

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตทนแรงกระแทกจาก PP/BaSO₄
สำหรับงานด้านเอกซเรย์

PREPARATION OF POLYMER COMPOSITE WITH ENHANCED
TOUGHNESS FROM PP/BaSO₄ FOR X-RAY RELATED APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-019

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตทนแรงกระแทกจาก PP/BaSO₄
สำหรับงานด้านเอกซเรย์

PREPARATION OF POLYMER COMPOSITE WITH ENHANCED
TOUGHNESS FROM PP/BaSO₄ FOR X-RAY RELATED APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF POLYMER COMPOSITE WITH ENHANCED
TOUGHNESS FROM PP/BaSO₄ FOR X-RAY RELATED APPLICATIONS



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

2019

KMITL-2019-SC-M-014-019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตทนแรงกระแทกจาก PP/BaSO ₄ สำหรับงานด้านเอกซเรย์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐธราเนตร จีระฤทธิ์เฉลิม
รหัสประจำตัว	59605032
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีน (PP) และแบเรียมซัลเฟต (BaSO₄) ให้มีความแข็งแรง และมีความทนแรงกระแทกที่ดี ด้วยการใช้เอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ และเพิ่มความทนแรงกระแทกของคอมโพสิต โดยทำการศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ 10-30%wt และศึกษาผลของปริมาณ EEA 5-20%wt ของพอลิเมอร์ผสมในคอมโพสิต (ควบคุมปริมาณ BaSO₄ 30%wt) และศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่อัตราส่วน PP/EEA คงที่เท่ากับ 95/5 ทำการผสมสูตรโดยใช้เครื่องผสมระบบปิดและทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป โดยทดสอบสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และความสามารถในการบดบังและลดทอนรังสีเอกซ์ จากการศึกษาพบว่า BaSO₄ หน่วงการสลายตัวของ PP และทำให้ PP เกิดนิวเคลียสผลึกแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous nucleation) เกิดเป็นสเฟียรูไลต์ที่มีขนาดเล็กลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ และปริมาณผลึกของ PP การเพิ่ม BaSO₄ ทำให้ยังมอดูลัสและความแข็งแรงของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การตั้งยัด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ในขณะที่ความทนแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการมีสเฟียรูไลต์ขนาดเล็กของ PP และพบว่า การเพิ่ม BaSO₄ ช่วยให้ความสามารถในการบดบังและลดทอนรังสีเอกซ์มีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าความหนาครึ่งค่า (Half value layer, HVL) ลดลงเมื่อเทียบกับ PP ผลของการใช้ EEA ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ พบว่า EEA ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ และปริมาณผลึกของ PP ในคอมโพสิต แต่ EEA ช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ และเพิ่มความทนแรงกระแทกของคอมโพสิต โดยที่ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกด และยังมีมอดูลัสของคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA เนื่องจากความยืดหยุ่นของ EEA อย่างไรก็ตามพบว่า การเพิ่มปริมาณ EEA ส่งผลให้ BaSO₄ เกิดการรวมกลุ่มกันมากขึ้น และพบว่า EEA ไม่มีผลต่อความสามารถในการลดทอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีเอกซ์ของคอมโพสิต เมื่อ BaSO_4 ลดจาก 30 เป็น 20%wt ในคอมโพสิตที่มีอัตราส่วน PP/EEA คงที่เท่ากับ 95/5 ทำให้ EEA ในปริมาณ 5%wt. ของพอลิเมอร์ผสมมีเพียงพอในการช่วยแตกตัวและกระจายตัวของ BaSO_4 (20%wt) ในคอมโพสิต ทำให้คอมโพสิตมีจุดบกพร่องน้อยลง จึงมีความแข็งแรงดี และมีรอยละการดึงยืดที่สูงขึ้น

คำสำคัญ : การบดบั้งรังสีเอกซ์ การลดทอนรังสีเอกซ์ คอมโพสิต พอลิโพรพิลีน แบริยมซัลเฟต เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Preparation of Polymer Composite with Enhanced Toughness from PP/BaSO ₄ for X-Ray Related Applications
Student Name	Miss Nattharanet Treeraritchalerm
Student ID	59605032
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee

Abstract

This research studied the preparation of high stiffness and tough polymer composite from polypropylene (PP) and barium sulfate (BaSO₄). Ethylene ethyl acrylate copolymer (EEA) was employed to improve compatibility between PP and BaSO₄ and to enhance impact strength of composites. BaSO₄ contents were varied from 10-30%wt and EEA loadings in the PP/EEA/BaSO₄ compounds (with 30%wt BaSO₄) were studied at 5-20%wt of polymer blends. Effect of BaSO₄ content in the compounds with a constant PP/EEA ratio of 95/5 were also included. All compounds were prepared using an internal mixer and the specimens were shaped via an injection molding machine. Thermal, mechanical, X-ray shielding and X-ray attenuation properties of composites were investigated. The results revealed that the presence of BaSO₄ enhanced the thermal stability of PP. The heterogeneous nucleation of PP was found when BaSO₄ was presented, resulting in small spherulites of PP. However, the crystalline melting temperature, recrystallization temperature and %crystallinity of PP in all samples were insignificantly changed. Young's modulus and hardness of composites were increased with increasing BaSO₄ loading but %elongation at break was decreased. Nevertheless, impact strength of the composites was increased because of better transfer impact strength from small spherulites of PP in composites. X-ray shielding and attenuation of composites was greater when BaSO₄ was incorporated, corresponding to the decrease of half value layer (HVL) as compared to PP. In addition, EEA did not affect crystalline region of PP in PP/EEA/BaSO₄ composites. Compatibility between PP and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BaSO₄ and impact strength of composites were improved when EEA was presented. On the other hand, tensile strength, hardness and Young's modulus of the composites were decreased with increasing EEA loading because of flexibility of EEA. Moreover, the higher the EEA loadings the larger the number of agglomerations of BaSO₄ were found. X-ray attenuation and shielding of composites did not alter when EEA was incorporated. The decrease of BaSO₄ content from 30 to 20%wt in PP/EEA/BaSO₄ with constant PP/EEA ratio of 95/5 could reduce agglomeration of BaSO₄ in composites. This may be because 5%wt EEA was enough to give good dispersion and distribution of 20%wt BaSO₄, resulting in the decrease of defects and so the increase of tensile strength and %elongation at break of the composites.

Keywords : X-ray Attenuation, X-ray Shielding, Composite, PP, BaSO₄, EEA



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาของ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความดูแลเอาใจใส่ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด ขอขอบคุณคณะกรรมการ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำถึงประเด็นต่าง ๆ ในการศึกษา และชี้แนวทาง ในการแก้ปัญหา การค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม อันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ และสรุปผลการศึกษา รวมทั้งการแก้ไขงานให้สมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุน การเสนอผลงานวิชาการ

ขอขอบคุณ ดร.วิฑิต ผึ้งกัน ผู้อำนวยการกลุ่มมาตรฐานการวัดทางนิวเคลียร์และรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ สำหรับการให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอัสชิ งามล้ำยอง ผู้จัดการอาวุโส ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ทีโอเอเพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการสนับสนุนแบเรียมซัลเฟตที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการสนับสนุน EEA ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบคุณ ครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจให้ทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา ซึ่งผู้เขียนไม่สามารถ กล่าวนามในที่นี้ได้ทั้งหมด หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ นับเป็นความปิติ ยินดีอย่างยิ่งที่ได้ทำงานวิจัยฉบับนี้ขึ้น และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ณัฐรานตร ธีรฤทธิเฉลิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุคอมโพสิต	5
2.1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต.....	5
2.1.1.1 เมตริกซ์.....	5
2.1.1.2 ส่วนเสริมแรง.....	5
2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต	5
2.1.2.1 จำแนกตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง	5
2.1.2.2 จำแนกตามลักษณะการเกิดคอมโพสิต	6
2.1.2.3 จำแนกตามชนิดของวัสดุเมตริกซ์	6
2.1.3 ประโยชน์ของวัสดุคอมโพสิต	7
2.2 พอลิเมอร์ผสม	8
2.3 รังสีเอกซ์.....	11
2.3.1 กำเนิดรังสีเอกซ์.....	11
2.3.2 ชนิดของรังสีเอกซ์.....	12
2.3.3 การดูดกลืนรังสีเอกซ์	13
2.3.4 การทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์	14
2.3.5 การคำนวณความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์	15
2.4 พอลิโพรพิลีน	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของพอลิโพรพิลีน (PP)	15
2.4.2 สมบัติทั่วไปของ PP	17
2.4.3 การใช้งานของ PP	17
2.5 เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์	17
2.5.1 ข้อมูลทั่วไปของ EEA	17
2.5.2 การใช้งาน EEA	18
2.6 แบริยมซัลเฟต	18
2.6.1 ข้อมูลทั่วไปของ BaSO ₄	18
2.6.2 การสังเคราะห์ BaSO ₄	19
2.6.3 การใช้งาน BaSO ₄	20
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	30
3.1 สารเคมี	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ BaSO ₄	33
3.4 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต	33
3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO ₄	33
3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄	33
3.5 กระบวนการขึ้นรูป	34
3.5.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป	34
3.5.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป	35
3.6 การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ ในพอลิเมอร์คอมโพสิต	35
3.7 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของคอมโพสิต	36
3.8 การศึกษาดัชนีการไหล	38
3.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและผลึกของพอลิเมอร์	38
3.9.1 การศึกษาผลึกของ PP	38
3.9.2 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T _m) อุณหภูมิการตกผลึก (T _c) และร้อยละความเป็นผลึก (X _c) ของพอลิเมอร์	38
3.10 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.10.1 การศึกษาการกระจายตัวของของ BaSO ₄ และ EEA ในพอลิเมอร์คอมโพสิต	39
3.10.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของการแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิต	39
3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต	39
3.11.1 การทดสอบการรับแรงดึง	39
3.11.2 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก	40
3.11.3 การทดสอบความแข็งกด	41
3.12 การทดสอบความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์	41
3.13 การทดสอบความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	42
4.1 การวิเคราะห์ BaSO ₄	42
4.2 การศึกษาผลของปริมาณ BaSO ₄ ในพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO ₄	44
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ อุณหภูมิการสลายตัว ของพอลิเมอร์คอมโพสิต	44
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นและดัชนีการไหลของคอมโพสิต	44
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต	46
4.2.3.1 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต	46
4.2.3.2 สัณฐานวิทยาการแตกหักของคอมโพสิต	46
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนและผลึกของพอลิเมอร์	48
4.2.4.1 ลักษณะผลึกของ PP	48
4.2.4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์	49
4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต PP/BaSO ₄	49
4.2.6 ผลการบดบังรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต PP/BaSO ₄	53
4.2.7 ผลการทดสอบความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต	54
4.3 การศึกษาผลของการใช้ EEA	55
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของคอมโพสิต	56
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นและดัชนีการไหลของคอมโพสิต	57
4.3.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของ EEA ใน PP	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต	58
4.3.5 ผลการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์	62
4.3.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต.....	63
4.3.7 ผลการบดบังรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต	66
4.4 ผลของปริมาณ BaSO ₄ ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง PP และ EEA เท่ากับ 95/5	67
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ ในคอมโพสิต.....	67
4.4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต	68
4.4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค BaSO ₄	81
ภาคผนวก ข การคำนวณความหนาแน่นและปริมาตรของคอมโพสิต	82
ภาคผนวก ค DSC เทอร์โมแกรม.....	85
ภาคผนวก ง TGA เทอร์โมแกรม	91
ประวัติผู้เขียน.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของวัสดุต่าง ๆ เทียบกับวัสดุคอมโพสิต	7
2.2 ตัวอย่างการใช้งานพอลิเมอร์คอมโพสิต	8
2.3 ค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ และตัวทำละลาย	10
2.4 สูตรผสมคอมโพสิต PP/BaSO ₄	22
2.5 ความเป็นผลึกของ PP ในสูตร Neat PP และ PP/BaSO ₄	24
2.6 โครงสร้างของสารปรับปรุงพื้นผิว CaCO ₃ แต่ละชนิด	25
2.7 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิต r-HDPE/10 wt.%CaCO ₃ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ของ CaCO ₃ ด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวแต่ละชนิดในปริมาณ 1%wt	26
3.1 สมบัติบางประการของ PP*	30
3.2 สมบัติบางประการของ BaSO ₄ *	31
3.3 สมบัติบางประการของ EEA*	31
3.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PP, EEA และ BaSO ₄ ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต	33
3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PP และ EEA ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีปริมาณ BaSO ₄ คงที่เท่ากับ 30%wt	33
3.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PP, EEA และ BaSO ₄ ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่มีปริมาณอัตราส่วน EEA : BaSO ₄ แตกต่างกัน โดยมีปริมาณ EEA คงที่ 5 %wt ของพอลิเมอร์ผสม	34
4.1 ปริมาณของ BaSO ₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO ₄	44
4.2 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO ₄	45
4.3 T _m , T _c และร้อยละความเป็นผลึกของ PP ในพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO ₄	50
4.4 ความหนาครึ่งค่า (HVL) ของวัสดุที่ความต่างศักย์ 120 kV	55
4.5 ปริมาณของ BaSO ₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์	56
4.6 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต	57
4.7 T _m , T _c และร้อยละความเป็นผลึกของ PP และ EEA ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ EEA แตกต่างกัน	63
4.8 ปริมาณของ BaSO ₄ ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄	67
ก-1 ตารางผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Histogram result table)	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-1	
น้ำหนัก, ความหนาแน่น และปริมาตรของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เคลื่อนที่ผ่านหัวตาย ในการทดสอบหาค่า MFI ที่อุณหภูมิการทดสอบ 230°C)	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างลักษณะและการวางตัวของวัสดุเสริมแรง (ก) คอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงด้วยอนุภาค (ข) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นเรียงตัวแบบสุ่ม (ค) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น เรียงตัวทิศทางเดียว และ (ง) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยาวต่อเนื่อง.....	6
2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม (a) ผสมเข้ากันได้ และ (b) ผสมเข้ากันไม่ได้.....	9
2.3 การทำงานของสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม.....	10
2.4 หลอดผลิตรังสีเอกซ์.....	12
2.5 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ.....	12
2.6 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากการถูกหน่วง.....	13
2.7 โครงสร้างทางเคมีของ PP.....	16
2.8 โครงสร้างของ PP (A) อะแทคติกพอลิโพรพิลีน (B) ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีนและ (C) ซินไดโอแทคติกพอลิโพรพิลีน.....	16
2.9 โครงสร้างของ EEA.....	18
2.10 โครงสร้างของ BaSO ₄	18
2.11 ภาพขยายของ BaSO ₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	19
2.12 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/SGF (a) ความแข็งแรงดึง (b) โมดูลัสความแข็ง และ (c) ความแข็งแรงกระแทก.....	21
2.13 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารปรับปรุงพื้นผิวของ BaSO ₄ ต่างชนิดกัน.....	22
2.14 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO ₄ สูตรต่าง ๆ.....	23
2.15 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ PP/BaSO ₄ สูตรต่าง ๆ.....	23
2.16 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระแทกของ PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่าง ๆ ที่ปริมาณ BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก.....	24
2.17 กราฟ Stress-strain curve ของ PLA (a) และคอมโพสิต PLA/BaSO ₄ ที่ปริมาณ BaSO ₄ ต่าง ๆ (b) 0.5, (c) 1, (d) 2, (e) 5 และ (f) 10%wt.....	26
2.18 ภาพถ่ายทางรังสีของ PLA (a) และ PLA/10 wt.% BaSO ₄ (b).....	27
2.19 ปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านอากาศ, แผ่น PU และแผ่นคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่ความเข้มข้นของ BaSO ₄ 20 และ 40 phr ที่ความหนาของแผ่นตัวอย่าง 2 mm ณ พลังงานรังสีเอ็กซ์ 60 keV.....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น.....	37
3.2 การจัดตั้งเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์.....	41
4.1 SEM micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของ BaSO ₄	42
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับร้อยละในการกระจายตัวของขนาด.....	43
4.3 TGA Thermogram ของ BaSO ₄	43
4.4 ดัชนีการไหลและปริมาตรของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ ตั้งแต่ 0-30%wt.	46
4.5 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO ₄ ใน PP ของพื้นผิวที่แตกหักแตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ ตั้งแต่ 0-30%wt.....	47
4.6 SEM micrographs แสดงการแตกหักบริเวณภาคตัดขวางของคอมโพสิตภายหลังการทดสอบความแข็งแรงกระแทกสูตร P80B20 (ขวา) และคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ 24%wt ของงานวิจัยก่อนหน้า [6] (ซ้าย)	48
4.7 ภาพถ่ายผลึกสเฟียไลต์ของ PP จากเทคนิค POM	48
4.8 Stress- strain curve ของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ ตั้งแต่ 0-30%wt. .	50
4.9 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ ตั้งแต่ 0-30%wt.....	51
4.10 ความแข็งกดของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ ตั้งแต่ 0-30%wt.....	52
4.11 ความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ ตั้งแต่ 0-30%wt.....	53
4.12 फिल्मเอกซเรย์ของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ ตั้งแต่ 0-30%wt.....	53
4.13 ปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง PP และคอมโพสิต PP/BaSO ₄ (P70B30) ที่ความหนาต่าง ๆ ที่คอมโพสิตความหนาต่าง ๆ.....	54
4.14 ดัชนีการไหลและปริมาตรของของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA).....	57
4.15 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของ PP และพอลิเมอร์ผสม P95E5 ก่อนสกัดและหลังสกัด	58
4.16 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของคอมโพสิต P70B30 และ P95E5B30 ก่อนสกัด.....	59
4.17 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 30%wt	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
และมีปริมาณ EEA 0-20%wt. (%wt. ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)	60
4.18 SEM-EDS micrographs แสดงสัญญาณวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวาง ของคอมโพสิต P70B30 และ PP/EEA/BaSO ₄	61
4.19 โมเดลจำลองของระบบคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄	62
4.20 Stress- strain curve ของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA).....	64
4.21 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)	64
4.22 ความแข็งกดของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA).....	66
4.23 ความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)	66
4.24 फिल्मเอกซเรย์ของคอมโพสิต P70B30 และ PP/EEA/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)	67
4.25 SEM micrographs แสดงสัญญาณวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวาง ของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO ₄ ;(a) P95E5B20 และ (b) P95E5B30	68
4.26 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่ปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt ที่มีและไม่มี EEA	69
4.27 ความแข็งกดของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่ปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt ที่มีและไม่มี EEA	71
4.28 ความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/BaSO ₄ ที่ปริมาณ BaSO ₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt ที่มีและไม่มี EEA	71
ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณ BaSO ₄	83
ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของ BaSO ₄	85
ค.2 TGA เทอร์โมแกรมของ PP.....	85
ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของ EEA.....	86
ค.4 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P90B10.....	86
ค.5 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P8020.....	87
ข.6 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P70B30.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.7 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5	88
ค.8 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5B30	88
ค.9 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P90E10B30	89
ค.10 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P85E15B30.....	89
ค.11 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P80E20B30.....	90
ค.12 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5B20.....	90
ง.1 DSC เทอร์โมแกรมของ PP	91
ง.2 DSC เทอร์โมแกรมของ EEA.....	92
ง.3 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P90B10.....	92
ง.4 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P80B20.....	93
ง.5 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P70B30.....	93
ง.6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P95E5.....	94
ง.7 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5B30	94
ง.8 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P90E10B30.....	95
ง.9 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P85E15B30	95
ง.10 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P80E20B30	96
ง.11 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5B20	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุคอมโพสิตเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้น ครอบคลุมอุตสาหกรรมหลักต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการก่อสร้าง อุตสาหกรรมการขนส่ง อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมการแพทย์ ตลอดจนอุตสาหกรรมด้านยานยนต์และอวกาศ เป็นต้น แนวโน้มการใช้งานวัสดุคอมโพสิตที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น เป็นผลเนื่องมาจากในบางการใช้งานการใช้วัสดุเพียงชนิดเดียวอาจให้สมบัติไม่เพียงพอต่อความต้องการ อีกทั้งวัสดุคอมโพสิตมีสมบัติที่หลากหลายและสามารถออกแบบให้เป็นไปตามความต้องการ โดยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์คอมโพสิตจัดเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถผลิต และดัดแปลงได้ง่าย ไม่เกิดการกัดกร่อน มีความแข็งแรงสูง ในขณะที่มีน้ำหนักเบา ทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (อัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุ, Specific strength, σ/ρ) มีค่าสูง [1] ซึ่งเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวัสดุประเภทอื่น เช่น โลหะ หรือ เซรามิก

ปัจจุบันพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงที่ดีขึ้นโดยมักใช้สารเสริมแรงประเภทเส้นใย (Fibrous reinforcement) และสารเสริมแรงประเภทอนุภาค (Particle reinforcement) เช่น การเสริมแรงพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ด้วยเส้นใยแก้ว (Glass fiber) [2], การเสริมแรงพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) [3] และการเสริมแรงไนลอน (Nylon 6) ด้วยอนุภาคไมก้า (Mica) [4] เป็นต้น แต่ในบางกรณีพอลิเมอร์คอมโพสิตอาจถูกออกแบบให้มีสมบัติอื่น ๆ เพื่อการใช้งานที่วัตถุประสงค์จำเพาะออกไป ยกตัวอย่างเช่น การใช้ไมก้าในการลดการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ [5] ซึ่งพอลิเมอร์คอมโพสิตส่วนใหญ่นิยมใช้สารเสริมแรงประเภทเส้นใยมากกว่าสารเสริมแรงประเภทอนุภาค เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ที่สูง และวัฏภาคเสริมแรงมีความต่อเนื่อง ทำให้สามารถรับและกระจายแรงได้ดี อย่างไรก็ตามการใช้สารเสริมแรงประเภทเส้นใยมีความยุ่งยากในการจัดวางทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย มีกำลังการผลิตต่ำ และมีความคล่องตัวน้อย ไม่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนโดยใช้กระบวนการฉีด (Injection molding process) ได้ การใช้สารเสริมแรงประเภทอนุภาคจึงมีความคล่องตัวมากกว่า และมีข้อจำกัดในการผลิตที่น้อย [6]

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกควบคุมจากหลากหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิด ขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรง การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสารเสริมแรง สัดส่วนระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารเสริมแรง ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) และอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารเสริมแรง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่หลากหลาย และสามารถออกแบบให้เป็นไปตามความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางกรณีการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตมีข้อจำกัดเนื่องจากความแตกต่างเรื่องขั้ว (Polarity) ระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์และสารเสริมแรง ทำให้พอลิเมอร์เมตริกซ์และสารเสริมแรงมีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ต่ำ เกิดกระจายตัวที่ไม่ดีของสารเสริมแรงในพอลิเมอร์เมตริกซ์ โดยสารเสริมแรงมีโอกาสเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) เนื่องจากไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์และสารเสริมแรง ทำให้สามารถเติมสารเสริมแรงได้ในปริมาณน้อย ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง จึงมีการใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ เช่น การใช้สารช่วยผสม (Compatibilizer) ในการปรับปรุงความสามารถในการผสมเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์กับสารเสริมแรง การใช้สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติมในพอลิเมอร์เมตริกซ์ และการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ในการปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมตริกซ์และสารเสริมแรง

งานวิจัยที่ผ่านมาของ Mustafa, G.A. และคณะ [7] ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจาก PP และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยพบว่าการมีอยู่ของอนุภาค CaCO_3 ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรง (Modulus) และความแข็งแรงดัด (Flexural strength) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการดัดยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) มีค่าลดลง เนื่องจาก PP และ CaCO_3 มีความแตกต่างกันเรื่องขั้ว และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค ต่อมาพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ด้วยสารคู่ควบ (Glycidoxypropyltri-methoxy silane, GPTMS) ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง และร้อยละการดัดยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอันตรกิริยาที่ดีขึ้นระหว่าง PP และ CaCO_3 โดยเกิดจากพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่าง PP กับหมู่ปลายด้านโพรพิลไกลซิไดลอีเทอร์ (Propylglycidyl ether group) ใน GPTMS ซึ่งยึดติดอยู่บนพื้นผิวของ CaCO_3

งานวิจัยต่อมาของ Wang, K. และคณะ [8] ศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted low density polyethylene, LLDPE-g-MA) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจาก PP และแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และความแข็งแรงของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเนื่องจาก PP และ BaSO_4 มีความสามารถในการเข้ากันได้ที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วของแอนไฮไดรด์มาเลอิก (Maleic anhydride, MAH) สามารถเข้ากันได้ดีกับ BaSO_4 ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขั้ว และส่วนที่ไม่มีขั้วของ LDPE เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับ PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ไม่มีขั้ว

งานวิจัยนี้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตให้มีความแข็งแรงที่ดี ซึ่งทำให้สามารถผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีความหนาแน่นได้ในขณะที่มีความแข็งแรงคงรูปที่ดี โดยเลือกใช้ PP เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ ซึ่ง PP เป็นพลาสติกใช้งานทั่วไป (Commodity plastic) ที่ได้รับความสนใจ และมีการใช้งานอยู่ในอันดับต้น ๆ ของปริมาณพลาสติกทั้งหมด เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี ทำให้มีการ

ใช้งานที่แพร่หลาย รวมถึงมีการนำ PP ไปปรับปรุงใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง หรือพลาสติกวิศวกรรม (Engineering plastic) [9-10] และเลือกใช้ BaSO_4 เป็นสารเสริมแรงประเภทอนุภาค เนื่องจาก BaSO_4 มีความแข็งแรงสูง (3.5-4 Mohs) ทนทานต่อสารเคมี ทนทานต่อการขีดข่วน ราคาถูก และมีสมบัติที่หลากหลายทำให้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลากหลายวัตถุประสงค์ เช่น BaSO_4 มีความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ทำให้มีการผสมลงในคอนกรีตเพื่อทำผนังลดทอนรังสีเอกซ์ในห้องเอกซเรย์ [11] อีกทั้งมีความหนาแน่นสูง (4.5 g/cm^3) จึงมีการนำไปใช้ในพลาสติกที่ต้องการถ่วงน้ำหนัก เช่น กระชังเพาะเลี้ยงปลา

ในการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใช้สารเสริมแรงประเภทอนุภาคที่มีความแข็งแรงสูง และไม่เกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงกระแทก และความสามารถในการดึงยึดของวัสดุมีค่าลดลง [7-8] เนื่องจากความแข็งแรงกระแทกของวัสดุคือ สมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการรับและกระจายแรงเมื่อวัสดุได้รับแรงที่มีความเร็วสูง ซึ่งในพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อวัสดุได้รับแรง พอลิเมอร์เป็นตัวรับและกระจายแรงหลัก จากนั้นส่งผ่านแรงให้แก่สารเสริมแรงซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งที่ไม่สามารถรับ และกระจายแรงได้ ทำให้เกิดเป็นจุดรวมแรงเค้น (Stress concentration) และเกิดการแตกหักได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคส่วนใหญ่มีความแข็งแรงที่ดี แต่มีความเปราะสูง งานวิจัยที่ผ่านมาของเมธาวิ อุตตสุรดี [12] จึงเลือกใช้เอทิลีนไวน์อะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) ในการปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) และ BaSO_4 เนื่องจาก EVA มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ต่ำ โดยมีค่าอยู่ในช่วง -20 ถึง -80°C ทำให้มีความยืดหยุ่นสูง โดยพบว่า EVA สามารถปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ในขณะที่ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง เนื่องจาก EVA มีความยืดหยุ่น ทำให้เกิดการเสียรูปง่ายกว่า LLDPE

ในงานวิจัยนี้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจาก PP และ BaSO_4 ให้มีความแข็งแรง และความแข็งแรงกระแทกที่ดี โดยทำการปรับปรุงความสามารถในการผสมเข้ากันได้และความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตด้วยการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างยึดหยุ่นเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า [12] โดยเลือกใช้เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Crystalline melting temperature, T_m) เท่ากับ 97°C ซึ่งมีค่าสูงกว่า EVA ($T_m = 60-80^\circ\text{C}$) และมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) สูงกว่า EEA [13] (เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ PP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีอุณหภูมิการขึ้นรูปที่สูงกว่า LLDPE ในงานวิจัยก่อนหน้า) โดย EEA ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วของเอทิลอะคริเลตซึ่งสามารถเข้ากันได้กับอนุภาค BaSO_4 ที่มีขั้วและส่วนไม่มีขั้วของสามารถเข้ากันได้กับ PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้ EEA เป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างยึดหยุ่น ทำให้สามารถช่วยในการปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของ

พอลิเมอร์คอมโพสิตได้ โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของปริมาณ BaSO_4 , ผลของปริมาณ EEA และผลของอัตราส่วนระหว่าง BaSO_4 และ EEA ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และศึกษาความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจาก BaSO_4 มีสมบัติในการบดบังและลดทอนรังสีเอกซ์จากที่กล่าวไปแล้วในช่วงต้น ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการปรับใช้พอลิเมอร์คอมโพสิตในงานที่ต้องการความจำเพาะทางด้านรังสีเอกซ์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/ BaSO_4 ให้มีความแข็งแรงสูง ในขณะที่มีความแข็งแรงกระแทกที่ดี และมีความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์ด้วยการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม PP/EEA

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมสูตรผสม PP/ BaSO_4 โดยการใช้ปริมาณของ BaSO_4 เป็น 10, 20 และ 30%wt
- 2) เตรียมสูตรผสม PP/EEA/ BaSO_4 โดยการใช้ปริมาณของ BaSO_4 คงที่ 30%wt และใช้ปริมาณของ EEA เป็น 5, 10, 15 และ 20%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA
- 3) เตรียมสูตรผสม PP/EEA/ BaSO_4 ที่อัตราส่วน PP/EEA คงที่เท่ากับ 95/5 และปรับเปลี่ยนปริมาณ BaSO_4 จาก 30%wt เป็น 20%wt
- 4) ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป และกระบวนการกดอัด
- 5) ตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์ของคอมโพสิตด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC), เทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิส (TGA), เทคนิคแอกเทนนูเอเทดโททาลรีเฟลคชันฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ATR-FTIR), เทคนิคโพลาริซไมโครสโคปี (POM) และเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (SEM)
- 6) ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต ได้แก่ สมบัติความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และความแข็งกด
- 7) ศึกษาความสามารถในการบดบังและลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตด้วยเครื่องเอกซเรย์ (X-ray generator)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถขึ้นรูปคอมโพสิต PP/EEA/ BaSO_4 ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ให้ได้คอมโพสิตที่มีความแข็งแรงสูง และมีความแข็งแรงกระแทกที่ดี
- 2) เป็นแนวทางในการพัฒนา และประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานที่มีความจำเพาะทางด้านรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต (Composites) หรือที่เรียกว่าวัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ [14-15]

2.1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตประกอบไปด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

2.1.1.1 เมตริกซ์

เมตริกซ์ (Matrix) คือองค์ประกอบที่เป็นเนื้อหลัก และมีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอก (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง อีกทั้งยังทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น

2.1.1.2 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforcements) คือ องค์ประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต ซึ่งเป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูงกว่าเมตริกซ์ ส่วนเสริมแรงมีรูปร่างได้หลากหลายแบบ ได้แก่ เป็นแบบแผ่น อนุภาค หรือเส้นใย เป็นต้น

2.1.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

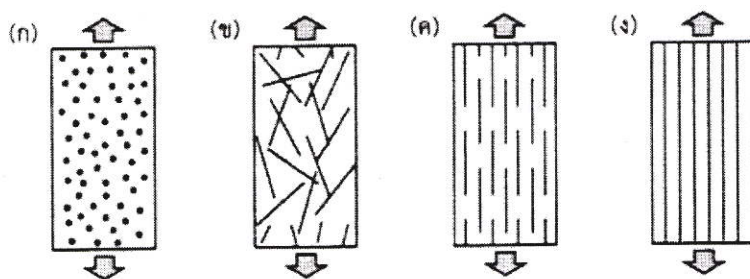
วัสดุคอมโพสิตสามารถจำแนกได้หลายประเภท ดังนี้

2.1.2.1 จำแนกตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง

1. วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คือ ส่วนเสริมแรงเป็นวัตถุที่มีขนาดในทิศต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน ส่วนมากมีขนาดเล็ก มีรูปร่างได้หลากหลาย อาทิเช่น เม็ด (Beads), แผ่น (Flake), ผง (Powder) หรือรูปทรงที่เป็นระเบียบหรือไม่เป็นระเบียบ (รูปที่ 2.1 ก) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการเรียงตัวของอนุภาคมักเป็นแบบสุ่ม (Random orientation) คือไม่มีการจัดเรียงตัวเฉพาะทิศทาง

2. วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) ซึ่งอาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) การวางตัวของเส้นใยนี้ อาจเป็นแบบสุ่มหรือแบบมีทิศทาง (Preferred orientation) (รูปที่ 2.1 ข-ง) เส้นใยที่ใช้มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะและการวางตัวของวัสดุเสริมแรง (ก) คอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงด้วยอนุภาค (ข) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น เรียงตัวแบบสุ่ม (ค) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น เรียงตัวทิศทางเดียว และ (ง) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวต่อเนื่อง [6]

2.1.2.2 จำแนกตามลักษณะการเกิดคอมโพสิต

1. คอมโพสิตธรรมชาติ (Natural composites) คือ คอมโพสิตที่สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตมีเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง และมีพวกลิกนิน (Lignin) ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน เป็นต้น

2. คอมโพสิตสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ คอมโพสิตที่ได้จากการใช้วัสดุสังเคราะห์ เช่น คอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงชนิดสังเคราะห์ เป็นต้น

2.1.2.3 จำแนกตามชนิดของวัสดุเมทริกซ์

1. วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) คือ คอมโพสิตที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์ สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนความร้อนสูง เนื่องจากการขึ้นรูปโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูง และสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้สารเสริมแรงอินทรีย์ และเส้นใยแก้วในการใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิก หรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น

2. วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) คือ คอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์ ด้วยข้อจำกัดทางการใช้งานของเซรามิก คือ เปราะและแตกหักง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้ง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกจึงเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานและใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมโพสิตกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

3. วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composites, PMC) คือ คอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ซึ่งอาจเป็นยางหรือพลาสติก โดยวัสดุเสริมแรงเป็นได้ทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก โดยปกติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ ซึ่งมีความแข็งแรงปานกลางจึงนิยมทำการเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมวัสดุเสริมแรง เช่น อนุภาคของแข็ง และที่นิยมที่สุดคือ การเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงการเสริมแรงนี้ทำให้เมตริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง

ในปัจจุบันวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (พอลิเมอร์คอมโพสิต) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติที่ที่หลากหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา ทำให้ความแข็งแรงจำเพาะมีค่าสูงซึ่งเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวัสดุประเภทอื่น เช่น โลหะ และเซรามิก ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของวัสดุต่าง ๆ เทียบกับวัสดุคอมโพสิต [1]

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรง (MPa)	ความแข็งแรงจำเพาะ (10 ³ N.m/kg)
โลหะอลูมิเนียม	2.70	310	115
โลหะเหล็ก	7.87	365	46
พลาสติกไนลอน 6,6 (Nylon 6,6)	1.14	70	61
คอมโพสิตเส้นใยคาร์บอน-อีพอกซี	1.55	1550	1000
คอมโพสิตเส้นใยเคฟลาร์-อีพอกซี	1.38	1378	999

2.1.3 ประโยชน์ของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตมีการใช้งานหลากหลายและกว้างขวาง โดยเฉพาะพอลิเมอร์คอมโพสิต ตั้งแต่งานที่ไม่ต้องการสมบัติใดโดดเด่นเป็นพิเศษไปจนถึงงานที่ต้องการสมบัติจำเพาะ พอลิเมอร์คอมโพสิตถูกนำไปใช้ในหลายวงการ เช่น อุตสาหกรรมทางทะเล อุตสาหกรรมการขนส่ง การก่อสร้าง เป็นต้น ส่วนมากงานที่ต้องการสมบัติการเสริมแรงที่มักใช้คอมโพสิตเส้นใยเสริมแรง ในขณะที่คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคนั้นมักเป็นในงานลดต้นทุนเป็นหลักตัวอย่างการใช้งานพอลิเมอร์คอมโพสิต แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานพอลิเมอร์คอมโพสิต [1]

ประเภทอุตสาหกรรม	ตัวอย่าง
ยานยนต์	กันชน ฝากระโปรง ห้องโดยสาร ฝาครอบหลอดไฟ ใบพัดต่าง ๆ
เคมี	ถังบรรจุสารเคมี ท่อส่งหรือท่อลำเลียงสารเคมี
ไฟฟ้า	ฝาครอบหรือลำตัวเครื่องใช้ไฟฟ้า ฉนวน ตัวเชื่อม
ที่อยู่อาศัย	ผนังตกแต่งภายในและภายนอก โตะ แก้ว อ่างอาบน้ำ บันได
การบินและอวกาศ	ปีก ลำตัว หาง ถังเชื้อเพลิง ท่อยิงจรวด

2.2 พอลิเมอร์ผสม

ในบางครั้งการใช้งานพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวไม่สามารถให้สมบัติตามที่ต้องการได้ จึงมีการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) คือ การนำพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมรวมกัน โดยเป็นการนำข้อดีของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมาชดเชยข้อด้อยของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้เป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม [16] เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) แม้ว่า PET มีข้อดีหลากหลายประการ อาทิเช่น แข็งแรง มีความคงรูป และทนทานต่อสารเคมี แต่มีความแข็งแรงกระแทกต่ำ ในขณะที่พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว แต่ไม่ทนทานต่อสารเคมี ทำให้ไม่ทนทานต่อการใช้งาน ด้วยเหตุนี้ทำให้มีการนำ PET และ PC มาผสมรวมกัน [17] โดย PET สามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อสารเคมีให้แก่ PC ในขณะที่ PC สามารถปรับปรุงความเหนียวแก่ PET ซึ่งเป็นการนำข้อดีของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมาชดเชยข้อด้อยของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทำให้พอลิเมอร์ผสมเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูง

อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดมาผสมกัน คือ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน โดยปกติแล้วการผสมพอลิเมอร์ต่างชนิดกันให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันนั้นเป็นไปได้ยาก อันเนื่องมาจากหลายปัจจัยที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างทางเคมีของคู่พอลิเมอร์ สัดส่วนของการผสม วิธีการผสม และสภาวะในการผสม เป็นต้น ซึ่งสาเหตุหลักที่มีผลต่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์คือ พลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing, ΔG_m) เป็นไปตามสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังสมการที่ 2.1

หากค่า ΔG_m มีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดการแยกชั้นของวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมกัน (Immiscible polymer blend) เป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีหลายวัฏภาค

หากค่า ΔG_m มีค่าเป็นลบ คือพอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันไปจนถึงระดับโมเลกุล (Miscible polymer blend) เกิดเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีวัฏภาคเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad (2.1)$$

- เมื่อ ΔG_m คือ พลังงานอิสระในการผสม (kJ/mol)
 ΔH_m คือ ความแตกต่างของเอนทาลปีในการผสม (kJ/mol)
 ΔS_m คือ ความแตกต่างของเอนโทรปีในการผสม (kJ/mol)
 T คือ อุณหภูมิ (K)

การจำแนกพอลิเมอร์ผสมตามความแตกต่างของค่า ΔG_m เป็นดังนี้ [18]

1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีค่า ΔG_m เป็นลบ นั่นคือ $\Delta H_m - T\Delta S_m < 0$ ส่งผลให้พอลิเมอร์เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) สมบัติของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด
2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีค่า ΔG_m เป็นบวก นั่นคือ $\Delta H_m - T\Delta S_m > 0$ ส่งผลให้พอลิเมอร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) แรงดึงดูดระหว่างผิวของวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมมีค่าน้อยมาก สมบัติที่ได้มักลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์เดิม



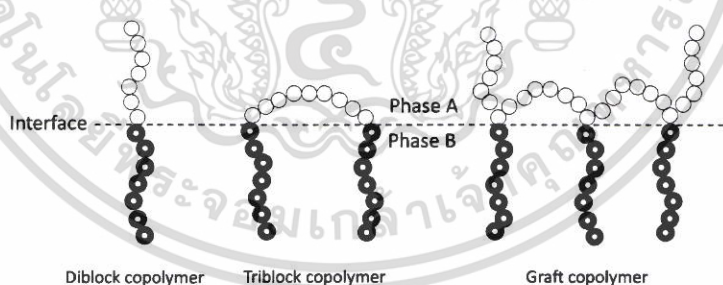
รูปที่ 2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม (a) ผสมเข้ากันได้ และ (b) ผสมเข้ากันไม่ได้ [19]

นอกเหนือจากค่าพลังงานอิสระในการผสม ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการเข้ากันได้ของคู่พอลิเมอร์ คือค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) [20] โดยพอลิเมอร์ชนิดใดที่มีค่าความสามารถในการละลายแตกต่างกันผสมเข้ากันได้ยาก ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Interfacial tension) ที่เกิดขึ้นระหว่างกันสูง เพราะฉะนั้นควรเลือกคู่พอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน จึงผสมเข้ากันได้ดี ตัวอย่างค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และตัวทำละลาย แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และตัวทำละลาย [21]

Polymer	$(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$	Solvent	$(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$
Polyethylene	7.9	Diethyl ether	7.4
Polybutadiene	8.3	Carbon tetrachloride	8.6
Polystyrene	9.1	Xylene	8.85
Poly(ethyl acrylate)	9.2	Toluene	8.9
Polypropylene	9.3	Acetone	9.9
Vinyl acetate	10	Pyridine	10.7
Acrylonitrile	12.5	Glycerol	16.5
Nylon 6,6	13.6	Water	23.4

เนื่องจากข้อจำกัดในด้านการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็น Immiscible blend มีรอยระหว่าง 2 ภูมิภาค ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม จึงได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการใช้สารช่วยผสม ซึ่งมักเป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีโครงสร้างส่วนหนึ่งที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ และอีกส่วนหนึ่งที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับภูมิภาคกระจาย โดยสารช่วยผสมเข้าไปเกี่ยวพันระหว่างภูมิภาคทั้งสอง ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น ความแข็งแรงระหว่างภูมิภาคดีขึ้น นำไปสู่สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [22]



รูปที่ 2.3 การทำงานของสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม [23]

งานวิจัยของ Pivsa-Art, S. และคณะ [24] ศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรยด์ (Maleic anhydride grafted polypropylene, PP-g-MA) ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PP/PLA ผลการทดลองพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PP-g-MA มีความแข็งแรงกระแทกที่มากกว่าพอลิเมอร์ผสม PP/PLA ที่ไม่ใช้สารช่วยผสม ทั้งนี้เนื่องมาจาก PP-g-MA มีปลายด้านหนึ่งที่มีโครงสร้างเดียวกับ PP ทำให้เกิดการเกี่ยวพันที่ติระหว่าง PP กับ PP-g-MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่เดียวกันหมู่ฟังก์ชันแอนไฮดรายด์บน PP-g-MA สามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole force) กับ PLA ได้เช่นกัน ทำให้แรงยึดติดระหว่างวัฏภาคของ PP และ PLA ดีขึ้น

2.3 รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10 ถึง 0.01 นาโนเมตร ตรงกับความถี่ในช่วง 30 ถึง 30,000 เพตะเฮิรตซ์ เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง มีความเร็วการเดินทางในสุญญากาศเท่ากับความเร็วแสง คือ 3.8×10^8 m/s มีสมบัติการสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) และเลี้ยวเบน (Diffraction) เหมือนกับแสง โดยรังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านวัตถุที่ไม่หนาจนเกินไปและมีความหนาแน่นน้อย ๆ ได้ เช่น กระดาษ ไม้ เนื้อเยื่อของคนและสัตว์ อานาจารทะลุทะลวงจะลดลงหากเคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น แพลทินัม ตะกั่ว กระจก เป็นต้น อย่างไรก็ตามรังสีเอกซ์ถูกดูดกลืนโดยวัตถุที่มีเลขเชิงมวลสูง [25]

2.3.1 กำเนิดรังสีเอกซ์

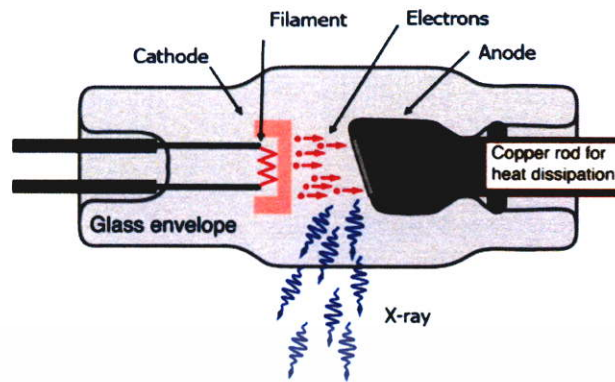
ทฤษฎีอิเล็กตรอนสมัยปัจจุบัน อธิบายถึงการเกิดรังสีเอกซ์ว่า ธาตุประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ในแต่ละอะตอมจะมีนิวเคลียสเป็นใจกลาง และมีอิเล็กตรอนวิ่งวนเป็นชั้น ๆ เมื่ออะตอมของธาตุถูกยิงด้วยกระแสอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในถูกชนหลุดออกมาอยู่ชั้นนอก ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร และตกกลับลงไปยังวงในชั้นในดั้งเดิม พร้อมกลับปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์

ในการผลิตรังสีเอกซ์ทำได้โดยใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงพุ่งชนเป้าที่ทำด้วยอะตอมโลหะหนักภายในหลอดผลิตรังสีเอกซ์ แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบไปด้วย [26-28]

1. หลอดแก้วสุญญากาศ (Glass envelope) เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานของกระแสอิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่ชนกับอนุภาคอากาศ
2. ขั้วแคโทด (Cathode) ประกอบไปด้วยลวดทังสเตน ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสอิเล็กตรอนเมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้า
3. ขั้วแอโนด (Anode) หรือเป้าโลหะทำจากโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวสูงและนำความร้อนดีเพื่อให้สามารถทนความร้อนสูง ๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตเอกซเรย์ โดยกำลังของรังสีจะแปรผันตรงกับเลขอะตอม (Atomic number, Z)
4. น้ำมัน ทำหน้าที่ในการระบายความร้อนของหลอดรังสีเอกซ์

ในการผลิตรังสีเอกซ์ เริ่มจากให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วแคโทดจนร้อน และปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เรียกกระบวนการนี้ว่า Thermionic emission หรือ Edison effect จากนั้นให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงระหว่างขั้วแคโทด และแอโนด ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งจากขั้วแคโทดไปชนเป้าโลหะเกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่ขั้วแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



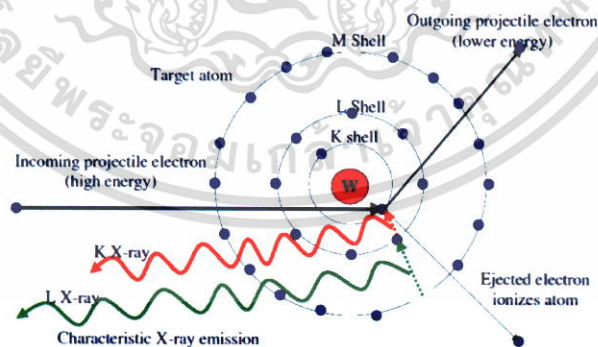
รูปที่ 2.4 หลอดผลิตรังสีเอกซ์ [28]

2.3.2 ชนิดของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากหลอดผลิตรังสีเอกซ์ มีสเปกตรัมที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน 2 ชนิด [28-29]

ดังนี้

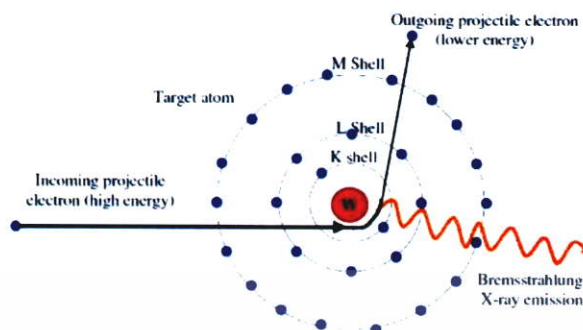
1. รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic X – rays) เกิดจากลำอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดวิ่งเข้าชนอิเล็กตรอนวงใน (K-shell) ของเป้าโลหะ ถ้าพลังงานของอิเล็กตรอนตัวที่วิ่งชนมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรวงในของเป้า ทำให้อิเล็กตรอนวงนั้นหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนจากวงโคจรอื่นที่อยู่วงถัดไปจะวิ่งเข้าไปแทนที่ พร้อมทั้งคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ ซึ่งการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นต่าง ๆ ของอะตอมทำให้เกิดสเปกตรัมลักษณะเฉพาะ มีพลังงานคงตัวขึ้นกับชนิดโลหะของเป้า ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ [29]

2. รังสีเอกซ์จากการถูกหน่วง (Bremsstrahlung) เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งด้วยความเร็วเข้าใกล้นิวเคลียสซึ่งมีประจุบวกส่งผลให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางหรือมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วทำให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนลดลง ส่งผลให้มีการแผ่พลังงานออกมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือโฟตอน ซึ่งเป็นรังสีเอกซ์จากการถูกหน่วง มีพลังงานได้หลายค่า ขึ้นกับชนิดโลหะของเป้า ดังรูปที่ 2.5 ข



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากการถูกหน่วง [29]

2.3.3 การดูดกลืนรังสีเอกซ์

เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใด ๆ เกิดอันตรกิริยาได้ 3 รูปแบบ [29-30] ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect), ปรากฏการณ์กระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering effect) และปรากฏการณ์แฟร์โปรดักชัน (Pair production effect) ซึ่งการเกิดอันตรกิริยาแบบใดนั้นขึ้นกับพลังงานและชนิดของตัวกลาง

การประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์ทางการแพทย์ในการวินิจฉัยโรค โดยการฉายรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปยังตัวกลางที่เป็นร่างกายของมนุษย์ ใช้พลังงานของรังสีเอกซ์ในช่วง 30-150 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ซึ่งในช่วงพลังงานนี้ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และปรากฏการณ์คอมพ์ตัน ทำให้มีการสูญเสียพลังงานไปบางส่วน เมื่อรังสีเอกซ์ทะลุผ่านตัวกลางออกมามีความเข้มลดลง เป็นไปตามสมการของ เบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) [31-32]

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.2)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์เริ่มต้น

I คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านตัวกลาง

x คือ ระยะทางที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

e คือ ค่าคงตัวยูเลอร์ (Euler's constant) มีค่าเท่ากับ 2.718

μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear absorption coefficient)

จากสมการเห็นว่า เมื่อ μ มีค่าสูงตัวกลางนั้นสามารถดูดกลืนเอกซเรย์ไว้ได้มาก รังสีเอกซ์ทะลุผ่านออกมาได้น้อย และในทางกลับกันเมื่อ μ มีค่าน้อยตัวกลางนั้นสามารถดูดกลืนรังสี

เอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นใบใส่ประวัติอันต้นการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกซ์ไว้ได้น้อย รังสีสามารถทะลุผ่านออกมาได้มาก นอกจากนี้พบว่า μ ขึ้นกับชนิดของตัวกลาง และพลังงานของรังสีเอกซ์ กล่าวคือ ถ้าพลังงานของเอกซ์เรย์คงตัว μ มีค่ามากขึ้นถ้าตัวกลางมีความหนาแน่นสูงขึ้นหรือเลขอะตอมสูงขึ้น และสำหรับตัวกลางชนิดหนึ่ง μ มีค่าลดลงถ้าพลังงานของเอกซ์เรย์เพิ่มขึ้น

2.3.4 การทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์

การทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์โดยอาศัยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Generator) เป็นเครื่องมือสร้างรังสีเอกซ์จากพลังงานไฟฟ้า โดยเร่งอิเล็กตรอนจากไส้หลอดเอกซ์เรย์ที่ถูกเผาให้ร้อนแล้วความต่างศักย์แก่ขั้วทั้งสอง ส่งผลให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยและเคลื่อนที่ชนเป้าโลหะที่มีเลขอะตอมสูงๆ เช่น ทังสแตน ทำให้เกิดการเปลี่ยนชั้นพลังงานของโลหะที่ใช้ทำเป้า และคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ รายละเอียดดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.3.1

ในการทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่

1. หลอดเอกซ์เรย์ (X-ray Tube) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์
2. แหล่งจ่ายไฟ (Power supplied) ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงแก่หลอดรังสี
3. ไอออนไนเซชัน แคมเบอร์ (Ionization chambers) เป็นหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ (Gas-filled detector) โดยหัววัดเป็นรูปทรงกระบอกบรรจุอากาศอยู่ภายใน ตรงกลางของแคมเบอร์มีขั้วแอโนดที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกและขั้วแคโทดที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบอยู่บริเวณด้านนอก การตรวจวัดอาศัยหลักการแตกตัวของก๊าซ โดยเมื่อรังสีหรืออนุภาคเข้ามาทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของก๊าซ พลังงานของรังสีจะถ่ายเทให้ก๊าซทำให้เกิดคู่อิออน (ไอออนบวกและไอออนลบ) เมื่อมีความต่างศักย์จ่ายให้ขั้วทั้งสอง (แคโทดและแอโนด) ไอออนบวกจะถูกดึงดูดไปที่ขั้วแคโทดส่วนไอออนลบจะถูกดึงดูดไปที่ขั้วแอโนด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้นปริมาณของกระแสขึ้นกับจำนวนไอออนที่ขั้วแอโนดซึ่งขึ้นกับปริมาณ, ชนิด และพลังงานของรังสีที่เข้ามาทำปฏิกิริยา
4. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Electrometer) ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Ionization chambers
5. เครื่องควบคุม (Controller) ทำหน้าที่ควบคุมค่าพลังงาน ปริมาณ และเวลาในการปลดปล่อยรังสีเอกซ์
6. คอมพิวเตอร์ (Computer) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ
7. แผ่นกรองรังสี (Radiation filter) ทำหน้าที่กรองสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงานที่ไม่ต้องการออก ในการใช้แผ่นกรองรังสีแต่ละชนิดกับพลังงานของรังสีเอกซ์ [33]

ในการทดสอบจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ kV, mA, ระยะทาง และเวลาตามความเหมาะสมในแต่ละการทดสอบ [34]

2.3.5 การคำนวณความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์

ในทางปฏิบัตินิยมหาความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์ 2 รูปแบบคือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น และสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวล [35-36] ซึ่งนิยมหาจากสมการเอกซ์โพเนน และความหนาครึ่งค่า โดยอาศัยเทคนิคเทรนไลน์ ในซอฟต์แวร์ของไมโครซอฟท์ (Microsoft excel)

1. การหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นจากสมการเอกซ์โพเนน

การหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นจากสมการเอกซ์โพเนน โดยการพลอตกราฟระหว่างความหนาของวัสดุ (x) กับปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุ เป็นไปตามสมการเอกซ์โพเนนของเบียร์-แลมเบิร์ต

2. การหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นจากความหนาครึ่งค่า

ความหนาครึ่งค่า (Half value layer, HVL) หมายถึง ความหนาของวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีเอกซ์ได้ครึ่งหนึ่ง (50%) เป็นไปตามสมการที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งสัมพันธ์กับสมการของเบียร์และแลมเบิร์ต

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu(HVL)} \quad (2.2)$$

$$\mu = \frac{\ln 2}{HVL} \quad (2.3)$$

การหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวล โดยการนำสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุ ดังสมการ 2.4

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.4)$$

2.4 พอลิโพรพิลีน [37-40]

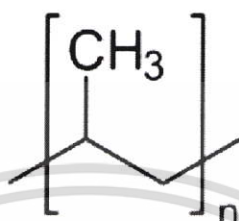
พอลิโพรพิลีน (PP) จัดเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ผลิตจากมอนอเมอร์ของโพรพิลีน มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสี ผิวเป็นมันเงา มีความสามารถในการทนการกัดกร่อนจากกรดและเบสหรือสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ภายในครัวเรือน, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของพอลิโพรพิลีน

- IUPAC name : Poly(propene)
- ชื่อพ้อง (Synonyms) : 1-propene homopolymer, Polypropene
- สูตรเคมี : $(C_3H_6)_n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

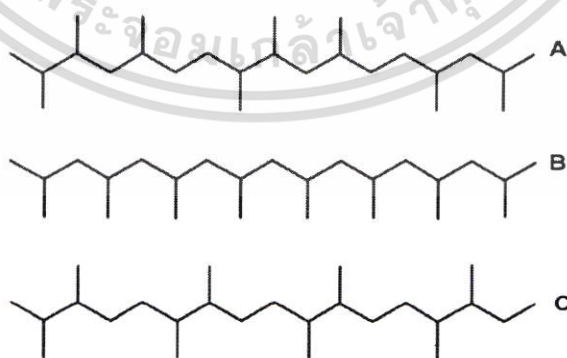
- จุดหลอมเหลว : 130-170°C
- ความหนาแน่น : 0.85-0.95g/cm³
- ร้อยละการดูดน้ำ : < 0.05%
- สัญลักษณ์พลาสติกรีไซเคิล : เลข 5 หมายถึง Resin identification code 5



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ PP [39]

พอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งตามโครงสร้าง หรือลักษณะการเกาะของหมู่เมทิล (Methyl group) บนสายโซ่หลักได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene) เป็นโครงสร้างของ PP ที่มีการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิลไว้ด้านเดียวกันของสายโซ่หลัก ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบสูงเกิดผลึกได้มาก และมีความแข็งแรงมากที่สุด จึงนิยมนำมาใช้กันโดยทั่วไปในงานพลาสติกขึ้นรูป
2. ซินไดโอแทคติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene) เป็นโครงสร้างของ PP ที่มีการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิลสลับกันไปมาบนสายโซ่หลัก ทำให้มีความเป็นระเบียบน้อยกว่าไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งนำไปสู่ความเป็นผลึกที่ลดลง
3. อะแทคติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene) เป็นโครงสร้างของ PP ที่มีการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิลอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้มีความเป็นผลึกน้อยที่สุด



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ PP (A) อะแทคติกพอลิโพรพิลีน (B) ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน และ (C) ซินไดโอแทคติกพอลิโพรพิลีน [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สมบัติทั่วไปของ PP

- มีผิวแข็ง ทนทานต่อรอยขีดข่วน ไม่เสียรูปร่าง
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- มีความต้านทานต่อการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี
- ทนทานต่อสารเคมี
- สามารถทนอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ (Sterilization) ได้ดีเพราะมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง (130-170°C)
- ไม่มีสี ง่ายต่อการผสมสี

2.4.3 การใช้งานของ PP

- ภาชนะต่าง ๆ เช่น จาน ชาม แก้ว
- ชิ้นส่วนของรถยนต์ เช่น คอนโซลรถ กันชน
- อุปกรณ์ภายในบ้าน เช่น เก้าอี้และโต๊ะพลาสติก
- เส้นใย
- บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ

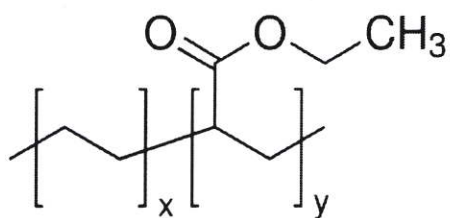
2.5 เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ [16]

เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (EEA) เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับเอทิลอะคริเลต (Ethyl acrylate, EA) จัดเป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงถึง 400°C ซึ่งสูงกว่าโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนชนิดอื่น ๆ เช่น EVA และ เอทิลีนเมทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethyle methyl acrylate copolymer, EMA) โดย EEA ทำการสังเคราะห์ภายใต้ความดันสูง มีความยืดหยุ่น สามารถผสมเข้ากันได้กับพอลิโอเลฟิน

2.5.1 ข้อมูลทั่วไปของ EEA

- ชื่อทางเคมี (Chemical name) : Ethylene/ethyl acrylate copolymer
- ชื่อพ้อง (Synonyms): 2 Propenoicacid, ethylester, Polymer with ethane ; poly(ethylene-co-ethyl acrylate)
- สูตรเคมี : $C_{21}H_{36}O_6X_2$
- อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) : 97°C
- อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) : <-35°C
- ความหนาแน่น : 0.93 g/cm³
- ลักษณะ : ขอบแข็ง ไม่มีสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ EEA [12]

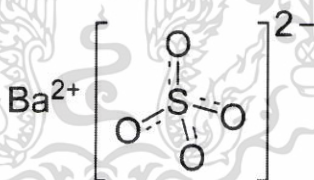
2.5.2 การใช้งาน EEA

- ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถยืดหยุ่นได้
- ใช้ในการปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ที่แข็งเปราะ
- ใช้เป็นชั้นกาว (Tie layers) ระหว่างพอลิโอเลฟินกับพื้นผิวที่มีขี้ เช่น โลหะ, เซลลูโลส แก้ว และอลูมิเนียมฟอยล์ หรือยึดติดระหว่างพอลิโอเลฟินที่ไม่มีขี้กับพอลิโอเลฟินที่มีขี้

2.6 แบเรียมซัลเฟต

แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) เป็นสารประกอบไอออนิกที่เป็นกากแร่โลหะ มักเกิดร่วมกับตะกั่ว สังกะสี เงิน ทองแดง โคบอลต์ หรือ เกิดเป็นก้อนแร่ตกค้าง (Residual messes) ในดินเหนียวที่ซ้อนอยู่บนหินปูนหรือเป็นวัตถุประสานในหินทราย

2.6.1 ข้อมูลทั่วไปของ BaSO_4

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ BaSO_4 [41]

- สูตรเคมี : BaSO_4
- น้ำหนักโมเลกุล : 233.34 g/mol
- ลักษณะ : ผงของแข็งสีขาว ทึบแสง
- สี : ปกติแล้วเป็นสีขาวขุ่นหรือหลากสี อย่างไรก็ตาม อาจปรากฏเป็นสีอื่น ๆ ได้ขึ้นอยู่กับสิ่งปนเปื้อนตกค้าง ระหว่างที่แรดกผลึก
- ธาตุองค์ประกอบ (%wt)
 - Barium (Ba) = 58.84
 - Sulfur (S) = 13.74
 - Oxygen (O) = 27.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความถ่วงจำเพาะ : 4.5
- จุดหลอมเหลว : 1580°C
- ค่าการละลาย (Ksp) : 1.0842×10^{-10} (at 25°C)
- ความสามารถในการละลาย : ไม่ละลายในน้ำหรือแอลกอฮอล์ แต่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น
- ความแข็ง : 3.5-4.0 Mohs
- โครงสร้างผลึก : ผลึกรูปแผ่นและผลึกรูปเพชร



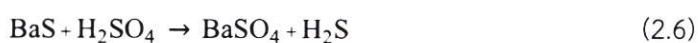
รูปที่ 2.11 ภาพขยายของ BaSO₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

2.6.2 การสังเคราะห์ BaSO₄ [42]

ในการสังเคราะห์ BaSO₄ เกือบทั้งหมดในเชิงพาณิชย์ เตรียมโดยการนำแร่แบไรต์ (Mineral barite) ซึ่งเป็นกากโลหะจึงมักมีสิ่งเจือปนสูง มาเข้ากระบวนการปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน (Carbothermal reduction : heating with coke) ผลผลิตที่ได้ออกมาเป็นแบเรียมซัลไฟด์ (Barium sulfide, BaS) ดังแสดงในสมการที่ 2.3



BaS ที่เกิดขึ้นสามารถละลายน้ำได้ จึงเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำและถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบออกไซด์ (Oxide) ในรูปของ คาร์บอเนต และเฮไลด์ (Halide) จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) เพื่อตกตะกอน จะได้ BaSO₄ ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดย BaSO₄ ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยกรดข้างต้นเรียกว่า บลังฟิซ (Blanc fixe) ซึ่งเป็นภาษาฝรั่งเศสแปลว่า สีขาวที่บริสุทธิ์ (Permanent white)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การใช้งาน BaSO₄ [43]

- นำมาใช้เป็นโคลนสำหรับประสานในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งต้องผ่านกระบวนการบดให้ละเอียด และผสมเข้ากับน้ำรวมทั้งสารเคมีและแร่ชนิดอื่น ๆ หลังจากนั้นจึงลำเลียงผ่านบ่บ่มแรงดันสูงลงหลุมเจาะ น้ำหนักของแร่จะช่วยลดแรงดันของน้ำมัน และก๊าซจากหลุมเจาะในประเทศไทย แร่แบไรต์ควรได้รับการตรวจสอบปริมาณสารปนเปื้อนจำพวกซีเมนต์ ซิเดอไรต์ พิโรไทต์ ยิปซัม หรือแอนไฮไดรต์ ก่อนนำไปใช้ ในอุตสาหกรรมขุดเจาะ

- BaSO₄ มีความสามารถในการดูดซับรังสีเอกซ์และแกมมา จึงมีนำมาใช้เพื่อการถ่ายภาพทางการแพทย์สำหรับการวินิจฉัยโรคต่าง ๆ โดยเฉพาะโรคในช่องท้องและทางเดินอาหาร ซึ่งรู้จักกันในชื่อที่คุ้นเคยว่าอาหารแบเรียม (Barium meal) และนำเข้าสู่ร่างกายผู้ป่วยโดยการรับประทานหรือสวนทางทวารหนัก(Enema) โดย BaSO₄ อยู่ในรูป Suspension ของผงละเอียดที่กระจายตัวในสารละลายน้ำ ถึงแม้ว่าแบเรียมเป็นโลหะหนักที่สารประกอบของมันเมื่อละลายน้ำถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้วเป็นพิษสูง แต่เนื่องจาก BaSO₄ ละลายน้ำได้น้อยมากคนไข้จึงไม่ได้รับอันตรายจากพิษของมัน

- ใช้เป็นสีขาวสำหรับการผลิตสี โดยถ้าผสมกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยเรียกว่า ลิโทโปน (Lithopone) และผสมกับโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) เรียกว่าบลิงฟิกส์

- สามารถนำไปผสมกับซีเมนต์ เพื่อทำบรรจุภัณฑ์เก็บสารกัมมันตภาพรังสี

- ใช้ในการผลิตผ้าเบรกและคลัทช์ สำหรับรถยนต์ รถบรรทุก

- เป็นสารตัวเติม (Filler) ในการทำพลาสติก หรือในงานที่ต้องการเพิ่มน้ำหนัก เช่น แห อวน ยางรองฐานกรวยจรวด เป็นต้น

- ใช้ BaSO₄ เกรดนาโน ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความโปร่งใส (Transparent polymer) สำหรับทำเป็นกระจกด้านข้างรถ (Side windows) และกระจกหลังคารถ (Sunroof) โดย BaSO₄ สามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วน

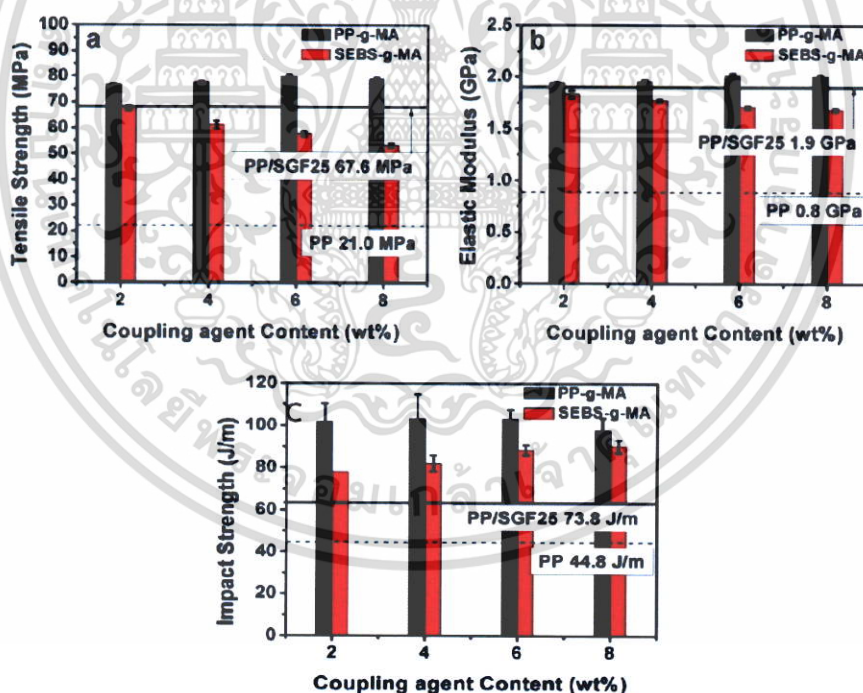
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jia, L.H. และคณะ [2] ศึกษาผลของการใช้ PP-g-MA และสไตรีนเอทิลีนบิวทิลีนสไตรีนบล็อกโคพอลิเมอร์ (Styrene-ethylene-butylene-styrene block copolymer, SEBS-g-MA) ในการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ในพอลิคอมโพสิตที่เตรียมจาก PP และเส้นใยแก้วชนิดสั้น (Shot glass fiber, SGF) ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ SGF ในปริมาณ 25 %wt และปรับเปลี่ยนปริมาณ PP-g-MA และ SEBS-g-MA เท่ากับ 2, 4, 6, และ 8%wt ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเทคนิค DSC พบว่า การมีอยู่ของ SGF ในปริมาณ 25%wt ส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) ของ PP มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า SGF ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ใน PP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการศึกษสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/SGF (รูปที่ 2.12) พบว่าการใช้ PP-g-MA ในปริมาณ 2%wt ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 2.12 a), ยังมอดุลัส (ความแข็งแรง) (รูปที่ 2.12 b) และความแข็งแรงกระแทก (รูปที่ 2.12 c) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ติขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยแก้วกับ PP-g-MA ในขณะที่การใช้ SEBS-g-MA ในปริมาณ 2%wt ส่งผลให้ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง และยังมอดุลัสมีค่าลดลง เนื่องจากการมีอยู่ของ SEBS ซึ่งมีวัฏภาคของยางบิวทาไดอีนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่า PP

การเพิ่มขึ้นของ SEBS-g-MA จาก 2-8%wt ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง และยังมอดุลัสของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง ในขณะที่พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการมีอยู่ของ SEBS ซึ่งมีวัฏภาคของยางบิวทาไดอีนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความแข็งแรงดึงน้อยกว่าพอลิเมอร์ แต่สามารถรับ และกระจายแรงที่มีอัตราการให้แรงที่สูงได้ดีกว่าพอลิเมอร์ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณ PP-g-MA ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต



รูปที่ 2.12 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/SGF (a) ความแข็งแรงดึง (b) ยังมอดุลัส และ (c) ความแข็งแรงกระแทก [2]

Wang, K. และคณะ [44] ศึกษาเกี่ยวกับขนาดของผลึก และอัตราการขยายของผลึก PP ที่มี BaSO_4 ขนาดอนุภาค $1.29 \mu\text{m}$ เป็นสารตัวเติม โดยใช้ชนิดของสารปรับปรุงพื้นผิวของ BaSO_4

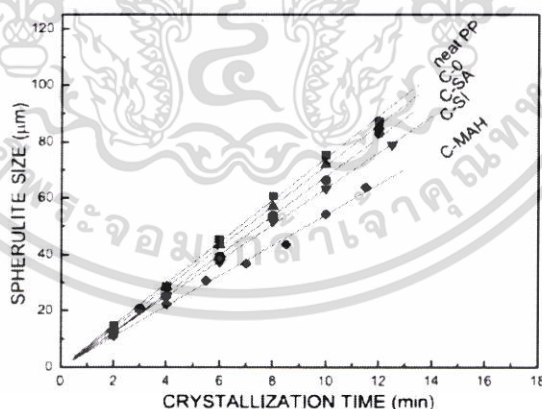
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แตกต่างกันเตรียมคอมโพสิตผ่านด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนอนคู่แบบหมุนตามกัน โดยในทุกตัวอย่างประกอบด้วย BaSO₄ 0.5%wt ได้สูตรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สูตรผสมคอมโพสิต PP/BaSO₄ [44]

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 2.13) พบว่าเมื่อเวลาในการตกผลึกเพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางผลึกสเฟียรูไลต์ของ PP มีค่าเพิ่มขึ้นและจะหยุดเมื่อผลึกขยายตัวมาชนกัน โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งพบว่าอัตราการเติบโตของผลึกของ PP ลดลง โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่มีค่าลดลง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึก PP ทุกสูตรผสมมีค่าน้อยกว่าใน Neat PP นอกจากนี้การใช้สารปรับปรุงพื้นผิวของ BaSO₄ ต่างชนิดกันส่งผลต่ออัตราการเกิดผลึกของ PP ซึ่งพบว่าสารปรับปรุงพื้นผิวที่มีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาค BaSO₄ กับ PP ที่ดี (C-MAH > C-SI > C-SA > C-0) ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลึกลดน้อยลง เนื่องจากบริเวณที่มีอันตรกิริยาที่ดีเปรียบเหมือนกับการถูกเชื่อมโยงทางกายภาพ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยาก

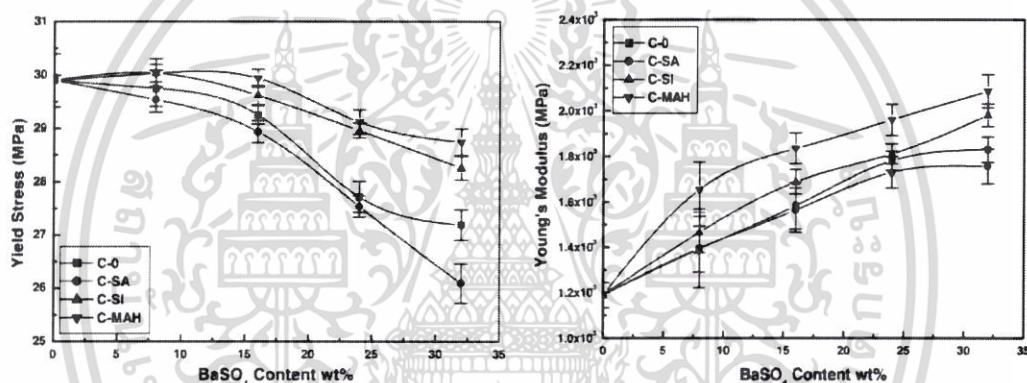


รูปที่ 2.13 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO₄ ที่มีการใช้สารปรับปรุงพื้นผิวของ BaSO₄ ต่างชนิดกัน [44]

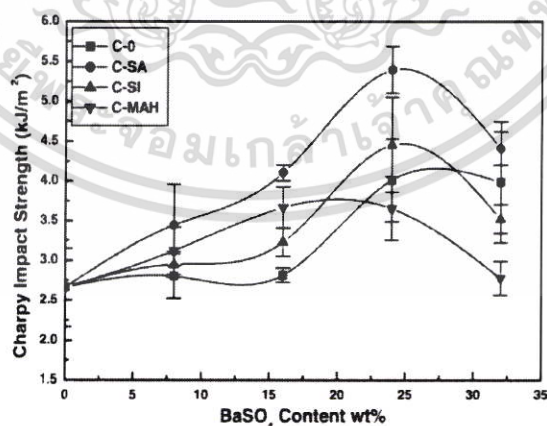
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PP/BaSO₄ [8, 45] ที่ปริมาณ BaSO₄ 8-32%wt พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 16%wt เป็นต้นไป ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึง ณ จุดคราก (Yield stress)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง (รูปที่ 2.14) เนื่องจากความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างภูมิภาคการเติม BaSO₄ ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขั้วลงในเมตริกซ์ PP ซึ่งไม่มีขั้ว ทำให้การยึดติดระหว่างภูมิภาคไม่ดี ส่งผลให้เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงยึด วัสดุมีโอกาสเกิดการเสียหายบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคได้ง่าย ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่างมอดุลัส (ความแข็งแรง) ของวัสดุ (Young's modulus) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก BaSO₄ มีค่างมอดุลัสมากกว่า PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ ผลของการใช้สารปรับปรุงพื้นผิว BaSO₄ ต่างชนิดกันที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ พบว่า C-MAH และ C-SI ให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และความแข็งแรงสูงกว่าสูตรอื่น ๆ เนื่องจากมีการยึดติดระหว่างภูมิภาคที่ดี โดยหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์ ในมาเลอิก (Maleic anhydride, MAH) หรือหมู่ไซลันอล (Silanol) ในไซเลน สามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole force) กับ BaSO₄ ได้ อีกทั้ง C-MAH และ C-SI เป็นสูตรที่มีความเป็นผลึกสูงกว่าสูตรอื่น ๆ (ตารางที่ 2.5)



รูปที่ 2.14 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO₄ สูตรต่าง ๆ [8]



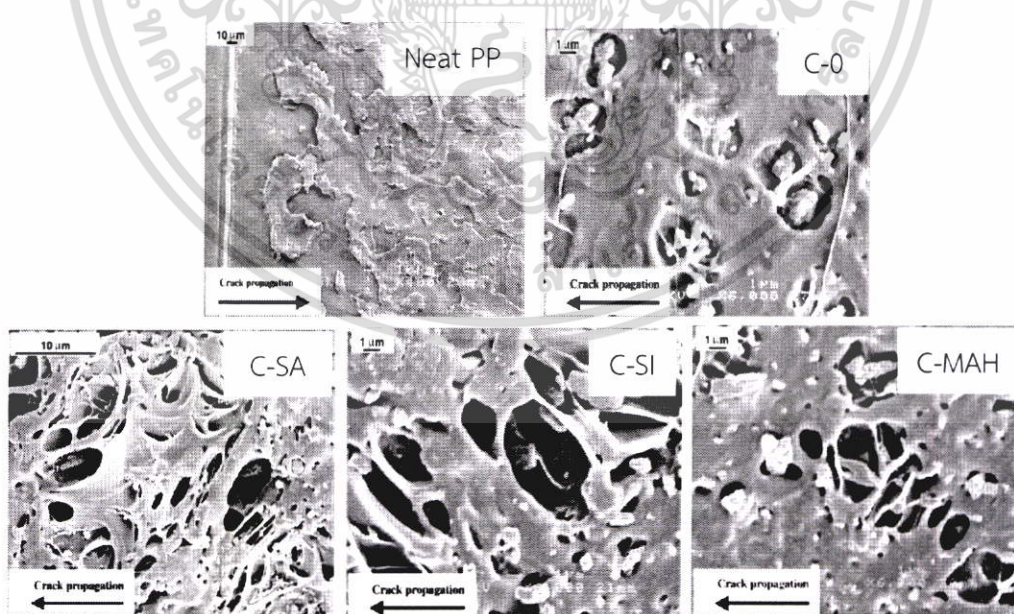
รูปที่ 2.15 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ PP/BaSO₄ สูตรต่าง ๆ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ความเป็นผลึกของ PP ในสูตร Neat PP และ PP/BaSO₄ [45]

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก (X _c)
Neat PP	46.4
C-0	47.1
C-SA	44.5
C-SI	50.3
C-MAH	52.9

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (รูปที่ 2.15) พบว่า PP/BaSO₄ ทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่า Neat PP เนื่องจากโดยปกติแล้ว Neat PP เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle failure) ยืนยันได้จาก SEM micrographs รูปที่ 2.16 ของชิ้นงานตัวอย่างหลังการทดสอบความแข็งแรงกระแทก ในขณะที่ PP/BaSO₄ เมื่อได้รับแรงกระแทกเกิดการเสียหายแบบครีช และการหลุดออกระหว่างพอลิเมอร์และ BaSO₄ (Debonding-cavitation) เกิดเป็นช่องว่างระหว่างภูมิภาคของ PP และ BaSO₄ อันเนื่องมาจากรีขบวนการที่ไม่ดีบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาค ส่งผลให้เกิดเป็นเส้นใย (Ligament) ของ PP โดยเส้นใยที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยกว่าพอลิเมอร์บริเวณอื่น ทำให้เมื่ออยู่ภายในระนาบเดียวกับกับแรงเค้น (Plane-stress) จะเกิดการเสียหายแบบ Shear yielding เส้นใยเกิดการยืดออกตามแนวแรง ซึ่งสามารถรับและกระจายแรงได้ดีขึ้นก่อนเกิดการแตกหัก (Cracking)



รูปที่ 2.16 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระแทกของ PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่าง ๆ ที่ปริมาณ BaSO₄ 24%wt [8]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phueakbuakhao, N. และคณะ [46] ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจาก รีไซเคิลพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (Recycle high density polyethylene, r-HDPE) และ CaCO_3 (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย $2 \mu\text{m}$) ปริมาณ 10%wt โดยใช้ชนิดของสารปรับปรุงพื้นผิวที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวทุกชนิดในปริมาณเท่ากัน (1%wt) มีค่าความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงดัด, ความแข็งแรงกระแทก และร้อยละการดึงยืด จุดขาดสูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 (ตารางที่ 2.7) แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงระหว่างรอยต่อวัฏภาคของ r-HDPE และ CaCO_3 ที่ได้รับการปรับปรุง

การปรับปรุงความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ r-HDPE และ CaCO_3 เป็นผลมาจาก หมู่ปลายโพรพิลไตรเอทอกซีใน AMPTES และ หมู่ปลายโพรพิลไตรเมทอกซีใน GPTMS เกิดปฏิกิริยากับพื้นผิวของ CaCO_3 ส่วนปลายของหมู่อะมิโนใน AMPTES และ GPTMS ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดเพียงการเกี่ยวพันเชิงกลกับ r-HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์

การเคลือบอนุภาค CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริกสามารถเพิ่มการกระจายตัวของ CaCO_3 โดย SA จะหันหมู่ฟังก์ชันที่มีหัวของกรดคาร์บอกซิลิกเข้าหา CaCO_3 และหันส่วนที่ไม่มีหัวของปลายสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเข้าหา r-HDPE ทำให้อนุภาค CaCO_3 เกิดการรวมตัวน้อยลง ทำให้มีจุดบกพร่องลดลง

ตารางที่ 2.6 โครงสร้างของสารปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 แต่ละชนิด [46]

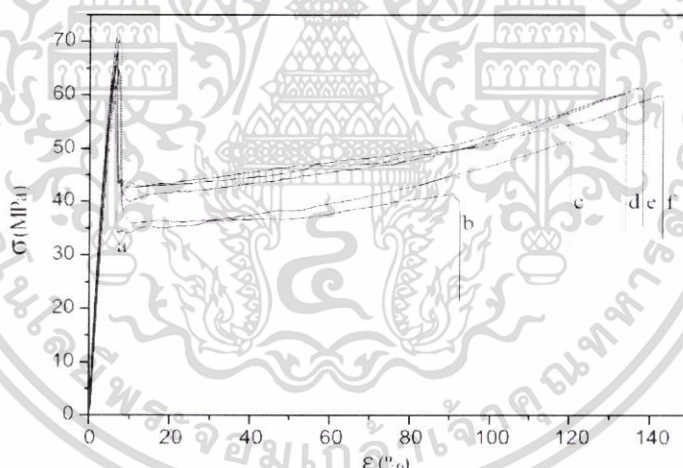
อักษรย่อ	สารปรับปรุงพื้นผิว	โครงสร้างทางเคมี
SA	Stearic acid	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{17}-\text{CH}_2-\text{COOH}$
AMPTES	3-Aminopropyltriethoxy silane	$\text{NH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3)_3$
GPTMS	3-Glycidoxypropyltrimethoxy silane	$\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_3)_3$ 
MA-g-HDPE	Maleic anhydride grafted HDPE	

ต่อมางานวิจัยนี้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารปรับปรุงพื้นผิวเป็น 2, 3, 4 และ 5%wt เพื่อหาปริมาณในการใช้สารปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสมและให้สมบัติเชิงกลที่สูงที่สุดในคอมโพสิต พบว่า คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA, AMPTES, GPTMS และ MA-g-HDPE ที่ 1, 2, 3 and 4%wt

ตารางที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของคอมโพสิต r-HDPE/10 %wt CaCO₃ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO₃ ด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวแต่ละชนิดในปริมาณ 1%wt

สารปรับปรุงพื้นผิว	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความแข็งแรงดัด (MPa)	ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m ²)	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%)
Untreated	14.01	19.87	10.28	18.77
SA	15.68	24.93	13.23	21.65
AMPTES	15.16	23.80	12.03	21.08
GPTMS	14.98	23.73	11.11	19.52
MA-g-HDPE	15.27	22.75	11.96	20.19

Arenaza, I.M. และคณะ [47] ศึกษาสมบัติเชิงกล และการบดบังรังสีเอกซ์ของ PLA โดยมี BaSO₄ ขนาดอนุภาค 0.75-1.0 μm เป็นสารตัวเติม ที่ปริมาณ 0.5, 1, 2, 5 และ 10%wt พบว่า BaSO₄ มีการกระจายตัวที่ดีในวัฏภาคของ PLA โดยมีการแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ไม่เกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน อันเนื่องมาจากทั้งอนุภาคของ BaSO₄ และ PLA เป็นวัฏภาคที่มีขั้ว



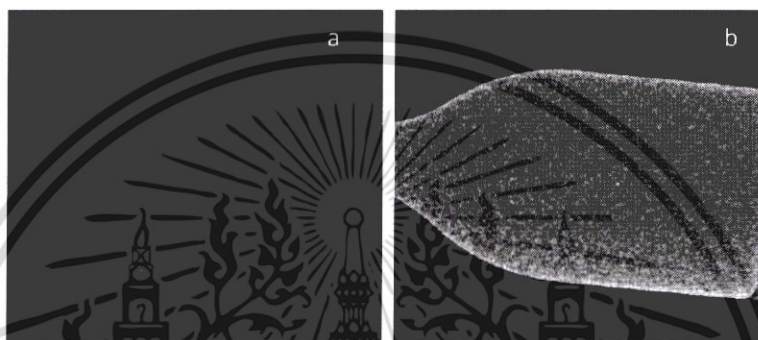
รูปที่ 2.17 กราฟ Stress-strain curve ของ PLA (a) และคอมโพสิต PLA/BaSO₄ ที่ปริมาณ BaSO₄ ต่าง ๆ (b) 0.5, (c) 1, (d) 2, (e) 5 และ (f) 10%wt [47]

ผลการทดสอบการรับแรงดึงพบว่า ยังมอดูลัสของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ในขณะที่ความแข็งแรงดึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่า ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ โดยร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตที่ปริมาณ BaSO₄ 10%wt มีค่าเพิ่มสูงขึ้นถึง 3338 % (จาก 3.90% ถึง 134.1%) แสดงในรูปที่ 2.17 ทั้งนี้เป็นผลมากจากการเกิดปรากฏการณ์ Debonding-cavitation และ Shear yielding ส่งผลให้วัสดุสามารถเกิดการดึงยืดได้มากกว่าเกิดการเสียหาย โดยให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang, K. และคณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[44] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกระจายตัวและแตกตัวที่ติของ BaSO_4 และเกิดเมื่อสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคเล็ก (เล็กกว่า $5 \mu\text{m}$) [48]

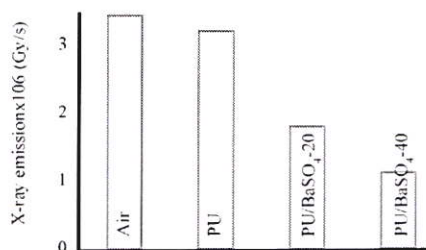
ผลการบดบังรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต PLA/ BaSO_4 รายงานผลการทดลองเป็นภาพถ่ายทางรังสีดังรูปที่ 2.18 พบว่าการมีอยู่ของ BaSO_4 ส่งผลให้ความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้น สังเกตจากภาพถ่ายทางรังสีมีพื้นที่สีขาวแสดงถึงการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่มากขึ้น เนื่องจากจากอะตอม Ba เป็นธาตุหนัก (เลขอะตอมเท่ากับ 56) และมีความหนาแน่นสูงกว่า PLA ทำให้สามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้



รูปที่ 2.18 ภาพถ่ายทางรังสีของ (a) PLA และ (b) PLA/10 %wt BaSO_4 [47]

ทิวาวลัย อธิชาติกุล และคณะ [35] ศึกษาการลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมโพสิต PU/ BaSO_4 โดยใช้ปริมาณ BaSO_4 20, 30, 40 และ 50 phr จากนั้นขึ้นรูปแผ่นคอมโพสิต และทำการทดสอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมโพสิตทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Generators โดยรายงานค่าเป็นปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านคอมโพสิต (X-ray emission $\times 10^{-6}$, Gry/s) (รูปที่ 2.19) พบว่าพบว่ามีปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านคอมโพสิต ที่มี BaSO_4 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศ และ PU เช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของ BaSO_4 มากขึ้น ปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านคอมโพสิตมีค่าลดลงตามลำดับเนื่องจากอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแบเรียมซัลเฟต คือ Ba ซึ่งเป็นธาตุหนัก ทำให้มีความสามารถลดทอนรังสีเอกซ์ได้ดีกว่าพอลิยูรีเทน ซึ่งมีองค์ประกอบของอะตอมธาตุเบา ได้แก่ C, O, H (เลขอะตอมเท่ากับ 12, 16 และ 1 ตามลำดับ) และเนื่องจาก BaSO_4 เป็นสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ จากการที่อิเล็กตรอนใน K-shell ของอะตอมแบเรียมมีพลังงาน 37.5 kVp (Kilovoltage peak) ซึ่งอยู่ในช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (26-40 kVp) ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO_4 มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผ่านอากาศ, แผ่น PU และแผ่นคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ความเข้มข้นของ BaSO₄ 20 และ 40 phr ณ พลังงานรังสีเอกซ์ 60 kV [35]

เมธาวิ อุตตสุรตี [12] ทำการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตที่เตรียมจาก LLDPE โดยใช้ BaSO₄ เป็นสารตัวเติม (0-25 php) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ 25 php การกระจายตัวของ BaSO₄ ในวัฏภาคของ LLDPE ไม่ดี มีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและมีการหลุดออกของอนุภาค BaSO₄ บริเวณพื้นผิว ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างขั้วของ BaSO₄ และ LLDPE ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ต่ำ ส่งผลให้ร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทก ของคอมโพสิตมีค่าลดลง ในขณะที่ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น จึงมีการนำ SA มาเคลือบอนุภาคของ BaSO₄ เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของ BaSO₄ ในเมตริกซ์ แต่ไม่พบความเปลี่ยนแปลงต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตหลังการใช้ SA เนื่องจาก SA ไม่สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของ BaSO₄ และ LLDPE ได้ ต่อมางานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ผลพบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทก ยังคงไม่ได้รับการปรับปรุง เนื่องจากการมีอยู่ของอนุภาค BaSO₄ ยังมีขนาดใหญ่ จึงเป็นจุดรวมแรงค้ำทำให้คอมโพสิตเกิดการแตกหักได้ง่าย ต่อมาจึงได้มีการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) โดยใช้ LLDPE กับ EVA เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิต ผลพบว่า EVA ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของ BaSO₄ ใน LLDPE อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิต ร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงมีค่าลดลง เนื่องจาก EVA เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถเสียรูปได้ง่ายกว่า LLDPE

จากหลากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้สารปรับปรุงพื้นผิว SA ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารตัวเติมที่มีขั้ว ในพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว และมีการใช้สารช่วยผสม เช่น PE-g-MA, SEBS-g-MA และ PP-g-MA ในปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมตริกซ์ และสารตัวเติม ส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงเชิงกลที่เพิ่มขึ้น แต่พบว่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากความแข็งแรงระหว่างรอยต่อที่เพิ่มขึ้น ทำให้คอมโพสิตสามารถรับและกระจายแรงที่มีอัตราการให้แรงที่เร็วได้ไม่ดี งานวิจัยเมธาวิ อุตตสุรตี [12] จึงมีการใช้ EVA ในการปรับปรุงแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄

งานวิจัยนี้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄ โดยใช้ PP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ซึ้ มาทำคอมโพสิตร่วมกับ BaSO₄ ที่มีซึ้ ซึ่งมีความสามารถในการเข้ากันได้ต่ำ อีกทั้ง PP มีความเปราะสูงเมื่อเทียบกับ PE เพราะฉะนั้นการนำ PP มาทำคอมโพสิตร่วมกับ BaSO₄ ซึ่งมีความแข็งที่สูง จะส่งผลให้คอมโพสิตมีความเปราะเพิ่มขึ้นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงใช้โคพอลิเมอร์ของเอทิลีนที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำมีโครงสร้างยืดหยุ่นเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า [12] ในการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ และเพิ่มความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิต โดยเลือกใช้ EEA แทนการใช้ EVA ซึ่งมีการใช้งาน EEA ในด้านพอลิเมอร์ผสม และคอมโพสิตที่หลากหลาย เนื่องจากเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น อาทิเช่น การใช้ EEA ในการปรับปรุงความแข็งแรงกระแทก และการดูดซับน้ำของไนลอน 6 [49] ตลอดจนการทำเป็นฟิล์ม EEA นาโนคอมโพสิตร่วมกับการใช้โปรตีนเซอีนจากแป้งข้าวโพด [50] อีกทั้ง EEA มีอุณหภูมิหลอมเหลวล็ก และเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า EVA [13] ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ PP เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีอุณหภูมิการผสมและขึ้นรูปที่สูงกว่า PE นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่า BaSO₄ มีความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาทั้งสมบัติเชิงกล และความสามารถในการบดบัง และลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตเพื่อเป็นแนวทางในการปรับใช้พอลิเมอร์คอมโพสิตเฉพาะทางด้านรังสี



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิโพรพิลีน เกรดฉีดขึ้นรูป 1100NK, บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)
2. แบเรียมซัลเฟต เกรดตกตะกอน SY 1250 (ไม่มีการเคลือบผิว), บริษัท ไททานอส จำกัด
3. เอทิลีนเอทิลอะครีเลต โคพอลิเมอร์ (EEA) เกรด AMPLIFY™ EA 101, บริษัท ดาว เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด
4. ไซลีน (Xylene) เกรดการค้า, บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
5. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂), บริษัท ลินเด (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
6. Surfactant Pervitro 75%, บริษัท บริษัท เมทเธอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PP*

สมบัติ	1100NK	หน่วย	วิธีการทดสอบ
ดัชนีการไหล (Melt flow index, 2.16 kg/230°C)	11	g/10 min	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	0.85-0.95	g/cm ³	ASTM D792
จุดหลอมเหลว (Melting point)	165	°C	-
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	36	N/mm ²	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield)	26	%	ASTM D638
ความแข็งแรงกระแทก (Charpy notched impact strength (at 23°C))	3	mJ/mm ²	DIN 53453
ความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอ (Flexural modulus, 1% Secant)	1500	MPa	ASTM D790
ความแข็ง (Hardness, shore D)	79	-	ASTM D785
อุณหภูมิคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature (Load 0.45 N/mm ²))	110	°C	ASTM D 648

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ BaSO₄*

สมบัติ	SY 1250	หน่วย
ลักษณะ (Appearance)	ผงสีขาว	-
ขนาด (Median diameter)	3.0	µm
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	4.5	g/cm ³
pH	6.5-9.0	-
ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility in water)	<0.3	%
ความบริสุทธิ์ของ BaSO ₄	>98	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ EEA*

สมบัติ	EEA 101	หน่วย	วิธีการทดสอบ
เอทิล อะคริเลต (Ethyl acrylate)	18.5	%	ASTM D3594
ดัชนีการไหล (2.16 kg/190°C)	6	g/10 min	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	0.931	g/cm ³	ASTM D792
จุดหลอมเหลว (Melting temperature, T _m)	97.8	°C	Dow method
อุณหภูมิตกผลึก (Peak crystallization temperature, T _c)	82.8	°C	Dow method
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก	3	MPa	ASTM D638
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	13	MPa	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดคราก	10	%	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	750	%	ASTM D638
ความแข็งแรงต่อการโค้งงอ (Flexural modulus, 2% Secant)	55	MPa	ASTM D790
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	672	kJ/m ²	ASTM D1822
ความแข็งกด (Shore D)	31	-	ASTM D2240

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd.)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น Bosco A600, Bosco Engineering Co., Ltd.)
3. เครื่องปั๊มลม (Air compressor, รุ่น SB-10/90, Siriwat Corporation (1976) Co., Ltd.,)
4. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine, รุ่น TTI 200/80, บริษัท ประทานกิจถาวร จำกัด)
5. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding machine, รุ่น LP 20; Lab tech engineering Co., Ltd.)
6. เครื่องทำรอยบาก (Ceast, รุ่น Yasuda No. 7686, Yausda seiki seisakusho Ltd.)
7. เครื่อง Density kit (รุ่น ML-DNY-43, Mattler-toledo Co., Ltd.)
8. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermal gravimetric analyzer, TGA, รุ่น Pyris 1 TGA, PerkinElmer Co., Ltd.)
9. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential mechanical analyzer, DSC, รุ่น DSC7, PerkinElmer Co., Ltd.)
10. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM, รุ่น QC-536 M1, Cometech Co., Ltd.)
11. เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (Izod impact tester, รุ่น QC-639P; Astro Instrument Co., Ltd.)
12. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonik™ Cleaner model, Output frequency: 44-48 KHz, Fisher scientific worldwide Co., Ltd.)
13. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR, รุ่น FTIR Spectrum Gx, Perkin Elmer)
14. เครื่องเอกซเรย์ เจนเนอเรเตอร์ (X-ray generator, รุ่น Model, YXLON (Beijing) X-Ray Equipment Trading Co., Ltd)
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM, รุ่น QUANTA 250)
16. กล้องโพลาไรซ์ไมโครสโคป (Polarization Microscope, รุ่น Nikon, POTIPHOT2-POL, Hollywood International Co., Ltd)
17. ตู้อบลมร้อน (Universal oven, รุ่น ML204, Memmert (Germany) Co., Ltd.)
18. เครื่องชั่งละเอียด (Balance, Model รุ่น ML3002/01, Mattler-toledo Co., Ltd.)
19. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียร์คาลิปเตอร์
20. บริษัทเครื่องแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของ BaSO₄

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ BaSO₄ โดยการนำตัวอย่างผง BaSO₄ โรยลงบนเทปคาร์บอน ก่อนนำไปติดบนสตัป (Stub) จากนั้นเคลือบด้วยทองคำ และทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

3.4 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/ BaSO₄

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/ BaSO₄ ในการศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ โดยทำการเตรียมให้ได้ปริมาณโดยน้ำหนักของ PP และ BaSO₄ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PP และ BaSO₄ ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

สูตร	ปริมาณสาร (%wt)	
	PP	BaSO ₄
P100	100	-
P90B10	90	10
P80B20	80	20
P70B30	70	30

3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ในการศึกษาผลของปริมาณ EEA ในคอมโพสิตที่ปริมาณ BaSO₄ คงที่เท่ากับ 30%wt โดยทำการเตรียมให้ได้อัตราส่วนของ PP และ EEA (คิดเป็น %wt ของพอลิเมอร์ผสม 70 ส่วน) ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PP และ EEA ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณ BaSO₄ คงที่เท่ากับ 30%wt

สูตร	ปริมาณสาร (%wt)		
	พอลิเมอร์		BaSO ₄
	PP	EEA	
P95E5B30	66.5	3.5	30
P90E10B30	63	7	30
P85E15B30	59.5	10.5	30
P80E20B30	56	14	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ในการศึกษาผลของ BaSO₄:EEA ที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt โดยมีอัตราส่วน PP/EEA คงที่เท่ากับ 95/5 ทำการชั่งปริมาณของ PP, EEA และ BaSO₄ ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PP, EEA และ BaSO₄ ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีอัตราส่วน EEA : BaSO₄ แตกต่างกัน โดยมีปริมาณ EEA คงที่ 5%wt ของพอลิเมอร์ผสม

สูตร	ปริมาณสาร (% โดยน้ำหนัก)		
	พอลิเมอร์		BaSO ₄
	PP	EEA	
P95E5B20	76	4	20
P95E5B30	66.5	3.5	30

ทำการเขย่าให้ส่วนผสมต่าง ๆ เข้ากันได้เบื้องต้น จากนั้นทำการผสมพอลิเมอร์คอมโพสิตทุกสูตรด้วยเครื่องผสมระบบปิด โดยควบคุมอัตราส่วนปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดต่อปริมาตรของห้องผสม (Fill factor) ให้อยู่ในช่วง 0.6-0.7 โดยตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 190 °C
- ความเร็วรอบ 100 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 15 min

พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดพลาสติก

3.5 กระบวนการขึ้นรูป

3.5.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

การขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการบวนการฉีดขึ้นรูป โดยการนำพอลิเมอร์คอมพาวนด์ที่ผ่านการเตรียมในหัวข้อที่ 3.4 มาทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป ตั้งสภาวะของเครื่องจักร ดังนี้

อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูป (°C)

- Nozzle Temperature 210
- Zone 1 Temperature 210
- Zone 2 Temperature 210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (%)

- 1st STG INJ 10
- 2nd STG INJ 10
- 3rd STG INJ 10

เวลาในการฉีดขึ้นรูป (s)

- 1st STG INJ 30
- 2nd STG INJ 30
- 3rd STG INJ 30

ความดันในการฉีดขึ้นรูป (kg/cm²)

- 1st INJ 40
- 2nd INJ 40
- 3rd INJ 40
- 4th INJ 50

อุณหภูมิการหล่อเย็น (°C) 17-20

เวลาในการหล่อเย็น (s) 30

3.5.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป

การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบในการทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยการนำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผ่านการบดมาทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด ใช้กรอบโลหะหนา 1 mm ในการควบคุมความหนาของแผ่นชิ้นงาน โดยใช้สภาวะการกดอัด ดังนี้

- อุณหภูมิในการกดอัด 230 °C
- อุณหภูมิในการหล่อเย็น 18-20 °C
- ความดันในการกดอัด 1500 psi
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 2 min
- เวลาในการกดอัด 4 min
- เวลาในการหล่อเย็น 20 s

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ ในพอลิเมอร์คอมโพสิต

การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ ในพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นหาปริมาณ BaSO₄ ด้วยเครื่อง TGA โดยกำหนดสภาวะในการทดสอบ ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

▪ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้	5-10	mg
▪ อุณหภูมิ	50-550	°C
▪ อัตราการให้ความร้อน	10	°C/min
▪ บรรยากาศ	Air zero	

นำข้อมูลที่ได้จาก TGA Thermogram มาหาปริมาณ $BaSO_4$ ที่แน่นอน และอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตตามมาตรฐาน ASTM D1131 [51]

3.7 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของคอมโพสิต

การหาความหนาแน่นของคอมโพสิตตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method A) [52] สามารถหาได้จากของเหลวที่ทราบความหนาแน่น (ρ_0) ซึ่งได้แก่ น้ำกลั่น โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 22.5 °C ($\rho_0 = 0.9977 \text{ g/cm}^3$ at 22.5 °C) ด้วยการใช้เครื่องชั่งตวงน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ประกอบพร้อมกับชุดวัดความหนาแน่น (Density kit) ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ [51]

1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด 5 X 5 X 3 mm³
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a)
3. หยด Surfactant Pervitro 75% ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารทำให้เปียก (Wetting agent) ประมาณ 3 หยด ซึ่ง Wetting agent จะทำให้น้ำกลั่นแพร่ไปบนชิ้นงานตัวอย่างได้ดีขึ้นโดย Surfactant จะไปลดความตึงผิวของน้ำกลั่น (ก่อนทำการทดสอบรองจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกลั่นคงที่)
4. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในอากาศโดยวางชิ้นงานตัวอย่างบน Pan ดังแสดง ในรูปที่ 3.1 (b) กดบันทึกค่าน้ำหนักที่ชั่งได้
5. หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในน้ำกลั่น
 - a. กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบคว่ำ ดังรูปที่ 3.1 (c) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปใต้น้ำกลั่นโดยค่อย ๆ ใช้แท่งแก้วคนต้นตัวอย่างให้อยู่ภายใต้ Basket ก่อนทำการกดบันทึกน้ำหนัก ต้องมั่นใจว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบไม่ลอยอยู่บนน้ำกลั่น และไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น
 - b. กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบหงาย ดังรูปที่ 3.1 (d) จากนั้นวางตัวอย่างลงบน Basket และกดบันทึกน้ำหนัก
6. หลังจากวัดน้ำหนักของตัวอย่างในตัวกลางที่เป็นอากาศและในตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่น

แล้ว กดปุ่มคำนวณ เครื่อง Density kit จะแสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง (ρ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง

A คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ

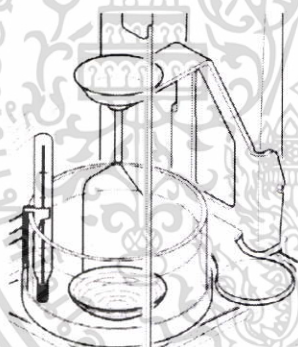
B คือ น้ำหนักของอากาศที่ชั่งในของเหลว

V คือ ปริมาตรของตัวอย่าง

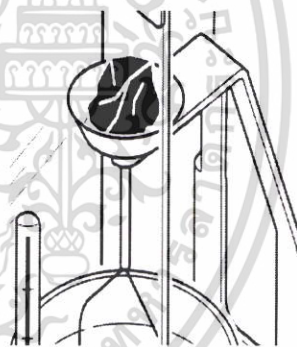
ρ_0 คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่ทราบความหนาแน่น

ρ_L คือ ความหนาแน่นของอากาศ (0.0012 g/cm^3)

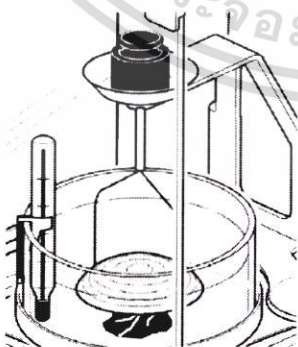
α คือ Weight correction factor (0.99985)



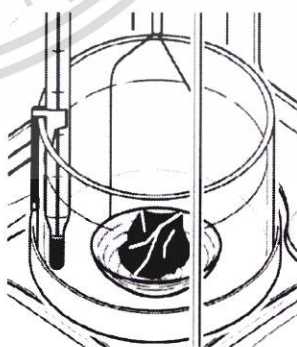
(a) ลักษณะการจัดวางเครื่องมือ



(b) การชั่งตัวอย่างในตุ้กล่างอากาศ



(c) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ
การชั่งตัวอย่างที่มี น้อยกว่าน้ำหนักถ่วง



(d) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ
การชั่งตัวอย่างที่มี มากกว่าน้ำหนักถ่วง

รูปที่ 3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การศึกษาดัชนีการไหล

การศึกษาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตตามมาตรฐาน ASTM D 1238 [54] ด้วยเครื่องวัดดัชนีการไหลที่อุณหภูมิ 230°C น้ำหนักกดทับ 2.16 kg โดยรายงานค่าเป็นน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เคลื่อนที่ผ่านหัวตายในหน่วยกรัมต่อ 10 นาที (g/10 min)

3.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อน และผลึกของพอลิเมอร์

3.9.1 การศึกษาผลึกของ PP

การศึกษาลักษณะผลึกของ PP โดยทำการหลอมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ด้วยความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 200 เท่า บันทึกภาพที่ได้ด้วยการถ่ายภาพผ่านกล้องโทรศัพท์มือถือ

3.9.2 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และร้อยละความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์

การศึกษสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC กำหนดสภาวะในการทดสอบ ดังนี้

▪ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้	5-10	mg
▪ อุณหภูมิ	25-220	°C
▪ อัตราการให้ความร้อน	10	°C/min
▪ อัตราการให้ความเย็น	10	°C/min
▪ บรรยากาศ	N ₂	

สารตัวอย่างถูกให้ความร้อน จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุด 220°C และทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลที่ได้จาก DSC Thermogram มาหาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และร้อยละความเป็นผลึก (X_c) ตามมาตรฐาน ASTM E794 [55] นำค่าความร้อนในการหลอมผลึก (Heat of fusion, ΔH_f) มาคำนวณหาร้อยละความเป็นผลึกได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{Heat of fusion, } \Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.1)$$

$$\text{ร้อยละความเป็นผลึก (} X_c \text{)} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{(\% \text{ โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่เกิดผลึกที่มีอยู่จริง})} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก 100% ของ PP มีค่าเท่ากับ 207 J/g และของ EEA (ใช้ของ PE) มีค่าเท่ากับ 293 J/g [56]

3.10 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต

3.10.1 การศึกษาการกระจายตัวของของ $BaSO_4$ และ EEA ในพอลิเมอร์คอมโพสิต

การศึกษารูปร่างการกระจายตัวของของ $BaSO_4$ และ EEA ในพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยการบากชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปเป็นรูปตัววี (V notch) ด้วยเครื่องทำรอยบาก จากนั้นแช่ลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้ค้อนตีชิ้นงานบริเวณรอยบากในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่

▪ การกระจายตัวของ $BaSO_4$ ใน PP

การกระจายตัวของ $BaSO_4$ ใน PP โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการหักบริเวณพื้นที่ตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของ $BaSO_4$ ใน PP ด้วยเทคนิค SEM ด้วยโหมดการจับภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI) ที่กำลังขยาย 3,000 และ 6,000 เท่า และโหมดการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า

▪ การกระจายตัวของ EEA ใน PP

นำชิ้นงานที่ผ่านการหักแช่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 ml ที่บรรจุตัวทำละลายไซลีน 50 ml ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ ปิดบีกเกอร์ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ วางในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานส่วนพื้นที่ตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของ EEA ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 3,000 และ 6,000 เท่า

3.10.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของการแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิต

การศึกษาสัณฐานวิทยาของการแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยการนำชิ้นงานภายหลังจากทดสอบความแข็งแรงกระแทกที่บริเวณพื้นผิวแตกหักมาทำการเคลือบด้วยทองคำ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 3,000 และ 6,000 เท่า

3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

3.11.1 การทดสอบการรับแรงดึง

การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ค่ายังมอดุลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ตามมาตรฐาน ASTM D638 [57] ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแบบประสมงค์ โดยการทดสอบทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ใช้สภาวะทดสอบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 2 kN
- ความเร็วในการดึง (cross head speed) 50 mm/min
- ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) 30 mm

สมบัติต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = \frac{F_{at \text{ yield}}}{A} \quad (3.3)$$

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = \frac{F_{at \text{ break}}}{A} \quad (3.4)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)} = \frac{(l_{at \text{ yield}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.5)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)} = \frac{(l_{at \text{ break}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.6)$$

$$\text{ค่า Young's Modulus (Young's Modulus)} = \frac{\Delta \text{ Stress at 5-6 \% strain}}{\Delta \text{ strain at 5-6 \%}} \quad (3.7)$$

เมื่อ	$F_{at \text{ yield}}$	คือ	แรงดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
	$F_{at \text{ break}}$	คือ	แรงดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
	$l_{at \text{ yield}}$	คือ	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
	$l_{at \text{ break}}$	คือ	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l_0	คือ	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน เท่ากับ 30 mm

หมายเหตุ ค่า Young's Modulus คำนวณจากความชันที่ร้อยละการดึงยืด 5 และ 6

3.11.2 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D256 [58] ใช้มาตรฐานแบบไอซอด โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป บางเป็นรูปตัววี ด้วยเครื่องทำรอยบาก โดยมีรัศมีร่องบาก (Root radius) เท่ากับ 0.254 mm และมีความลึก 2.54 mm

ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (Notched samples) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (} W_k \text{)} = \frac{W}{A_k} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ W_k คือ ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (kJ/m^2)

W คือ ค่าพลังงานกระแทกที่วัดได้ (kJ)

A_k คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่หักลกรอยบากออกแล้ว (m^2)

3.11.3 การทดสอบความแข็งกด

การทดสอบความแข็งกดของพอลิเมอร์คอมโพสิต ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [59] โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้อง กดตัวอย่างเป็นเวลา 5 วินาที จากนั้นอ่านค่าที่วัดได้

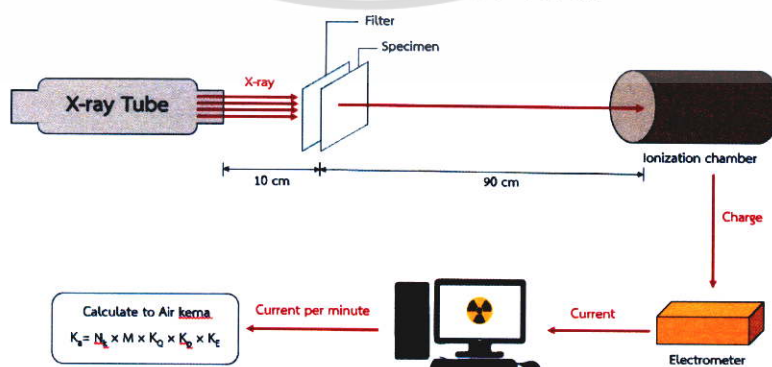
3.11 การทดสอบความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์

การทดสอบความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ทางการแพทย์โดยทดสอบด้วยชิ้นงานขนาด $10 \times 10 \times 0.1 \text{ cm}^3$ ที่ได้จากระบวนการกดอัด กำหนดตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ระยะห่างระหว่างชิ้นงานและแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ 100 cm
- ความต่างศักย์ 40 kV
- กระแส 10 mA
- ระยะเวลาในการให้รังสีเอกซ์ 0.5 s

3.12 การทดสอบความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์

การหาความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์ของพอลิเมอร์คอมโพสิตตามมาตรฐาน ISO 4037-1 [33] ด้วยเครื่อง X-ray generators ที่ความต่างศักย์ 120 kV จัดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ดังรูป 3.2 โดยใช้แผ่นคอมโพสิตที่ได้จากระบวนการฉีดขึ้นรูปขนาด $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ความหนา 1 mm ทำการทดสอบครั้งละ 1 แผ่น และทำการทดลองซ้ำโดยมีการซ้อนแผ่นคอมโพสิตเพิ่มครั้งละ 1 แผ่น ทำการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานตัวอย่างด้วยหัววัดรังสีชนิดบรรจุแก๊ส และแปลผลด้วยโปรแกรม MAX COMM นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า HVL จากสมการเบียร์-แลมเบิร์ต โดยใช้เทคนิคเทรอนไลน์ในซอฟต์แวร์ของไมโครซอฟท์



รูป 3.2 การจัดตั้งเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดสอบการลดทอนรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

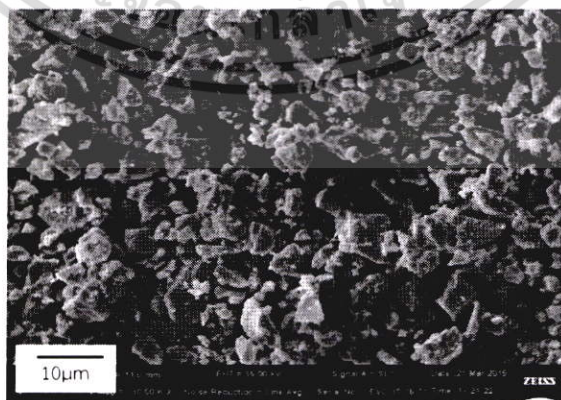
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตของ PP และ BaSO₄ ให้มีความแข็งแรงสูง และมีความแข็งแรงกระแทกที่ดี ด้วยการใช้ EEA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมที่ประกอบด้วยส่วนที่ไม่มีขั้ว และมีขั้ว และมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่น ในการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ ไปพร้อม ๆ กับการปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄, ผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PP/EEA โดยใช้ปริมาณคงที่ของ BaSO₄ เท่ากับ 30%wt และผลของอัตราส่วน BaSO₄:EEA ในคอมโพสิตที่ใช้ปริมาณ BaSO₄ 20% และ 30%wt ในอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PP/EEA คงที่เท่ากับ 95/5 ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และความสามารถในการบดบัง และลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต ทำการผสมองค์ประกอบต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 190°C และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดที่อุณหภูมิหัวตายเท่ากับ 210°C จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์ และทดสอบสมบัติต่าง ๆ โดยผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

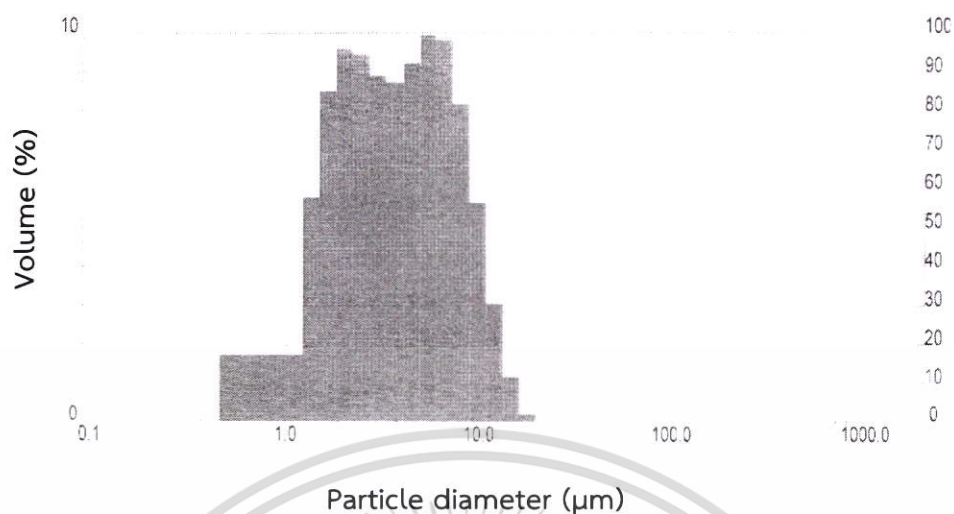
4.1 การวิเคราะห์ BaSO₄

งานวิจัยนี้ใช้ BaSO₄ เกรดเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า [12] ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา และการกระจายขนาดอนุภาคของ BaSO₄ ด้วยเทคนิค SEM แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า อนุภาคของ BaSO₄ มีลักษณะเป็นผลึกทรงเหลี่ยม มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer X แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า การกระจายตัวของอนุภาคประมาณ 70% โดยปริมาตรอยู่ในช่วง 1.95-6.39 μm (แสดงดังภาคผนวก ก) คิดเป็นขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.64 μm



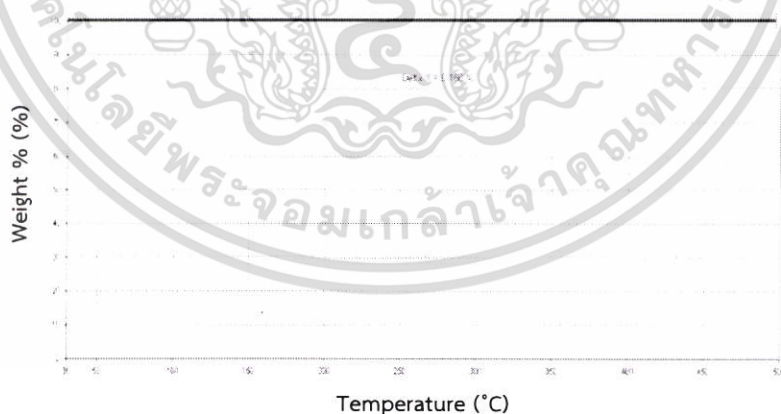
รูปที่ 4.1 SEM micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของ BaSO₄ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับร้อยละในการกระจายตัวของขนาด [12]

การวิเคราะห์ BaSO_4 ด้วยเทคนิค TGA ในช่วงอุณหภูมิ 30-550°C ภายใต้บรรยากาศ Air zero พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ โดยสังเกตได้จากเส้นกราฟ TGA เป็นเส้นตรงขนานกับแกน X ตลอดทั้งช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า BaSO_4 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีการเคลื่อนผิว เนื่องจากโดยปกติแล้วสารเคลื่อนผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 500°C



รูปที่ 4.3 TGA Thermogram ของ BaSO_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄

ผลการศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄ โดยมีการใช้ปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 0, 10, 20 และ 30%wt

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต

การตรวจสอบปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ โดยเทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศ Air Zero ที่อุณหภูมิ 30-550°C แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยในขั้นตอนการผสมแต่ละสูตร ทำการเติมปริมาณ BaSO₄ มากกว่าปริมาณที่ต้องการประมาณ 10%wt ของสารตัวเติม เนื่องจากในขั้นตอนการเติมสารลงในเครื่องผสมมีโอกาสสูญเสีย BaSO₄ ไปบางส่วน เพราะ BaSO₄ มีขนาดเล็ก และมีการฟุ้งกระจาย ผลการทดลองพบว่าปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการโดยมีค่ามากกว่าปริมาณที่ต้องการเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีการเผื่อปริมาณ BaSO₄ ทั้งนี้เนื่องจากการผสมในระบบปิดจึงสามารถควบคุมปริมาณสารตัวเติมได้ดี คอมโพสิตทุกสูตรมีการสลายตัวหนึ่งช่วง (แสดงในภาคผนวก ข) โดย PP มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 250°C และในคอมโพสิตที่มี BaSO₄ ทุก ๆ สูตรพบการสลายตัวของ PP ในคอมโพสิตที่อุณหภูมิสูงกว่าซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ying, L. และคณะ [60] และ Wang, Y. และคณะ [61] เนื่องจาก BaSO₄ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงกว่า PP (Thermal conductivity of BaSO₄ = 1.674 W/m*K และ PP = 0.17-0.22 W/m*K) [62-63] ส่งผลให้ BaSO₄ หน่วงการสลายตัวของ PP

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของ BaSO₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄

สูตรผสม	ปริมาณ BaSO ₄ (%wt)		อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
	ปริมาณที่ต้องการ	ปริมาณที่พบ	
P100	-	-	256
P90B10	10	11.4	284
P80B20	20	21.5	297
P70B30	30	30.6	289

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น และดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของคอมโพสิตจากเครื่อง Density kit และความหนาแน่นทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข) รายงานค่าในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นของแต่ละสูตรผสมในทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน และความหนาแน่นของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ BaSO₄ เนื่องจาก BaSO₄ มีความหนาแน่นเท่ากับ 4.5 g/cm³ ซึ่งสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า PP ที่มีความหนาแน่นเพียง 0.89 g/cm^3 เพราะฉะนั้นการเพิ่มวัสดุภาคที่มีความหนาแน่นสูงเข้าไปในระบบ ส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้น

เมื่อนำค่าความหนาแน่นไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (g/cm^3) กับปริมาณ BaSO_4 (%wt) ดังแสดงในรูปที่ ข-1 ในภาคผนวก ข พบว่ากราฟมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี แสดงว่าความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นเป็นไปตามกฎของการผสม (Rule of mixture)

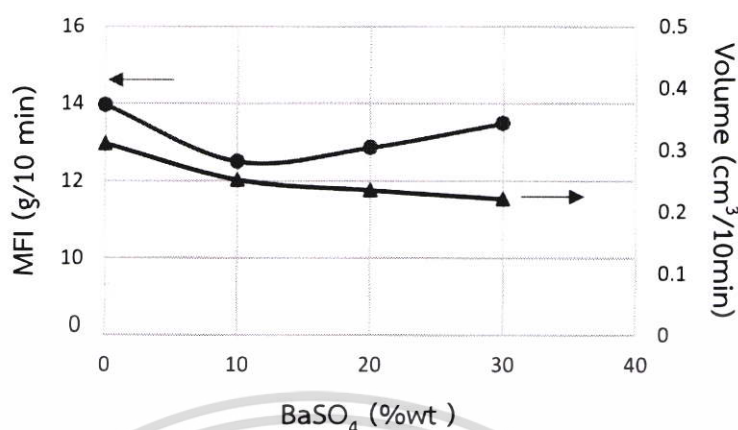
การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีผลโดยตรงกับดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต แสดงในผลการวิเคราะห์หัตดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตดังรูปที่ 4.4 พบว่า PP มีดัชนีการไหลเท่ากับ $14 \text{ g}/10 \text{ min}$ และเมื่อเติม BaSO_4 ในปริมาณ 10%wt ดัชนีการไหลมีค่าลดลง จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO_4 เป็น 20 และ 30%wt ซึ่งโดยปกติแล้วในงานวิจัยที่ผ่านมา [64] การเติมสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งและไม่เกิดการหลอม ณ อุณหภูมิที่ทดสอบจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลดัชนีการไหลมีค่าลดลง และมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมหรือสารเสริมแรง แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ BaSO_4 ตั้งแต่ 20%wt ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความหนาแน่นของ BaSO_4 มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของ PP ประมาณ 5 เท่า ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของคอมโพสิต จึงทำให้คอมโพสิตมีน้ำหนักที่มากขึ้น แม้ว่าปริมาตรของพอลิเมอร์หลอมเหลว (แสดงการคำนวณในภาคผนวกข) ที่เคลื่อนที่ผ่านหัวดายมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO_4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวเคลื่อนที่ออกจากหัวดายในปริมาณที่น้อยลง แต่การหาดัชนีการไหลเป็นการชั่งน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เคลื่อนที่ผ่านหัวดายออกมา เพราะฉะนั้นพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีปริมาณ BaSO_4 สูงจะมีน้ำหนักมาก ทำให้มีดัชนีการไหลสูง [65]

เมื่อดำเนินการคำนวณปริมาตรของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เคลื่อนที่ออกมา (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข) พบว่า ปริมาตรของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO_4

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/ BaSO_4

สูตรผสม	ความหนาแน่น (g/cm^3)	
	ค่าจากการทดลอง	ค่าทางทฤษฎี
P100	0.889 ± 0.006	0.850
P90B10	0.976 ± 0.013	0.936
P80B20	1.063 ± 0.006	1.029
P70B30	1.150 ± 0.024	1.131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ดัชนีการไหล และปริมาตรของของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt

4.2.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

4.2.3.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄

การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄ โดยเทคนิค SEM แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า พื้นผิวแตกหักของ PP มีลักษณะเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกัน (รูปที่ 4.5 (a)) การกระจายตัวของ BaSO₄ ใน PP ที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า ที่ปริมาณ BaSO₄ 10%wt (รูปที่ 4.5 (b)) อนุภาค BaSO₄ มีการแตกตัว และกระจายตัวที่ดี (Good dispersion and distribution) ในวัฏภาคต่อเนื่องของ PP สังเกตได้จากอนุภาคของ BaSO₄ ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคเดี่ยว (Single particles) และกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ เป็น 20 และ 30%wt พบอนุภาค BaSO₄ ที่มีขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากขึ้นซึ่งอาจเป็นอนุภาค BaSO₄ ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ หรืออาจเกิดการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) (รูปที่ 4.5 (c), (d) และ (e)) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ อนุภาค BaSO₄ มีโอกาสเกิดการแตกตัวที่ไม่ดี เนื่องจาก BaSO₄ เป็นอนุภาคที่มีขั้ว ทำให้มีโอกาสเกิดการแตกตัวและกระจายตัวที่ไม่ดีในวัฏภาคต่อเนื่องของ PP ซึ่งไม่มีขั้ว และ BaSO₄ ไม่มีอันตรกิริยาที่ดีกับ PP โดยสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากการที่อนุภาคของ BaSO₄ ไม่เกิดการฝังตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง PP และมีการหลุดออกของ BaSO₄ เห็นได้จากช่องว่างที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาค BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตร

4.2.3.2 สัณฐานวิทยาการแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/BaSO₄

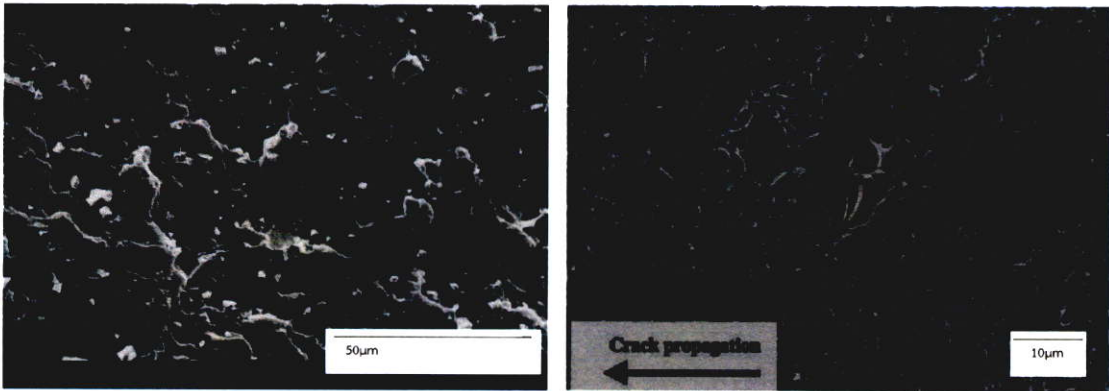
การศึกษาสัณฐานวิทยาการแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเทคนิค SEM จากชิ้นงานสูตร P80B20 ภายหลังจากทดสอบความต้านทานแรงกระแทก แสดงในรูปที่ 4.6 ผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตมีการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wang, K. และคณะ [6, 45] ที่พบว่าคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ปริมาณ BaSO₄ 24%wt เมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดการเสียหายแบบครีคและการแยกระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม เกิดเป็นช่องว่างระหว่างภูมิภาคของ PP และ BaSO₄ มีลักษณะเป็นเส้นใยของ PP และเกิดการเสียหายแบบ Shear yielding (รูปที่ 4.6 (b)) ทำให้วัสดุสามารถรับแรงกระทำได้ดี ความแตกต่างนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากงานวิจัยก่อนหน้าทำการผสมด้วยการผสมแบบ 2 ขั้นตอน (Two-step mixing) มีการใช้เมตริกซ์ PP ที่มีความหนืดสูง (MFI=2.5 g/10min) และ BaSO₄ ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (1.69 μm) ทำให้งานวิจัยมีโอกาสเกิดการแตกตัวและกระจายตัวของ BaSO₄ ใน PP ได้ดีกว่า และมีรอยต่อระหว่าง ภูมิภาคที่มีขนาดเล็กกว่างานวิจัยนี้ ซึ่งส่งผลให้ระยะห่างระหว่างภูมิภาค BaSO₄ มีน้อย พอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่าง BaSO₄ มีโอกาสเกิดการดึงยึดเมื่อได้รับแรงอันเนื่องมาจากมีพื้นที่ที่น้อยกว่าพอลิเมอร์บริเวณอื่น ในขณะที่งานวิจัยนี้มีการผสมด้วยการผสมแบบพร้อมกันทุกองค์ประกอบ (One-step mixing) PP มีความหนืดต่ำ (MFI= 11g/10min) อีกทั้ง BaSO₄ มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า (4.64 μm)



รูปที่ 4.5 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO₄ ใน PP ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

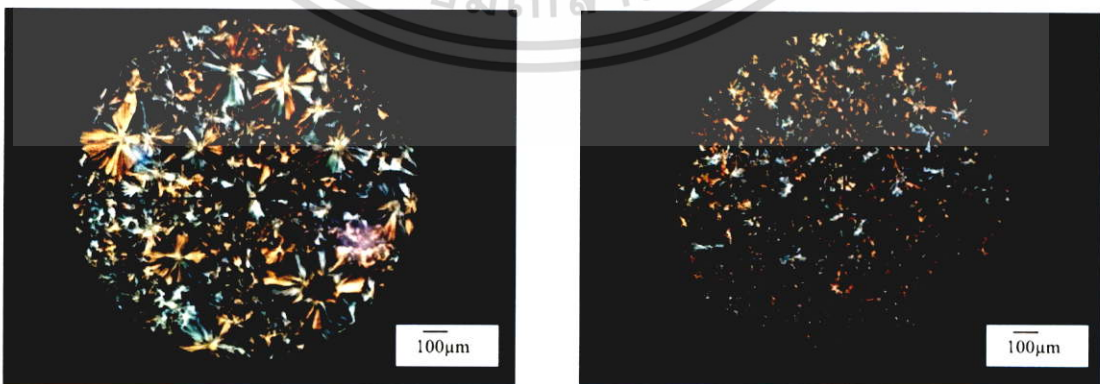


รูปที่ 4.6 SEM micrographs แสดงการแตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานคอมโพสิตภายหลังการทดสอบความแข็งแรงกระแทกสูตร P80B20 (ขวา) และคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ปริมาณ BaSO₄ 24%wt ของงานวิจัยก่อนหน้า [45] (ซ้าย)

4.2.4 ผลการศึกษาผลึก และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์

4.2.4.1 ลักษณะผลึกของ PP

ผลการศึกษาลักษณะผลึกของ PP แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าผลึกของ PP (รูปที่ 4.7(a)) เป็นผลึกแบบสเฟียรูไลต์ (Spherulite) โดยมีจุดเกิดนิวเคลียส (Nuclei) ของผลึก และเกิดการเติบโตของผลึกในแนวรัศมีทำให้ผลึกมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน ในขณะที่สเฟียรูไลต์ของ PP ในคอมโพสิต P70B30 ที่มีปริมาณ BaSO₄ อยู่ 30%wt (รูปที่ 4.7(b)) พบว่ามีขนาดเล็กกว่าสเฟียรูไลต์ของ PP (P100) แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของ BaSO₄ ทำให้ PP เกิดผลึกแบบ Heterogeneous nucleation ซึ่งเกิดเป็นนิวเคลียสของผลึกจำนวนมาก ทำให้เมื่อผลึกเติบโตมาชนกัน เกิดเป็นผลึกที่มีขนาดเล็กและมีรอยต่อระหว่างผลึก (Grain boundaries) จำนวนมาก ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang, K [45] ที่พบว่า การมี BaSO₄ ทำให้ PP เกิดผลึกขนาดเล็กลง



(a) P100

(b) P70B30

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายผลึกสเฟียรูไลต์ของ PP จากเทคนิค POM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์

ผลการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของ PP ด้วยเทคนิค DSC พบว่า T_m ของ PP ในการตรวจสอบครั้งที่ 1 ในคอมโพสิตทุกสูตรมีค่าสูงกว่าการตรวจสอบครั้งที่ 2 (แสดงในภาคผนวก ค) แสดงให้เห็นว่าสถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปส่งผลให้ PP เกิดผลึกขนาดใหญ่ (มีความหนาของชั้นลามเลลามาก) อย่างไรก็ตาม T_c และปริมาณผลึกของ PP ของการตรวจสอบทั้งสองครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน

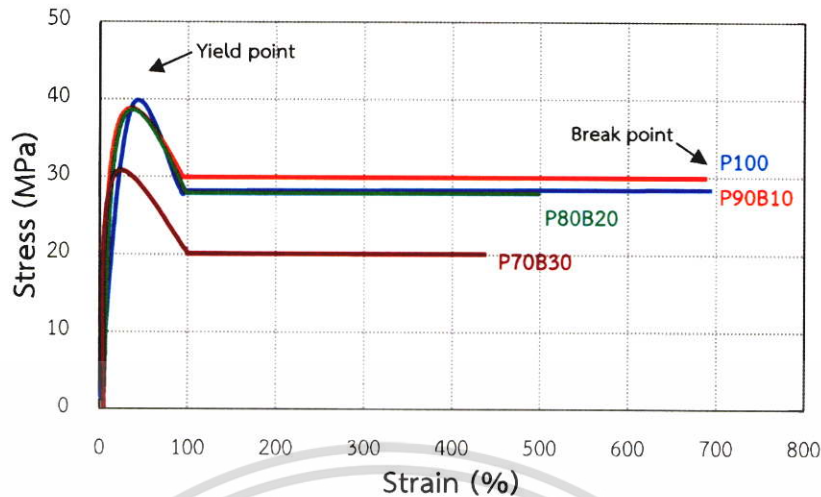
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบครั้งที่ 1 ของคอมโพสิตทุกสูตร พบว่า PP มีค่า T_m , T_c และปริมาณผลึก เท่ากับ 172°C , 113°C และ 45% ตามลำดับ และพบว่า T_m , T_c และปริมาณผลึกของ PP ในคอมโพสิตทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าของ PP ในสูตร P100 อันเนื่องมาจาก PP และ BaSO_4 มีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ต่ำ ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค ยืนยันได้จาก SEM micrographs ในรูปที่ 4.5 ทำให้การเติม BaSO_4 ลงในวัฏภาคต่อเนื่องของ PP ไม่มีผลให้ PP เกิดการตกผลึกในปริมาณเพิ่มขึ้น แม้ว่าการมีอยู่ของ BaSO_4 ทำให้สเฟียรูไลต์ของ PP มีขนาดเล็กลงจากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.4.1 แต่ไม่พบความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของ T_c ของ PP ในคอมโพสิตทุกสูตร

ตารางที่ 4.3 T_m , T_c และร้อยละความเป็นผลึกของ PP ในพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/ BaSO_4

สูตร	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ความเป็นผลึก (%)
P100	172	113	45
P90B10	171	113	42
P80B20	170	114	44
P70B30	173	115	43

4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/ BaSO_4

การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงพบว่าคอมโพสิตมีพฤติกรรมการเสียสภาพที่มีลักษณะเดียวกันทุกสูตรโดยมีรูปแบบ Stress-strain curve ตามรูปที่ 4.8 โดยเมื่อวัสดุได้รับแรงดึงผ่านจุดคราก (Yield point) จะเกิด Necking และเกิดการดึงยืดออกไปเรื่อย ๆ โดยที่ค่าความเค้น (Stress) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงจุดขาดของวัสดุ (Break point)

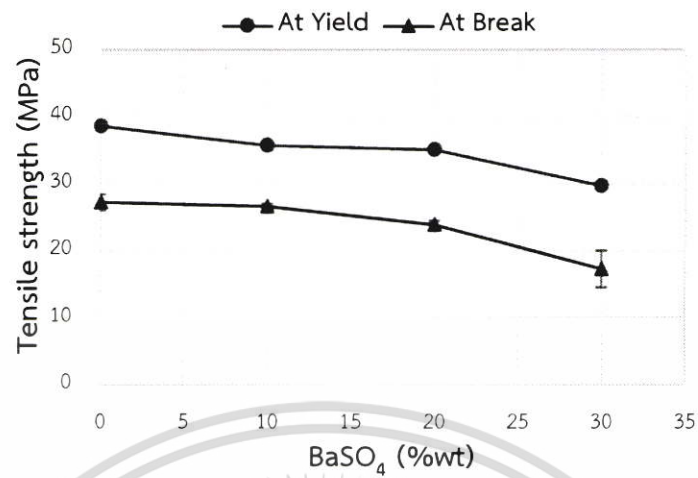


รูปที่ 4.8 Stress- strain curve ของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt

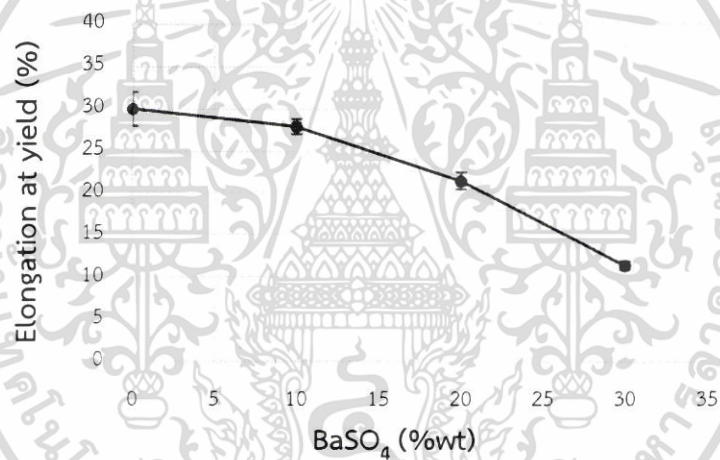
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/BaSO₄ พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก, ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด, ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมและเพิ่มปริมาณ BaSO₄ (รูปที่ 4.9 (a)-(c)) เป็นผลเนื่องมาจากการไม่อันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของ PP และ BaSO₄ ทำให้ BaSO₄ มีโอกาสเกิดการแตกตัวที่ไม่ดี และรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ยืนยันได้จาก SEM micrographs ในรูปที่ 4.5 ทำให้เมื่อคอมโพสิตได้รับแรงดึงจะเกิดการแยกออกบริเวณช่องว่างระหว่างวัฏภาคของ PP และ BaSO₄ ซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ส่งผลให้คอมโพสิตเกิดการดึงยืด และรับแรงได้น้อยลงก่อนเกิดการเสียหาย ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang, K. และคณะ [6] ที่พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของคอมโพสิตค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ มากกว่า 16%wt

ยังมีมอดูลัสและความแข็งแรงดของคอมโพสิตที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม BaSO₄ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของคอมโพสิต แสดงดังรูปที่ 4.9 (d) และ 4.10 ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของ BaSO₄ มีมอดูลัสและความแข็งแรงมากกว่า PP

ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/BaSO₄ แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า PP มีความต้านทานแรงกระแทกเท่ากับ 2.0 kJ/m² และความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ เป็นผลมาจากการมีอยู่ของ BaSO₄ ทำให้สเฟียรูไลต์ของ PP มีขนาดเล็กและมีรอยต่อระหว่างผลึกจำนวนมาก ยืนยันได้จากภาพถ่ายด้วยเทคนิค POM ในหัวข้อ 4.2.4.1 (รูปที่ 4.7) ซึ่งสเฟียรูไลต์ขนาดเล็กสามารถรับและกระจายแรงที่มีอัตราการให้แรงสูงได้ดีกว่าสเฟียรูไลต์สมบูรณ์ขนาดใหญ่ที่มีรอยต่อระหว่างผลึกที่น้อยกว่า



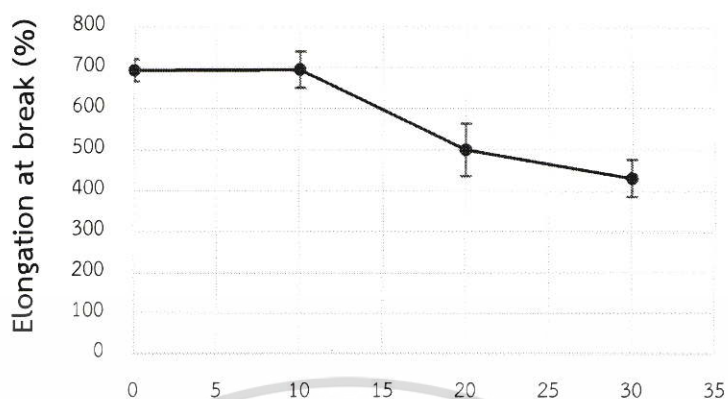
(a) ความแข็งแรงดึง



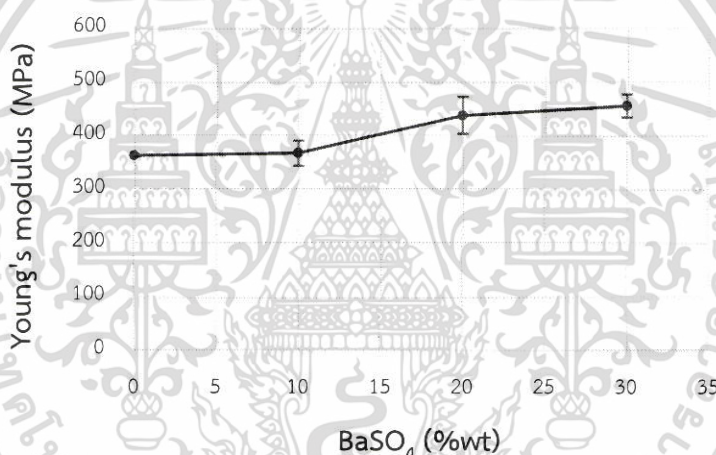
(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก

รูปที่ 4.9 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt

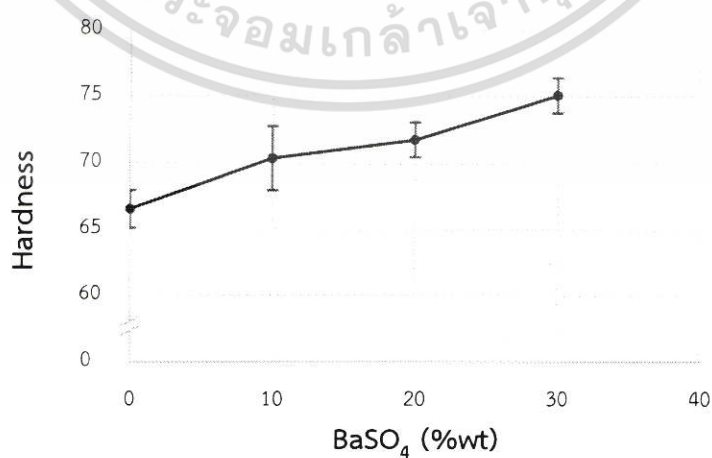
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BaSO₄ (%wt)

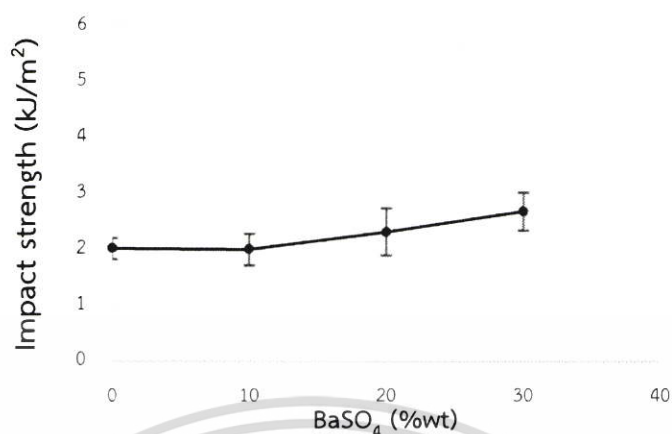
(c) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด

BaSO₄ (%wt)

(d) ย้ำมอดุลัส

รูปที่ 4.9 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt (ต่อ)รูปที่ 4.10 ความแข็งกดของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt

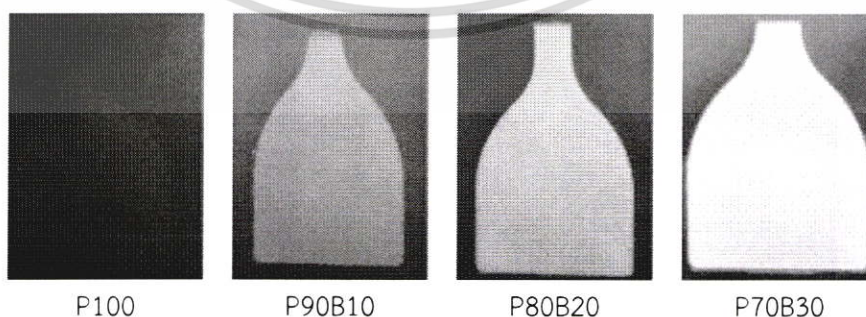
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt

4.2.6 ผลการทดสอบการบดบังรังสีของคอมโพสิต PP/BaSO₄

การทดสอบการบดบังรังสีของคอมโพสิตด้วยการถ่ายภาพเอกซเรย์ทางการแพทย์ ที่พลังงานรังสีเท่ากับ 40 keV แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า PP มีความสามารถบดบังรังสีเอกซ์ต่ำมาก โดยสังเกตได้จากภาพเอกซเรย์เป็นสีดำทึบ เห็นรูปร่างชิ้นงานไม่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจาก PP เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งจัดเป็นธาตุเบา รังสีเอกซ์สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านไป ยังฉากรับได้มาก ในขณะที่เมื่อมีการเติม BaSO₄ พบว่าภาพที่เห็นเป็นพื้นที่สีขาวบนฟิล์มเอกซเรย์ แสดงรูปร่างของชิ้นงานที่ทดสอบ ซึ่งเกิดจากการที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ทะลุผ่านชิ้นงานได้น้อยลงอันเนื่องจากการบดบังโดย BaSO₄ เนื่องจาก BaSO₄ มีความหนาแน่นเท่ากับ 4.5 g/cm³ ซึ่งมีค่าสูงกว่า PP ถึงประมาณ 5 เท่า และประกอบด้วยอะตอม Ba โดยมีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) เท่ากับ 37 keV ซึ่งมีค่าน้อยกว่าพลังงานรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดสอบ และเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ จะเห็นพื้นที่สีขาวแสดงรูปร่างชิ้นงานบนฟิล์มเอกซเรย์ชัดขึ้น แสดงถึงความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ฟิล์มเอกซเรย์ของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณที่มีปริมาณ BaSO₄ ตั้งแต่ 0-30%wt

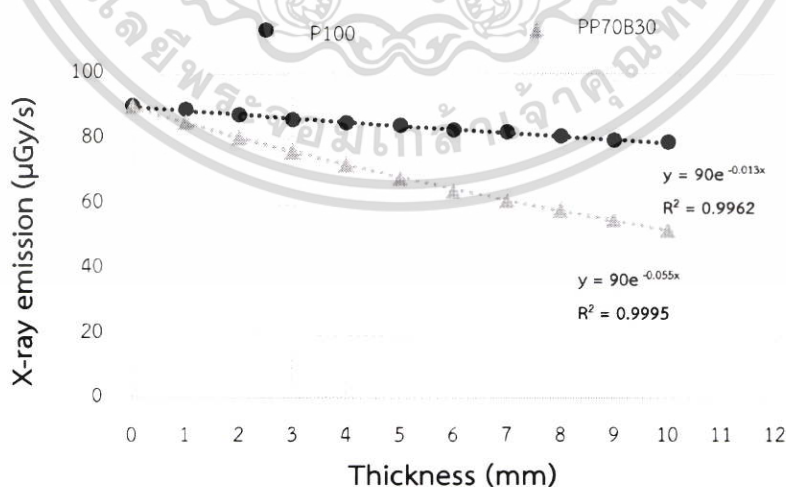
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ผลการทดสอบความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์

การทดสอบความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่พลังงานรังสีเอกซ์เท่ากับ 100 keV (ความต่างศักย์ 120 kV) โดยรายงานค่าเป็นปริมาณของรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (X-ray emission) ในหน่วย ไมโครเกรย์ต่อวินาที (μGy/s) โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง P100 และ P70B30 ซึ่งเป็นคอมโพสิตที่มีปริมาณ BaSO₄ อยู่ในปริมาณมากที่สุดแสดงผลในรูปที่ 4.12 พบว่าปริมาณของรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศมีค่าประมาณ 90 μGy/s เมื่อพิจารณาปริมาณของรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านแผ่น P100 และ แผ่นคอมโพสิต P70B30 ที่ความหนา 1 mm มีค่าเท่ากับ 88 และ 85 μGy/s ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นขึ้นงานจาก 2-10 mm เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชิ้นงานเป็นการเพิ่มระยะทางในการเคลื่อนที่ของรังสีเอกซ์มาสู่ชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาจากความชันสัมบูรณ์ของเส้นกราฟ และปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน พบว่าคอมโพสิต P70B30 มีความชันของเส้นกราฟที่สูงกว่าแผ่น P100 และมีปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากันออกมาในปริมาณที่น้อยกว่าแผ่น P100 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ดีกว่า P100 ซึ่งเป็นผลจากการมีอยู่ของ BaSO₄

จากสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) ของวัสดุ แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยพบว่าแม้ว่าการมีอยู่ของ BaSO₄ สามารถลดทอนรังสีเอกซ์ได้จากค่า HVL ที่ลดลง แต่ยังคงมีค่าที่สูงกว่าตะกั่วซึ่งปกติถูกใช้เป็นวัสดุลดทอนรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าการลดทอนรังสีเอกซ์ในปริมาณที่เท่ากัน (50%) ต้องใช้ชิ้นงานคอมโพสิตที่มีความหนามากกว่าตะกั่ว ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในการใช้งานในด้านของการผลิตเป็นวัสดุลดทอนรังสีเอกซ์เชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.13 ปริมาณรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง PP และคอมโพสิต PP/BaSO₄ (P70B30) ที่ความหนาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความหนาครึ่งค่า (HVL) ของวัสดุที่ความต่างศักย์ 120 kV

วัสดุ	HVL (mm)
P100	53.66
P70B30	12.60
ตะกั่ว	0.15 *

*หมายเหตุ ค่า HVL ของตะกั่วอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้า [66] ที่ความต่างศักย์ที่เท่ากันกับงานวิจัยนี้ (120 kV) ทั้งนี้อาจมีตัวแปรอื่น ๆ (ระยะระหว่างวัสดุและแหล่งกำเนิด, กระแสไฟฟ้า และเวลาในการให้รังสี เป็นต้น) ที่มีการใช้งานแตกต่างจากงานวิจัยนี้ ซึ่งอาจส่งผลต่อค่า HVL ของตะกั่ว

4.3 การศึกษาผลของ EEA

จากการศึกษาผลของปริมาณ $BaSO_4$ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์ของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/ $BaSO_4$ ในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าการมีอยู่ของ $BaSO_4$ ส่งผลให้คอมโพสิตมีค้ำยงมอดุลัส และความแข็งกตสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันพบว่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยึดของคอมโพสิตมีค้ำลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ $BaSO_4$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีความสามารถในการดึงยึด และความสามารถในการรับแรงดึงลดลง เนื่องจาก PP และ $BaSO_4$ มีความเข้ากันได้ดีต่ำ ทำให้ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของ PP และ $BaSO_4$ เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ EEA ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับเอทิลอะคริเลต ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วของเอทิลอะคริเลต และส่วนที่ไม่มีขั้วของเอทิลีน เพื่อช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PP และ $BaSO_4$ อีกทั้ง EEA เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตได้ แม้ว่าผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าการมีอยู่ของ $BaSO_4$ ทำให้ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค้ำเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตยังคงมีค้ำต่ำ (ประมาณ 2.0-2.7 kJ/m²)

งานวิจัยนี้เลือกสูตร P70B30 ซึ่งเป็นสูตรที่มีความแข็งแรง และความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์สูงที่สุด มาทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PP และ $BaSO_4$ และเพิ่มความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตด้วยการใช้ EEA ทำการผสม PP และ EEA โดยใช้ปริมาณ EEA เป็น 5, 10, 15 และ 20%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA ซึ่งคิดเป็น 70%wt ของคอมโพสิต และใช้ปริมาณ $BaSO_4$ คงที่เท่ากับ 30%wt จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิต PP/EEA/ $BaSO_4$ แสดงผลดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์

การตรวจสอบปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์โดยเทคนิค TGA แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณ BaSO₄ ที่พบในคอมโพสิตทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ เนื่องจากมีการเผื่อปริมาณ BaSO₄ ในขั้นตอนการผสม (10%wt ของสารตัวเติม) ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่า BaSO₄ หน่วงการสลายตัวของพอลิเมอร์ในคอมโพสิตทุกสูตร โดยพบอุณหภูมิการสลายตัวของ PP และ EEA ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.2.1 เมื่อพิจารณา TGA Thermogram ของคอมโพสิตทุกสูตร (ภาคผนวก ง) พบพีค DTG 2 พีค ที่ประมาณ 260°C และ ที่มากกว่า 300°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตมีการสลายตัว 2 ช่วงซึ่งเป็นการสลายตัวของ PP และ EEA ตามลำดับ โดย PP มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่า EEA

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของ BaSO₄ และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์

สูตร	ปริมาณ BaSO ₄ (% โดยน้ำหนัก)		อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	
	ปริมาณที่ต้องการ	ปริมาณที่พบ	PP	EEA
P100	-	-	265	-
EEA	-	-	-	315
P95E5	-	-	264	311
P95E5B30	30	30.7	335	368
P90E10B30	30	30.6	326	363
P85E15B30	30	30.9	324	356
P80E20B30	30	31.1	333	371

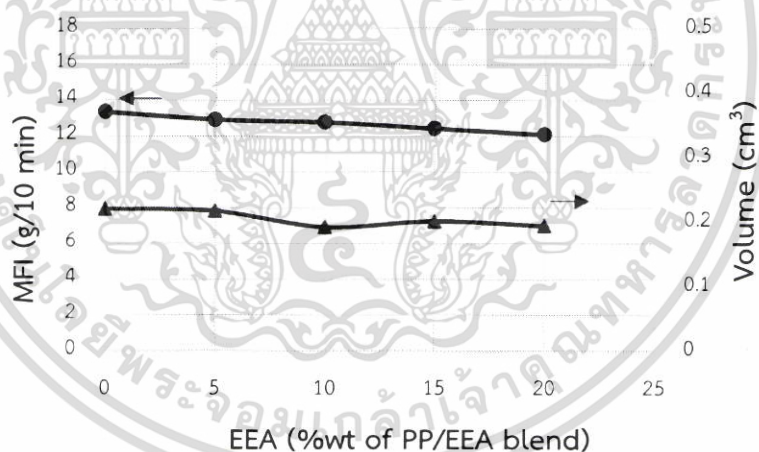
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น และดัชนีการไหลของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ รายงานค่าในตารางที่ 4.6 พบว่าความหนาแน่นของคอมโพสิตที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี และทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันกับสูตร P70B30 เนื่องจากมาจากความหนาแน่นของ PP และ EEA มีค่าเท่ากับ 0.933 g/cm³ และ 0.889 g/cm³ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาคอมโพสิตสูตร P80E20B30 ที่มีปริมาณ EEA อยู่ในปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 20%wt ซึ่งคิดเป็นเพียง 14 กรัม ในคอมโพสิต 100 กรัม ทำให้การมีอยู่ของ EEA ในปริมาณ 0-20%wt ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของคอมโพสิต

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิต

สูตรผสม	ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	ค่าจากการทดลอง	ค่าทางทฤษฎี
P70B30	1.150±0.024	1.131
P95E5B30	1.157±0.021	1.126
P90E10B30	1.140±0.006	1.126
P85E15B30	1.151±0.045	1.130
P80E20B30	1.150±0.024	1.138

การวิเคราะห์ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต แสดงผลดังรูปที่ 4.14 พบว่าดัชนีการไหลของคอมโพสิต P70B30 มีค่าประมาณ 13 g/10 min เมื่อมีการเติม EEA ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่าดัชนีการไหลและปริมาตรของของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่เคลื่อนที่ออกจากหัวตายมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA จาก 0-20 %wt เนื่องจาก EEA มีดัชนีการไหลเท่ากับ 11 g/10 min ซึ่งมีความต่ำกว่าคอมโพสิตดัชนีการไหลของคอมโพสิต P70B30



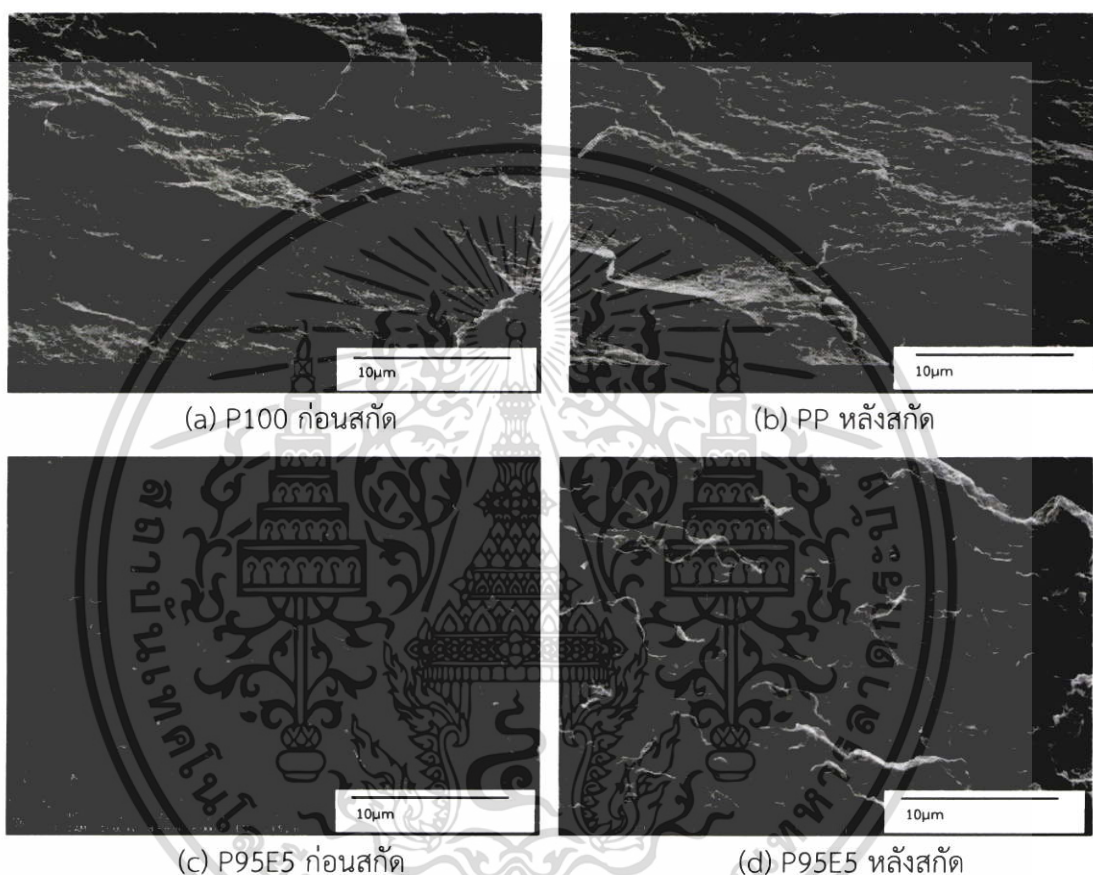
รูปที่ 4.14 ดัชนีการไหลและปริมาตรของของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)

4.3.3 ผลการศึกษาการกระจายตัวของ EEA ใน PP

การศึกษาการกระจายตัวของ EEA ใน PP โดยการสกัดวัฏภาคของ EEA ออก พบว่าชิ้นงานก่อนทำการสกัดของ PP (P100) และ พอลิเมอร์ผสม PP/EEA ที่มีการเติม EEA ในปริมาณ 5%wt (P95E5) มีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบและแน่นทั่วทั้งชิ้นงาน (รูปที่ 4.14 (a) และ (c)) ภายหลังจากการสกัด พบว่าชิ้นงาน PP ยังคงมีพื้นผิวที่เรียบและแน่น โดยไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิภาคของ PP ไม่ถูกสกัดออก ในขณะที่พอลิเมอร์ผสม P95E5 พบว่าหลังการสกัดวิภาค EEA ออก เกิดเป็นช่องว่างแสดงการหลุดออกของ EEA ซึ่งเป็นวิภาคกระจายที่มีการแตกตัว และกระจายตัวที่ดี ใน PP โดยสังเกตได้จากช่องว่างมีขนาดเล็ก และมีขนาดของช่องว่างที่ใกล้เคียงกัน กระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน เป็นการยืนยันว่าระบบพอลิเมอร์ผสมของ PP/EEA เป็นแบบ Immiscible blend (รูปที่ 4.15 (b) และ (d))



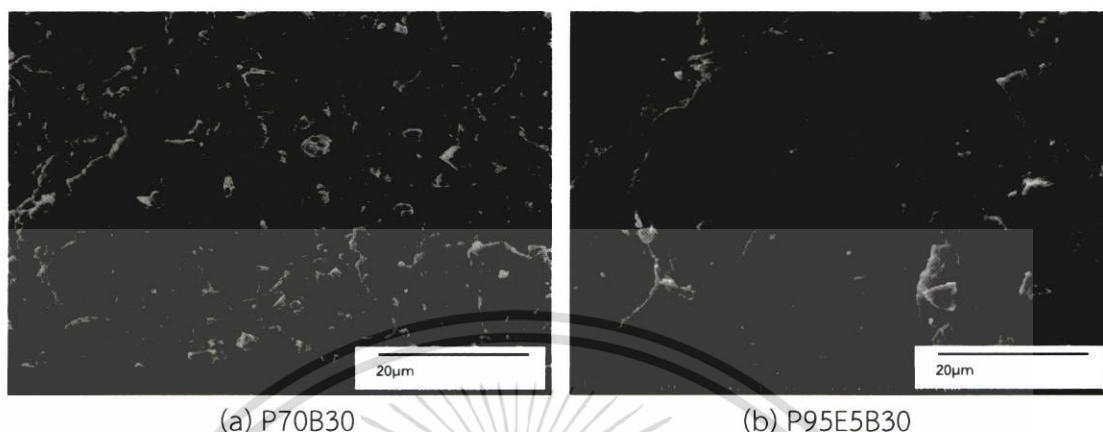
รูปที่ 4.15 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางชิ้นงานของ PP และพอลิเมอร์ผสม P95E5 ก่อนสกัดและหลังสกัด

4.3.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตพบว่า รูปที่ 4.16 (a) แสดงภาคตัดขวางของคอมโพสิตสูตร P70B30 พบว่าอนุภาค BaSO₄ มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ไม่เกิดการฝังตัวอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์ และพบช่องว่างซึ่งเกิดจากการหลุดออกของ BaSO₄ แสดงให้เห็นถึงความสามารถเข้ากันได้ต่ำ และการไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างวิภาคของ PP และ BaSO₄ เมื่อเปรียบเทียบกับกับรูปที่ 4.15 (b) ซึ่งแสดงภาคตัดขวางของคอมโพสิตสูตร P95E5B30 ที่มีการเติม EEA ในปริมาณ 5%wt ของพอลิเมอร์ผสม ก่อนทำการสกัดวิภาคของ EEA ออก ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดว่าพื้นผิวของชิ้นงานมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะแน่น อนุภาค $BaSO_4$ ส่วนใหญ่เกิดการฝังตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์และไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น ซึ่งแสดงความสามารถในการผสมเข้ากันได้ที่ดีขึ้นระหว่าง PP และ $BaSO_4$ เมื่อมีการเติม EEA



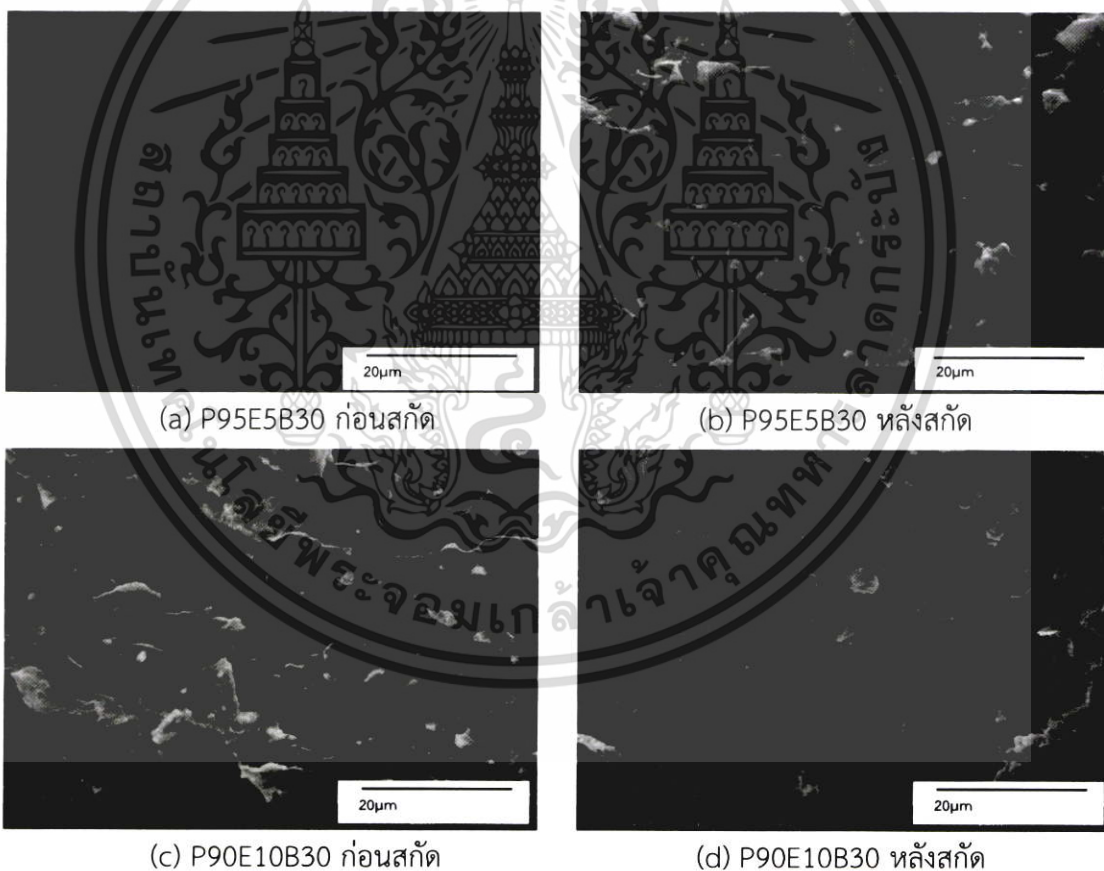
รูปที่ 4.16 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางชิ้นงานของคอมโพสิต P70B30 และ P95E5B30 (มีปริมาณ $BaSO_4$ 30%wt) ก่อนสกัด

สัณฐานวิทยาการกระจายตัวของ $BaSO_4$ ในพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/EEA/ $BaSO_4$ ภายหลังจากสกัดออกของวัฏภาค EEA แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าในคอมโพสิตทุกสูตรมีช่องว่างทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งช่องว่างขนาดเล็กแสดงถึงการหลุดออกของวัฏภาค EEA หรืออนุภาคของ $BaSO_4$ ที่มีขนาดเล็ก และช่องว่างขนาดใหญ่เกิดจากการหลุดออกของ $BaSO_4$ บางส่วนที่ถูกสกัดออกไปพร้อม ๆ กับ EEA เนื่องจากรูปร่างและขนาดของรูมีลักษณะใกล้เคียงกับอนุภาคของ $BaSO_4$ อีกทั้งปริมาณ $BaSO_4$ ที่เหลืออยู่ภายหลังจากสกัดมีปริมาณลดลงเทียบกับการสกัดแสดงให้เห็นว่าอนุภาค $BaSO_4$ ชอบอยู่กับวัฏภาคกระจายที่มีขั้วของ EEA มากกว่า PP ซึ่งไม่มีขั้ว ทำให้ $BaSO_4$ บางส่วนถูกสกัดออกไปพร้อม ๆ กับ EEA เห็นเป็นช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของวัฏภาค EEA

เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA ในคอมโพสิตพบช่องว่างที่เกิดจากการหลุดออกของ $BaSO_4$ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.17 (b), (d), (f) และ (h)) แสดงให้เห็นว่า $BaSO_4$ มีโอกาสเกิดการแตกตัวและกระจายตัวที่ไม่ดี ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากเนื่องมาจากในงานวิจัยนี้ใช้การผสมพร้อมกันทุกองค์ประกอบ และใช้สภาวะในการผสมและขึ้นรูปเดียวกันกับคอมโพสิตทุกสูตร ทำให้การเพิ่มปริมาณ EEA อาจทำให้วัฏภาคกระจายของ EEA เกิดการแตกกระจายตัวได้น้อยลง และจากการที่ $BaSO_4$ ชอบอยู่กับวัฏภาค EEA มากกว่า PP จึงพบอนุภาค $BaSO_4$ แตกตัวและกระจายตัวในเมตริกซ์ได้ลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับผลการจับคู่ (Mapping) ธาตุ Ba ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบใน $BaSO_4$ โดยเทคนิค SEM-EDS พบว่า การมีอยู่ของ EEA ในปริมาณ 5%wt (รูปที่ 4.18 (b)) ทำให้ $BaSO_4$ มีการแตกตัว และกระจายตัวในเมตริกซ์ได้ดีโดยสังเกตได้จากการที่ธาตุ Ba มีการรวมกลุ่มกันน้อยลง และกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน เมื่อเทียบกับสูตร P70B30 ที่ไม่มีการเติม EEA (รูปที่ 4.18 (a))

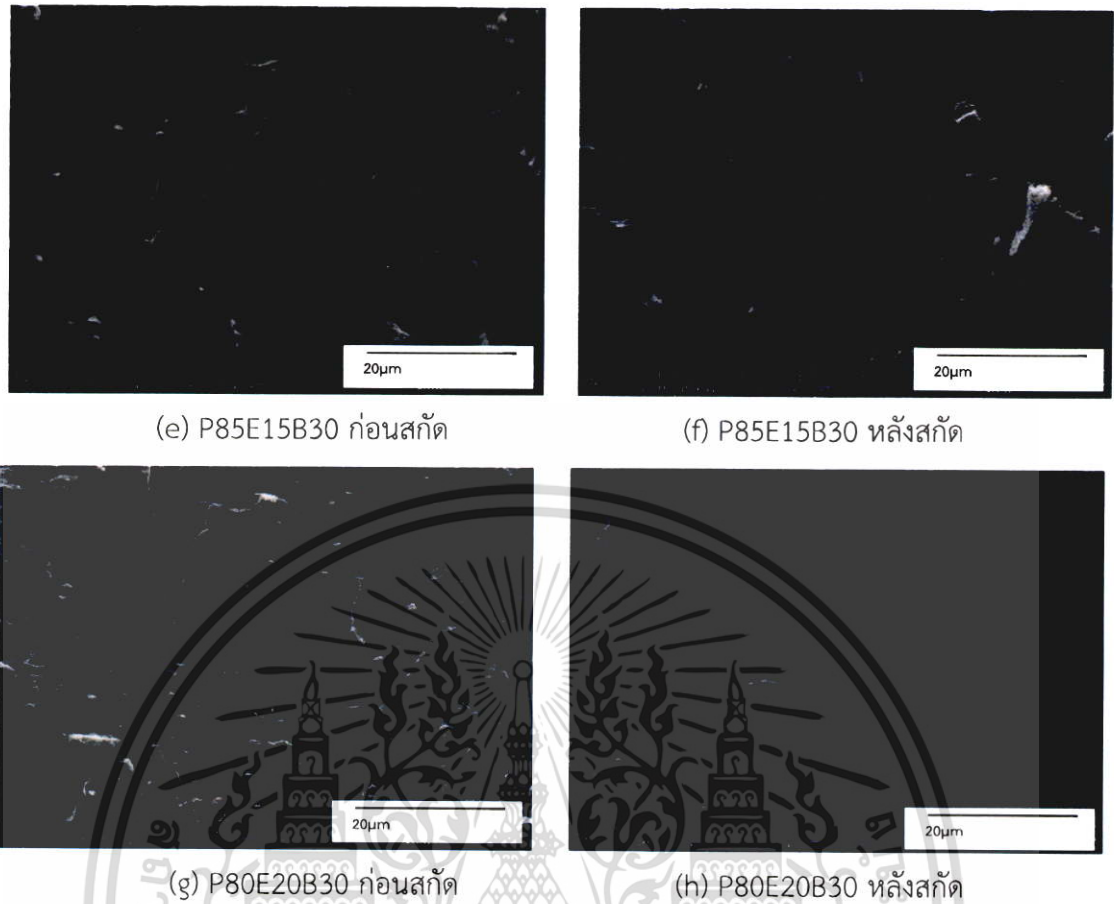
และพบว่าธาตุ Ba กลับมารวมกลุ่มกันมากขึ้นในคอมโพสิตสูตร P80E20B30 ซึ่งมี EEA อยู่ในปริมาณมากที่สุด (รูปที่ 4.18 (c)) ซึ่งสอดคล้องกับช่องว่างขนาดใหญ่ที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาค $BaSO_4$ ใน SEM micrographs รูปที่ 4.17 (h)

จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตด้วยเทคนิค SEM คาดว่าลักษณะการอยู่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบเป็นดังแบบจำลองในรูปที่ 4.19 โดยอนุภาค $BaSO_4$ ส่วนใหญ่กระจายและฝังตัวอยู่บนอนุภาค EEA เนื่องจากสภาพขั้วที่ใกล้เคียงกัน และสังเกตได้จากภาพหลังการสกัดวัฏภาค EEA ออก รูที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของ $BaSO_4$ มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงคาดว่า EEA ที่ติดอยู่กับ $BaSO_4$ เมื่อทำการสกัด EEA ออก วัฏภาคของ $BaSO_4$ จึงหลุดออกไปพร้อมกับ EEA แต่จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า $BaSO_4$ มีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาค EEA ทำให้เหมือนกับว่าอนุภาค $BaSO_4$ ถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคของ EEA หลาย ๆ อนุภาค ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า โดย EEA มีการแตกตัว และการกระจายตัวที่ดี โดยมีขนาดที่ใกล้เคียงกันและกระจายอยู่ทั่วทั้งบริเวณในเมทริกซ์ PP

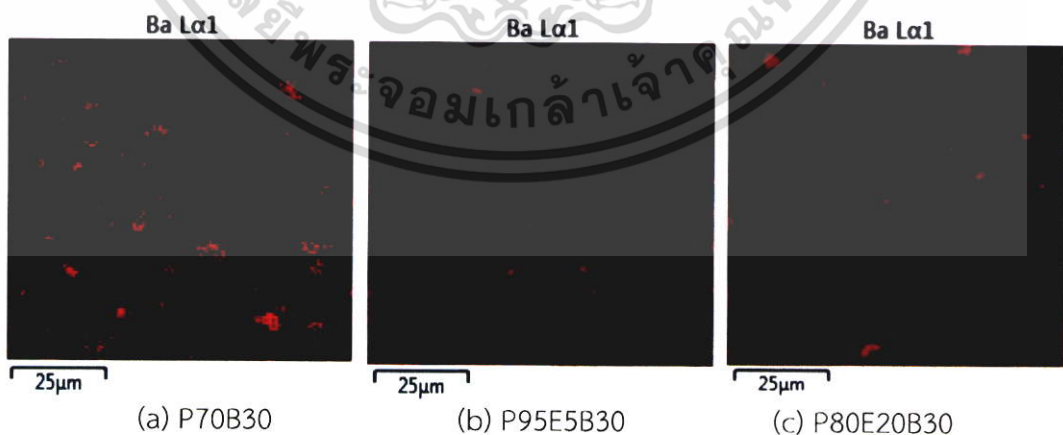


รูปที่ 4.17 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานคอมโพสิต PP/EEA/ $BaSO_4$ ที่มีปริมาณ $BaSO_4$ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

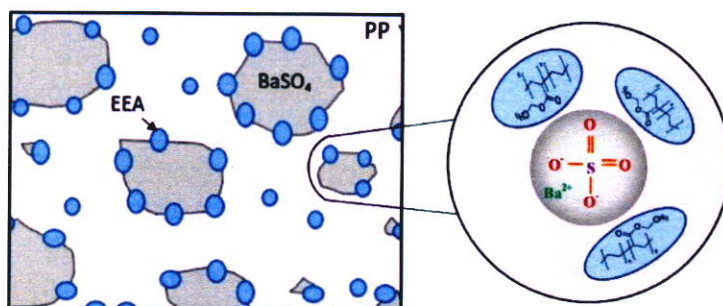


รูปที่ 4.17 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของ ชิ้นงานคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA) (ต่อ)



รูปที่ 4.18 SEM-EDS micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของ คอมโพสิต P70B30 และ PP/EEA/BaSO₄

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แบบจำลองของระบบคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

4.3.5 ผลการศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์

การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของ PP และ EEA ในพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ด้วยเทคนิค DSC แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าคอมโพสิตทุกสูตรมีค่า T_m , T_c และปริมาณผลึกของ PP ใกล้เคียงกันกับสูตร P100 (อยู่ในช่วง 170-173°C, 111-115°C และ 41-47% ตามลำดับ) ในส่วนของ EEA พบ T_m ที่ 104°C, T_c ที่ 75°C และปริมาณผลึกเท่ากับ 10% แต่เนื่องจากในระบบพอลิเมอร์ผสม EEA เป็นวัฏภาคกระจาย ขาดความต่อเนื่องในระบบ EEA จึงมีโอกาสเกิดผลึกได้น้อย อีกทั้งมีการใส่ในปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับ PP เพราะฉะนั้นในระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ EEA อยู่ภายในปริมาณ 0-15%wt ของพอลิเมอร์ผสม (P95E5B30, P90E10B30 และ P85E15B30) จึงไม่พบของ T_m , T_c และผลึกของ EEA แต่จะพบในสูตร P80E20B30 ซึ่งมีปริมาณ EEA มากที่สุด (20%wt ของพอลิเมอร์ผสม) โดยพบ T_m , T_c และปริมาณผลึกของ EEA เท่ากับ 100°C, 79°C และ 4% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 T_m , T_c และร้อยละความเป็นผลึกของ PP และ EEA ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ EEA แตกต่างกัน

สูตร	T_m (°C)		T_c (°C)		ความเป็นผลึก (%)	
	PP	EEA	PP	EEA	PP	EEA
PP	172	-	113	-	45	-
EEA	-	104	-	75	-	10
P70B30	173	-	115	-	43	-
P95E5B30	171	-	114	-	47	-
P90E10B30	170	-	111	-	45	-
P85E15B30	171	-	111	-	45	-
P80E20B30	170	100	111	79	41	4

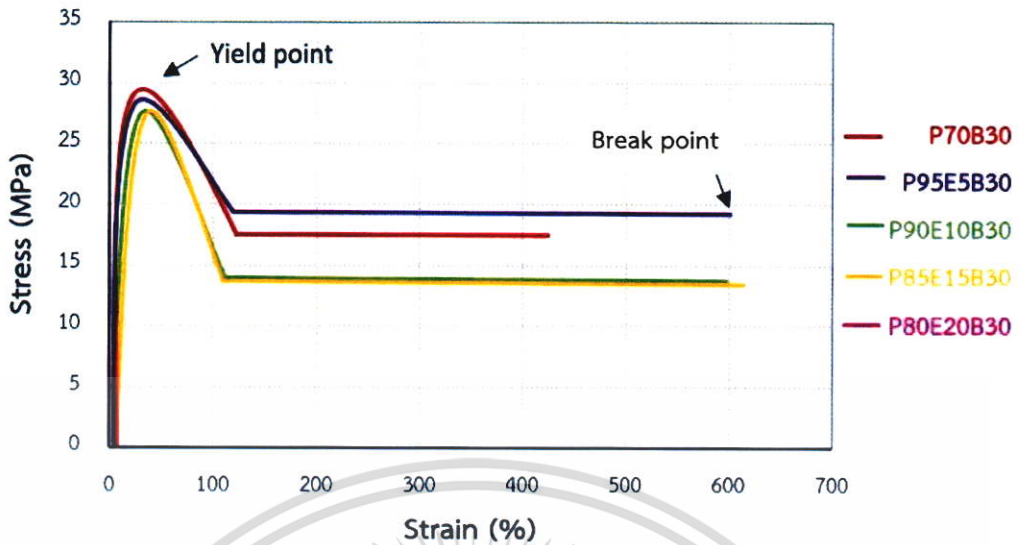
4.3.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ พบว่าคอมโพสิตทุกสูตร มีพฤติกรรมการเสียสภาพที่มีลักษณะเดียวกันกับคอมโพสิต P70B30 โดยแสดงตัวอย่างรูปแบบ Stress-strain curve ในรูปที่ 4.20 และผลการทดสอบการรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

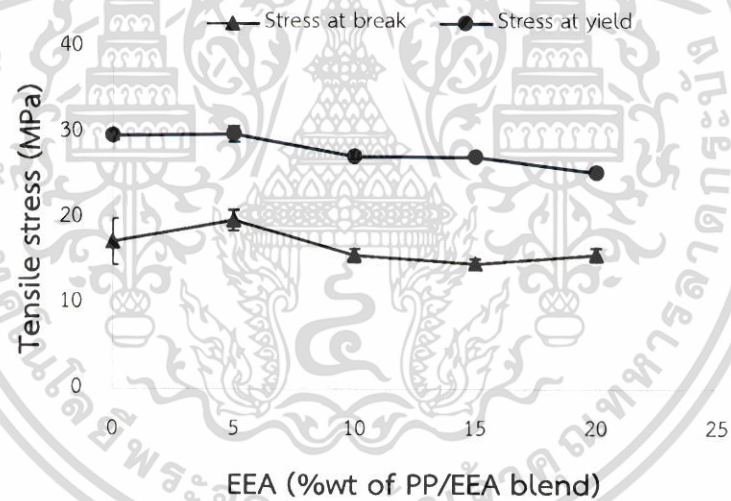
ที่ปริมาณ EEA เท่ากับ 5%wt ของพอลิเมอร์ผสม (สูตร P95E5B30) มีค่าใกล้เคียงกันกับสูตร P70B30 จากนั้นสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ EEA จนถึง 20%wt ของพอลิเมอร์ผสม (รูปที่ 4.21 (a)) แม้ว่า EEA ช่วยเพิ่มความสามารถในการผสมเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตร ซึ่งยืนยันได้จากผล SEM micrograph แต่ความยืดหยุ่นของ EEA ทำให้คอมโพสิตเสียรูปได้ง่ายและรับแรงได้น้อยกว่า PP และส่งผลให้ค่า Young's Modulus และความแข็งแรงของคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลงแสดงในรูปที่ 4.21 (d) และ 4.22 ตามลำดับ

ร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากนั้นสมบัติดังกล่าวมีค่าคงที่เมื่อมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 10%wt (รูปที่ 4.21 (c)) คาดว่าเป็นผลมาการรวมกลุ่มกันของอนุภาค BaSO₄ ในคอมโพสิตที่มีปริมาณ EEA อยู่มาก เกิดเป็นจุดบกพร่องและจุดรวบรวมแรงเค้นของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วใน SEM micrograph (รูปที่ 4.17 (d), (f) และ (h)) ทำให้เมื่อคอมโพสิตได้รับแรงดึง จะเกิดการแยกออกระหว่างรอยต่อผิวภาคของ BaSO₄ และพอลิเมอร์ผสม แม้มีการเพิ่มปริมาณ EEA ซึ่งเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นและเสียรูปได้ง่าย

ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ EEA แสดงในรูปที่ 4.23 เป็นผลมาจากการที่คอมโพสิตสามารถส่งผ่านแรงและกระจายแรงได้ดีขึ้น แม้ว่าการเพิ่มขึ้นของ EEA ทำให้อนุภาค BaSO₄ เกิดการรวมตัว ซึ่งมีโอกาสทำให้ความต่อเนื่องของระบบลดลง แต่การมีอยู่ของ EEA ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่นิ่ม และมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถรับและกระจายแรงได้ดีกว่า PP



รูปที่ 4.20 Stress- strain curve ของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)



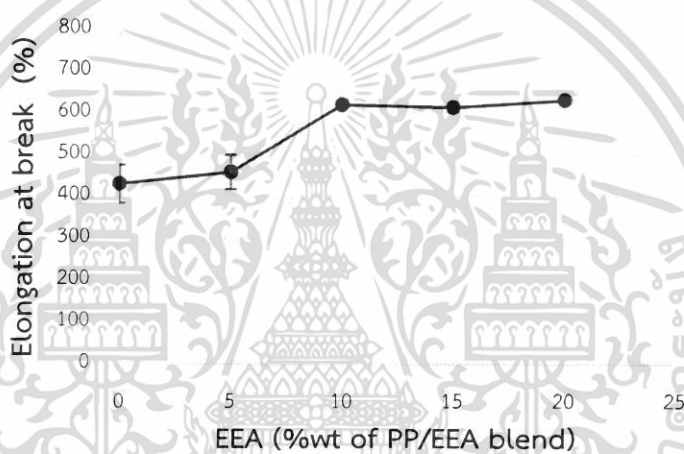
a) ความแข็งแรงดึง

รูปที่ 4.21 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 30%wt และมีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)

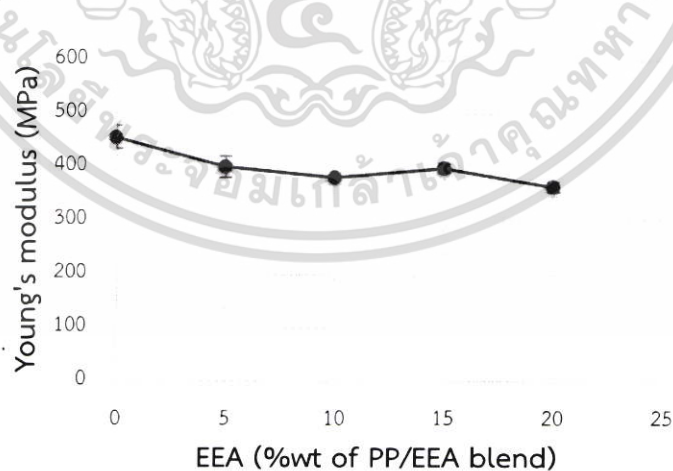
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก



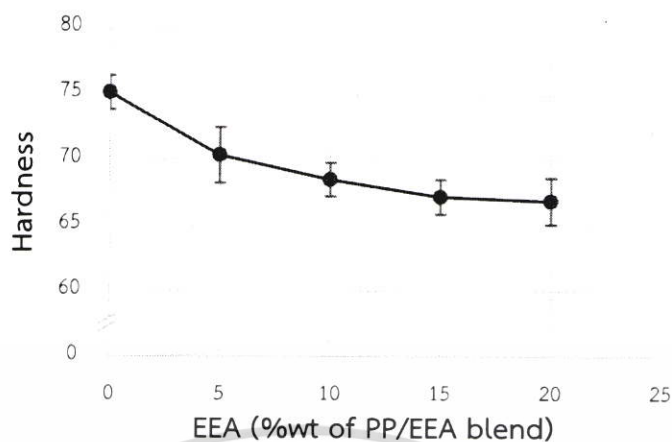
(c) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด



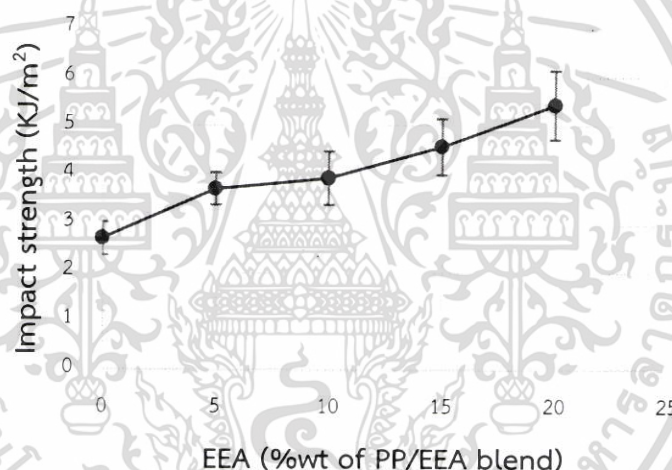
(d) ยังมอดุลัส

รูปที่ 4.21 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA) (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ความแข็งกดของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)

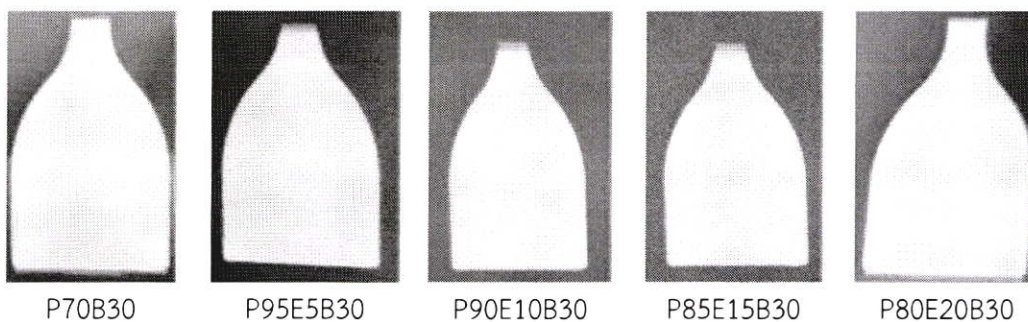


รูปที่ 4.23 ความต้านทานแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0- 20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)

4.3.7 ผลการทดสอบการบดบังรังสีของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

การทดสอบการบดบังรังสีของคอมโพสิตด้วยการถ่ายภาพเอกซเรย์ทางการแพทย์ แสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า ความสามารถในการบดบังรังสีเอกซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ EEA โดยสังเกตได้จากภาพเอกซเรย์ของคอมโพสิตทุกสูตร เห็นรูปร่างชิ้นงานชัดเจนใกล้เคียงกับสูตร P70B30 ทั้งนี้เนื่องจาก PP และ EEA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ โดยการบดบังรังสีเอกซ์เป็นผลมาจากอะตอม Ba ใน BaSO₄ ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูง และในคอมโพสิตทุกสูตรมีปริมาณ BaSO₄ ที่เท่ากัน (เท่ากับ 30%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 फिल्मเอกซเรย์ของคอมโพสิต P70B30 และ PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ EEA ตั้งแต่ 0-20%wt (%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA)

4.4 ผลของปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง PP และ EEA เท่ากับ 95/5

จากการศึกษาผลของปริมาณ EEA ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ คงที่เท่ากับ 30%wt พบว่า EEA สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตร และสามารถเพิ่มความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตได้ แต่พบว่าคอมโพสิตที่มี EEA ในปริมาณมากขึ้น มีค่าความแข็งแรงดึง ยิงมอดุลัส และความแข็งกดลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยในด้านความยืดหยุ่นของ EEA แต่พบว่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มปริมาณ EEA มากกว่า 10%wt ทั้งนี้เนื่องจาก BaSO₄ เกิดการแตกตัวและกระจายตัวไม่ดีในคอมโพสิตที่มี EEA อยู่ในปริมาณมาก ทำให้มีโอกาสเกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานมากขึ้น

งานวิจัยนี้เลือกคอมโพสิตที่มีปริมาณ EEA ต่ำ (5%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA ในสูตร P95E5B30) มาทำการปรับลดปริมาณ BaSO₄ ลง จาก 30%wt เป็น 20%wt เนื่องจากเมื่อพิจารณาคอมโพสิต P95E5B30 มี EEA : BaSO₄ เท่ากับ 1:9 ซึ่ง EEA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีเอทิลอะครีเลตอยู่ในปริมาณ 18.5% คาดว่าอาจมีปริมาณ EEA ที่น้อยเกินไปสำหรับปริมาณ BaSO₄ 30%wt ในคอมโพสิต จึงทำการเปรียบเทียบกับสูตร P95E5B20 (BaSO₄ 20%wt) คิดเป็น EEA : BaSO₄ เป็น 1:5

4.4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

การตรวจสอบปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ โดยเทคนิค TGA แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิตทั้งสองสูตรมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของ BaSO₄ ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄

สูตร	ปริมาณ BaSO ₄ (%wt)	
	ปริมาณที่ต้องการ	ปริมาณที่พบ
P95E5B20	20	21.5
P95E5B30	30	30.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ภายหลังจากการสกัดออกของวัฏภาค EEA ในรูปที่ 4.25 พบว่าคอมโพสิตทั้ง 2 สูตร มีช่องว่างซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่ EEA ถูกสกัดออกไป โดยมีการกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน และมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า EEA กระจายตัวได้ดีใน PP

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของ BaSO₄ ในพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อลดปริมาณ BaSO₄ ลงจาก 30%wt เป็น 20%wt ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มี PP/EEA เท่ากับ 95/5 อนุภาคของ BaSO₄ มีการแตกตัวและกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสม โดยอนุภาค BaSO₄ ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและฝังตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม และมีแนวโน้มเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนลดลงแสดงในรูปที่ 4.25 (a) เนื่องจากปริมาณ EEA 5%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA เพียงพอในการช่วยให้เกิดการแตกตัวและกระจายตัวที่ดีของ BaSO₄ 20%wt เมื่อเทียบกับคอมโพสิต P95E5B30 ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณ BaSO₄ อยู่ในปริมาณที่มากกว่า สังเกตเห็นจากอนุภาค BaSO₄ ที่มีขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการรวมกลุ่มของ BaSO₄ ที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณ EEA ในคอมโพสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (b)



(a) P95E5B20

(b) P95E5B30

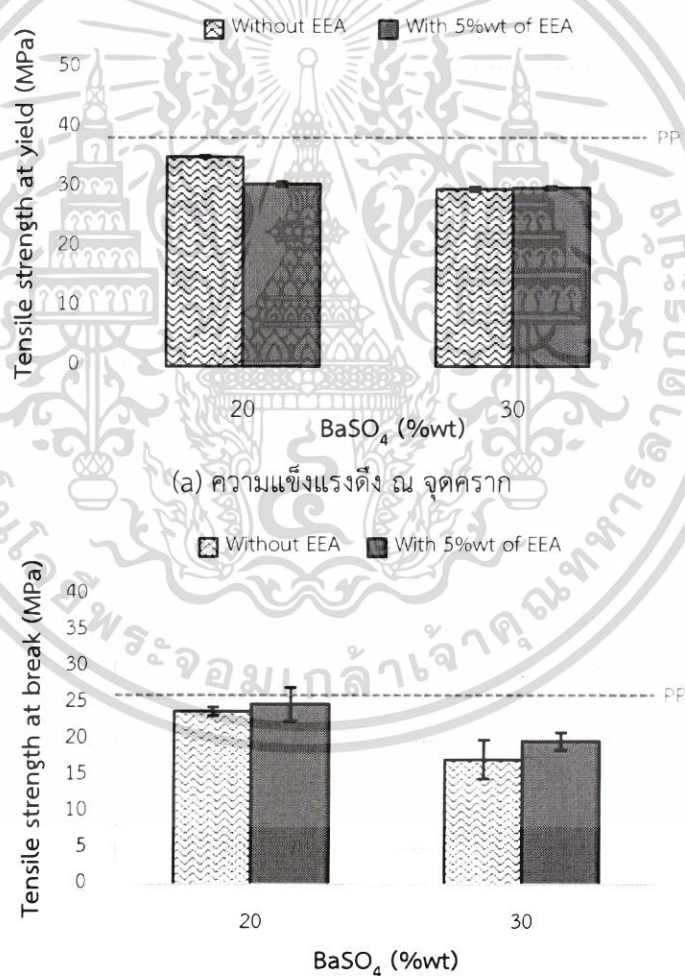
รูปที่ 4.25 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ;(a) P95E5B20 และ (b) P95E5B30

4.4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต พบว่าการลดลงของปริมาณ BaSO₄ ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีร้อยละการดึงยืดที่สูงกว่า PP (P100) (รูปที่ 4.26 (b) และ (d) ตามลำดับ) เนื่องจากปริมาณ EEA 5%wt ของพอลิเมอร์ผสม PP/EEA เพียงพอที่ทำให้ BaSO₄ ในปริมาณ 20%wt เกิดการแตกตัวและกระจายตัวได้ดี และมีโอกาสเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนลดลงซึ่งยืนยันได้จาก SEM-micrograph รูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

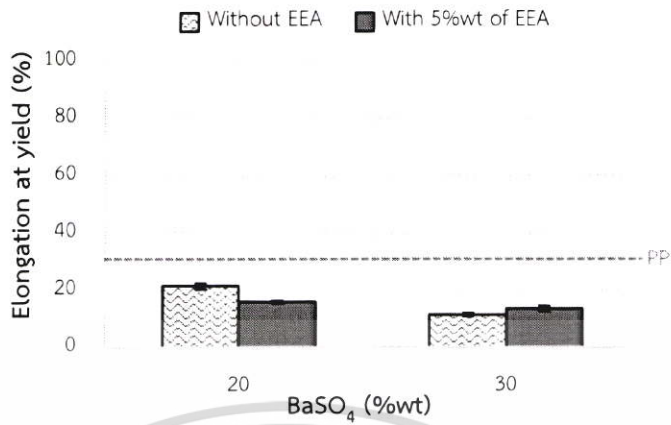
จากการศึกษาที่ผ่านมามีการใช้ BaSO₄ ร่วมกับ PP ทำให้คอมโพสิตมีมอดุลัสและความแข็งแรงสูง แต่มีความแข็งแรงดึง และการยึดตัวลดลง และความแข็งแรงกระแทกต่ำ เนื่องจากความเข้ากันได้ต่ำระหว่าง PP และ BaSO₄ จึงมีการนำ EEA มาช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ ซึ่งพบว่าแม้ว่า EEA ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ การกระจายตัวความสามารถในการดึงยึด และความแข็งแรงกระแทกให้แก่คอมโพสิต แต่การใช้ EEA ในปริมาณที่มากทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลงเนื่องจากความยืดหยุ่นของ EEA จึงเลือกใช้ปริมาณ EEA ที่ 5%wt และลดปริมาณ BaSO₄ จาก 30%wt (P95E5B30) เป็น 20%wt (P95E5B20) ซึ่งพบว่าคอมโพสิต มีมอดุลัส, ความแข็งแรง, ร้อยละการดึงยึด และความแข็งแรงกระแทกที่สูงกว่า P100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตมีความแข็งแรงคงรูปที่ดีขึ้น มีความสามารถในการดึงยึดก่อนเสียหายได้มากขึ้น อีกทั้งยังมีความแข็งแรงกระแทกที่สูงขึ้นอีกด้วย แม้ว่าจะมีความแข็งแรงดึงที่น้อยกว่า PP



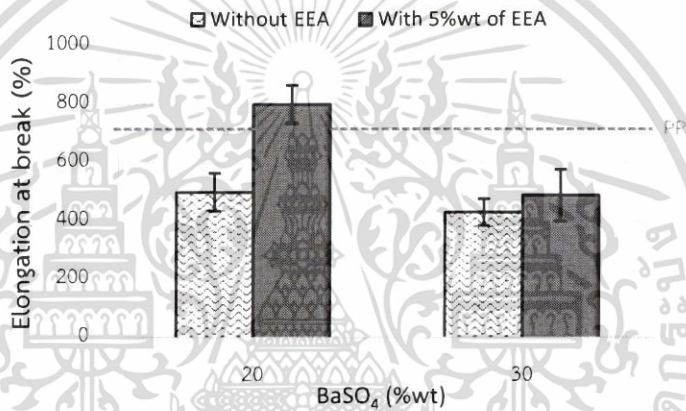
(b) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด

รูปที่ 4.26 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt ที่มีและไม่มี EEA

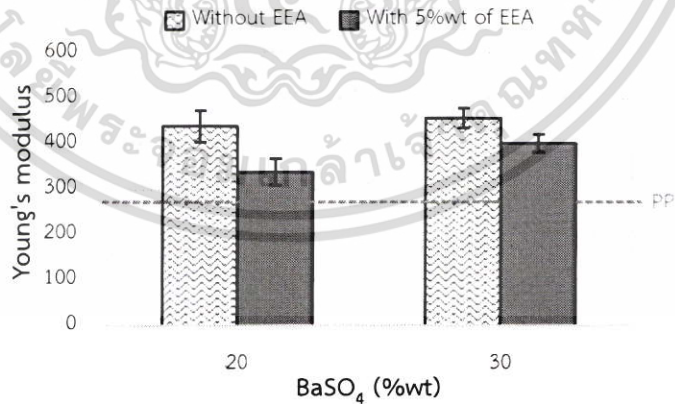
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก



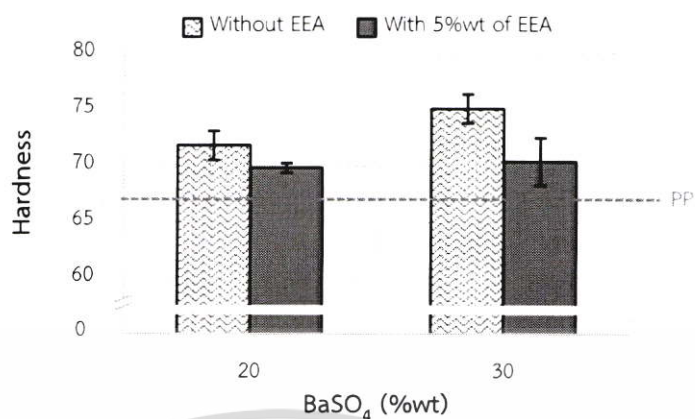
(d) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด



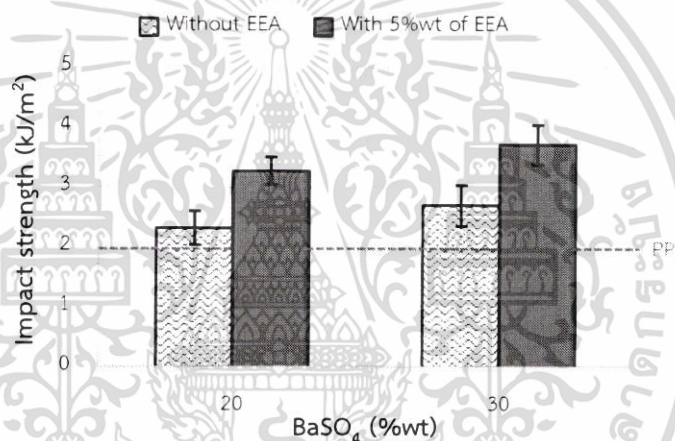
(e) ยังมอดุลัส

รูปที่ 4.26 การรับแรงดึงของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt ที่มี และไม่มี EEA (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ความแข็งกดของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt ที่มีและไม่มี EEA



รูปที่ 4.28 ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิต PP/BaSO₄ ที่ปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 20 และ 30%wt ที่มีและไม่มี EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตของ PP และ BaSO₄ ให้มีความแข็งแรงสูง และมีความทนแรงกระแทกที่ดี ด้วยการนำ EEA ในการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PP และ BaSO₄ ไปพร้อม ๆ กับการปรับปรุงความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄, ผลของ EEA และผลของปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีอัตราส่วน PP/EEA คงที่เท่ากับ 95/5 ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และความสามารถในการบดบังและลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิต จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิต PP/BaSO₄ พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ความหนาแน่นของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ดัชนีการหักเหของแสงเพิ่มขึ้น และพบว่า BaSO₄ หน่วงการสลายตัวของ PP ในคอมโพสิตทุกสูตร การมีอยู่ของ BaSO₄ ทำให้สเปียร์ลัดของ PP ในคอมโพสิตมีขนาดเล็กลง แต่คอมโพสิตทุกสูตรมี T_m, T_c และความเป็นผลึกของ PP ใกล้เคียงกัน การเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ BaSO₄ เกิดการแตกตัวและกระจายตัวที่ไม่ดีในวัฏภาคของ PP โดยพบว่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยืดมีค่าลดลง ในขณะที่ยังมอดูลัส, ความแข็งกด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่า การเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ส่งผลให้ความสามารถในการบดบังและลดทอนรังสีเอกซ์มีค่าสูงขึ้น โดยพบว่าคอมโพสิต P70B30 มีค่า HVL น้อยกว่า PP ถึง 4 เท่า

2. การศึกษาผลของ EEA ในคอมโพสิต PP/EEA/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 30%wt พบว่าการเพิ่มปริมาณ EEA ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของคอมโพสิต ดัชนีการหักเหของแสงของคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลง คอมโพสิตทุกสูตรมี T_m, T_c และความเป็นผลึกของ PP ใกล้เคียงกัน และ EEA สามารถเกิดผลึกได้ในคอมโพสิตสูตรที่มี EEA อยู่ในปริมาณมาก (P80E20B30) EEA ช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของ PP และ BaSO₄ โดยเกิดการฝังตัวของ BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตร EEA มีการกระจายตัวที่ดีใน PP และช่วยการแตกตัวและกระจายตัวของ BaSO₄ แต่พบว่าเมื่อปริมาณ EEA มากขึ้นส่งผลให้ BaSO₄ กลับมารวมกลุ่มกัน ส่งผลให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานประกอบกับผลจากความยืดหยุ่นของ EEA จึงพบว่า การเพิ่มปริมาณ EEA ทำให้ความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงดึง, ยังมอดูลัส และความแข็งกดมีค่าลดลง

3. การศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิต PP/EE/BaSO₄ ที่มีอัตราส่วน PP/EEA เท่ากับ 95/5 เมื่อมีการลดปริมาณ BaSO₄ จาก 30%wt เป็น 20%wt อนุภาค BaSO₄ กระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ได้ดีขึ้น เกิดการรวมกลุ่มกันน้อยลง และพบว่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการดึงยืดมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น โดยมีร้อยละการดิ่งยดที่สูงกว่า PP เนื่องจากปริมาณที่เหมาะสมของ EEA และ BaSO_4 และจากการมีรอยต่อระหว่างวัฏภาค และจุดบกพร่องของชิ้นงานที่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับเปลี่ยนระบบการผสมเป็นการผสมแบบ 2 ขั้นตอน และเพิ่มความเร็วรอบในการผสม เพื่อให้ BaSO_4 เกิดการกระจายตัวได้ดีในเมตริกซ์ และเกิดการผสมที่ดี

2. ศึกษาการใช้ BaSO_4 เกรดนาโนที่มีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และลดจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน แต่ต้องระวังเรื่องการแตกตัวและกระจายตัว อาจจำเป็นต้องใช้สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาค BaSO_4 ซึ่งส่งผลให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

3. คอมโพสิตที่ได้มีความสามารถในการลดทอนรังสีเอกซ์ แต่ยังคงมีความหนาที่มากเมื่อเทียบกับการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ทั่วไปทำให้ไม่สามารถทดแทนการใช้ตะกั่วได้แต่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุโครงสร้าง (Housing) ในวัสดุลดทอนรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีการใช้แผ่นตะกั่วแทรกอยู่ภายในวัสดุโครงสร้าง แต่เนื่องจากตะกั่วมีน้ำหนักมากทำให้วัสดุป้องกันรังสีเอกซ์มีน้ำหนักที่สูง อีกทั้งยังเป็นพิษทำให้ยากต่อการกำจัด การใช้วัสดุโครงสร้างจากพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สามารถลดทอนรังสีเอกซ์ได้ จะทำให้สามารถลดการใช้ตะกั่วลงหรือใช้ตะกั่วที่มีความหนาลดลงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อธิพิล แจ้งชัด. 2553. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Jia, L.H. Chien, H.L. Chi, L.F. Chih, C.K. Zheng, L.L. and Ching, L.W. 2015. “Polypropylene/Short Glass Fibers Composites: Effects of Coupling Agents on Mechanical Properties, Thermal Behaviors, and Morphology.” *Materials*. 8 : 8279–8291.
- [3] Ozkan, C. Karsli, N.G. Aytac, A. and Deniz, V. 2014. “Short Carbon Fiber Reinforced Polycarbonate Composites: Effects of Different Sizing Materials.” *Composites: Part B*. 62 : 230-235.
- [4] Unal, H. and Mimaroglu, A. 2012. “Mechanical and Morphological Properties of Mica and Short Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites.” *International Journal of Polymeric Materials*. 61 : 834–846.
- [5] รังสิมา ทญิตสอน, นฤมล เครื่ององอาจนุกูล, สพล โชติวรรณ และวิวรรณ ธรรมมงคล. 2545. “HDPE ผสมไมก้าหรือทาวคัม : สมบัติการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนและสมบัติเชิงกล.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 12(3) : 48-56.
- [6] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย. 2559. *คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น*. กรุงเทพฯ : ไอดี ออล. ดิจิตอลพริ้นท์.
- [7] Mustafa, G.A. Ibrahim, I. Hassan, H. and Yaser, D. 2016. “Viscoelastic Behavior and Mechanical Properties of Polypropylene/Nano-Calcium Carbonate Nanocomposites Modified by a Coupling Agent”. *Macromolecular Research*. 17 : 1-11.
- [8] 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.
- [9] Harper, C.A. 1994 . **Modern Plastics Handbook**. New York : McGraw-Hill.
- [10] Subramanian, S.J. 2011. **Materials and Manufacturing for the Automotive Industry**. Madras : Department of Engineering Design Indian Institute of Technology.
- [11] Ling, T.C. Poon, C. Lam, W.S. Chan, T.P. and Fung, K.L. 2013. “X-ray Radiation Shielding Properties of Cement Mortar Prepared with Different Types of Aggregate.” *Materials and Structures*. 46(7) : 1133–1141.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] เมธาวิ อุตตสุรติ. 2558. “การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตแอลแอลดีพีอี/แบเรียมซัลเฟต ด้วยสารช่วยผสมและอีวีเอ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] DowDuPont. 2017. **Acrylate Copolymer Resin Enhances and Processing Performance.** [Online]. Available : <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/ethylene-copolymers/brands/elvaloy-ethylene-copolymer-resins/products/elvaloy-ac-acrylate-copolymer.html>
- [14] หลุณศักดิ์ กิรีติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี . 2552. “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ.” *วิศวกรรมสาร มก.* 22(70) : 18-32.
- [15] Hull, D. and Clyne, T.W. 1996. **An Introduction to composite materials.** 2nd ed. Cambridge : Great Britain at the University Press.
- [16] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. 2541. **เอกสารประกอบการสอน วิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Pereira, P. S. Mendes, L.C. and Abrigo, R. E. 2008. “Changes in Properties of PET/PC Blend by Catalyst and Time.” *International Journal of Polymeric Materials.* 57 : 494–505.
- [18] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2559. **เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์ผสม.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ต.
- [20] Lloy, M.R. 2007. **Polymer Blends.** [Online]. Available : [http://files.hanser.de/hanser/docs/20071031-2713114551-70-978-3-446-22569-5_Extract.pdf.2007.](http://files.hanser.de/hanser/docs/20071031-2713114551-70-978-3-446-22569-5_Extract.pdf.2007)
- [21] Hansen, C.M. 2007. **Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook.** New York : CRC Press Taylor & Francis Group.
- [22] Thomas, S. Grohens, Y. and Jyotishkumar, P. 2014. **Characterization of Polymer Blends: Miscibility, Morphology, and Interfaces.** 1st ed. German : Wiley-VCH Verlag GmbH.
- [23] Zeng, J. Li, K. and Du, A. 2015. “Compatibilization Strategies in Poly(lactic acid)-Based Blends.” *RSC Advances.* 5(41) : 32546-32565.
- [24] Pivsa-Art, S. Kord-Sa-Ard, J. Pivsa-Art, W. Wongpajan, R. O-Charoen, N. Pavasupree, S. and Hamada, H. 2016. “Effect of Compatibilizer on PLA/PP Blend for Injection Molding.” *Energy Procedia.* 89(1) : 353 – 360.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. 2545. **วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [26] Explorable. 2010. **Wilhelm Conrad Roentgen and the Discovery of X-Ray Beams**. [Online]. Available : <https://explorable.com/wilhelm-conrad-roentgen>.
- [27] ปรียา อุนพงษ์องอาจ. 2560. **การเรียนการสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านอินเทอร์เน็ต**. [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/physics/>.
- [28] คณะเทคนิคการแพทย์ ภาควิชารังสีเทคนิค มหาวิทยาลัยมหิดล. 2547. **E-learning MTRD202**. [Online]. Available : <http://www.mt.mahidol.ac.th/e-learning/MTRD202/WEB/Chapter2Conventionalx-ray/2-3-1.htm>
- [29] คณะเทคนิคการแพทย์ ภาควิชารังสีเทคนิค มหาวิทยาลัยมหิดล. 2547. **E-learning Instrumentation/NMP_chap1_47**. [Online]. Available : http://www.mt.mahidol.ac.th/elearning/instrumentation/NMP_chap1_47/page/index_1.htm
- [30] Mohamed, M.M. 2015. **X-Ray Technology**. [Slide]. Faculty of Allied Medical Science Pharos University in Alexandria : Slideplayer.
- [31] Hunt, S.E. 1987. **Nuclear Physics for Engineers and Scientists**. Chichester : Ellis Horwood Limited.
- [32] สมศร สิงขรัตน์. 2545. **เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์นิวเคลียร์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [33] International Organization for Standardization. 1996. **ISO 4037-1 X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosimeters and Doseratemeters and for Determining their Response as a Function of Photo Energy Part 1 : Radiation Characteristics and Production methods**. Switzerland : n.p.
- [34] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2015. **Calibration Certificate of Ionisation Chamber with Display Unit**. Braunschweig : Standard Imaging.
- [35] ทิวาวัลย์ อธิชาติกุล, นพวรรณ ชนัญพานิช, วิฑิต ผึ้งกัน และชลดา สุวรรณบุรณ์. 2560. “สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นคอมพอสิต PU/BaSO₄” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 27(1) : 159-168.
- [36] นพวรรณ ชนัญพานิช และอุทุมมา มัชชะเนมิ. 2554. “แผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตป้องกันรังสีเอกซ์.” ใน *การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 12* กรุงเทพฯ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] Deanin, R.D. 1972. **Polymer Structure, Properties and Applications**. Boston : Division of Cahners Publishing.
- [38] ปรีชา พหลเทพ. 2540. **พอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [39] Wikipedia. 2017. **Polypropylene**. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>
- [40] NPTEL. 2017. **Polypropylene Fibres**. [Online]. Available : <http://nptel.ac.in/courses/116102026/synthetic%20fibers-m7/polypropylene%20fibres.htm>
- [41] Thai Poly Chemicals. 2017. **Barium Sulphate**. [Online]. Available: <https://thaipolychemical.page.tl/%26%233649%3B%26%233610%3B%26%233648%3B%26%233619%3B%26%233637%3B%26%233618%3B%26%233617%3B%26%233595%3B%26%233633%3B%26%233621%3B%26%233648%3B%26%233615%3B%26%233605%3B.htm>
- [42] P & S Barite Mining Co., Ltd. 2012. **Barite/Baryte (BaSO₄)**. [Online]. Available: <http://pandsgroup.com/th/products.htm>.
- [43] 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.
- [44] Wang, K. Wu, J. and Zeng, H. 2003. "Radial growth rate of spherulites in polypropylene/barium sulfate composites." 39 : 1647–1652.
- [45] 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>.
- [46] Phueakbuakhao, N. Prissanapoon-ouajai, W. and Kreua-ongarjnucool, N. 2008. "Effect of Coupling Agents on Mechanical Properties and Morphology of CaCO₃-filled Recycled High Density Polyethylene." *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 18 : 131-135.
- [47] Martinez de Arenaza, I. Sadaba, N. Larrañaga, A. Zuza, E. and Sarasua, J.R. 2015. "High Toughness Biodegradable Radiopaque Composites Based on Polylactide and Barium Sulphate." *European Polymer Journal*. 73 : 88-93.
- [48] Zuiderduin, W.C.J. Westzaan, C. Hue'tink, J. and Gaymans. R.J. 2003. "Toughening of Polypropylene with Calcium Carbonate Particles." *Polymer*. 44 : 261-275.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] Koulouri, E. G. Gravalos, K. G. and Kallitsis, J. K. 1996. "In situ Compatibilization of Poly(ethyleneco-ethyl acrylate)/Nylon 6 Blends." *Polymer*. 37(12) : 2555-2563
- [50] Kausar, A. 2016. "Scrutinization of Poly(ethylene-co-ethyl acrylate)/Poly(methyl acrylate) and Zein-based Nanocomposite." *American Journal of Polymer Science & Engineering*. 4: 8-16
- [51] 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.
- [52] 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*. 8(1).
- [53] 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).
- [54] American Standard for Testing and Materials. 1992. "Standard Test Methods for Melt Flow Rates of Thermoplastic by Extrusion Plastometer: ASTM D 1238." *Annual Book of ASTM Standards*. 8.01
- [55] American Standard for Testing and Materials. 2006. "Standard Test Method for Melting and Cystallization Temperatures by Thermal Analysis : ASTM E794." *Annual Book of ASTM Standards*. 4(2).
- [56] Brand Rawlings. 2015. **Heat of Fusion of 100% Crystalline Polymer.** [Online]. Available: <http://willson.cm.utexas.edu/.../Crystalline%20in%20Polymers>.
- [57] American Standard for Testing and Materials. 1992. "Standards Test Method for Tensile Properties of Plastics : ASTM D638." *Annual Book of ASTM Standards*. 8(2) : 226-229.
- [58] 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(3) : 201-210.
- [59] American Standard for Testing and Materials. 1992. "Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness: ASTM D2240." *Annual Book of*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ASTM Standards. 8(2) : 226-229.
- [60] Ying, L. Xuanjun, W. Xiaoxi, M and Shujuan, Z. 2012. "The Performance of Barium Sulfate Nanoparticles/Polypropylene Hybrid Multifilament." *International Journal of Nanoscience*. 11(7) : 1240039-1- 1240039-7.
- [61] Wang, Y. Cheng, R. Liang, L. and Wang, Y. 2005. "Study on the preparation and characterization of ultra-high molecular weight polyethylene-carbon nanotubes composite fiber." *Composites Science and Technology*. 65 : 793-797.
- [62] Lide, D.R. 2008. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 89th ed. London : CRC Press Taylor & Francis Group.
- [63] INEOS world of chemicals. 2018 **Typical Engineering Properties of Polypropylene**. [Online]. Available: <https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos-engineering-properties-of-pp.pdf>.
- [64] Sonpoo, T. and Rukchonlatee, S. 2017. "Effect of ethylene vinyl acetate copolymer on mechanical properties of bottles produced from high density Polyethylene mixed with calcium carbonate." The Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-8), Bangkok, 170-174.
- [65] Rother, R. N. 2003. **Particulate-Filled Polymer Composites, Chapter: 8 Filled Thermoplastics**. 2nd ed. Boston : Rapra Technology Limited.
- [66] Sprawls, P. 1995. **Physical Principles of Medical Imaging**. 2nd ed. Wisconsin : Medical Physics Publishing.
- [67] สุภารัตน์ รักชลธี. 2559. **เอกสารประกอบการสอนวิชา Polymer structure, properties and applications**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค BaSO₄

ก-1 ผลการทดสอบการกระจายขนาดของอนุภาค BaSO₄ ด้วยเครื่อง Mastersizer X

ตารางที่ ก-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 ขนาดเล็กสุดของช่วงขนาดอนุภาคนั้น ๆ (μm)

Size high คือ ขนาดใหญ่สุดของช่วงขนาดอนุภาคนั้น ๆ (μm)

Result In คือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของปริมาณอนุภาคที่มีอยู่ในช่วงขนาดอนุภาคนั้น (%)

Result below คือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของปริมาณอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าช่วงขนาดของอนุภาคที่กล่าวถึง (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณความหนาแน่นและปริมาตรของคอมโพสิต

(ข-1) การคำนวณความหนาแน่นทางทฤษฎี

ความหนาแน่นของสารผสมหาได้ดังสมการ

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

$$\text{ซึ่งปริมาตรรวมของสารผสม} = \frac{\% \text{wt of PP}}{\rho \text{ of PP}} + \frac{\% \text{wt of EEA}}{\rho \text{ of EEA}} + \frac{\% \text{wt of BaSO}_4}{\rho \text{ of BaSO}_4} \quad (\text{ข-2})$$

เมื่อ

$$\text{ความหนาแน่นของ PP* } (\rho \text{ of PP}) = 0.850 \text{ g/cm}^3$$

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

$$\text{ความหนาแน่นของ EEA* } (\rho \text{ of EEA}) = 0.931 \text{ g/cm}^3$$

*ค่าความหนาแน่นที่ใช้เป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตหรือบริษัทผู้จำหน่าย

ตัวอย่างการคำนวณ

- สูตร P70B30 (สารผสม 100 g มี PP 70 g และ BaSO₄ 30 g)

ปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ จากผลของ TGA = 30.60 %wt

แสดงว่าในสารผสม 100 %wt มี PP = 69.4 %wt และมี BaSO₄ = 30.60 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 88.45 cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.131 g/cm³

- สูตร P95E5B30 (สารผสม 100 g มี PP 66.5 g, EEA 3.5 g และ BaSO₄ 30 g)

ปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ จากผลของ TGA = 30.70 %wt

แสดงว่าในสารผสม 100 %wt มี PP = 66.5 %wt , EEA = 3.5 และ BaSO₄ = 30.70 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

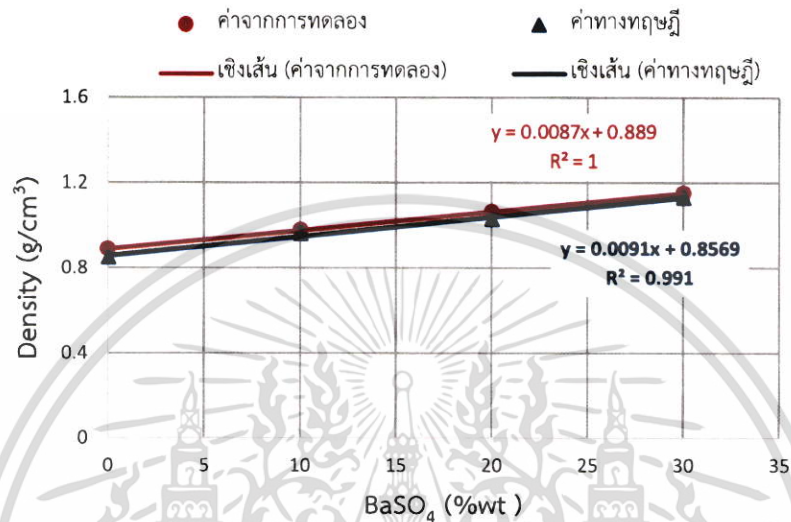
จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 88.82 cm³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.126 g/cm^3

(ข-2) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอมโพสิตกับปริมาณ BaSO_4



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณ BaSO_4

(ข-3) การคำนวณปริมาตรของคอมโพสิตที่เคลื่อนที่ผ่านหัวตายในการหาค่า MFI

จากสมการ

$$D = \frac{M}{V}$$

(ข-3)

ความหนาแน่นของ BaSO_4^* = 4.5 g/cm^3

ความหนาแน่นของ PP ที่อุณหภูมิการทดสอบ (230°C)** = 0.75 g/cm^3

ความหนาแน่นของ EEA ที่อุณหภูมิการทดสอบ (230°C)** = 0.819 g/cm^3

*ค่าความหนาแน่นที่ใช้เป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตหรือบริษัทผู้จำหน่าย

** ค่าความหนาแน่นของ PP และ EEA ที่อุณหภูมิการทดสอบคิดเป็น 88% ของความหนาแน่น ณ อุณหภูมิห้อง [67]

ตัวอย่างการคำนวณ

- สูตร P70B30 (สารผสม 100 g มี PP 70 g และ BaSO_4 30 g)

ปริมาณที่แท้จริงของ BaSO_4 จากผลของ TGA = 30.60 %wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่าในสารผสม 100 %wt มี PP = 69.4 %wt และมี BaSO₄ = 30.60 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 99.33 cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.006 g/cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-3

จะได้ปริมาตรของพอลิเมอร์หลอมเหลว = 0.220 cm³

- สูตร P95E5B30 (สารผสม 100 g มี PP 66.5 g, EEA = 3.5 g และ BaSO₄ 30 g

ปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ จากผลของ TGA = 30.70 %wt

แสดงว่าในสารผสม 100 %wt มี PP = 66.5 %wt , EEA = 3.5 และ BaSO₄ = 30.70 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

จะได้ ปริมาตรรวมของสารผสม = 99.76 cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของสารผสม = 1.002 g/cm³

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-3

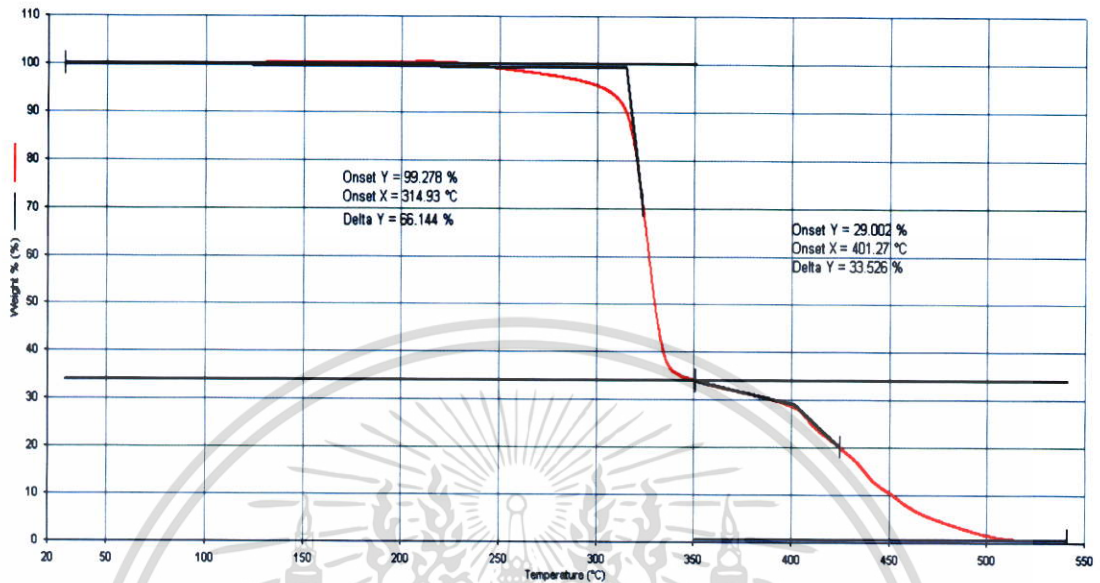
จะได้ปริมาตรของพอลิเมอร์หลอมเหลว = 0.218 cm³

ตารางที่ ข-1 น้ำหนัก, ความหนาแน่น และปริมาตรของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เคลื่อนที่ผ่านหัวตาย

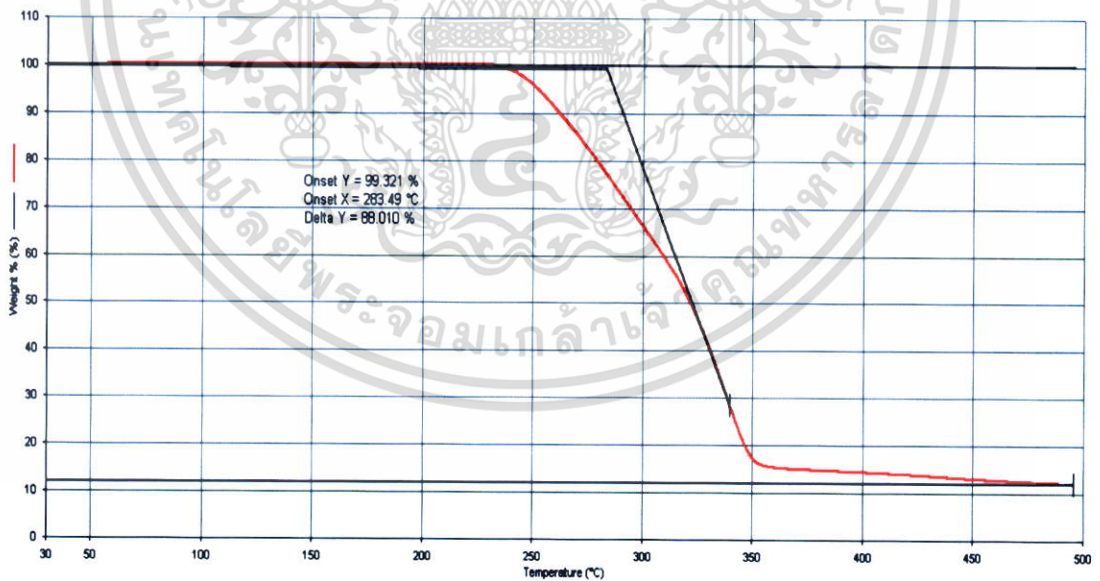
ในการทดสอบหาค่า MFI ที่อุณหภูมิทดสอบ 230°C

Formula	น้ำหนักพอลิเมอร์หลอมเหลว ที่เคลื่อนที่ผ่านหัวตาย (g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ปริมาตรพอลิเมอร์หลอมเหลว ที่เคลื่อนที่ผ่านหัวตาย (cm ³)
P100	0.2327	0.750	0.310
P90B10	0.2083	0.828	0.252
P80B20	0.2141	0.913	0.234
P70B30	0.2219	1.006	0.220
P95E5B30	0.2191	1.002	0.218
P90E10B30	0.2125	1.006	0.211
P85E15B30	0.2068	1.010	0.204
P80E20B30	0.2011	1.013	0.198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

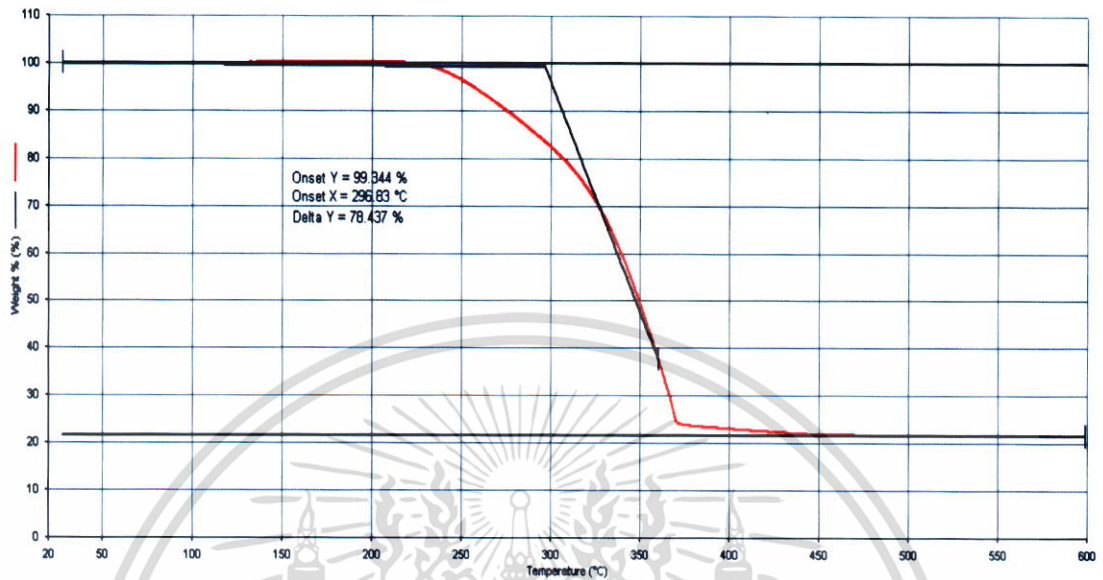


รูปที่ ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของ EEA

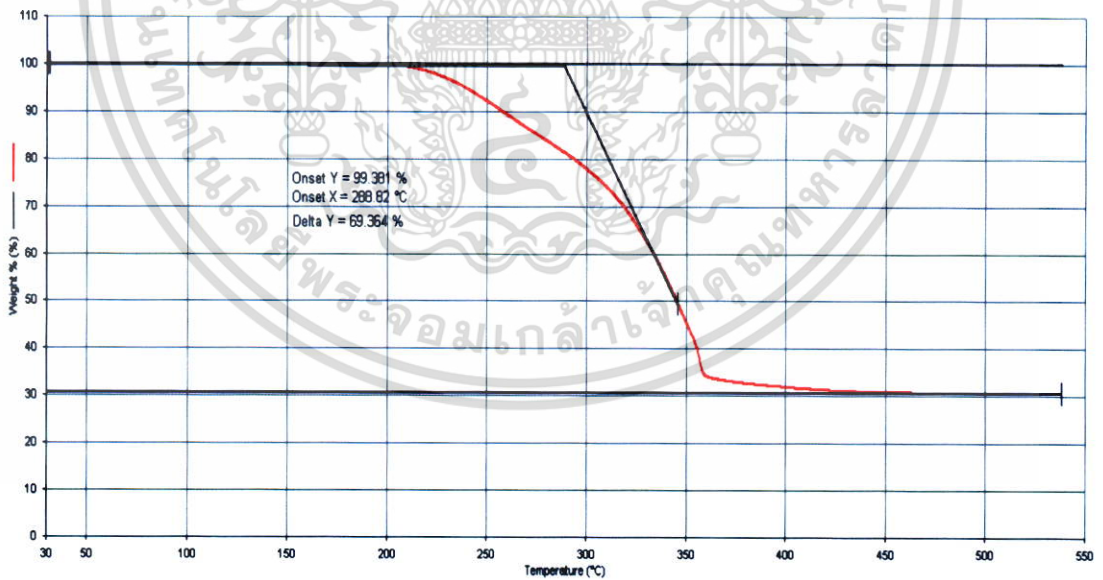


รูปที่ ค.4 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P90B10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

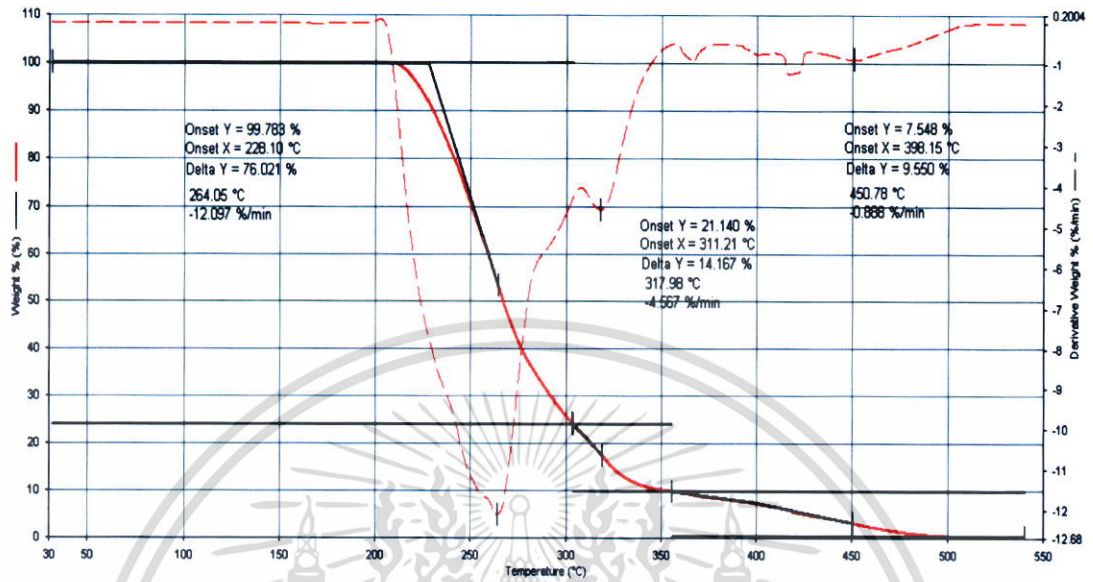


รูปที่ ค.5 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P8020

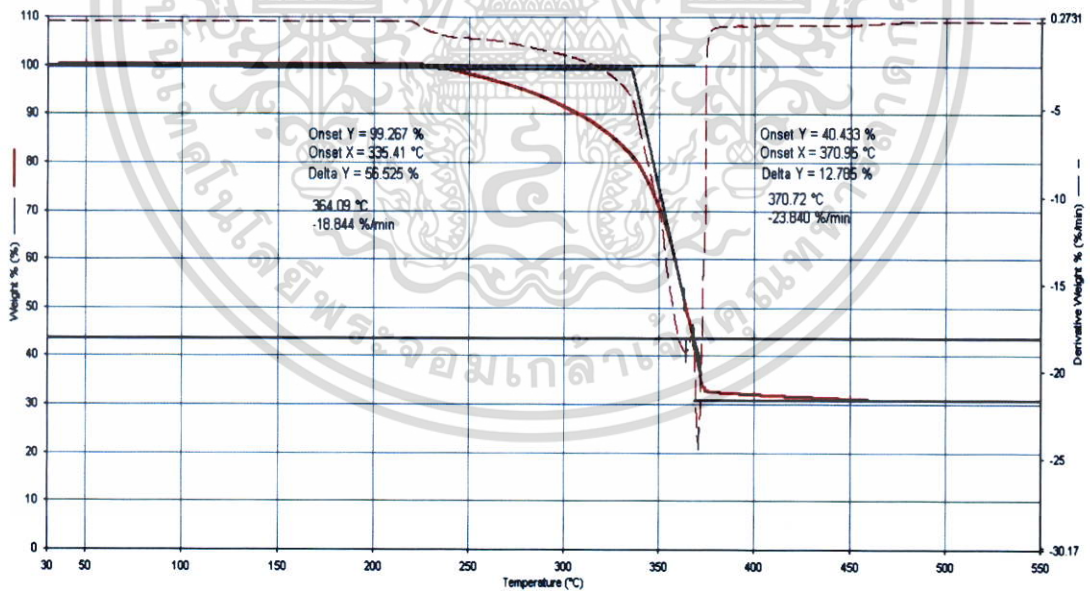


รูปที่ ค.6 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P70B30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

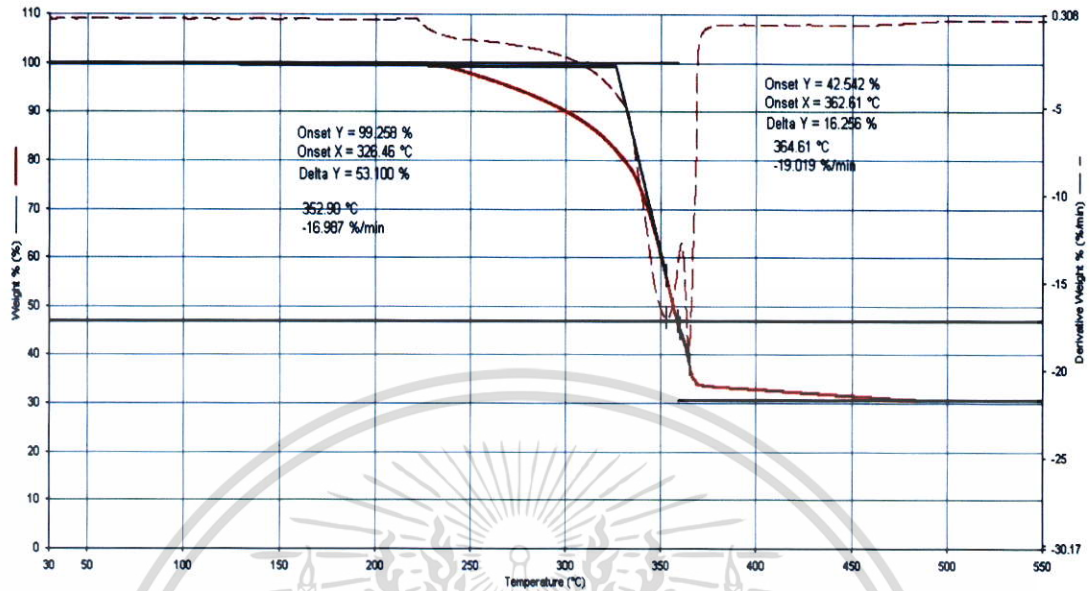


รูปที่ ค.7 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5

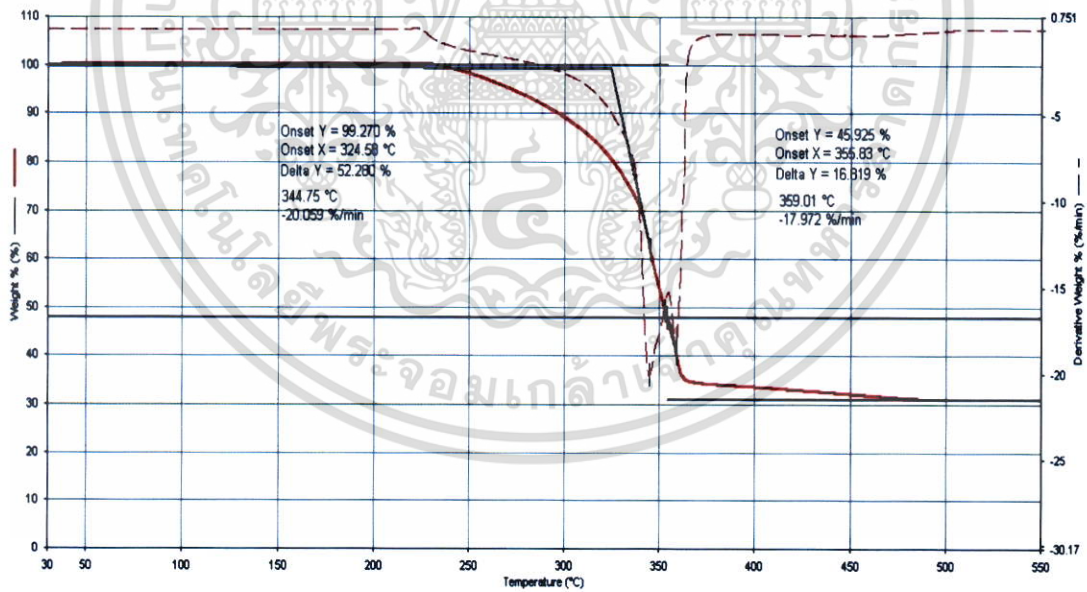


รูปที่ ค.8 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5B30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

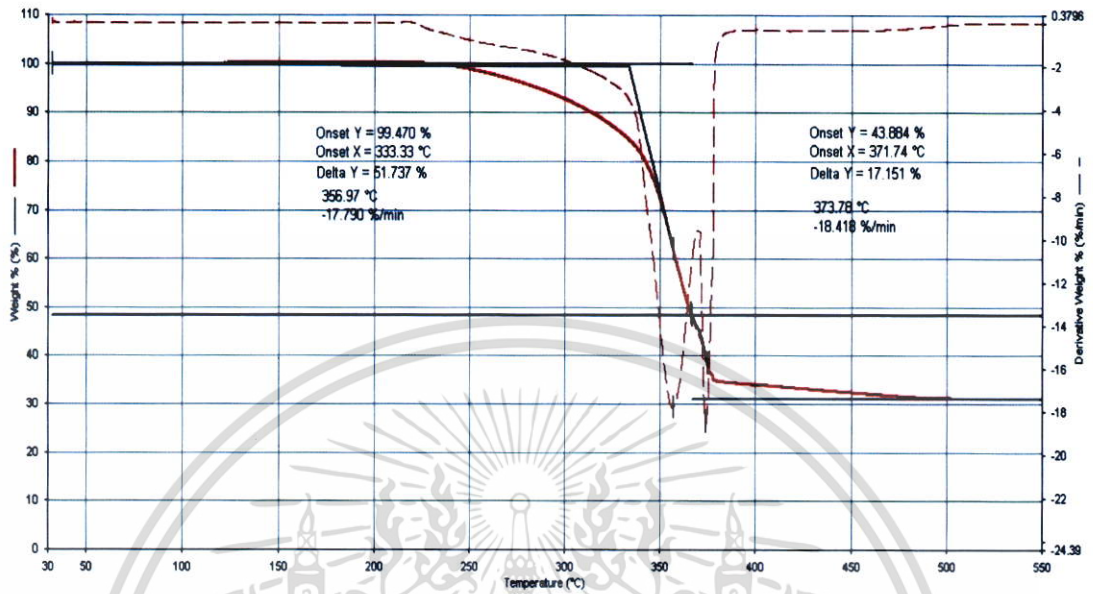


รูปที่ ค.9 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพลีต P90E10B30

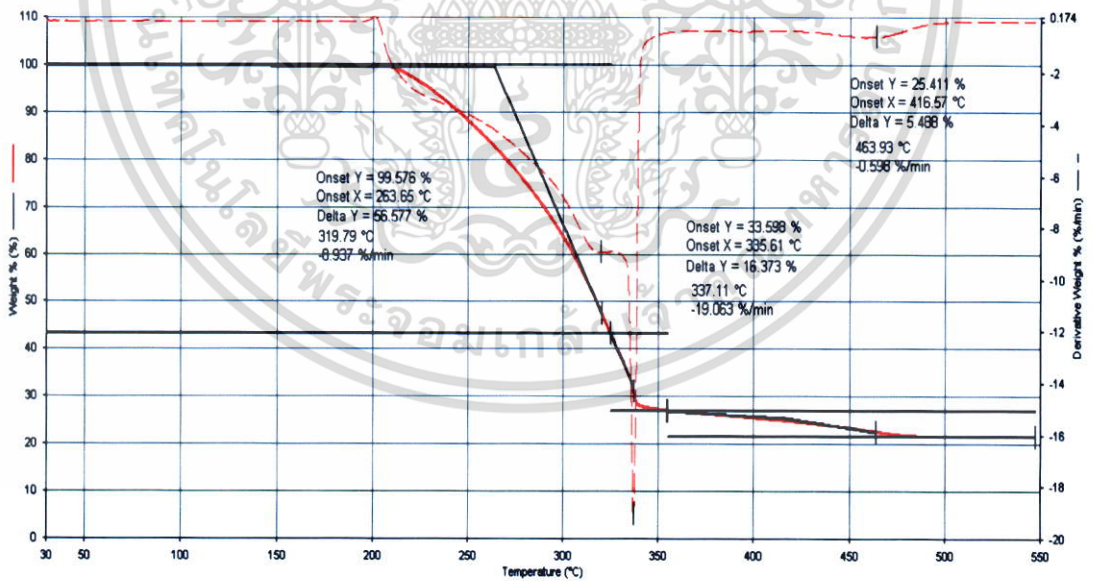


รูปที่ ค.10 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพลีต P85E15B30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.11 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P80E02B30



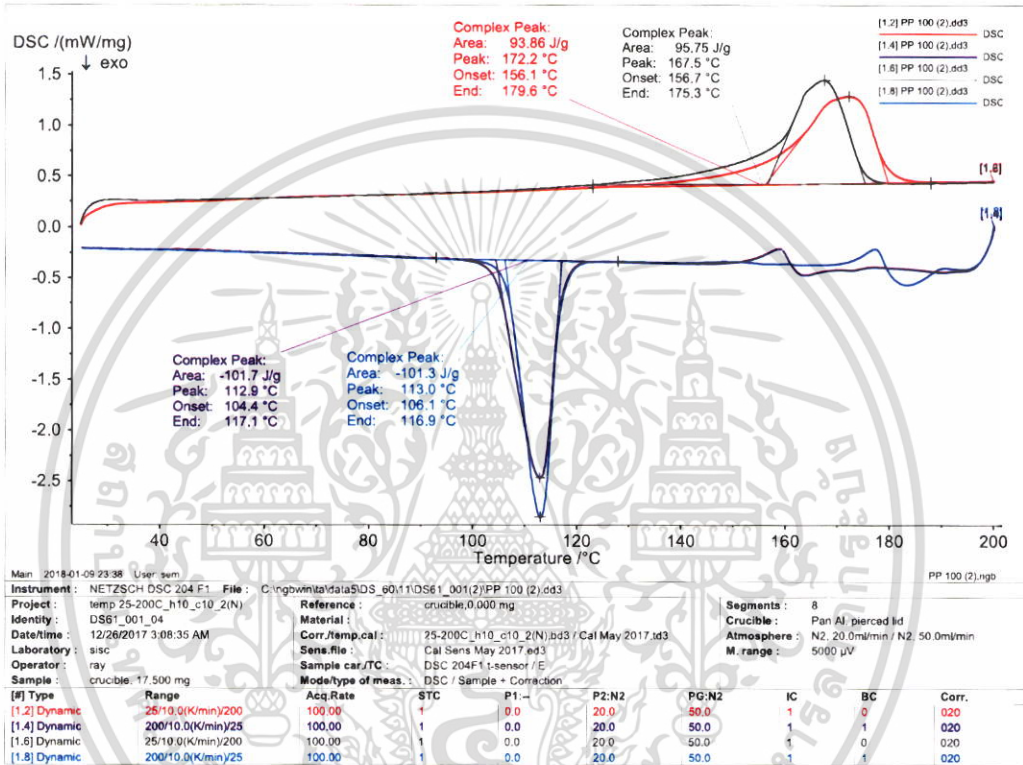
รูปที่ ค.12 TGA เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5B20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

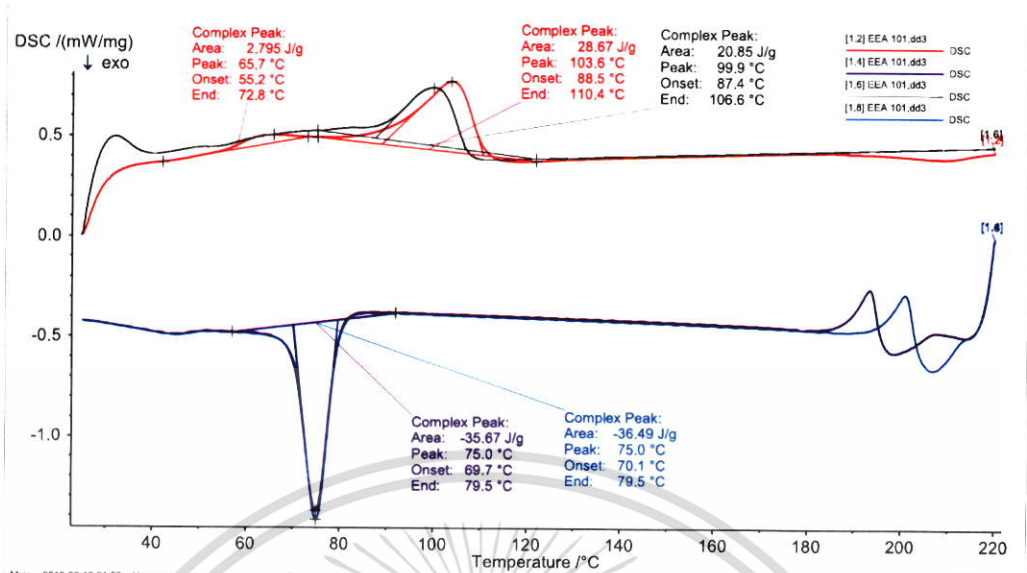
DSC เทอร์โมแกรม

ง.1 DSC เทอร์โมแกรมของวัสดุดิบและคอมโพสิต



รูปที่ ง.1 DSC เทอร์โมแกรมของ PP

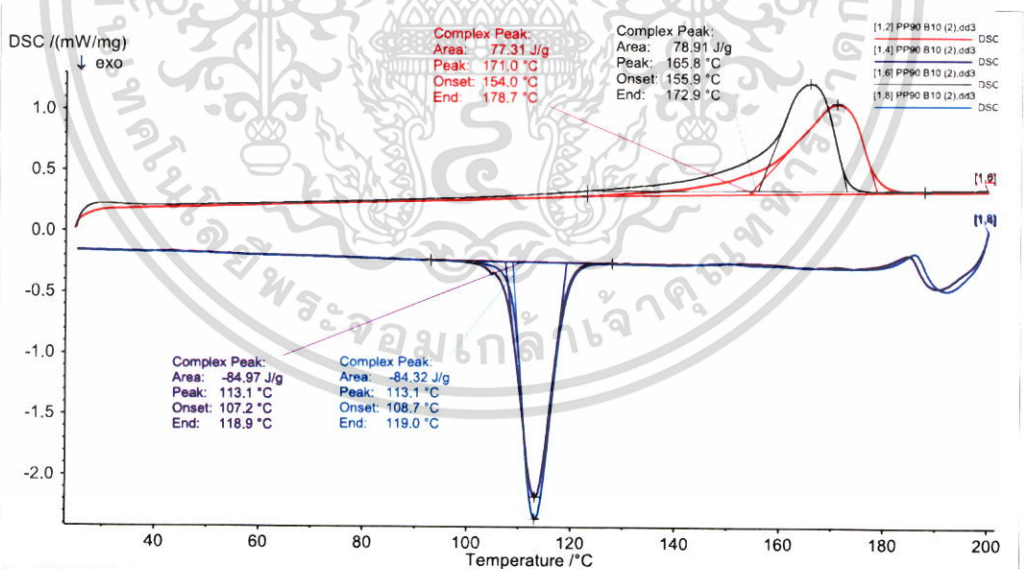
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Main: 2018-02-19 21:56 User: sem
 Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwint\data\DS_6102\DS61_010\EEA 101.d3
 Project: temp 25-220C_h10_c10_2(N) Reference: crucible,0.000 mg
 Identity: DS61_010_01 Material: In Segments: 8
 Date/Time: 2/7/2018 11:28:27 PM Corr.Temp.cal: 25-220C_h10_c10_2(N).bd3 / Cal May 2017.d3 Crucible: Pan Al, pierced lid
 Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sens May 2017.ed3 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
 Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E M.range: 5000 uV
 Sample: crucible, 15.200 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction

[#] Type	Range	Acq.Rate	STC	P1	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/220	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.4] Dynamic	220/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020
[1.6] Dynamic	25/10.0(K/min)/220	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.8] Dynamic	220/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

รูปที่ 2 DSC เทอร์โมแกรมของ EEA

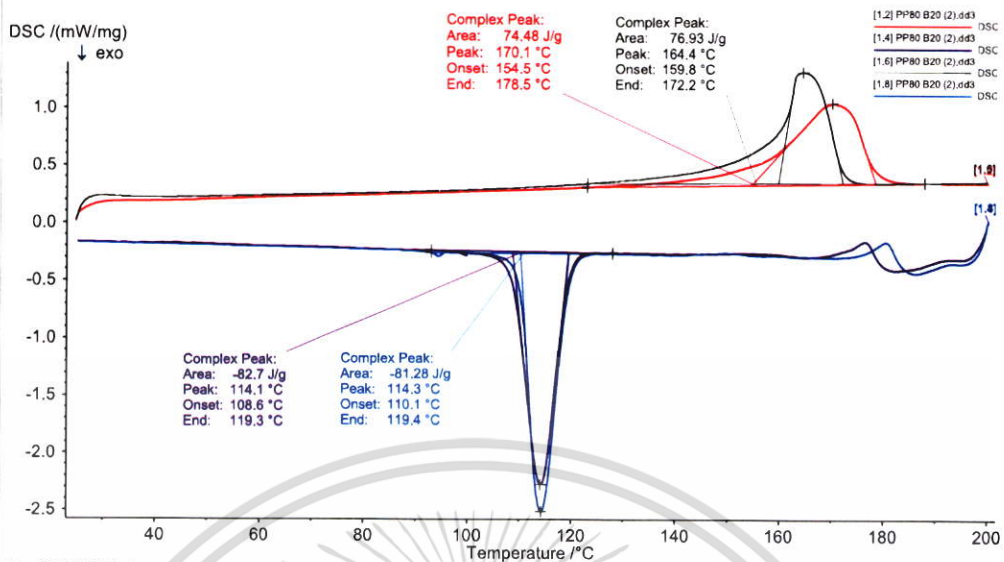


Main: 2018-01-09 23:50 User: sem
 Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwint\data\5DS_60\11\DS61_001(2)\PP90 B10 (2).d3
 Project: temp 25-200C_h10_c10_2(N) Reference: crucible,0.000 mg
 Identity: DS61_001_03 Material: In Segments: 8
 Date/Time: 1/4/2018 4:04:07 AM Corr.Temp.cal: 25-200C_h10_c10_2(N).bd3 / Cal May 2017.d3 Crucible: Pan Al, pierced lid
 Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sens May 2017.ed3 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
 Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E M.range: 5000 uV
 Sample: crucible, 16.500 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction

[#] Type	Range	Acq.Rate	STC	P1	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/200	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.4] Dynamic	200/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020
[1.6] Dynamic	25/10.0(K/min)/200	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.8] Dynamic	200/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

รูปที่ 3 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพลีเมอร์ P90B10

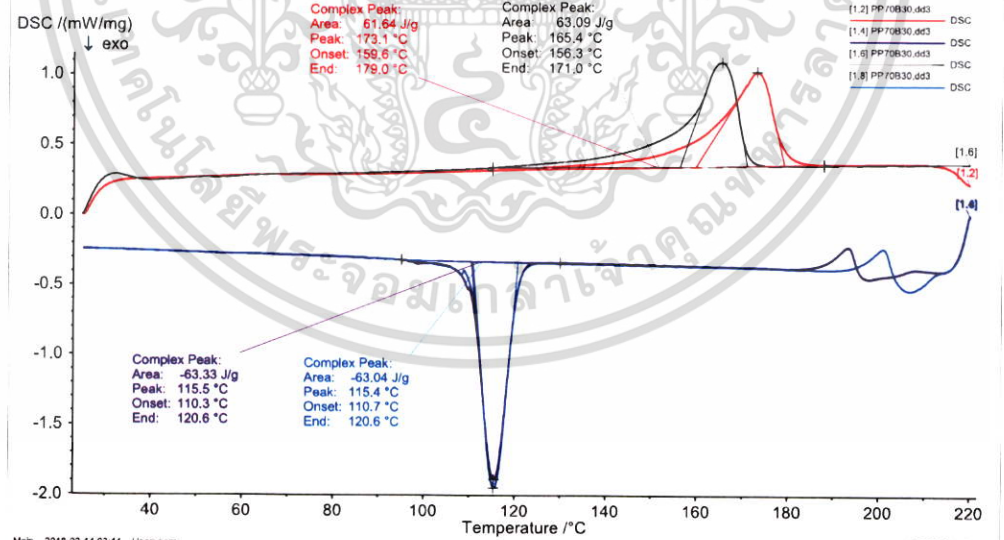
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Main: 2018-01-09 23:46 User: ssm
 Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbw\nta\data\DS_6011\DS61_001(2)\PP80 B20 (2).dd3
 Project: temp 25-200C_h10_c10_2(N) Reference: crucible,0.000 mg
 Identity: DS61_001_01 Material: In
 Date/time: 1/4/2018 12:45:39 AM Corr./temp.cal: 25-200C_h10_c10_2(N).bd3 / Cal May 2017.td3
 Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sens May 2017.ed3
 Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 I-sensor / E
 Sample: crucible, 16.200 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction
 Segments: 8
 Crucible: Pan Al, pierced lid
 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
 M. range: 5000 µV

[#] Type	Range	Acq.Rate	STC	P1:--	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/200	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.4] Dynamic	200/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020
[1.6] Dynamic	25/10.0(K/min)/200	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.8] Dynamic	200/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

รูปที่ ง.4 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพลีต P80B20

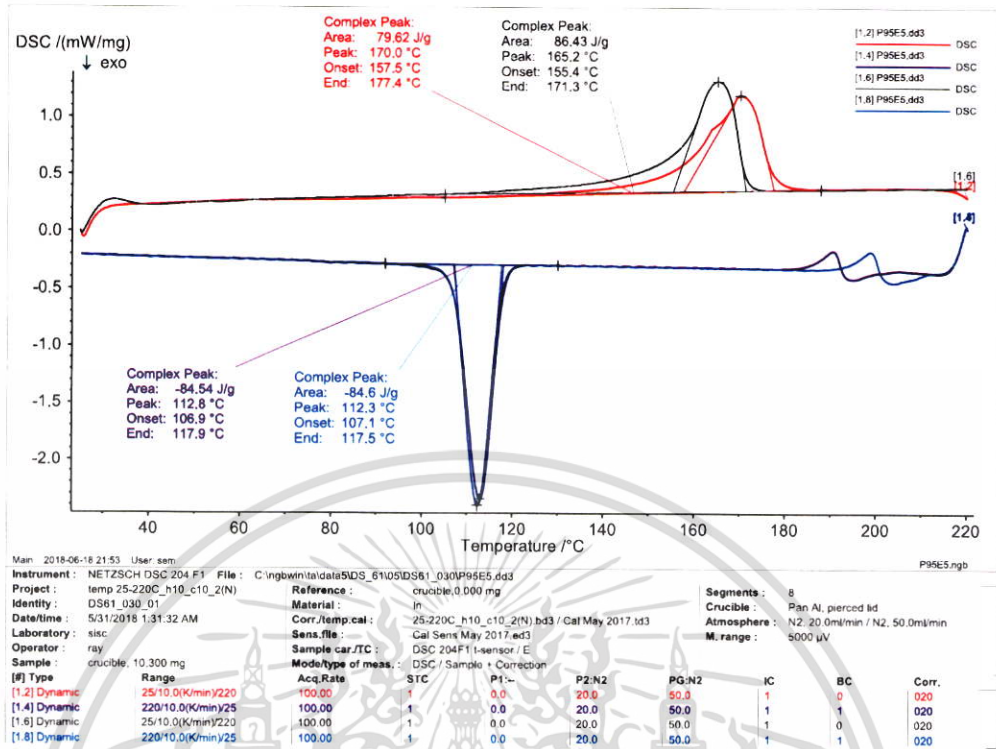


Main: 2018-03-14 03:44 User: ssm
 Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbw\nta\data\DS_6103\DS61_016\PP70B30.dd3
 Project: temp 25-220C_h10_c10_2(N) Reference: crucible,0.000 mg
 Identity: DS61_016_01 Material: In
 Date/time: 3/13/2018 11:45:43 PM Corr./temp.cal: 25-220C_h10_c10_2(N).bd3 / Cal May 2017.td3
 Laboratory: sisc Sens.file: Cal Sens May 2017.ed3
 Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 I-sensor / E
 Sample: crucible, 13.700 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction
 Segments: 8
 Crucible: Pan Al, pierced lid
 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min
 M. range: 5000 µV

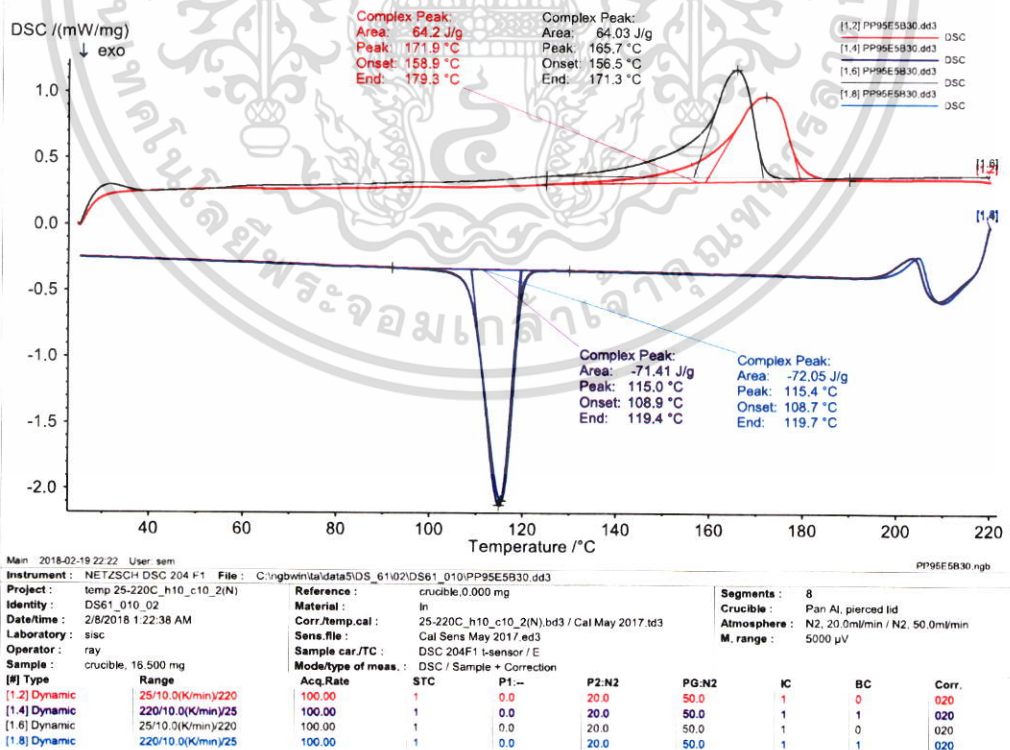
[#] Type	Range	Acq.Rate	STC	P1:--	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1.2] Dynamic	25/10.0(K/min)/220	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.4] Dynamic	220/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020
[1.6] Dynamic	25/10.0(K/min)/220	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1.8] Dynamic	220/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

รูปที่ ง.5 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพลีต P70B30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

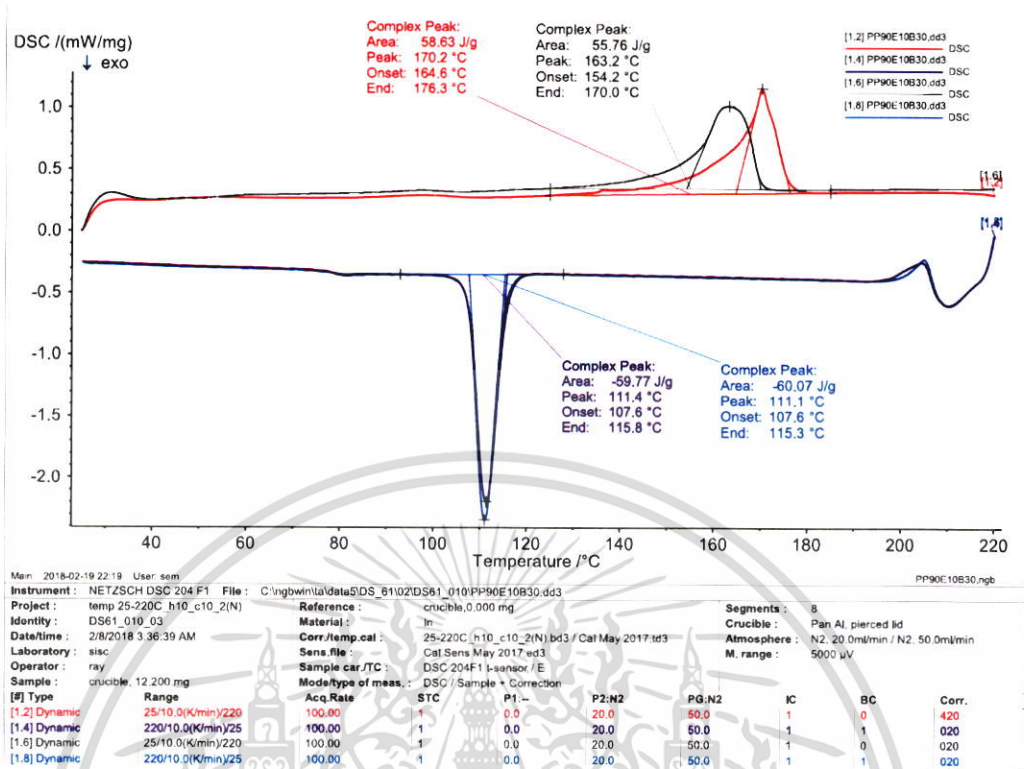


รูปที่ ง.6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P95E5

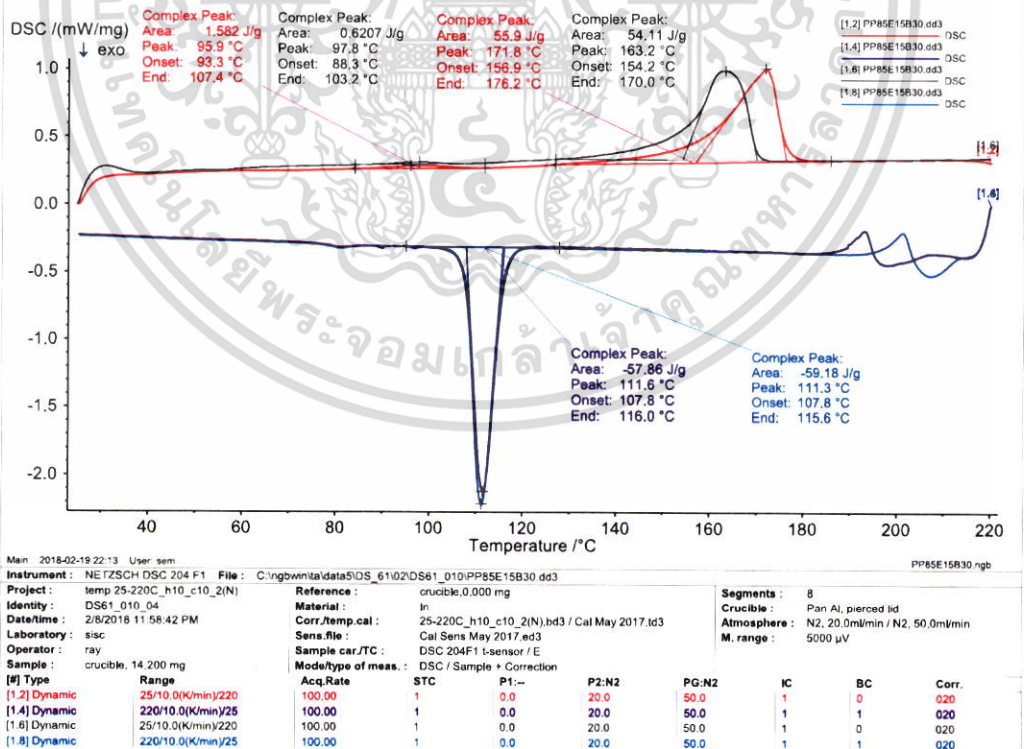


รูปที่ ง.7 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพสิต P95E5B30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

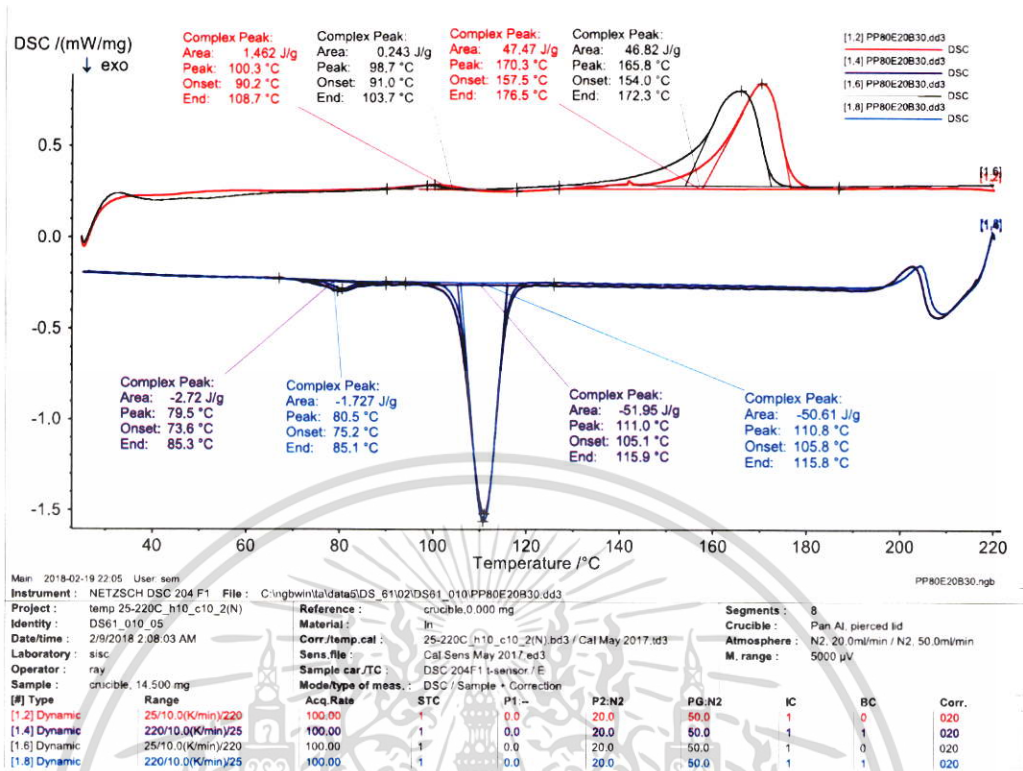


รูปที่ ๘.๘ DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพลีเมอร์ P90E10B30

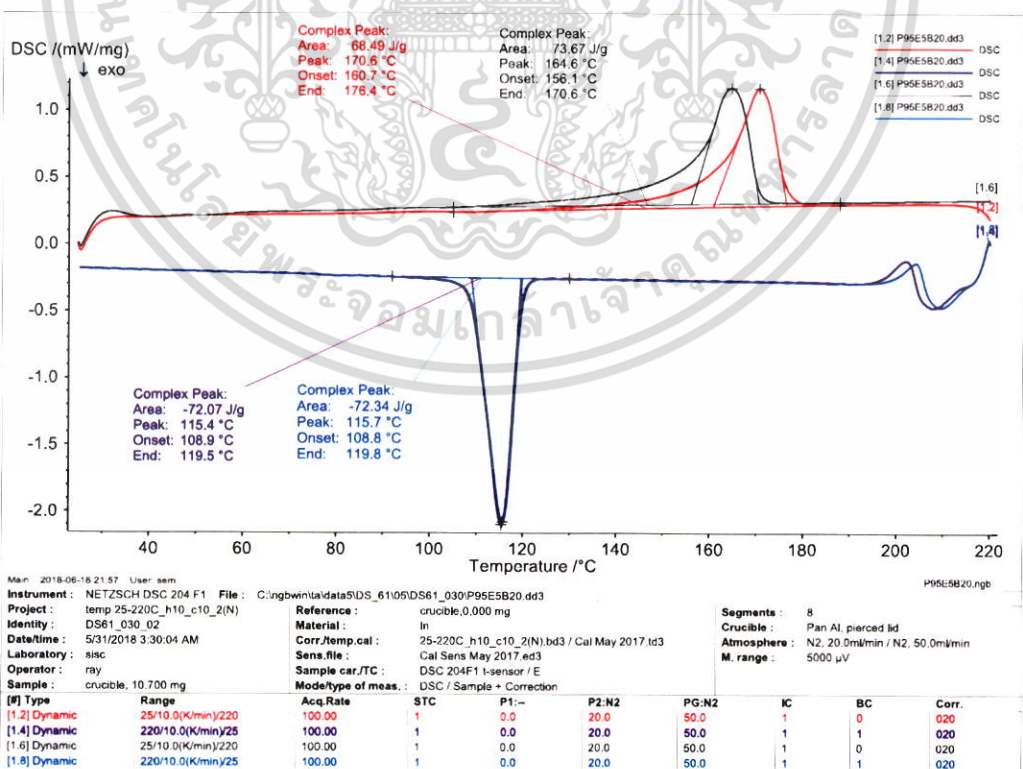


รูปที่ ๘.๙ DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพลีเมอร์ P85E15B30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.10 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพลีเมอร์ P80E20B30



รูปที่ ง.11 DSC เทอร์โมแกรมของคอมโพลีเมอร์ P95E5B20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวณัฐธราเนตร ธีรฤทธิเฉลิม
วัน เดือน ปีเกิด	22 สิงหาคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	99/95 ถนนนวมินทร์ 45 แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	(2559) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรตเฉลี่ย 3.16 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโทของคณะวิทยาศาสตร์ สจล.
ผลงานทางวิชาการ	Treerarithchalem, N. and Rukchonlatee, S. 2018. "Effect of Ethylene Ethyl Acrylate Copolymer on Mechanical Properties of Polymer Composite from Polypropylene Mixed with Barium Sulfate." The Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-8), Bangkok, 230-235.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้