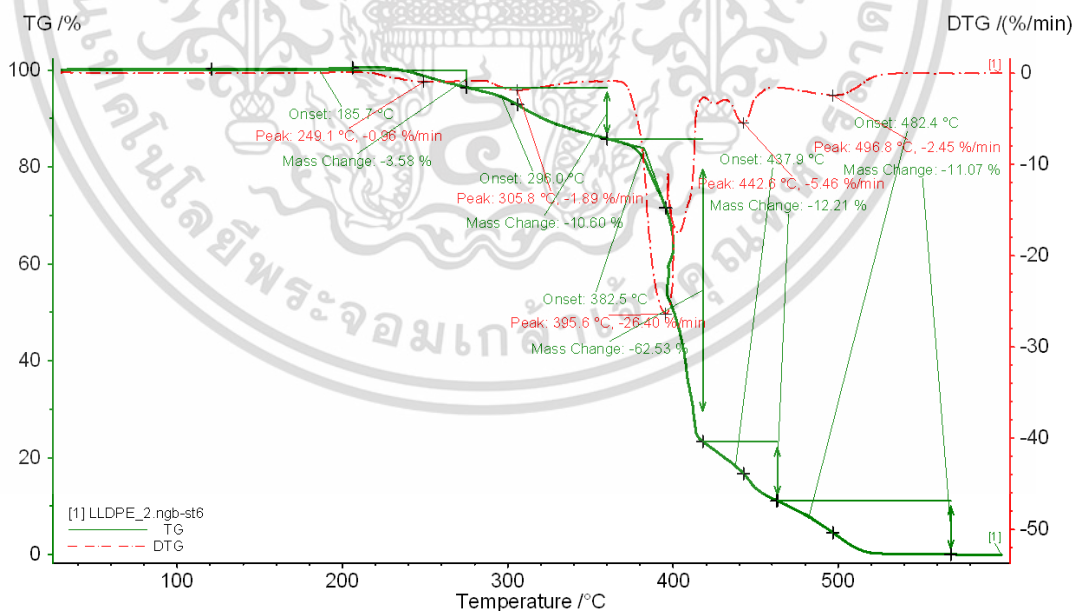
ภาคผนวก ก

การทดสอบสมบัติทางความร้อนจาก TGA

ก-1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyzer : TGA

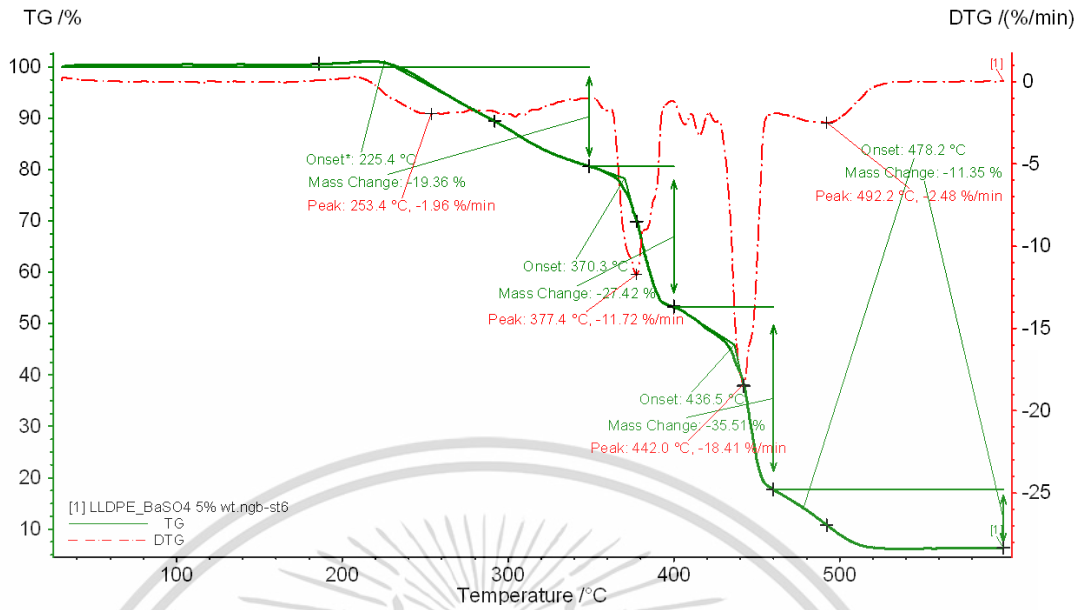


รูปที่ ก-1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ BaSO₄

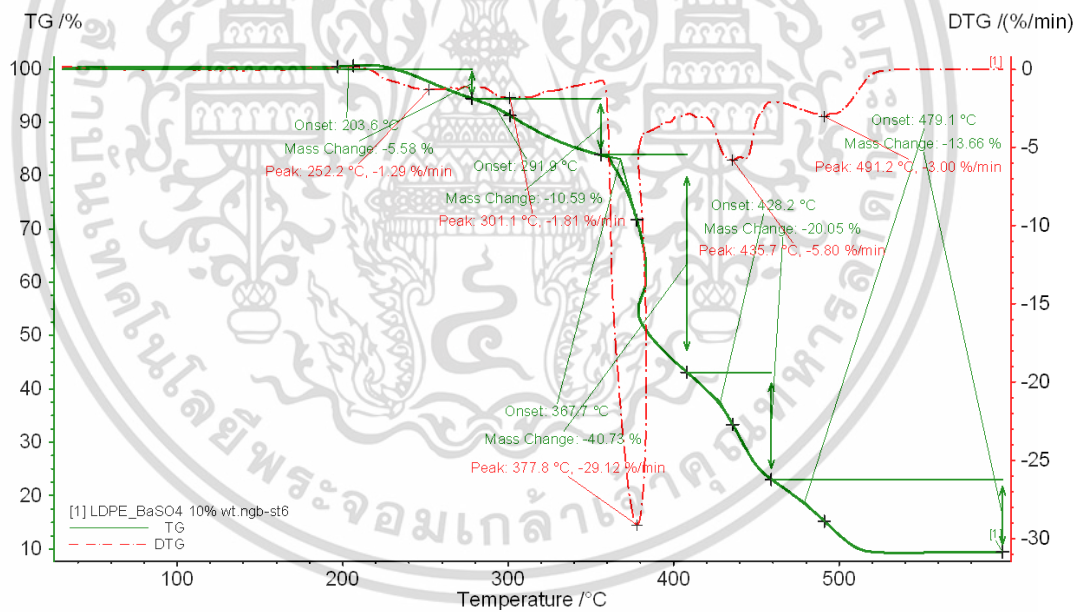


รูปที่ ก-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

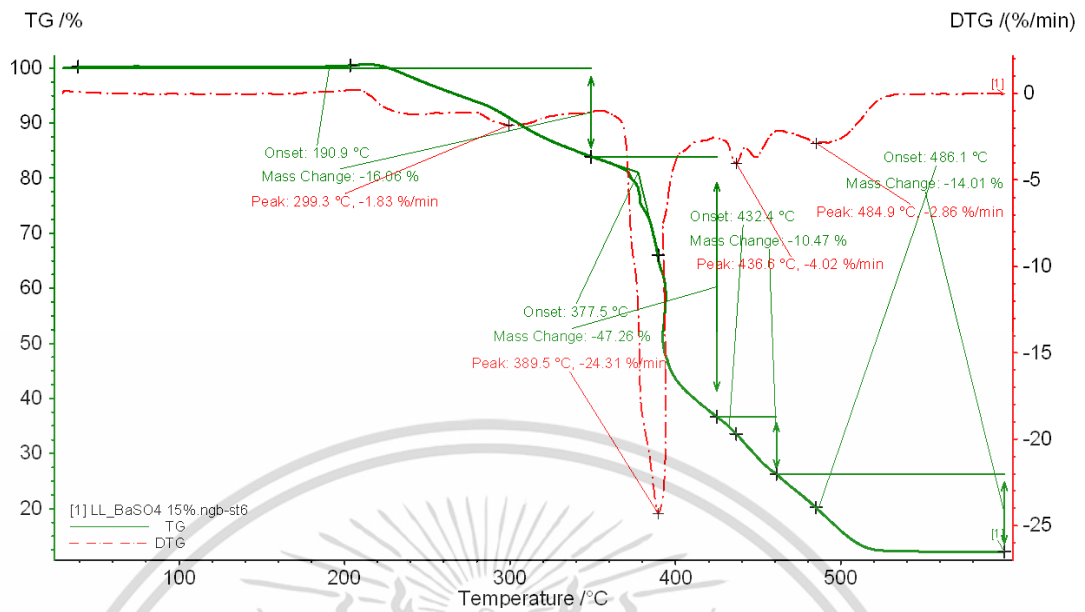


รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB5

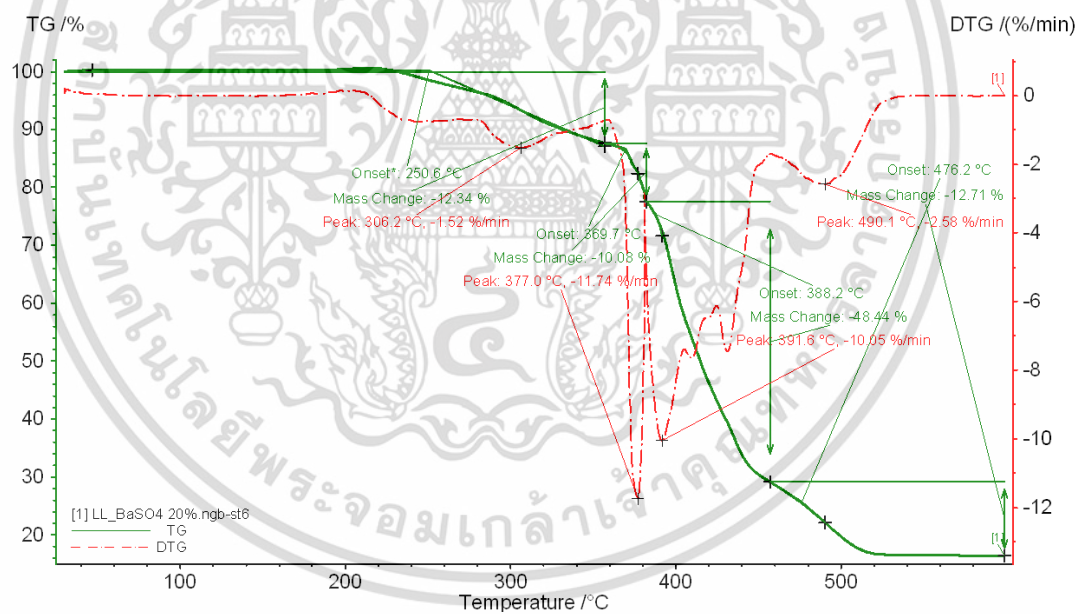


รูปที่ ก-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

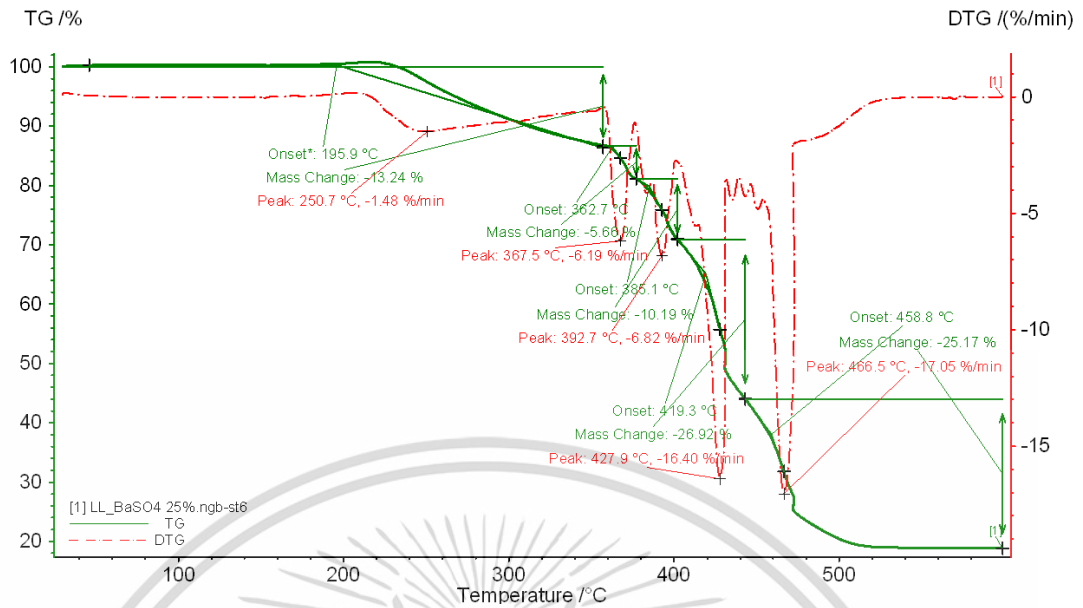


รูปที่ ก-5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB15

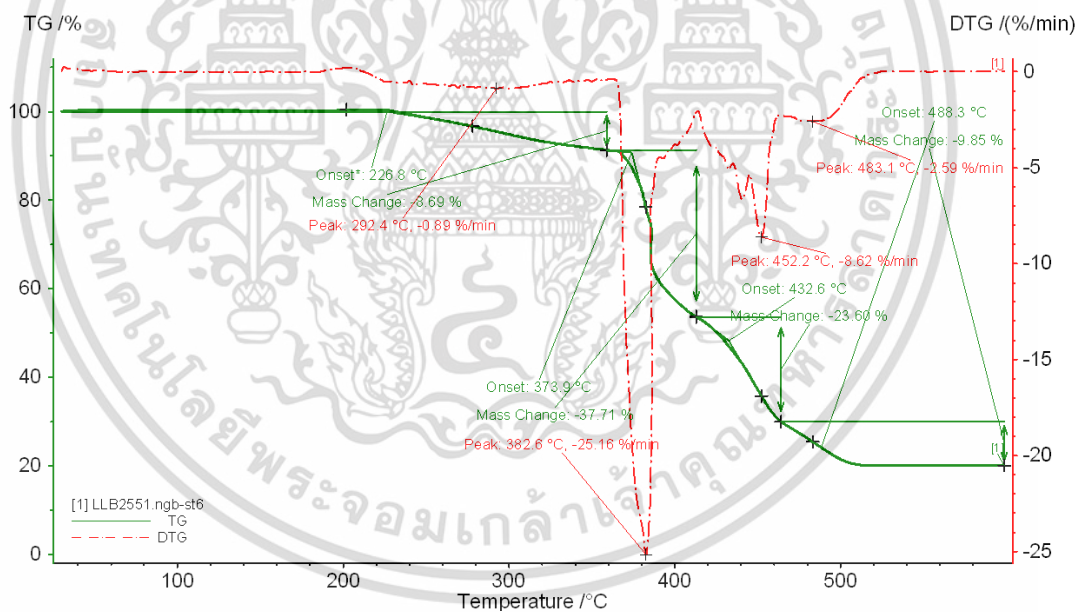


รูปที่ ก-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

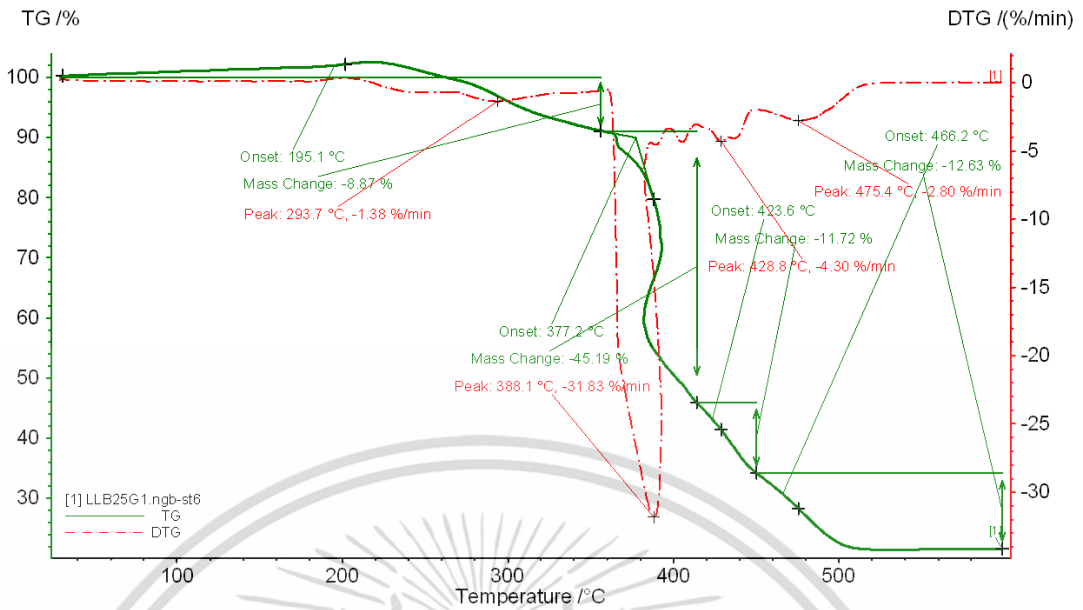


รูปที่ ก-7 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB25

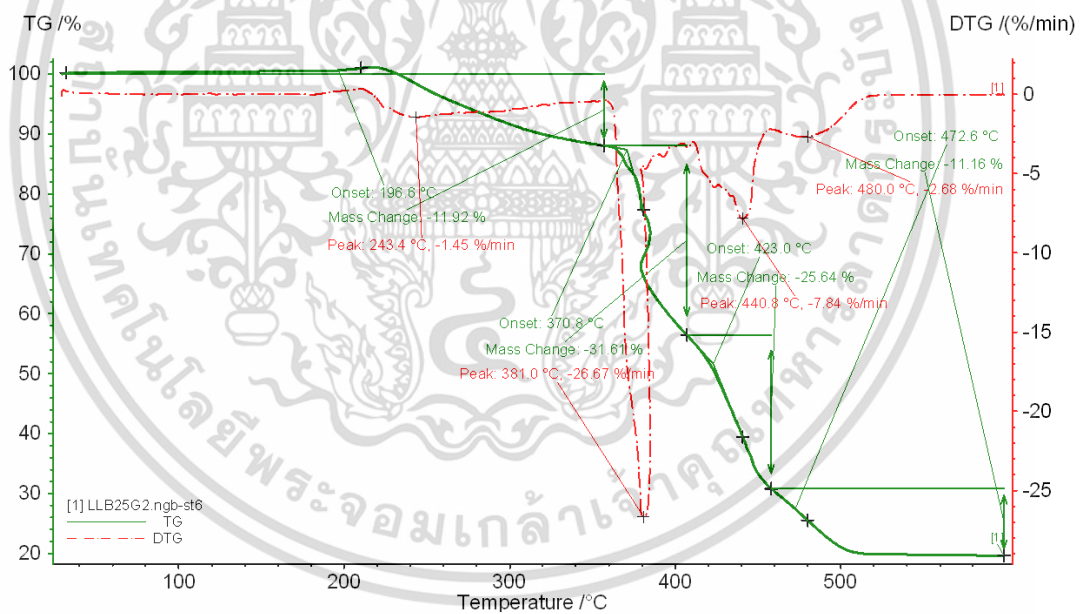


รูปที่ ก-8 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB25S1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

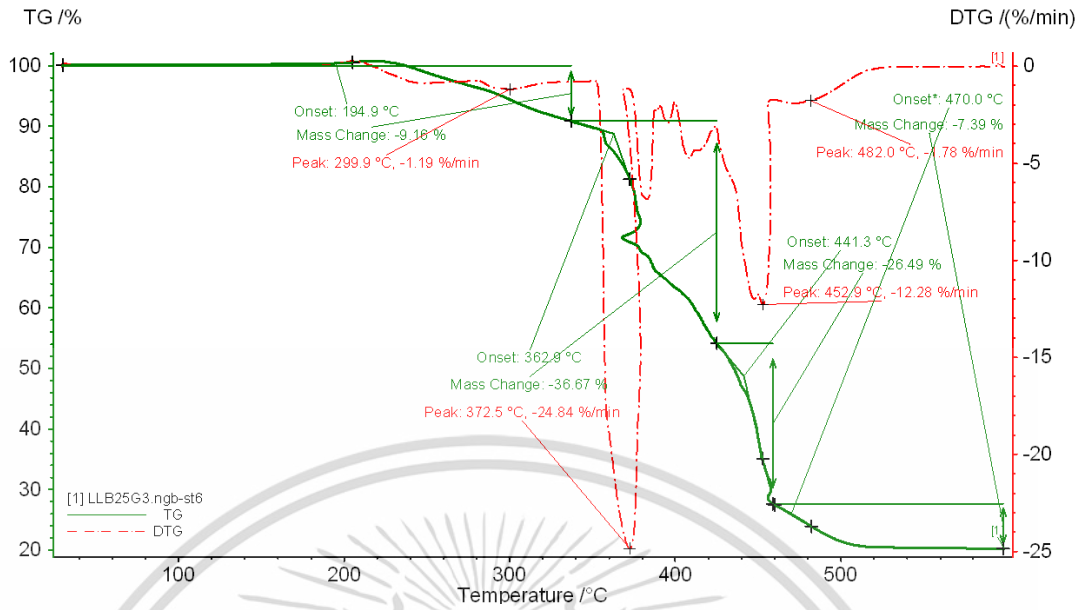


รูปที่ ก-9 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB25G1

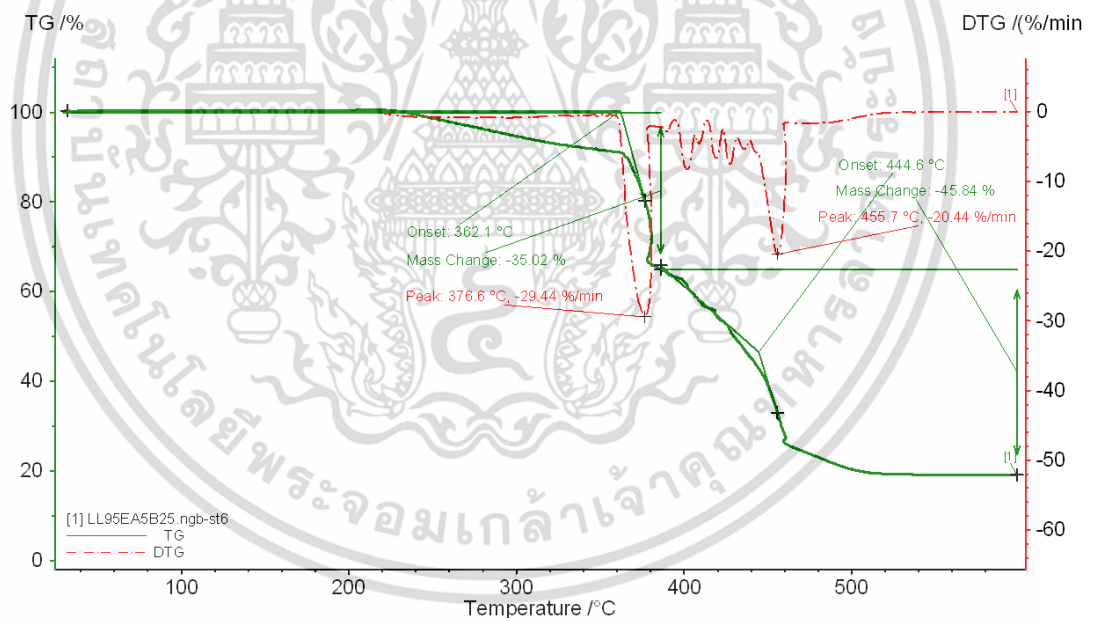


รูปที่ ก-10 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB25G2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

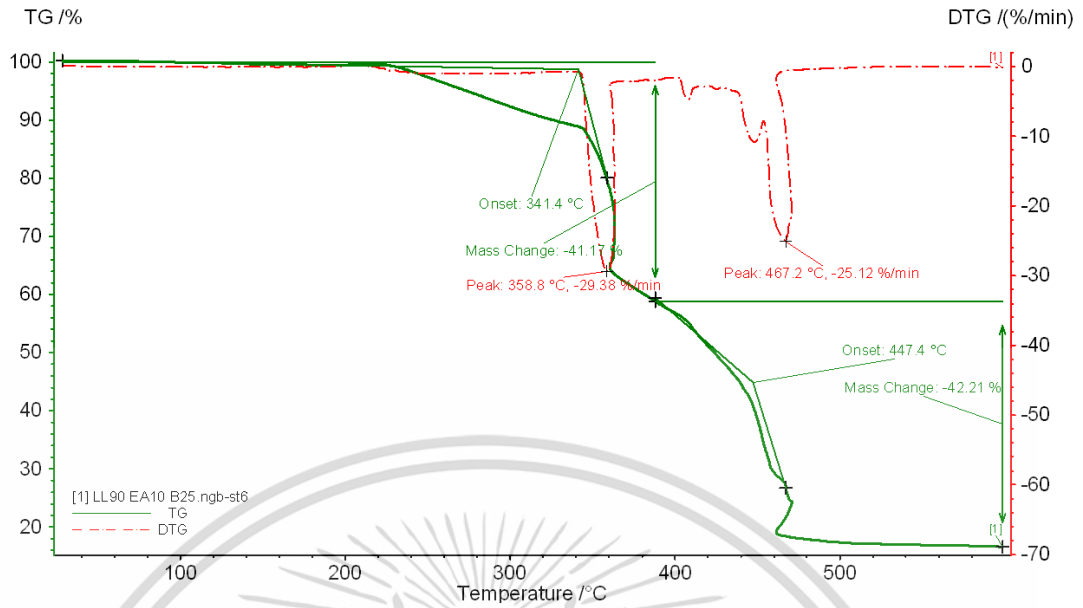


รูปที่ ก-11 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LLB25G3

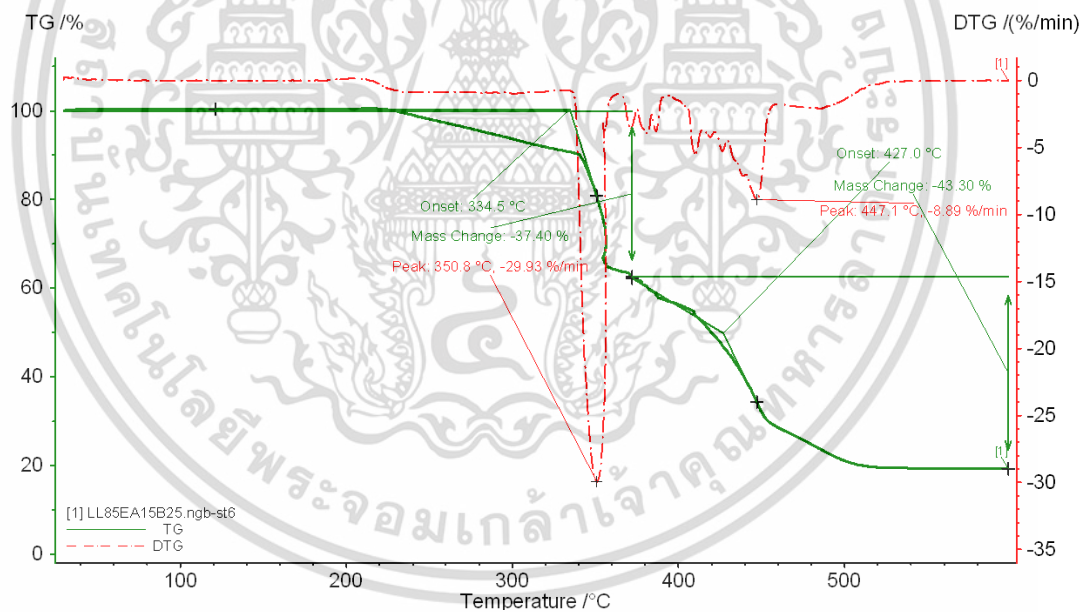


รูปที่ ก-12 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LL95EA5B25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-13 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LL90EA10B25



รูปที่ ก-14 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ LL85EA15B25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบหาความหนาแน่นของคอมโพสิตตัวอย่าง

ข-1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอมโพสิตตัวอย่างด้วยเครื่อง Density kit

ตารางที่ ข-1 ค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

สูตร	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)					ค่าเฉลี่ย (g/cm ³)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LL	0.926	0.927	0.925	0.922	0.931	0.926	0.001
LLB5	0.967	0.963	0.964	0.964	0.962	0.964	0.001
LLB10	0.997	0.998	0.998	0.997	0.998	0.998	0.000
LLB15	1.029	1.027	1.026	1.028	1.027	1.027	0.001
LLB20	1.058	1.059	1.059	1.057	1.058	1.058	0.000
LLB25	1.086	1.087	1.092	1.086	1.097	1.090	0.002
LLB25S1	1.093	1.095	1.096	1.095	1.099	1.096	0.001
LLB25G1	1.087	1.087	1.085	1.087	1.100	1.089	0.003
LLB25G2	1.087	1.091	1.088	1.089	1.087	1.088	0.001
LLB25G3	1.093	1.090	1.091	1.091	1.090	1.091	0.001
LL90EA10	0.932	0.930	0.940	0.932	0.927	0.932	0.002
LL95EA5B25	1.089	1.091	1.090	1.094	1.088	1.090	0.001
LL90EA10B25	1.095	1.093	1.082	1.090	1.093	1.091	0.002
LL85EA15B25	1.096	1.084	1.094	1.089	1.090	1.091	0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-2 การคำนวณความหนาแน่นทางทฤษฎี

ความหนาแน่นของสารผสมหาได้ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของสารผสม} = \frac{100 \text{ (g)}}{\text{ปริมาตรรวมของของผสม (cm}^3\text{)}} \quad (\text{ก-1})$$

$$\text{ซึ่งปริมาตรรวมของสารผสม} = \frac{\% \text{wt of LLDPE}}{\rho \text{ of LLDPE}} + \frac{\% \text{wt of BaSO}_4}{\rho \text{ of BaSO}_4} + \frac{\% \text{wt of additive}}{\rho \text{ of additive}} \quad (\text{ก-2})$$

เมื่อ

$$\text{ความหนาแน่นของ LLDPE* } (\rho \text{ of LLDPE}) = 0.924 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของ BaSO}_4^* (\rho \text{ of BaSO}_4) = 4.5 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของ SA* } (\rho \text{ of SA}) = 0.847 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของ LL-g-MA* } (\rho \text{ of LL-g-MA}) = 0.975 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของ EVA* } (\rho \text{ of EVA}) = 0.952 \text{ g/cm}^3$$

*ค่าความหนาแน่นที่ใช้เป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตหรือบริษัทผู้จำหน่าย

หมายเหตุ การแทนค่า %wt of additive (สารเติมแต่ง) ขึ้นอยู่กับว่าในกรณีนั้น ใช้ SA, LLDPE-g-MA หรือ EVA

ตัวอย่างการคำนวณ

สูตร LLB25 (สารผสม 125 g มี LLDPE 100 g, BaSO₄ 25 g)

ปริมาณ BaSO₄ ที่ได้จากผลของ TGA = 18.82 %wt

แสดงว่าในสารผสม 100 %wt มี LLDPE = 81.18 %wt และมี BaSO₄ = 18.82 %wt

แทนค่าในสมการ ก-2

จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 92.039 cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ก-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.086

สูตร LLB25S1 (สารผสม 125.25 g มี LLDPE 100 g, BaSO₄ 25 g และ SA 0.25 g)

สารผสม 125.25 g มี SA 0.25 g

ถ้ามีสารผสม 100 g จะมี SA = 100 × 0.25/125.25 = 0.2 g ซึ่งคิดเป็น 0.2 %wt

ปริมาณ BaSO₄ ที่ได้จากผลของ TGA = 20.15 %wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารผสม 100 g มี BaSO₄ 20.15 g และมี SA 0.2 g ดังนั้นมี LLDPE = 100-20.15-0.2 = 79.65 g

แทนค่าในสมการ ก-2

จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 90.915 cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ก-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.100 g/cm³

สูตร LLB25G1 (สารผสม 125.25 g มี LLDPE 100 g, BaSO₄ 25 g และ LLDPE-g-MA 0.25 g)

สารผสม 125.25 g มี LLDPE-g-MA 0.25 g

ถ้ามีสารผสม 100 g จะมี LLDPE-g-MA = 100 × 0.25/125.25 = 0.2 g ซึ่งคิดเป็น 0.2 %wt

ปริมาณ BaSO₄ ที่ได้จากผลของ TGA = 21.59 %wt

สารผสม 100 g มี BaSO₄ 21.59 g และมี LLDPE-g-MA 0.2 g

ดังนั้นมี LLDPE = 100-21.59-0.2 = 78.39 g

แทนค่าในสมการ ก-2

จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 82.786 cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ก-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.208 g/cm³

สูตร LL95EA5B25 (สารผสม 125 g มี LLDPE 95 g, BaSO₄ 25 g และ EVA 5 g)

ถ้าผสม 100 g มี EVA = 5*100/125 = 4 g คิดเป็น 4 %wt

ปริมาณ BaSO₄ ที่ได้จากผลของ TGA = 19.14 %wt

สารผสม 100 g มี BaSO₄ 19.14 g และมี EVA 04 g ดังนั้นมี LLDPE 100-19.14-4 = 76.86 g

แทนค่าในสมการ ก-2

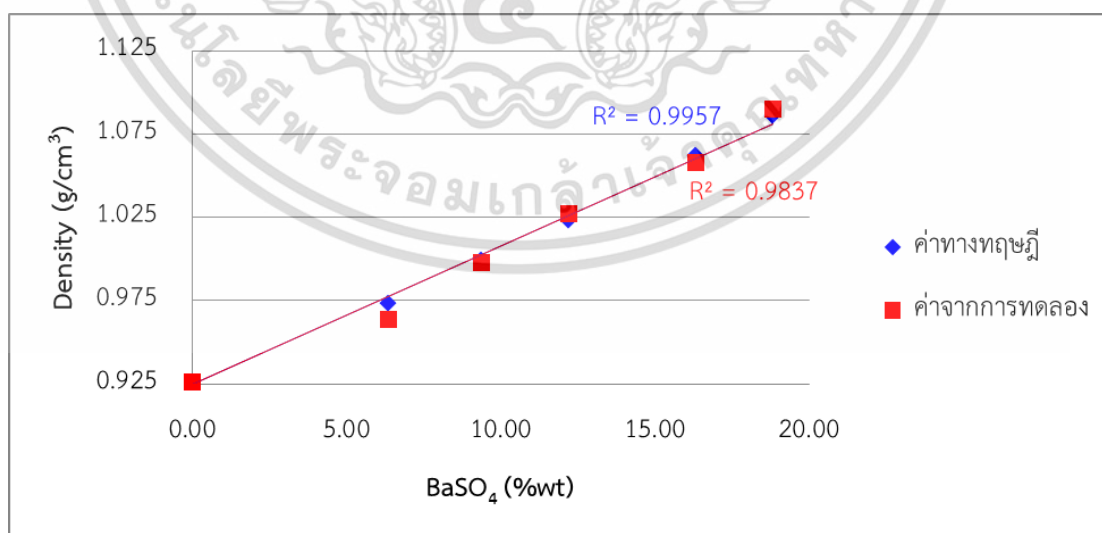
จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 91.538 cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ก-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.092 g/cm³

ตารางที่ ข-2 ปริมาณองค์ประกอบในสูตรคอมโพสิต (%wt) และค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ

สูตร	ปริมาณสาร (%wt)			ρ ทางทฤษฎี
	LLDPE	BaSO ₄	Additive	
LL	100.000	-	-	0.924
LLB5	93.640	6.360	-	0.973
LLB10	90.610	9.390	-	0.999
LLB15	87.800	12.200	-	1.023
LLB20	83.660	16.340	-	1.062
LLB25	81.180	18.820	-	1.086
LLB25S1	79.650	20.150	SA 0.200	1.100
LLB25G1	78.210	21.590	LL-g-MA 0.200	1.208
LLB25G2	79.932	19.670	LL-g-MA 0.398	1.179
LLB25G3	79.114	20.290	LL-g-MA 0.596	1.254
LL90EA10	90.000	-	EVA 10.000	0.929
LL95EA5B25	76.860	19.140	EVA 4.000	1.092
LL90EA10B25	72.310	19.690	EVA 8.000	1.101
LL85EA15B25	68.700	19.300	EVA 12.000	1.100



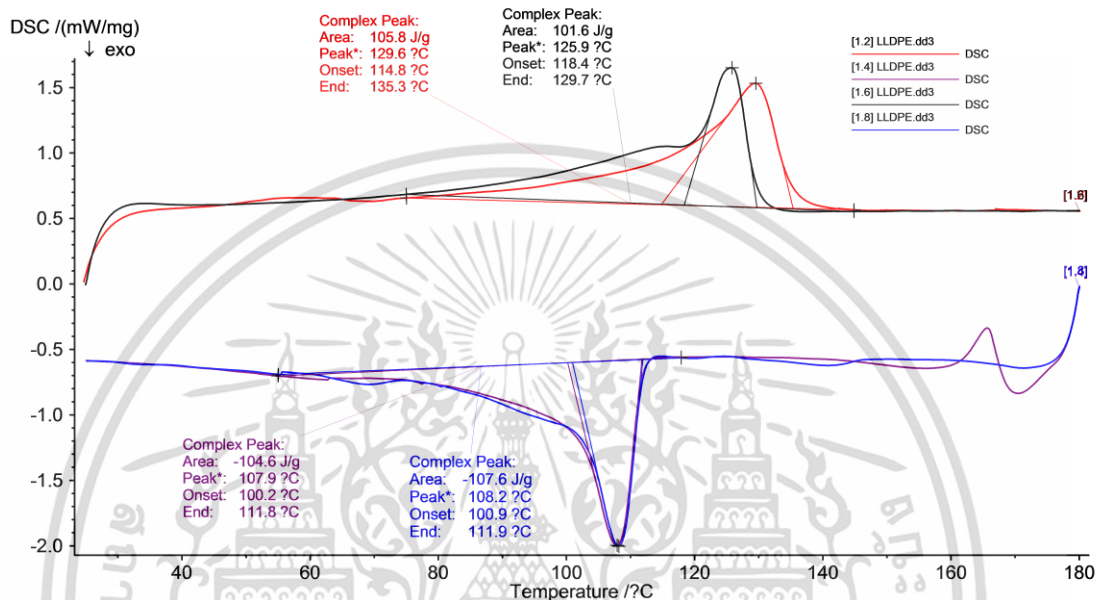
รูปที่ ข-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณ BaSO₄

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

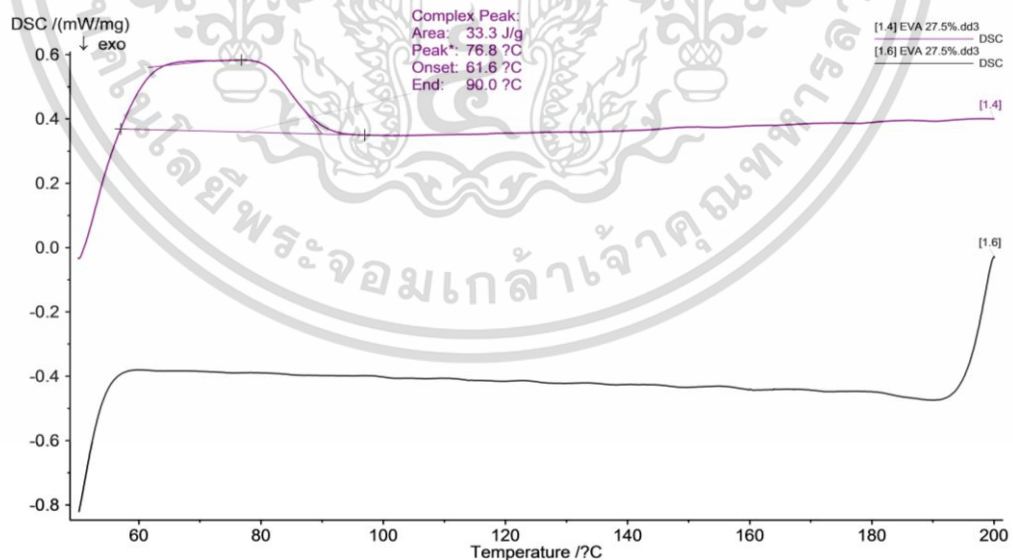
ภาคผนวก ค

การทดสอบสมบัติทางความร้อนจาก DSC

ค-1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter : DSC

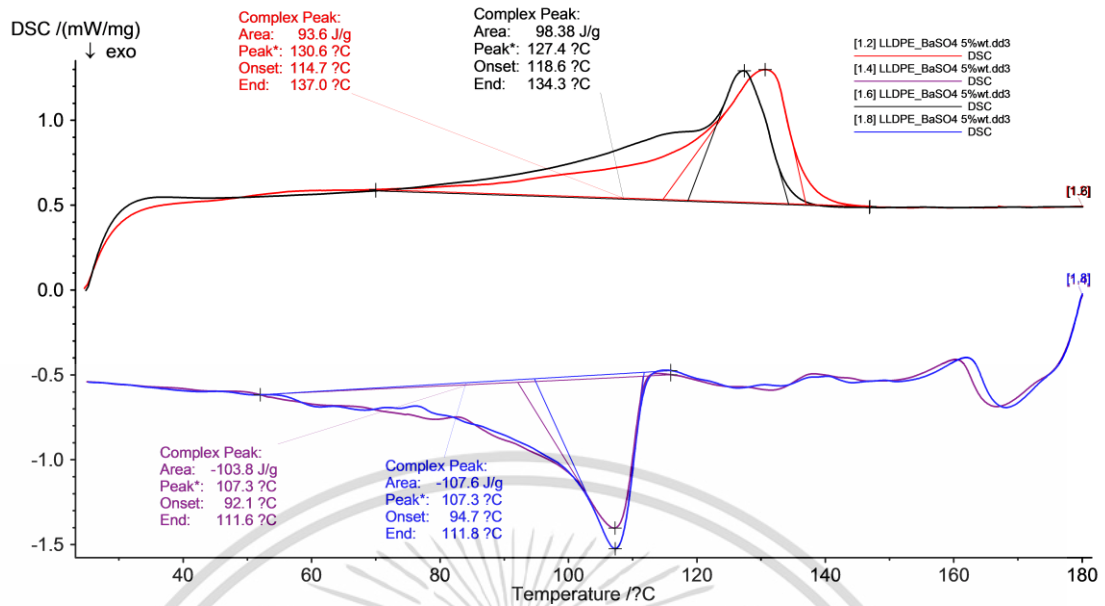


รูปที่ ค-1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLDPE

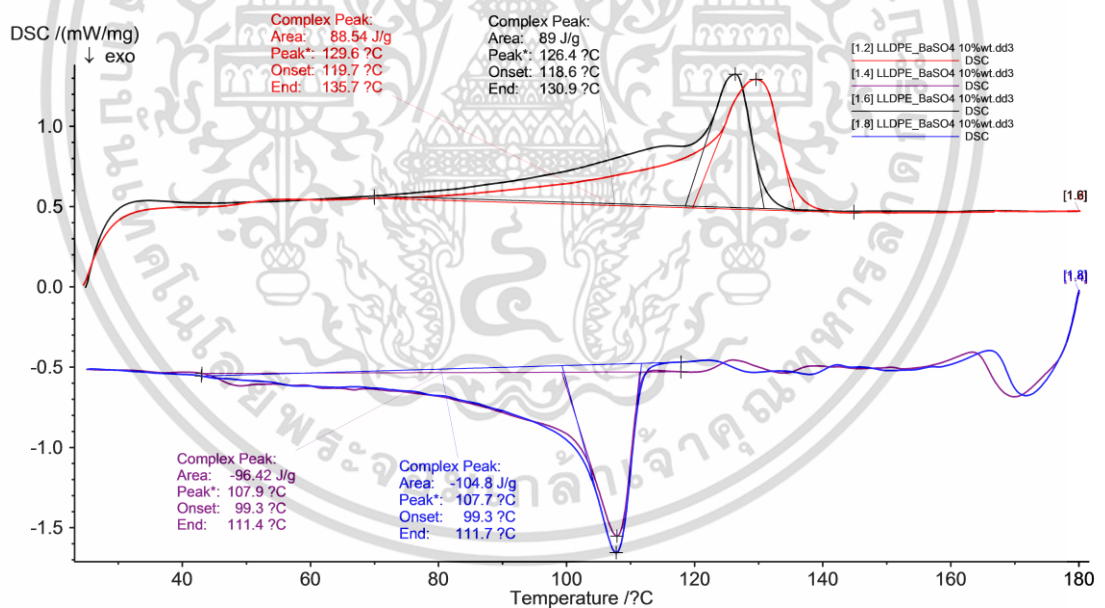


รูปที่ ค-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

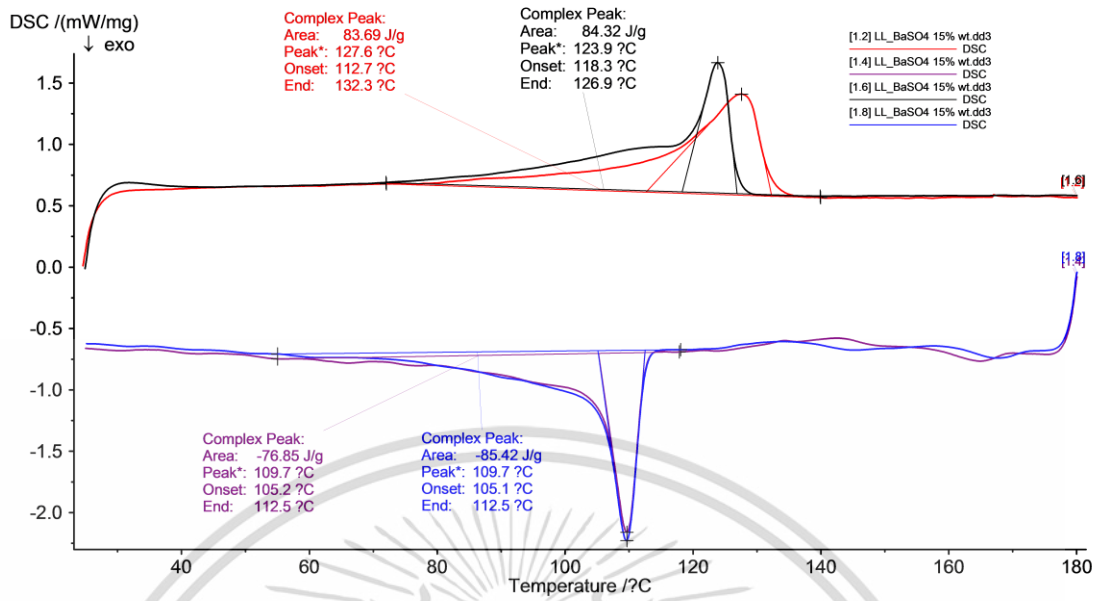


รูปที่ ค-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLD5

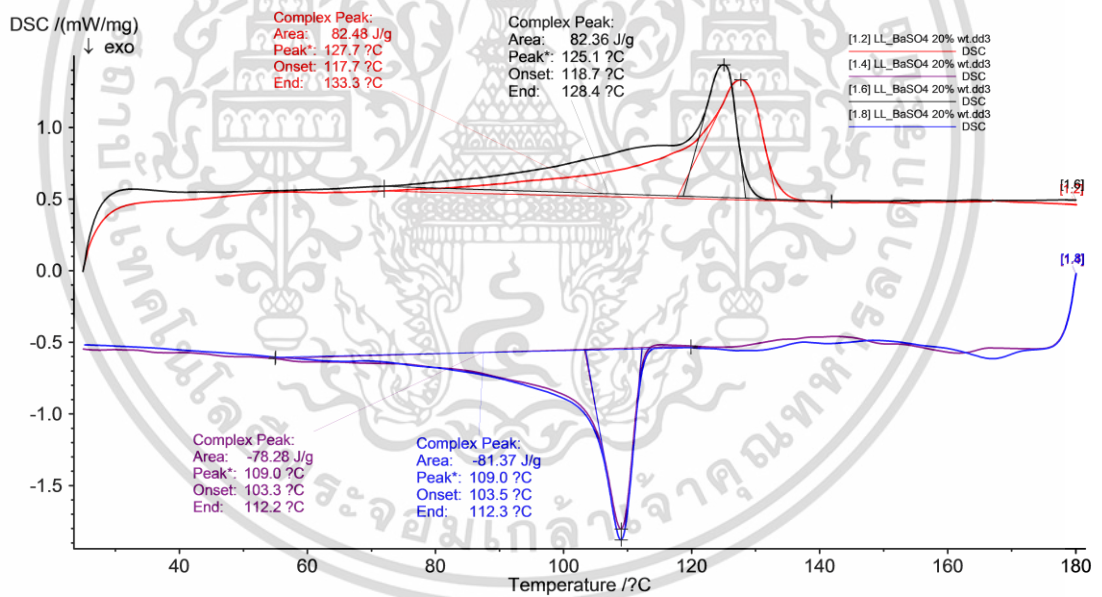


รูปที่ ค-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLD10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

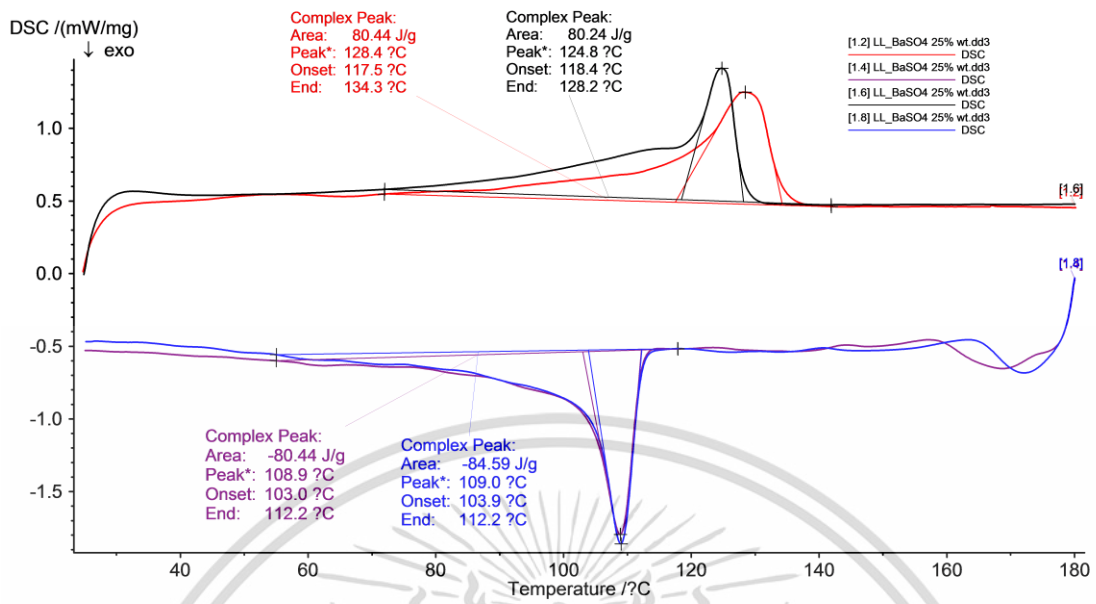


รูปที่ ค-5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLB15

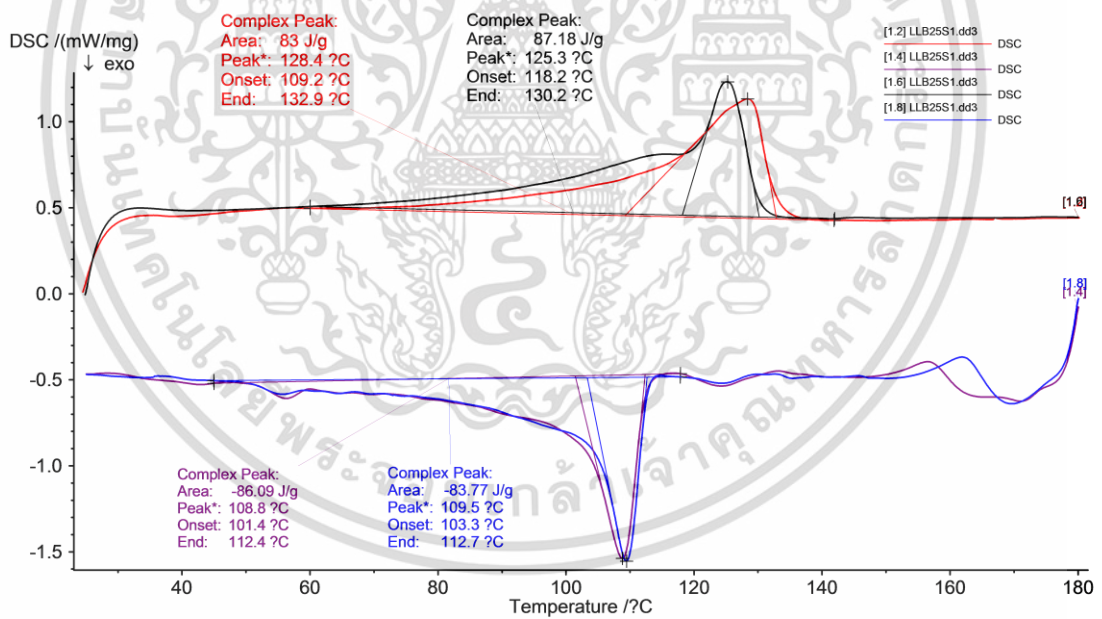


รูปที่ ค-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLB20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

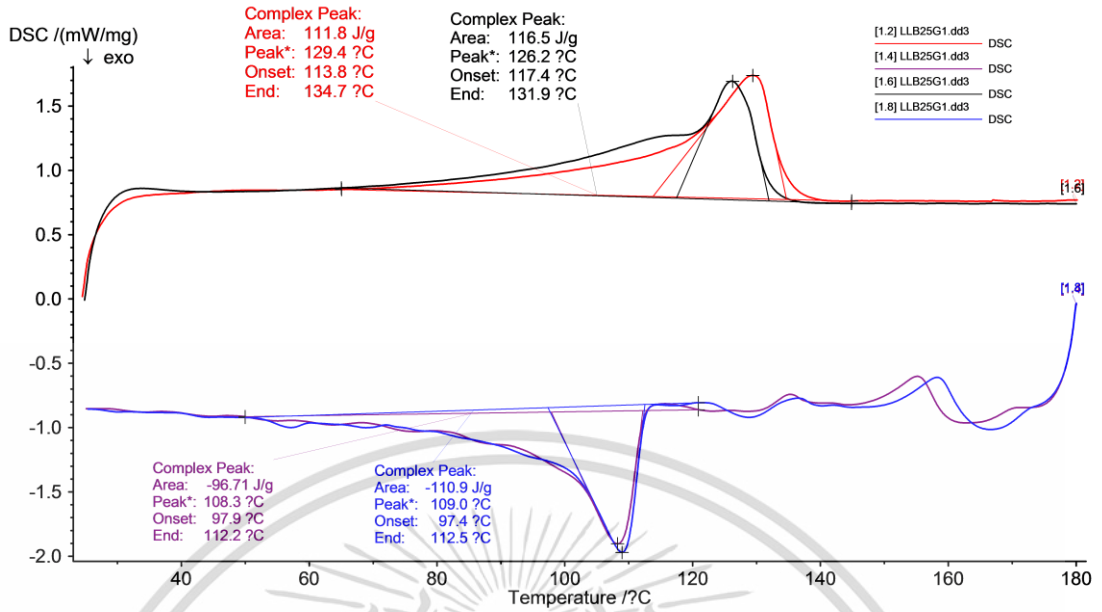


รูปที่ ค-7 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLB25

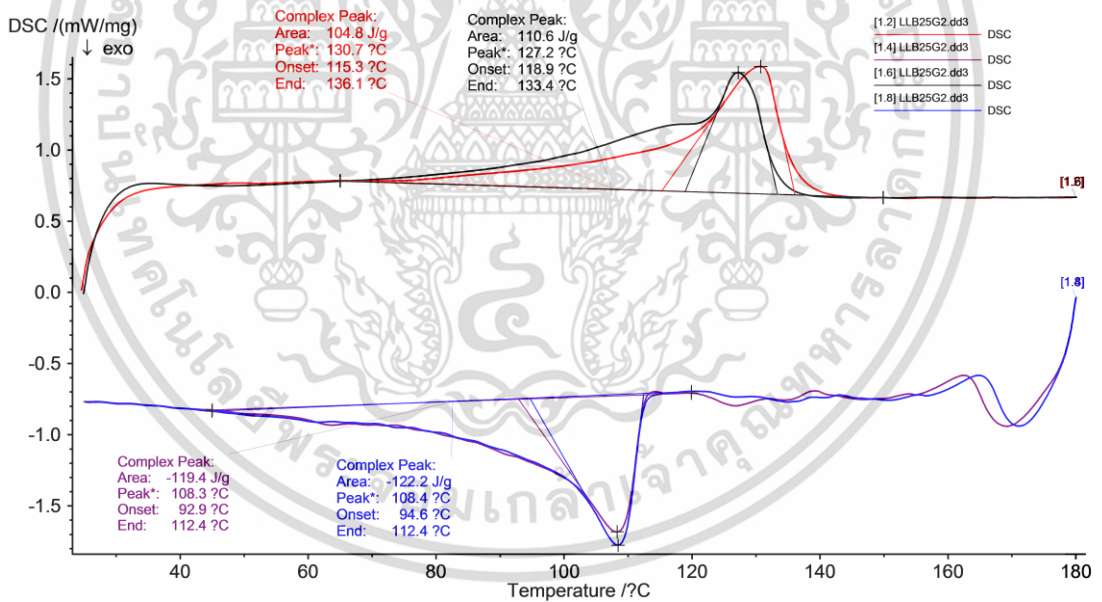


รูปที่ ค-8 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLB25S1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

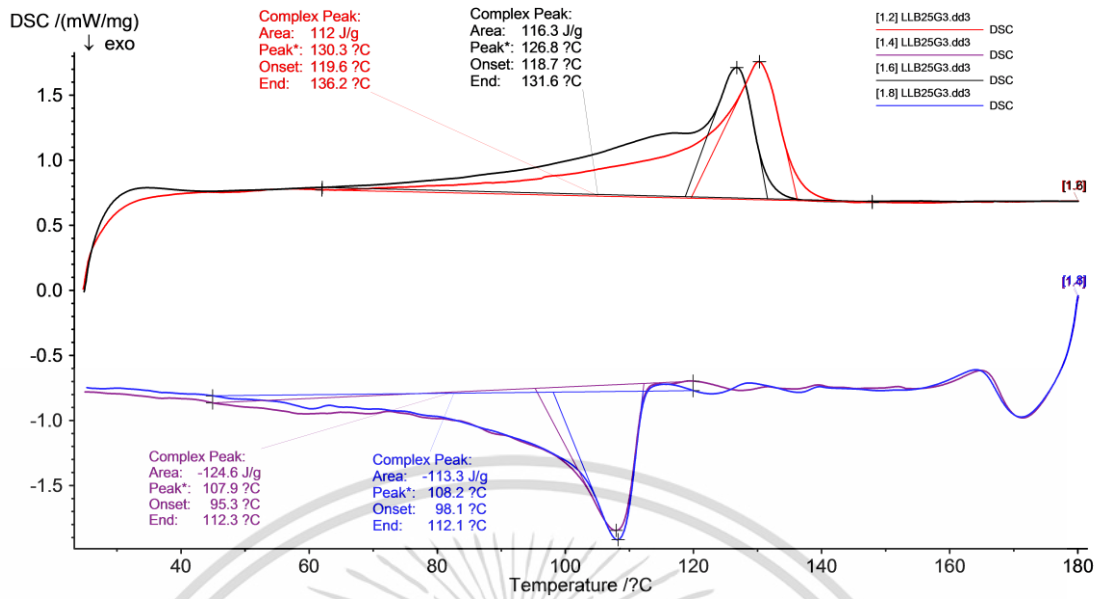


รูปที่ ค-9 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLB25G1

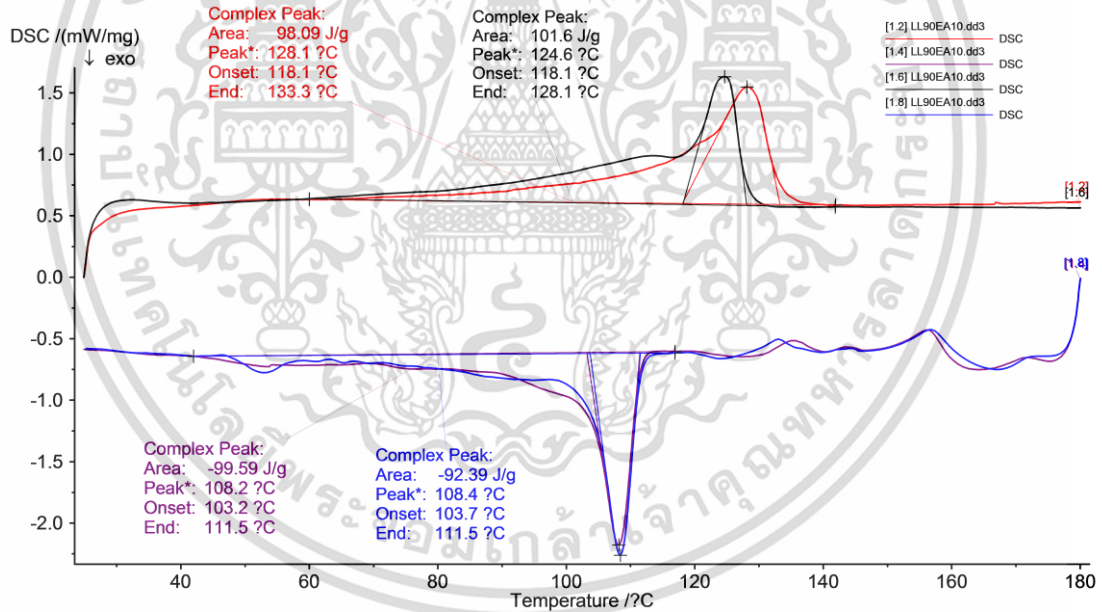


รูปที่ ค-10 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLB25G2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

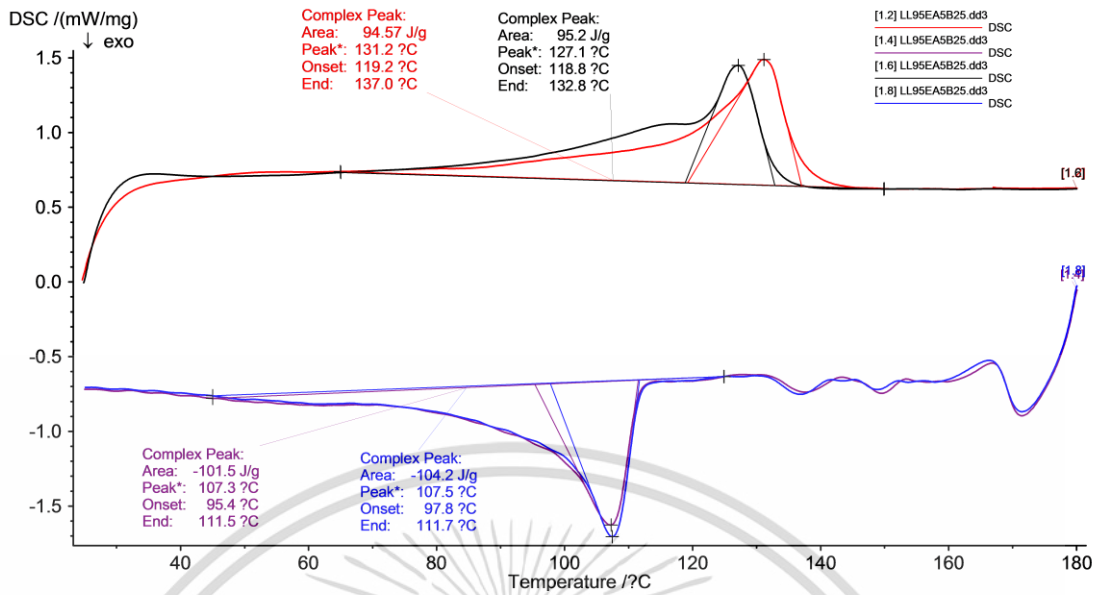


รูปที่ ค-11 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ LLB25G3

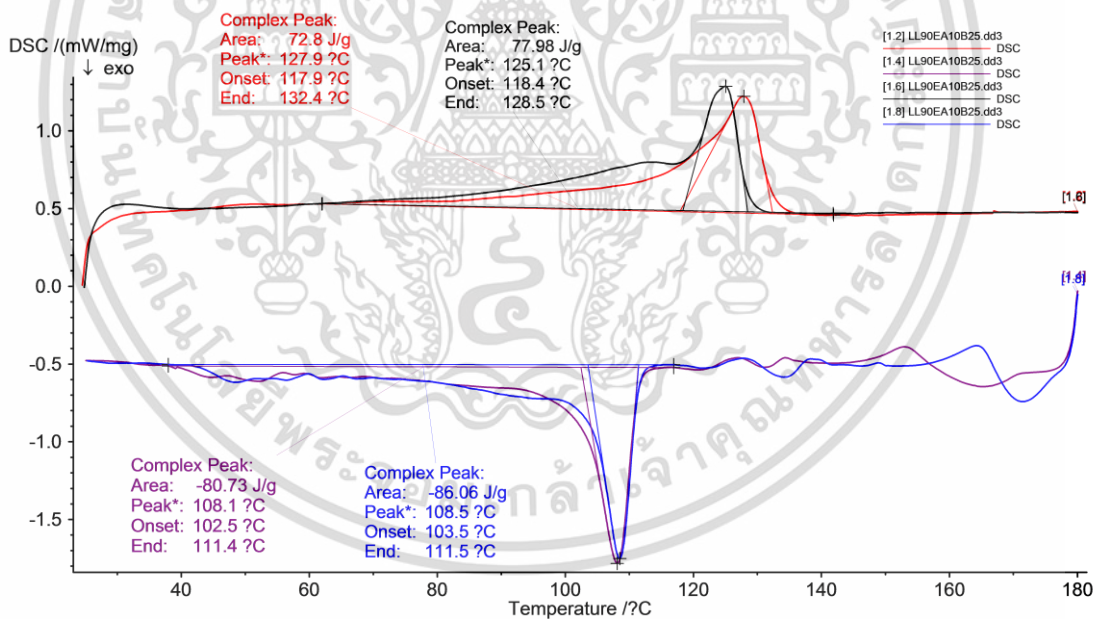


รูปที่ ค-12 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ L90EA10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

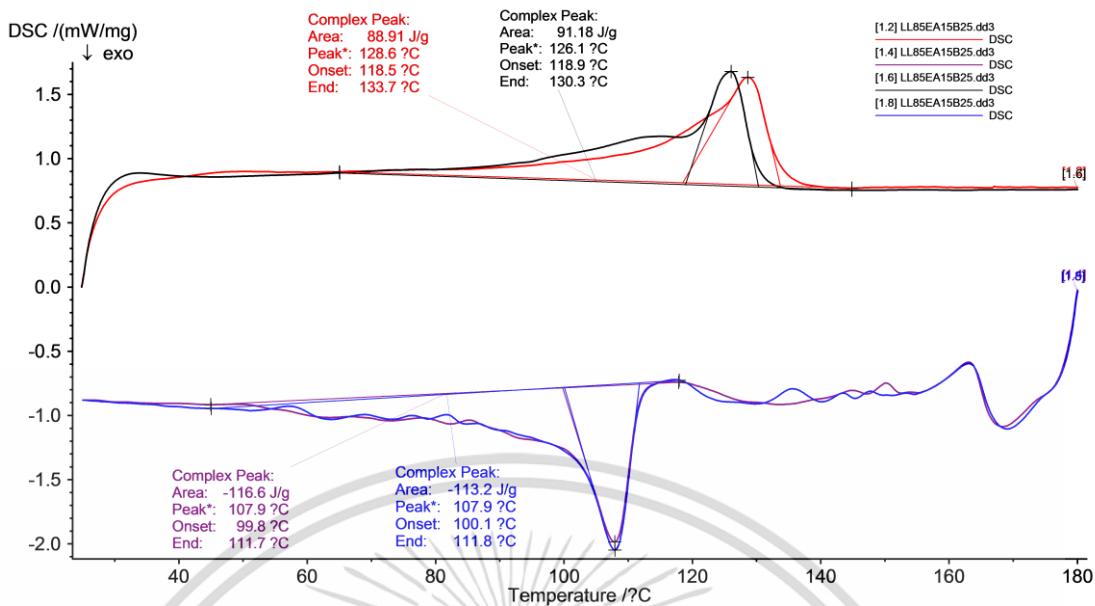


รูปที่ ค-13 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ L95EA5B25



รูปที่ ค-14 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ L90EA10B25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-15 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ L85EA15B25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค BaSO₄

ง-1 ผลการทดสอบการกระจายขนาดของอนุภาค BaSO₄ ด้วยเครื่อง Mastersizer X

ตารางที่ ง-1 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Histogram result table)

Size (Low) (μm)	Result in (%)	Size (High) (μm)	Result below (%)
0.50	1.62	1.32	1.62
1.32	5.71	1.60	7.33
1.60	8.62	1.95	15.95
1.95	9.99	2.38	25.94
2.38	10.15	2.90	36.09
2.90	9.84	3.53	45.93
3.53	9.72	4.30	55.66
4.30	10.01	5.24	65.66
5.24	10.25	6.39	75.91
6.39	9.47	7.78	85.38
7.78	7.29	9.48	92.67
9.48	4.52	11.55	97.19
11.55	2.10	14.08	99.29
14.08	0.65	17.15	99.94
17.15	0.06	20.90	100.00

เมื่อ

Size low คือ ขนาดเล็กสุดของช่วงขนาดอนุภาคนั้นๆ (μm)

Size high คือ ขนาดใหญ่สุดของช่วงขนาดอนุภาคนั้นๆ (μm)

Result In คือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของปริมาณอนุภาคที่มีอยู่ในช่วงขนาดอนุภาคนั้น (%)

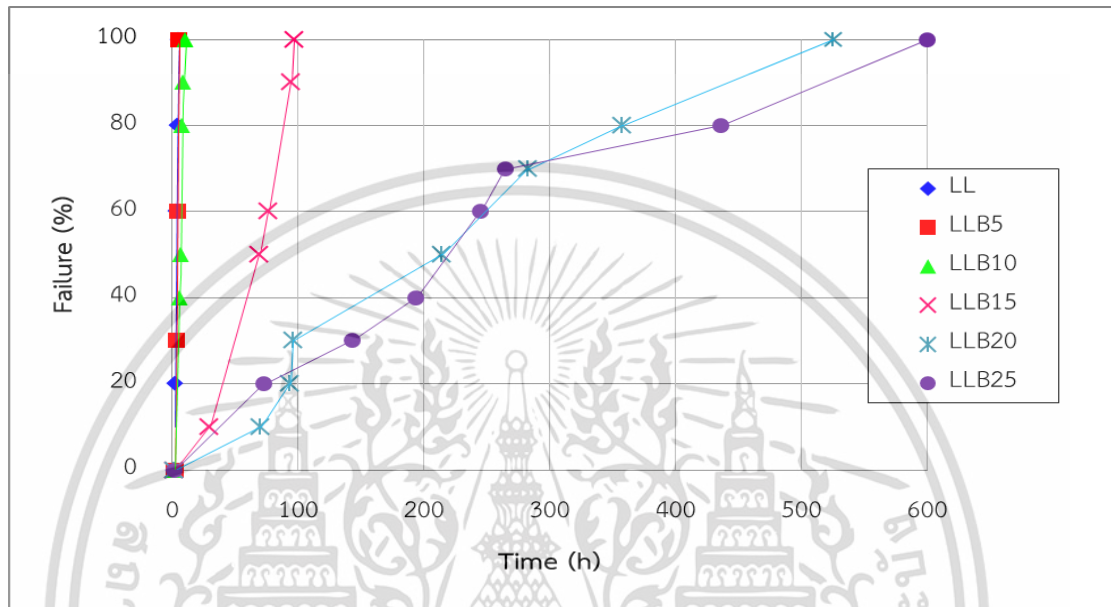
Result below คือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของปริมาณอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าช่วงขนาดของอนุภาคที่กล่าวถึง (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

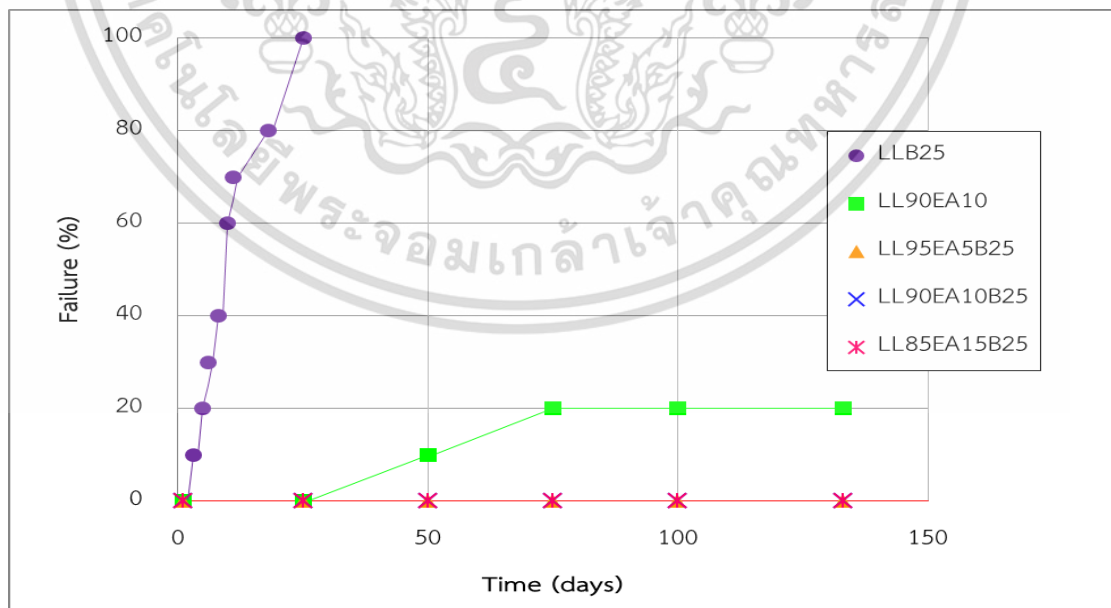
ภาคผนวก จ

การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

จ-1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม



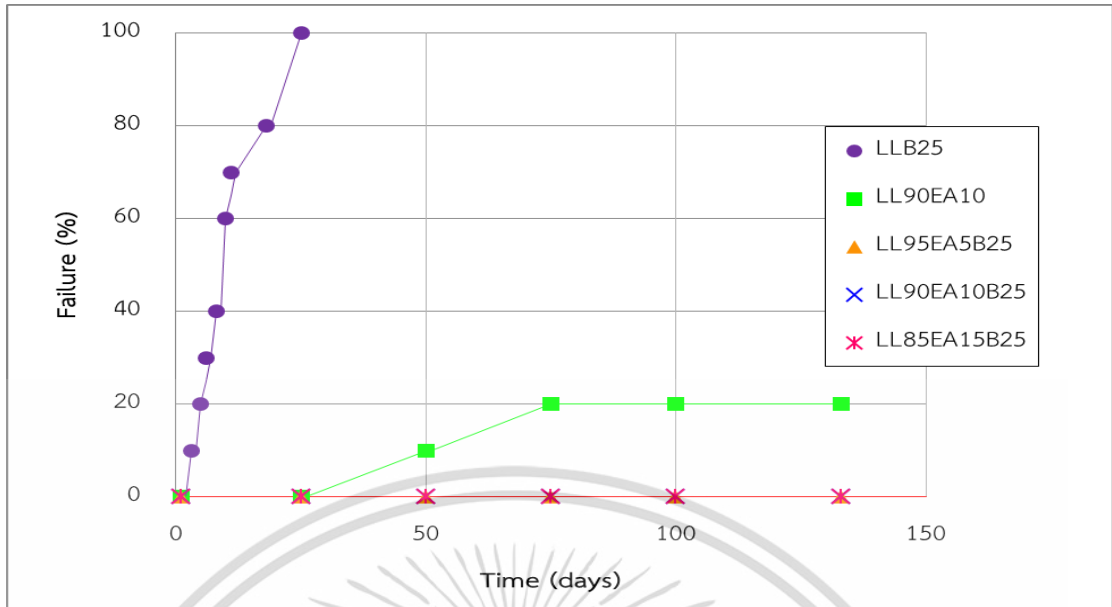
รูปที่ จ-1 ผลการทดสอบสมบัติ ESCR ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ต่างๆ



รูปที่ จ-2 ผลการทดสอบสมบัติ ESCR ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยผสม SA

และการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ที่ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-3 ผลการทดสอบสมบัติ ESCR ของคอมพอสิต LLDPE/EVA/BaSO₄ ที่มีอัตราส่วนของ LLDPE/EVA ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

สมบัติของ BaSO₄

ฉ-1 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบธาตุและสารประกอบออกไซด์ในสารตัวอย่าง BaSO₄ ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

ตารางที่ ฉ-1 องค์ประกอบธาตุและสารประกอบออกไซด์ในสารตัวอย่าง BaSO₄

ธาตุ	ปริมาณ (%wt)	สารประกอบออกไซด์ (%wt)	ปริมาณ (%wt)
O	21.7	-	-
Mg	0.179	MgO	0.297
Al	0.354	Al ₂ O ₃	0.668
Si	0.269	SiO ₂	0.575
S	8.43	SO ₃	21.0
Ca	0.588	CaO	0.823
Fe	0.219	Fe ₂ O ₃	0.313
Cu	0.251	CuO	0.315
Sr	1.12	SrO	1.33
Ba	66.7	BaO	74.5
Compton	0.84	Compton	0.84
Rayleigh	0.95	Rayleigh	0.95
Norm.	100.00	Norm.	100.00

ฉ-2 สมบัติของ BaSO₄ (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

ตารางที่ ฉ-2 องค์ประกอบต่างๆ ของ BaSO₄

BaSO ₄ + SrSO ₄	>98%	Heavy metal max	20 ppm
SiO ₂	0.28%	Electric conductivity	150 μs/cm
Al ₂ O ₃	0.02%	Specific gravity	4.5 g/cm ³
MgO	0.01%	Particle distribution	<10 μm >80
Fe ₂ O ₃	0.06%		<5 μm >60
CaO	0.26%		<2 μm >25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สภาวะการฉีดขึ้นรูป

อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป (°C)

Nozzle Temp.	190
Zone 1 Temp.	180
Zone 2 Temp.	170

เวลาในการฉีดขึ้นรูป (s)

DIE CLS/OPN	50	MELTING	500
SID-COR ACT	30	DECOMPRS	2
1 st STG INJ	20	COOLING	300
2 nd STG INJ	20	3 rd STG INJ	20

ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (%)

RAPID CLS. SPD.	50	DIE CHANGE SPD.	44
HIGH CLS. SPD.	60	DIE ADJ. SPD.	33
CLAMPING SPD.	55	MELTING SPD.	50
DIE OPN. SLW. 1	30	DECOMP. SPD.	0
RAPID OPN. SPD.	30	SCREW-INJ. SPD.	0
DIE OPN. SLW. 2	30	1 st STG ING	30
EJECTION SPD.	30	2 nd STG ING	30
PLUNGER SPD.	40	3 rd STG ING	30

ความดันในการฉีดขึ้นรูป (kg/cm²)

DIE CLS.	50	MELTING	50
CLS LOW.	50	DECOMP.	39
CLS HI.	70	PLUNGER	40
DIE OPN.	22	EJECTOR	20
1 st INJ	30	SCW-IN	50
2 nd INJ	30	DIE ADJ	50
3 rd INJ	30		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวเมธาวี อุตตสุรดี
วัน เดือน ปีเกิด	3 ตุลาคม พ.ศ. 2533
ที่อยู่ปัจจุบัน	165/26 ถ.ตรัง-ปะเหลียน ต.ย่านตาขาว อ.ย่านตาขาว จ.ตรัง
ประวัติการศึกษา	2555 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.67 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโทของคณะวิทยาศาสตร์ สจล.
ผลงานทางวิชาการ	1. Uttasuradee, M. Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S. 2014. “Improved Water Vapor Permeability of LDPE Films using EVOH or EVA Blends.” 215-217. In IUPAC World Polymer Congress 2014, The 45 th International Symposium on Macromolecules (MACRO2014). Chiang Mai. 2. Uttasuradee, M. and Rukchonlatee, S. 2015. “Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene/Barium Sulfate Composites for Sea Fishery Application.” 416-419. In Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON2015). Bangkok.
รางวัลที่ได้รับ	Outstanding poster presentation award ในงานประชุมวิชาการ PACCON2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้