

พอลิเมอร์ผสมจากผงพอลิโพรพิลีนและ
ขวดเพตใช้แล้วที่ปิดด้วยเทคนิคพัลเวอไรเซชัน



นายสุภโชค ตันพิชัย

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยี ภาควิชาวัสดุศาสตร์

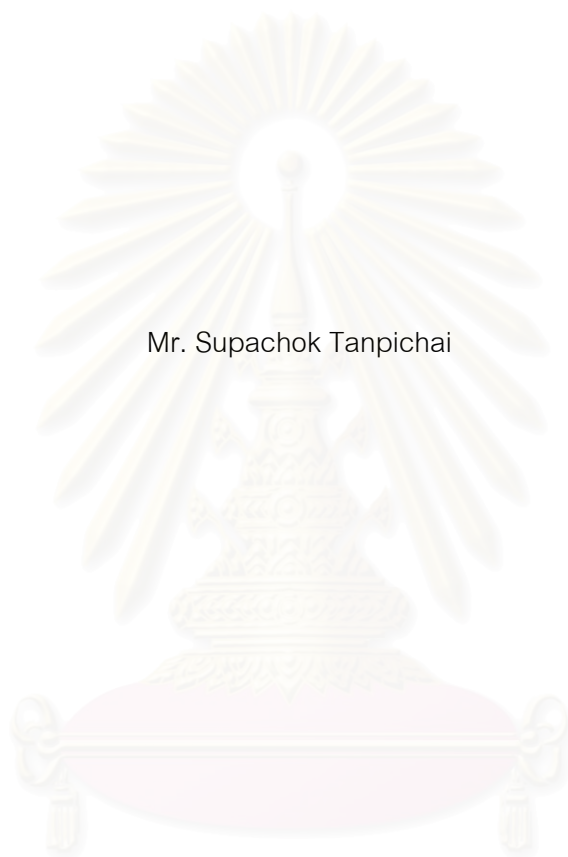
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-3259-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLYMER BLEND FROM POLYPROPYLENE AND
WASTE PET BOTTLE POWDER PREPARED BY PULVERIZATION TECHNIQUE



Mr. Supachok Tanpichai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-3259-3

477 25321 23 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD: POLYPROPYLENE / POLYMER BLEND / PET / POLYETHYLENE WAX/ MALEIC ANHYDRIDE GRAFTED POLYPROPYLENE / RECYCLE / PULVERIZATION

SUPACHOK TANPICHAI : POLYMER BLEND POWDER FROM POLYPROPYLENE AND WASTE PET BOTTLE POWDER PREPARED BY PULVERIZATION TECHNIQUE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D,
196 pp. ISBN: 974-14-3259-3.

Polymer blends between polypropylene and PET from post-consumed bottles were studied. The polymer mixtures were pulverized, at the amounts of PET in PP of 0, 5, 10, 15, 20, 30 and 40 phr (parts per hundred of resin) by weight, into powder. In an extruder, the polymer powders were mixed with maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) and polyethylene wax (PE wax) as a compatibilizer and a processing aid, respectively. The extrudates were prepared into test specimens by injection molding. Physical, mechanical and thermal properties as well as morphology were subsequently investigated. The results pointed out that pulverization must have shortened molecular chains of polypropylene as indicated by the increase of MFI. Contrarily, mechanical properties decreased comparing with polypropylene without grinding. It was found that when the amount of PET increased, MFI decreased but flexural modulus increased while other mechanical properties were worsened. The melting and crystallization temperatures increased but the amount of crystalline and degradation temperature decreased. When the amount of MAPP increased, MFI decreased while tensile strength, tensile modulus, flexural properties and impact strength increased. The melting and crystalline temperatures were raised but the amount of crystalline and degradation temperatures were lower. As the amount of PE wax in the blends increased, MFI and elongation at break increased while other mechanical properties reduced. The melting and degradation temperature decreased but crystallization temperature and the amount of crystalline increased. When comparing between grinding polypropylene and recycled-PET together and grinding only recycled-PET, it was found that grinding polypropylene and recycled-PET together lowered mechanical properties. It was also observed that tensile modulus, flexural properties and impact strength of grinding recycled-PET only by mesh 1.0 mm. was higher than grinding by mesh 0.5 mm. whereas the melting and crystalline temperatures were rarely changed.

DepartmentMaterials Science..... Student's signature.....*Supachok Tanpichai*
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature.....*Pranut Potiyaraj*
Academic year2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ในหัวข้อเรื่อง พอลิเมอร์ผสมจากผงพอลิโพรพิลีน และขดเพตไใช้แล้วที่บิดด้วยเทคนิคพัลเวอไรเซชันฉบับนี้ไม่สามารถเกิดขึ้น และสำเร็จตามวัตถุประสงค์ และเป้าหมายที่ตั้งไว้ได้ ถ้าหากขาดคำแนะนำทางด้านวิชาการ การเอื้อเฟื้อเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ วัสดุดิบ และสถานที่ในการทำวิจัย ด้วยเหตุนี้ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตั้งแต่ขั้นตอนการคิดหัวข้อวิจัย การทดลอง จนถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์เป็นรูปเล่มเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งมีรายชื่อดังต่อไปนี้

บุคคลแรกที่ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง คือ รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นปัญหาจากการวิจัยหรือปัญหาด้านอื่นๆ รวมทั้งการให้ความสนใจและดูแลเอาใจใส่ต่อข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.เสาวรณีย์ ช่วยจุลจิตร รศ.ไพพรรณ สันติสุข และ รศ.อรอุษา สรวารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาในด้านต่างๆ แก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีโดยไม่รู้สึกรับเหน็ดเหนื่อย

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบริษัท ไทยพอลิเอททีลีน จำกัด และบริษัท เคมิคอล อินโนเวชัน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (P700J) พอลิเอททีลีนเกรด (LP 1040E) และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (Fusabond, MZ-109D) สำหรับการทำวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้อำนวยการสถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม รวมทั้งคุณสมปองที่กรุณาเสียสละเวลามาช่วยข้าพเจ้าขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีด

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำวิจัย และมอบความสนุกสนานให้แก่ข้าพเจ้า รวมทั้งขอขอบพระคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ เครื่องทดสอบ สถานที่ทำวิจัย และที่พักผ่อนยามเหนื่อยล้า

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณแทบเท้าบิดามารดาที่ให้กำเนิดและคอยเลี้ยงดูเอาใจใส่เป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามที่ข้าพเจ้าได้ตั้งใจไว้ ขอขอบคุณความเอาใจใส่ของเธอนั่นที่ดูแลข้าพเจ้า และที่ขาดไม่ได้ขอขอบคุณตัวเองที่ทำหน้าที่ในงานวิจัยนี้ได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่รู้จักรเหน็ดเหนื่อยและย่อท้อ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 มูลเหตุจูงใจในการทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	6
2 วารสารปริทรรศน์.....	8
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพอลิเมอร์.....	8
2.2 พอลิโพรพิลีน.....	14
2.3 พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต หรือ เพต.....	17
2.3.1 วัตถุประสงค์.....	18
2.3.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต หรือ เพต.....	19
2.3.3 สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	22
2.3.4 การใช้งาน.....	24
2.3.5 การย่อยสลายเพต	24
2.4 ขยะพลาสติก	25
2.4.1 ชนิดของขยะพลาสติก.....	25
2.4.2 การจัดการกับพลาสติกหลังการใช้งาน.....	26
2.4.3 การเสื่อมสภาพของพลาสติก	26
2.5 พอลิเมอร์ผสม	30
2.5.1 กลไกความเข้ากันได้	32
2.5.2 วิธีทำให้เข้ากันได้.....	33
2.5.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	36

บทที่	หน้า
2.5.4	38
2.5.5	39
2.6	40
2.6.1	40
2.6.2	41
2.6.3	44
2.7	46
2.7.1	46
2.8	47
2.8.1	47
2.8.2	49
2.8.3	50
2.9	53
2.9.1	55
2.9.2	56
2.10	57
2.11	58
2.11.1	58
2.11.2	59
2.12	60
3	63
3.1	63
3.2	64
3.3	65
3.3.1	65
3.3.2	65
3.3.3	65
3.3.4	66
3.3.5	66

บทที่	หน้า
3.3.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	66
3.4 ขั้นตอนการวิจัย	66
3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้นตอนทดสอบ.....	66
3.4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	73
3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล	74
3.4.3.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง.....	74
3.4.3.2 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง	75
3.4.3.3 การทดสอบความทนแรงกระแทก	76
3.4.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	77
3.4.4.1 การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล	77
3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	78
3.4.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC.....	78
3.4.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA.....	80
3.4.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	81
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	82
4.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบด	82
4.2 ผลของปริมาณเพต	84
4.2.1 ดัชนีการไหล.....	84
4.2.2 ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง.....	86
4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง	91
4.2.4 ความทนแรงกระแทก	94
4.2.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว.....	95
4.2.6 ปริมาณผลึก.....	96
4.2.7 สัณฐานวิทยา.....	97
4.3 ผลของปริมาณมาลิกิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน.....	99
4.3.1 ดัชนีการไหล.....	99
4.3.2 ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง.....	101
4.3.3 ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง	106
4.3.4 ความทนแรงกระแทก	108

บทที่	หน้า
4.3.5	คุณสมบัติการหลอมเหลว คุณสมบัติการเกิดผลึก และคุณสมบัติการสลายตัว.....110
4.3.6	ปริมาณผลึก.....111
4.3.7	พื้นฐานวิทยา.....112
4.4	ผลของปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์.....115
4.4.1	ดัชนีการไหล.....115
4.4.2	ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง.....116
4.4.3	ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง.....119
4.4.4	ความทนแรงกระแทก.....121
4.4.5	คุณสมบัติการหลอมเหลว คุณสมบัติการเกิดผลึก และคุณสมบัติการสลายตัว.....122
4.4.6	ปริมาณผลึก.....123
4.4.7	พื้นฐานวิทยา.....123
4.5	ผลของวิธีการบด และขนาดของตะแกรง.....125
4.5.1	ดัชนีการไหล.....125
4.5.2	ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง.....126
4.5.3	ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง.....131
4.5.4	ความทนแรงกระแทก.....135
4.5.5	คุณสมบัติการหลอมเหลว คุณสมบัติการเกิดผลึก และคุณสมบัติการสลายตัว.....137
4.5.6	ปริมาณผลึก.....139
4.5.7	พื้นฐานวิทยา.....141
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....145
5.1	สรุปผลการทดลอง.....145
5.2	ข้อเสนอแนะ.....147
	รายการอ้างอิง.....149
	ภาคผนวก.....153
	ภาคผนวก ก.....154
	ภาคผนวก ข.....187
	ภาคผนวก ค.....191
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....196

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
0 ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก.....	11
ตารางที่ 2.2 การใช้งานของเทอร์โมเซตพลาสติก	12
ตารางที่ 2.3 การใช้งานของเทอร์โมพลาสติก	13
ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของพลาสติกชนิดต่างๆ.....	16
ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	23
ตารางที่ 2.6 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง.....	31
ตารางที่ 2.7 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง.....	32
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่ แบบหมุนทางเดียวกัน และอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน	43
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	63
ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิโพรพิลีน (EL-Pro, P700J)	64
ตารางที่ 3.3 สมบัติของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (Fusabond, MZ-109D)	64
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน เพตจากขวดพลาสติกที่ ผ่านการใช้งาน มาลิกแอนไฮไดรด์ และพอลิเอทิลีนแวกซ์	68
ตารางที่ 3.5 สภาพะในการอัดรีดของเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่	70
ตารางที่ 3.6 สภาพะในการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบของเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องฉีดพลาสติก .	71
ตารางที่ 4.1 คุณหมุมิหลอมเหลว คุณหมุมิการเกิดผลึก และคุณหมุมิการสลายตัวของพอลิ เมอร์ผสมที่มีเพตในปริมาณต่างๆ.....	95
ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพตในปริมาณต่างๆ.....	96
ตารางที่ 4.3 คุณหมุมิหลอมเหลว คุณหมุมิการเกิดผลึก และคุณหมุมิการสลายตัวของพอลิ เมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณ 0-15 phr	110
ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิ โพรพิลีนที่มีปริมาณ 0-15 phr	111
ตารางที่ 4.5 คุณหมุมิหลอมเหลว คุณหมุมิการเกิดผลึก และคุณหมุมิการสลายตัวของพอลิ เมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณ 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 0 และ 5 phr	122

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr มาลิกอินไฮไดรด์กราฟต์พอลิ โพรพิลีนที่มีปริมาณ 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 0 และ 5 phr.....	123
ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติหลอมเหลว คุณสมบัติการเกิดผลึก และคุณสมบัติการสลายตัวของพอลิ โพรพิลีนที่ผ่านการบดกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผ่านการบด.....	137
ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติหลอมเหลว คุณสมบัติการเกิดผลึก และคุณสมบัติการสลายตัวของพอลิ เมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง.....	138
ตารางที่ 4.9 ปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผ่านการบด	139
23ตารางที่ 4.10 ปริมาณผลึกพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของ ตะแกรง.....	140



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้งานของพลาสติกทั่วโลกเมื่อเทียบกับเหล็กและอะลูมิเนียมตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 ถึง ค.ศ.2003 [1]	1
รูปที่ 1.2 การใช้งานของพลาสติกในประเทศแถบยุโรปตะวันตกในปี ค.ศ. 2003	2
รูปที่ 1.3 การใช้งานบรรจุภัณฑ์พลาสติกในแต่ละประเทศ [2].....	2
รูปที่ 1.4 ประเภทของบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม [3]	3
รูปที่ 1.5 สัดส่วนการผลิตขวดพลาสติกในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.2001	3
รูปที่ 1.6 สัดส่วนการการรีไซเคิลขวดพลาสติกหลังการใช้งานใน ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.2001	4
รูปที่ 1.7 ปริมาณการใช้กระป๋องอะลูมิเนียมและขวดพลาสติกเพตในประเทศสหรัฐอเมริกา[4] ..	4
รูปที่ 1.8 ปริมาณการรีไซเคิลขวดพลาสติกเพตหลังการใช้งานของประเทศสหรัฐอเมริกา	5
รูปที่ 2.1 โครงสร้างประเภทต่างๆของพอลิเมอร์.....	10
รูปที่ 2.2 ปริมาณการใช้งานของเทอร์โมเซตพลาสติกในปีค.ศ. 2001-2003 ในประเทศยุโรป แถบตะวันตก	11
รูปที่ 2.3 ปริมาณการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกในปีค.ศ. 2001-2003 ในประเทศยุโรปแถบ ตะวันตก.....	12
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของหน่วยซ้ำของพอลิโพรพิลีน.....	14
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน	15
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต หรือ เพต	17
รูปที่ 2.7 การไฮเดรชันของเอทิลีนออกไซด์	18
รูปที่ 2.8 การเตรียมกรดเทเรฟทาลิก จาก พาราไซลีน (p-xylene)	19
รูปที่ 2.9 การผลิตไดเมทิลเทเรฟทาเลต	19
รูปที่ 2.10 การทำปฏิกิริยากันระหว่างระหว่างเอทิลีนไกลคอล กับกรดเทเรฟทาลิก.....	20
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ BHET [bis(2-hydroxyethyl)terephthalate].....	20
รูปที่ 2.12 การทำปฏิกิริยากันระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต กับเอทิลีนไกลคอล	21
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์.....	21
รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเสื่อมสภาพทางความร้อนของสายโซ่พอลิเมอร์	27

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน.....	31
รูปที่ 2.16 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น LCST	34
รูปที่ 2.17 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น UCST	34
รูปที่ 2.18 กลไกของบล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด	35
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม.....	37
รูปที่ 2.20 ลักษณะต่างๆของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม	38
รูปที่ 2.21 การกระจายตัวที่ไม่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์.....	39
รูปที่ 2.22 การกระจายตัวที่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์	40
รูปที่ 2.23 เครื่องผสมแบบแบนบิวรี.....	41
รูปที่ 2.24 เครื่องอัดรีด	42
รูปที่ 2.25 ประเภทสกรูของเครื่องอัดรีดสกรูคู่.....	42
รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก [17].....	45
รูปที่ 2.27 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดึงของพลาสติก [22]	47
รูปที่ 2.28 แผนภาพความเค้น-ความเครียด และเส้นสัมผัสเริ่มแรกที่ใช้หาค่ามอดุลัส [22].....	48
รูปที่ 2.29 แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบเครื่องทดสอบแรงดัดโค้งแบบสามจุด	49
รูปที่ 2.30 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก	50
รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม A และ B ที่อัตราส่วน 50: 50 (เส้นประ) โดยเส้นที่บแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละตัว.....	54
รูปที่ 2.32 การวิเคราะห์โดยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี.....	55
รูปที่ 2.33 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมท	56
รูปที่ 2.34 การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี	57
รูปที่ 2.35 กล้องจุลทรรศน์	59
รูปที่ 2.36 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	60
รูปที่ 3.1 เครื่องบดแบบพัลเวไรเซอร์ (pulverizer).....	67
รูปที่ 3.2 ตะแกรงขนาด 0.5 และ 1 มิลลิเมตร	67
รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder).....	70

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.4 เครื่องฉีดพลาสติก (injection molding machine)	71
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ	72
รูปที่ 3.6 เครื่องฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transforms infrared Spectrometer รุ่น Nicolet Impact 400D)	73
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 100K)	74
รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง	74
รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบความทนแรงดัดโค้ง	75
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (Universal Testing Machine, LLOYD รุ่น 500)..	75
รูปที่ 3.11 เครื่องบากชิ้นงาน	76
รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกที่มีรอยบาก	76
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact Tester, GOTECH TESTING MACHINE รุ่น GT-7045-MDH)	77
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Indexer, KAYENESS รุ่น 7053).....	77
รูปที่ 3.15 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งโครมาโตกราฟี (Differential Scanning Calorimeter, PERKIN ELMER รุ่น Diamond DSC)	78
รูปที่ 3.16 ภาดอะลูมิเนียม	79
รูปที่ 3.17 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermal Gravimetric Analyzer, METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA851 ^o)	80
รูปที่ 3.18 ครุฑิเบิลอะลูมินา	80
รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JEOL รุ่น JSM-5410LV)	81
รูปที่ 3.20 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการเคลือบทอง	81
รูปที่ 4.1 ดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ และพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ	82
รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ และพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ	83
รูปที่ 4.3 ดัชนีเมทิลของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ และพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ	83
รูปที่ 4.4 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณต่างๆ.....	85

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.5 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณต่างๆ.....	86
รูปที่ 4.6 การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณต่างๆ.....	88
รูปที่ 4.7 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณต่างๆ.....	89
รูปที่ 4.8 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณต่างๆ.....	91
รูปที่ 4.9 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณต่างๆ.....	92
รูปที่ 4.10 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณต่างๆ.....	94
รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 5 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr.....	97
รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 10 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr.....	97
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr.....	97
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 20 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr.....	98
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 30 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr.....	98
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 40 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr.....	98
รูปที่ 4.17 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน.....	99
รูปที่ 4.18 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน.....	101
รูปที่ 4.19 การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน.....	103
รูปที่ 4.20 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน.....	104

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.21 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน	106
รูปที่ 4.22 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิก แอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน	107
รูปที่ 4.23 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน	109
รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 0 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ...	112
รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ...	113
รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 10 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ...	113
รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 15 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ...	114
รูปที่ 4.28 ลักษณะหลุมที่เพตเกิดการหลุดออกที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสม ที่เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 5 10 และ 15 phr ตามลำดับ	115
รูปที่ 4.29 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์ ..	116
รูปที่ 4.30 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีน แวกซ์	116
รูปที่ 4.31 การยึดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิ เอทิลีนแวกซ์	117
รูปที่ 4.32 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์	118
รูปที่ 4.33 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีน แวกซ์	119
รูปที่ 4.34 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีน แวกซ์	120
รูปที่ 4.35 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิ เอทิลีนแวกซ์	121

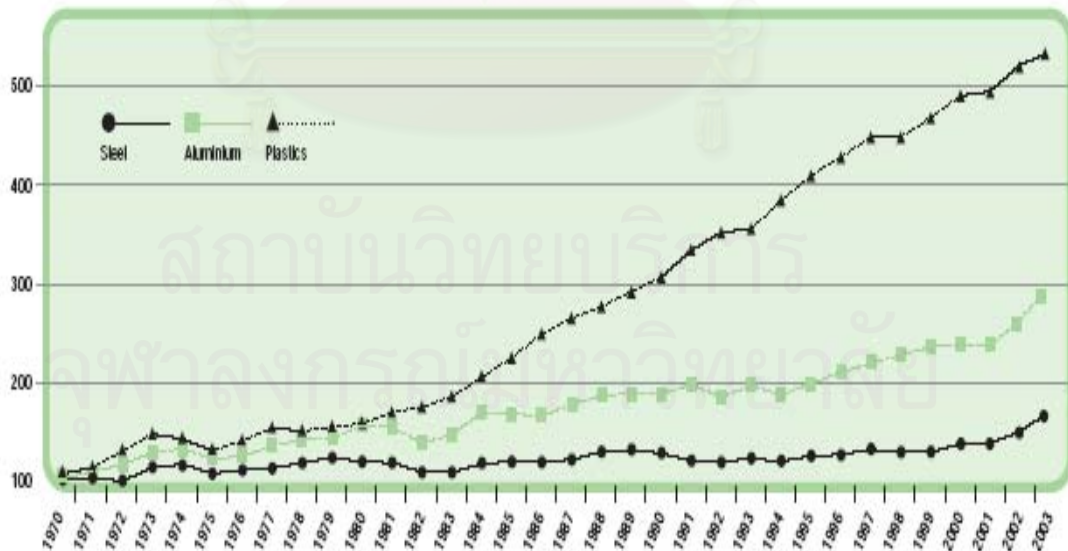
รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.36 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน เพต 15 phr พอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า.....	123
รูปที่ 4.37 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า	124
รูปที่ 4.38 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้กำลังขยาย 5,000 เท่าของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีนคงที่ (ก)มีมาลิกแอนไฮไดรด์พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนแวกซ์อย่างละ 5 phr (ข)มีมาลิกแอนไฮไดรด์พอลิโพรพิลีน 5 phr เท่านั้น (ค) มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr เท่านั้น.....	124
รูปที่ 4.39 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง.....	125
รูปที่ 4.40 ความทนแรงดึงระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด.....	126
รูปที่ 4.41 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง.....	127
รูปที่ 4.42 การยืดตัวออก ณ จุดขาดระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด....	128
รูปที่ 4.43 การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง	129
รูปที่ 4.44 มอดุลัสดึงระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด	130
รูปที่ 4.45 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง	130
รูปที่ 4.46 ความทนแรงดัดโค้งระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด.....	132
รูปที่ 4.47 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง	132
รูปที่ 4.48 มอดุลัสดัดโค้งระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด	133
รูปที่ 4.49 มอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง.....	134
รูปที่ 4.50 ความทนแรงกระทำระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด	135
รูปที่ 4.51 ความทนแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง.....	136

บทที่ 1

บทนำ

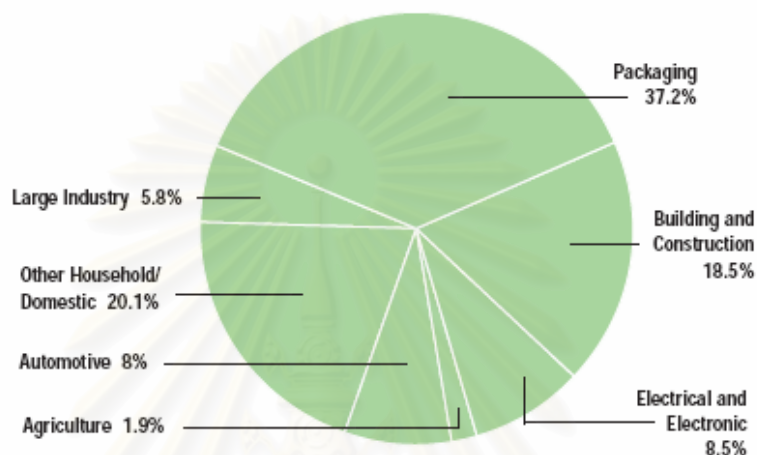
1.1 มุมเหตุจูงใจในการทำวิจัย

จากคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุประเภทอื่นหลายประการ ทำให้ความนิยมในการนำพลาสติกมาใช้งานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดต่างๆ เพราะพลาสติกมีน้ำหนักเบา มีความต้านทานการกัดกร่อน หรือการเกิดสนิม ราคาถูก ผลิตให้มีรูปแบบต่างๆ และหลากหลายได้ง่าย ใช้แรงงานในการผลิตต่ำ สามารถทำให้มีสมบัติที่หลากหลาย โดยพลาสติกบางชนิดสามารถใช้แทนที่โลหะ เซรามิก แก้ว ไม้ หรือหนังสัตว์ ได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้เองพลาสติกจึงถูกนำมาใช้งานหลากหลายประเภท เช่น ยาง พลาสติก เส้นใย สารเคลือบผิว กาว และวัสดุเชิงประกอบ โดยปริมาณการใช้งานของพลาสติกทั่วโลกเมื่อเทียบกับเหล็กและอะลูมิเนียมตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 ถึง ค.ศ.2003 (โดยเทียบปริมาณการใช้งานของพลาสติก เหล็กและอะลูมิเนียม ในปี ค.ศ.1970 เป็น 100 ส่วน) พบว่า พลาสติกมีปริมาณการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในแต่ละปี ส่วนอะลูมิเนียมมีปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเหล็กมีปริมาณการใช้งานในแต่ละปีที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.1



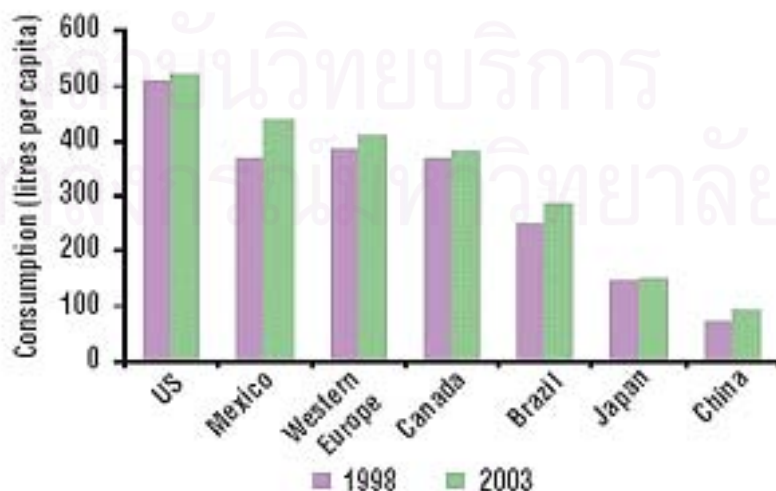
รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้งานของพลาสติกทั่วโลกเมื่อเทียบกับเหล็กและอะลูมิเนียมตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 ถึง ค.ศ.2003 [1]

ประเภทการใช้งานของพลาสติกที่สูงสุดเป็นอันดับ 1 ในประเทศแถบยุโรปตะวันตกในปี ค.ศ.2003 คือการใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์ที่สูงถึง 37.2% รองลงมาคือ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน 20.1% งานด้านการก่อสร้าง 18.5% ด้านไฟฟ้า 8.5% วัสดุภายในรถยนต์ 8% ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ 5.8% และสุดท้ายด้านการเกษตรกรรม 1.9% ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.2 โดยมีการใช้งานของพลาสติกทั้งหมด คือ 39,706,000 ตัน



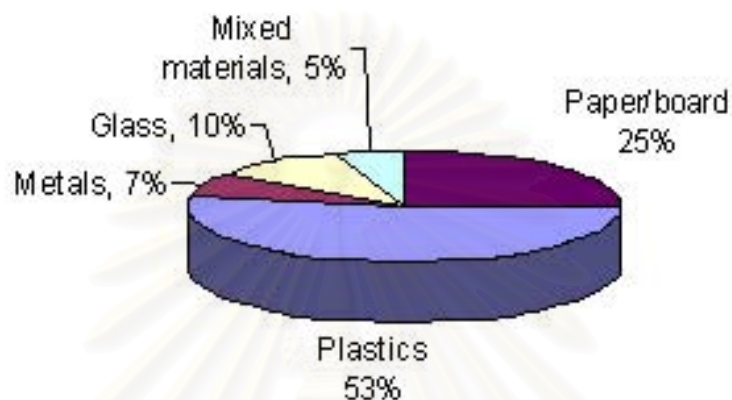
รูปที่ 1.2 การใช้งานของพลาสติกในประเทศแถบยุโรปตะวันตกในปี ค.ศ. 2003 [1]

โดยในปี ค.ศ.2003 ประชาชนในสหรัฐอเมริกามีการใช้งานบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มมากกว่า 200,000 ล้านบรรจุภัณฑ์ หรือประมาณ 700 ชิ้นต่อคน มากกว่าการใช้งานของชาวแคนาดาถึง 38% ซึ่งเป็นสองเท่าของการใช้งานของชาวบราซิล และมากกว่า 5 เท่าของการใช้งานในจีน โดยแสดงการใช้งานบรรจุภัณฑ์พลาสติกในแต่ละประเทศเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานในปี ค.ศ.1998 แสดงไว้ในรูปที่ 1.3



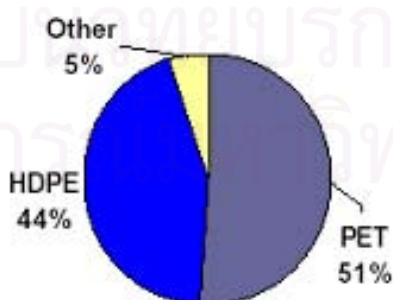
รูปที่ 1.3 การใช้งานบรรจุภัณฑ์พลาสติกในแต่ละประเทศ [2]

จากการสำรวจในปี ค.ศ. 2001 บรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มที่ใช้กันทั่วโลกนั้นสามารถผลิตได้จากวัสดุ 5 ประเภท คือ กระดาษ โลหะ พลาสติก แก้ว และวัสดุผสม โดยพลาสติกที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มมากที่สุดถึง 53% รองลงมาคือ กระดาษ 25% แก้ว 10% โลหะ 7% และวัสดุผสม 6% ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.4



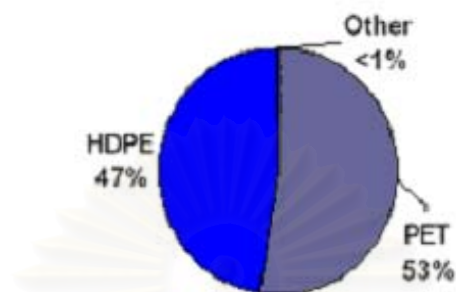
รูปที่ 1.4 ประเภทของวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม [3]

จากปริมาณการนำพลาสติกมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มที่นิยมมากที่สุด ในปี ค.ศ. 2001 พบว่าในประเทศสหรัฐอเมริกาขวดพลาสติกที่มีการผลิตและใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มมากที่สุดมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่มีการใช้งานถึง 51% และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีการใช้งาน 44% ที่เหลืออีก 5% เป็นพลาสติกชนิดอื่น ซึ่งมีสัดส่วนการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.5



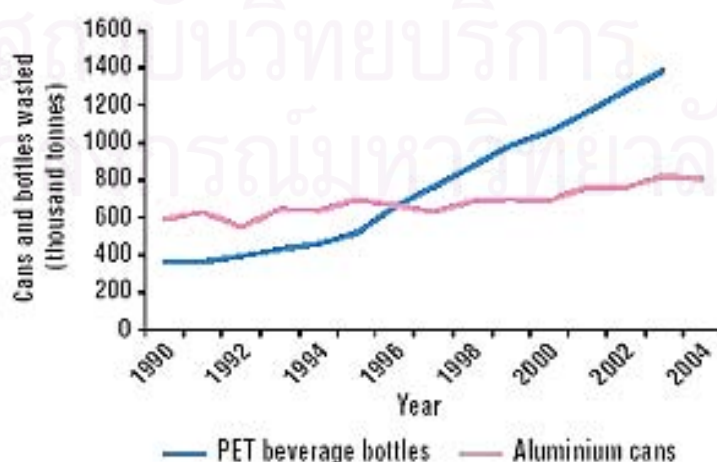
รูปที่ 1.5 สัดส่วนการผลิตขวดพลาสติกในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.2001

ส่วนการรีไซเคิลบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มหลังการอุปโภคแล้วนั้น พบว่าพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) มีการนำมารีไซเคิลถึง 53% พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีการนำมารีไซเคิล 47 % ส่วนพลาสติกชนิดอื่นๆ มีการนำมารีไซเคิลที่น้อยกว่า 1% โดยมีสัดส่วนการรีไซเคิลดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.6



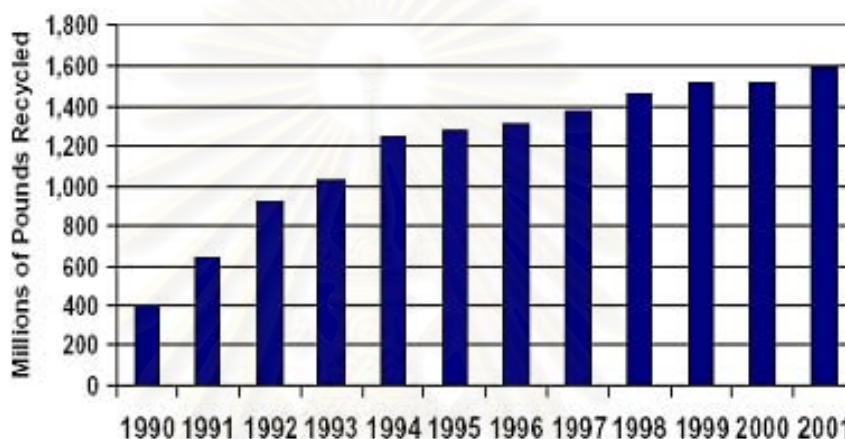
รูปที่ 1.6 สัดส่วนการการรีไซเคิลขวดพลาสติกหลังการใช้งานใน ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.2001

จะเห็นได้ว่าพลาสติกที่มีชื่อว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือที่รู้จักกันในชื่อของเพตนั้นได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของคนเราเป็นอย่างมาก โดยการนำมาใช้งานแทนที่ขวดแก้ว กระป๋องโลหะ เช่น อะลูมิเนียม เนื่องจากเพตมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ความใส น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊สต่างๆ ได้ดี เช่น ไอน้ำ ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ปริมาณการใช้งานของขวดพลาสติกเพตในประเทศสหรัฐอเมริกาจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ในแต่ละวันนั้นมีขยะที่เกิดขึ้นจากขวดพลาสติกเพตเป็นจำนวนมาก จากปี ค.ศ.1990 ถึงปี ค.ศ.2003 ปริมาณการใช้งานขวดพลาสติกเพตเพิ่มขึ้นจาก 952 ล้านปอนด์ (432 ล้านกิโลกรัม) ไปเป็น 3,517 ล้านปอนด์ (1,595 ล้านกิโลกรัม) ในขณะที่กระป๋องอะลูมิเนียมมีการใช้งานที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 ปริมาณการใช้กระป๋องอะลูมิเนียมและขวดพลาสติกเพตในประเทศสหรัฐอเมริกา [4]

ผลจากปริมาณการใช้งานขวดพลาสติกเพทที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมขึ้น โดยเฉพาะปัญหาที่เกิดจากการสะสมขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานซึ่งยากที่จะทำการกำจัด จึงได้มีการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะพยายามแก้ปัญหาการสะสมของขยะพลาสติกเหล่านี้ โดยมีการนำขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งหนึ่ง หรือที่เรียกกันว่าการรีไซเคิล การรีไซเคิลเป็นหนทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการสะสมของขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี ดังข้อมูลสถิติปริมาณการรีไซเคิลขวดพลาสติกเพทหลังการใช้งานของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 ปริมาณการรีไซเคิลขวดพลาสติกเพทหลังการใช้งานของประเทศสหรัฐอเมริกา

จากการใช้งานของขวดพลาสติกเพทที่มีปริมาณมากขึ้นนั้น ทำให้การรีไซเคิลเป็นที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยการรีไซเคิลสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกายภาพและการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกายภาพนั้น ประหยัดต้นทุน เวลา ค่าใช้จ่าย มากกว่าการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมีที่ต้องใช้เวลา เพื่อย่อยสลาย หรือเปลี่ยนโครงสร้างระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้มีขนาดเล็กลงแล้วจึงนำไปใช้เป็นมอนอเมอร์ หรือสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารตัวอื่นต่อไป หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกายภาพ คือ การนำขยะพลาสติกที่ผ่านการใช้งานนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยอาจนำไปผสมกับวัตถุดิบบริสุทธิ์หรือไม่ก็ได้ และนำไปผ่านกระบวนการผลิต เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่อีกครั้ง เนื่องจากพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นพลาสติกที่สามารถนำมาหลอมเหลวใช้ใหม่ได้ เพราะฉะนั้นความคิดที่จะนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งจึงเป็นความคิดที่เป็นประโยชน์ เพราะเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกหลังการใช้งานที่เกิดขึ้นในแต่ละวันให้ลดลง และยังเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิตอีก

ด้วย แต่สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ได้อาจจะด้อยลง เนื่องจากพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปต้องผ่านกระบวนการผลิตที่มีความรุนแรง เช่น ความร้อน ความดัน นอกจากนี้ยังจะถูกอัด บด หรือรีดในช่วงกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งอาจจะทำให้พอลิเมอร์บางส่วนเกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุล เป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเสื่อมสภาพของพลาสติกซึ่งส่งผลต่อสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลให้ลดลง ไม่ดีเหมือนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกใหม่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่ลดต่ำลง จึงทำให้โรงงานไม่สามารถนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานทั้งหมดกลับมาใช้ใหม่ได้ในคราวเดียวกัน ต้องมีการใช้พลาสติกใหม่ควบคู่กันไปด้วย

ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำขยะพลาสติกประเภทขวดพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่มีปริมาณการใช้งานในแต่ละวันที่สูง มารีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกายภาพ เพื่อลดปริมาณขยะขวดพลาสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละวันลง และเพิ่มสมบัติบางประการแก่พลาสติกชนิดอื่น

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิจัย

ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากผงพอลิโพรพิลีน และเม็ดพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันด้วยเทคนิคฟัลเวอไรเซชัน โดยมีการใช้สารเชื่อมประสานและสารช่วยในกระบวนการขึ้นรูป โดยมีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และศึกษาสูตรฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการนำขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานนำกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต และเป็นหนทางหนึ่งในการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นในแต่ละวันอีกด้วย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเม็ดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานด้วยเทคนิคฟัลเวอไรเซชัน ซึ่งถือว่าการรีไซเคิลขวดพลาสติกแบบกระบวนการทางกายภาพ โดยการนำขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาผสมกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วน 5 10 15 20 30 และ 40 ส่วนโดยน้ำหนัก (phr) และนำมาผ่านกระบวนการบดด้วยเครื่องฟัลเวอไรเซอร์ จะได้ออกมาเป็นผงพอลิเมอร์ผสม และนำผงพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้มาลิอกแอนไฮ

ไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต และใช้พอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นสารช่วยในกระบวนการขึ้นรูป เพื่อช่วยให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น หลังจากนั้นนำเม็ดพลาสติกผสมที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโดยกระบวนการฉีด และนำชิ้นทดสอบที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกล คือ สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทก ทดสอบสมบัติทางกายภาพ คือ ดัชนีการไหล วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน และศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอรัสม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (polymer) คือ สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆกัน ที่เรียกว่า “เมอร์” (mer) แปลว่า “ส่วน” หรือ “หน่วย” หรือ “repeating unit” จำนวนมากมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยการสังเคราะห์พอลิเมอร์นั้นเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารโมเลกุลเล็กๆ ที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” (monomer) พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตั้งแต่ 10^4 - 10^6 กรัมต่อโมล พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอาจเกิดขึ้นในธรรมชาติหรือถูกสังเคราะห์ขึ้นมา ซึ่งจะมีลักษณะการใช้งานได้หลากหลาย ดังต่อไปนี้ [5,6]

- 1) พลาสติก (plastics) เช่น ถุงพลาสติก พิล์มพลาสติก
- 2) ยาง (rubbers) เช่น ยางธรรมชาติ (natural rubber) หรือ ยางสังเคราะห์ (synthetic rubbers) ใช้ทำยางรถยนต์ ถุงมือยาง
- 3) เส้นใย (fibers) เช่น เส้นใยธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ พืช และแร่ธาตุ หรือเส้นใยประดิษฐ์ เช่น ไนลอน พอลิเอสเตอร์
- 4) สารเคลือบผิว (surface coatings) เช่น สีทาบ้าน แลกเกอร์
- 5) กาว (adhesives) เช่น กาวลาเทกซ์ กาวอีพอกซี
- 6) วัสดุเชิงประกอบ (composite materials) เช่น ผลิตภัณฑ์พลาสติกเสริมกำลังด้วยใยแก้ว (glass fiber reinforced plastics) หรือที่เรียกว่าผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส

โดยทั่วไปพอลิเมอร์มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) หรือการเกิดสนิม ราคาถูก ผลิตให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย ใช้แรงงานในการผลิตต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้มีสมบัติได้หลากหลาย โดยจะมีความทนทานทั้งกายภาพและทางเคมี แต่ไม่เหมาะที่จะใช้งานในอุณหภูมิที่สูง และพอลิเมอร์บางชนิดสามารถใช้แทนโลหะ เซรามิกส์ แก้ว ไม้ หรือหนังสัตว์ได้ เช่น Plexiglas และ Lucite ที่มีความโปร่งใส สามารถใช้แทนแก้วหรือกระจก หรือหนังเทียมที่ทำจากพีวีซี ใช้แทนหนังสัตว์ ภาชนะเมลามีนที่ใช้แทนจานชามเซรามิกส์

โครงสร้างของพอลิเมอร์หรือลักษณะการจัดรูปร่างโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับ ประเภทของพอลิเมอร์และวิธีการสังเคราะห์ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ เช่น ความหนาแน่น ความเหนียว ความเปราะ ความยืดหยุ่น ความแข็ง ความใส ฯลฯ

โครงสร้างของพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็นแบบต่างๆ ดังนี้

1) พอลิเมอร์แบบเส้น (linear polymer) เมื่อสายโซ่ยาวขึ้น พอลิเมอร์จะมีความแข็งแรงสูงขึ้น ทนความร้อนได้ดีขึ้น โดยมีลักษณะโมเลกุลเป็นสายโซ่เส้นยาวๆ หรือเป็นสายเดี่ยวๆ คล้ายเส้นด้าย โดยไม่มีกิ่งหรือสาขาแยกออกมา ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethy methacrylate, PMMA) พอลิอะคริโลไนไตรล์ (polyacrylo nitrile) ไนลอน 6,6 (nylon 6,6) เป็นต้น

2) พอลิเมอร์แบบกิ่ง (branched polymer) โครงสร้างแบบนี้ทำให้โมเลกุลอยู่ห่างกัน จึงทำให้มีความหนาแน่นน้อย โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีกิ่งหรือสาขาที่แยกออกมาจากสายโซ่หลัก ทำให้โมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ ความสามารถในการเกิดผลึกจึงลดลง ทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่นที่ต่ำ เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ซึ่งกิ่งที่แยกออกมานั้นต้องมีลักษณะเป็นหน่วยซ้ำๆ กัน หรือเป็นหน่วยของเมอร์ก็ได้ แต่ถ้ากิ่งเป็นส่วนประกอบของเมอร์นั้นๆ จะไม่จัดเป็นพอลิเมอร์แบบกิ่ง แต่จัดเป็นพอลิเมอร์แบบเส้น เช่น พอลิสไตรีน (polystyrene) พอลิโพรพิลีน (polypropylene)

3) พอลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือพอลิเมอร์แบบร่างแห (cross-linked or network polymer) โครงสร้างแบบนี้ทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูง มีความแข็งแรง ทนความร้อนได้ดี โดยสายโซ่โมเลกุลจะเชื่อมติดกันด้วยพันธะเคมีเป็นแบบร่างแห ได้แก่ เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (melamine formaldehyde resin) ฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (phenol formaldehyde resin) ยูเรียฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (urea formaldehyde resin) เป็นต้น

พอลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือพอลิเมอร์แบบร่างแหจะไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ แต่จะเกิดการบวมตัวขึ้นในตัวทำละลายบางชนิดแทน ซึ่งปริมาณการบวมตัวนั้นจะขึ้นกับปริมาณของการเชื่อมโยงโมเลกุล (degree of crosslinking) ถ้ามีการเชื่อมโยงมาก พอลิเมอร์จะเกิดการบวมตัวได้น้อย

โดยโครงสร้างประเภทต่างๆของพอลิเมอร์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างประเภทต่างๆของพอลิเมอร์

โดยพอลิเมอร์สามารถแบ่งตามพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อนได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) พอลิเมอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นแบบเส้น หรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด และเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการอ่อนตัว และหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) และเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัวได้อีก (rearden) ดังนั้นในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทนี้จะต้องอาศัยความร้อน และเมื่อเย็นตัวลงจะสามารถรักษารูปร่างให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ พลาสติกประเภทนี้สามารถนำกลับมารีไซเคิล (recycle) ได้ง่าย โดยการทำให้หลอมเหลวแล้วนำไปขึ้นรูปใหม่ ซึ่งการหลอมเหลวและการแข็งตัวนั้นสามารถทำซ้ำไปกลับมาได้ โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงไป พลาสติกประเภทนี้มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะ จะทำให้บิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรงได้ เช่น ช้อนพลาสติกที่ทำจากโพลีเอทิลีนพอลิเมอร์เหมาะสำหรับการตักไอศกรีม แต่ไม่เหมาะกับการใช้คนกาแฟขณะร้อน

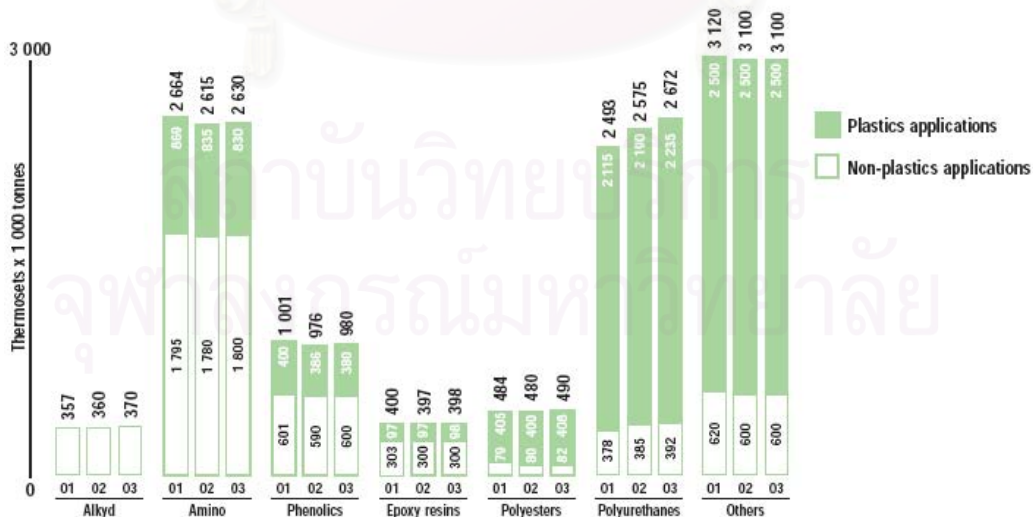
2) เทอร์โมเซตพลาสติก (thermoset plastics) พอลิเมอร์ประเภทนี้จะหลอมเหลวในขั้นตอนแรกเท่านั้น และเมื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลในเวลาต่อมาจนได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมโยงหรือร่างแห ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพสูง ซึ่งจะไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกเมื่อได้รับความร้อน แต่หากได้รับความร้อนที่สูงเกินไป จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมภายในโมเลกุลเกิดการแตกออก การสลายตัวจึงเกิดขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ เหมือนกับเทอร์โมพลาสติก โดยมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พลาสติกประเภทนี้อย่างน้อย 1 ชนิด จะต้องมีส่วนฟังก์ชันมากกว่า 2 ขึ้นไป เพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างร่างแห พลาสติกประเภทนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าเทอร์โมพลาสติก เพราะจะไม่อ่อนตัว หรือบิดเบี้ยวเมื่อได้รับความร้อน เช่น ใช้ทำที่จับหุ้มน้ำ หรือกระทะ ทำจานชามใส่อาหารขณะร้อน หรือถ้วยใส่กาแฟร้อน

โดยความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติกนั้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก	เทอร์โมเซตพลาสติก
<ol style="list-style-type: none"> 1. มอนอเมอร์มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ 2. เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นหรือกิ่ง 3. อ่อนตัว หรือหลอมเหลวได้ เมื่อได้รับความร้อน 4. ต้องทำให้เย็นก่อนนำออกจากแม่แบบ มิฉะนั้นอาจจะเสียรูปทรงได้ 5. ไม่เกิดการพอลิเมอไรเซชันอีกในแม่แบบ 6. นำกลับมารีไซเคิลได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มอนอเมอร์อย่างน้อย 1 ชนิด มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่ 2. เป็นพอลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือแบบร่างแห 3. จะแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อนและสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ 4. ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนนำออกจากแม่แบบ 5. เกิดการพอลิเมอไรเซชันอีกในแม่แบบ 6. รีไซเคิลด้วยการหลอมเหลวไม่ได้

ปริมาณการใช้งานของเทอร์โมเซตพลาสติกในปีค.ศ. 2001-2003 ในประเทศยุโรปแถบตะวันตกพบว่าปริมาณการใช้งาน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



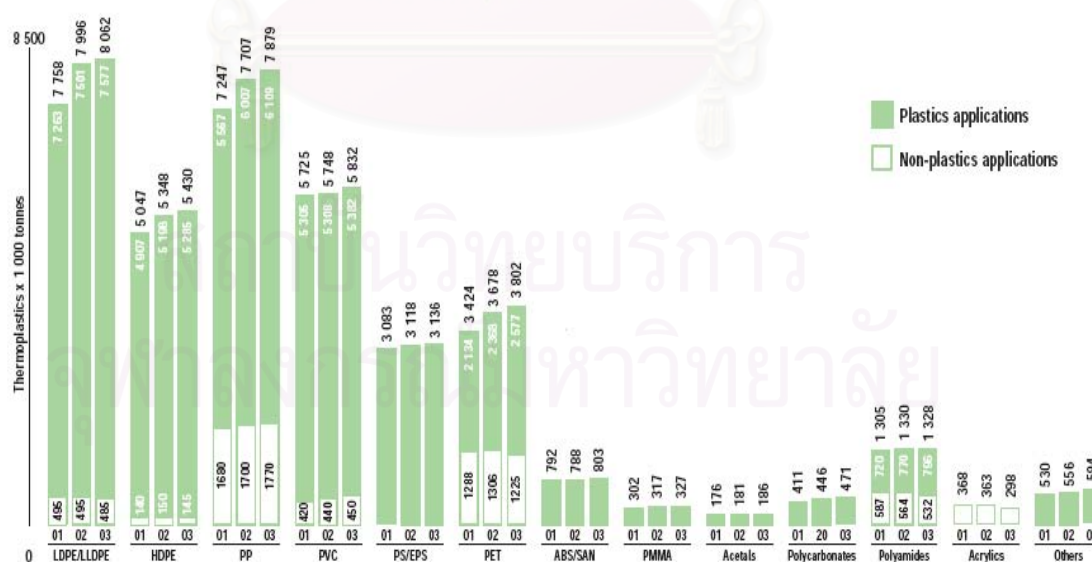
รูปที่ 2.2 ปริมาณการใช้งานของเทอร์โมเซตพลาสติกในปีค.ศ. 2001-2003 ในประเทศยุโรปแถบตะวันตก

ปริมาณการใช้งานของเทอร์โมเซตพลาสติก ในปี ค.ศ. 2002 คือ 10, 503,000 ตัน และในปี ค.ศ. 2003 มีปริมาณการใช้งาน 10,640,000 ตัน โดยการใช้งานส่วนมากของเทอร์โมเซตพลาสติกนั้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การใช้งานของเทอร์โมเซตพลาสติก

ชนิดของเทอร์โมเซตพลาสติก	การใช้งาน
ฟีนอลิก เรซิน (phenolic resins)	กาว, ส่วนประกอบของรถยนต์, อุปกรณ์ด้านไฟฟ้า
อีพอกซี เรซิน (epoxy resin)	กาว, ส่วนประกอบของรถยนต์, อุปกรณ์กีฬา, เรือ
พอลิยูรีเทน (polyurethane , PU)	กาว, เบาะ, ที่นอน

และปริมาณการใช้งานของเทอร์โมพลาสติก ในปีค.ศ. 2001-2003 ในประเทศยุโรปแถบตะวันตกพบว่าปริมาณการใช้งาน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปริมาณการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกในปีค.ศ. 2001-2003 ในประเทศยุโรปแถบตะวันตก

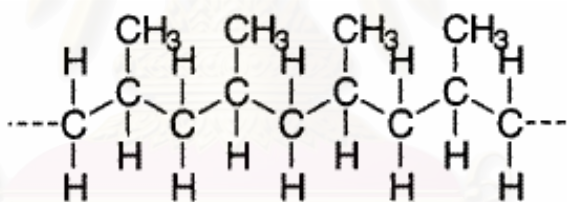
โดยปริมาณการใช้งานของเทอร์โมพลาสติก ในปี ค.ศ. 2002 คือ 37, 576,000 ตัน และในปี ค.ศ. 2003 มีปริมาณการใช้งาน 38,148,000 ตัน โดยการใช้งานส่วนมากของเทอร์โมพลาสติก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การใช้งานของเทอร์โมพลาสติก

ชนิดของเทอร์โมพลาสติก	การใช้งาน
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (HDPE)	ที่รอง, พลาสติกทางการเกษตรกรรม, ของเล่น, สารเคลือบผิว, ท่อ, ภาชนะ, เครื่องใช้ในครัวเรือน
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (LDPE)	ภาชนะ, ของเล่น, เครื่องใช้ในบ้าน, ท่อบรรจุก๊าซ, วัสดุห่อที่ใช้ในอุตสาหกรรม, บรรจุภัณฑ์, ถังเคมีภัณฑ์
พอลิโพรพิลีน (PP)	ฟิล์ม, กล่องบรรจุแบตเตอรี่, ภาชนะบรรจุที่เข้าไมโครเวฟได้, ส่วนประกอบของรถยนต์, ส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้า
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	ส่วนประกอบของหน้าต่าง, ท่อ, วอลล์เปเปอร์, ขวดน้ำ, ฟิล์มหด, ของเล่น, ฉนวนกันไฟฟ้า, บัตรเครดิต, อุปกรณ์ทางการแพทย์, กระเบื้องยาง
พอลิสไตรีน (PS & EPS)	อุปกรณ์ด้านไฟฟ้า, ฉนวนกันความร้อน, เทป, ถ้วย, ของเด็กเล่น, งานใส่อาหาร, โฟมกันกระแทก
พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET)	ขวดน้ำ, เส้นใย, ฟิล์มบรรจุอาหาร
สไตรีนโคพอลิเมอร์ (ABS/SAN)	ส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป
พอลิเมทิล เมทาครีเลต (PMMA)	ซีตใส, ฉนวนกันไฟฟ้า, ส่วนประกอบในห้องน้ำ, ส่วนประกอบของรถยนต์
พอลิเอไมด์ (PA)	ฟิล์มบรรจุอาหารประเภทซีต, ไชมัน, เส้นใย, วัสดุวิศวกรรมที่ทนอุณหภูมิสูง

2.2 พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกสามารถผลิตจากกระบวนการ coordination polymerization ให้มีโครงสร้างเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีความเป็นผลึกสูงถึง 70% ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก มีความแข็งและทนแรงดึงได้ดี มีความทนแรงกระแทกที่ดี อุณหภูมิสูงกว่า 15°C มีจุดหลอมเหลวประมาณ $165 - 175^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง มีค่าความถ่วงจำเพาะ $0.90 - 0.91$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนยังทำให้ทนต่อการซึมของไขมันและน้ำมันได้ดี ไขมันและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ แต่พอลิโพรพิลีนมีจุดอ่อน คือ เปราะแตกหักได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 0°C) และเสถียรภาพของพอลิโพรพิลีนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและออกซิเจนต่ำกว่าพอลิเอทิลีนจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานกลางแจ้ง เนื่องจาก แสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้เปราะแตกร้าว สีซีดจางได้ง่าย จึงต้องทำการผสมสารป้องกันออกซิเดชัน (antioxidant) และสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV stabilizer) เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพของชิ้นงานที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีน [7,8]



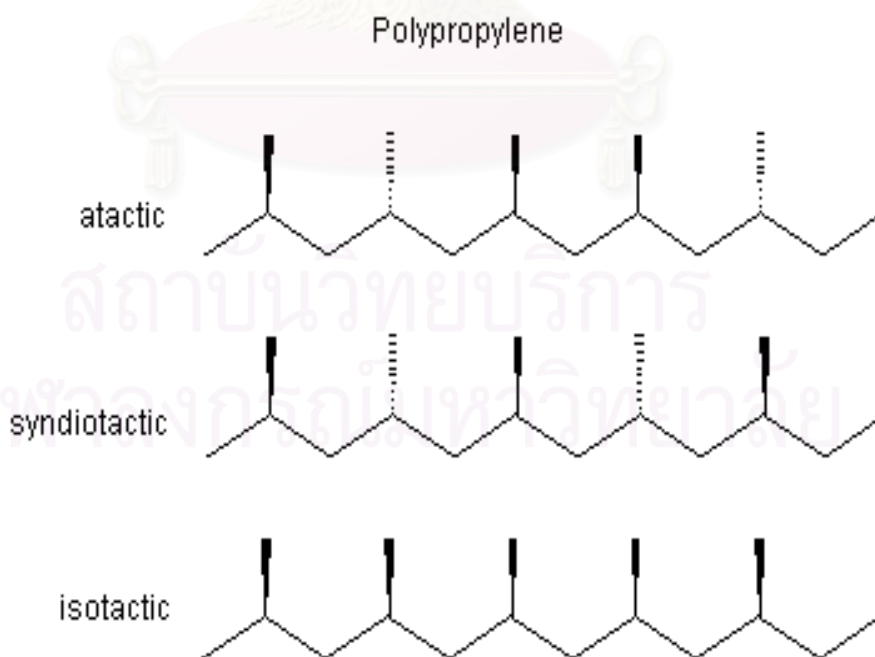
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของหน่วยซ้ำของพอลิโพรพิลีน

โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนประกอบด้วยโซ่โมเลกุลยาวของอะตอมคาร์บอน มีหมู่ เมทิลที่ยื่นออกมาเป็นกิ่งก้านอยู่ด้านข้างของโมเลกุลทำให้มีความหลากหลายในรูปแบบต่างๆ ของการจัดเรียงตัวกลุ่มโมเลกุลดังกล่าว สายโซ่โมเลกุลของอะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันในลักษณะซิกแซก (Zig-Zag) ซึ่งอาจพิจารณาให้การเรียงตัวของโซ่โมเลกุลดังกล่าวอยู่ในระนาบเดียวกับแผ่นกระดาษ แล้วมีกลุ่ม (R) ที่เกาะยึดด้านข้างของโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์หลัก ซึ่งทุกๆ กลุ่มอาจเกาะยึดอยู่ด้านบนหรือด้านล่างของระนาบกระดาษ โดย Professor Giulio Natta ได้บันทึกไว้ว่า โครงสร้างพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีน ถูกจำแนกด้วยการสลับตำแหน่งของกลุ่มโมเลกุลที่ยึดเกาะอยู่ด้านข้างของโซ่โมเลกุลหลักเหล่านี้ และได้มีการกำหนดชื่อเรียกของแต่ละแบบ ซึ่งปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 คือ

1) ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene) เป็นโครงสร้างที่มีหมู่เมทิล ยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลหลักอย่างสม่ำเสมอในลักษณะเหมือนกันและต่อซ้ำๆ กันไป โดยเกาะอยู่ด้านใดด้านหนึ่งเพียงด้านเดียวของสายโซ่โมเลกุลหลัก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ด้วยเหตุนี้ทำให้มีปริมาณผลึกที่สูง โครงสร้างแบบนี้จึงมีความแข็งแรงมากที่สุด

2) ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene) เป็นโครงสร้างที่มีหมู่เมทิล ยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลหลักในลักษณะสลับตำแหน่งข้ามกันไปมาอย่างเป็นระเบียบ มีความสม่ำเสมอและต่อซ้ำๆ กันตลอดทั้งสายโซ่โมเลกุล โดยจะยึดเกาะสลับกันทั้งด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างโซ่หลัก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนจัดเรียงตัวกันได้อย่างหนาแน่นรองลงมาจากไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ทำให้มีปริมาณผลึกปานกลาง โครงสร้างแบบนี้จึงมีความแข็งแรงเป็นลำดับสอง

3) อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (atactic polypropylene) เป็นโครงสร้างที่มีหมู่เมทิล ยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลหลักอยู่ทั้ง 2 ด้าน ในลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนจัดเรียงตัวกันได้ไม่แน่น ทำให้มีปริมาณผลึกน้อย ส่วนใหญ่จะเป็นอสัณฐาน โครงสร้างแบบนี้จึงมีความแข็งแรงต่ำที่สุด



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน

การใช้งานของ PP จะใช้งานตามประเภทของการขึ้นรูป คือ

1) งานฉีด (injection molding) ใช้ทำกล่องเบตเตอร์ กั้นชนรถยนต์ ลังใส่ขวด กระจก ต้นไม้ เครื่องใช้ทางการแพทย์ กระจกฉีดยาที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ด้ามแปรงสีฟัน ฝาจุกลพลาสติก

2) งานเป่า (blow molding) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่มีความทนทานสูงเช่น ขวด ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมี

3) งานเป่าถุง (blown film) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่ออุณหภูมิสูง เช่น ถุงร้อน พลาสติกหุ้มซองบุหรี่ ฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน เช่น ซองบะหมี่สำเร็จรูป

4) งานสิ่งทอ (textile) ใช้ผลิตเส้นใยกระสอบ เชือกฟาง เชือกประมง

เมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิโพรพิลีน กับพลาสติกชนิด อื่นๆ จะได้ผลดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของพลาสติกชนิดต่างๆ

สมบัติ	PE	PP	PET	PC
ความเบา	2	1	5	6
ความใส	3	2	1	1
ความเหนียว	1	3	2	3
การดูดซับน้ำ	2	2	3	6
การแพร่ผ่านของ H ₂ O	2	2	4	7
การแพร่ผ่านของ CO ₂	6	5	2	9
การแพร่ผ่านของ O ₂	7	6	2	8
ความต้านทานต่อกรด	2	2	4	4
ความต้านทานต่อด่าง	2	2	3	7
ความต้านทานต่อน้ำมัน	4	3	2	4
ความต้านทานต่อตัวทำละลาย	3	3	2	6
ความต้านทานต่อความชื้น	1	1	1	6
ความต้านทานต่อแสงแดด	4	4	1	4
ความต้านทานต่อความร้อน	3	2	3	1
ความต้านทานต่อความเย็น	1	4	2	1

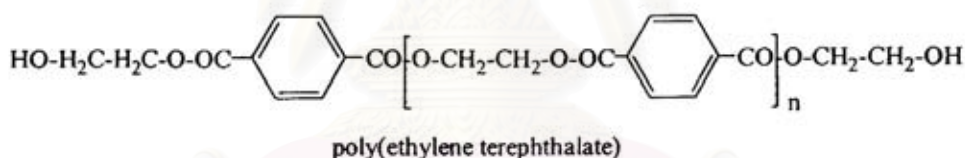
หมายเหตุ - PP: Polyethylene, PE: Polyethylene, PET: Polyethylene terephthalate และ PC: Polycarbonate

- 1 คือ ดีที่สุด และ 9 คือ ต่ำที่สุด

2.3 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพต

พอลิเอสเทอร์หลายชนิดได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1929 โดย W.H. Carothers บริษัท E.I. DuPont de Nemours and Co. (สหรัฐอเมริกา) แต่พอลิเมอร์เหล่านี้เป็นพอลิเมอร์แบบอะลิฟาติกเชิงเส้น (linear aliphatic polymer) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถละลายได้ในสารอินทรีย์ต่างๆ และต้านทานต่อการไฮโดรไลซิสต่ำ ทำให้ไม่สามารถใช้ในงานด้านสิ่งทอได้เหมือนพอลิเอไมด์ได้ [9]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพต คือ พอลิเอสเทอร์แบบเส้นชนิดอิมิตัว จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความสำคัญทางอุตสาหกรรมชนิดหนึ่ง เพตถูกใช้งานครั้งแรกในรูปของเส้นใยที่เรียกว่า “เส้นใยพอลิเอสเทอร์” โดย Whinfield & J.T.Dickson จากบริษัท The Calico Printers Association Ltd. (อังกฤษ) สามารถเตรียมพอลิเอสเทอร์แบบอะโรมาติก (aromatic polyester) ซึ่งพบว่าพอลิเอสเทอร์ที่เตรียมได้นั้น มีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น จุดหลอมเหลวสูง และ ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ยาก เหมาะสำหรับทำเป็นเส้นใยสิ่งทอ และเป็นมีชื่อทางการค้าที่เป็นที่รู้จักกันในชื่อของ แดครอน (Dacron®) และเทอริลีน (Terylene®) เพตมีสูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต หรือ เพต

การพัฒนาเพตเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์นั้นเริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1970 ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเริ่มแรกนั้นได้ผลิตขึ้นในรูปของขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ที่มีทั้งความเหนียวใส และกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี เพื่อทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้วและอะลูมิเนียมที่ต้องใช้พลังงานในการผลิตสูงและมีอัตราการแตกที่สูง ซึ่งบรรจุภัณฑ์จากเพตนั้นเป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ ดังต่อไปนี้

1. มีความทนแรงกระแทก และการตกกระทบดี จึงปลอดภัยในการใช้งาน
2. มีความใส
3. น้ำหนักเบา
4. สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ดี แม้ที่มีความดันสูง
5. ปลอดภัยต่ออาหารและเครื่องดื่มที่สัมผัส และไม่ทำให้รสชาติเปลี่ยนแปลงไป

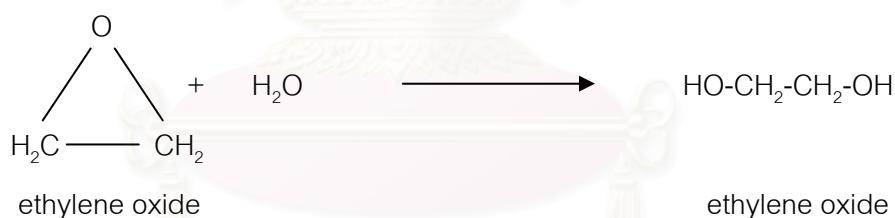
จากสมบัติของเพตที่เหนือกว่าพลาสติกชนิดอื่นๆ หลายประการ ทำให้มีการนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ขวดน้ำมันพืช ขวดน้ำดื่ม บรรจุภัณฑ์อาหาร ยา และสารเคมี เป็นต้น แต่เนื่องจากการใช้งานของเพตส่วนมากเป็นการใช้งานแบบใช้แล้วทิ้ง ทำให้ขยะจากขวดเพตในแต่ละวันนั้นมีปริมาณที่สูงมากขึ้น ดังนั้นการย่อยสลายขวดเพตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลเพต จึงได้รับความสนใจทั้งในด้านการลดขยะที่เกิดจากพลาสติกเพต และยังเป็นการใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่าอีกด้วย

2.3.1 วัตถุดิบ

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพต ผลิตมาจากเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) กับกรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid) หรือเอสเทอร์ของกรด เช่น ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate)

1) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol)

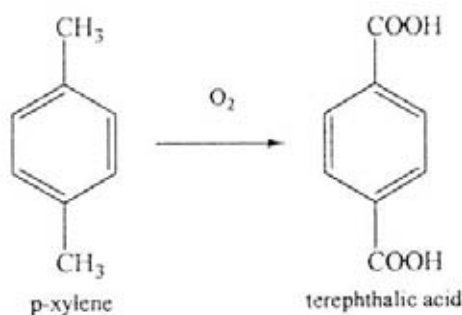
เอทิลีนไกลคอลนี้เตรียมได้จากการไฮเดรชันของเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 โดยเอทิลีนไกลคอลนี้เป็นสมบัติของเหลวที่ไม่มีสี มีจุดเดือด 197°C



รูปที่ 2.7 การไฮเดรชันของเอทิลีนออกไซด์

2) กรดเทเรฟทาลิก (Terephthalic Acid)

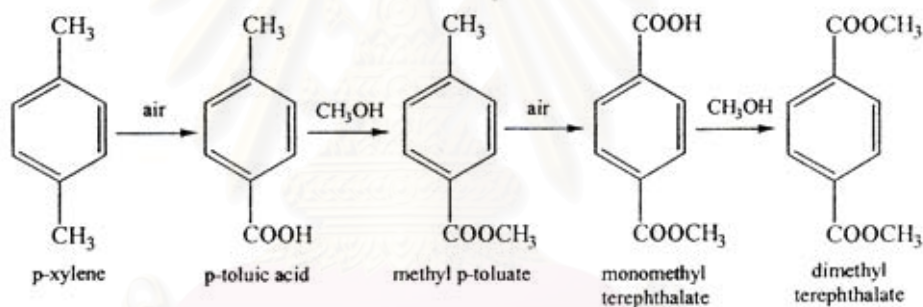
การเตรียมกรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid) ที่เหมาะสำหรับการเตรียมเพตนั้นนิยมเตรียมจาก พาราไซลีน (p-xylene) ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งได้จากปิโตรเลียม โดยผ่านอากาศเข้าไปในสารละลายพาราไซลีนในกรดอะซิติกที่ 200°C (20 บรรยากาศ) โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยเกลือของโคบอลต์ และแมงกานีส รวมทั้งโบรไมด์ไอออนโดยจะเกิดออกซิเดชันขึ้นได้เป็นกรดเทเรฟทาลิก จากนั้นลดอุณหภูมิลงเป็น 100°C กรดเทเรฟทาลิกบริสุทธิ์จะตกตะกอนออกมาเป็นของแข็งสีขาว มีอุณหภูมิการระเหิดที่ 300°C



รูปที่ 2.8 การเตรียมกรดเทเรพทาลิกจากพาราไซลีน (*p*-xylene)

3) ไดเมทิลเทเรพทาเลต (Dimethyl Terephthalate)

ไดเมทิลเทเรพทาเลตเป็นของแข็งสีขาว มีจุดเดือด 142°C สามารถผลิตได้หลายวิธี แต่กระบวนการที่นิยมที่สุดนั้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การผลิตไดเมทิลเทเรพทาเลต

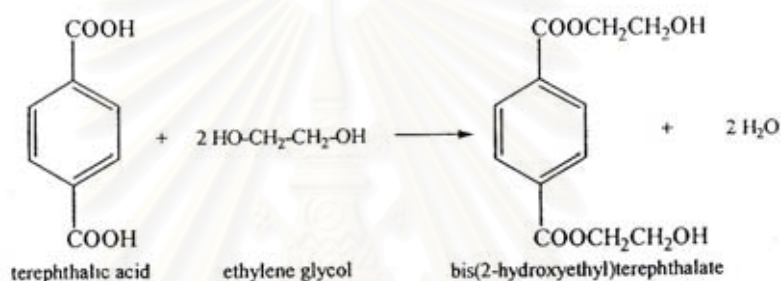
2.3.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต หรือเพต

พอลิเอทิลีน เทเรพทาเลต หรือ เพต สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้โดยตรง (direct esterification) ระหว่างกรดเทเรพทาลิก (terephthalic acid, TPA) และ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) หรือจากการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) ระหว่างไดเมทิลเทเรพทาเลต (dimethylterephthalate, DMT) และเอทิลีนไกลคอล ซึ่งในทางอุตสาหกรรม นั้นนิยมสังเคราะห์เพตจากปฏิกิริยาล้างมากกว่า เนื่องจาก ไดเมทิลเทเรพทาเลต สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายโดยการกลั่นแบบลดความดันหรือการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ ยังสามารถละลายได้ดีในเอทิลีนไกลคอล ทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นได้ดีในระยะเวลาเริ่มแรกของปฏิกิริยา แต่ในทางตรงกันข้ามกรดเทเรพทาลิกทำให้บริสุทธิ์ได้ยาก และมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายทั่วไปที่ต่ำ

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทีลีน เทเรฟทาเลต หรือเพตประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) กระบวนการกรด-เบส หรือกระบวนการเอสเทอร์-เบส

กระบวนการกรด-เบสเป็นการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) กันระหว่างระหว่างเอทีลีนไกลคอล (EG) ที่มีปริมาณมากเกินพอ กับกรดเทเรฟทาลิก (TPA) แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 250°C ความดัน 0.4 MPa (4 บรรยากาศ) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยานี้คือ BHET [bis(2-hydroxyethyl)terephthalate] โดยมีน้ำเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา



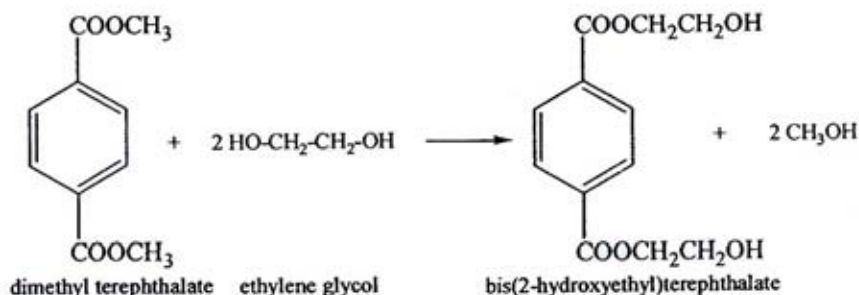
รูปที่ 2.10 การทำปฏิกิริยากันระหว่างระหว่างเอทีลีนไกลคอล กับกรดเทเรฟทาลิก

ซึ่ง BHET [bis(2-hydroxyethyl)terephthalate] ที่ได้นั้นเป็นเพียงโพลิโเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ BHET [bis(2-hydroxyethyl)terephthalate]

หรือสังเคราะห์เพตจากการทำกระบวนการเอสเทอร์-เบสซึ่งเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (trans-esterification) ระหว่าง ไดเมทิลเทเรฟทาเลต กับเอทีลีนไกลคอลที่มีปริมาณมากเกินพอ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 – 210 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย ได้แก่ เกลืออะซิเตตของโลหะ เช่น แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม แมกนีเซียม จะเกิดเป็น BHET เช่นเดียวกับกระบวนการกรด-เบส ซึ่งจะได้ผลพลอยได้เป็นเมทานอล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12

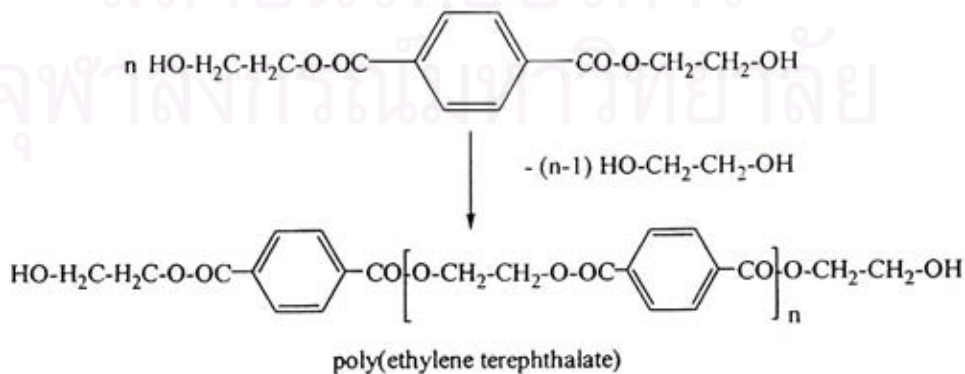


รูปที่ 2.12 การทำปฏิกิริยากันระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต กับเอทิลีนไกลคอล

น้ำหรือเมทานอลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยานั้นจะถูกกำจัดออกไป เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ และการใช้เอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากที่สุด ปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (solution polymerization)

2) ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์

แม้ว่าสารตั้งต้นจะเป็นกรดเทเรฟทาลิก หรือไดเมทิลเทเรฟทาเลต แต่ในขั้นตอนนี้มีปฏิกิริยาเหมือนกัน คือ ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) ซึ่ง BHET มีทั้งส่วนที่เป็นทั้งเอสเทอร์และแอลกอฮอล์ โดยการให้ความร้อนกับของผสมซึ่งได้จากการสังเคราะห์ในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 270 – 280°C ภายใต้สุญญากาศ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ (antimony trioxide) และในขณะที่ความดันถูกทำให้ต่ำลงมาที่ประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท จะได้ผลผลิตจากปฏิกิริยานี้ คือ เพทที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เหมาะสำหรับการทำเส้นใย และฟิล์ม และจะได้เอทิลีนไกลคอลเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยานี้อีกด้วย โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยานั้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์

เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ จึงต้องทำการกำจัดเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นผลพลอยได้ออกจากระบบอย่างต่อเนื่องด้วยระบบสุญญากาศ จนกระทั่งได้พอลิเมอร์ของพेटที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยในขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาแบบสารละลาย (solution polymerization) ส่วนปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบหลอมเหลว (melt polymerization) เพราะอุณหภูมิของขั้นตอนนี้สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (T_m)

2.3.3 สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

1) สมบัติทางกายภาพ

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือพेटเป็นพอลิเมอร์แบบผลึกที่แข็ง ไม่มีสี สมบัติทางกายภาพจึงมีผลมาจากความเป็นผลึกในโครงสร้างเป็นอย่างมาก เช่น ในการผลิตเส้นใย พอลิเมอร์จะถูกอัดรีดออกจากหัวสปินเนอร์ (spinneret) สู่อากาศที่อุณหภูมิกปกติ แล้วจึงทำให้เส้นใยเย็นตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นโครงสร้างอสัณฐาน ทำให้เส้นใยที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ จากนั้นนำเส้นใยไปผ่านกระบวนการการยัดดิ่งที่อุณหภูมิกสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ประมาณ 80°C เพื่อให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวและเกิดเป็นผลึกขึ้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 200°C เพื่อให้เกิดปริมาณผลึกมากที่สุด

เนื่องจากพेटมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการขึ้นรูปแบบทั่วไปจึงไม่เป็นที่ยอมรับ เพราะได้พेटที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน เนื่องจากมีการทำให้เย็นตัวในแม่แบบ จึงได้ชิ้นงานที่มีความอ่อนแอ และเมื่อมีการใช้งานที่อุณหภูมิกที่สูงกว่า 80°C จะทำให้ชิ้นงานหดตัว บิดเบี้ยว และมีสีขึ้น แต่สามารถแก้ไขได้โดยการใส่สารก่อผลึก หรือการเติมพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำลงมา หรืออาจจะใช้แม่แบบร้อนในการฉีด แต่วิธีนี้ก็ยังไม่เป็นที่สนใจ จนกระทั่งได้มีการใช้เทคนิคการยัดดิ่ง 2 ทิศทางเข้ามาใช้ในการผลิตฟิล์ม และนำมาใช้ในการผลิตขวด โดยในขั้นตอนแรก ขวดจะผลิตโดยการฉีดเข้าไปในแบบเย็นได้เป็นพาริสัน (parison) ที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน หลังจากนั้นนำพาริสันที่ได้ไปให้ความร้อน และเป่าในแม่แบบรูปขวด ซึ่งจะทำให้พेटถูกยัดดิ่งออก 2 ทิศทาง ทำให้ได้ผนังขวดที่บาง เหนียวและใส นอกจากนี้พेटยังมีความสามารถในการผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไอน้ำที่ต่ำอีกด้วย

พेटมีจุดหลอมเหลว (T_m) คือ 265°C ถึงแม้ว่าพेटจะมีขั้ว แต่พेटมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีที่อุณหภูมิกห้อง เนื่องจากการจัดเรียงตัวที่มาจากแรงดึงดูดไดโพลนั้นถูกจำกัดอยู่ที่อุณหภูมิกนี้ ซึ่งสมบัติอื่นๆ ของพेटในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย ฟิล์ม ชิ้นงานแบบอสัณฐาน ชิ้นงานแบบผลึกนั้นดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

สมบัติ	เส้นใย	ฟิล์ม	ชิ้นงานแบบ อสังฐาน	ชิ้นงานแบบ ผลึก	ชิ้นงานที่ผ่าน การเป่ายืดดึง
ความถ่วงจำเพาะ	1.38	1.38	1.30-1.34	1.32-1.38	1.36
ความทนต่อแรงดึง (เมกะปาสคาล)	690	170	55	76	120
ความยืดดึง ณ จุด ขาด (%)	100,000	25,000	8,000	11,000	17,000
ความทนต่อแรง กระแทก(จูลต่อเมตร)	-	-	53	43	-

2) สมบัติทางเคมี

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพตสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ให้โปรตอนที่อุณหภูมิห้องโดยตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพ เช่น กรดอะซิติกที่ถูกแทนที่ด้วยคลอรีนหรือฟลูออรีน (chlorinated or fluorinated acetic acid) ฟีนอล (phenol) และกรดไฮโดรฟลูออริก แอนไฮไดรอส (anhydrous hydrofluoric acid) นอกจากนี้ เพตสามารถละลายได้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น แอนนิโซล (anisole) อะโรมาติกคีโตน (aromatic ketone) ไดบิวทิลฟทาเลต (dibutyl phthalate) และไดเมทิลซัลโฟน (dimethyl sulphone) ในขณะที่คลอโรฟอร์ม (chloroform) สามารถละลายอสังฐานของเพตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C แต่ไม่สามารถละลายเพตที่เป็นผลึกได้

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความต้านทานต่อน้ำ และกรดแร่เจือจางได้ แต่จะสลายตัวในกรดไนตริก และกรดซัลฟูริกเข้มข้น เพตยังว่องไวต่อเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่จะมีผลเฉพาะที่ผิวของชิ้นงานเท่านั้น ไม่ทำอันตรายต่อเนื้อใน ในขณะที่เบสอินทรีย์ เช่น เมทิลเอมีนสามารถเข้าไปทำลายเนื้อในของวัสดุได้

ความต้านทานของเพตต่อการสลายตัวด้วยแสงนั้นดีมาก แต่การสลายตัวด้วยความร้อนสามารถเกิดได้เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว โดยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์อะซีทัลดีไฮด์ (acetaldehyde) และกรดเทเรฟทาลิก

2.3.4 การใช้งาน

พेटสามารถนำไปใช้งานในหลายด้าน อาทิเช่น ด้านยานยนต์ งานโครงสร้าง กลอนประตู กรอบดวงไฟ ด้านไฟฟ้า เช่น ข้อต่อไฟฟ้า มอเตอร์ กระจวย สวิตช์ไฟ และเตาไมโครเวฟ ด้านอุตสาหกรรมจะใช้ในส่วประกอบที่ต้องความแข็งแรงสูง และดูซึมความชื้นต่ำ ด้านเส้นใยและฟิล์มเช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม แผ่นใสสำหรับถ่ายเอกสาร เทปแม่เหล็ก และฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดบรรจุน้ำอัดลม ขวดบรรจุน้ำมันพืช

2.3.5 การย่อยสลายพेट

การรีไซเคิลพลาสติกตามความหมายของ ASTM D5033 นั้น หมายความว่า การนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการผลิต เพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกชิ้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1) Primary recycling

เป็นการนำเศษพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการผลิตมาผ่านกระบวนการผลิตซ้ำใหม่อีกครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เดิม หรือใกล้เคียง

2) Secondary recycling

เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบอื่นที่แตกต่างจากการใช้งานครั้งแรก ซึ่งมักพบว่าพลาสติกชนิดอื่นปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก

3) Tertiary recycling

เป็นการนำขยะพลาสติกมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และ กระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เพื่อผลิตเป็นสารเคมีพื้นฐานทั่วไป โดยมุ่งเน้นที่ขยะพลาสติกจากแหล่งชุมชน หรือขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยก

4) Quaternary recycling

เป็นการนำพลังงานที่ได้จากการเผาขยะพลาสติกมาใช้

พेटจัดเป็นพลาสติกที่นิยมนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบต่างๆมากที่สุด โดยทั่วไปจะเป็นบรรจุภัณฑ์พวกขวดน้ำดื่ม น้ำอัดลม ซึ่งในแต่ละปีจะมีอัตราการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้ยังมีฟิล์มหรือบรรจุภัณฑ์อื่นๆที่ทำจากพेटอีกด้วย

การรีไซเคิลเพตนั้นทั้งแบบเชิงกายภาพ และเคมี ซึ่งการรีไซเคิลทางกายภาพจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเพต แต่จำเป็นต้องทำการแยกประเภทและทำความสะอาด พลาสติก ก่อนที่จะนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้ง สำหรับการรีไซเคิลทางเคมีจัดเป็น เทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อเปลี่ยนเพตให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลง ซึ่ง สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมีต่างๆ รวมทั้งพอลิเมอร์ได้อีกด้วย การรีไซเคิลทางเคมี เป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องทำการคัดแยกผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นกับ พลาสติกแต่ละชนิด ซึ่งผลผลิตที่ได้สามารถนำไปกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกสารโมเลกุลชนิดต่างๆ ออกจากกันได้

2.4 ขยะพลาสติก

ขยะพลาสติกเป็นขยะของแข็งที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เนื่องจากใน ปัจจุบันมีการใช้งานพลาสติกในด้านต่างๆมากมาย ทำให้มีปริมาณของขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นแต่ละวันนั้นเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และต่อผู้ที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น

พลาสติกที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์และสามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้นั้น ส่วนใหญ่มาจากพลาสติก 6 ประเภทหลักๆ คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density P)polyethylene, HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) พอลิ ไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride, PVC) และพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP)

2.4.1 ชนิดของขยะพลาสติก

- 1) เศษพลาสติกที่เหลือจากการตัดแต่งผลิตภัณฑ์ ขยะประเภทนี้จะไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม
- 2) เศษพลาสติกที่เหลืออยู่ทางการค้า ซึ่งได้แก่ วัสดุกันกระแทก หรือวัสดุที่ใช้ในการบรรจุและห่อสินค้า เศษพลาสติกประเภทนี้หาได้ง่าย และมีความบริสุทธิ์สูง
- 3) เศษพลาสติกจากการใช้แล้วของผู้บริโภค ประกอบด้วยภาชนะพลาสติก ฟิ์มและเครื่องใช้ต่างๆ ขยะพลาสติกเหล่านี้มีพลาสติกหลายชนิดปะปนกันอยู่ ทำให้แยกออกจากกันลำบากมีค่าใช้จ่ายสูงในการคัดแยกและเมื่อนำมาหลอมเหลวใหม่ ไม่สามารถนำมาใช้ในการบรรจุอาหารได้อีก เมื่อทำการรวบรวมและคัดแยกประเภทพลาสติกชนิดต่างๆ ได้แล้ว จะนำไปผ่านกรรมวิธีการผลิตเป็นเม็ดพลาสติกประเภทรีไซเคิลอีกครั้งหนึ่ง

2.4.2 การจัดการกับพลาสติกหลังการใช้งาน

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทและเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรามากขึ้นทุกที กล่าวคือพลาสติกได้เข้ามาแทนที่วัสดุอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นแก้ว เซรามิกส์ ไม้ หรือกระดาษ เพราะสมบัติที่เด่นหลายประการ เช่น ความแข็งแรง คงทนไม่เกิดสนิม ในขณะที่มีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้ง่าย ประกอบกับราคาที่ไม่แพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำพลาสติกมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นปริมาณความต้องการในการใช้พลาสติกในแต่ละวันจึงได้เติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีขยะพลาสติกเกิดขึ้นในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมาภายหลังได้ ดังนั้นผู้บริโภคจึงต้องหันมาช่วยกันจัดการกับขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นเหล่านั้นให้เหมาะสมด้วยวิธีการเหล่านี้ ได้แก่

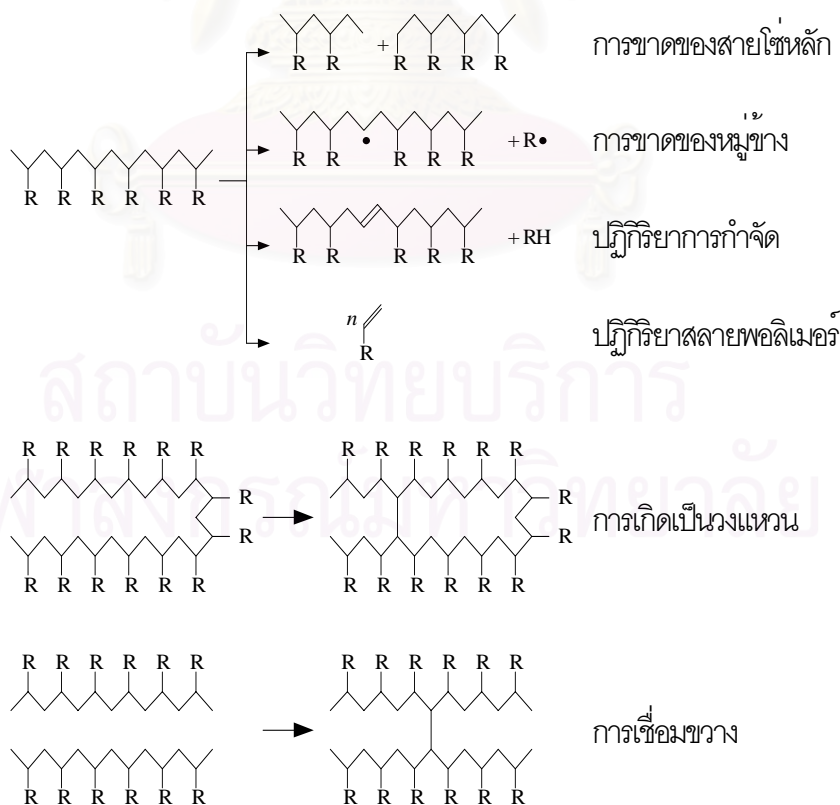
- 1) การนำไปถมดิน
- 2) การกำจัด ด้วยวิธีสังเคราะห์พลาสติกที่สลายตัวได้เร็วขึ้นเมื่อถูกแสงแดดหรือสลายตัวด้วยวิธีการทางชีวภาพ ตลอดจนการกำจัดด้วยการเผา
- 3) การแปรใช้ใหม่ หรือที่เรียกว่าการรีไซเคิล โดยการรีไซเคิลแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ
 - การรีไซเคิลเชิงอุตสาหกรรม คือ การนำเศษพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการขึ้นรูปนำกลับมาหลอมใช้ใหม่
 - การรีไซเคิลหลังการใช้งาน คือ การรีไซเคิลผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ถูกทิ้งหลังจากการใช้งาน

2.4.3 การเสื่อมสภาพของพลาสติก

การนำขยะพลาสติกมาผ่านกระบวนการหลอมเหลวและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่นั้นสามารถทำได้โดยการนำมาผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่ เพื่อประโยชน์ในการลดต้นทุน และอาจจะเพิ่มสมบัติเชิงกลบางประการ แต่ข้อควรระวังก็คือ พลาสติกที่ผ่านการหลอมเหลวหรือผ่านการใช้งานมาแล้ว จะมีคุณสมบัติที่ด้อยลง เพราะมีสายโซ่โมเลกุลบางส่วนเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากพลาสติกจะต้องผ่านการให้ความร้อนเพื่อให้หลอมเหลวหรืออ่อนตัวพอจะไหลได้ นอกจากนี้ยังจะต้องถูกอัด บด หรือรีด ในช่วงกระบวนการขึ้นรูป ในภาวะนี้พลาสติกจะเกิดการแตกตัวได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเสื่อมสภาพ และจะเกิดได้อย่างรวดเร็ว และมากยิ่งขึ้น เมื่อมีออกซิเจนเข้ามาร่วมด้วย ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยจะเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นด้วยสาเหตุต่างๆ กล่าวคือ [10]

1) การเสื่อมสภาพทางเคมี

การเสื่อมสภาพทางเคมี จะเกิดขึ้นในกระบวนการที่มีสารเคมีต่างๆ เช่น กรด ต่าง และ สารละลาย หรืออาจเกิดขึ้นได้เองถ้าในพอลิเมอร์มีส่วนประกอบต่างๆ เจือปนอยู่ เช่น สารเติมแต่ง (additives) อื่นทั้งในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์อาจจะมีพันธะไม่อิ่มตัวอยู่ด้วย ซึ่งพันธะไม่อิ่มตัวนี้ มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นอย่างมาก นอกจากนี้พอลิเมอร์ยังอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับออกซิเจนในอากาศในสภาวะการขึ้นรูปพลาสติกได้อีกด้วย การเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อน (thermal degradation) ของพลาสติกเกิดจากการสลายพันธะโควาเลนต์ในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งมีพลังงานการสลายพันธะของพันธะเดี่ยวที่ 25°C มีค่าอยู่ในช่วง 300 - 900 กิโลจูลต่อโมล ในขณะที่พลังงานความร้อนในบรรยากาศมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.4 กิโลจูลต่อโมล จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมด้วย ทำให้การสลายพันธะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเนื่องจากการสลายพันธะในสายโซ่หลัก และสายโซ่ข้างเคียงนั้น ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง และจะให้สารน้ำหนักโมเลกุลเล็กๆ ออกมา หรืออาจจะเป็นวงแหวน และเกิดการเชื่อมขวาง โดยรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพทางความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 [11]



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเสื่อมสภาพทางความร้อนของสายโซ่พอลิเมอร์

ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนได้แก่

(ก) สิ่งแปลกปลอม ซึ่งอาจเกิดในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ หรือเกิดจากสารเติมแต่งที่อยู่ในพอลิเมอร์

(ข) การเกิดหมู่ไม่อิ่มตัวที่ปลายสายโซ่โมเลกุล หมู่ที่ไม่อิ่มตัวเหล่านี้จะเป็นหมู่ที่ไวต่อความร้อน ดังนั้นถ้าเกิดหมู่เหล่านี้ขึ้นในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก จะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ลดลง

(ค) การจัดเรียงตัวของโครงสร้าง พอลิเมอร์บางชนิดจะมีการรวมตัวของ growing chain สองลักษณะคือ head-to-head และ head-to-tail จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิสไตรีน พบว่าการจัดเรียงตัวแบบ head-to-head จะมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าการจัดเรียงตัวแบบ head-to-tail จึงเกิดการสลายตัวได้มากกว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน

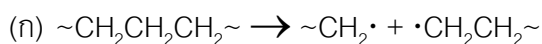
(ง) เสถียรภาพทางความร้อนจะลดลงตามปริมาณของกิ่งที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกิ่งจะทำให้โครงสร้างของโมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ โดยจากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนจะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิไอโซบิวทอะไดอีนนั้น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสุด รองลงมา คือ พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่วนพอลิไอโซบิวทอะไดอีนนั้นจะมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำที่สุด

(จ) ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization reaction) ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนเช่นกัน พบว่าพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์จาก radical polymerization มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์จาก ionic polymerization เนื่องจาก ionic polymerization จะมีความจำเพาะในการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่า ทำให้โครงสร้างมีการเรียงตัวแบบ head-to-head เป็นส่วนมาก

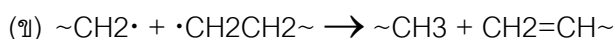
2) การสลายตัวเชิงกลของพอลิเมอร์

จะประกอบด้วยการสลายพันธะ และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเกิดจากภาวะที่มีแรงมากระทำ เป็นผลให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป เกิดการเสียรูป ร้าว หรือแตก เป็นต้น โดยพฤติกรรมเหล่านี้จะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพ และจุดบกพร่องของวัสดุ จึงทำให้ต่อมาเมื่อมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายใต้ระบบที่มีแรงมากระทำ โดยพบว่าจะเกิดการกระจายแรงไปที่พันธะเป็นผลให้เกิดการเสียรูป และเกิดอนุมูลอิสระจากการขาดของพันธะเคมีภายใต้แรงกระทำ

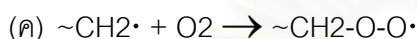
นอกจากนี้สารที่เจือปนอยู่ในรูปต่างๆ จะทำให้ปฏิกิริยาการสลายพันธะเกิดได้ง่ายขึ้น ปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิเมอร์เชิงเส้นภายใต้แรงกระทำเริ่มจากการสลายพันธะ



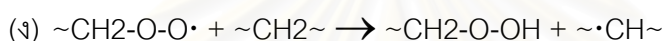
และอนุมูลอิสระใน (ก) สามารถเกิด disproportionation ได้ดังนี้



ในที่มีออกซิเจน monoradical จะทำปฏิกิริยาคือ



โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ดังนี้



การเสื่อมสภาพของพลาสติกนั้นเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ บางชนิดอาจเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุล ทำให้พลาสติกแข็งแรงขึ้น แต่มีสมบัติที่เปราะ บางชนิดอาจเกิดการแตกตัวออกของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ความแข็งแรงลดลง หรือบางชนิดอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางเคมี สังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของพลาสติก ส่วนการเสื่อมสภาพจะเกิดขึ้นในแบบใดนั้น ขึ้นกับ

- ชนิดของพลาสติก
- อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์
- ช่วงเวลา หรือจำนวนครั้งที่พลาสติกอยู่ในสภาพที่หลอมเหลว
- ปริมาณออกซิเจนที่พลาสติกได้รับ

เพราะฉะนั้นการควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้งหนึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและสมบัติของพลาสติกที่ผ่านการใช้ และนำกลับมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยระหว่างกระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สมบัติต่อไปนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง

- ความหนืดขณะหลอมเหลว
- สมบัติเชิงกล
- สี
- ความต้านทานต่อสารเคมี

2.5 พอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม คือ การนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อช่วยในการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งในปัจจุบันการผลิตพอลิเมอร์ผสมกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา เช่น ราคาถูก ทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ใช้เวลาในการผลิตไม่มาก เช่น การทำให้พอลิสไตรีนมีความเหนียว ไม่เปราะแตกง่าย โดยทำการผสมพอลิสไตรีนกับยาง หรือที่รู้จักกันในชื่อว่า 'HIPS' (high impact polystyrene) แต่การที่จะนำพอลิเมอร์มาผสมกันนั้น เพื่อให้สมบัติที่ดีขึ้นนั้นจำเป็นต้องพิจารณาจากองค์ประกอบต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันด้วย เช่น โครงสร้าง สมบัติ และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด หากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันไม่สามารถเข้ากันได้ดี จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ลดต่ำลง [12, 13]

ระบบพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วย 2 เฟส คือ เมทริกซ์เฟส และดิสเพอร์สเฟส ซึ่งเมทริกซ์เฟส คือ เฟสที่เป็นตัวหลักที่กำหนดสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ส่วนดิสเพอร์สเฟส คือ เฟสที่มีการกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม โดยอาจจะอยู่ในลักษณะที่เป็นเส้นใย ทรงกลม แผ่น หรือโครงสร้างที่เป็นแผ่นบาง (lamellae) เป็นต้น เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน และพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก จะมีพอลิสไตรีนเป็นเมทริกซ์เฟส และ พอลิบิวตะไดอินเป็นดิสเพอร์สเฟสกระจายตัวอยู่ในพอลิสไตรีน ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเปราะลดลง เพราะอนุภาคของพอลิบิวตะไดอิน ไปช่วยในการรับแรงกระแทก และมีความอ่อนนุ่มมากกว่าพอลิสไตรีนธรรมดา แต่จะมีลักษณะขุ่น เพราะ อนุภาคของพอลิบิวตะไดอินนั้นไปทำให้เกิดการสะท้อนของแสง

โดยการผสมพอลิเมอร์ผสมนั้นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Reactive blending)

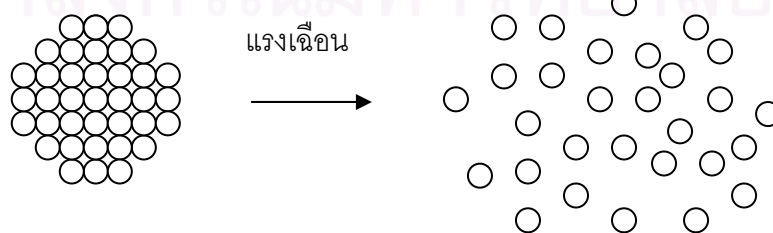
พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันนั้นจะต้องมีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ทำให้เกิดพันธะทางเคมีขึ้นเช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตและพอลิเอไมด์ ซึ่งพอลิเมอร์จะต้องมีหมู่ฟังก์ชันสำหรับทำปฏิกิริยา ตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมประเภทนี้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง

ชนิด	วิธีการเตรียม
Interpenetrating Polymer Networks (IPN)	ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวางแล้วบวมตัวในมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ หลังจากนั้นทำให้มอนอเมอร์เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันและเชื่อมขวางกัน ทำให้เกิดการไขว้กันของพอลิเมอร์ 2 ชนิด
Semi-Interpenetrating Polymer Networks (SIPN)	ผสมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่เข้าด้วยกันกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์แล้วจึงพอลิเมอร์ไรเซชันให้กลายเป็นพอลิเมอร์ร่างแหไขว้กับพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติก
Simultaneous Interpenetrating Polymer (SIN)	ผสมมอนอเมอร์ต่างๆเข้าด้วยกันโดยจะเกิดไฮโม่พอลิเมอร์ไรเซชันและโครงสร้างแบบเชื่อมขวางในเวลาเดียวกัน แต่ไม่เกิดกีดกันที่มีแรงกระทำระหว่างกัน
Interpenetrating Elastomeric Networks (IEN)	ทำการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของลาเทกซ์ โดยจะทำการหลังจากเกิดภาวะที่ของเหลวเป็นเป็นก้อนแล้ว

2) การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Non – reactive blending)

การผสมวิธีนี้ทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องคำนึงถึงหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยแสดงวิธีการผสมพอลิเมอร์ดังตารางที่ 2.7 ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการผสม เช่น เครื่องอัดรีด (extruder) เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill) โดยเครื่องมือประเภทนี้จะทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นในระหว่างการผสม แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะไปทำให้พอลิเมอร์เกิดการกระจายตัวกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้การผสมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อาจเรียกว่าเป็นการผสมเชิงกลก็ได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 [14]



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน

ตารางที่ 2.7 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง

ชนิด	วิธีการเตรียม
Mechanochemical Blends	ผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยอัตราแรงเฉือนสูง เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว โดยพีรีเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะรวมตัวเป็นของผสมเชิงซ้อนซึ่งมีทั้งองค์ประกอบที่เป็นบล็อก และกราฟต์โคพอลิเมอร์
Solution-Cast Blends	ละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายแล้วเทลงแม่แบบ หลังจากนั้นจึงทำการกำจัดตัวทำละลายออกไป
Latex Blends	ผสมพอลิเมอร์กับน้ำเข้าด้วยกัน จนกระทั่งพอลิเมอร์กระจายตัวได้ดีในน้ำ ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีลักษณะเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นก้อน (coagulated)

โดยสิ่งที่จะต้องคำนึงมากที่สุดในการทำพอลิเมอร์ผสม คือ ความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยเฉพาะการผลิตในทางการค้า ซึ่งมีพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความสามารถในความเข้ากันได้ แต่บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจาก พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลต่างกัน ความมีขั้วต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์ที่ทำการผสมกันไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างอิสระในพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับสารโมเลกุลเล็ก ทำให้เกิดการแยกชั้นของพอลิเมอร์เกิดขึ้น นอกจากนี้พลังงานของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ยังเป็นปัจจัยทำให้พอลิเมอร์เกิดความเข้ากันได้ หรือไม่ด้วย เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

2.5.1 กลไกความเข้ากันได้

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่เมื่อนำมาผสมกันเป็นพอลิเมอร์ผสมแล้วจะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเปราะ ไม่แข็งแรง ขาดง่าย เนื่องจาก แรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ที่เป็นดิสเพอร์สเฟสกับเมทริกซ์เฟสมีค่าที่ต่ำ (interfacial adhesion) และมีความเค้นสะสม (Stress concentration) เกิดขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม จึงจำเป็นต้องมีการใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติต่างๆที่ดีขึ้น โดยมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เช่น สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของ

พอลิเมอร์ในแต่ละองค์ประกอบ สันฐานวิทยาระหว่างผิวสัมผัสของแต่ละเฟส และแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส

2.5.2 วิธีทำให้เข้ากันได้

การผสมที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ และ ทำให้มีสมบัติต่างๆตามที่ต้องการนั้นมีด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะแตกต่างกัน ขึ้นกับการเลือกใช้ ซึ่งพิจารณาจากราคาเป็นสำคัญ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1) ความเข้ากันได้ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Miscibility)

ความเข้ากันได้จะขึ้นกับสมมูลระหว่างเอนทัลปี (enthalpy) และเอนโทรปี (entropy) ของการผสมที่มีต่อพลังงานอิสระของการผสม (free energy of mixing) โดยที่เอนโทรปี คือ การวัดระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) หรือ ความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุล เมื่อมีการผสมเกิดขึ้น โดยการผสมจะทำให้เอนโทรปีมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ ($S_2 > S_1$) สำหรับโมเลกุลใหญ่ๆ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้น การเข้ากันได้จึงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม ซึ่งดังแสดงไว้ในสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยที่ ΔG = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม

ΔH = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม

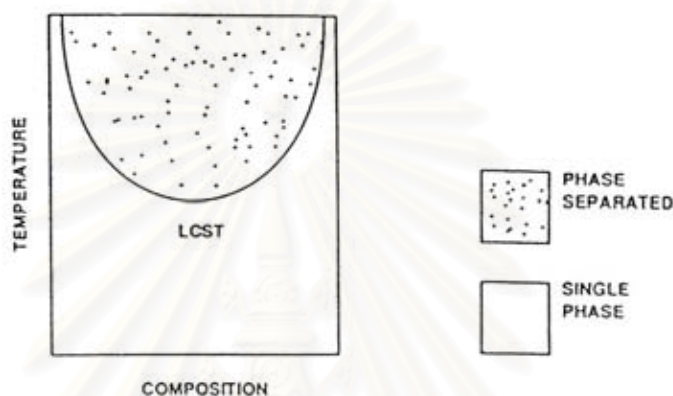
ΔS = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

T = อุณหภูมิ (K)

โดยการผสมที่สามารถทำให้พอลิเมอร์เกิดความเข้ากันได้ นั้น ΔG ต้องมีค่าเป็นลบ ($\Delta G < 0$) หรือ $\Delta H - T\Delta S$ ต้องน้อยกว่าศูนย์ ($\Delta H - T\Delta S < 0$) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. การผสมที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Mixture)

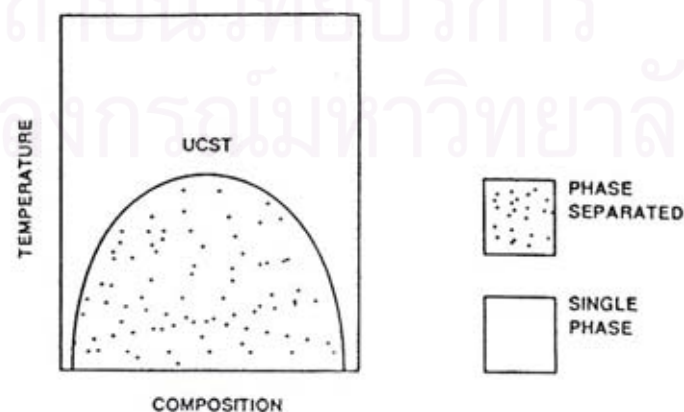
ภายในระบบของผสมจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน เช่น โมเลกุล A และ โมเลกุล B ดึงดูดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นลบ ($\Delta H < 0$) นั่นคือ การผสมสามารถเข้ากันได้ และเมื่อสร้างเป็นแผนภาพเฟส จะปรากฏดังรูปที่ 2.16 พบว่า พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบมากขึ้น จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง และอุณหภูมิต่ำสุดที่ของผสมเกิดการแยกเฟส เรียกว่า Lower Critical Solution Temperature (LCST)



รูปที่ 2.16 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น LCST

2. การผสมที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Mixture)

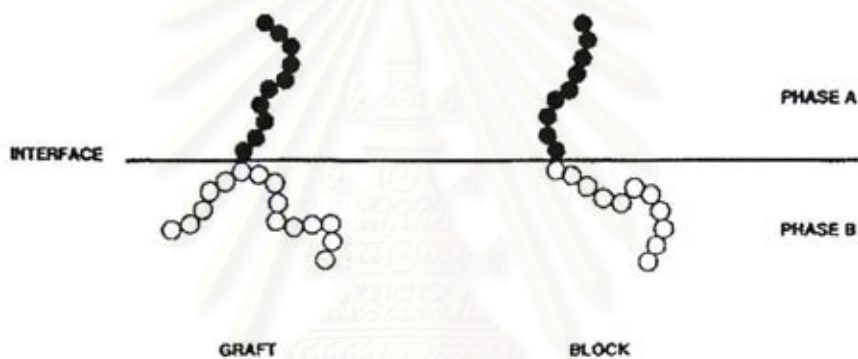
ถ้าภายในระบบของผสมไม่มีแรงดึงดูดระหว่างกัน ซึ่งจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta H > 0$) ดังนั้นการผสมจะสามารถเข้ากันได้ดี เมื่อ $T\Delta S$ มีค่ามากกว่า ΔH ($T\Delta S > \Delta H$) เพื่อให้ ΔG มีค่าเป็นลบ ($\Delta G < 0$) ซึ่งการผสมที่เข้ากันได้ดีนั้นจะสามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง หรือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ ดังปรากฏในรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงสุดพอลิเมอร์ผสมจะเกิดการแยกเฟส ที่เรียกว่า Upper Critical Solution Temperature (UCST)



รูปที่ 2.17 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงเป็น UCST

2) การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of Block or Graft Copolymer)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม เพื่อเพิ่มความสามารถในความเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์เป็นที่นิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์แต่ละชนิดนำมาผสมกัน ส่วนโคพอลิเมอร์จะต้องมีโครงสร้างทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยพบว่าสายโซ่โมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะต้องยาวพอที่จะจับกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสม แต่ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สูงจนเกินไป เพราะจะแพร่ไปที่ผิวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ กลไกของสารช่วยผสมระหว่างเฟสดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กลไกของบล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด

โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสมอย่างมาก จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง พบว่า

1. บล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
2. ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
3. ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกสั้นสลับยาวจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ที่มีความยาวของบล็อกเท่ากัน

สารช่วยผสมมีหน้าที่ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดย

1. ลดแรงดึงผิวระหว่างผิวสัมผัสในภาวะหลอมเหลว ทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์
2. ช่วยเพิ่มแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระหว่างเฟส
3. เพิ่มความคงตัวของขนาดของดิสเพอร์สเฟสภายใต้การอบบ่ม (annealing)

3) การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Addition of Function or Reactive Polymer)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ได้จากการนำพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมาทำการดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หรือ มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ เช่น พันธะไอออนิก ซึ่งการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์ หรือผ่านเครื่องอัดรีด เช่น การกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิโอฟีนส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทำให้พอลิโอฟีนส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมอย่างสูง และมีราคาไม่แพง

4) การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการผสม (In-situ Grafting Copolymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากัน โดยแตกต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม เช่น การผสมพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์

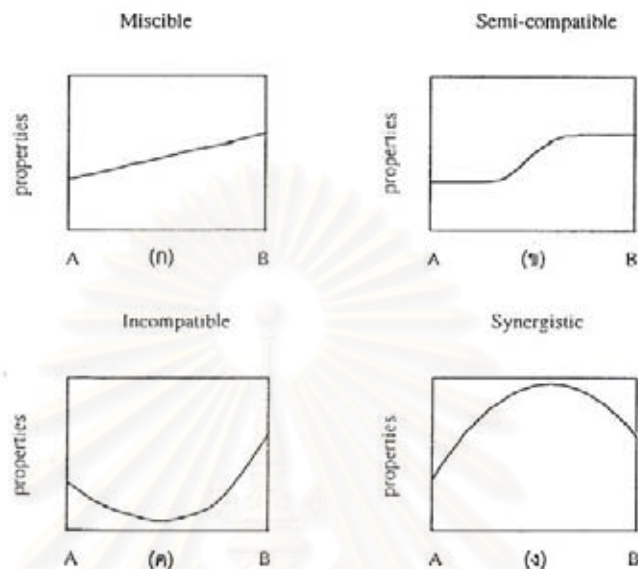
กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการผสมอาจเกิดได้ ดังต่อไปนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะกระตุ้นโดยการเติมสารริเริ่มในระหว่างกระบวนการผสม
2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดกับพอลิเมอร์แบบควบแน่น
3. เกิดการขาด หรือ รวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อที่จะสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้สภาวะที่มีความเค้นเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับอัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบ รวมทั้งสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ ลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละองค์ประกอบ เช่น ลักษณะคล้ายแก้ว ยาง หรือเป็นพอลิเมอร์

ลิเมอริกซ์ผลึก สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการผสม และการจัดเรียงโมเลกุล โดยการผสมที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์จะแสดงลักษณะสัญญาณวิทยาเพียงเฟสเดียว ซึ่งเป็นการง่ายที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนผสม ซึ่งดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.19



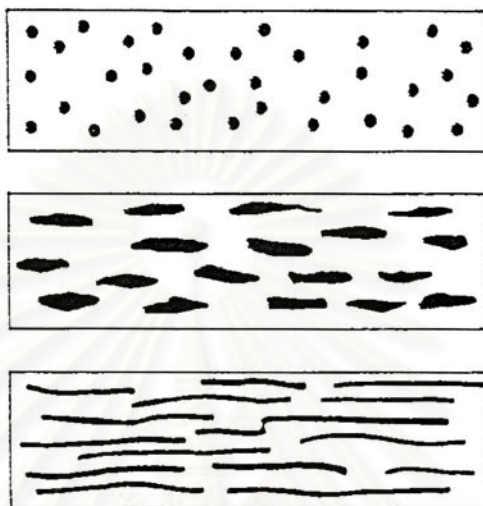
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 2.19 ในระบบการผสมที่สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ อัตราส่วนผสมกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ดังรูปที่ 2.19(ก) แต่ในการผสมส่วนใหญ่จะไม่ต้องการความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ ต้องการความเข้ากันได้บางส่วน (semi compatible) คือ อนุภาคของดีสเพอร์สเฟสที่มีขนาดเล็กจะกระจายอยู่ในเมทริกซ์ โดยในระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และเมื่อนำไปพล็อตกราฟระหว่างสมบัติและอัตราส่วนการผสมจะได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายตัวเอส ดังรูปที่ 2.19 (ข) โดยพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลัก และควบคุมสมบัติของชิ้นงาน ส่วนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกราฟมีสาเหตุมาจากการกลับเฟสของของผสม

ในระบบที่มีความเข้ากันน้อยมาก หรือไม่เข้ากันจะมีการแยกเฟสเกิดขึ้น โดยดีสเพอร์สเฟสจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กระจายตัวอยู่ในเฟสหลัก และระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ หรือไม่มีเลย จากลักษณะดังกล่าวสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ทำให้ไม่นิยมนำไปใช้งาน และจะได้กราฟระหว่างอัตราส่วนการผสมและสมบัติคล้ายรูปตัวยู ดังรูปที่ 2.19 (ค) ส่วนระบบสุดท้ายจะพบได้น้อย โดยการผสมจะปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่าระบบอื่น คือ สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมากกว่า หรือ เท่ากับพอลิเมอร์ แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ดังรูปที่ 2.19(ง)

2.5.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

การจัดเรียงตัวหรือสัณฐานวิทยาของแต่ละเฟสในพอลิเมอร์ผสมจะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง สัณฐานวิทยาอาจจะมีลักษณะของดิสเพอร์สเฟสกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยดิสเพอร์สเฟสจะมีลักษณะเป็นทรงกลม แผ่น หรือเส้นใย ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะต่างๆของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิต จะขึ้นกับอัตราส่วนของการผสม อัตราส่วนความหนืดในแต่ละองค์ประกอบ แรงตึงผิว และภาวะของการผสม โดยองค์ประกอบที่มีเป็นจำนวนมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเมทริกซ์หรือเฟสหลัก โดยขนาดของดิสเพอร์สเฟสจะถูกควบคุมด้วยการแตกตัวเป็นหยดของดิสเพอร์สเฟส (drop breakout) และการรวมกลุ่ม (coalescence) ของดิสเพอร์สเฟส โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องผสม แรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส และลักษณะการไหลของแต่ละองค์ประกอบ นอกจากนี้ รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสอาจจะถูกเปลี่ยนแปลงจากทรงกลมเป็นเส้นใยจากการไหลแบบยืดดึงที่หัวตาย หรือจากทรงกลมเป็นแผ่นจากการยืดดึงแบบ 2 ทิศทาง ในกระบวนการเป่า เป็นต้น

ในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด เข้าด้วยกันนั้น ส่วนใหญ่แล้วพอลิเมอร์ดังกล่าวจะไม่เข้ากัน โดยจะแยกเป็น 2 เฟส ตามหลักการเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของผสม สมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบ และภาวะในการผสม คือ เมื่อทำการผสมดิสเพอร์สเฟสในอัตราส่วนเล็กน้อย ดิสเพอร์สเฟสจะกระจายอยู่ในเฟสหลักโดยอาจมีรูปร่างเป็นทรงกลม เส้นใย หรือแผ่น ขึ้นกับสภาวะของการขึ้นรูป และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของดิสเพอร์สเฟสขึ้น จะมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและมีขนาดใหญ่ เนื่องจากการรวมกลุ่มกันของดิสเพอร์สเฟส และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมต่อไป ดิสเพอร์สเฟสจะเกิดการกลับเฟส (phase inversion)

เปลี่ยนเป็นเฟสหลัก โดยก่อนถึงจุดนี้สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะเกิดการกลับทั้ง 2 เฟส เรียกรการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวว่า co-continuous ซึ่งการกลับเฟสนี้สามารถเห็นได้จากการสังเคราะห์ high impact polystyrene (HIPS) ซึ่งการกลับเฟสจะเกิดขึ้นโดยในช่วงแรกเฟสของยางจะเป็นเฟสหลัก แต่เมื่อสิ้นสุดการสังเคราะห์แล้วพอลิสไตรีนจะเป็นเฟสหลัก

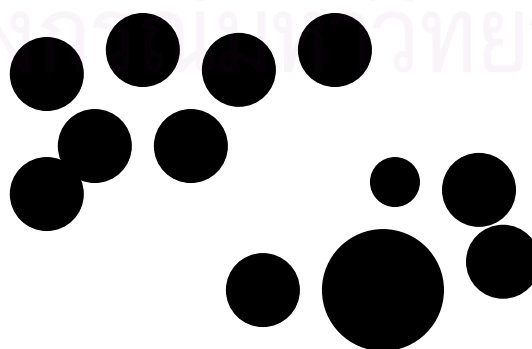
2.5.5 ความสามารถในการกระจายตัว

ความสามารถในการกระจายตัวของฟิลเลอร์ขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางเคมีของฟิลเลอร์ ลักษณะของพื้นผิว ขนาดของอนุภาค และกระบวนการผลิต

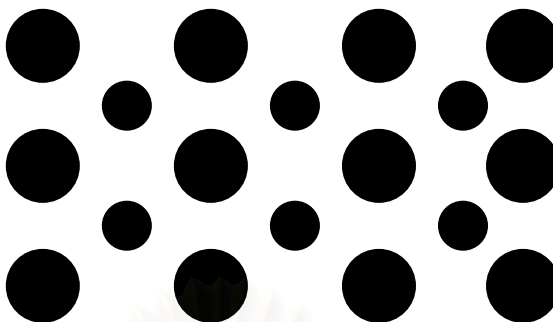
ลักษณะทางเคมีของฟิลเลอร์ คือ ความแข็งแรงของพันธะและลักษณะพิเศษของพื้นผิวซึ่งมีความแตกต่างกันตามลักษณะของฟิลเลอร์ สมบัติทางกายภาพ และเคมีของผิวฟิลเลอร์ จะเป็นตัวกำหนดแนวโน้มในการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือความแข็งแรงของการรวมกลุ่มกัน

ขนาดของอนุภาคมีความสำคัญต่อความยากง่ายในการกระจาย โดยทั่วไปแรงที่พื้นผิวของฟิลเลอร์ที่มีอนุภาคที่ใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะมีแรงผลักดันให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนน้อย และค่อนข้างอ่อน แต่สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่า 1 ไมครอน จะยังเข้าใกล้สถานะคอลลอยด์และมีแนวโน้มในการเกาะกลุ่มกันอย่างรวดเร็ว ต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิว หรือสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้ป้องกันการเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอีกครั้งหนึ่ง เมื่อเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนจะถูกทำลายโดยกระบวนการกระจายตัว

กระบวนการที่มีการเติมฟิลเลอร์จะมีผลต่อการกระจายตัวในผลิตภัณฑ์ โดยเทคนิคที่นิยมใช้ คือ การเคลือบผิว เพื่อเปลี่ยนลักษณะทางเคมีที่ผิว และลดแรงดึงดูดที่เกิดระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และพันธะเคมีของอนุภาค และวิธีที่ทำให้เกิดการล้อมรอบของอนุภาค หรือลดแรงที่จะทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน โดยการกระจายที่เหมาะสมของฟิลเลอร์มีผลต่อสมบัติโดยรวมของผลิตภัณฑ์ โดยรูปที่ 2.21 แสดงการกระจายตัวที่ไม่ดีและ รูปที่ 2.22 แสดงการกระจายตัวที่ดีของผงสีในเมทริกซ์



รูปที่ 2.21 การกระจายตัวที่ไม่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์



รูปที่ 2.22 การกระจายตัวที่ดีของฟิลเลอร์ในเมทริกซ์

2.6 กระบวนการผสม

การผสมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การผสมด้วยการละลาย การผสมด้วยการหลอมเหลว และการผสมแบบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามการผสมด้วยการหลอมเหลวพอลิเมอร์นั้นเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวทำละลายซึ่งบางชนิดมีราคาแพง และไม่ต้องยุ่งยากกับการระเหย และควบคุมตัวทำละลาย

การผสมให้เข้ากันได้ดีไม่เพียงแต่จะทำให้ฟิลเลอร์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระดับมหภาค (macroscopic) เท่านั้น แต่ยังต้องทำให้ของผสมมีขนาดลดลง และเข้ากันได้ดีในระดับไมโครสเกลด้วย ดังนั้นการผสมด้วยการหลอมเหลวจึงต้องให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการอ่อนตัวลง และสามารถเคลื่อนตัวได้ตามอุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ควบคุมจนเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ตามต้องการ

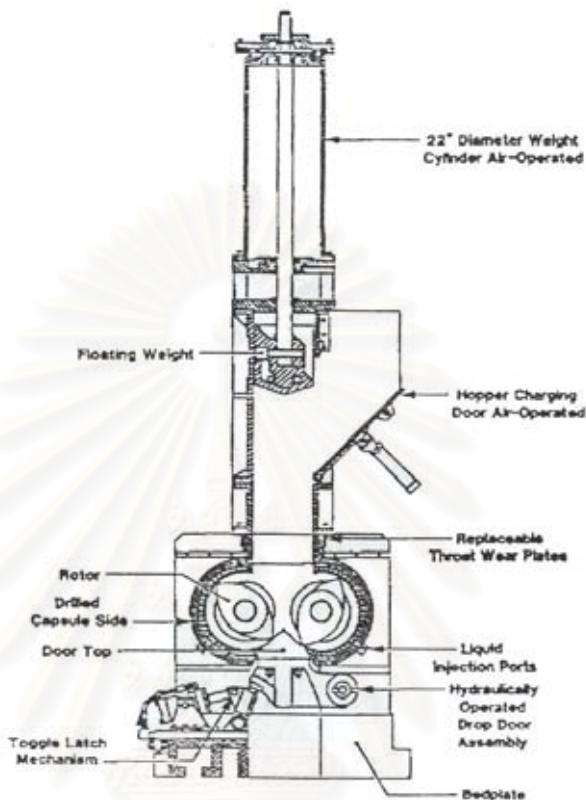
โดยทั่วไปสามารถแบ่งการผสมออกเป็น 2 ชนิด คือ การผสมภายในแบบทีละชุด (internal batch mixing) เช่น เครื่องผสมแบบแบนบิวรี (banbury mixer) และการผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixing) เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว และสกรูคู่

2.6.1 การผสมภายในแบบทีละชุด

การผสมแบบทีละชุดทำโดยการผสมส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้ใบกวน 2 ใบหมุนทวนกัน พร้อมทั้งให้ความร้อนเพื่อการหลอมเหลวส่วนผสม จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปบดให้มีขนาดเล็ก และนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ

เครื่องผสมแบบแบนบิวรี (Banbury mixer) ดังรูปที่ 2.23 เป็นต้นแบบการผสมภายในแบบทีละชุด โดยมีความสามารถในการผสมสูง ทำให้เกิดแรงเฉือนที่ซับซ้อน (complex shearing) และมีการไหลแบบยืดดึง (elongational flow) จึงเหมาะสมกับการกระจายอนุภาคของแข็งที่จับตัวเป็นก้อนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้เป็นอย่างดี เช่น การผสมคาร์บอนแบล็ค (carbon black) ในยาง การ

กระจายอนุภาคที่จับตัวกันเป็นก้อนนี้ ขึ้นกับเวลาในการผสม ความเร็วของใบกวน คุณหมุมิ และรูปทรงของใบกวนในการผสม



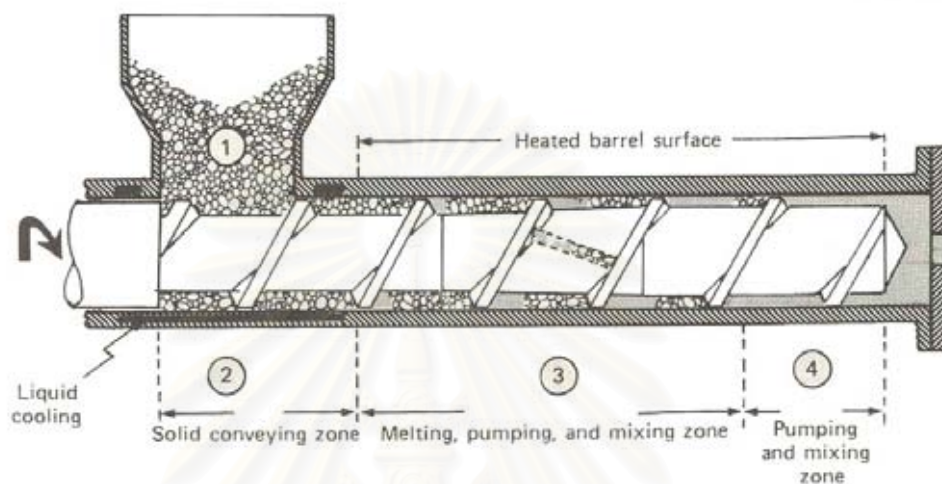
รูปที่ 2.23 เครื่องผสมแบบแบนบิวรี

2.6.2 การผสมแบบต่อเนื่อง

การผสมแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยการผสมเชิงกลอย่างหยาบภายนอก เครื่องผสมนี้ก่อนแล้วตามด้วยการป้อนส่วนผสมเข้าไปในเครื่องผสมจากนั้นทำให้เย็นตัวลง แล้วตัดเป็นเม็ดแล้วนำไปขึ้นรูปต่อไป

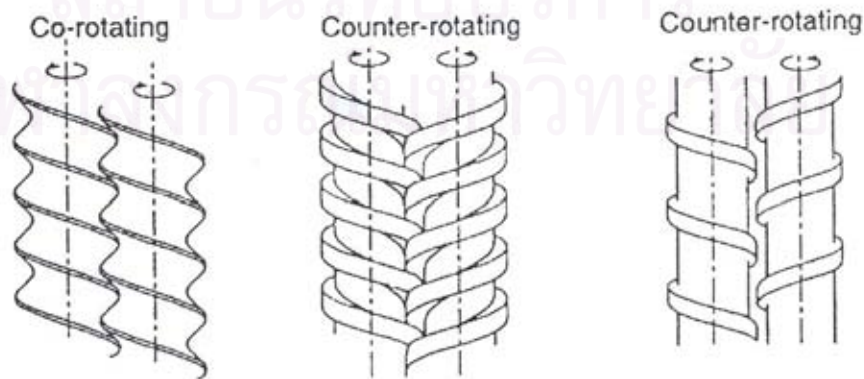
การผสมแบบต่อเนื่องด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.24 พอลิเมอร์อาจจะอยู่ในรูปเม็ดหรือผงก็ได้ ซึ่งจะทำให้การป้อนส่วนผสมนี้ผ่านกรวยเติม (hopper) ลงสู่สกรู (screw) จากนั้นพอลิเมอร์จะเคลื่อนตัวภายในกระบอกรัดรีด (barrel) ที่มีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจากแถบให้ความร้อน (band heaters) รวมทั้งความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของพอลิเมอร์ด้วยกัน และความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของพอลิเมอร์กับเครื่องอัดรีด ความลึกของร่องสกรูจะลดลงตามความยาวของสกรู เพื่อเป็นการเพิ่มความดันให้แก่พอลิเมอร์หลอมเหลว จากนั้นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะไหลออกจากหัวตาย (die) ที่อาจจะมึรูปแบบต่างๆ ตามต้องการ เช่น ฟิล์ม หรือ แผ่น ท่อกลม ท่อตัน เป็นต้น

การผสมด้วยเครื่องอัดรีดให้มีประสิทธิภาพ และเข้ารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) ได้นั้นนอกจากจะขึ้นกับสมบัติของวัตถุดิบเองแล้ว ยังประกอบด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ในช่วงต่างๆ กันของกระบอกอัดรีด ความเร็วรอบสกรู การออกแบบ สกรู และหัวตาย เป็นต้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งเครื่องอัดรีดตามจำนวนของสกรูได้เป็นเครื่องอัดรีดเดี่ยวและสกรูคู่ [15]



รูปที่ 2.24 เครื่องอัดรีด

ปัจจุบันเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวมีการนำไปใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย เนื่องจากมีการผลิตที่ง่าย ราคาไม่แพง และง่ายต่อการดูแลรักษา การออกแบบสกรูก็สามารถทำได้ง่าย และซึ่กับพอลิเมอร์ได้หลายชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ซึ่งมีสกรู 2 ตัวหมุนคู่กันในกระบอกอัดรีด เมื่อพิจารณาจากส่วนพื้นของสกรูที่มีลักษณะขบกันอยู่นั้น สามารถแบ่งเครื่องอัดรีดสกรูคู่ได้เป็น 2 ชนิด คือ เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียว (co-rotating twin screw extruder) และ เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน (counter-rotating twin screw extruder) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ประเภทสกรูของเครื่องอัดรีดสกรูคู่

โดยเฉพาะแบบที่มีทิศทางหมุนของสกรูสวนทางกัน พบว่าเครื่องอัดรีดสกรูคู่มีความยากในการผลิตมากกว่า มีราคา และค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงกว่าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว แต่เนื่องจากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่า เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว จะมีการไหลแบบลากพา (drag flow) ของเม็ดพลาสติกบริเวณสกรูกับผนังของกระบอกลัดรีด ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสีซึ่งยากต่อการควบคุมอุณหภูมิของการหลอมเหลว ในขณะที่เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีการไหลในลักษณะคล้ายปั๊ม ความร้อนส่วนใหญ่จะได้รับจากแถบทำความร้อนที่ผนังของกระบอกลัดรีด ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนสู่พอลิเมอร์ที่เคลื่อนที่ในกระบอกลัดรีดนี้จึงเป็นไปได้เป็นอย่างดีและลดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความร้อนที่เกิดจากการเสียดสี จึงนิยมนำเครื่องอัดรีดสกรูคู่ไปใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ที่ไวต่อความร้อน เช่น พีวีซี โดยได้มีการเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียวกัน และอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียวกัน และอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน

ชนิดของเครื่องอัดรีด	สกรูเดี่ยว	สกรูคู่หมุนทางเดียวกัน		สกรูคู่หมุนสวนทาง
		ความเร็วต่ำ	ความเร็วสูง	
หลักการ	แรงเสียดสีระหว่างกระบอกลัดรีดกับพอลิเมอร์และพอลิเมอร์และสกรู	ขึ้นกับแรงเสียดสีเหมือนในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว	ขึ้นกับแรงเสียดสีเหมือนในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว	การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เกิดโดยหลักการของปั๊ม
การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
การผสม	ต่ำ	ปานกลาง – สูง	ปานกลาง – สูง	สูง
แรงเฉือน	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
การทำ ความสะอาดด้วยพอลิเมอร์เองขณะผสม	น้อย	ปานกลาง – สูง	สูง	ต่ำ

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) การเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียวกัน และอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน

ชนิดของเครื่องอัดรีด	สกรูเดี่ยว	สกรูคู่หมุนทางเดียวกัน		สกรูคู่หมุนสวนทาง
		ความเร็วต่ำ	ความเร็วสูง	
ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน	ต่ำ	ปานกลาง – สูง	ปานกลาง – สูง	สูง
ความร้อนที่เกิดขึ้น	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ

2.6.3 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีดเข้าแบบ

การฉีดพลาสติกนับเป็นกระบวนการหลักในการผลิตชิ้นงานพลาสติกสำเร็จรูป เป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกที่สำคัญที่สุด ประมาณ 60% ของผลิตภัณฑ์พลาสติกทั้งหมดได้จากการฉีดซึ่งโดยทั่วไปการฉีดพลาสติกนี้จะใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 5 กรัมถึง 90 กิโลกรัม [16]

การฉีดพลาสติก เริ่มจากการเตรียมความพร้อมของเครื่องฉีดและอุปกรณ์ต่างๆ คือ

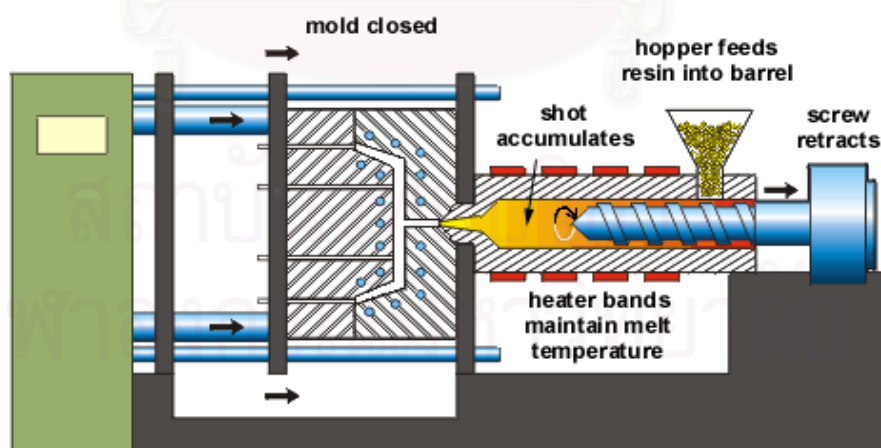
- 1) แม่แบบ (mould) รวมทั้งชุดปิดและเปิดแม่แบบ (clamping unit)
- 2) ชุดหลอมพลาสติกและชุดฉีด (injection unit)

กระบวนการฉีดเริ่มจากชุดปิดและเปิดแม่แบบเลื่อนให้แม่แบบทั้งสองส่วนประกบกันเพื่อให้แม่แบบปิดกันได้สนิท โดยมีแรงปิด (clamping force) มากพอที่จะปิดล็อกให้แน่น และสามารถต้านทานแรงดันของพลาสติกที่ถูกฉีดเข้ามาได้ จากนั้นชุดหลอม และชุดฉีดพลาสติกจะถูกเลื่อนเข้าหาแม่แบบ โดยแรงขับจากไฮดรอลิกหรือแรงส่งจากข้อต่อ (ขึ้นกับระบบของเครื่องจักร) เมื่อส่วนปลายของชุดฉีดสัมผัสพอดีกับแม่แบบแล้ว หัวฉีดจะเปิดออก และฉีดอัดพลาสติกหลอมเหลวที่สะสมอยู่ด้านหน้าของสกรูเข้าสู่แม่แบบ โดยที่การเลื่อนตัวไปทางด้านหน้าของสกรูจะทำหน้าที่เป็นลูกสูบในการฉีด และทันทีที่สกรูเคลื่อนตัวไปข้างหน้า ความดันของพลาสติกหลอมเหลวในช่องว่าง (ที่จะสะสมไว้สำหรับฉีด) นั้นจะดันให้วงแหวนกันการไหลย้อนกลับ (back-flow valve) เคลื่อนตัวไปปิดกั้นพลาสติกหลอมไว้ไม่ให้ไหลสวนทาง และเมื่อพลาสติกหลอมสัมผัส

กับผนังแม่แบบ พลาสติกหลอมก็จะค่อยๆ กลายเป็นของแข็ง เนื่องจากอิทธิพลของน้ำหล่อเย็น ดังนั้นต้องทำการฉีดอย่างรวดเร็ว เพื่อให้พลาสติกเข้าเต็มแม่แบบขณะที่ยังเป็นของเหลวอยู่

หลังจากที่พลาสติกหลอมเข้าไปอยู่ในช่องว่างของแม่แบบ พลาสติกก็จะเริ่มแข็งตัวจากด้านนอก (ด้านที่สัมผัสกับผนังแม่แบบ) ก่อน โดยที่ด้านในซึ่งยังไม่แข็งตัวก็ยังคงจะเหลวอยู่ และในขณะที่พลาสติกเริ่มแข็งตัวนั้นมันก็จะเกิดการหดตัว ทำให้ชิ้นงานเกิดการยุบตัว (sink mark) สำหรับพลาสติกเนื้ออ่อน และสำหรับพลาสติกเนื้อแข็งนั้นจะเกิดโพรง (void) ขึ้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการรักษาความดันในแม่แบบให้คงที่ เพื่อผลักดันให้พลาสติกที่หลอมเหลวชุดใหม่เข้าไป ชดเชยการหดตัว แต่จะได้ผลในกรณีที่พลาสติกหลอมในกรวยนำฉีด (sprue cone) ยังไม่แข็งตัว และยังไหลได้ ดังนั้นการออกแบบแม่แบบควรวีให้กรวยนำฉีดอยู่ในตำแหน่งที่หนาที่สุดของแม่แบบ เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกที่อยู่ในท่อแข็งตัวเร็วจนเกินไป

ช่วงเวลาที่มีการแช่ความดันของพลาสติกหลอม เพื่อ ชดเชยการหดตัว โดยการให้พลาสติกหลอมเหลวชุดใหม่เข้าไปเสริม เรียกว่า การอัดฉีด (holding pressure) ซึ่งระยะนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อ พลาสติกในกรวยนำฉีดแข็งตัว กล่าวคือ ไม่สามารถอัดพลาสติกหลอมเข้าไปได้อีก แต่ระดับความดันของการฉีดแช่อัดนั้น ไม่ควรต่ำจนเกินไป หรือ ใช้เวลาในการฉีดแช่อัดน้อยเกินไป เพราะจะทำให้ได้ชิ้นงานที่บวมพร่อง มีการหดตัวของชิ้นงาน และไม่ควรรักษาความดันฉีดแช่อัดสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้แม่แบบได้รับแรงเค้นมากอาจทำให้เกิดความเสียหายได้



รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก [17]

2.7 สมบัติทางกายภาพของพลาสติก

2.7.1 การทดสอบดัชนีการไหล

ดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) คือ ค่าที่ชี้ถึงความยากง่ายในการไหลของวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก โดยเป็นฟังก์ชันส่วนกลับกับความหนืดหลอมเหลว (melt viscosity) ของพลาสติก ถ้า MFI มีค่าสูง แสดงว่ามีความหนืดต่ำ แต่ถ้า MFI มีค่าต่ำ แสดงว่า มีความหนืดสูง สำหรับพลาสติกชนิดเดียวกัน พลาสติกที่มี MFI สูงกว่า อาจบ่งชี้ว่ามีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า พลาสติกที่มี MFI ต่ำ [18, 19, 20]

การหาค่าดัชนีการไหลเป็นวิธีการทดสอบวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อทดสอบดัชนีการไหลของ thermoplastic Material โดยค่า MFI ที่ได้จากการทดสอบนั้น ไม่ใช่ค่าที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของตัวพอลิเมอร์ แต่ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างของพอลิเมอร์ วิธีการวัด และสภาวะที่ใช้การทดสอบ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดสอบนั้นมีหลายปัจจัย เช่น ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวเม็ดพลาสติกมากหรือน้อย ความชื้นในวัสดุ การอัดแน่นของเม็ดพลาสติกในกระบอก เป็นต้น โดยค่า MFI นี้ยังขึ้นกับวิธีการผลิตเม็ดพลาสติกอีกด้วย ถ้าเม็ดพลาสติกชนิดเดียวกัน แต่ผลิตจากโรงงานคนละที่ ค่า MFI ก็จะไม่เท่ากัน และขึ้นอยู่กับกระบวนการเก็บรักษาเม็ดพลาสติกด้วย

หลักในการหาค่าดัชนีการไหล คือ การวัดอัตราไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ผ่านช่องขนาดเล็กภายในเวลา 10 นาที โดยคำนวณได้จากน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ไหลออกมา (กรัม) ภายในเวลาที่กำหนด แต่ข้อจำกัดของการทำการทดสอบนี้ คือ เม็ดพลาสติกที่จะนำมาทดสอบควรมีความหนืดในการไหลต่ำ เพื่อที่จะง่ายต่อการทดสอบ โดยการทดสอบ Melt Flow Index นี้อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238 - 03

การวัดอัตราการถูกอัดรีด จะวัดโดยการตัดพอลิเมอร์ที่ไหลผ่านหัวตาย ตามเวลาที่ต้องการ โดยทั่วไปจะตัดพลาสติกหลังจากใส่ตัวอย่างลงไปประมาณ 30 วินาที และต้องทำขณะ piston อยู่เหนือหัวตาย ประมาณ 20 – 25 มิลลิเมตร นำส่วนที่ตัดได้ไม่น้อยกว่า 3 ชิ้น มาชั่งน้ำหนัก นำมาคำนวณน้ำหนักเฉลี่ย จากนั้นทำการตรวจสอบอีกครั้ง โดยชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างในช่วง flow rate ที่เหมาะสม

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ method A:

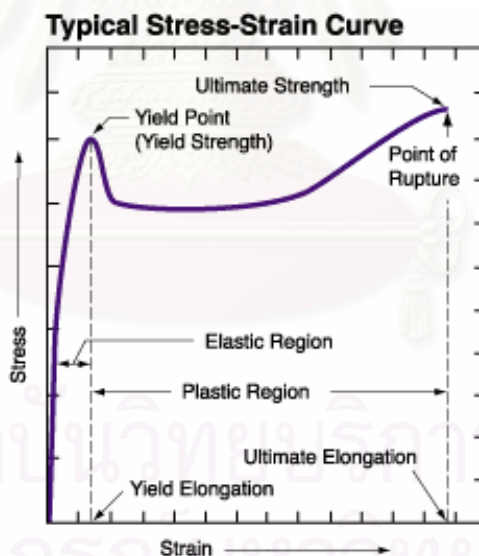
$$\frac{G}{10} = (W \times 600)T_A$$

เมื่อ	$G/10$	คือ flow rate ในหน่วย กรัมต่อ10 นาที
	W	คือ น้ำหนักของพลาสติกที่อัดรีดออกมา ในหน่วยกรัม
	T_A	คือ เวลาที่ใช้ในการอัดรีด (extrusion time) ในหน่วยวินาที

2.8 สมบัติเชิงกลของพลาสติก

2.8.1 สมบัติด้านแรงดึง

ความทนแรงดึงของวัสดุแสดงถึงความต้านทานต่อการยืด (elongation) หรือการแตกหัก (breaking) ของวัสดุนั้นเมื่อได้รับแรงดึง การวัดทนความทนแรงดึงของพลาสติกเป็นการวัดที่มีประโยชน์ที่สุดแบบหนึ่ง ตามมาตรฐาน ASTM D638-03 นั้น ใช้ชิ้นทดสอบแบบที่มีรูปดัมเบลล์ ปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบถูกยึดเข้ากับหัวจับของเครื่องทดสอบ และใช้แรงดึงที่ทราบค่า ดึงหัวจับทั้งสองให้เคลื่อนออกจากกันด้วยอัตราเร็วคงที่ พลาสติกที่ทดสอบจะยืดออกในแนวเดียว (uniaxial) และขาดจากกันบริเวณส่วนกลางที่แคบของชิ้นงานภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ทำให้ได้กราฟระหว่างแรงและการยืด (load-elongation curve) ซึ่งนิยมแสดงออกในรูปความเครียดและความเค้น (stress-strain) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 [21]



รูปที่ 2.27 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ทัวไปในการทดสอบความทนแรงดึงของพลาสติก

[22]

เมื่อออกแรงดึง (F) ให้กับชิ้นทดสอบ สามารถคำนวณหาความเค้นดึง (tensile stress) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\delta = \frac{F}{A}$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นดึง (tensile stress) มีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ เช่น นิวตันต่อตารางเมตร หรือ ปาสคาล

F คือ แรงดึง ในหน่วยของแรง เช่น นิวตัน หรือ กิโลกรัม

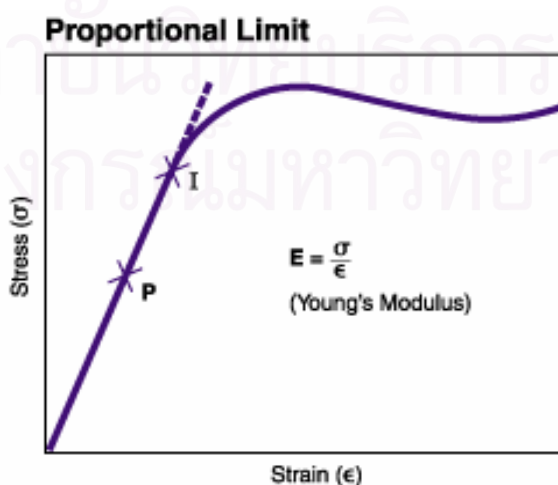
A คือ พื้นที่หน้าตัด เช่น ตารางเมตร หรือ ตารางมิลลิเมตร

ค่าความเค้นดึงทำให้เกิดการยืดของชิ้นงานจาก L_0 เป็น L นั่นคือชิ้นงานมีความเครียดดึง (tensile strain, ϵ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

เมื่อออกแรงดึงต่อวัสดุ จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติก คือ เมื่อเอาแรงออกวัสดุสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม (reversible change) จนเมื่อดึงผ่านขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ไปแล้วจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อีกเมื่อเอาแรงออก และหลังจากนี้จะเรียกว่า strain harden คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งขาดออกจากกัน จะได้ค่าความเค้นดึงสุดท้าย ซึ่งเรียกว่า ultimate tensile stress

มอดุลัส (modulus) หรือมอดุลัสยืดหยุ่น (elastic modulus, E) หรือมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือมอดุลัสของยังส์ (Young's modulus) เป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความเค้น ค่ามอดุลัสเป็นสิ่งที่วัดความแข็งแกร่งหรือความแข็งดึง (stiffness) ของพลาสติกซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) ขณะรับแรง



รูปที่ 2.28 แผนภาพความเค้น-ความเครียด และเส้นสัมผัสเริ่มแรกที่ใช้หาค่ามอดุลัส [22]

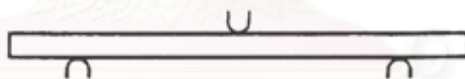
การหาค่ามอดูลัสจากกราฟความเค้น-ความเครียดดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 โดยหาค่ามอดูลัสแบบยืดหยุ่น (E) ได้จากการวัดความชัน (slope) ของเส้นสัมผัสเริ่มแรกซึ่งเป็นส่วนที่ชันที่สุดของเส้นโค้ง

Yield stress เป็นความเค้นที่จุดคราก (yield point) ซึ่งจุดครากเป็นจุดแรกบนเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่เกิดการเพิ่มความเครียดโดยที่ไม่มีการเพิ่มความเค้น เมื่อวัสดุถูกดึงถึงจุดครากแล้ว จะไม่สามารถคืนตัวได้อีกเมื่อเอาแรงกระทำออกไป

พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงความเหนียว (toughness) ของพลาสติก เป็นพลังงานที่ทั้งหมดที่ทำให้พลาสติกเกิดการแตกหัก พลาสติกที่มีพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดมากเป็นวัสดุที่มีความเหนียว ส่วนวัสดุที่เปราะจะมีพื้นที่ใต้เส้นโค้งน้อย

2.8.2 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง

การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง ซึ่งทดสอบจะได้รับความเค้น 2 ประเภท คือความเค้นดึง (tensile stress) และความเค้นกด (compressive stress) การทดสอบความทนแรงดัดโค้งทำได้หลายวิธีในที่นี้จะกล่าวถึงแต่วิธีการหาความทนแรงดัดโค้งแบบสามจุด (three-point bending) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบก็คือเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล โดยให้แรงกดตรงกลางบนที่ค่าของแรงกดดังแสดงในรูปที่ 2.29 [23]



รูปที่ 2.29 แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบเครื่องทดสอบแรงดัดโค้งแบบสามจุด

จากค่าที่อ่านได้ เราสามารถคำนวณค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) ได้ โดยใช้สมการมาตรฐานที่ใช้สำหรับคาน (beam) ที่เกิดการเบนแบบยืดหยุ่นเล็กน้อยดังนี้

$$E = \frac{L^3 P}{4BD^3}$$

เมื่อ P คือ ค่าแรงสูงสุดที่อ่านได้ (นิวตัน)

L คือ ระยะทดสอบ (มิลลิเมตร)

B คือ ความกว้างของชิ้นงาน โดยเฉลี่ย ณ จุดหักของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

D คือ ความหนาของชิ้นงาน โดยเฉลี่ย ณ จุดหักของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

ส่วนความเค้นมากที่สุดเกิดที่ตรงกลางขึ้นทดสอบ (midspan) ตรงส่วนผิวนอก คำนวณได้จากสมการ

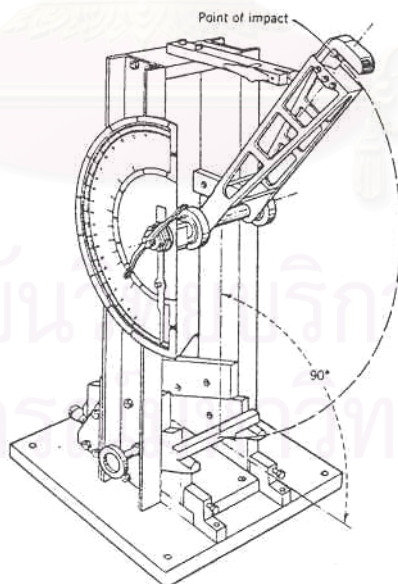
$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2BD^2}$$

สำหรับเทอร์โมพลาสติกส่วนมาก จะไม่เกิดการแตกหักตามการทดสอบนี้ แม้ว่าจะเกิดการโค้งงออย่างมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณความทนแรงโค้งงอได้ตามปกติ มีการคำนวณโดยใช้ค่าความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียด 5% แทน นั่นคือค่าแรงต่อพื้นที่ทำให้เกิดการยืดพื้นผิวภายนอกออก 5% การวัดความทนแรงดัดโค้งของพลาสติกอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D790-03

วิธีทดสอบทำโดยวางขึ้นทดสอบบนที่ตั้ง 2 อัน ให้แรงกดที่ศูนย์กลางขึ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว เฉพาะค่าหนึ่ง ความทนแรงโค้งงอได้จากค่าของแรงกดที่ทำให้ขึ้นทดสอบแตกหักต่อพื้นที่โดยระยะของ support span นั้น คิดจาก 16 เท่าของความหนาของชิ้นงาน

2.8.3 ความทนแรงกระแทก

ในการทดสอบความทนแรงกระแทกของพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่การทดสอบแรงกระแทกโดยใช้ค้อนแกว่ง (pendulum impact testing) โดยใช้เครื่องมือดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.30[24]



รูปที่ 2.30 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

วิธีการทดสอบแบบนี้ยังสามารถแบ่งตามความเหมาะสมของชิ้นงานและลักษณะของเครื่องมือที่ใช้เป็น

1) Method A (Izod type) วิธีนี้ชิ้นทดสอบจะถูกตรึงกับเครื่องในแนวตั้งฉากกับแท่นวางชิ้นงาน (cantilever beam) และถูกทำให้แตกโดยหัวกระแทก (pendulum) โดยหันรอยบากออกมาทางด้านเดียวกับทิศทางของ pendulum

2) Method B (Charpy type) วางชิ้นทดสอบในแนวขนานกับแท่นวางชิ้นงาน แล้วใช้หัวกระแทก เหยียงกระทบชิ้นงานให้แตกเพียงครั้งเดียวโดยรอยบากออกมาทางด้านเดียวกับทิศทางของหัวกระแทก

3) Method C คล้ายกับ Method A แต่พิจารณาค่า toss correction ด้วย ค่าที่ได้จากวิธีเรียกว่า “estimated net Izod impact strength “ วิธีนี้ใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีค่าความทนแรงกระแทกจาก Izod test น้อยกว่า 27 J/m ถ้ามีค่ามากกว่า 27 J/m ค่าที่ได้จะไม่ต่างกับ Method A มากนัก

4) Method D เหมือนกับ Method A แต่เป็นการวัด sensitivity ของรอยบากของชิ้นงาน นั่นคือวัดผลหรือดูว่ารัศมีของรอยบากที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อค่าความทนแรงกระแทกอย่างไร

5) Method C เหมือนกับ Method A แต่การวางชิ้นทดสอบนั้นจะเห็นรอยบากตรงข้ามกับ Method A

ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบ สามารถแบ่งออกเป็น

1) C-complete break เป็นลักษณะของชิ้นทดสอบแตกออกเป็น 2 ส่วน หรือมากกว่าอย่างชัดเจน

2) H-hinge break ชิ้นงานแตกอย่างไม่สมบูรณ์ คือ ส่วนหนึ่งอยู่ในลักษณะตั้ง และอีกส่วนหนึ่งอยู่ในแนวที่ไม่ใช่แนวนอน นั่นคือ มุมของชิ้นงานน้อยกว่า 90 องศา

3) P-partial break ชิ้นงานแตกอย่างไม่สมบูรณ์ แตกอย่างน้อย 90% ของระยะระหว่างยอดของรอยบากกับด้านตรงข้ามของชิ้นงาน

4) NB-non break เป็นการแตกที่ไม่สมบูรณ์ที่สุด คือ รอยแตกน้อยกว่า 90% ของระยะระหว่างยอดของรอยบากกับอีกด้านหนึ่งของชิ้นงาน

ในปัจจุบันนิยมใช้การทดสอบ Method A และ Method B โดยจะกล่าวละเอียดดังนี้

1) Izod Test วิธีนี้ใช้หาค่าความทนแรงกระแทกทั้งของโลหะ และของพอลิเมอร์ คือ ใช้หัวกระแทกที่รู้มวลแน่นอน เหยียงกระทบกับชิ้นงานที่วางยึดอยู่กับแท่นวางชิ้นงานในแนวตั้ง โดยให้

รอยบากหันไปในทิศทางที่หัวกระแทกตกกระทบ และอยู่เหนือที่ยึด โดยค่าความทนแรงกระแทกที่อ่านได้จากเครื่องจะมีหน่วยเป็นจูลส์ วิธีนี้รอยบากก็มีความสำคัญ คือ ถ้ารอยบากยิ่งคมชัดเท่าไร ค่าความทนแรงกระแทกก็จะยิ่งลดลงเนื่องจากรอยบากจะทำให้ชิ้นงานนี้มีความเค้นมากขึ้น วิธีนี้จะมีข้อเสียคือ พลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการเหวี่ยงหัวกระแทกที่สูญเสียไปนั้นไม่ได้ทำให้ชิ้นงานแตกเพียงอย่าง แต่เป็นผลรวมของพลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดรอยแตกครั้งแรก ซึ่งต้องใช้ในการทำให้ส่วนที่เหลือขาดด้วย และใช้ในการโยนชิ้นงานที่แตกแล้ว นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดัน การสูญเสียพลังงานบางส่วนเนื่องจากแรงเสียดทาน และการสั่นของเครื่องมือ

2) Charpy Test วิธีนี้มีหลักการทั่วไปเหมือนกับ Izod แต่ต่างกันตรงลักษณะการวางชิ้นทดสอบ วิธีนี้ชิ้นทดสอบจะถูกวางในลักษณะที่ขนานกับแท่นวางชิ้นงาน ซึ่งเมื่อปล่อยหัวกระแทกจะกระทบชิ้นงานตรงกลางพอดี และตรงด้านหลังของรอยบาก ค่าความทนแรงกระแทกจะอ่านได้จากเครื่องทันทีและมีหน่วยเป็นจูลส์

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6110-03 สามารถทำได้ดังนี้

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปตามมาตรฐาน วัดขนาดของความกว้าง ความหนา และขนาดของรอยบาก โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ บันทึกผล
- 2) นำชิ้นงานไปวางกับเครื่องทดสอบ โดยให้ด้านของชิ้นทดสอบที่มีรอยบากอยู่ ตรงข้ามกับด้านที่กระทบกับค้อนน้ำหนัก
- 3) เลื่อนเข็มวัดน้ำหนักมาไว้ที่ตำแหน่ง 0 แล้วปล่อยค้อนน้ำหนักลงมากกระทบกับชิ้นทดสอบบันทึกน้ำหนักที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตก
- 4) นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าความทนแรงกระแทกตามสูตรต่อไปนี้

$$akc = \frac{E}{b(t-d)} \times 1000$$

เมื่อ akc คือ ค่าความทนแรงกระแทก (Charpy impact strength, kJ/m^2)

E คือ ค่าพลังงานดูดซึมที่อ่านได้ (J)

b คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบตรงรอยบาก (มิลลิเมตร)

t คือ ความหนาของชิ้นทดสอบบริเวณใกล้รอยบาก (มิลลิเมตร)

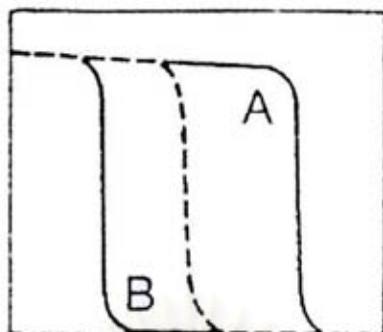
d คือ ความลึกของรอยบาก (มิลลิเมตร)

2.9 สมบัติทางความร้อน

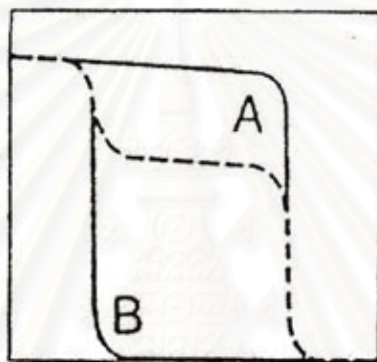
สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะตัวของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น พอลิเมอร์กิ่งผลึก พอลิเมอร์อสัณฐาน และภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยสมบัติทางความร้อนที่รู้จักกันดีของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) เป็นต้น

โดยทั่วไปลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่พอลิเมอร์อสัณฐานเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วกลายเป็นสถานะที่อ่อนนุ่มคล้ายยาง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันนั้นถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมชนิดนั้นๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.31 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน พบว่า ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเดกุล พอลิเมอร์ผสมจะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แคบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.31 (ก) แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถเข้ากันได้จะปรากฏการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่ง และมีการเปลี่ยนแปลงที่แคบซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.31 (ข) แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเข้ากันได้บางส่วน พอลิเมอร์ผสมจะแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งแสดงถึงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่กว้าง ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการเข้ากันได้เพียงบางส่วนของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.31 (ค)

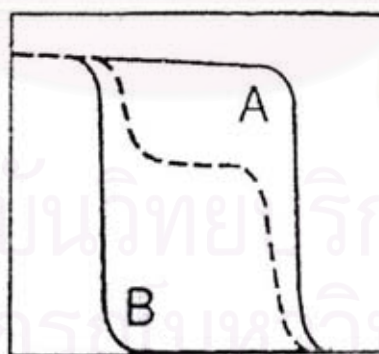
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างการให้ความร้อน โดยการเปลี่ยนแปลงความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ เช่น การหลอมเหลว การเกิดผลึก อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน การสลายตัว ปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ เช่น การกลายเป็นไอ แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสมการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และจุดหลอมเหลว ถือเป็น การตรวจสอบที่สำคัญ ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้กันในการตรวจสอบ คือ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมนั้นนิยมวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมทรี (Thermo Gravimetry Analysis, TGA)



(ก)



(ข)



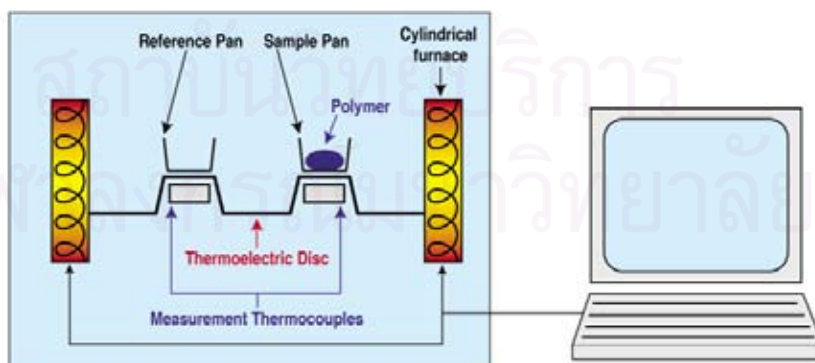
(ค)

รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสม A และ B ที่อัตราส่วน 50: 50 (เส้นประ) โดยเส้นทึบแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละตัว

2.9.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี

การตรวจสอบคุณสมบัติทรานซิชันต่างๆ ของพอลิเมอร์นั้นสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการดูด หรือคายความร้อนซึ่งสามารถวัดจากความแตกต่างของพลังงาน (energy) หรือการไหลของความร้อน (heat flow) ระหว่างสารทดสอบ และสารอ้างอิง เป็นฟังก์ชันกับเวลา และอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ให้แก่สารทั้งสองนั้นถูกกำหนดไว้ ณ บรรยากาศการทดสอบ คือ DSC เป็นเทคนิคที่สามารถบอกขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของความร้อนในระบบที่สัมพันธ์กับปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และ/หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อน หรือทำให้เย็นตัวลง โดย DSC สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายอย่าง ได้แก่ ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติกลาสทรานซิชัน หรือ อุณหภูมิหลอมเหลว ระดับการเชื่อมขวางในเทอร์โมเซต พลาสติก เสถียรภาพทางความร้อน ความบริสุทธิ์ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น

โดยการตรวจสอบคุณสมบัติทรานซิชันต่างๆของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรีนั้น เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง และเซลล์อ้างอิงจะถูกวางไว้บนตัวทำความร้อน และในขณะที่ให้ความร้อนแก่เซลล์ด้วยอัตราเพิ่ม หรือลดอุณหภูมิที่กำหนด ตัวทำความร้อนจะพยายามรักษาอุณหภูมิของเซลล์ให้เป็นไปตามอัตราที่กำหนด หลังจากนั้นเครื่อง DSC จะนำข้อมูลทางความร้อนของสารตัวอย่างที่ได้มาคำนวณ ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทรานซิชันของสารตัวอย่างได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.32 [25]



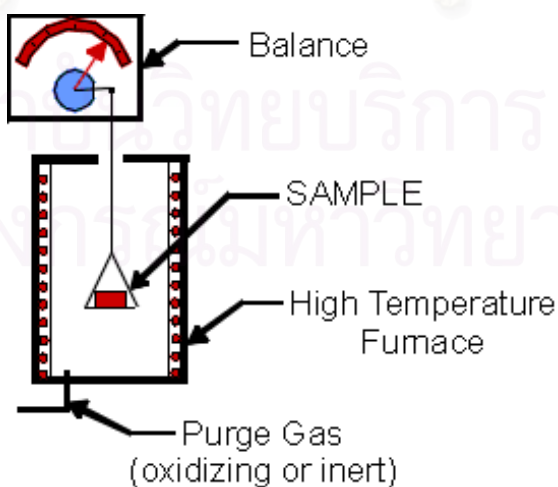
รูปที่ 2.32 การวิเคราะห์โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี

2.9.2 เทอร์โมกราวิเมทรี

การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทรี (Thermo Gravimetry Analysis, TGA) เป็นเทคนิคที่ทำให้ทราบข้อมูลของพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ ได้แก่ เสถียรภาพทางความร้อน รูปแบบการสลายตัวของพอลิเมอร์ และปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทรี เป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของสารทดสอบดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.33 ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในแบบอัตราคงที่หรือ กับเวลาในสภาวะอุณหภูมิคงที่ เช่น ในการเกิดการสลายตัว การเกิดออกซิเดชัน การระเหยกลายเป็นไอ แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาการเกิดความร้อนที่เกิดขึ้นในบางกรณี อาจจะไม่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลเสมอไป เช่น การเกิดผลึก การหลอมเหลว หรือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยการใช้งานส่วนใหญ่ใช้ในการวิเคราะห์การสลายตัวและเสถียรภาพทางความร้อนภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

วิธีนี้มวลของสารทดสอบจะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิในอัตราที่คงที่ น้ำหนักของสารทดสอบ หรือพอลิเมอร์ที่ทำการวิเคราะห์จะลดลง เนื่องจากการระเหยของพอลิเมอร์ที่มีการสลายตัวเกิดขึ้น ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบนี้จะต้องมีความแม่นยำสูงมาก ไม่เพียงแต่จะต้องวัดน้ำหนักจำนวนน้อยที่ลดลง แต่ยังต้องหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความหนาแน่นของอากาศในเครื่องวิเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้สารที่ระเหยออกมาจะต้องไม่ไปจับกับส่วนวัดน้ำหนักของเครื่องวิเคราะห์ จึงจำเป็นต้องควบคุมบรรยากาศ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อน้ำหนักที่วัดได้อีกด้วย

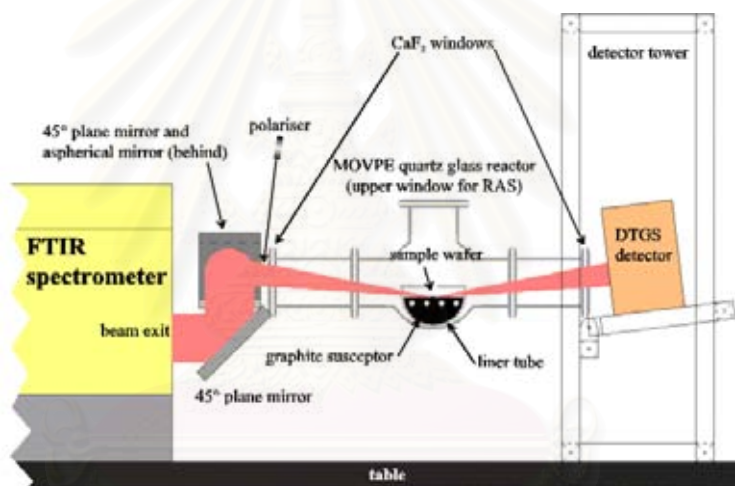


รูปที่ 2.33 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทรี

2.10 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

การตรวจสอบปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในขณะเกิดปฏิกิริยา หรือขั้นตอนการผสมนั้นทำได้ยาก และต้องใช้เครื่องมือเฉพาะในการตรวจสอบ โดยสามารถใช้การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้น เพื่อทราบถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในขณะผสมพอลิเมอร์ผสมแทน

อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเป็นสเปกโทรสโคปีแบบสั่น (vibrational spectroscopy) ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถตรวจสอบระดับพลังงานในโมเลกุลที่เกิดขึ้นจากการสั่นของพันธะได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิห้อง โมเลกุลส่วนมากจะอยู่ในสถานะการสั่นที่สถานะปกติ (ground vibrational state) และเมื่อมันดูดซับพลังงานทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้นไปสู่สถานะการสั่นที่สูงขึ้น ซึ่งความถี่ของการสั่นนี้แสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ด้วยเหตุนี้อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีจึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

เมื่อโมเลกุลเกิดการสั่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์ของพันธะ (dipole moment) ซึ่งสามารถจำลองปรากฏการณ์นี้ได้โดยใช้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) เมื่อรังสีอินฟราเรดถ่ายทอดพลังงานไปสู่โมเลกุลนั้นจะมีการตรวจสอบพลังงานที่สารตัวอย่างดูดซับเข้าไป ในทางปฏิบัติแล้วสเปกตรัมจะถูกตรวจโดยการสแกนตลอดช่วงคลื่นความถี่ และตรวจสอบความเข้มแสงที่ผ่านออกมาอย่างต่อเนื่อง โดยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 2.5-25 ไมครอน หรือ ความยาวคลื่น $4,000-400\text{ cm}^{-1}$ (โดยความถี่ในหน่วยของความยาวคลื่น(cm^{-1}) = $10,000/\text{ความยาวคลื่นในหน่วยของไมครอน}$)

การเตรียมตัวอย่างนั้นเริ่มจากการนำสารตัวอย่างมาบดอย่างละเอียด และผสมกับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) หรือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ให้มีความเข้มข้นประมาณ 1% จากนั้น

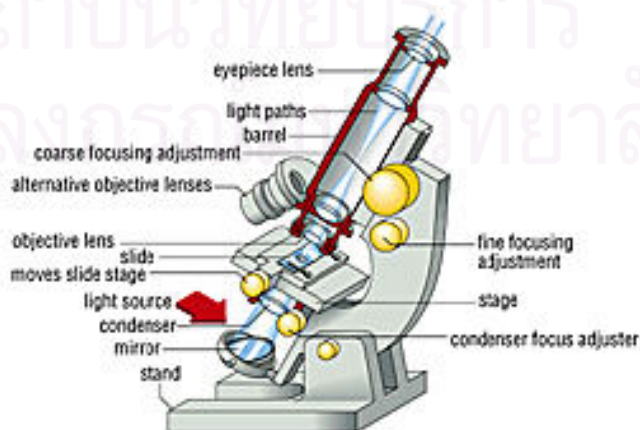
ทำการอัดเป็นแผ่น แต่พอลิเมอร์บางชนิดอาจบดให้ได้อนุภาคที่มีความละเอียดได้ยาก เพราะความเหนียวของพอลิเมอร์ หรือการให้ความร้อน เพื่อให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลว และทำการให้เป็นแผ่นฟิล์มโดยออกแรงกด โดยความหนาของแผ่นฟิล์มควรอยู่ระหว่าง 0.001-0.05 นาโนเมตร

2.11 สัณฐานวิทยา

เพื่อความเข้าใจสมบัติของพอลิเมอร์ผสมนั้น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างหรือสัณฐานวิทยา และสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM) และ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2.11.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์

การใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นเทคนิคที่สำคัญในการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และเตรียมตัวอย่างได้ง่ายไม่ยุ่งยาก แต่ความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้ถูกจำกัดด้วยความยาวคลื่นแสงที่ตาสามารถมองเห็นได้ และประสิทธิภาพของเลนส์วัตถุซึ่งสามารถแยกความแตกต่างได้ต่ำสุดในระดับ 2 ไมโครเมตรเท่านั้น ดังนั้นประสิทธิภาพของกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้จึงเพียงพอที่ใช้ในการศึกษาการผสมที่ไม่มีความเข้ากันได้ แต่ไม่เพียงพอที่ใช้ในการศึกษาการผสมที่มีความสามารถในการเข้ากันได้ หรือเข้ากันได้บางส่วน และปัญหาหลักของกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้ คือ การเตรียมชิ้นตัวอย่าง โดยเฉพาะในกรณีพอลิเมอร์ผสมซึ่งเป็นวัสดุที่มีความอ่อนนิ่ม การตัด หรือบดบ่อยครั้งทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเกิดความเสียหาย ในบางกรณีจำเป็นต้องตัดชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ -40°C หรือน้อยกว่า เพื่อป้องกันพื้นผิวของชิ้นงานเกิดความเสียหาย โดยลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 กล้องจุลทรรศน์

2.11.2 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ใน การศึกษาเฟสของพอลิเมอร์ผสม รวมทั้งขนาด และการกระจายตัวในดิสเพอร์สเฟส ตลอดทั้งแรง ดึงดูระหว่างผิวของแต่ละเฟส โดยในการตรวจสอบจำกัดอยู่ในระดับพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง ซึ่ง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่ากล้องจุลทรรศน์ทั่วไป โดยการ เตรียมชิ้นตัวอย่างนั้นส่วนมากใช้วิธีการหักชิ้นตัวอย่างภายใต้สภาวะในโตรเจนเหลว เพื่อป้องกัน ความเสียหายของสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่ดีควรจะเรียบ

มีปัญหา 2 อย่างในการตรวจสอบวัสดุพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่อง กราด ประการแรก คือ พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำมาก และประจุถูกสร้างขึ้นอย่าง รวดเร็วบนชิ้นทดสอบเมื่อมันถูกยิงด้วยลำแสงอิเล็กตรอน ถ้าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด สนามอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยประจุกระทบกับลำแสง อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนที่สร้างสัญญาณจะเกิดการรบกวนภาพได้ การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการ ทำการเคลือบด้วยสารซึ่งนำไฟฟ้าได้ (conductive coating) ปัญหาอย่างที่สอง คือ วัสดุพอลิเมอร์ มักถูกทำลายด้วยพลังงานจากการทะลุทะลวงของอิเล็กตรอนทำให้เกิดรอยตำหนิ (artifacts) ขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ควรใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งทำให้กำลังขยายและความละเอียดลดลง ปัญหา เหล่านี้ส่งผลให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ต้องการชิ้นทดสอบที่มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 10 ตารางมิลลิเมตร) โดยวัสดุที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวหน้าของชิ้นทดสอบ คือ ทองคำ เพราะเป็นวัสดุระเหยได้ง่าย ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รัตนา จิตต์ลดาพิทักษ์ และแสงเพชร อิศระพาณิชยกิจ [26] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (เพต) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (เอชดีพีอี) โดยกระบวนการอัดรีด และนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีด เมื่อเพิ่มปริมาณเพตมากขึ้น จะทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกชั้นขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจาก เพต และเอชดีพีอี ไม่สามารถรวมตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ และพอลิเมอร์ผสมจะให้ค่าความทนแรงดึงที่ต่ำกว่าเอชดีพีอี 100% เนื่องจากอนุภาคของเพต มีแนวโน้มไหลไปรวมตัวกันที่จุดเดียว ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน

สมพงษ์ ช้องชัยนำสกุล เพลินพิศ ปานนิลวงค์ และรุ่งลักษณ์ พรหมพันธุ์ [27] ได้ขึ้นรูปขยะพลาสติกผสมระหว่างเพต และพีอี เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ด้วยกระบวนการฉีด แต่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ เนื่องจากไม่สามารถทำการบดเพตให้มีขนาดเล็กตามที่ต้องการได้

สิรินธร สุธาชีวะ และสุวัฒน์ เขียมแสงจันทร์ [28] นำขยะพลาสติก พีอี พีพี และเพต มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ด้วยกระบวนการอัด ในงานวิจัยนี้เกิดปัญหาล้าภัยกับในงานวิจัยของ สมพงษ์ ช้องชัยนำสกุล และคณะ คือ ไม่สามารถบดเพตให้มีขนาดเล็กตามที่ต้องการได้ เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกผสมด้วยกระบวนการอัดรีด เพตไม่สามารถผ่านหัวตายของเครื่องอัดรีดออกมาได้ หากใช้อุณหภูมิที่สูงในการขึ้นรูปเพื่อให้เพตหลอมเหลวนั้นจะทำให้ขยะพีพี และพีอีเกิดการไหม้และเสื่อมสภาพได้

กัญจนา ตระกูลคู และพรศักดิ์ เจนสุขทรัพย์ [29] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของจำนวนครั้งต่อสมบัติเชิงกล และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ และไม่ใช้มาลิกแอนไฮโดรไดรด์กราฟต์พอลิโอฟีนส์เป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งมีอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตดังนี้ 95/5, 90/10 85/15 และ 80/20 และอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตและสารเชื่อมประสาน ดังนี้ 85/10/5 75/20/5 และ 45/50/5 พบว่า เมื่อผ่านกระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่หลายครั้ง และนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาทดสอบโดยเปรียบเทียบในแต่ละครั้งของการผลิตพบว่า การยืดตัว และความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้สารเชื่อมประสานนั้น มีค่าที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารเชื่อมประสาน และโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารเชื่อมประสาน เมื่อมีรอบการผลิตเพิ่มมากขึ้น อนุภาคเพตมีแนวโน้มที่รวมตัวกันใหญ่ขึ้น ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้สารเชื่อมประสานพบว่าขนาดของอนุภาคเพตมีขนาดประมาณ 2 ไมครอนในทุกรอบการผลิตส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นประโยชน์ได้

ประณัฐ โพธิยะราช กิตติภูมิ กลัปดี และธีรศักดิ์ สรรพศิริ [30] ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลและลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (เฮกซีพีอี) กับขูดเพต (พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต) ที่ใช้แล้วในอัตราส่วน 100:90, 20:80, 70:30, 40:60 และ 50:50 พอลิเมอร์ผสมได้จากการนำเอาพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมาผสมกันในเครื่องบดละเอียด (pulverizer) โดยถูกบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.50 มิลลิเมตร และนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดเข้าแบบ โดยทั่วไปพบว่าเมื่อนำขูดเพตมาหลอมใช้ใหม่จะขึ้นรูปได้ยากขึ้น อีกทั้งสมบัติเชิงกลบางประการจะด้อยลง โดยเฉพาะความทนแรงกระแทก แต่จากการทดลองนี้พบว่า การนำขูดเพตมาผสมกับเฮกซีพีอีด้วยวิธีการบดละเอียด จะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้ขึ้นรูปได้ดีขึ้น และยังสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงได้อีกด้วย และเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าเนื้อของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเป็นเส้นใยเล็ก (fibrillation) ซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์ทั้งสองมีความหนืดขณะหลอมเหลวที่แตกต่างกัน ลักษณะของเส้นใยเล็กๆ นี้เองที่คาดว่าน่าจะเป็นส่วนที่ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม โดยขณะที่ทำการบดผสมสันนิษฐานว่าสายโซ่พอลิเมอร์ของพลาสติกทั้งสองอาจเกิดการขาดออกเนื่องจากแรงเฉือน สายโซ่ที่ขาดออกระหว่างพลาสติกต่างชนิดกัน อาจจะมีโอกาสสามารถรวมตัวเข้าด้วยกัน เกิดเป็นสารช่วยผสมเพื่อลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสทั้งสองเฟสของพลาสติกทั้งสอง

P. Santos and S. Henrique Pezzin [31] ได้วิจัยสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเพตที่ผ่านการรีไซเคิล โดยมีอัตราส่วนของเส้นใยเพตในพอลิโพรพิลีน 3, 5 และ 7% โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกผสมโดยกระบวนการอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีด นำชิ้นทดสอบที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้ผลดังนี้ ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนที่เติมเส้นใยเพตที่ผ่านการรีไซเคิลลงไปในนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนที่เติมเส้นใยเพตที่ผ่านการรีไซเคิลลงไปในนั้นลดลงถึง 82% เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ส่วนความทนแรงกระแทกนั้นเพิ่มขึ้นถึง 18.9% ที่อัตราส่วน 7% ของเส้นใยเพตในพอลิโพรพิลีน และเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่า เส้นใยเพตในพอลิโพรพิลีนนั้นเกิดการรวมกลุ่มกันของเส้นใยเพตซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงทำให้ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ก็เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และเส้นใยกับเส้นใย ทำให้ค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาดนั้นลดลง ส่วนความแข็งของชิ้นงานนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทุกอัตราส่วน เพราะปริมาณของเส้นใยเพตที่ใส่ลงไปนั้นในพอลิโพรพิลีนนั้นมีปริมาณน้อย โดย Palova Santos และคณะ ได้ให้คำแนะนำว่า ถ้าพัฒนาความเข้ากันได้ของเมทริกซ์ และตัวเสริมแรง และเพิ่มปริมาณของเส้นใยเพตโดยการใส่

สารเชื่อมประสาน และการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จะทำให้พอลิเมอร์รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้นและมีการกระจายตัวของเส้นใยพेटในเมทริกซ์ได้ดียิ่งขึ้น

C.Saujanya, S.Radhakrishnan [32] ได้ศึกษาโครงสร้าง และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยพेटโดยมีการใช้สารเชื่อมประสานผสม โดยการนำพอลิโพรพิลีน เส้นใยพेट และสารเชื่อมประสานมาขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องอัดรีด และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีด พบว่าเมื่อมีการใช้สารเชื่อมประสานทำให้พันธะระหว่างเส้นใย และเมทริกซ์นั้นเกิดขึ้น ทำให้ความทนแรงกระแทก และมอดุลัสมีค่าที่ดีกว่า พอลิโพรพิลีนเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพेटที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมประสาน สามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนของ เส้นใยพेटในวัสดุเชิงประกอบ ความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนและความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยพेटและเมทริกซ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยกำหนดไว้ 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- 1) ค้นคว้าเอกสารงานวิจัย ข้อมูลพื้นฐาน และมาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง จากแหล่งต่างๆ อาทิเช่น วารสารเชิงวิชาการทั้งใน และต่างประเทศ หนังสือ และตำรา รวมทั้งการสืบค้นข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต
- 2) วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และวิธีการทดลอง
- 3) จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย
- 4) ดำเนินการวิจัยโดยการเตรียมเม็ดพลาสติกผสม ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล
- 5) นำผลที่ได้จากการวิจัยมาวิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

โครงการวิจัยนี้ใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้น 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2548 ถึงวันที่ 14 เมษายน พ.ศ. 2549 โดยมีแผนการดำเนินงานแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน/ เดือน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	_____												
2		_____											
3			_____										
4				_____									
5									_____				

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1) พอลิโพรพิลีน (EL-Pro, P700J) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด เป็นพอลิโพรพิลีนประเภทไฮโมพอลิเมอร์ โดยมีสมบัติต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิโพรพิลีน (EL-Pro, P700J)

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	P700J
ดัชนีการไหล	g/10 min	ASTM D1238	12
ความหนาแน่น	g/cm ³	ASTM D1505	0.910
ความทนแรงดึงที่จุดคราก	kg/cm ²	ASTM D638	380
ความทนแรงดึง ณ จุดขาด	kg/cm ²	ASTM D638	250
การยืดตัว ณ จุดขาด	%	ASTM D638	500
ความทนแรงกระแทกที่ 23 °C	kg-cm/cm	ASTM D256	2.5
ความทนแรงกระแทกที่ 0 °C	kg-cm/cm	ASTM D256	2
มอดุลัสการดัดโค้ง	kg/cm ²	ASTM D790	15,500
จุดอ่อนตัว	°C	ASTM D1525	110

2) มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (Fusabond, MZ-109D) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมีคอล อินโนเวชัน จำกัด เป็นมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนชนิดไฮโมพอลิเมอร์ มีสมบัติต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (Fusabond, MZ-109D)

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	MZ-109D
ดัชนีการไหล	g/10 min	ASTM D1238	120
จุดหลอมเหลว	°C	ASTM D3418	162
ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ในสายโซ่	wt%	FTIR	0.55

3) ขวดพลาสติกเปตที่ผ่านการใช้งาน ประเภทขวดน้ำดื่มยี่ห้อเพียวเว็กซ์ ขนาด 600 มิลลิลิตร

4) พอลิเอทิลีนแว็กซ์ (EL-WAX, LP 1040E) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด เป็นพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประมาณ 1,500 ± 500 กรัมต่อโมล

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 การเตรียมพลาสติกผสมและขึ้นทดสอบ

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

- 1) เครื่องบดพัลเวอร์ไรเซอร์ (pulverizer, Fritsch รุ่น P15) พร้อมตะแกรงบดขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder, Thermo Prism) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 3) เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีดเข้าแบบ (injection molding machine, Battenfield Austria รุ่น BA 250/50CDC) ของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

3.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

- 1) เครื่องทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 100K) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้หัวจับแบบสปริง
- 2) เครื่องทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง (universal testing machine, Lloyd รุ่น 500) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ชุดทดสอบการดัดโค้ง 3 จุด
- 3) เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact tester, Gotech Testing Machine รุ่น GT-7045-MDH) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 4) เครื่องบากชิ้นงาน (Gotech Specimen Notcher รุ่น 51K40A-C) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 5) เครื่องตัดชิ้นงานแบบใบเลื่อยของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 การทดสอบสมบัติกายภาพ

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

- 1) เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (melt flow indexer, Kayeness รุ่น 7053) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1) เครื่องฟูริเออร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, Nicolet Impact รุ่น 400D) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1) เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (differential scanning calorimeter, Perkin elmer รุ่น Diamond DSC) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^o) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ถาดอะลูมิเนียมและครุฑิเบิลอะลูมินาของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, Jeol รุ่น JSM-5410LV) ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) แท่งทองเหลืองสำหรับวางชิ้นงาน ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1) การเตรียมผงพลาสติกผสม

การเตรียมผงพลาสติกผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) นำขวดพลาสติกเพตประเภทขวดน้ำดื่มที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาดโดยการล้าง ตัดเป็นชิ้นขนาดประมาณ 1×1 เซนติเมตร อบให้แห้งที่ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(2) ผสมพอลิโพรพิลีนกับเพตที่ผ่านการใช้งานที่ล้างทำความสะอาด และตัดเป็นชิ้นเล็กในอัตราส่วนต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

(3) นำพลาสติกผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตที่ผ่านการใช้งานมาอบที่ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำไป บดด้วยเครื่องพัลเวไรเซอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยใช้ตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร และขนาด 0.5 มิลลิเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 เครื่องบดแบบพัลเวไรเซอร์ (pulverizer)



รูปที่ 3.2 ตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน เพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์

สูตร	พอลิโพรพิลีน (phr)	เพตจากขวดพลาสติก ที่ผ่านการใช้งาน (phr)	มาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน (phr)	พอลิเอทิลีนแวกซ์ (phr)
1	100	0	0	0
2*	100	0	0	0
3	100	0	5	0
4	100	0	0	5
5	100	0	5	5
6	100	5	5	5
7	100	10	0	0
8	100	10	5	0
9	100	10	10	0
10	100	10	15	0
11	100	10	5	5
12	100	15	0	0
13	100	15	5	0
14	100	15	10	0
15	100	15	15	0
16	100	15	5	5
17	100	20	0	0
18	100	20	5	0
19	100	20	10	0
20	100	20	15	0
21	100	20	5	5

ตารางที่ 3.4(ต่อ) อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน เพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน มาลิกอกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์

สูตร	พอลิโพรพิลีน (phr)	เพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน (phr)	มาลิกอกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (phr)	พอลิเอทิลีนแวกซ์ (phr)
22	100	30	0	0
23	100	30	5	0
24	100	30	10	0
25	100	30	15	0
26	100	30	5	5
27**	100	15	0	0
28**	100	15	5	0
29**	100	15	10	0
30***	100	15	0	0
31***	100	15	5	0
32***	100	15	10	0

* คือ ขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยการฉีดเข้าแบบเพียงอย่างเดียว โดยไม่บดพอลิโพรพิลีน

** คือ บดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร

*** คือ บดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) การอัดรีดเป็นเม็ดพลาสติกผสม

ขั้นตอนการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกผสมจากผงพลาสติกผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตมีดังต่อไปนี้

(1) นำผงพลาสติกผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตที่บดด้วยเครื่องพัลเวอไรเซอร์มาผสมกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซีในอัตราส่วนต่างๆ ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 มาอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(2) นำผงพลาสติกผสมที่ได้มาขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 และแสดงสภาวะการขึ้นรูปไว้ในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder)

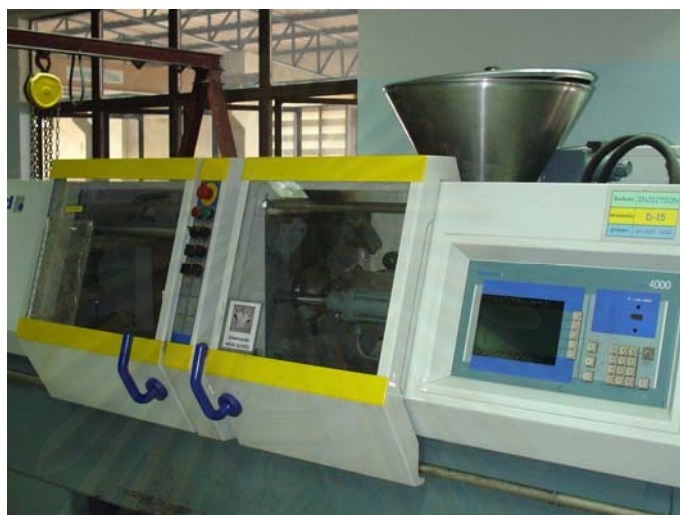
ตารางที่ 3.5 สภาวะในการอัดรีดของเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

สภาวะในการอัดรีด	กระบวนการอัดรีด
	อุณหภูมิในการอัดรีด (°C)
โซนที่ 1	170
โซนที่ 2	185
โซนที่ 3	200
โซนที่ 4	215
โซนที่ 5	230
ความเร็วสกรู (รอบต่อนาที)	40

3) การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

(1) อบเม็ดพลาสติกผสมที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(2) นำเม็ดพลาสติกผสมที่ผ่านการอบมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และมีสภาวะการขึ้นรูปแสดงไว้ในตารางที่ 3.6

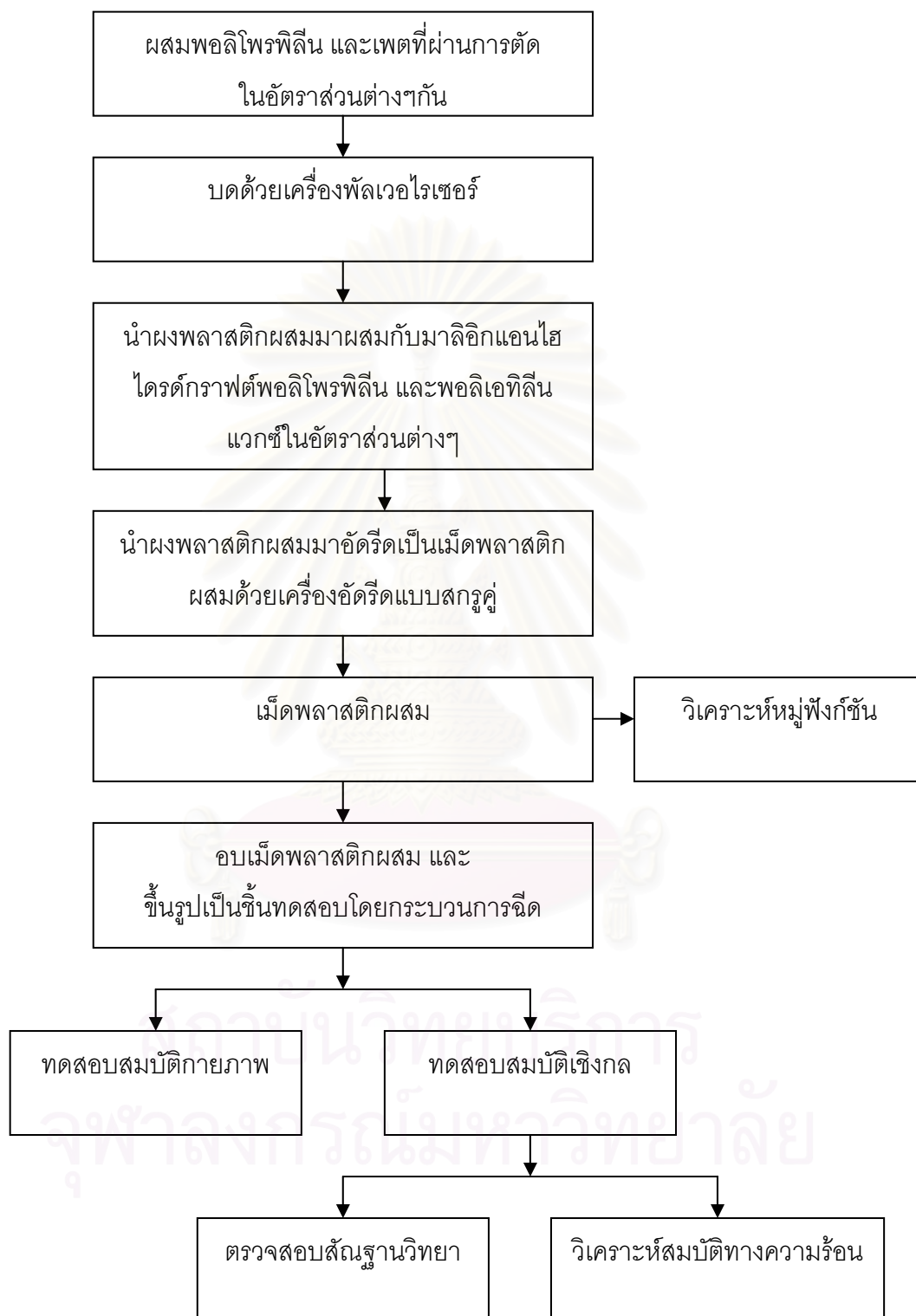


รูปที่ 3.4 เครื่องฉีดพลาสติก (injection molding machine)

ตารางที่ 3.6 สภาวะในการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบของเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

สภาวะในการขึ้นรูป	กระบวนการฉีด
	อุณหภูมิในการขึ้นรูป ($^{\circ}\text{C}$)
โซนที่ 1	160
โซนที่ 2	185
โซนที่ 3	200
โซนที่ 4	215
โซนที่ 5	235
อุณหภูมิแม่แบบ ($^{\circ}\text{C}$)	40
ความดันที่ใช้ในการฉีด (บาร์)	30

สามารถสรุปขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

3.4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

นำเม็ดพลาสติกผสมมาวางบนกระจกนาฬิกา และให้ความร้อน ทำให้เกิดการหลอม นำกระจกนาฬิกาอีกแผ่นมาวางทับทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มขึ้น นำแผ่นฟิล์มที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคฟูริเออร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีด้วยเครื่องฟูริเออร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer รุ่น Nicolet Impact 400D) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยคำนวณหาอัตราส่วนระหว่าง $\text{CH}_3:\text{CH}_2$ โดยใช้ความสูงของพีคของกราฟการดูดกลืนแสงที่ $1340 - 1390 \text{ cm}^{-1}$ และ $1430 - 1470 \text{ cm}^{-1}$ มาคำนวณ ในขณะที่อินฟราเรดสเปกตรัมของหมู่คาร์บอนิลในมาลิกแอซไฮโดรด์จะปรากฏที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่ $1720-1780 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.6 เครื่องฟูริเออร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transforms infrared spectrometer รุ่น Nicolet Impact 400D)

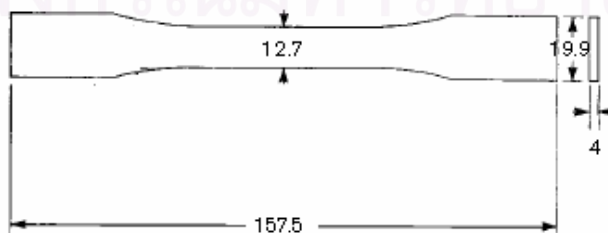
3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.4.3.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-03 [21] ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึง (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 100K) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 โดยใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน อัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะความยาวเกจ (gauge length) 50 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างที่หนีบ 115 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบมีลักษณะคล้ายรูปดัมเบล ขนาดยาว 157.5 มิลลิเมตร กว้าง 12.7 มิลลิเมตรหนา 4 มิลลิเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 โดยทำการทดสอบสุทธละ 5 ชิ้น



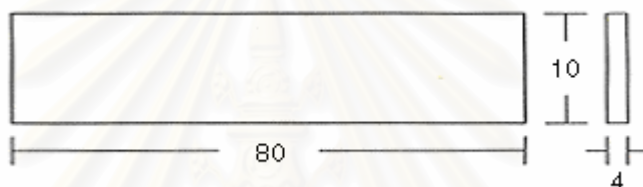
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 100K)



รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง

3.4.3.2 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง

ทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-03 [24] ทดสอบภายใต้อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยขึ้นทดสอบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.9 โดยมีระยะคานรองรับชิ้นงาน (support span) 64 มิลลิเมตร และใช้อัตราเร็วของหัวกด 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการทดสอบสุทธละ 5 ชิ้น ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (universal testing machine, Lloyd 500) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 โดยใช้ load cell ขนาด 2.5 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบความทนแรงดัดโค้ง



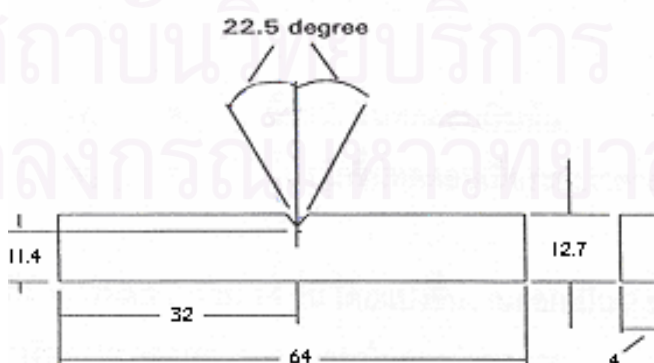
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (universal testing machine, Lloyd รุ่น 500)

3.4.3.3 การทดสอบความทนแรงกระแทก

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-04 [23] โดยทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยชิ้นทดสอบมีขนาดกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร มิลลิเมตร ก่อนที่จะทำการทดสอบจะต้องนำชิ้นทดสอบไปทำรอยบากด้วยเครื่องทำรอยบากแสดงไว้ในรูปที่ 3.11 ได้ชิ้นทดสอบที่มีรอยบากแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 โดยทำการทดสอบสุทธระ 5 ชิ้นด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact tester, Gotech Testing Machine รุ่น GT-7045-MDH) แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้หัวค้อนขนาด 5 กิโลจูล



รูปที่ 3.11 เครื่องบากชิ้นงาน



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกที่มีรอยบาก



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact tester, Gotech Testing Machine รุ่น GT-7045-MDH)

3.4.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

3.4.4.1 การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล

ทดสอบหาค่าดัชนีการไหล อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238-03 [20] ด้วยเครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (melt flow indexer, Kayeness รุ่น 7053) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 ใช้อุณหภูมิการทดสอบ 230°C น้ำหนักกดทับ 2.16 กิโลกรัม ใช้โอริฟิซที่มีรัศมี 0.1048 เซนติเมตร และยาว 0.8 เซนติเมตร เวลาในการหลอมเหลว 50 วินาทีและใช้เวลาในการทดสอบ 30 วินาที โดยทำการทดสอบสุทธละ 5 ครั้ง



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (melt flow indexer, Kayeness รุ่น 7053)

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

3.4.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (differential scanning calorimeter, Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.15 นำพอลิเมอร์ผสมน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุในถาดอะลูมิเนียม และปิดผนึกให้เรียบร้อย แสดงไว้ในรูปที่ 3.16 โดยทดสอบได้สภาวะหลัก 3 สภาวะ คือ ขั้นตอนแรก ให้สภาวะการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ 60 ถึง 300°C ภายใต้อัตราการเพิ่มความร้อน 15°C ต่อนาที และคงที่ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อทำการกำจัดอิทธิพลต่างๆที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูป หลังจากนั้นในขั้นที่สอง ทำการลดอุณหภูมิจาก 300 ลงมาถึง 60°C ด้วยอัตราการเย็นตัว 15°C ต่อนาที และคงที่ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดผลึก และในขั้นตอนที่สามซึ่งเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์อุณหภูมิในการหลอมเหลวนั้น ทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิจาก 60 ถึง 300°C ภายใต้อัตราการเพิ่มความร้อน 15°C ต่อนาที โดยวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.15 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (differential scanning calorimeter, Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC)



รูปที่ 3.16 ภาดอะลูมิเนียม

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC นอกจากจะสามารถวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และ อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมได้แล้ว ยังสามารถนำผลที่ได้จากเทคนิคนี้มาคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย โดยอาศัยการคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณความเป็นผลึก (\%)} = \frac{H_f^*}{H_f^\circ} \times 100$$

(% degree of crystallinity, χ)

โดย

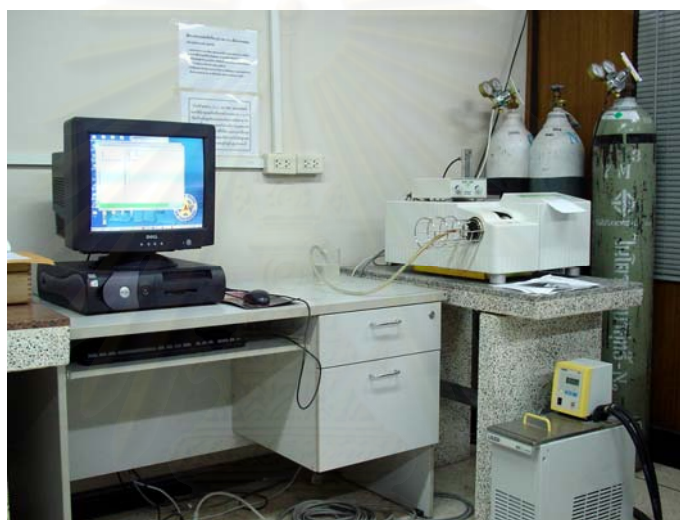
H_f^* คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (จูล/กรัม)

H_f° คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% (จูล/กรัม)

พอลิโพรพิลีนมีพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% คือ 207.1 จูล/กรัม และ เพตมีพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% คือ 140.1 จูล/กรัม [33]

3.4.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^o) ของภาควิชา วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงไว้ในรูปที่ 3.17 นำพอลิเมอร์ผสม น้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครุชชีเบิลอะลูมินา แสดงในรูปที่ 3.18 โดยใช้สภาวะการ วิเคราะห์เริ่มจากอุณหภูมิ 60 ถึง 1,000^oC อัตราการเพิ่มความร้อน 15^oC ต่อนาที ทำการวิเคราะห์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการ สลายตัว (T_d) ของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีนและเพตที่ผ่านการใช้งาน



รูปที่ 3.17 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^o)



รูปที่ 3.18 ครุชชีเบิลอะลูมินา

3.4.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, Jeol รุ่น JSM-5410LV) แสดงในรูปที่ 3.19 ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นการศึกษาการกระจายตัวและความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาบริเวณรอยหักของชิ้นทดสอบ ความทนแรงกระแทก ซึ่งจะต้องทำการเคลือบทองลงบนพื้นผิวที่ต้องการทำการตรวจสอบ แสดงในรูปที่ 3.20 โดยใช้กำลังขยายในการตรวจสอบ คือ 50 เท่า 150 เท่า 1,000 เท่า 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Jeol รุ่น JSM-5410LV)



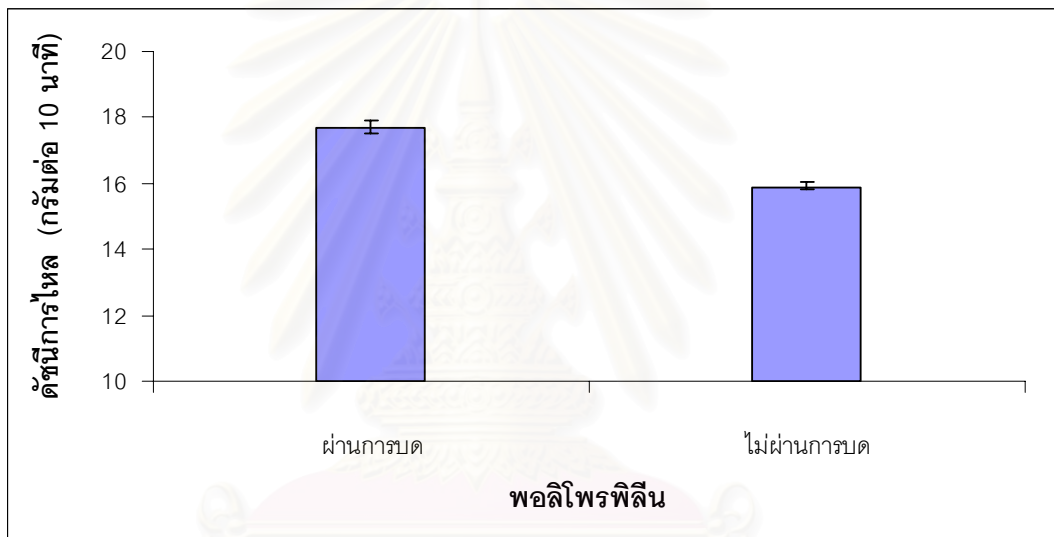
รูปที่ 3.20 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการเคลือบทอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบด

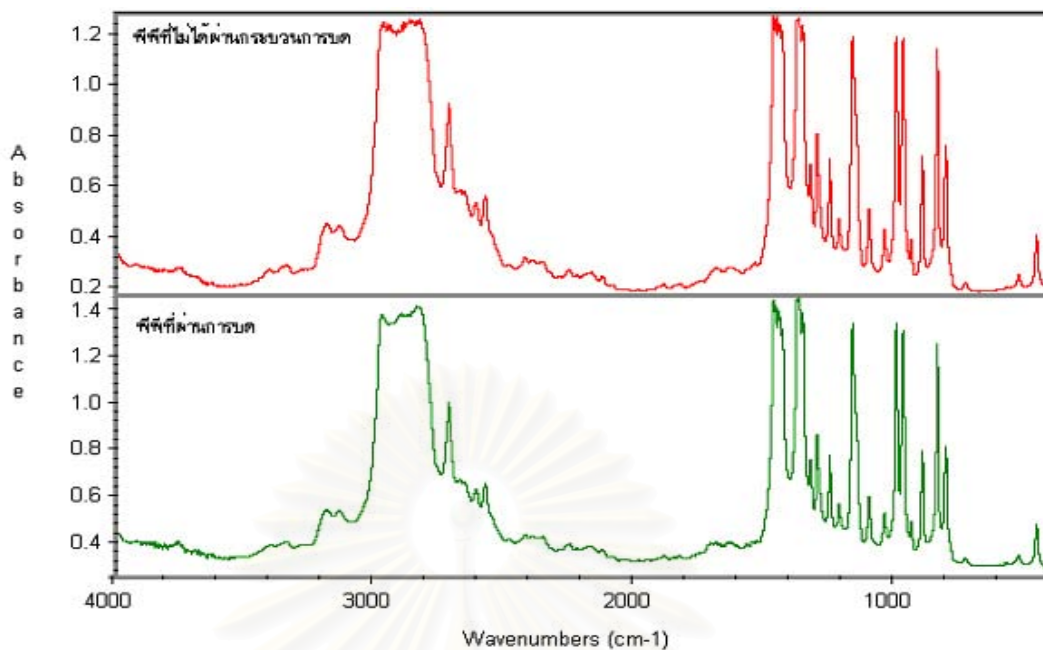
นำพอลิโพรพิลีนมาบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์โดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร แล้วนำผงพลาสติกที่ได้ไปผ่านกระบวนการอัดรีด และตัดเป็นเม็ด ทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (melt flow index, MFI) เทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238-03 แสดงผลในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์และพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ

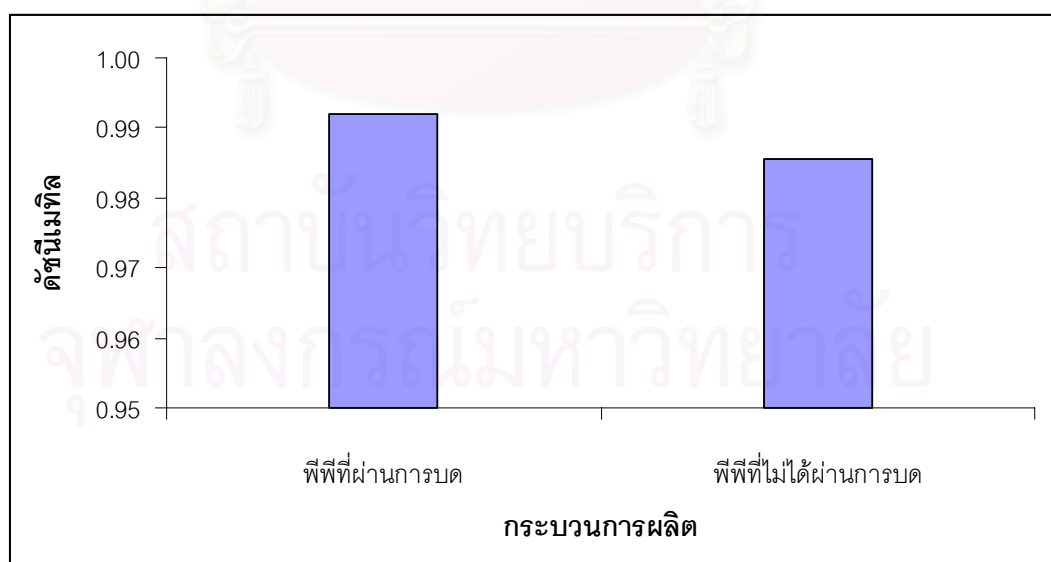
จากผลการทดสอบ พบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดมีค่าดัชนีการไหลที่เพิ่มขึ้น หรือความหนืดขณะหลอมเหลวลดลง เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ เนื่องจากพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลที่ลดต่ำลง เพราะการบดด้วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์สองประการ คือ การขาดออกของสายโซ่โมเลกุล และการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ แต่เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลมากกว่า ค่าดัชนีการไหลจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงที่ได้จากเทคนิคฟูรีเออร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ระหว่างฟิล์มที่ได้จากเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ กับฟิล์มที่ได้จากเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการอบด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์และพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ

จากผลการทดสอบการดูดกลืนแสงที่แสดงในรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณดัชนีเมทิล (methyl index) ของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการอบ เทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ ได้จากการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่าง $\text{CH}_3:\text{CH}_2$ โดยใช้ความสูงของพีคของกราฟการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง $1340 - 1390 \text{ cm}^{-1}$ และ $1430 - 1470 \text{ cm}^{-1}$ ได้ผลแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ดัชนีเมทิลของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการอบด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์และพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ

จากผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีเมทิลของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบำบัดด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซอร์นั้นมีค่า 0.992 ส่วนพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ มีค่าดัชนีเมทิล 0.986 โดยการเปลี่ยนแปลงดัชนีเมทิลขึ้นกับความชื้นไปได้ใน 2 กรณี คือ [11]

1) ถ้าค่าดัชนีเมทิลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่ $-CH_3$ มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น หรือหมู่ $=CH_2$ มีปริมาณลดลง นั่นคือ เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุล ทำให้มีปริมาณของ $-CH_3$ เพิ่มมากขึ้น

2) ถ้าค่าดัชนีเมทิลมีค่าลดลง เนื่องจากหมู่ $-CH_3$ มีปริมาณลดลง หรือ หมู่ $=CH_2$ มีปริมาณเพิ่มขึ้น นั่นคือ มีการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ $-CH_3$ มีปริมาณที่ลดลง ในขณะที่เดียวกัน ปริมาณของ $=CH_2$ ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

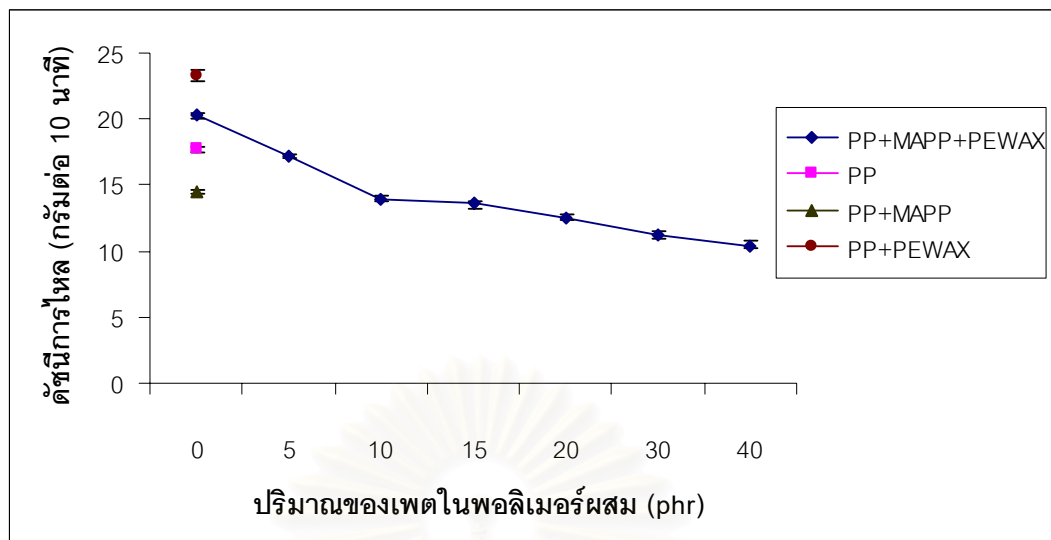
จากผลการทดสอบทั้งสองสามารถสรุปได้ว่า การบดพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซอร์นั้นทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนมากกว่าการจับตัวกันของแรงแคิลที่เกิดขึ้นเป็นโครงสร้างร่างแห ทำให้ค่าดัชนีเมทิลของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดมีค่ามากกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใดๆ โดยการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลนี้เองทำให้พอลิโพรพิลีนมีค่าดัชนีการไหลที่สูงขึ้น

4.2 ผลของปริมาณเพต

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณเพตในพอลิเมออร์ผสมที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ดัชนีการไหล สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก สมบัติทางความร้อน ปริมาณผลึก และสัณฐานวิทยาโดยนำผงพอลิเมออร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานในอัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซอร์ โดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร แล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีด และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ โดยในระบบของพอลิเมออร์ผสมประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณ 100 phr มาลิกิก แอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ปริมาณอย่างละ 5 phr ส่วนปริมาณของเพตนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 อยู่ระหว่าง 0-40 phr

4.2.1 ดัชนีการไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมออร์ผสม กับค่าดัชนีการไหล แสดงไว้ในรูปที่



รูปที่ 4.4 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเพตที่ในปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเพตมีจุดหลอมเหลวประมาณ 265°C ซึ่งสูงกว่าภาวะในการทดสอบ คือ 230°C เพตจึงไม่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ ทำให้มีความหนืดที่สูง ประกอบกับในพอลิเมอร์ผสมมีการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ด้วยเหตุนี้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีการไหลระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดเพียงอย่างเดียวกับพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบด และมีส่วนผสมของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์อย่างละ 5 phr ปรากฏว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดเพียงอย่างเดียวนั้นมีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดน้อย ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นส่วนผสมนั้นมีความหนืดที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดเพียงอย่างเดียว หรือมีค่าดัชนีการไหลสูงกว่านั่นเอง

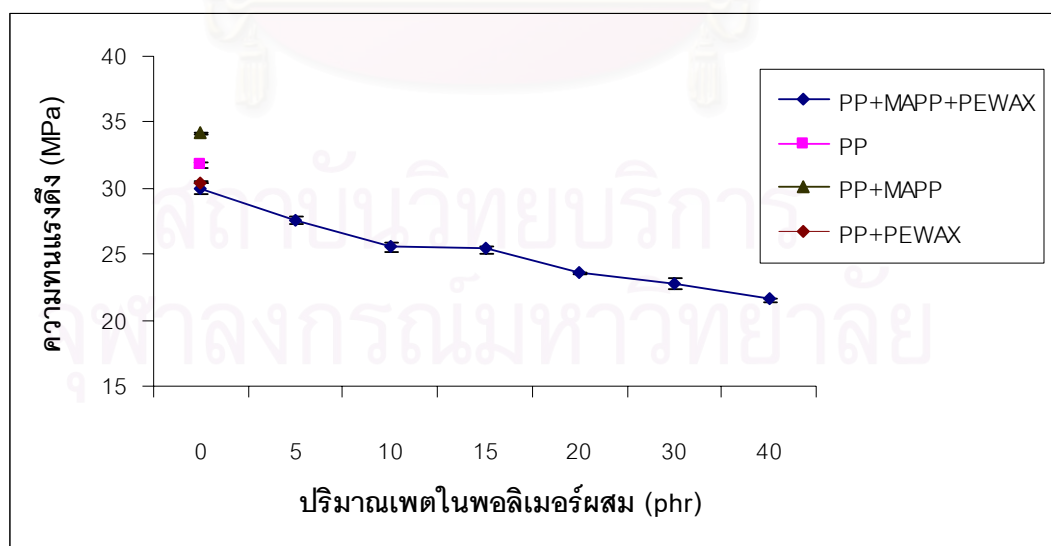
เมื่อเปรียบเทียบพอลิโพรพิลีนซึ่งผ่านการบดที่มีการผสม และไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr พบว่าพอลิโพรพิลีนที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่าดัชนีการไหลที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีโครงสร้างเป็นสายโซ่โมเลกุลสั้นๆ ทำให้พอลิโพรพิลีนที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์มีความหนืดลดลง ค่าดัชนีการไหลจึงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์

เมื่อเปรียบเทียบพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม และไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณ 5 phr พบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจากด้านที่เป็นสายโซ่พอลิโพรพิลีนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดึงดูดกับพอลิโพรพิลีน และส่วนที่เป็นหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดึงดูดกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอีกตัวหนึ่ง ทำให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน มีค่าลดลง หรือมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

อิทธิพลของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีผลต่อค่าดัชนีการไหลสูงกว่าอิทธิพลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีการไหลระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม และไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนแวกซ์อย่างละ 5 phr พบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่าสูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่าสูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์

4.2.2 ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดึงแสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เพราะเพตเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของพอลิโพรพิลีนทำให้ความเป็นผลึกลดลง และระหว่างทดสอบความทนแรงดึง ขึ้นทดสอบเริ่มเกิดการขาดออกบริเวณที่มีความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตน้อย เพราะปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณคงที่ที่ 5 phr เมื่อปริมาณของเพตเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความต้องการปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มสูงขึ้น เพื่อช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเพต ประกอบกับในพอลิเมอร์ผสมนั้นมีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่ ซึ่งพอลิเอทิลีนแวกซ์จะไปแทรกตัวอยู่ในพอลิโพรพิลีนทำให้ความทนแรงดึงลดต่ำลง เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่ไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดการลื่นไถลได้ง่าย เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีโครงสร้างเป็นสายโซ่โมเลกุลสั้น มีสมบัติการไหลที่ดี

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดโดยผสม และไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ 5 phr นั้นพบว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่าความทนแรงดึงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดการลื่นไถลได้ง่าย เมื่อเกิดการยืดดึง ทำให้ใช้แรงในการทำให้เกิดการยืดออกน้อยกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์

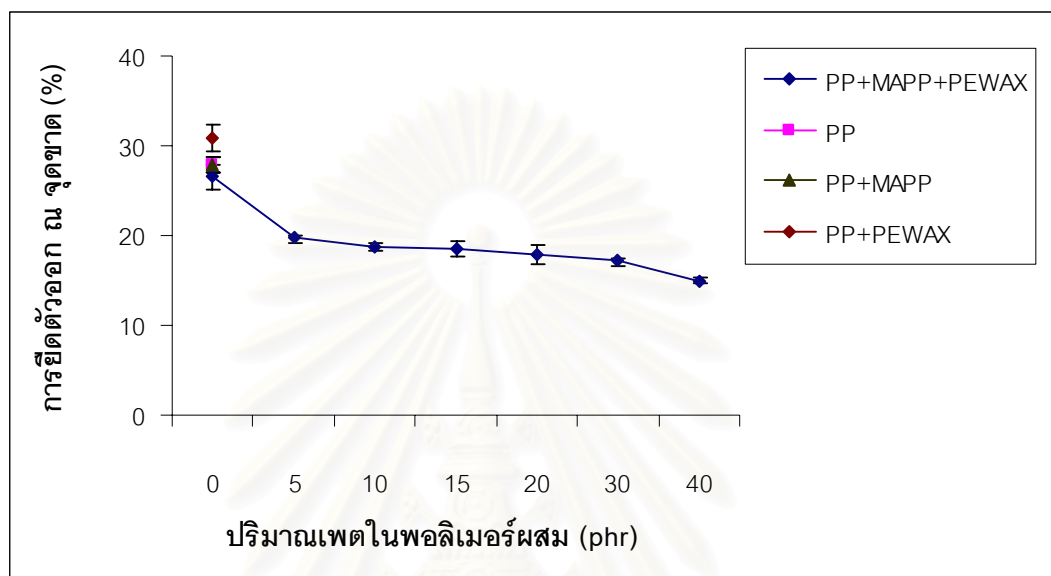
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม และไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณ 5 phr ปรากฏว่าพอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีค่าความทนแรงดึงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจากพอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นเกิดแรงดึงดูระหว่างกัน โดยส่วนที่เป็นสายโซ่โมเลกุลพอลิโพรพิลีนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดีดดูกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีน และส่วนที่เป็นหมู่คาร์บอนิลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดีดดูกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนตัวอื่น ทำให้พอลิโพรพิลีนที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงดึงที่เพิ่มมากขึ้น ต้องใช้แรงในการดึงเพิ่มมากขึ้น เพื่อทำลายแรงดีดดูที่เกิดขึ้น

อิทธิพลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับการลดค่าความทนแรงดึงเมื่อเติมพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ 5 phr ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม และไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr นั้นพบว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนและ

พอลิเอทิลีนแวกซ์ จะมีค่าใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมกับการยืดตัว ณ จุดขาดแสดงในรูปที่

4.6



รูปที่ 4.6 การยืดตัวออก ณ จุดขาด พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเพต ในปริมาณต่างๆ

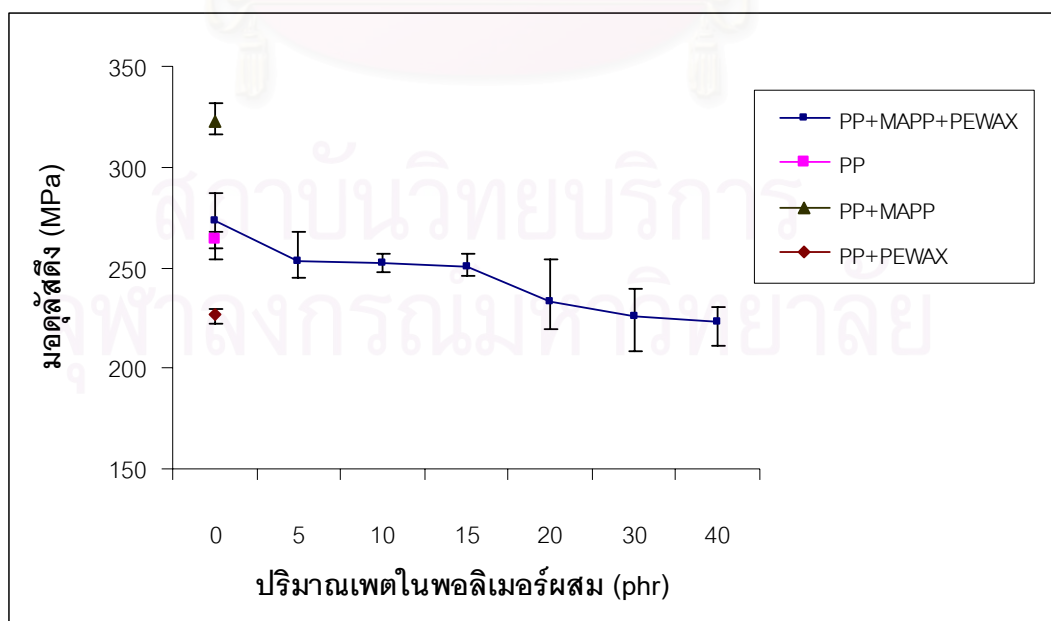
จากผลการทดสอบพบว่า การยืดตัวออก ณ จุดขาดแปรผกผันกับปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมคือ เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น การยืดตัวออก ณ จุดขาดมีค่าลดลงเป็นผลมาจาก เมื่อทำการดึงขึ้นทดสอบ เกิดการยืดตัวออกของส่วนที่เป็นเมทริกซ์ คือพอลิโพรพิลีน เพราะมีสมบัติคล้ายยางที่อุณหภูมิต่ำ แต่เพตมีสมบัติเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงดึงพอลิโพรพิลีนเกิดการยืดออก แต่เพตเกิดการยืดเพียงเล็กน้อย และเกิดการหลุดออก (pull out) จากพอลิโพรพิลีนแทนที่การยืดออก ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นในการขาดของชิ้นทดสอบ ด้วยเหตุนี้การยืดตัวออก ณ จุดขาดจึงมีค่าลดลง เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีเพตผสมอยู่

เมื่อเปรียบเทียบพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม และไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr พบว่า การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ นั้นมีค่าสูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยให้พอลิโพรพิลีนเกิดการยืดตัวออกได้ดี เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์ไปแทรกตัวในสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนทำให้เกิดการลื่นไหล หรือ ลดการขัดกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม และไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณ 5 phr ปรากฏว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาด ที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจากด้านที่เป็นสายโซ่พอลิโพรพิลีนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดึงดูดกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีน ส่วนที่เป็นหมู่คาร์บอนิลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดึงดูดกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอีกด้วย ทำให้พอลิโพรพิลีนที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น เพราะโมเลกุลมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ค่าการยืดตัวจึงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลระหว่างมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน กับพอลิเอทิลีน แวกซ์ที่ส่งผลต่อการยืดตัวออก ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ส่งผลให้การยืดตัวออก ณ จุดขาด ลดลงกว่าการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน หรือพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิโพรพิลีนอย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยให้การกระจายตัวของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมนั้นเกิดได้ดีขึ้น เมื่อทำการยืดดึงเกิดการยืดออกของพอลิเมอร์ผสมที่ลดลง โดยอิทธิพลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเพตนั้นส่งผลต่อการยืดตัวออก ณ จุดขาด มากกว่าอิทธิพลของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ทำให้เกิดการยืดออก ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมกับมอดูลัสดึงแสดงไว้ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 มอดูลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเพตในปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การใช้แรงดึงในการทำให้ขึ้นทดสอบเกิดการยืดตัวออกที่ความยาวเท่ากันมีค่าลดลง เพราะพอลิโพรพิลีน และเพตมีความเข้ากันได้น้อย ถึงจะมีการเพิ่มความเข้ากันได้โดยผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน แต่เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเพตทำให้เกิดช่องว่างในขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเพตมีหมู่เอสเทอร์ที่มีขั้วแต่พอลิโพรพิลีนนั้นไม่มีขั้ว ค่ามอดุลัสดึงจึงลดลง และปริมาณของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมนั้นคงที่ที่ 5 phr ซึ่งไม่เพียงพอต่อปริมาณเพตที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีเพตเพียงบางส่วนที่เข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีน โดยพบว่าเมื่อเพตในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณ 5 10 และ 15 phr ตามลำดับ มอดุลัสดึงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพตเป็น 20 30 และ 40 phr นั้นค่ามอดุลัสดึงมีแนวโน้มลดลง เพราะปริมาณของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนไม่เพียงพอต่อปริมาณเพตที่เพิ่มมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม กับไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr พบว่าค่ามอดุลัสดึงของพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่าต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นไหลที่ดี ไม่เกิดการพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้แรงที่ต้องใช้ในการยืดออกลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม กับไม่ผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณ 5 phr พบว่ามอดุลัสดึงของพอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีค่ามอดุลัสดึงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจาก มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำให้เกิดแรงดึงดูระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิโพรพิลีนของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ดังนั้นจึงต้องใช้แรงดึงที่เพิ่มมากขึ้นในการทำลายแรงดึงดูนี้ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีค่ามอดุลัสดึงที่สูงขึ้น

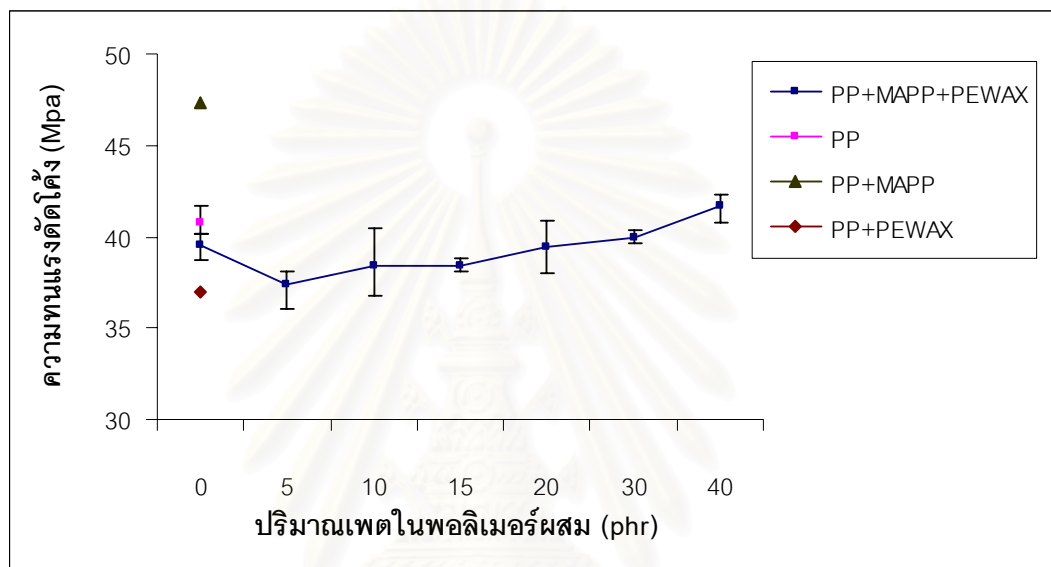
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผสม กับไม่ผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr พบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นมีค่ามอดุลัสดึงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์จะไปทำให้มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นกระจายตัวในขึ้นทดสอบที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้แรงดึงดูระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้น ค่ามอดุลัสดึงจึงเพิ่มสูงขึ้น โดยอิทธิพลของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ทำให้เกิดแรง

ดึงดูดระหว่างพอลิโพรพิลีน กับเพตนั้นส่งผลต่อค่ามอดุลัสดึงให้เพิ่มสูงขึ้น มากกว่าอิทธิพลของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ทำให้ค่ามอดุลัสดึงลดต่ำลง

4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดัดโค้งแสดงไว้ในรูปที่

4.8



รูปที่ 4.8 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตในปริมาณต่างๆ

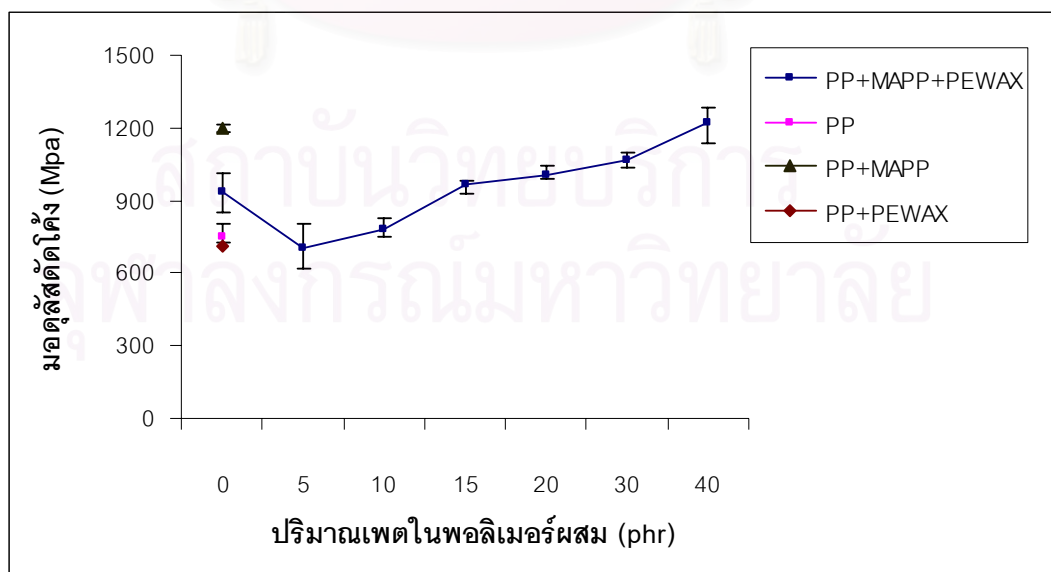
จากผลการทดสอบพบว่า ช่วงแรกเมื่อทำการผสมเพตในพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอย่างละ 5 phr นั้น ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง แต่เมื่อเพตในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก การทดสอบความทนแรงดัดโค้งนั้นเกิดแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบ 2 แรงคือ แรงกด และแรงยืดออก ดังนั้นเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณที่น้อย ทำให้พอลิเมอร์ผสมรับแรงกดได้ไม่ดี เพราะมีเพตกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสมน้อย เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกด ทำให้เกิดการงอ และหักออกบริเวณที่มีเพตกระจายตัวอยู่ แต่เมื่อเพตในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมมีความทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น เพราะการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่มากขึ้น เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกด ส่วนที่เป็นพอลิโพรพิลีนเกิดการงอ แต่ส่วนที่เป็นเพตทำหน้าที่ต้านแรงกด ทำให้ต้องใช้แรงกดที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการงอ ด้วยเหตุนี้ เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมจึงเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงดัดโค้งระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่ผสม กับไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณ 5 phr พบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจากส่วนที่เป็นสายโซ่พอลิโพรพิลีนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดึงดูดกับสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน และส่วนที่เป็นหมู่คาร์บอนิลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นเกิดแรงดึงดูดกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอีกตัวหนึ่ง จึงต้องใช้แรงกดเพิ่มมากขึ้นในการทำลายพันธะเหล่านี้เพื่อให้พอลิโพรพิลีนที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นเกิดการยืดออก

เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงดัดโค้งระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม กับไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr พบว่า พอลิโพรพิลีนที่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่าความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ทำการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์ทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดการลื่นไถลได้ง่าย

เมื่อเปรียบเทียบความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอย่างละ 5 phr พบว่า พอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ทำการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูงกว่า เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปแทรกตัวอยู่ในสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน ทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำลงมากกว่าการเกิดแรงดึงดูดกันของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมกับมอดูลัสดัดโค้งแสดงไว้ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 มอดูลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตที่ในปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมเพตปริมาณ 5 phr ในพอลิเมอรัสมที่มีพอลิเอทิลีน แวกซ์ และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอย่างละ 5 phr นั้น ค่ามอดูลัสตัดโค้งของพอลิเมอรัสมมีค่าต่ำลง เนื่องจาก ใช้แรงกดน้อยลงในการทำให้เกิดการยืดออก เพราะ เพตมีปริมาณน้อย ถึงแม้มีการใช้สารเชื่อมประสานมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต แต่เมื่อพอลิเมอรัสมได้รับแรงกด เพตไม่สามารถช่วยรับแรงกดที่เกิดขึ้นได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพต เป็น 10 15 20 25 30 และ 40 phr ตามลำดับนั้น พบว่ามอดูลัสตัดโค้งของพอลิเมอรัสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอรัสมมีความแข็งขึ้นจากการที่มีเพตกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอรัสมเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องใช้แรงกดเพิ่มมากขึ้นในการทำให้พอลิเมอรัสมเกิดการยืดออก โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิโพรพิลีน และเพต

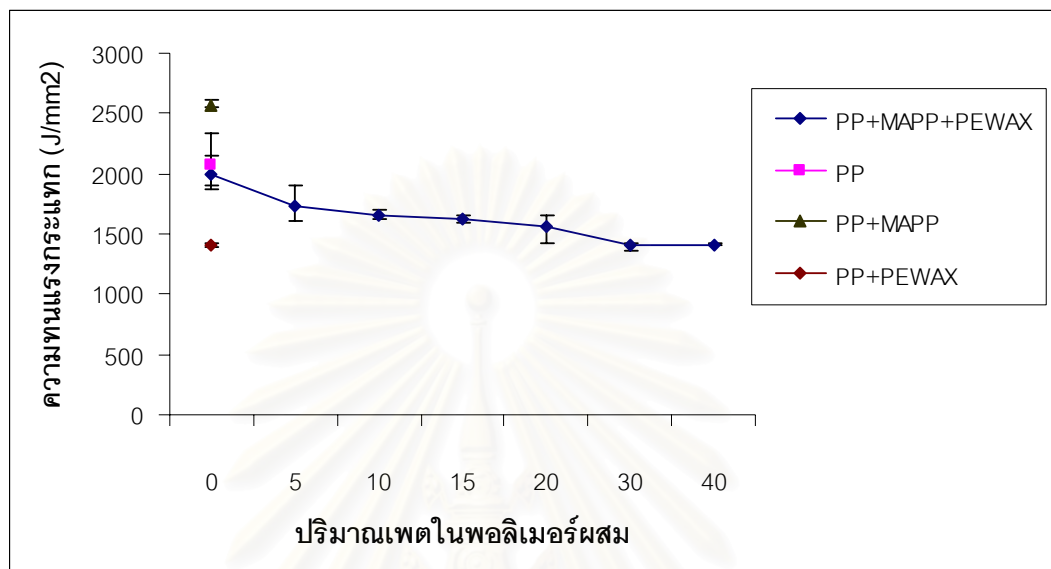
เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสตัดโค้งระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสม กับไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr พบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นมีค่ามอดูลัสตัดโค้งที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ทำการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปแทรกตัวในสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนทำให้เกิดการลื่นไถล และพันกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง จึงใช้แรงกดน้อยลงในการทำให้พอลิเมอรัสมเกิดการยืดออก

เมื่อเปรียบเทียบมอดูลัสตัดโค้งระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่ผสม กับไม่ได้ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณ 5 phr พบว่าพอลิโพรพิลีนที่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีค่ามอดูลัสตัดโค้งที่สูงกว่าไม่ได้ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เพราะส่วนที่เป็นพอลิโพรพิลีน และหมู่คาร์บอนิลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดึงดูดกับสายโซ่พอลิโพรพิลีน และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอีกตัวหนึ่ง ทำให้ต้องใช้แรงกดมากขึ้นเพื่อไปทำลายแรงดึงดูดที่เกิดขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอย่างละ 5 phr ในพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบด พบว่ามีค่ามอดูลัสตัดโค้งที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่ไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เพราะพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยให้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนกระจายตัวในพอลิเมอรัสมได้ดี ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และคาร์บอนิลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอีกตัวหนึ่ง ส่งผลให้มอดูลัสตัดโค้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ต้องใช้แรงกดมากขึ้นในการทำให้เกิดการยืดออก โดยอิทธิพลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีผลต่อค่ามอดูลัสตัดโค้งมากกว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์

4.2.4 ความทนแรงกระแทก

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงกระแทกแสดงไว้ในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตในปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมเพตในพอลิเมอร์ผสม ค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการทดสอบความทนแรงกระแทก เป็นการทดสอบที่พอลิเมอร์ผสมต้องรับแรงกระแทกในทันที ไม่เหมือนกับการทดสอบความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้งที่พอลิเมอร์ผสมค่อยๆ ยึดตัวออกอย่างช้าๆ ดังนั้นเมื่อผสมเพตในพอลิเมอร์ผสม เพตไปขัดขวางการจัดเรียงตัวการเป็นผลึกทำให้มีปริมาณผลึกที่ลดลง ประกอบกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งขึ้น จึงรับแรงกระแทกได้ต่ำลง และปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมนั้นมีค่าคงที่ที่ 5 phr เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น เพตบางส่วนเริ่มเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตขึ้น เนื่องจากความไม่เข้ากัน ความทนแรงกระแทกจึงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความทนแรงกระแทกระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่ผสม และไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในปริมาณ 5 phr พบว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์มีความทนแรงกระแทกที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้นๆ และไปแทรกตัวอยู่ในสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน เมื่อขึ้นทดสอบได้รับแรงกระแทก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดการสั่นไถลออกจากกันอย่างรวดเร็ว

เมื่อเปรียบเทียบความทนแรงกระทำระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่ผสม และไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณ 5 phr พบว่าพอลิโพรพิลีนที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีความทนแรงกระทำที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจากส่วนที่เป็นพอลิโพรพิลีนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นเกิดแรงดึงดูดกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีน และส่วนที่เป็นคาร์บอนิลของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดแรงดึงดูดกับมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอีกตัวหนึ่ง หรือเกิดแรงดึงดูดกับสายโซ่พอลิโพรพิลีนเส้นอื่น ทำให้มีลักษณะเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ จึงรับแรงกระทำได้ดีกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

4.2.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอรัสมกับ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอรัสมที่มีเพตในปริมาณต่างๆ

ปริมาณเพต (phr)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
0	151.08	116.87	446.87
5	151.15	119.92	446.40
10	151.67	117.02	445.50
15	151.89	117.19	440.55
20	151.46	118.11	439.62
30	151.67	118.30	437.10
40	151.70	117.62	434.08

จากผลของการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอรัสมเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึก เนื่องจากในพอลิเมอรัสมนั้นมีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต

ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับความร้อน และเกิดการเย็นตัวพบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมนั้นเกิดการก่อตัวเป็นผลึกอย่างรวดเร็วมากขึ้น เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น เพราะเพตทำให้ผลึกเกิดขึ้นรอบๆของเพต ดังนั้นเมื่อเพตเพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลึกเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น [32]

ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวนั้นพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์อย่างละ 5 phr นั้น พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำลง เนื่องจาก เพตมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 423.72°C ซึ่งต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน (447.46°C) และมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (442.01°C) ดังนั้นเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมจึงลดต่ำลง

4.2.6 ปริมาณผลึก

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมกับปริมาณผลึก แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

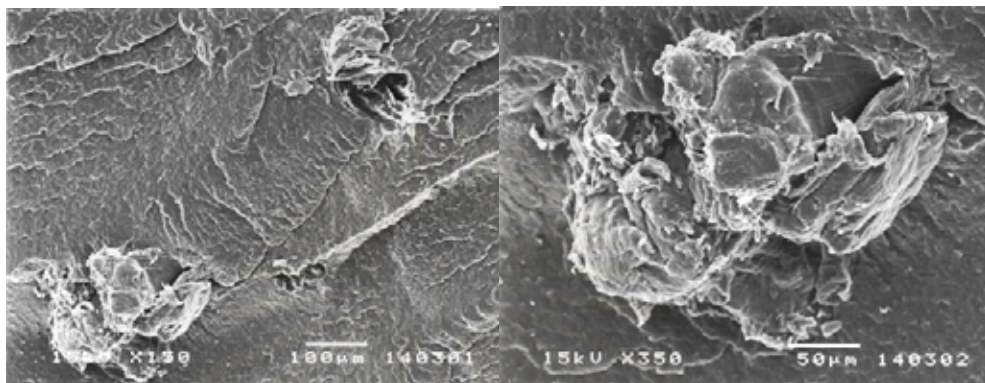
ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพตในปริมาณต่างๆ

ปริมาณเพต (phr)	ปริมาณผลึก (%)
0	38.60
5	33.64
10	32.61
15	30.38
20	28.19
30	27.68
40	26.44

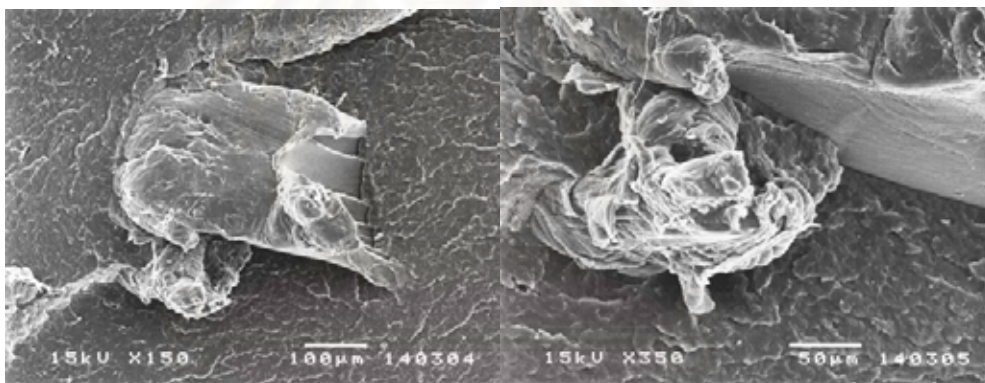
จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง เพราะเพตไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ประกอบกับน้ำหนักโดยรวมของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อปริมาณเพตเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณผลึกคิดจากความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกเทียบกับน้ำหนักทั้งหมดของพอลิเมอร์ผสม

4.2.7 สัณฐานวิทยา

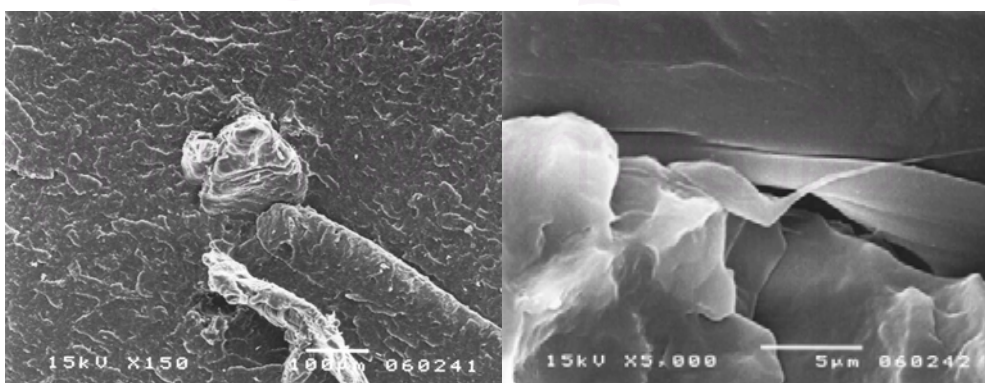
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมกับสัณฐานวิทยา แสดงไว้ในรูปที่ 4.11-4.16



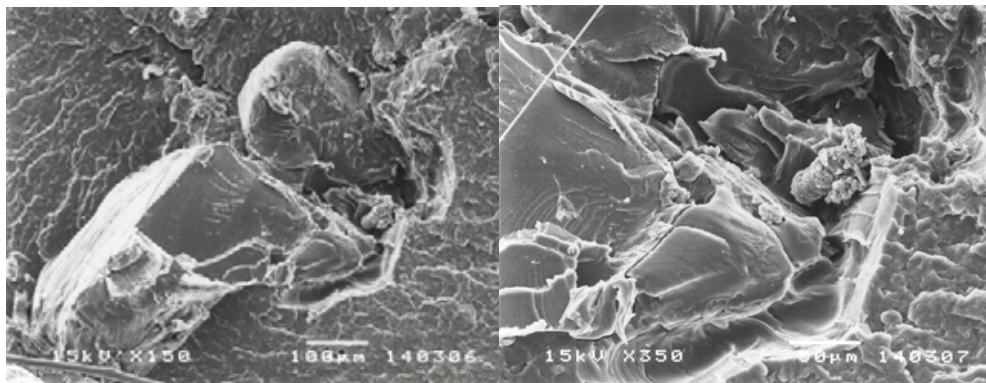
รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 5 phr ส่วนมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทีลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr



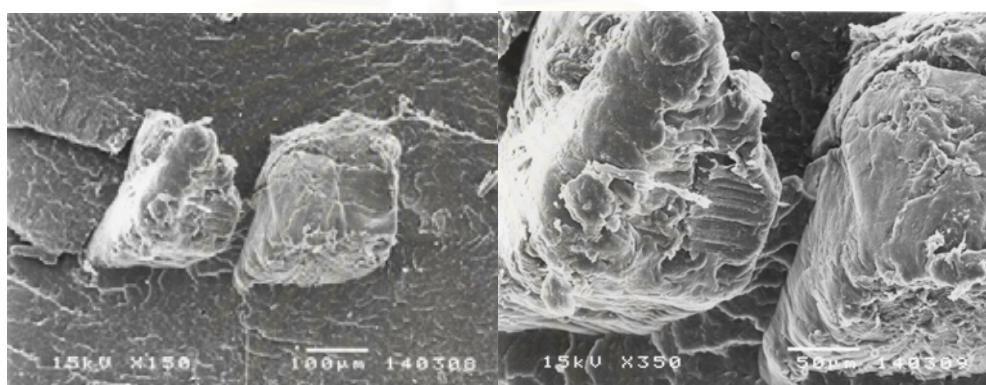
รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 10 phr ส่วนมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทีลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr



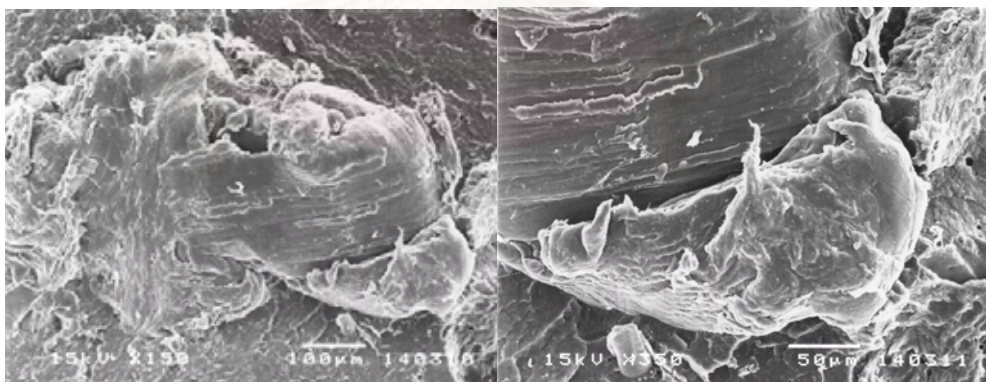
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr ส่วนมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทีลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr



รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเฟต 20 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์
พอลิไพโรฟิลีนและพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr



รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเฟต 30 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์
พอลิไพโรฟิลีนและพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr



รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเฟต 40 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์
พอลิไพโรฟิลีนและพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นอย่างละ 5 phr

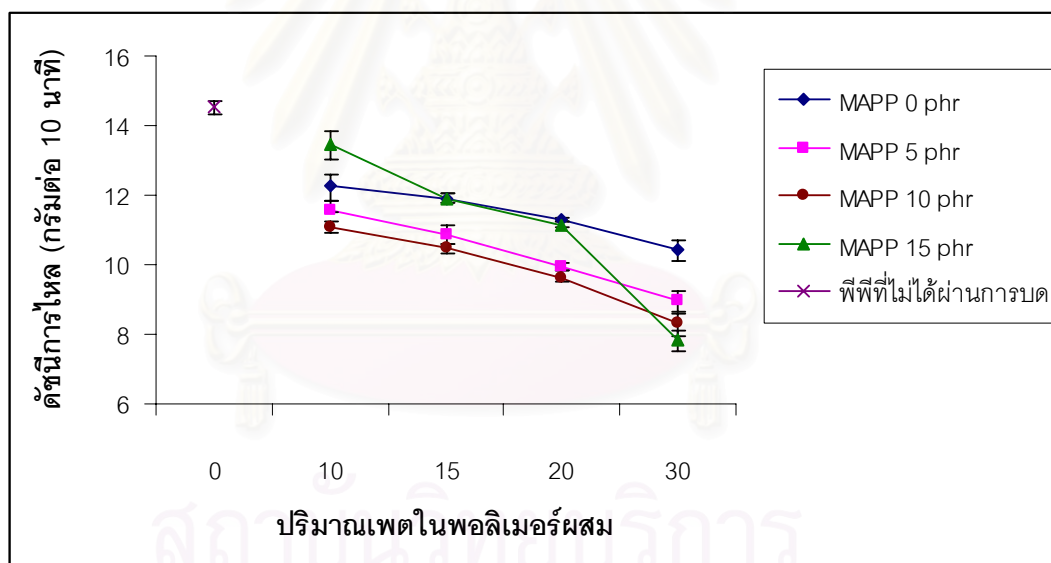
จากรูปสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อปริมาณเฟตเพิ่มขึ้น เฟตเริ่มเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน เพราะมีเฟตบางส่วนไม่เข้ากันกับพอลิไพโรฟิลีน เนื่องจากปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นมีปริมาณคงที่ที่ 5 phr

4.3 ผลของปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ดัชนีการไหล สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก สมบัติทางความร้อน ปริมาณผลึก และสัณฐานวิทยาโดยนำผงพอลิเมอรัสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และพेटจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานในอัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ โดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร แล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีด และขึ้นรูปป็นชิ้นทดสอบ โดยในระบบของพอลิเมอรัสมประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนมีปริมาณ 100 phr ส่วนปริมาณของพेटอยู่ระหว่าง 0-30 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีปริมาณ 0-15 phr ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

4.3.1 ดัชนีการไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพेट และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมกับดัชนีการไหล แสดงไว้ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ดัชนีการไหลของพอลิเมอรัสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพेट และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

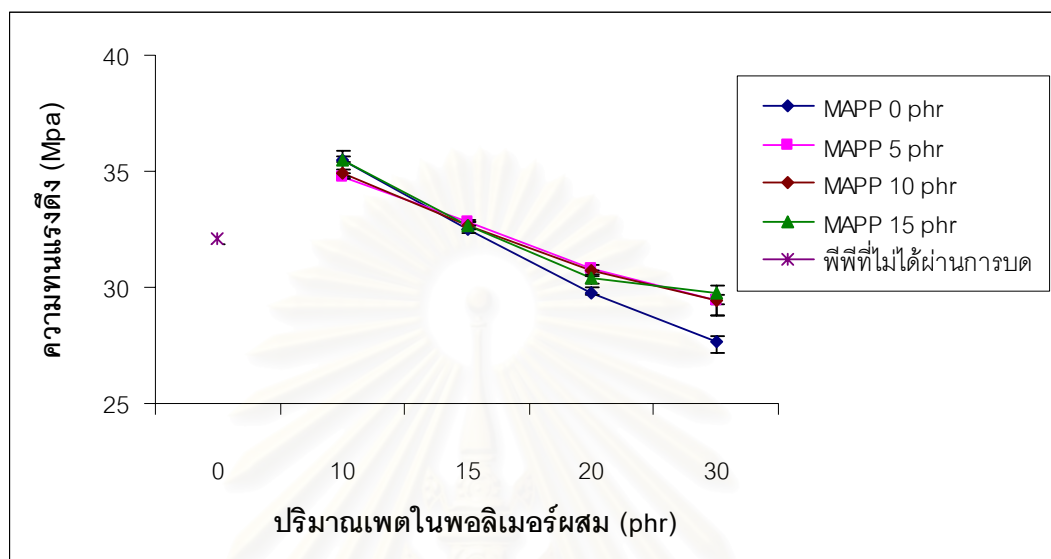
จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณพेटเพิ่มมากขึ้น ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ เนื่องจาก อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบค่าดัชนีการไหล (230°C) นั้นต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพेट (265°C) แต่สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ทำให้พेटในพอลิเมอรัสมนั้นมีลักษณะเหนียว ด้วยเหตุนี้เมื่อปริมาณพेटในพอลิเมอรัสมเพิ่มมากขึ้น ความเหนียวจึงเพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลง

เมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลง เพราะมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนไปเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต โดยทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ซึ่งเห็นได้จากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ผสมมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีค่าดัชนีการไหลที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เพราะพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ผสมมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้น พอลิโพรพิลีนที่เป็นเมทริกซ์เฟสทำหน้าที่เคลือบเพตให้ไหลออกจากหัวโอรีฟิช โดยไม่เกิดแรงดึงดูดกับเพต แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่มีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่า เพราะ เกิดแรงดึงดูดระหว่างมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนกับเพต และมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนกับพอลิโพรพิลีน ทำให้เวลาพอลิโพรพิลีนไหลผ่านหัวโอรีฟิชนั้นถูกดึงให้ไหลออกอย่างช้าๆ โดยเพต ด้วยเหตุนี้เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ นั้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมขณะหลอมเหลวมีความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมจึงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่

ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเพต 10 15 20 และ 30 phr ตามลำดับ และ มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ 0 5 และ 10 phr ตามลำดับนั้นมีค่าดัชนีการไหลที่มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเพต และมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสม ยกเว้นพอลิเมอร์ผสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ 15 phr เห็นว่าที่ปริมาณเพต 10 phr นั้นมีค่าดัชนีการไหลที่สูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ 5 และ 10 phr เนื่องจากปริมาณมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณที่มากเกินไป แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ 15 phr พบว่าค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลง เพราะเมื่อปริมาณเพตมากขึ้น ปริมาณการใช้มาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตก็มากขึ้นตาม แต่อย่างไรก็ตามการใช้มาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 15 phr ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเพตอยู่ 15 และ 20 phr นั้นมีปริมาณของมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมากเกินไป แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพตจาก 15 และ 20 phr เป็น 30 phr พบว่าการใช้มาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ 15 phr ทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับปริมาณเพต 20 phr เพราะมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยในการเชื่อมประสานเพตที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นกับพอลิโพรพิลีน นอกจากมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตแล้ว ยังช่วยในการกระจายตัวของเพตในพอลิโพรพิลีนอีกด้วย

4.3.2 ความทนแรงดึง การยึดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.18



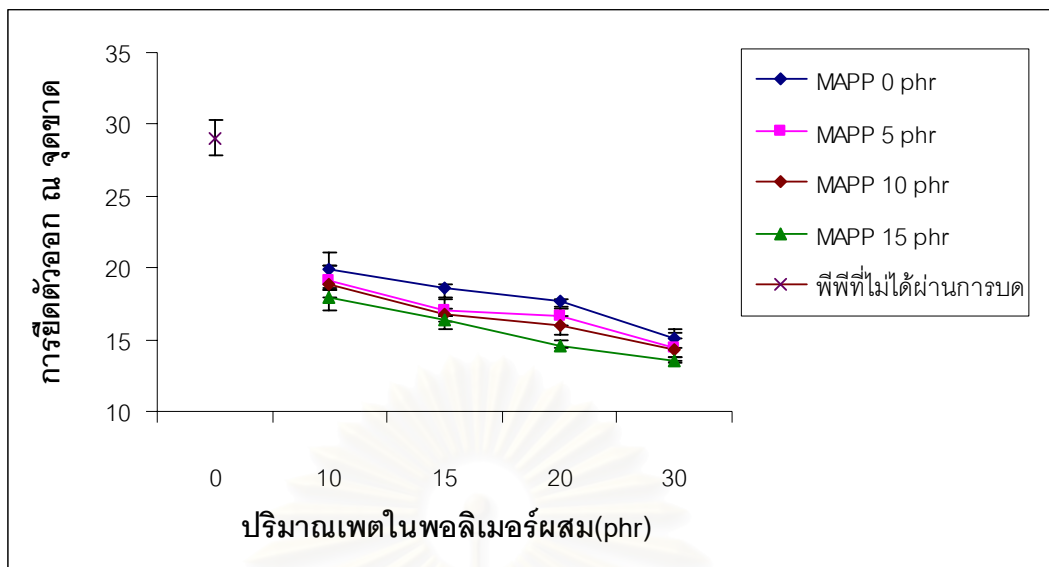
รูปที่ 4.18 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดต่ำลง เพราะเพตประกอบด้วยโครงสร้างที่มีหมู่อะโรเมติกในสายโซ่โมเลกุลจึงมีสมบัติที่แข็ง เกิดการยึดดึงได้น้อย ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกับพอลิโพรพิลีนที่มีสมบัติคล้ายยางที่อุณหภูมิต่ำทำให้เมื่อนำไปทดสอบสมบัติด้านแรงดึงพบว่า เมื่อเพตในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณ 10 phr เพตทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเพตมีความทนแรงดึงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพตเป็น 15 20 และ 30 phr ตามลำดับ พบว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเพตเริ่มจับกลุ่มกันมากขึ้น เพราะ เพตมีหมู่เอสเทอร์ซึ่งมีขั้ว แต่พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ด้วยเหตุนี้ เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้นจึงเกิดการรวมตัวเป็นก้อนและแยกตัวออกจากพอลิโพรพิลีนที่เป็นเมทริกซ์เฟส[31] ทำให้ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ปริมาณเพตต่ำๆ ไม่เกิดการรวมตัวกันของเพต เนื่องจากเพตมีปริมาณที่น้อย ประกอบกับขั้นตอนการผลิตตั้งแต่ขั้นตอนการบดด้วย กระบวนการอัดรีด และกระบวนการฉีดช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสม ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเพตอยู่ 10 phr จึงสูงกว่าค่าความทนแรงดึงพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบด

เมื่อมีการผสมมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสม พบว่าเมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอรัสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ณ ทุกปริมาณของเพตในพอลิเมอรัสม โดยพอลิเมอรัสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ 15 phr นั้นมีค่าความทนแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือ 10 5 และ 0 phr ตามลำดับ เนื่องจากมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน กับเพต ช่วยให้มี ความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยข้างหนึ่งจับกับเพต อีกข้างหนึ่งจับกับพอลิโพรพิลีนอยู่ และช่วยในการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอรัสมอีกด้วย

เมื่อนำพอลิเมอรัสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ไปทำการทดสอบความทนแรงดึง พบว่า ค่าความทนแรงดึงที่ได้สูงกว่าพอลิเมอรัสมที่ไม่ผสมมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทุกๆ ปริมาณของเพต คือ 10 15 20 และ 30 phr เพราะระหว่างการทดสอบความทนแรงดึงนั้น เมื่อขึ้นทดสอบที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่เกิดการยึดดึงออกจะถูกหยุดโดยเพต เนื่องจากการเชื่อมกันด้วยมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างของขึ้นทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามที่มีเพตอยู่ในพอลิเมอรัสม 10 phr พบว่า ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอรัสมที่ไม่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่มีค่าความทนแรงดึงใกล้เคียงกับพอลิเมอรัสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ เนื่องจากมีปริมาณเพตอยู่ในพอลิเมอรัสมที่น้อย ทำให้อิทธิพลของมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนส่งผลต่อความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต นั้นเห็นได้อย่างไม่ชัดเจน แต่เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้นเป็น 15 20 และ 30 phr ตามลำดับ พบว่า ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอรัสมที่ไม่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่นั้นเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับพอลิเมอรัสมที่มีมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ เนื่องจากมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนไปเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงอย่างช้าๆ เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้มาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนยังช่วยให้เพตกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น ไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน แต่ปริมาณเพตที่ผสมอยู่ในพอลิโพรพิลีนที่มากเกินไปส่งผลให้ความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมกับการยึดตัวออก ณ จุดขาด แสดงไว้ในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิยูเรเทนและมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

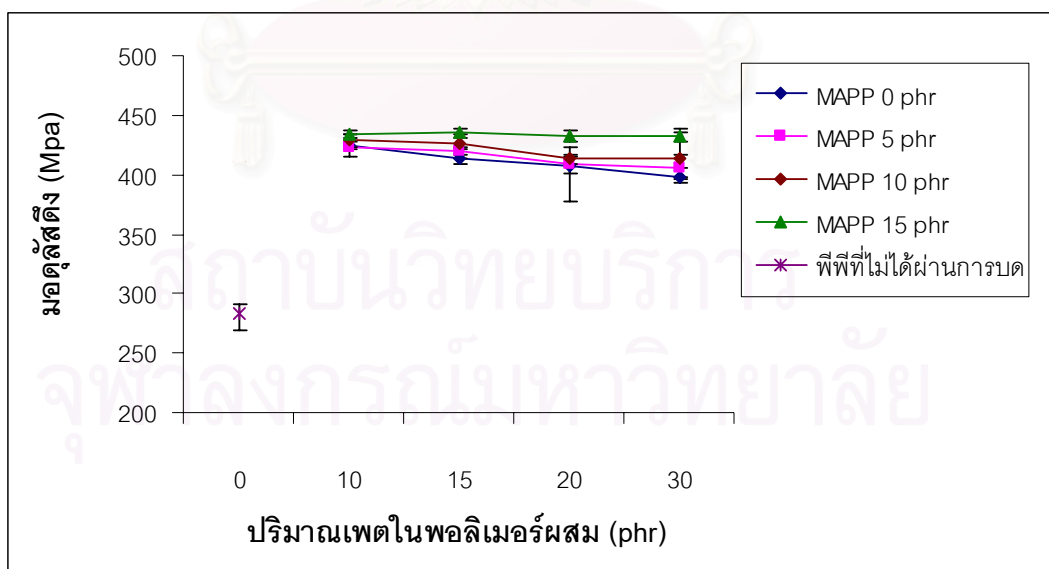
จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อทำการผสมพอลิยูเรเทนในพอลิเมอร์ผสมนั้นส่งผลต่อการยืดตัวออก ณ จุดขาดเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผ่านการอบ เนื่องจากพอลิยูเรเทนไปขัดขวางการยืดตัวออกของพอลิเมอร์ผสม และความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิยูเรเทนส่งผลต่อการยืดตัวออก ณ จุดขาด เนื่องจากสมบัติที่ต่างกันระหว่างพอลิโพรพิลีน กับพอลิยูเรเทน โดยพอลิโพรพิลีนมีสมบัติที่ยืดตัวได้ดี แต่พอลิยูเรเทนที่ยืดตัวที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อนำพอลิโพรพิลีน และพอลิยูเรเทนมาผสมกัน เมื่อเกิดการยืดตัว พอลิโพรพิลีนที่เป็นเมทริกซ์เกิดการยืดตัว แต่พอลิยูเรเทนเกิดการยืดตัวที่น้อยกว่าพอลิโพรพิลีน ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างการยืดตัว (pull out) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมต่ำลง และเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิยูเรเทนจาก 10 เป็น 15 20 และ 30 phr ตามลำดับ พบว่าการยืดตัวออก ณ จุดขาดลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของพอลิยูเรเทนในพอลิเมอร์ผสม เพราะเมื่อปริมาณพอลิยูเรเทนเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีโอกาสเกิดช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิยูเรเทนระหว่างการยืดตัวเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้การยืดตัวออก ณ จุดขาดลดต่ำลง

เมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม พบว่าการยืดตัวออก ณ จุดขาดนั้นแปรผกผันกับปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม คือ เมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น การยืดตัวออก ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เชื่อมกันระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิยูเรเทน เมื่อเกิดการยืดตัว พอลิโพรพิลีนเกิดการยืดออก แต่ถูกยึดไว้ด้วยพอลิยูเรเทนที่ยืดตัวออก ณ จุดขาดที่ต่ำกว่า ด้วยเหตุนี้เมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์

พอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้นทำให้การยึดดึงของพอลิเมอร์ผสมมีการยืดตัวออก ณ จุดขาด ที่ลดต่ำลง เพราะเกิดแรงดึงดูระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตเพิ่มมากขึ้น

เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และเพตในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีการยืดตัวออก ณ จุดขาดต่ำที่สุด โดยที่ปริมาณเพต 30 phr นั้นมีการยืดตัวออก ณ จุดขาด ต่ำที่สุด รองลงมาคือ 20 15 และ 10 phr ตามลำดับ ส่วนปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีการยืดตัวออก ณ จุดขาด ต่ำที่สุดคือ 15 phr รองลงมาคือ 10 5 และ 0 phr ตามลำดับ เนื่องจาก มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน กับเพต ทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เวลาทำการยึดดึง ค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาดจึงลดต่ำลง เพราะ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น แม้เติมในปริมาณที่น้อย เพราะเกิดความเข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีการยืดตัวออก ณ จุดขาดที่สูงกว่า เพราะพอลิโพรพิลีนไม่เกิดแรงดึงดูกับเพต ทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดการยืดออกได้ง่าย แต่เกิดการขาดออก เพราะการหลุดออกของเพตในพอลิเมอร์ผสม หรือที่เรียกกันว่า pull out

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับมอดุลัสดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

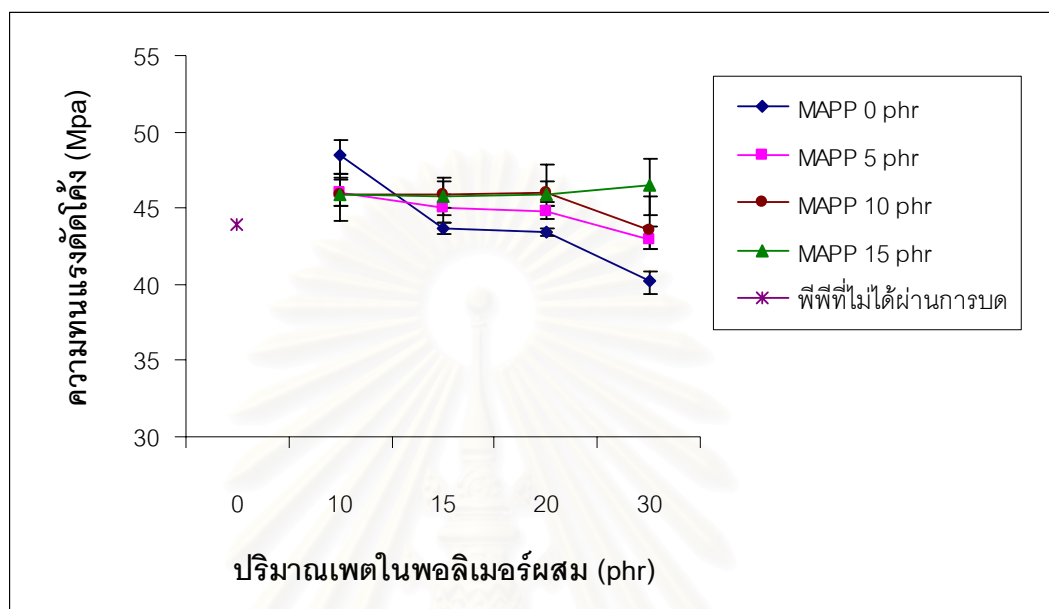
จากผลการทดสอบพบว่า ค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าที่สูงกว่าค่ามอดุลัสดึงของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบด เพราะมอดุลัสดึง คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นส่วนด้วยความเครียด ดังนั้นพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบดที่มีค่ามอดุลัสดึงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม เพราะพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิห้องมีสถานะคล้ายยาง ทำให้ใช้แรงในการทำให้ยืดออกที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเพตมีค่าความทนแรงดึงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีน และมีการยืดออกที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนด้วย ด้วยเหตุนี้ พอลิโพรพิลีนจึงมีค่ามอดุลัสดึงที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม และเมื่อเพิ่มปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมพบว่า ค่ามอดุลัสดึงมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณเพตผสมอยู่ในพอลิโพรพิลีนในปริมาณต่ำ คือ 10 phr เพตไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มแต่เกิดการกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนที่เป็นเมทริกซ์แทน เนื่องจากกระบวนการบดผสม และการขึ้นรูปช่วยให้เพตกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ เพตจึงทำหน้าที่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิโพรพิลีนให้มีค่ามอดุลัสที่สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมนั้นค่ามอดุลัสดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเพตเริ่มจับตัวกันเป็นกลุ่ม ส่งผลต่อค่ามอดุลัสดึง แต่อย่างไรก็ตามทุกๆ ปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมตั้งแต่ 10 15 20 และ 30 phr พบว่าจะมีค่ามอดุลัสดึงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด

ปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมแปรผันตรงกับค่ามอดุลัส กล่าวคือ เมื่อปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้น ค่ามอดุลัสดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ 15 phr ให้ค่ามอดุลัสดึงที่สูงที่สุด รองลงมาคือ 10 5 และ 0 phr ตามลำดับ เนื่องจากมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยให้ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตนั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขึ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แต่มีการยืดดึงที่ต่ำลง ทำให้ค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนอยู่นั้นมีค่ามอดุลัสที่สูงมากขึ้น

เมื่อปริมาณเพต และปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามอดุลัสดึงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสม 0 5 และ 10 phr นั้นมีค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ปริมาณเพตมากๆ ถึงแม้ขึ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีเพตบางส่วนรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากปริมาณของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับปริมาณเพตที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็น 15 phr พบว่าที่ปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสม 20 30 และ 40 phr นั้นมีค่ามอดุลัสดึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr เนื่องจาก มีปริมาณมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตในปริมาณที่เพียงพอกับปริมาณเพตที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทั่วทั้งชิ้นทดสอบ

4.3.3 ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดัดโค้ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.21

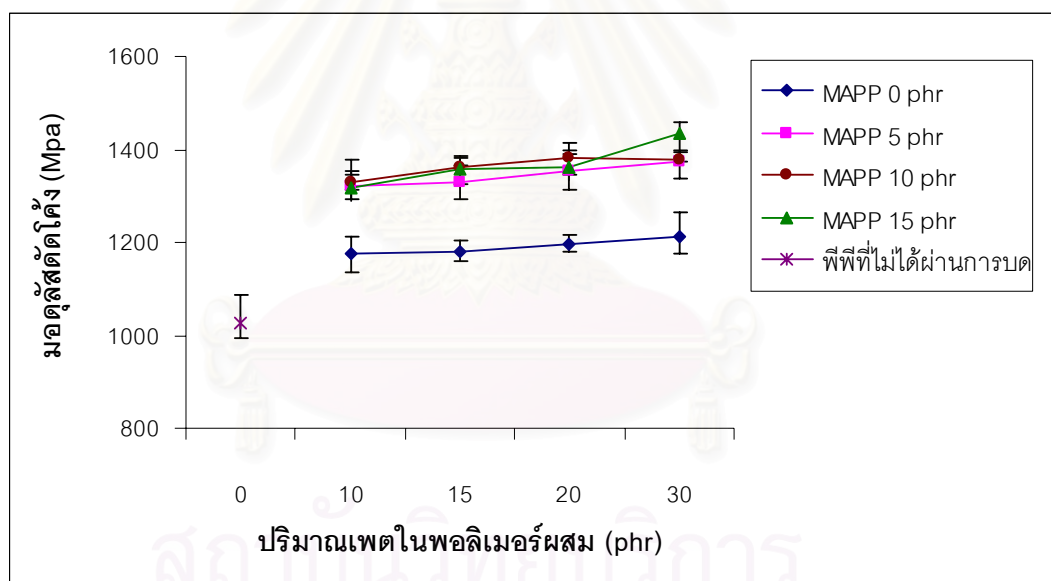


รูปที่ 4.21 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสม ความทนแรงดัดโค้งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ดังต่อไปนี้ เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นโดยไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน พบว่าความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกดจึงเกิดการแยกออกตรงช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงดัดโค้งลดต่ำลงเมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr พบว่า ที่ปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสม 10 phr นั้น มีความทนแรงดัดโค้งที่ดี แต่เมื่อปริมาณเพตเพิ่มขึ้นเป็น 15 20 และ 30 phr ตามลำดับนั้น ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เนื่องจากในช่วงแรกที่ปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณน้อย ปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพียง 5 phr นั้นเพียงพอต่อการเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตจึงทำให้ความทนแรงดัดโค้งเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 phr ตามลำดับ พบว่า ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr นั้นไม่

เพียงพอต่อการเชื่อมประสานเขตในพอลิเมอร์ผสมทั้งหมด ทำให้มีเขตบางส่วนไม่มีความเข้ากันกับพอลิโพรพิลีน เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกด เขตที่ไม่มีความเข้ากันกับพอลิโพรพิลีนเหล่านี้เกิดการแยกตัวทำให้ความทนแรงดัดโค้งลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็น 10 phr พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดัดโค้งได้ดีเมื่อมีปริมาณเขตในพอลิเมอร์ผสมเป็น 10 15 และ 20 phr แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเขตเป็น 30 phr ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงในทันที แสดงว่า ปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr นั้นไม่เพียงพอต่อการเชื่อมประสานเขต 30 phr ให้เข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนทั้งหมด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็น 15 phr พบว่า ความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ปริมาณเขตในพอลิเมอร์ผสม 30 phr เพราะ เขตเกิดแรงดึงดูดกับพอลิโพรพิลีน และไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงต้องใช้แรงกดเพิ่มมากขึ้นในการทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการยืดออก

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเขต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับมอดูลัสดัดโค้ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 มอดูลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเขตและ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อปริมาณเขตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อค่ามอดูลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน โดยในตอนแรกเมื่อพอลิเมอร์ผสมไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน พบว่าเมื่อเขตในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม

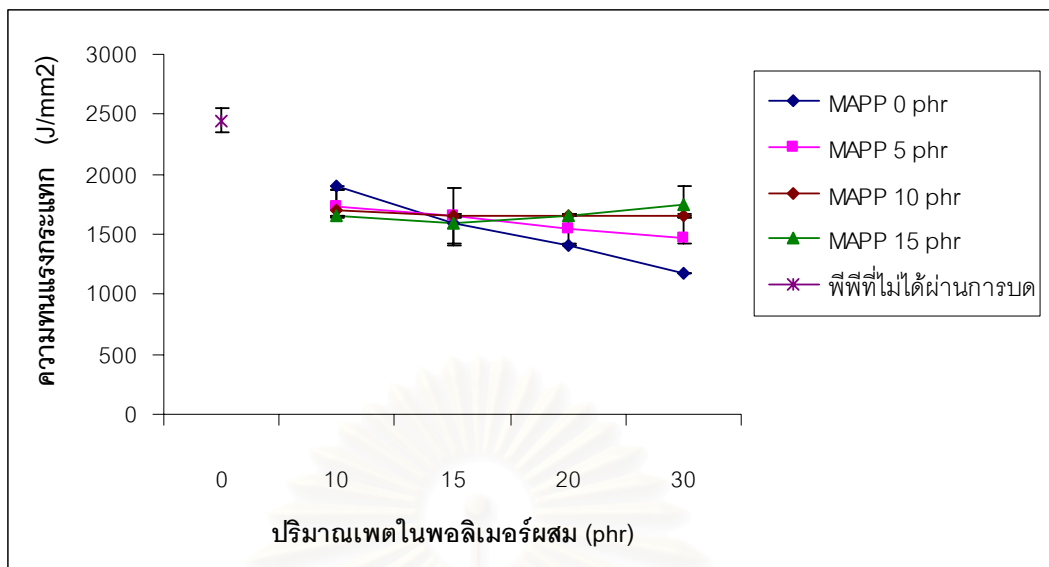
เพราะ ปริมาณเพตในพอลิเมอรัสมที่เพิ่มมากขึ้นทำหน้าที่เสริมความต้านทานการตัดโค้ง เนื่องจาก เพตมีความทนต่อแรงกดมากกว่าพอลิโพรพิลีน ประกอบกับเมื่อปริมาณของเพตเพิ่มมากขึ้น เพตเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มเป็นก้อน โดยกลุ่มของเพตนี้จะสามารถรับแรงกดได้ดี ทำให้พอลิเมอรัสมมีความอดุ้ลัดโค้งที่เพิ่มสูงขึ้น

เมื่อทำการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสม ปรากฏว่าค่ามอดุ้ลัดโค้งของพอลิเมอรัสมเพิ่มมากขึ้นในทันที เมื่อเทียบกับพอลิเมอรัสมที่ไม่ได้ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ณ ทุกอัตราส่วนของปริมาณเพต เนื่องจากมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เชื่อมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตให้เข้ากัน และทำให้เพตเกิดการกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนที่เป็นเมทริกซ์มากกว่ารวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงต้องใช้แรงกดที่มากขึ้น เพื่อทำลายแรงดึงดูดระหว่างมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนกับพอลิโพรพิลีน และเพตที่เกิดขึ้น ประกอบกับเพตมีความทนแรงดัดโค้งที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีน และเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอรัสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้พอลิเมอรัสมมีความอดุ้ลัดโค้งสูงขึ้น เนื่องจาก เพตช่วยกันต้านแรงกด ทำให้ต้องใช้แรงกดมากขึ้นในการทำให้พอลิเมอรัสมเกิดการยืด โดยปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมนั้นสัมพันธ์กับปริมาณของเพตในพอลิเมอรัสมด้วย กล่าวคือเมื่อปริมาณของเพตในพอลิเมอรัสมมากขึ้น ต้องใช้ปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นตาม เพื่อเชื่อมพอลิโพรพิลีนกับเพตได้หมด ถ้าใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณน้อย ทำให้ค่ามอดุ้ลัดโค้งลดลง เพราะมีเพตบางส่วนไม่เข้ากับพอลิโพรพิลีน เมื่อได้รับแรงกดจึงเกิดการแยกตัวของเพตออกจากพอลิโพรพิลีน ทำให้ค่ามอดุ้ลัดโค้งลดลง แต่ถ้าปริมาณของเพตมีปริมาณที่น้อย และใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณที่สูง ค่ามอดุ้ลัดโค้งที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ถึงแม้เกิดแรงดึงดูดระหว่างมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนด้วยกัน แต่ผลของมันก็ไม่ส่งผลเท่ากับการเพิ่มปริมาณของเพตในพอลิเมอรัสม

อย่างไรก็ตามจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง พบว่าพอลิเมอรัสมที่มีเพตผสมอยู่นั้นช่วยเพิ่มค่ามอดุ้ลัดโค้งให้สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ เลย และเมื่อทำการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนพบว่า ค่ามอดุ้ลัดโค้งที่ได้มีค่าสูงมากขึ้น

4.3.4 ความทนแรงกระแทก

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมกับความทนแรงกระแทก แสดงไว้ในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพตและ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเพตไปกระจายตัวอยู่ในพอลิโพรพิลีน โดยไม่มีความเข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ทำให้เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกระแทกเกิดการหักบริเวณช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต และเมื่อปริมาณเพตในพอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้น ช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตก็เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกระแทกทำให้เกิดการแตกหักที่ง่ายยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้ความทนแรงกระแทกจึงลดลงเมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น

เมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม พบว่าความทนแรงกระแทกมีค่าเปลี่ยนไป คือ พอลิเมอร์ผสมที่มีเพตผสมอยู่ 10 phr นั้นมีความทนแรงกระแทกลดลงเนื่องจาก มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพต แต่เนื่องจากเพตมีปริมาณที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถเสริมแรงของพอลิเมอร์ผสมได้ และเมื่อเพิ่มปริมาณเพตเป็น 15 20 และ 30 phr ตามลำดับ พบว่า การผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมให้ค่าความทนแรงกระแทกที่สูงกว่าการไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เพราะ เกิดความเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น จึงรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น โดยที่ปริมาณเพต 15 phr นั้นการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 10 และ 15 phr ให้ค่าความทนแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเพตมีปริมาณน้อย ความต้องการมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนจึงมีปริมาณที่ไม่สูง ด้วยเหตุนี้การใช้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมต้องคำนึงถึงปริมาณเพตด้วย อย่างไรก็ตามการผสมมาลิกแอนไฮ

ไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมไม่สามารถทำให้เพดเกิดความเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนอย่างสมบูรณ์ เพียงแต่เข้ากันได้บางส่วน ความทนแรงกระแทกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มาก และเมื่อปริมาณเพดในพอลิเมอรัสมเพิ่มเป็น 20 และ 30 phr ตามลำดับ พบว่าปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีผลต่อความทนแรงกระแทก โดยที่ปริมาณเพด 20 phr ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอรัสมที่มีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่ 5 phr มีค่าความทนแรงกระแทกที่ลดลง เพราะมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่น้อยเกินไป เมื่อเทียบกับปริมาณเพดในพอลิเมอรัสมที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีเพดบางส่วนไม่เข้ากับพอลิโพรพิลีน โดยบริเวณที่ไม่เข้ากันนี้เป็นจุดเริ่มต้นการหักของชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็น 10 และ 15 phr ตามลำดับ พบว่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอรัสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเพดในพอลิเมอรัสมเป็น 30 phr พบว่าการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 15 phr ให้ค่าความทนแรงกระแทกที่สูงที่สุด รองลงมาคือ 10 5 และ 0 phr ตามลำดับ เนื่องจากเพดที่มีปริมาณมากมีความต้องการมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในปริมาณที่สูง โดยปริมาณเพดที่เพิ่มมากขึ้นช่วยในการรับแรงกระแทก แต่เนื่องจากเพดมีความแข็งที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอรัสมนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มาก

4.3.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพด และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิ

เมอร์สมที่มีเพด 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณ 0-15 phr

ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (phr)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
0	152.47	116.13	442.18
5	152.69	118.34	441.96
10	153.71	118.47	432.17
15	154.02	118.17	429.01

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณของมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอรัสม เนื่องจาก มาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเชื่อมประสานเพต และพอลิโพรพิลีนให้มีความเข้ากันมากยิ่งขึ้น ทำให้ อุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มมากขึ้น โดยมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นทำให้เพตมีการกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนที่ดีขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอรัสมที่มีมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นสูงกว่าที่ไม่ผสมมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอรัสมที่มีการผสมมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนพบว่า อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยให้เพตเกิดการกระจายตัวดีในพอลิโพรพิลีน ซึ่งเพตนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 423.72°C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน ส่วนพอลิเมอรัสมที่ไม่มีการผสมมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า เพราะเพตมีการกระจายตัวในพอลิเมอรัสมที่ไม่ดี ทำให้บริเวณที่สุ่มขึ้นมาทำการทดสอบนั้นมีเพตจับตัวเป็นกลุ่มก้อน เมื่อเทียบกับพอลิเมอรัสมที่มีมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนผสมอยู่นั้นมีการกระจายตัวของเพตแบบค่อนข้างสม่ำเสมอ

4.3.6 ปริมาณผลึก

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอรัสม กับปริมาณผลึก แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

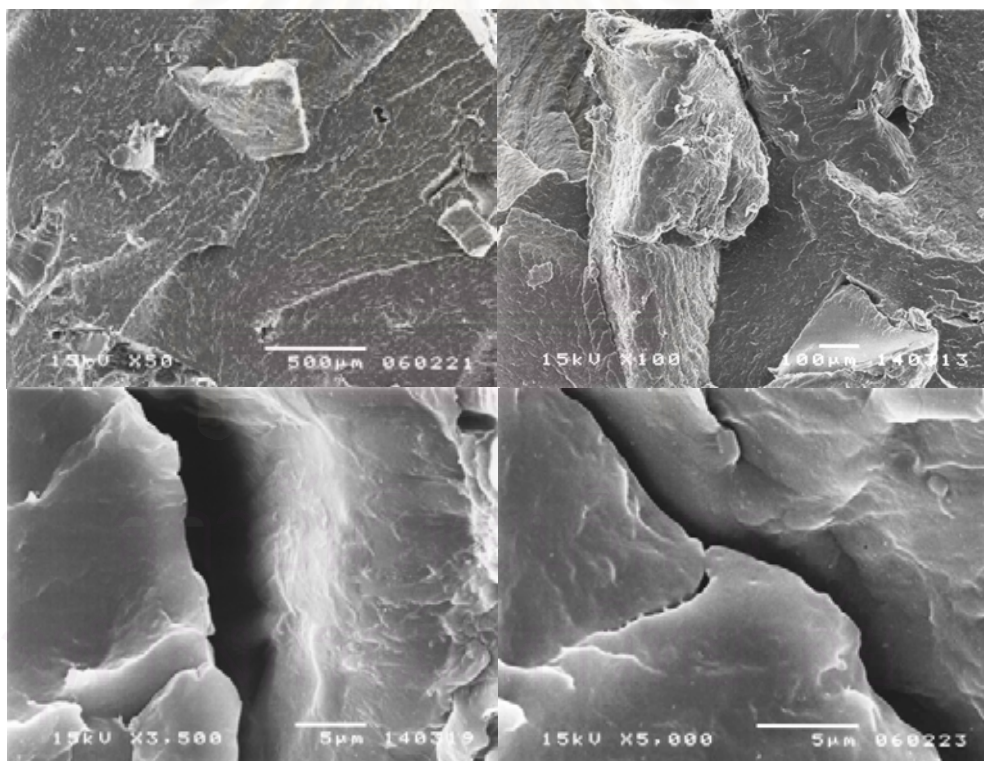
ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลึกของพอลิเมอรัสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณ 0-15 phr

มาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (phr)	ปริมาณผลึก (%)
0	37.96
5	27.84
10	27.39
15	26.22

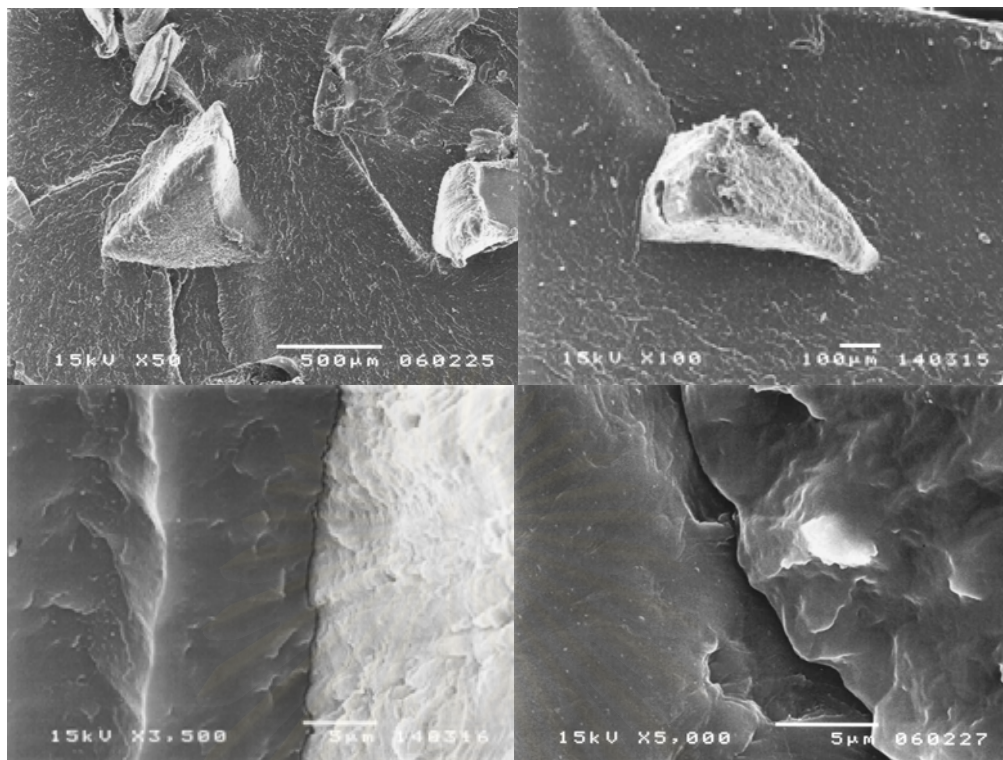
ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนไปลดการจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีนลง เพราะมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นได้น้อยลง ประกอบกับเมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นทำให้พอลิโพรพิลีนมีปริมาณลดลงเมื่อน้ำหนักของชั้นทดสอบเท่าเดิม เพราะปริมาณผลึก คิดจากปริมาณความร้อนที่ทำให้ผลึกของพอลิเมอร์ผสมเกิดการหลอมเหลวต่อ น้ำหนักในหน่วยกรัม

4.3.7 สัณฐานวิทยา

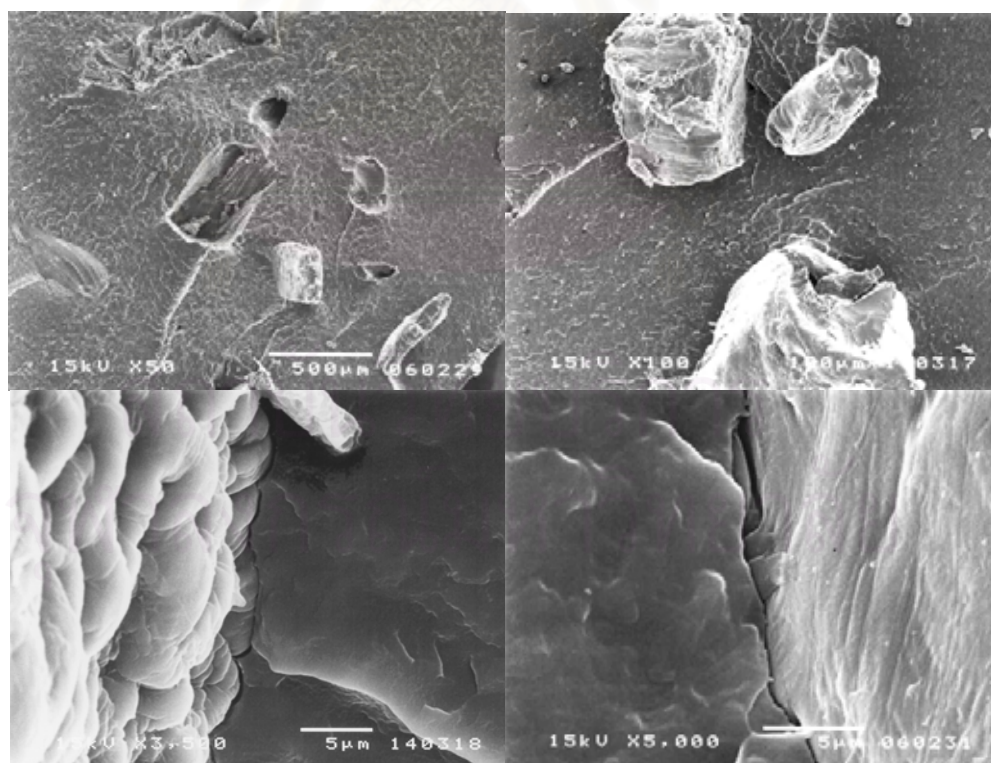
ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับสัณฐานวิทยา แสดงไว้ในรูปที่ 4.24-4.28



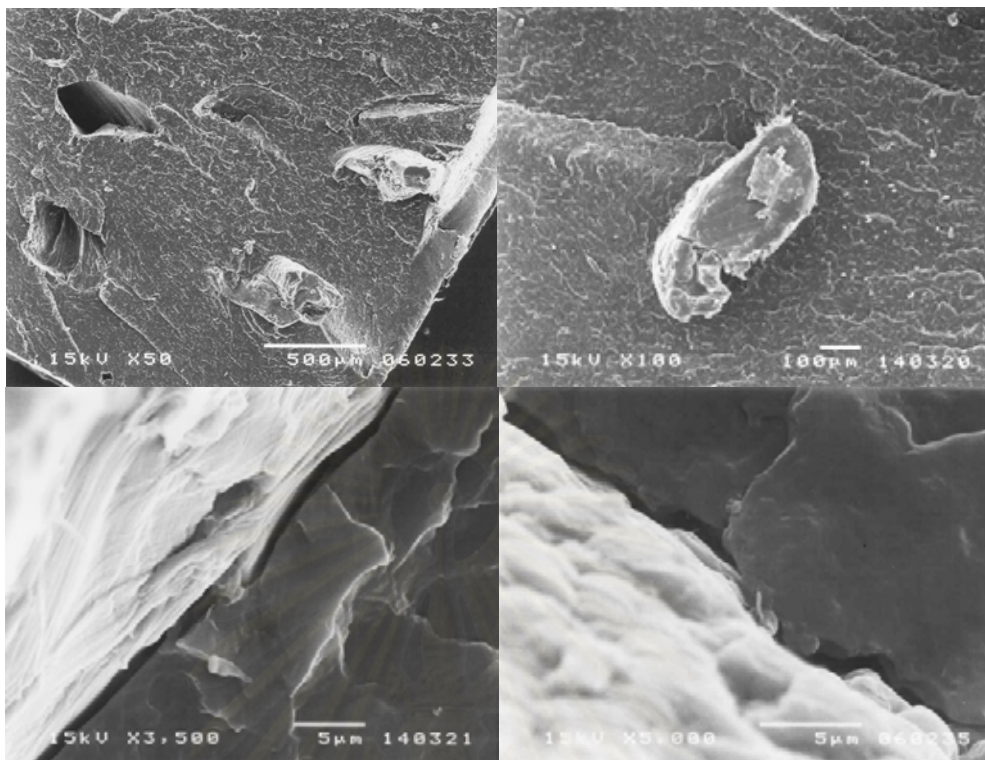
รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ



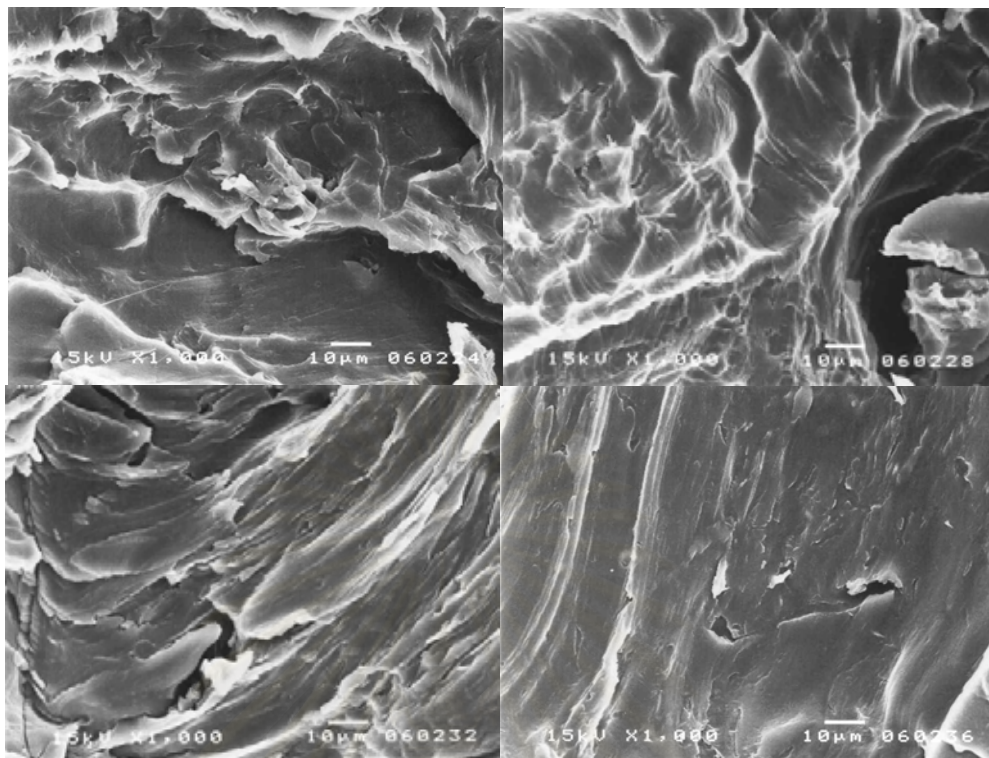
รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr และมาลิกิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 10 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีเฟด 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีน 15 phr โดยมีกำลังขยาย 50 100 3,500 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีนในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น เฟดมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นในพอลิไพโรฟิลีน และการไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีนในพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดช่องว่างระหว่างพอลิไพโรฟิลีน และเฟด และเกิดการรวมกลุ่มกันของเฟดเกิดขึ้น แต่เมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีนในพอลิเมอร์ผสม ช่องว่างระหว่างพอลิไพโรฟิลีน และเฟดมีขนาดเล็กลง จนสุดท้ายแทบแนบสนิทติดกันเมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีน 15phr และพบว่าการเชื่อมกันเกิดขึ้นระหว่างพอลิไพโรฟิลีน และเฟดด้วยเมื่อเติมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีน ด้วยเหตุนี้สมบัติเชิงกลต่างๆ จึงมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีนในพอลิเมอร์ผสม

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของเฟดในพอลิเมอร์ผสมนั้นที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.28 พบว่า เมื่อมีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิไพโรฟิลีนในพอลิเมอร์ผสมนั้น พื้นผิวมีลักษณะที่เรียบขึ้น ความขรุขระลดลง เนื่องจากพอลิไพโรฟิลีน และเฟดมีความเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นผิวของพอลิไพโรฟิลีนและเฟดนั้นเข้าใกล้กันมากขึ้น ช่องว่างมีขนาดเล็กลง ดังนั้นพื้นผิวจึงมีความเรียบมากขึ้น



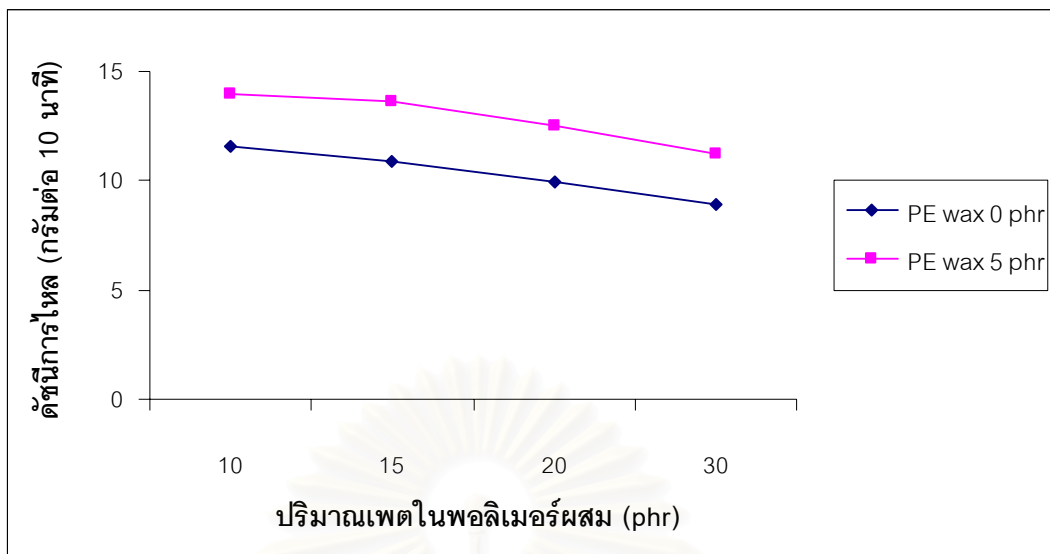
รูปที่ 4.28 ลักษณะหลุมที่เพตเกิดการหลุดออกที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเอทิลีนที่มีเพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 5 10 และ 15 phr ตามลำดับ

4.4 ผลของปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเอทิลีนที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ดัชนีการไหล สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก สมบัติทางความร้อน ปริมาณผลึก และสัณฐานวิทยาโดยนำผงพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานในอัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ โดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร มาขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีด และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโดยกระบวนการฉีด ในระบบของพอลิเอทิลีนผสมประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณ 100 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr ส่วนเพต และพอลิเอทิลีนแวกซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

4.4.1 ดัชนีการไหล

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเอทิลีนผสมกับดัชนีการไหล แสดงไว้ในรูปที่ 4.29

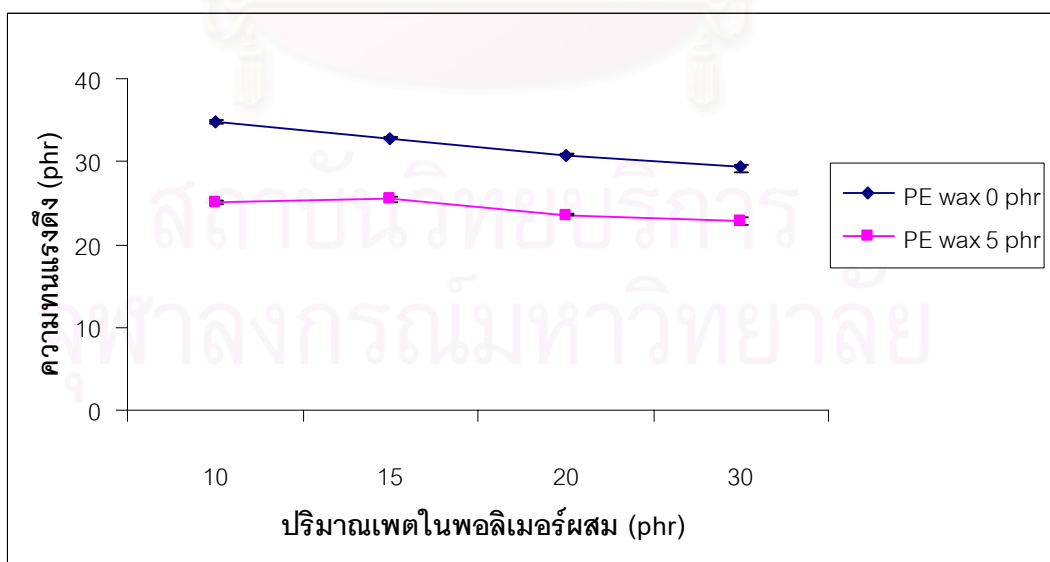


รูปที่ 4.29 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแว็กซ์

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแว็กซ์ในพอลิเมอร์ผสม ค่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะพอลิเอทิลีนแว็กซ์เป็นพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความหนืดน้อยไปช่วยลดความหนืดที่เกิดขึ้นจากเพต และช่วยให้การไหลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเพตพบว่าค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลงทั้งกรณีที่ไม่เติมและเติมพอลิเอทิลีนแว็กซ์

4.4.2 ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแว็กซ์ในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดึงแสดงในรูปที่ 4.30

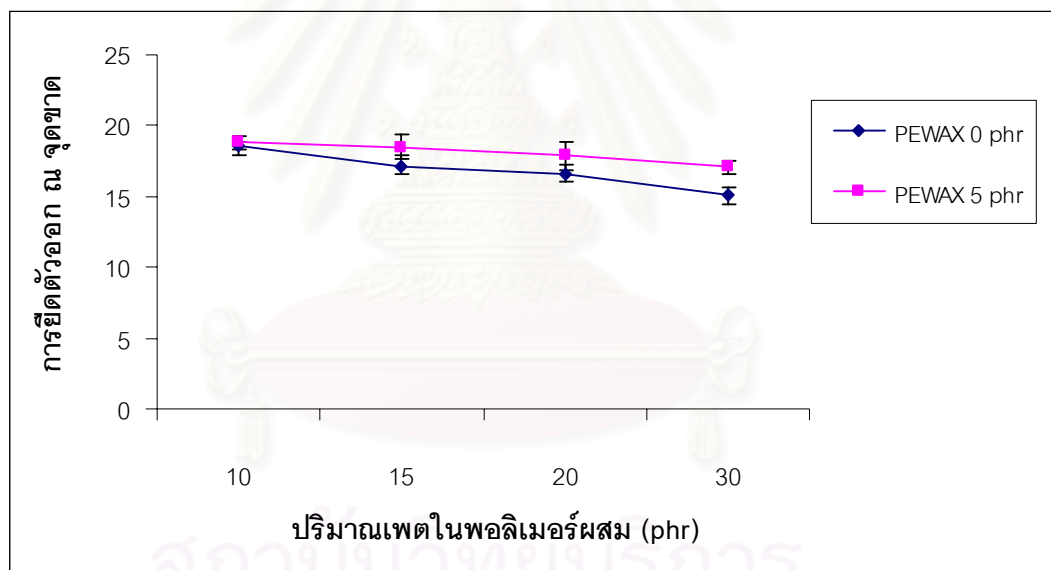


รูปที่ 4.30 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแว็กซ์

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอรัผสม 5 phr ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงลดต่ำลง เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์ไปแทรกตัวอยู่ในพอลิโพรพิลีน ช่วยให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดการลื่นไถล ทำให้ความทนแรงดึงลดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มปริมาณพेटในพอลิเมอรัผสมระหว่างพอลิเมอรัที่มี กับไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่ พบว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอรัทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดต่ำลง แต่พอลิเมอรัที่ไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้น ความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดต่ำลงอย่างรวดเร็วกว่าพอลิเมอรัที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่เมื่อปริมาณพेटเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยในการกระจายตัวของพेटในพอลิเมอรัผสม ทำให้พेटไม่จับกันเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอรัที่ไม่มีผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอรัผสมกับการยืดตัวออก ณ จุดขาด แสดงไว้ในรูปที่ 4.31

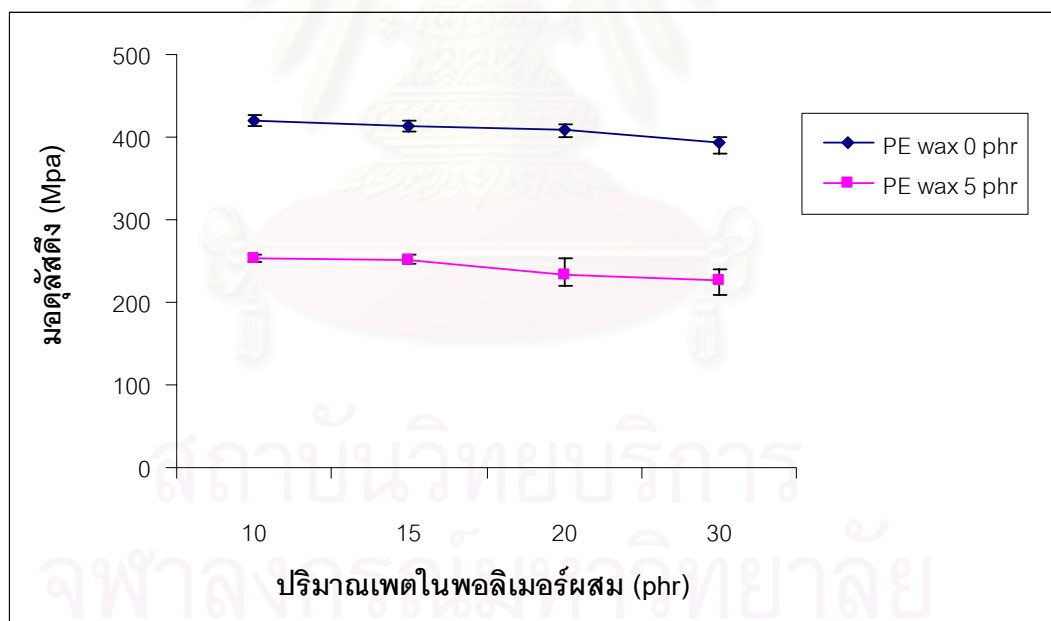


รูปที่ 4.31 การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอรัผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr ในพอลิเมอรัผสมนั้นส่งผลให้การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอรัผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกๆปริมาณพेटในพอลิเมอรัผสม เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดการขัดกันน้อยลงด้วยเหตุนี้จึงสามารถยืดตัวออกได้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการยืดตัวออก ณ จุดขาด ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสม กับไม่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้น เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การยืดตัวออก ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลง แต่เป็นการลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่ที่มีการยืดตัวออก ณ จุดขาดลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยในการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น เพราะ พอลิเอทิลีนแวกซ์เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการละลายกลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำช่วยทำให้เพตที่มีความหนืดสูงกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้นในพอลิเมอร์ผสม เพตจึงเกิดเกาะกลุ่มกันน้อยลง ส่งผลให้ค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาด นั้นลดลงอย่างช้าๆ เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่มีการยืดตัวออก ณ จุดขาด ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น เพราะ เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้นเกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้เกิดการแยกออกจากพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นเมทริกซ์ได้ง่าย ส่งผลให้การการยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสมกับมอดุลัสดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์

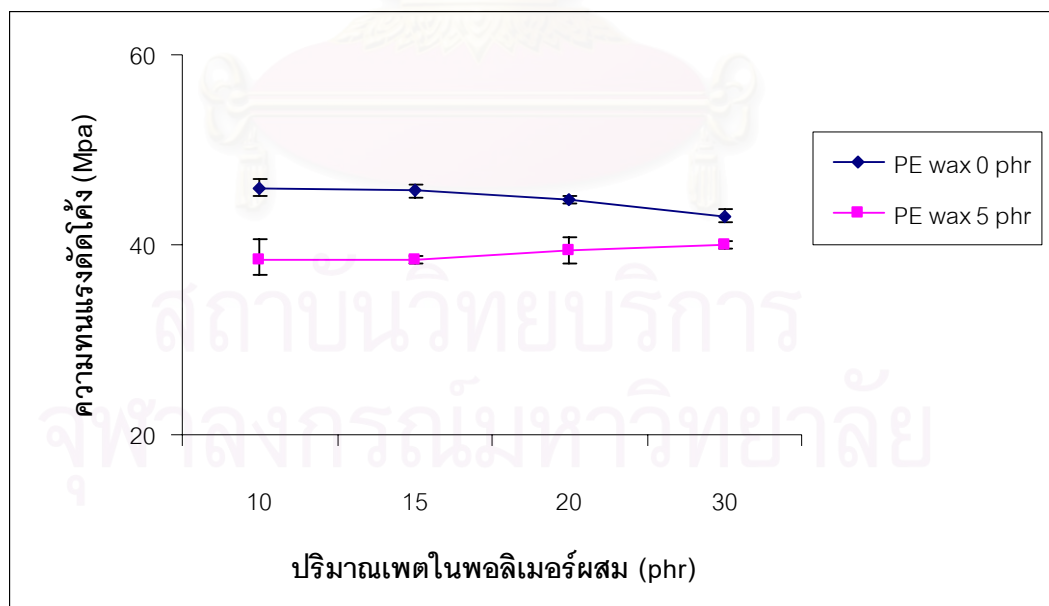
จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นส่งผลต่อค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือ เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสม 5 phr ทำให้ค่ามอดุลัสดึงมี

แนวโน้มลดลงต่ำลงในทุกๆ อัตราส่วนของเพต เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีการยึดตัวที่ดี ทำให้ค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่พอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นมีแนวโน้มลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสดึง ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่ กับไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่ ณ ปริมาณเพตที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้นมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มของเพตในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้ค่ามอดุลัสดึงลดต่ำลง และเมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น ค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่ เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยในการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่ามอดุลัสดึงลดลงอย่างช้าๆ โดยที่ค่ามอดุลัสดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากปริมาณของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับการใช้มาลิอิกแอนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนคองที่ 5 phr ซึ่งน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่ามอดุลัสดึงลดต่ำลง

4.4.3 ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดัดโค้ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.33



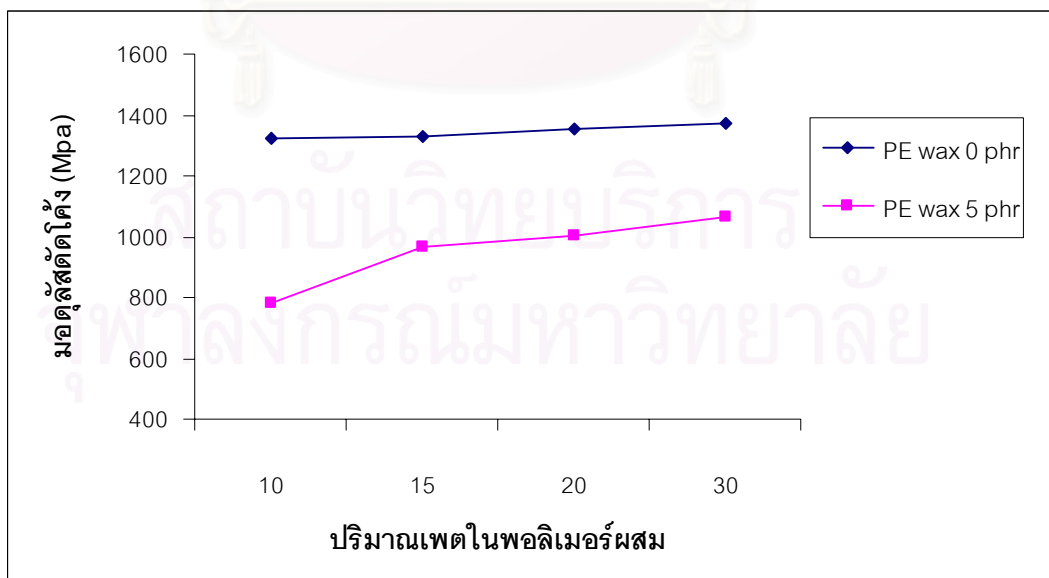
รูปที่ 4.33 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr ในพอลิเมอร์ผสม ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงทุกๆ ปริมาณของเพตในพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเกิดการลื่นไถลได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกด ทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ กับไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ ณ อัตราส่วนของเพตในปริมาณต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นมีความทนแรงดัดโค้งที่ลดต่ำลง เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้นมีความทนแรงดัดโค้งที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นมีเพตบางส่วนเกาะกลุ่มรวมตัวกันเป็นก้อน เนื่องจากความไม่เข้ากันกับพอลิโพรพิลีน เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกด จึงเริ่มเกิดการแยกออกจากกันบริเวณที่พอลิโพรพิลีน และเพตไม่เข้ากัน ด้วยเหตุนี้ความทนแรงดัดโค้งจึงมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้น พอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยในการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสม ไม่ให้จับรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงกดได้ดีมากยิ่งขึ้น ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเพตเพิ่มสูงขึ้น

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสมกับมอดูลัสดัดโค้ง แสดงไว้ในรูปที่

4.34



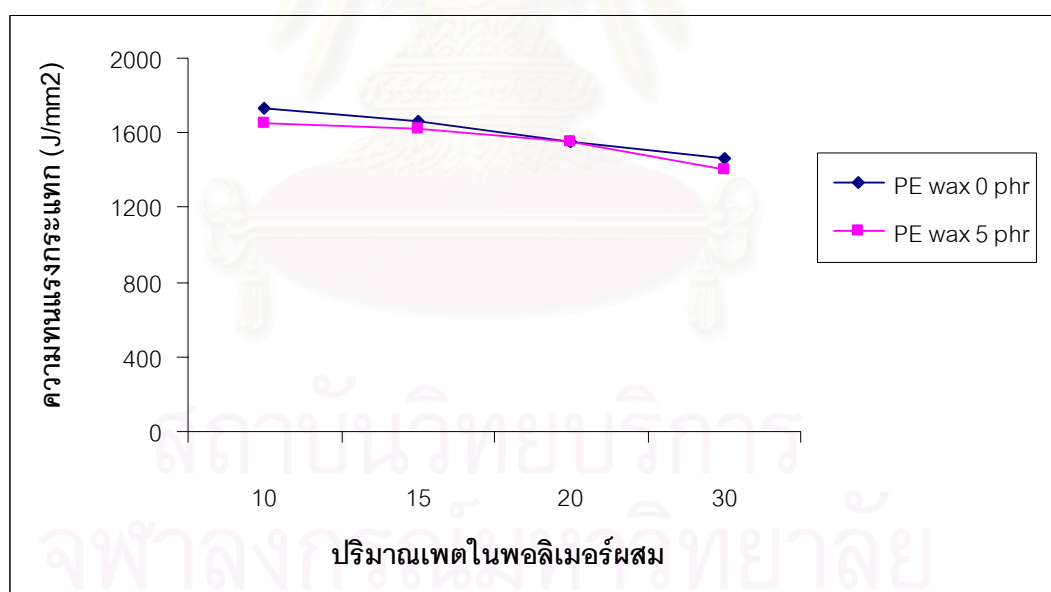
รูปที่ 4.34 มอดูลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์จาก 5 phr ในพอลิเมอรัสม พบว่ามอดูลัสตัดโค้งของพอลิเมอรัสมมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์ทำให้พอลิเมอรัสมมีความอ่อนตัวมากขึ้น ทำให้ใช้แรงกดน้อยลงในการทำให้พอลิเมอรัสมเกิดการยืดออก ด้วยเหตุนี้ การผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ทำให้พอลิเมอรัสมมีมอดูลัสตัดโค้งที่ลดต่ำลง

เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอรัสมพบว่าทั้งพอลิเมอรัสม และไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้น มีค่ามอดูลัสตัดโค้งที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะ พอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยต้านทานแรงกด เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์มีความแข็งมากกว่าพอลิโพรพิลีน และเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์มากขึ้นทำให้พอลิเมอรัสมมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงต้องออกแรงกดมากขึ้นในการทำให้พอลิเมอรัสมเกิดการงอ ค่ามอดูลัสตัดโค้งจึงสูงขึ้น แต่ค่ามอดูลัสตัดโค้งของพอลิเมอรัสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าพอลิเมอรัสมที่ไม่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่เมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก พอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยให้พอลิเอทิลีนแวกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอรัสม

4.4.4 สมบัติความทนแรงกระแทก

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอรัสมกับดัชนีการไหล แสดงไว้ในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอรัสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนแวกซ์

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr ในพอลิเมอรัสม ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอรัสมมีค่าลดต่ำกว่าพอลิเมอรัสมที่ไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยให้พอลิเอทิลีนแวกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอรัสม

ลิเอทีลีนแวกซ์เป็นสารโมเลกุลต่ำจึงไปลดสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลง อย่างไรก็ตามพอลิเอทีลีนแวกซ์ช่วยในการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสม เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมพอลิเอทีลีนแวกซ์ จึงไม่แตกต่างจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผสมพอลิเอทีลีนแวกซ์มากนักเมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น เพราะปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ใช้ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าคงที่ที่ 5 phr เมื่อปริมาณเพตเพิ่มมากขึ้น มีเพตบางส่วนที่ไม่เกิดความเข้ากันกับพอลิโพรพิลีน และรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ค่าความทนแรงกระทำลดลง แต่เมื่อผสมพอลิเอทีลีนแวกซ์ลงไปในพอลิเมอร์ผสมนั้น ช่วยให้เกิดการกระจายตัวของเพตได้ดี ทำให้ความทนแรงกระทำระหว่างการผสมพอลิเอทีลีนแวกซ์ และไม่ได้ผสมพอลิเอทีลีนแวกซ์ลงในพอลิเมอร์ผสมนั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกันทุกๆ ปริมาณของเพตที่ผสมในพอลิเมอร์ผสม

4.4.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว

ความสัมพันธ์ของพอลิเอทีลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสมกับดัชนีการไหล แสดงไว้ในตารางที่

4.5

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณ 5 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 0 และ 5 phr

ปริมาณพอลิเอทีลีนแวกซ์ (phr)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
0	152.69	114.76	441.96
5	151.89	117.19	440.55

ผลการทดลองพบว่า พอลิเอทีลีนแวกซ์มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากพอลิเอทีลีนแวกซ์ทำให้เพตกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิการเกิดผลึกจึงเกิดได้เร็วขึ้น และพอลิเอทีลีนแวกซ์ยังส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวนั้นเกิดเร็วขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย เพราะ ไปเกิดแรงดึงดูดกับพอลิโพรพิลีน

ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวพบว่า เมื่อมีการผสมพอลิเอทีลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสมนั้น อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก พอลิเอทีลีนแวกซ์มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ

เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน พอลิเมอร์ผสมที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์จึงมีการสลายตัวทางความร้อนก่อนพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์

4.4.6 ปริมาณผลึก

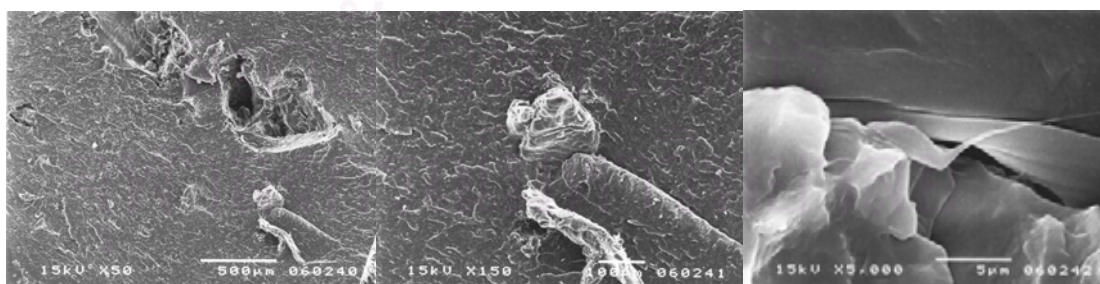
ความสัมพันธ์ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสมกับปริมาณผลึก แสดงในตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีเพต 15 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณ 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 0 และ 5 phr

ปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ (phr)	ปริมาณผลึก (%)
0	27.84
5	30.38

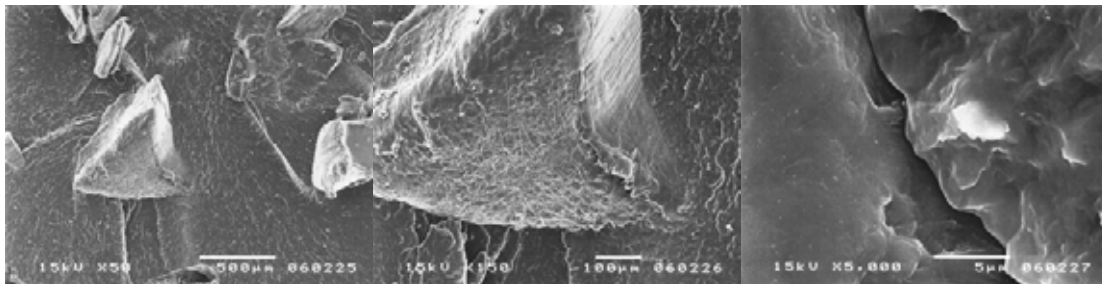
พอลิเอทิลีนแวกซ์ช่วยให้เพตมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมที่ดีขึ้น โดยการเกิดผลึกนั้นเกิดรอบๆเพต ถึงแม้ปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจากมีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ แต่การกระจายตัวที่ดีของเพตทำให้มีปริมาณผลึกมากกว่าไม่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์

4.4.7 สัณฐานวิทยา

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ในพอลิเมอร์ผสมกับสัณฐานวิทยาแสดงไว้ในรูปที่ 4.36 และ 4.37



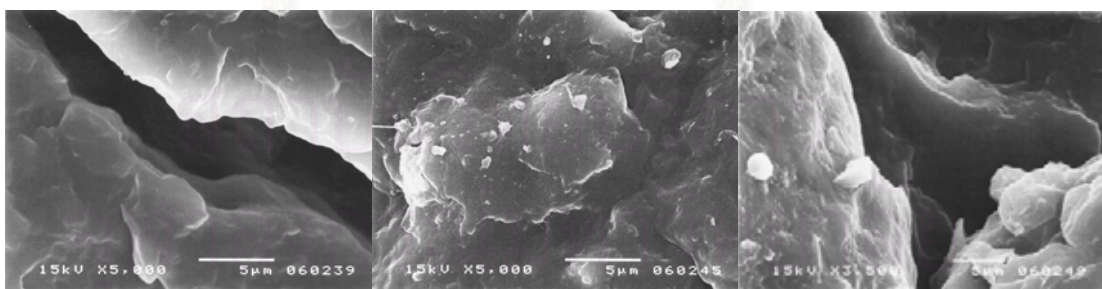
รูปที่ 4.36 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน เพต 15 phr พอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr และมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



รูปที่ 4.37 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน เพต 15 phr และ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr นั้น เกิดการรวมตัวกันของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ขึ้น และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000 เท่า พบว่า เกิดรอยยี่ดอออกของพอลิเอทิลีนแวกซ์ โดยการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ผสมอยู่นั้น มีการกระจายตัวที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์

เมื่อส่องดูพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน มาลิกแอนไฮไดรด์พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนแวกซ์อย่างละ 5 phr ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.38 พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์นั้นเกิดช่องว่างเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง แต่พอลิเมอร์ผสมที่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์พอลิโพรพิลีนนั้นไม่เห็นช่องว่าง ด้วยเหตุนี้สมบัติเชิงกลของจึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์เพียงอย่างเดียว



(ก) (ข) (ค)

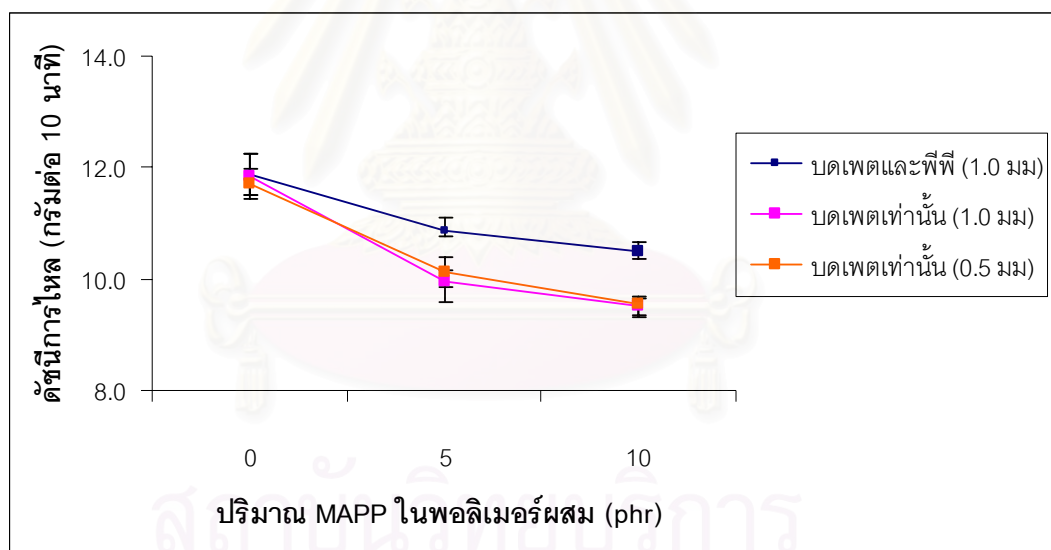
รูปที่ 4.38 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้กำลังขยาย 5,000 เท่าของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีนคงที่ (ก)มีมาลิกแอนไฮไดรด์พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนแวกซ์อย่างละ 5 phr (ข)มีมาลิกแอนไฮไดรด์พอลิโพรพิลีน 5 phr เท่านั้น (ค) มีพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr เท่านั้น

4.5 ผลของวิธีการบด และขนาดของตะแกรง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของวิธีการบด และขนาดของตะแกรงที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ดัชนีการไหล สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก สมบัติทางความร้อน ปริมาณผลึก และสัณฐานวิทยาโดยนำผงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานในอัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวไรเซออร์ โดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร แล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีด และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดมาเปรียบเทียบกับกรบดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งในระบบของพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณ 100 phr เพต 15 phr ส่วนมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 โดยอยู่ระหว่าง 0-10 phr

4.5.1 ดัชนีการไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบด และขนาดของตะแกรงกับดัชนีการไหล แสดงในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง

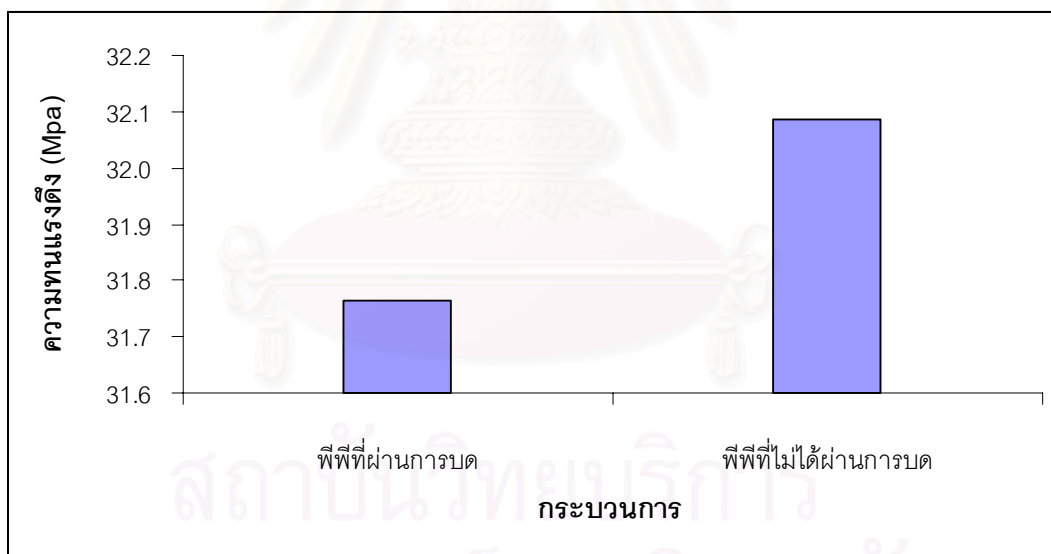
จากผลการทดสอบพบว่า การบดพอลิโพรพิลีนพร้อมกับเพตให้ค่าดัชนีการไหลสูงกว่าการบดเฉพาะเพตเพียงอย่างเดียว เพราะเมื่อทำการบดพอลิโพรพิลีนพร้อมกับเพตนั้น เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลระหว่างกระบวนการบดทำให้สายโซ่โมเลกุลมีขนาดที่สั้นลง น้ำหนักโมเลกุลจึงลดลง ด้วยเหตุนี้ค่าดัชนีการไหลจึงสูงกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อเปรียบเทียบส่วน

เบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่า การบดพอลิโพรพิลีนพร้อมกับเพตนั้นมีค่าดัชนีการไหลที่ใกล้เคียงกันมากกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว แสดงว่าการบดพอลิโพรพิลีนพร้อมกับเพตนั้นให้การกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่ดีกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบการใช้ตะแกรงขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร ของเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ พบว่าการบดเพตอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตรนั้น ให้ค่าดัชนีการไหลที่ต่ำกว่าการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เพียงเล็กน้อย ในทุกๆ ปริมาณของเพต และมาลิกอิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจากขนาดของเพตที่ผ่านการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้นเพตมีขนาดใหญ่กว่าการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของเพตที่บดโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรนั้นมีปริมาณที่มากกว่าเพตที่บดโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร ทำให้ค่าดัชนีการไหลของการบดเพตโดยใช้ตะแกรงทั้ง 2 ขนาดนั้นมีค่าดัชนีการไหลที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

4.5.2 ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด และมอดุลัสดึง

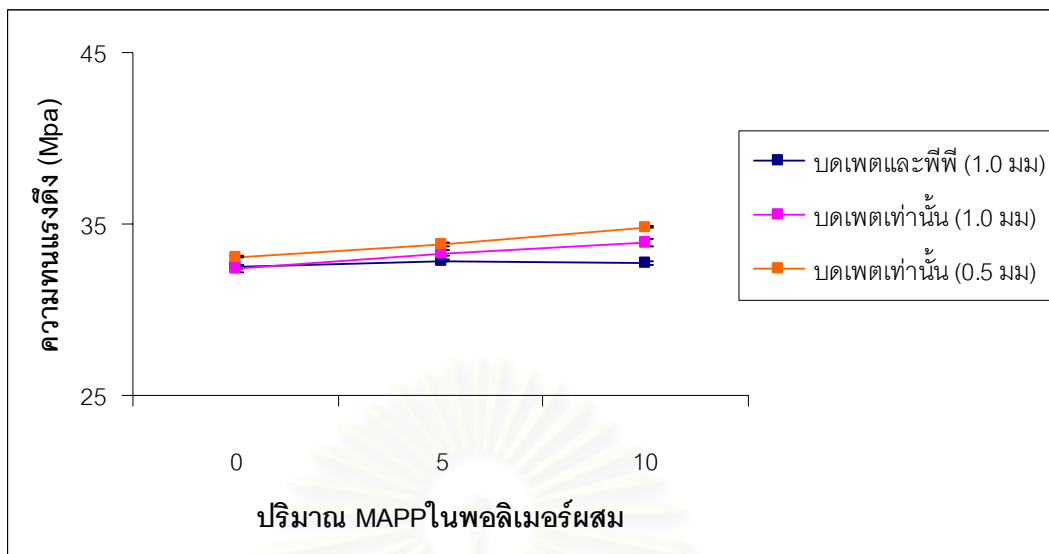
ความสัมพันธ์ระหว่างการบดพอลิโพรพิลีนกับความทนแรงดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ความทนแรงดึงระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด

จากผลการทดสอบพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์นั้นมีความทนแรงดึงที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนที่ถูกตัดให้สั้นลงและมีบางส่วนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบด และขนาดของตะแกรงกับความทนแรงดึงแสดงในรูปที่

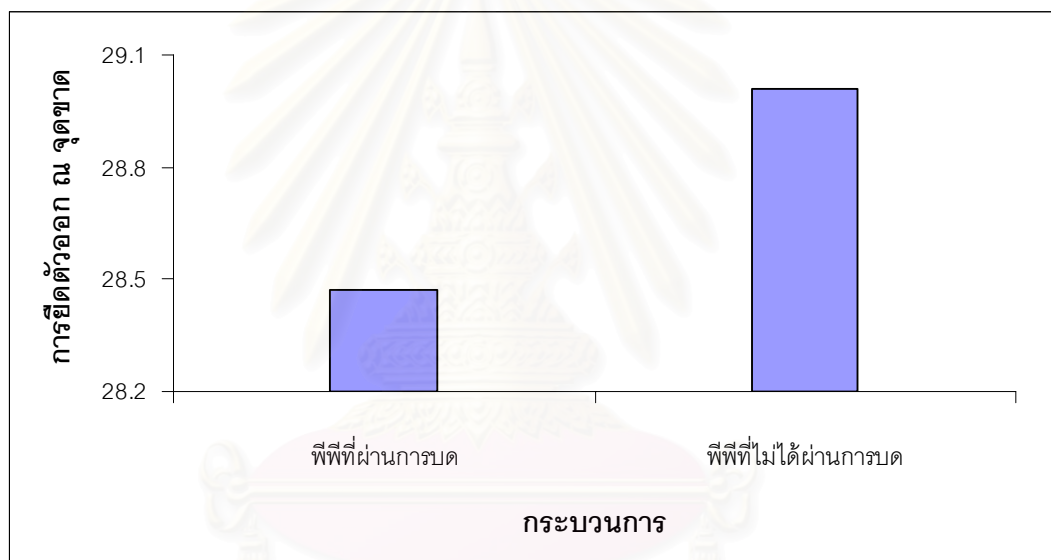


รูปที่ 4.41 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของ ตะแกรง

จากผลการทดสอบพบว่า การบดพอลิโพรพิลีน และเพตด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์นั้น ส่งผลต่อความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเทียบกับกรบดเพตเพียงอย่างเดียว โดยความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่บดพอลิโพรพิลีน และเพตมีค่าต่ำกว่าที่บดเพตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลกลายเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดสั้นลง ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมนั้นมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และวิธีการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ คือเมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตาม และความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพต พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมขึ้นอย่างช้าๆ ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่บดแต่เพตเท่านั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนไม่ได้ถูกทำลาย โดยแรงเฉือน ดังนั้นเมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมนั้นเพิ่มมากขึ้น ด้านที่เป็นสายโซ่พอลิโพรพิลีนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเกิดไปพันกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีน ส่วนที่เป็นหมู่คาร์บอนิลจะเกิดแรงดึงดูดกับเพต

เมื่อเปรียบเทียบการใช้ขนาดตะแกรงเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ระหว่าง 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตรในการบดเพต ปรากฏว่า การบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงที่ดีกว่าการใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร ในทุกอัตราส่วนของเพต และมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน เนื่องจาก การบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรนั้น จะให้เพตที่มีขนาดเล็กกว่า และมีปริมาณเพตที่กระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมที่สูงกว่าการบดด้วย ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร ดังนั้นความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจึงเพิ่มมากขึ้นในทุกอัตรา ส่วนผสมของมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

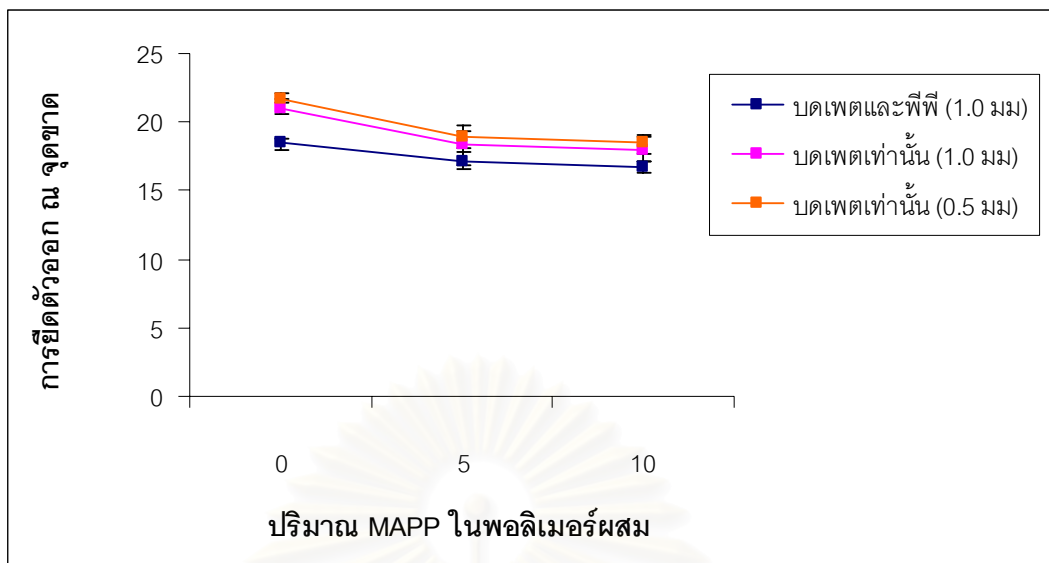
ความสัมพันธ์ระหว่างการบดพอลิโพรพิลีนกับการยืดตัวออก ณ จุดขาด แสดงไว้ในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 การยืดตัวออก ณ จุดขาดระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด

จากผลการทดสอบพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์นั้นมีการยืดตัวออก ณ จุดขาดที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนถูกตัดให้มีขนาดสั้นลง และมีโครงสร้างร่างแหเกิดขึ้น ทำให้การยืดตัวออก ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด เพราะ ขึ้นทดสอบมีความแข็งแรงขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบด และขนาดของตะแกรง กับ การยืดตัวออก ณ จุดขาดแสดงไว้ในรูปที่ 4.43

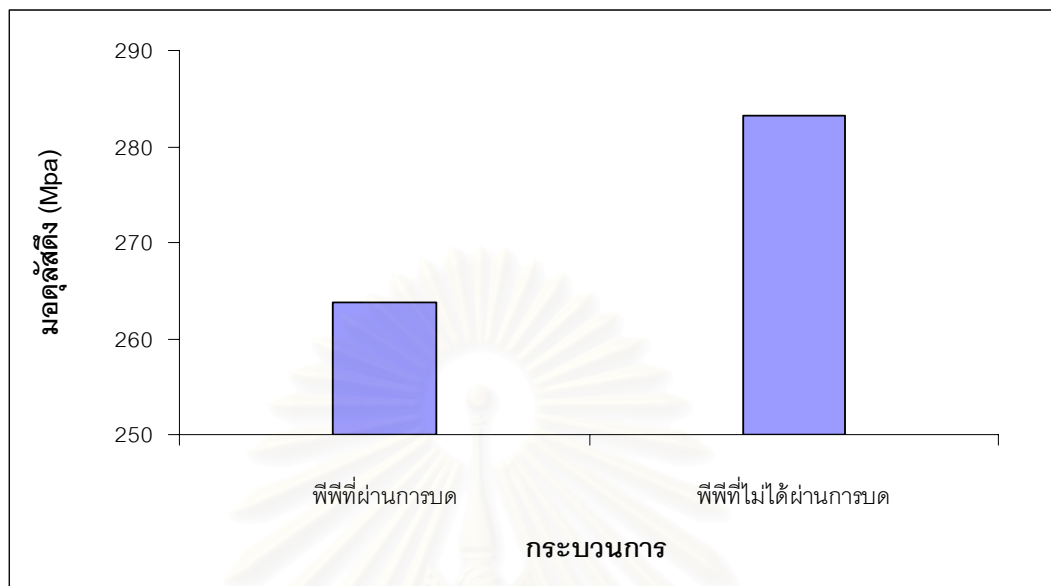


รูปที่ 4.43 การยึดตัวออก ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง

จากผลการทดสอบพบว่า การบดพอลิโพรพิลีน และเพตด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์นั้น มีผลต่อการยึดตัวออก ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเทียบกับการบดเพตเพียงอย่างเดียว คือ เมื่อบดพอลิโพรพิลีนกับเพตนั้นให้การยึดตัวออก ณ จุดขาด ที่ต่ำกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดมีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นลง บางส่วนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ทำให้มีค่าการยึดตัวออก ณ จุดขาดลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม พบว่าการยึดตัวออก ณ จุดขาด มีค่าลดลง เนื่องจากมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตให้มีความเข้ากันมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มสูงขึ้น การบดพอลิโพรพิลีน และเพตนั้นให้การยึดตัวออก ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากการบดช่วยเพตกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนดีขึ้น ส่วนการบดเพตเพียงอย่างเดียวให้ค่าการยึดตัวออก ณ จุดขาดลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะ มีความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตน้อยกว่าการบดทั้งพอลิโพรพิลีนและเพต

เมื่อเปรียบเทียบการบดเพตเพียงอย่างเดียวระหว่างการใช้ตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร พบว่า การใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรนั้นให้การยึดตัวออก ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าการใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร เนื่องจาก การบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรนั้นให้เพตที่มีขนาดเล็กกว่าการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร และขนาดของเพตที่เล็กทำให้เกิดช่องว่างระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตที่เล็กกว่า เพราะฉะนั้นพอลิเมอร์ผสมที่บดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรจึงมีการยึดตัวออก ณ จุดขาด สูงกว่าการบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรในทุกอัตราส่วนของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

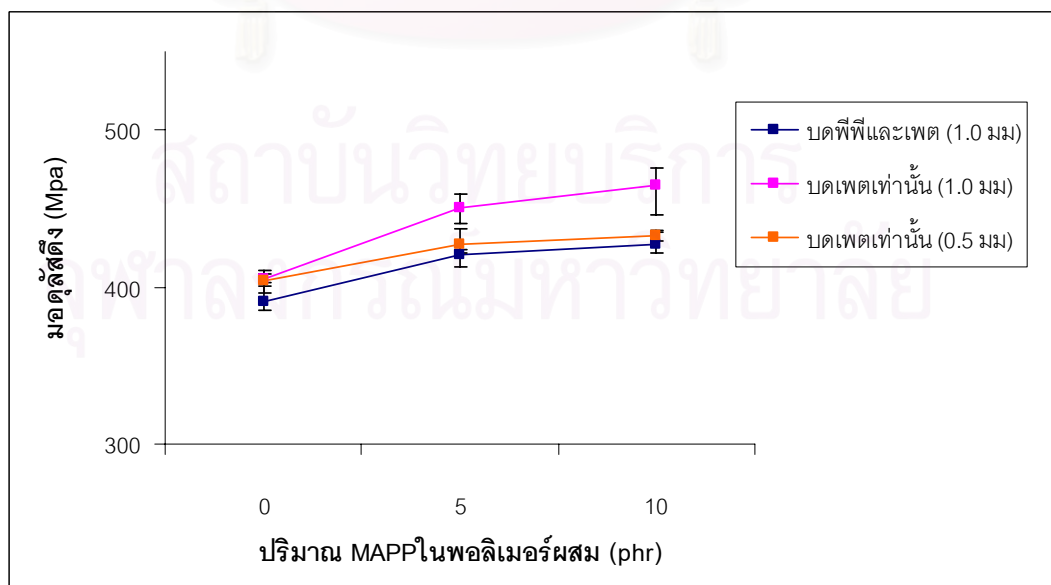
ความสัมพันธ์ระหว่างการบดพอลิโพรพิลีนกับมอดุลัสดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 มอดุลัสดึงระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด

จากผลการทดสอบพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซออร์นั้นมอดุลัสดึงที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซออร์ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนที่ถูกตัดให้สั้นลง

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบด และขนาดของตะแกรงกับมอดุลัสดึงแสดงไว้ในรูปที่ 4.45



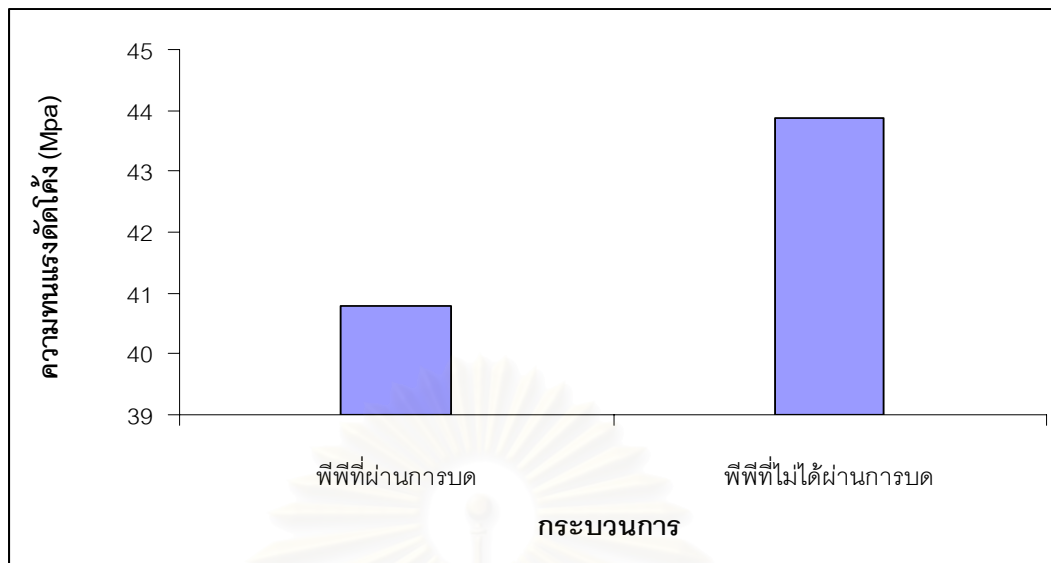
รูปที่ 4.45 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อทำการบดพอลิโพรพิลีนพร้อมกับเพตนั้นให้ค่ามอดุลัสดึงที่ต่ำกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดมีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเกิดการยึดดึงได้ง่ายขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ได้บดพอลิโพรพิลีน ซึ่งมอดุลัสดึงนั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นส่วนความเครียด หรือ แรงส่วนระยะทางที่ยืดออก เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ค่ามอดุลัสดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต โดยค่ามอดุลัสดึงของการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนจาก 0 ถึง 5 phr มีค่าสูงกว่า จาก 5 ถึง 10 phr แสดงว่า การเติมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมช่วยเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตให้มีความเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่ามอดุลัสดึง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมให้มากขึ้นนั้นช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตให้เพิ่มขึ้น แต่ส่งผลต่อค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมไม่มากเท่ากับการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเลย และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนยังช่วยให้แพร่กระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น การเกาะเป็นกลุ่มน้อยลง ส่งผลให้ค่ามอดุลัสดึงเพิ่มมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการบดเพตเพียงอย่างเดียวระหว่างการใช้ตะแกรงเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ขนาด 0.5 กับ 1.0 มิลลิเมตรนั้น พบว่า การบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรให้ค่ามอดุลัสดึงสูงกว่าการใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เพราะเพตที่มีขนาดเล็กช่วยต้านทางแรงดึงขณะเกิดการดึงได้ต่ำกว่าเพตที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่ามอดุลัสดึงของเพตที่ผ่านการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้นส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดุลัสดึงสูงกว่าการใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร และเมื่อมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสดึงของการใช้ตะแกรงขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตรยิ่งห่างกันมากขึ้น เพราะ ขนาดของเพตมีผลต่อค่ามอดุลัสดึงอย่างชัดเจน เพตที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถต้านการยึดดึงได้ดีกว่าเพตที่มีขนาดเล็ก และเมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการเติมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน พบว่ามีค่ามอดุลัสดึงใกล้เคียงกัน เพราะการบดเพตพร้อมกับพอลิโพรพิลีนนั้นให้การกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่ดีกว่า ถึงแม้พอลิโพรพิลีนมีค่ามอดุลัสดึงที่ต่ำกว่าก็ตาม ส่วนการบดเพตเพียงอย่างเดียว พอลิโพรพิลีนมีค่ามอดุลัสดึงที่สูงกว่า แต่เพตมีการกระจายตัวที่ต่ำกว่า ค่ามอดุลัสดึงจึงใกล้เคียงกัน

4.5.3 ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสดัดโค้ง

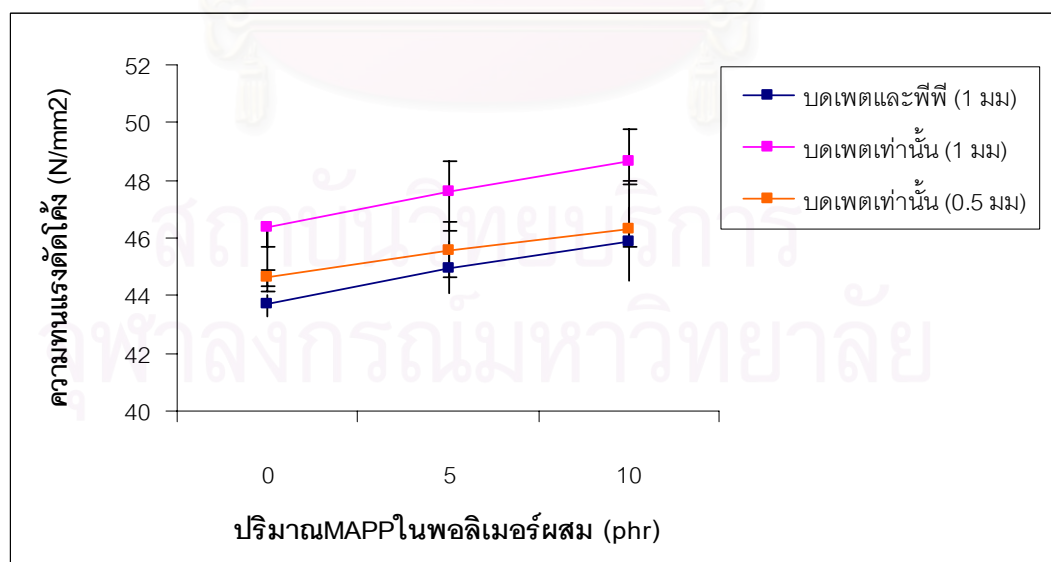
ความสัมพันธ์ระหว่างการบดพอลิโพรพิลีนกับความทนแรงดัดโค้ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ความทนแรงดึงระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการอบกับไม่ได้ผ่านการอบ

จากผลการทดสอบพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการอบด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซอร์มีความทนแรงดึงที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผ่านการอบด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซอร์ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดการขาดออกมากกว่าการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการอบ และขนาดของตะแกรงกับความทนแรงดึงแสดงไว้ในรูปที่ 4.47

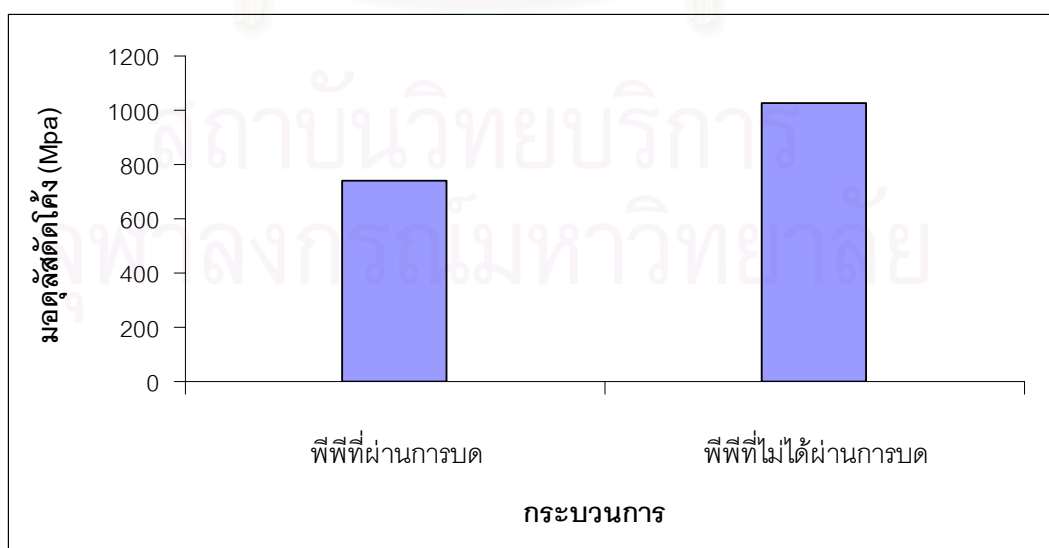


รูปที่ 4.47 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการอบ และขนาดของตะแกรง

จากผลการทดสอบพบว่า วิธีการบดนั้นส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือ เมื่อทำการบดพอลิโพรพิลีน และเพตพร้อมกันโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้นให้ค่าความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำกว่าการบดเพตอย่างเดียว เนื่องจาก สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนมีขนาดสั้นลง สมบัติเชิงกลจึงลดต่ำลง ด้วยเหตุนี้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมจึงลดต่ำลง

เมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมพบว่า พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นในทุกวิธีการผลิต เนื่องจาก มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ทำให้ต้องใช้แรงกดมากขึ้นในการทำลายแรงดึงดูระหว่างพอลิโพรพิลีน กับเพต โดยการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ปริมาณ 5 phr นั้นความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มจาก 5 เป็น 10 phr เพราะ ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่เติมไปตอนแรกช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต ทำให้ความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของเพตมีปริมาณคงที่ ทำให้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีปริมาณที่มากเกินไป โดยมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่เหลือนั้นไปเกิดแรงดึงดูระหว่างกัน ทำให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ส่วนการบดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตรนั้น พบว่า การบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรให้ความทนแรงดัดโค้งที่สูงกว่าตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เนื่องจาก ให้เพตที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงสามารถต้านทานแรงกดได้ดีกว่าเพตที่มีขนาดเล็ก

ความสัมพันธ์ระหว่างการบดพอลิโพรพิลีนกับมอดูลัสดัดโค้งแสดงไว้ในรูปที่ 4.48

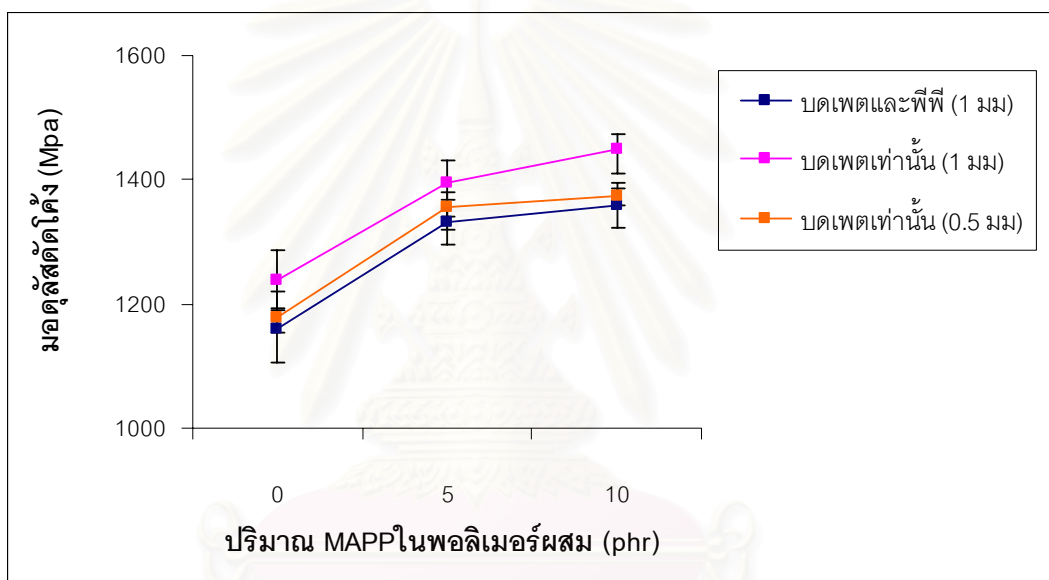


รูปที่ 4.48 มอดูลัสดัดโค้งระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด

จากผลการทดสอบพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซอร์นั้นมีความอดุลล์ตัดโค้งที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวโรเซอร์ เนื่องจาก สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนนั้นถูกตัดให้มีขนาดที่สั้นลง ส่งผลให้มีปริมาณผลึกที่ลดลง ถึงแม้จะมีการเกิดการเชื่อมขวางขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนขึ้น แต่ปริมาณการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลนั้นมีมากกว่าการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล ทำให้มอดุลล์ตัดโค้งของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบด และขนาดของตะแกรงกับมอดุลล์ตัดโค้งแสดงไว้ในรูปที่

4.49



รูปที่ 4.49 มอดุลล์ตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง

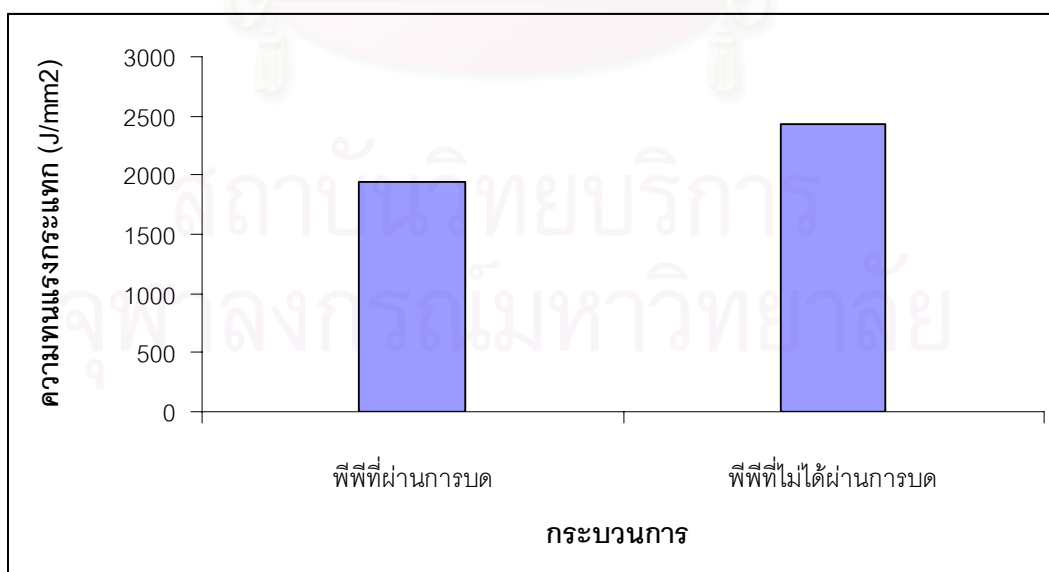
จากผลการทดสอบพบว่า การบดพอลิโพรพิลีน และเพตพร้อมกันโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร ให้ค่ามอดุลล์ตัดโค้งที่ต่ำกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการบดพอลิโพรพิลีนทำให้สายโซ่โมเลกุลนั้นเกิดการขาด และมีขนาดสั้นลง ทำให้ใช้แรงกดในการยืดพอลิเมอร์ผสมออกลดลง ค่ามอดุลล์ตัดโค้งของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดจึงต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด ถึงแม้การบดพอลิโพรพิลีน และเพตพร้อมกันนั้นทำให้มีการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่ดีกว่าก็ตาม

เมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมพบว่า ค่ามอดุลัสตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตให้มีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น ค่ามอดุลัสตัดโค้งจึงเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า การเติมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนนั้นขึ้นกับปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมด้วย เพราะเมื่อเติมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ 5 phr นั้นค่ามอดุลัสตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็น 10 phr พบว่า ค่ามอดุลัสตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่มากเกินไป เมื่อเทียบกับเพตที่มีปริมาณคงที่

เมื่อเปรียบเทียบการบดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตรพบว่า ส่งผลต่อค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม คือการบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้นให้ค่ามอดุลัสที่สูงกว่าการการใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เนื่องจากให้เพตที่มีขนาดใหญ่กว่าซึ่งเพตที่มีขนาดใหญ่ช่วยในการต้านทานแรงกดได้ดีกว่า ทำให้ค่ามอดุลัสตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพตเพียงอย่างเดียวด้วยตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้นมามีค่ามอดุลัสตัดโค้งที่สูงกว่า

4.5.4 ความทนแรงกระแทก

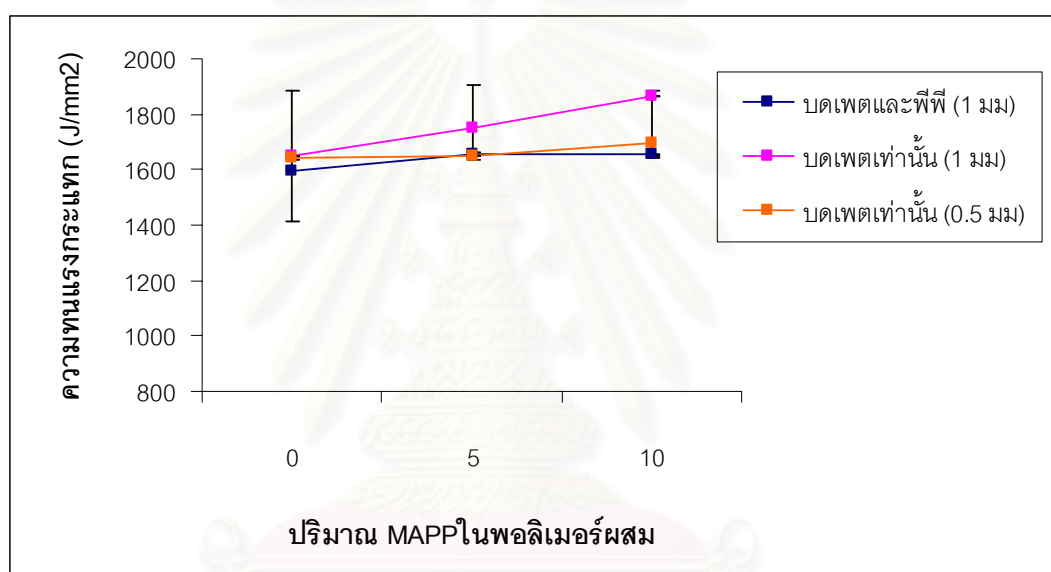
ความสัมพันธ์ระหว่างการบดพอลิโพรพิลีนกับความทนแรงกระแทก แสดงไว้ในรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับไม่ได้ผ่านการบด

จากผลการทดสอบพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์มีค่าความทนแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนถูกตัดให้มีขนาดของโซ่โมเลกุลที่สั้นลง ส่งผลให้ปริมาณผลึกในพอลิโพรพิลีนนั้นมีปริมาณที่ลดต่ำลง ประกอบกับเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล ทำให้พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดมีลักษณะแข็ง จึงมีค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องพัลเวอไรเซอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบด และขนาดของตะแกรงกับความทนแรงกระแทกแสดงไว้ในรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง

จากผลการทดสอบพบว่า ความทนแรงกระแทกระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่บดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์นั้นมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่บดเพตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตนั้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนถูกทำลายให้สั้นลง และเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้พอลิเมอร์ผสมนั้นมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงกระจายแรงกระแทกได้ไม่ดีเท่ากับพอลิเมอร์ผสมที่บดเฉพาะเพตเท่านั้น

เมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่บดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ กับพอลิเมอร์ผสมที่บดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงบดขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้นมีค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมาลิก

อีกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น เพราะ มาลิกอีกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนไปช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของเพตในพอลิโพรพิลีน ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมจึงรับแรงกระแทกได้เพิ่มมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพตเพียงอย่างเดียว ระหว่างการใช้ตะแกรงบดขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร พบว่าการบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกที่สูงกว่าการใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร ในทุกอัตราส่วนของลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการบดเพตโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรนั้นให้เพตที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร เพตจึงไม่สามารถช่วยต้านทานความทนแรงกระแทกได้

4.5.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างการบดพอลิโพรพิลีนกับอุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัว แสดงไว้ในตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด

พอลิเมอร์ผสม	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
พีพีที่ไม่ได้ผ่านการบด	151.17	108.44	446.09
พีพีที่ผ่านการบด	151.16	113.49	447.46

ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวทั้งพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบด และไม่ได้ผ่านการบดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดมีอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดนั้นมีสายโซ่ที่สั้นกว่าทำให้การจัดเรียงตัวเป็นผลึกนั้นเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด ส่วนที่อุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพราะถึงแม้พอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดไม่เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุล แต่ต้องนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ซึ่งมีการใช้ความร้อน และความดันที่สูง ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลได้เช่นกัน ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนทั้งสองชนิดจึงมีค่าเริ่มการหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกัน

ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ และพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผ่านการบดมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน เพราะ พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดนั้นจะเกิดโครงสร้างตาข่ายขึ้น ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบดนั้นต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด ซึ่งใช้แรงอัดและความร้อนสูง ทำให้เกิดการโครงสร้างตาข่ายได้เช่นเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบด และขนาดของตะแกรงกับอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง

พอลิเมอร์ผสม	MAPP (phr)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิการเกิด ผลึก (°C)	อุณหภูมิการ สลายตัว (°C)
บดเพตและพีพี (1.0 มม)	0	152.47	116.13	442.18
บดเพตเท่านั้น (1.0 มม)	0	152.75	114.41	425.25
บดเพตเท่านั้น (0.5 มม)	0	152.29	114.86	428.62
บดเพตและพีพี (1.0 มม)	5	152.69	118.34	441.96
บดเพตเท่านั้น (1.0 มม)	5	153.72	118.37	431.68
บดเพตเท่านั้น (0.5 มม)	5	153.16	118.02	433.97
บดเพตและพีพี (1.0 มม)	10	153.71	118.47	432.17
บดเพตเท่านั้น (1.0 มม)	10	153.85	119.10	426.13
บดเพตเท่านั้น (0.5 มม)	10	153.20	118.52	430.94

จากผลการทดลองพบว่า การบดเพตเพียงอย่างเดียวให้คุณสมบัติหลอมเหลวที่ไม่แตกต่างกับการบดพอลิโพรพิลีน และเพต เมื่อมีการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่เท่ากัน แต่คุณสมบัติการเกิดผลึกนั้นมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน เพราะการบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตมีการกระจายตัวของเพตที่ดีกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อมีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนพบว่า คุณสมบัติหลอมเหลวมีค่าที่ไม่แตกต่างกันนัก เพราะมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยเพตกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสม และเมื่อเปรียบเทียบการบดโดยใช้ตะแกรงระหว่าง 1.0 กับ 0.5 มิลลิเมตรพบว่ามีคุณสมบัติหลอมเหลว และคุณสมบัติการเกิดผลึกใกล้เคียงกัน

ส่วนคุณสมบัติการสลายตัวพบว่า การบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตให้เสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียวเนื่องจาก การบดพอลิโพรพิลีน และเพตพร้อมกันทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดโครงสร้างร่างแหขึ้น และเมื่อผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม พบว่าคุณสมบัติการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำให้มีการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมที่ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการไม่ผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม ส่วนการบดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงบดขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร พบว่าการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรมีคุณสมบัติการสลายตัวที่ต่ำกว่าการใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เพราะอนุภาคของเพตที่มีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลต่อคุณสมบัติการสลายตัวมากกว่า

4.5.6 ปริมาณผลึก

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบดพอลิโพรพิลีนกับปริมาณผลึกแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 ตารางที่ 4.9 ปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผ่านการบด

พอลิเมอร์ผสม	ปริมาณผลึก (%)
พีพีที่ไม่ได้ผ่านการบด	44.83
พีพีที่ผ่านการบด	40.63

จากการทดลองพบว่า ปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ผ่าน และไม่ผ่านการบดมีค่าที่แตกต่างกัน แม้ว่าพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดนั้นมีสายโซ่ที่สั้นกว่า ทำให้การจัดเรียงตัวเป็นผลึกเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด แต่พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดมีปริมาณผลึกที่น้อยกว่า เนื่องจาก มีบางส่วนของจับตัวกันเป็นโครงสร้างตาข่ายทำให้ปลดปริมาณการเกิดผลึกลง

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการบดและขนาดของตะแกรงกับปริมาณผลึกแสดงไว้ในตารางที่

4.10

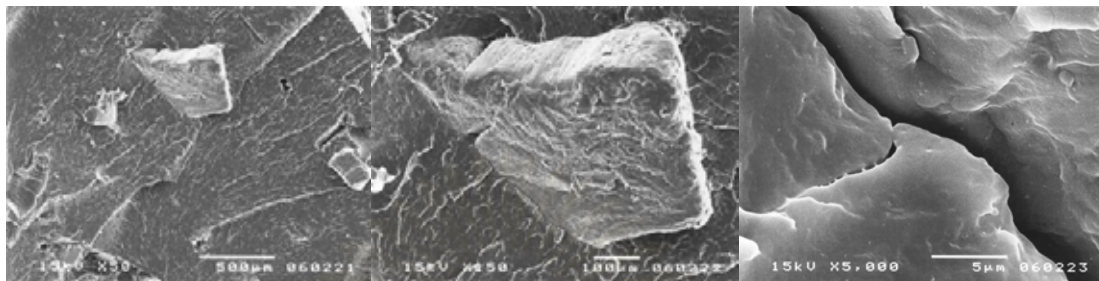
ตารางที่ 4.10 ปริมาณผลึกของพอลิเมออร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของ
ตะแกรง

พอลิเมออร์ผสม	MAPP (phr)	ปริมาณผลึก (%)
บดเพตและพีพี (1.0 มม)	0	37.96
บดเพตเท่านั้น (1.0 มม)	0	33.77
บดเพตเท่านั้น (0.5 มม)	0	39.64
บดเพตและพีพี (1.0 มม)	5	27.84
บดเพตเท่านั้น (1.0 มม)	5	26.53
บดเพตเท่านั้น (0.5 มม)	5	35.03
บดเพตและพีพี (1.0 มม)	10	27.39
บดเพตเท่านั้น (1.0 มม)	10	24.48
บดเพตเท่านั้น (0.5 มม)	10	25.87

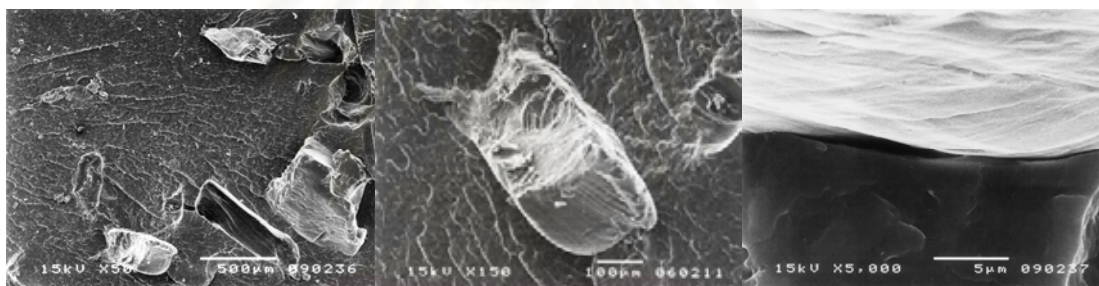
จากผลการทดลอง พบว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร
นั้นมีปริมาณผลึกมากกว่าการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร เพราะเพตที่มีขนาดเล็กกว่า
และมีการกระจายตัวที่มากกว่า ทำให้เกิดผลึกที่ปริมาณมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ
ผลึกระหว่างการบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพต กับการบดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด
1.0 มิลลิเมตร พบว่า การบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตมีปริมาณผลึกที่มากกว่าการบดเพตเพียง
อย่างเดียว ถึงแม้การบดพอลิโพรพิลีนทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิโพรพิลีนเกิดการขาดออก แต่
การบดช่วยให้เพตกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น ทำให้ปริมาณผลึกสูงกว่าการบดเพตเพียง
อย่างเดียว และเมื่อเพิ่มทำการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนพบว่า มีปริมาณผลึก
ลดลงเนื่องจาก สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ได้น้อยลง

4.5.7 สัณฐานวิทยา

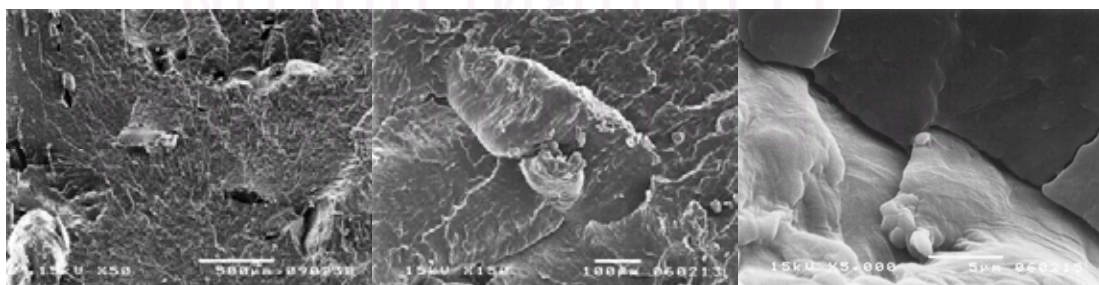
ความสัมพันธ์ระหว่างการบดและขนาดของตะแกรงกับสัณฐานวิทยาแสดงไว้ในรูปที่ 4.52-4.60



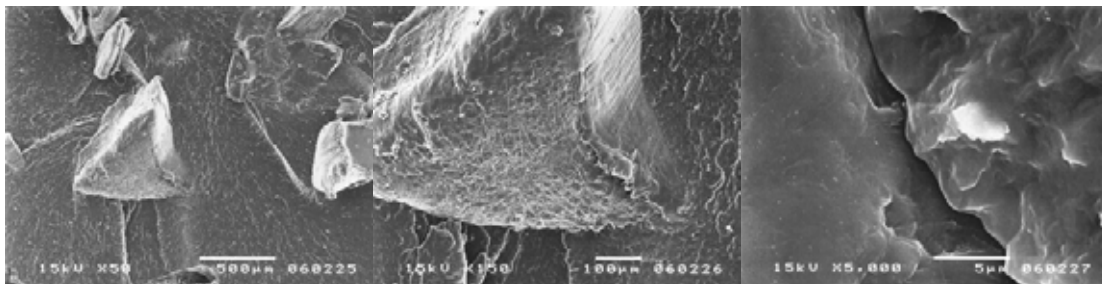
รูปที่ 4.52 สัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนที่มีการบดเพด 15 phr และพอลิโพรพิลีนพร้อมกันด้วยตะแกรงบดขนาด 1.0 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



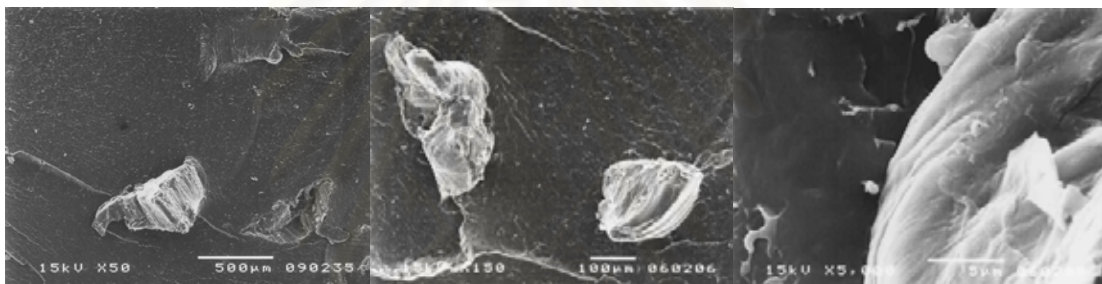
รูปที่ 4.53 สัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนที่มีการบดเพด 15 phr เพียงอย่างเดียวเท่านั้นด้วยตะแกรงบดขนาด 1.0 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



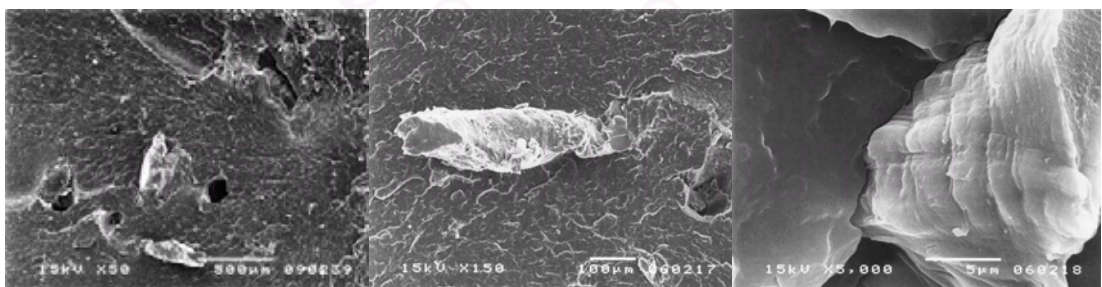
รูปที่ 4.54 สัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนที่มีการบดเพด 15 phr เพียงอย่างเดียวเท่านั้นด้วยตะแกรงบดขนาด 0.5 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



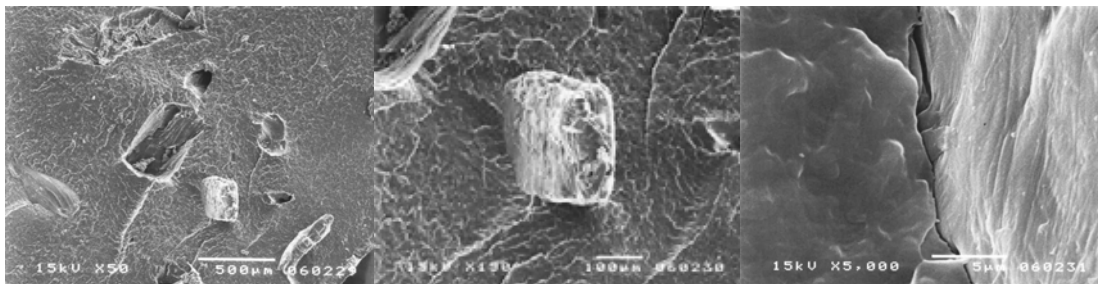
รูปที่ 4.55 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพต 15 phr และพอลิโพรพิลีนพร้อมกันด้วยตะแกรงบดขนาด 1.0 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



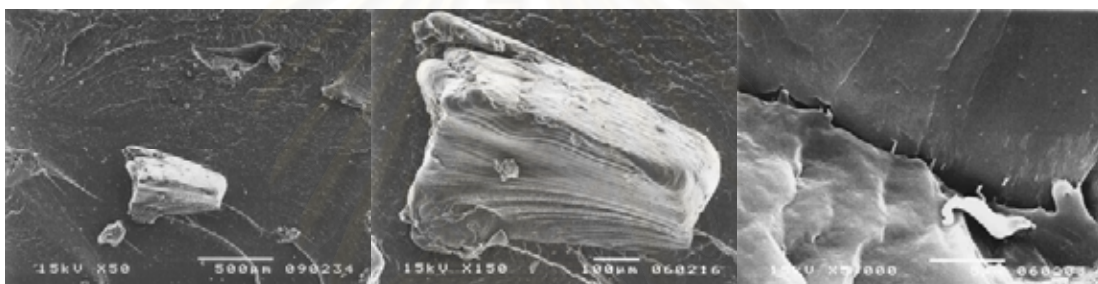
รูปที่ 4.56 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพต 15 phr เพียงอย่างเดียวเท่านั้นด้วยตะแกรงบดขนาด 1.0 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



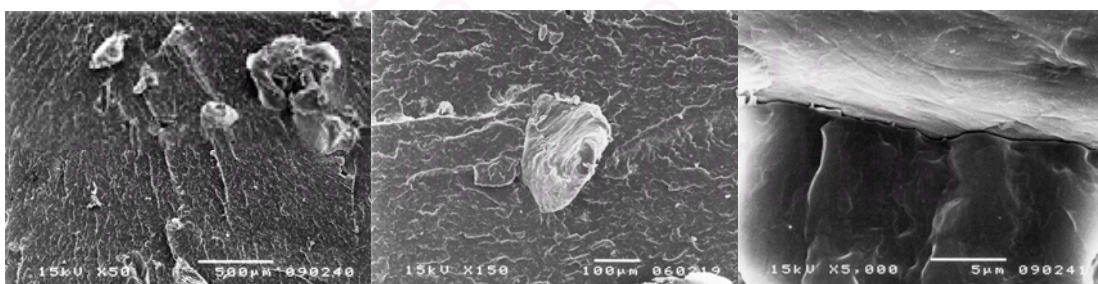
รูปที่ 4.57 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพต 15 phr เพียงอย่างเดียวเท่านั้นด้วยตะแกรงบดขนาด 0.5 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



รูปที่ 4.58 สัณฐานวิทยาของพอลิเออร์ผสมที่มีการบดเพต 15 phr และพอลิโพรพิลีนพร้อมกันด้วยตะแกรงบดขนาด 1.0 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



รูปที่ 4.59 สัณฐานวิทยาของพอลิเออร์ผสมที่มีการบดเพต 15 phr เพียงอย่างเดียวเท่านั้นด้วยตะแกรงบดขนาด 1.0 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า



รูปที่ 4.60 สัณฐานวิทยาของพอลิเออร์ผสมที่มีการบดเพต 15 phr เพียงอย่างเดียวเท่านั้นด้วยตะแกรงบดขนาด 0.5 มิลลิเมตร โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr โดยใช้กำลังขยาย 50 150 และ 5,000 เท่า

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม พบว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรนั้น เพตที่ได้มีขนาดเล็กกว่าการบดโดยใช้ตะแกรง 1.0 มิลลิเมตร และเมื่อมีการผสมมาลิกอิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิไพริลีนในพอลิเมอร์ผสมนั้น มีความเข้ากันได้ระหว่างพอลิไพริลีนดีซีเอ็น มีความใกล้เคียงกันมากขึ้น นอกจากนี้มาลิกอิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิไพริลีนยังช่วยให้เพตมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิไพริลีนอีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมผงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานด้วยเทคนิคพัลเวอไรเซชัน โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพต เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ให้ดีขึ้น และใช้พอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นสารช่วยในกระบวนการขึ้นรูป รวมทั้งเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของเพตในพอลิโพรพิลีน โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังต่อไปนี้

1. การบดพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์นั้น ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดให้มีสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพที่ลดต่ำลง ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก และดัชนีการไหล ส่วนสมบัติทางความร้อนนั้น อุณหภูมิการสลายตัว และอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้น แต่มีปริมาณผลึกที่ลดต่ำลง และมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการบดพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์นั้นทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลมากกว่าเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล

2. พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน เพต และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทุกๆ อัตราส่วน มีค่ามอดูลัสดึง และมอดูลัสดัดโค้งที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด

3. เมื่อเพิ่มปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใส่มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแวกซ์ ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ดังต่อไปนี้

3.1 ดัชนีการไหล ความทนแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก และสมบัติด้านแรงดึงซึ่งประกอบด้วย ความทนแรงดึง การยืดตัวออก ณ จุดขาด มอดูลัสดึง มีแนวโน้มลดต่ำลง

3.2 มอดูลัสดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

3.3 เมื่อปริมาณเพตในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มสูงขึ้น แต่ อุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณผลึกลดต่ำลง

4. เมื่อปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ดังต่อไปนี้

- 4.1 ดัชนีการไหล และการยืดตัวออก ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง
 - 4.2 ความทนแรงดึง มอดุลัสดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทก มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น
 - 4.3 คุณภูมิหลอมเหลว และคุณภูมิการเกิดผลึกเพิ่มสูงขึ้น แต่คุณภูมิการสลายตัว และปริมาณผลึกลดลง
5. ปริมาณของมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ใช้ในพอลิเมอร์ผสมนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของเพตในพอลิเมอร์ผสม
 6. เมื่อผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ปริมาณ 5 phr ในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ดังต่อไปนี้
 - 6.1 ดัชนีการไหล และการยืดตัวออก ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น
 - 6.2 สมบัติด้านแรงดึง ซึ่งประกอบด้วย ความทนแรงดึง และมอดุลัสดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง และสมบัติด้านแรงกระแทกนั้นมีแนวโน้มลดลง
 - 6.3 คุณภูมิการหลอมเหลว และคุณภูมิการสลายตัวลดลง แต่คุณภูมิการเกิดผลึก และปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น
 7. เปรียบเทียบวิธีการบดพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน เพต 15 phr และมาลิกแอโนไฮโดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนที่ปริมาณต่างๆ ระหว่างการบดทั้งพอลิโพรพิลีนและเพตกับการบดเฉพาะเพตอย่างเดียว โดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลดังต่อไปนี้
 - 7.1 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการบดเพตเพียงอย่างเดียว
 - 7.2 สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพตอย่างเดียวมีค่าสูงกว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีการบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพต
 - 7.3 พอลิเมอร์ผสมที่มีการบดทั้งพอลิโพรพิลีน และเพตนั้นมีคุณภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกัน คุณภูมิการเกิดผลึก และคุณภูมิสลายตัวสูงกว่าการบดเพตเพียงอย่างเดียว แต่มีปริมาณผลึกที่ต่ำกว่า

8. เปรียบเทียบการใช้ตะแกรงของเครื่องบดพัลเวอไรเซอร์ระหว่างขนาด 1.0 กับ 0.5 มิลลิเมตรของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์พอลิโพรพิลีนที่ปริมาณต่างๆ โดยการบดเพียงอย่างเดียว พบว่า

8.1 พอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้น มีค่าดัชนีการไหล ความทนแรงดึง และการยืดตัวออก ณ จุดขาดที่ต่ำกว่าการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

8.2 มอดูลัสดึง สมบัติด้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการบดเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรมีค่าที่สูงกว่าการใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

8.3 การบดเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตรนั้นมีคุณสมบัติหลอมเหลว คุณสมบัติการก่อผลึกที่ใกล้เคียงกัน แต่การบดเพียงอย่างเดียวโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตรนั้นมีคุณสมบัติการสลายตัวและปริมาณผลึกที่ต่ำกว่าการบดด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

9. จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพบว่า

9.1 การผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมนั้น ส่งผลต่อความเข้ากันได้ของพอลิโพรพิลีน และเพต เมื่อเพิ่มปริมาณของมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมทำให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิโพรพิลีน และเพตมีขนาดเล็กลง และทำให้การกระจายตัวของเพตในพอลิโพรพิลีนมีการกระจายตัวที่ดียิ่งขึ้น

9.2 การผสมพอลิเอทิลีนแวกซีในพอลิเมอร์ผสมช่วยในการกระจายตัวของเพตในพอลิเมอร์ผสมให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น

9.3 การบดโดยใช้ตะแกรงที่มีขนาด 0.5 มิลลิเมตรนั้นให้เพตที่มีขนาดเล็กกว่าการบดโดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การบดพอลิโพรพิลีนจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลที่ลดต่ำลง ควรทำการบดเพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตามเมื่อมีการผสมเพตในปริมาณที่มาก อาจจะ

จำเป็นต้องผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ หรือบดพอลิโพรพิลีน เพื่อให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าดัชนีการไหลที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน

2. ในกรณีที่บดพेटเพียงอย่างเดียววันั้น พेटมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ดี ดังนั้นควรมีการนำพेट และพอลิเมอร์ผสมมาผสมกันด้วยเครื่องผสมก่อน เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของพेटในพอลิโพรพิลีนให้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มที่ดีมากยิ่งขึ้น

3. อาจนำพेटไปผ่านกระบวนการปั่นเป็นเส้นใยก่อนผสมกับพอลิโพรพิลีน เพื่อให้พेटมีลักษณะเป็นเส้น ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้

4. อาจทดลองเปลี่ยนพลาสติกที่ผ่านการใช้งานจากพेटจากขวดพลาสติกเป็นพอลิคาร์บอเนตจากแผ่นซีดี เพื่อลดปริมาณการสะสมของแผ่นซีดีที่ผ่านการใช้งานที่มีเป็นจำนวนมาก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Association of Plastic Manufacturers. An analysis of plastics consumption and recovery in Europe2002&2003 [online]. Available from: <http://www.plasticseurope.org>, [2006, March 10].
2. Jennifer Gitlitz. Drink and deposit[online]. Available from: <http://www.earthscan.co.uk>, [2006, March 10].
3. Waste online. Packaging materials[online]. Available from: <http://www.wasteonline.org.uk>, [2006, March 10].
4. Jennifer Gitlitz. SOCIAL CHANGES SPUR INCREASED CONSUMPTION. [online]. Available from: <http://www.earthscan.co.uk>, [2006, March 15].
5. เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร. สมบัติของพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
6. เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร. วัสดุศาสตร์มูลฐาน. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
7. วลัยภรณ์ อະนุ และสุจิตรา พงศ์รกุลพานิช. พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างขยะพลาสติกพอลิโพรพิลีนและซีลีย. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
8. อำนวย ลากเกษมสุข. สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมคาร์บอนเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
9. พรทิพย์ แซ่เบ๊. การสังเคราะห์สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนสูตรน้ำ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่เตรียมได้จากการรีไซเคิลขยะขวดเพท. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
10. อุดมศักดิ์ พาลี และ นรินทร์ ไทยปรีชา. อิทธิพลของยางในโพลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูงที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีไซเคิล. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
11. กิตติศักดิ์ ชัยเจริญ. ความสัมพันธ์ระหว่างประวัติทางความร้อนกับสมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และ

- เทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
12. อุดมศักดิ์ พาลี. ผลของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
 13. สุชาดา จงประกอบกิจ. การสังเคราะห์มาลิกิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการแบบสารละลายเพื่อใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิเอไมด์ 6. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
 14. รัชฎ บุหงาชาติ. การเปรียบเทียบเทคนิคการผสมและการกระจายตัวของผงสีอินทรีย์ในพอลิเมอร์ชนิดความหนาแน่นปานกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
 15. Mukhtar Ahmed. Coloring of Plastics : Theory and Practices. Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
 16. เจริญ นาคะสรรค์. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์นิติธรรม, 2542.
 17. Industrial Designers Society of America Materials and Processes Section. Plastic: Injection Molding[online]. Available from: <http://www.idsa-mp.org>, [2005, September 27].
 18. นิทัศน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์ 1. เชียงใหม่: ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
 19. คณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปฏิบัติการทดสอบพอลิเมอร์. 2545.
 20. American National Standard. ASTM D1238-04c Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. 2004.
 21. American National Standard, ASTM D638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2003.

22. Dow Chemical Company. Styron Polystyrene: Mechanical Properties. [Online] Available from: <http://www.dow.com/styron> [2005, September 26]
23. American National Standard, ASTM D790-03 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 2003.
24. American National Standard, ASTM D256-05 Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. 2005.
25. Institut for Kemiteknik. DSC - DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY. [online]. Available from: <http://hekabe.kt.dtu.dk>, [2006, March 20].
26. รัตนา จิตต์ลดดาพิทักษ์ และแสงเพชร อิศสระพาดิษยกิจ. การเสริมแรงพลาสติก PP และ PE ด้วยขวด PET ที่ใช้แล้ว. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
27. สมพงษ์ ส่องชัยนำสกุล, เพลินพิศ ปานนิลวงศ์ และรุ่งลักษณ์ พร้อมพันธ์. การนำขยะพลาสติกผสม (PE กับ PET และ PP กับกากหมักพิมพ์) มาขึ้นรูปด้วยการฉีดเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
28. สิริรินทร์ สุธาชีวะ และสุวัฒน์ เขียมแสงจันทร์. การนำขยะพลาสติก พีอี พีพี และเพต มาดัดแปลงขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยวิธี compression. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
29. กัญจนา ตระกูลคู. การศึกษาสมบัติทางกลและการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) กับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (PET). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, 2538:1-35.
30. ประณัฐ โพธิยะราช, กิตติภูมิ กลัปดี และธีรศักดิ์ สรรพศิริ. การปรับปรุงเทคนิคการผลิตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับขวดPETที่ใช้แล้ว. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) 1, 2545:167-175.
31. Palova Santos, Sergio Henrique Pezzin. Mechanical properties of polypropylene reinforced with recycled-pet fibres. Journal of Materials Processing Technology. 143-144, 2003 : 517-520.

32. C.Saujanya, S.Radhakrishnan. Structure development and properties of PET fibre filled PP composites. Journal of Polymer 42, 2001:4537-4548.
33. Marek Pyda. Advanced Thermal Analysis System. [Online] Available from: <http://www.prz.rzeszow.pl/athas>, [2005, Feb 20].



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

1) พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการอบ

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	31.5	27.6	259.8
2	31.8	29.9	260.2
3	31.8	28.7	265.2
4	31.9	27.4	265.7
5	31.9	28.8	268.2
Average	31.8	28.5	263.8
SD	0.2	0.9	3.3
MAXIMUM	31.5	27.4	259.8
MINIMUM	31.9	29.9	268.2
MAX +	0.2	1.4	4.4
MIN -	0.3	1.0	4.0

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	40.3	742.2	1715.0	17.8
2	40.9	743.9	2142.5	17.6
3	40.2	747.5	2082.5	17.6
4	41.7	726.4	1867.5	17.9
5	41.0	728.8	1902.5	17.5
Average	40.8	737.8	1942.0	17.7
SD	0.5	8.5	154.0	0.1
MAXIMUM	40.2	726.4	1715.0	17.5
MINIMUM	41.7	747.5	2142.5	17.9
MAX +	0.9	9.7	200.5	0.2
MAX -	0.6	11.4	227.0	0.2

2) พอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบด

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	32.3	27.9	268.7
2	32.2	28.2	283.4
3	31.8	28.8	285.1
4	32.0	29.8	287.4
5	32.1	30.3	291.4
Average	32.1	29.0	283.2
SD	0.2	0.9	7.7
MAXIMUM	31.8	27.9	268.7
MINIMUM	32.3	30.3	291.4
MAX +	0.2	1.3	8.2
MIN -	0.3	1.1	14.5

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	43.3	992.9	2545.0	15.9
2	43.3	999.5	2380.0	15.8
3	43.4	999.5	2500.0	15.9
4	45.0	1053.0	2402.5	15.8
5	44.5	1087.0	2357.5	16.0
Average	43.9	1026.4	2437.0	15.9
SD	0.7	37.3	72.7	0.1
MAXIMUM	43.3	992.9	2357.5	15.8
MINIMUM	45.0	1087.0	2545.0	16.0
MAX +	1.1	60.6	108.0	0.1
MAX -	0.6	33.5	79.5	0.1

3) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 0 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	29.6	25.1	253.9
2	29.9	25.3	270.8
3	29.9	26.9	271.7
4	30.1	27.6	283.8
5	30.6	28.0	287.3
Average	30.0	26.6	273.5
SD	0.3	1.2	11.8
MAXIMUM	29.6	25.1	253.9
MINIMUM	30.6	28.0	287.3
MAX +	0.6	1.4	13.8
MIN -	0.5	1.5	19.6

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	39.9	957.5	2142.5	20.1
2	38.7	1014.0	1902.5	20.1
3	38.9	923.4	1902.5	20.2
4	39.8	919.2	1902.5	20.5
5	40.2	854.1	2142.5	20.5
Average	39.5	933.6	1998.5	20.3
SD	0.6	52.3	117.6	0.2
MAXIMUM	38.7	854.1	1902.5	20.1
MINIMUM	40.2	1014.0	2142.5	20.5
MAX +	0.7	80.4	144.0	0.2
MAX -	0.8	79.5	96.0	0.2

4) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 5 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	27.3	19.2	244.9
2	27.4	19.3	245.0
3	27.7	19.9	251.8
4	27.8	20.0	258.9
5	27.9	20.1	267.5
Average	27.6	19.7	253.6
SD	0.2	0.4	8.7
MAXIMUM	27.3	19.2	244.9
MINIMUM	27.9	20.1	267.5
MAX +	0.3	0.4	13.9
MIN -	0.3	0.5	8.7

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	36.1	748.1	1605.0	17.2
2	37.7	620.0	1650.0	17.0
3	38.1	735.1	1650.0	17.2
4	37.5	618.8	1817.5	17.3
5	37.5	806.2	1902.5	17.2
Average	37.4	705.6	1725.0	17.2
SD	0.7	74.4	114.6	0.1
MAXIMUM	36.1	618.8	1605.0	17.0
MINIMUM	38.1	806.2	1902.5	17.3
MAX +	0.7	100.6	177.5	0.1
MAX -	1.3	86.8	120.0	0.1

5) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 10 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	25.0	18.3	247.9
2	25.4	18.4	250.9
3	25.6	18.9	252.8
4	25.7	19.1	254.1
5	25.9	19.2	256.7
Average	25.5	18.8	252.5
SD	0.3	0.4	3.0
MAXIMUM	25.0	18.3	247.9
MINIMUM	25.9	19.2	256.7
MAX +	0.3	0.5	4.2
MIN -	0.5	0.5	4.6

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	37.9	752.6	1627.5	13.8
2	36.7	754.6	1627.5	13.8
3	37.1	772.5	1635.0	13.9
4	39.9	817.6	1665.0	14.0
5	40.5	823.8	1697.5	14.2
Average	38.4	784.2	1650.5	14.0
SD	1.5	30.6	27.3	0.1
MAXIMUM	36.7	752.6	1627.5	13.8
MINIMUM	40.5	823.8	1697.5	14.2
MAX +	2.1	39.6	47.0	0.2
MAX -	1.7	31.6	23.0	0.1

6) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 15 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	25.0	17.6	245.9
2	25.4	17.9	247.8
3	25.6	18.4	248.9
4	25.7	18.7	254.1
5	25.9	19.4	257.2
Average	25.5	18.4	250.8
SD	0.3	0.6	4.2
MAXIMUM	25.0	17.6	245.9
MINIMUM	25.9	19.4	257.2
MAX +	0.3	1.0	6.4
MIN -	0.5	0.8	4.9

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	38.1	930.2	1600.0	13.7
2	38.5	967.3	1620.0	13.7
3	38.6	972.1	1650.0	13.8
4	38.3	983.8	1650.0	13.5
5	38.9	984.2	1605.0	13.3
Average	38.5	967.5	1625.0	13.6
SD	0.3	19.8	21.4	0.2
MAXIMUM	38.1	930.2	1600.0	13.3
MINIMUM	38.9	984.2	1650.0	13.8
MAX +	0.4	16.7	25.0	0.2
MAX -	0.3	37.3	25.0	0.3

7) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 20 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	23.4	16.8	219.2
2	23.4	17.1	226.6
3	23.6	18.3	228.5
4	23.6	18.8	238.9
5	23.7	18.9	253.9
Average	23.6	18.0	233.4
SD	0.1	0.9	12.0
MAXIMUM	23.4	16.8	219.2
MINIMUM	23.7	18.9	253.9
MAX +	0.1	0.9	20.5
MIN -	0.1	1.2	14.2

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	38.0	991.7	1427.5	12.4
2	38.5	1047.0	1427.5	12.4
3	39.6	991.8	1620.0	12.8
4	40.2	994.9	1650.0	12.6
5	40.9	994.1	1650.0	12.4
Average	39.4	1003.9	1555.0	12.5
SD	1.1	21.6	104.7	0.2
MAXIMUM	38.0	991.7	1427.5	12.4
MINIMUM	40.9	1047.0	1650.0	12.8
MAX +	1.4	43.1	95.0	0.3
MAX -	1.4	12.2	127.5	0.1

8) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 30 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	22.4	16.6	208.5
2	22.7	16.9	223.6
3	22.8	17.2	225.3
4	22.9	17.5	231.8
5	23.3	17.5	239.6
Average	22.8	17.1	225.8
SD	0.3	0.3	10.3
MAXIMUM	22.4	16.6	208.5
MINIMUM	23.3	17.5	239.6
MAX +	0.5	0.4	13.9
MIN -	0.4	0.5	17.3

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	39.6	1096.0	1367.5	11.3
2	39.7	1053.0	1387.5	11.3
3	39.8	1062.0	1400.0	11.0
4	40.1	1085.0	1415.0	11.1
5	40.4	1036.0	1427.5	11.5
Average	39.9	1066.4	1399.5	11.2
SD	0.3	21.7	20.9	0.2
MAXIMUM	39.6	1036.0	1367.5	11.0
MINIMUM	40.4	1096.0	1427.5	11.5
MAX +	0.5	29.6	28.0	0.3
MAX -	0.3	30.4	32.0	0.2

9) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 40 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	21.4	14.8	210.8
2	21.6	14.8	223.2
3	21.6	14.9	225.2
4	21.7	15.1	226.8
5	21.7	15.3	230.2
Average	21.6	15.0	223.2
SD	0.1	0.2	6.6
MAXIMUM	21.4	14.8	210.8
MINIMUM	21.7	15.3	230.2
MAX +	0.1	0.3	6.9
MIN -	0.2	0.2	12.5

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	40.7	1285.0	1400.0	10.8
2	41.5	1250.0	1400.0	10.3
3	41.9	1223.0	1415.0	10.3
4	42.0	1206.0	1427.5	10.6
5	42.3	1135.0	1427.5	10.2
Average	41.7	1219.8	1414.0	10.4
SD	0.5	50.1	12.3	0.2
MAXIMUM	40.7	1135.0	1400.0	10.2
MINIMUM	42.3	1285.0	1427.5	10.8
MAX +	0.6	65.2	13.5	0.3
MAX -	1.0	84.8	14.0	0.2

10) พอลิเมอริสผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 0 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 0 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	34.2	27.0	316.0
2	34.2	27.1	317.9
3	34.1	27.8	321.7
4	34.1	28.3	327.6
5	34.2	28.7	331.3
Average	34.2	27.8	322.9
SD	0.1	0.7	5.8
MAXIMUM	34.1	27.0	316.0
MINIMUM	34.2	28.7	331.3
MAX +	0.1	0.9	8.4
MIN -	0.1	0.8	6.9

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	46.9	1212.0	2570.0	14.6
2	47.2	1205.0	2545.0	14.3
3	47.0	1192.0	2570.0	14.6
4	47.7	1180.0	2570.0	14.4
5	47.6	1201.0	2617.5	14.7
Average	47.3	1198.0	2574.5	14.5
SD	0.3	11.1	23.6	0.1
MAXIMUM	46.9	1180.0	2545.0	14.3
MINIMUM	47.7	1212.0	2617.5	14.7
MAX +	0.4	14.0	43.0	0.2
MAX -	0.4	18.0	29.5	0.2

11) พอลิเมอรัสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 0 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 0 phr และพอลิเอทีลีนแวกซ์ 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	30.4	29.1	222.1
2	30.3	29.4	226.1
3	30.4	30.6	227.8
4	30.5	30.8	228.5
5	30.3	31.5	229.1
Average	30.4	30.3	226.7
SD	0.1	0.9	2.5
MAXIMUM	30.3	29.1	222.1
MINIMUM	30.5	31.5	229.1
MAX +	0.1	1.2	2.4
MIN -	0.1	1.2	4.6

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	38.1	690.8	1387.5	23.3
2	36.4	699.1	1400.0	23.2
3	36.6	715.8	1415.0	22.9
4	36.9	715.8	1415.0	23.3
5	37.0	741.2	1427.5	23.7
Average	37.0	712.5	1409.0	23.3
SD	0.6	17.3	13.8	0.3
MAXIMUM	36.4	690.8	1387.5	22.9
MINIMUM	38.1	741.2	1427.5	23.7
MAX +	1.1	28.7	18.5	0.4
MAX -	0.6	21.7	21.5	0.4

12) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 10 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	35.5	20.3	423.5
2	35.5	19.9	425.8
3	35.7	18.6	426.7
4	35.4	19.4	427.3
5	35.4	21.0	421.6
Average	35.5	19.8	425.0
SD	0.1	0.8	2.1
MAXIMUM	35.4	18.6	421.6
MINIMUM	35.7	21.0	427.3
MAX +	0.2	1.2	2.3
MIN -	0.1	1.3	3.4

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	47.3	1182.0	1867.5	12.3
2	48.1	1204.0	1902.5	12.3
3	48.8	1212.0	1902.5	12.3
4	48.9	1136.0	1902.5	11.8
5	49.4	1145.0	1902.5	12.6
Average	48.5	1175.8	1895.5	12.3
SD	0.7	30.6	14.0	0.3
MAXIMUM	47.3	1136.0	1867.5	11.8
MINIMUM	49.4	1212.0	1902.5	12.6
MAX +	1.0	36.2	7.0	0.4
MAX -	1.2	39.8	28.0	0.4

13) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 10 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	34.7	20.1	415.6
2	34.9	18.5	416.7
3	34.7	19.4	422.1
4	34.7	18.6	427.1
5	34.8	19.1	434.1
Average	34.8	19.1	423.1
SD	0.1	0.6	6.9
MAXIMUM	34.7	18.5	415.6
MINIMUM	34.9	20.1	434.1
MAX +	0.1	1.0	11.0
MIN -	0.1	0.7	7.5

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	45.2	1326.0	1867.5	11.5
2	45.6	1299.0	1867.5	11.8
3	46.0	1291.0	1635.0	11.5
4	46.5	1313.0	1650.0	11.6
5	46.9	1377.0	1635.0	11.5
Average	46.0	1321.2	1731.0	11.6
SD	0.6	30.4	111.6	0.1
MAXIMUM	45.2	1291.0	1635.0	11.5
MINIMUM	46.9	1377.0	1867.5	11.8
MAX +	0.9	55.8	136.5	0.2
MAX -	0.8	30.2	96.0	0.1

14) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 10 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	34.5	17.9	429.1
2	34.7	20.2	423.6
3	34.8	18.4	428.9
4	35.0	19.1	432.0
5	35.4	18.7	434.3
Average	34.9	18.9	429.6
SD	0.3	0.8	3.6
MAXIMUM	34.5	17.9	423.6
MINIMUM	35.4	20.2	434.3
MAX +	0.5	1.3	4.7
MIN -	0.4	0.9	6.0

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	46.6	1334.0	1635.0	11.2
2	46.2	1314.0	1650.0	11.2
3	45.1	1335.0	1650.0	11.1
4	47.3	1327.0	1665.0	10.9
5	44.2	1344.0	1867.5	10.9
Average	45.9	1330.8	1693.5	11.1
SD	1.1	10.0	87.5	0.1
MAXIMUM	44.2	1314.0	1635.0	10.9
MINIMUM	47.3	1344.0	1867.5	11.2
MAX +	1.4	13.2	174.0	0.1
MAX -	1.7	16.8	58.5	0.2

15) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 10 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 15 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	35.1	18.4	436.8
2	35.3	17.6	433.9
3	35.5	18.2	432.3
4	35.6	18.3	434.3
5	35.9	17.0	430.1
Average	35.5	17.9	433.5
SD	0.3	0.5	2.2
MAXIMUM	35.1	17.0	430.1
MINIMUM	35.9	18.4	436.8
MAX +	0.4	0.5	3.3
MIN -	0.4	0.9	3.3

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	45.2	1353.0	1650.0	13.3
2	45.2	1350.0	1650.0	13.6
3	45.9	1287.0	1650.0	13.2
4	46.1	1288.0	1650.0	13.6
5	47.0	1313.0	1650.0	13.6
Average	45.9	1318.2	1650.0	13.5
SD	0.7	28.8	0.0	0.2
MAXIMUM	45.2	1287.0	1650.0	13.2
MINIMUM	47.0	1353.0	1650.0	13.6
MAX +	1.2	34.8	0.0	0.2
MAX -	0.7	31.2	0.0	0.2

16) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	32.5	18.0	409.6
2	32.5	18.6	411.9
3	32.7	18.8	414.3
4	32.4	18.6	415.6
5	32.4	18.8	416.7
Average	32.5	18.6	413.6
SD	0.1	0.3	2.6
MAXIMUM	32.4	18.0	409.6
MINIMUM	32.7	18.8	416.7
MAX +	0.2	0.3	3.1
MIN -	0.1	0.6	4.0

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	44.0	1158.0	1415.0	11.8
2	44.0	1170.0	1415.0	11.9
3	43.3	1206.0	1885.0	11.9
4	43.6	1172.0	1635.0	11.8
5	43.7	1192.0	1635.0	12.0
Average	43.7	1179.6	1597.0	11.9
SD	0.3	17.1	174.4	0.1
MAXIMUM	43.3	1158.0	1415.0	11.8
MINIMUM	44.0	1206.0	1885.0	12.0
MAX +	0.3	26.4	288.0	0.1
MAX -	0.4	21.6	182.0	0.1

17) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	32.9	17.1	423.4
2	32.8	16.6	423.8
3	32.8	16.7	421.0
4	32.9	17.1	419.3
5	32.9	17.9	412.8
Average	32.9	17.1	420.1
SD	0.1	0.4	4.0
MAXIMUM	32.8	16.6	412.8
MINIMUM	32.9	17.9	423.8
MAX +	0.1	0.8	3.7
MIN -	0.1	0.5	7.2

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	44.1	1367.0	1635.0	10.8
2	44.5	1330.0	1665.0	11.0
3	44.9	1330.0	1665.0	11.1
4	45.6	1330.0	1665.0	10.8
5	45.9	1294.0	1665.0	10.6
Average	45.0	1330.2	1659.0	10.9
SD	0.7	23.1	12.0	0.2
MAXIMUM	44.1	1294.0	1635.0	10.6
MINIMUM	45.9	1367.0	1665.0	11.1
MAX +	0.9	36.8	6.0	0.3
MAX -	0.9	36.2	24.0	0.3

18) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	32.6	16.6	425.1
2	32.7	17.1	421.9
3	32.9	16.8	428.3
4	32.7	16.3	434.4
5	32.7	16.8	424.5
Average	32.7	16.7	426.8
SD	0.1	0.3	4.3
MAXIMUM	32.6	16.3	421.9
MINIMUM	32.9	17.1	434.4
MAX +	0.2	0.4	7.6
MIN -	0.1	0.4	4.9

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	45.8	1324.0	1658.3	10.4
2	46.6	1333.0	1643.2	10.3
3	44.5	1378.0	1658.3	10.6
4	47.0	1380.0	1658.3	10.6
5	45.3	1385.0	1658.3	10.5
Average	45.8	1360.0	1655.3	10.5
SD	0.9	26.0	6.0	0.1
MAXIMUM	44.5	1324.0	1643.2	10.3
MINIMUM	47.0	1385.0	1658.3	10.6
MAX +	1.2	25.0	3.0	0.1
MAX -	1.3	36.0	12.1	0.2

19) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 15 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	32.7	16.6	430.7
2	32.8	16.7	432.2
3	32.5	16.0	437.0
4	32.7	15.7	437.8
5	32.6	16.7	438.1
Average	32.6	16.3	435.1
SD	0.1	0.4	3.1
MAXIMUM	32.5	15.7	430.7
MINIMUM	32.8	16.7	438.1
MAX +	0.1	0.3	3.0
MIN -	0.2	0.6	4.5

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	45.0	1340.0	1407.0	12.2
2	45.1	1345.0	1635.0	12.3
3	45.7	1355.0	1643.2	11.8
4	46.2	1369.0	1650.0	11.5
5	46.7	1383.0	1665.0	11.6
Average	45.7	1358.4	1600.0	11.9
SD	0.7	15.8	97.0	0.3
MAXIMUM	45.0	1340.0	1407.0	11.5
MINIMUM	46.7	1383.0	1665.0	12.3
MAX +	1.0	24.6	65.0	0.4
MAX -	0.8	18.4	193.0	0.4

20) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 20 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	29.7	17.9	378.2
2	29.8	17.8	398.2
3	29.8	17.9	416.3
4	30.0	17.2	419.1
5	29.7	17.5	423.6
Average	29.8	17.7	407.1
SD	0.1	0.3	16.8
MAXIMUM	29.7	17.2	378.2
MINIMUM	30.0	17.9	423.6
MAX +	0.2	0.2	16.5
MIN -	0.1	0.4	28.8

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	43.7	1178.0	1400.0	11.2
2	43.2	1210.0	1415.0	11.3
3	43.4	1191.0	1415.0	11.4
4	43.5	1191.0	1415.0	11.3
5	43.5	1218.0	1400.0	11.3
Average	43.3	1197.6	1409.0	11.3
SD	0.2	14.4	7.3	0.0
MAXIMUM	43.7	1178.0	1400.0	11.2
MINIMUM	43.2	1218.0	1415.0	11.4
MAX +	0.3	20.4	6.0	0.1
MAX -	43.7	19.6	9.0	0.1

21) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 20 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	31.0	16.8	400.4
2	30.8	16.0	405.8
3	30.8	17.2	409.3
4	30.7	16.0	410.7
5	30.9	16.9	415.5
Average	30.8	16.6	408.3
SD	0.1	0.5	5.0
MAXIMUM	30.7	16.0	400.4
MINIMUM	31.0	17.2	415.5
MAX +	0.1	0.6	7.1
MIN -	0.1	0.6	7.9

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	44.3	1351.0	1400.0	9.9
2	44.9	1391.0	1427.5	9.8
3	44.9	1334.0	1635.0	10.1
4	45.1	1313.0	1635.0	10.0
5	45.1	1385.0	1665.0	9.9
Average	44.8	1354.8	1552.5	10.0
SD	0.3	29.7	114.1	0.1
MAXIMUM	44.3	1313.0	1400.0	9.8
MINIMUM	45.1	1391.0	1665.0	10.1
MAX +	0.3	36.2	112.5	0.1
MAX -	0.5	41.8	152.5	0.1

22) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 20 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	30.9	15.3	415.5
2	30.9	15.3	414.3
3	30.6	16.7	412.1
4	30.7	16.6	409.5
5	30.6	15.7	416.4
Average	30.7	15.9	413.5
SD	0.1	0.6	2.5
MAXIMUM	30.6	15.3	409.5
MINIMUM	30.9	16.7	416.4
MAX +	0.2	0.7	2.8
MIN -	0.2	0.6	4.1

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	45.4	1345.0	1650.0	9.8
2	46.8	1353.0	1650.0	9.5
3	45.6	1386.0	1650.0	9.7
4	46.1	1405.0	1650.0	9.6
5	46.1	1414.0	1665.0	9.6
Average	46.0	1380.6	1653.0	9.6
SD	0.5	27.5	6.0	0.1
MAXIMUM	45.4	1345.0	1650.0	9.5
MINIMUM	46.8	1414.0	1665.0	9.8
MAX +	0.8	33.4	12.0	0.2
MAX -	0.6	35.6	3.0	0.1

23) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 20 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 15 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	30.5	14.6	428.1
2	30.4	14.9	428.1
3	30.3	14.4	436.3
4	30.2	14.5	437.9
5	30.5	14.7	434.0
Average	30.4	14.6	432.9
SD	0.1	0.2	4.1
MAXIMUM	30.2	14.4	428.1
MINIMUM	30.5	14.9	437.9
MAX +	0.1	0.3	5.0
MIN -	0.2	0.2	4.8

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	47.8	1399.0	1650.0	10.9
2	45.2	1333.0	1650.0	10.9
3	45.3	1342.0	1665.0	11.2
4	45.6	1343.0	1665.0	11.3
5	45.3	1397.0	1655.0	11.4
Average	45.8	1362.8	1657.0	11.2
SD	1.0	29.0	6.8	0.2
MAXIMUM	45.2	1333.0	1650.0	10.9
MINIMUM	47.8	1399.0	1665.0	11.4
MAX +	2.0	36.2	8.0	0.3
MAX -	0.6	29.8	7.0	0.3

24) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 30 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	27.7	15.7	393.2
2	27.2	15.4	395.1
3	27.8	15.7	397.6
4	27.9	14.5	399.8
5	27.6	14.4	405.4
Average	27.6	15.1	398.2
SD	0.2	0.6	4.2
MAXIMUM	27.2	14.4	393.2
MINIMUM	27.9	15.7	405.4
MAX +	0.2	0.6	7.2
MIN -	0.4	0.8	5.0

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	40.9	1176.0	1177.5	10.7
2	40.3	1176.0	1177.5	10.2
3	40.1	1201.0	1177.5	10.6
4	40.3	1250.0	1177.5	10.6
5	39.4	1264.0	1177.5	10.1
Average	40.2	1213.4	1177.5	10.5
SD	0.5	37.0	0.0	0.2
MAXIMUM	39.4	1176.0	1177.5	10.1
MINIMUM	40.9	1264.0	1177.5	10.7
MAX +	0.7	50.6	0.0	0.3
MAX -	0.8	37.4	0.0	0.3

25) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 30 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	29.7	13.8	417.5
2	29.4	13.8	417.2
3	28.8	14.4	398.1
4	29.6	14.5	399.9
5	29.7	15.4	397.3
Average	29.4	14.4	406.0
SD	0.3	0.6	9.3
MAXIMUM	28.8	13.8	397.3
MINIMUM	29.7	15.4	417.5
MAX +	0.2	1.0	11.5
MIN -	0.6	0.6	8.7

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	42.8	1371.0	1415.0	8.6
2	43.8	1363.0	1415.0	8.9
3	43.1	1396.0	1415.0	8.8
4	42.8	1396.0	1427.5	9.2
5	42.3	1337.0	1635.0	9.2
Average	43.0	1372.6	1461.5	8.9
SD	0.5	22.2	86.9	0.2
MAXIMUM	42.3	1337.0	1415.0	8.6
MINIMUM	43.8	1396.0	1635.0	9.2
MAX +	0.8	23.4	173.5	0.3
MAX -	0.6	35.6	46.5	0.3

26) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 30 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	29.7	14.6	436.0
2	28.6	13.5	407.9
3	29.3	14.2	425.5
4	29.7	14.1	395.9
5	29.7	15.0	399.8
Average	29.4	14.3	413.0
SD	0.4	0.5	15.3
MAXIMUM	28.6	13.5	395.9
MINIMUM	29.7	15.0	436.0
MAX +	0.3	0.7	23.0
MIN -	0.8	0.8	17.1

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	42.3	1372.0	1635.0	8.1
2	42.3	1373.0	1665.0	8.5
3	45.8	1375.0	1665.0	8.6
4	43.4	1384.0	1665.0	8.5
5	43.7	1393.0	1665.0	8.0
Average	43.5	1379.4	1659.0	8.3
SD	1.3	8.0	12.0	0.2
MAXIMUM	42.3	1372.0	1635.0	8.0
MINIMUM	45.8	1393.0	1665.0	8.6
MAX +	2.3	13.6	6.0	0.3
MAX -	1.2	7.4	24.0	0.4

27) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 30 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 15 phr

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	29.7	13.7	438.8
2	30.1	13.8	427.1
3	29.3	13.5	429.5
4	29.6	13.5	438.3
5	30.1	13.4	427.1
Average	29.7	13.6	432.1
SD	0.3	0.1	5.3
MAXIMUM	29.3	13.4	427.1
MINIMUM	30.1	13.8	438.8
MAX +	0.4	0.2	6.6
MIN -	0.4	0.2	5.1

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	44.5	1382.0	1659.0	7.8
2	46.0	1434.0	1665.0	7.8
3	46.6	1441.0	1665.0	7.9
4	47.2	1455.0	1867.6	7.9
5	48.2	1458.0	1902.5	7.9
Average	46.5	1434.0	1751.8	7.8
SD	1.2	27.5	109.4	0.1
MAXIMUM	44.5	1382.0	1659.0	7.8
MINIMUM	48.2	1458.0	1902.5	7.9
MAX +	1.7	24.0	150.7	0.1
MAX -	2.0	52.0	92.8	0.1

27) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr ซึ่งทำการบดเฉพาะพेटเท่านั้นด้วยตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	32.5	21.2	403.1
2	32.6	20.5	406.6
3	32.2	21.0	404.6
4	32.3	20.7	403.4
5	32.4	21.7	408.5
Average	32.4	21.0	405.2
SD	0.1	0.4	2.0
MAXIMUM	32.2	20.5	403.1
MINIMUM	32.6	21.7	408.5
MAX +	0.2	0.7	3.2
MIN -	0.2	0.5	2.1

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	44.2	1226.0	1650.0	11.9
2	44.4	1285.0	1650.0	12.0
3	45.0	1225.0	1650.0	11.5
4	45.4	1271.0	1650.0	11.5
5	45.7	1189.0	1650.0	12.3
Average	44.9	1239.2	1650.0	11.8
SD	0.6	34.7	0.0	0.3
MAXIMUM	44.2	1189.0	1650.0	11.5
MINIMUM	45.7	1285.0	1650.0	12.3
MAX +	0.7	45.8	0.0	0.4
MAX -	0.8	50.2	0.0	0.3

28) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เฟต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr ซึ่งทำการบดเฉพาะเฟตเท่านั้นด้วยตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	33.5	19.4	459.7
2	33.3	18.7	455.7
3	33.1	19.0	441.0
4	33.3	16.9	446.7
5	33.2	17.8	450.7
Average	33.3	18.4	450.7
SD	0.1	0.9	6.6
MAXIMUM	33.1	16.9	441.0
MINIMUM	33.5	19.4	459.7
MAX +	0.3	1.0	8.9
MIN -	0.1	1.4	9.7

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	46.2	1320.0	1650.0	10.1
2	46.6	1417.0	1650.0	10.1
3	48.3	1394.0	1665.0	10.0
4	48.3	1430.0	1885.0	10.0
5	48.6	1421.0	1902.5	9.6
Average	47.6	1396.4	1750.5	9.9
SD	1.0	40.0	117.2	0.2
MAXIMUM	46.2	1320.0	1650.0	9.6
MINIMUM	48.6	1430.0	1902.5	10.1
MAX +	1.0	33.6	152.0	0.2
MAX -	1.4	76.4	100.5	0.4

29) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr ซึ่งทำการบดเฉพาะเพตเท่านั้นด้วยตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	34.1	18.0	446.3
2	33.8	17.5	465.8
3	34.1	18.2	466.0
4	34.1	17.2	472.6
5	33.7	19.0	476.2
Average	33.9	18.0	465.4
SD	0.2	0.6	10.3
MAXIMUM	33.7	17.2	446.3
MINIMUM	34.1	19.0	476.2
MAX +	0.2	1.0	10.8
MIN -	0.3	0.8	19.1

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	47.8	1474.0	1867.5	9.3
2	48.3	1467.0	1867.5	9.4
3	48.3	1459.0	1867.5	9.6
4	49.2	1440.0	1867.5	9.6
5	49.8	1411.0	1867.5	9.7
Average	48.7	1450.2	1867.5	9.5
SD	0.7	22.7	0.0	0.1
MAXIMUM	47.8	1411.0	1867.5	9.3
MINIMUM	49.8	1474.0	1867.5	9.7
MAX +	1.1	23.8	0.0	0.1
MAX -	0.8	39.2	0.0	0.2

30) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr ซึ่งทำการบดเฉพาะพेटเท่านั้นด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	33.1	21.8	396.2
2	33.1	22.0	400.0
3	33.0	22.1	406.1
4	33.1	21.6	408.0
5	33.2	21.4	410.3
Average	33.1	21.8	404.1
SD	0.0	0.2	5.2
MAXIMUM	33.0	21.4	396.2
MINIMUM	33.2	22.1	410.3
MAX +	0.1	0.3	6.2
MIN -	0.1	0.4	7.9

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	44.3	1192.0	1635.0	12.0
2	44.5	1155.0	1635.0	12.0
3	44.7	1219.0	1650.0	11.6
4	44.8	1160.0	1650.0	11.6
5	44.9	1160.0	1650.0	11.5
Average	44.6	1177.2	1644.0	11.7
SD	0.2	24.7	7.3	0.2
MAXIMUM	44.3	1155.0	1635.0	11.5
MINIMUM	44.9	1219.0	1650.0	12.0
MAX +	0.2	41.8	6.0	0.2
MAX -	0.3	22.2	9.0	0.2

31) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr ซึ่งทำการบดเฉพาะพेटเท่านั้นด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	33.7	19.4	421.4
2	33.9	18.2	424.8
3	33.7	18.1	426.4
4	33.8	19.2	427.7
5	33.8	19.7	436.9
Average	33.8	18.9	427.4
SD	0.1	0.6	5.2
MAXIMUM	33.7	18.1	421.4
MINIMUM	33.9	19.7	436.9
MAX +	0.1	0.8	9.5
MIN -	0.1	0.8	6.0

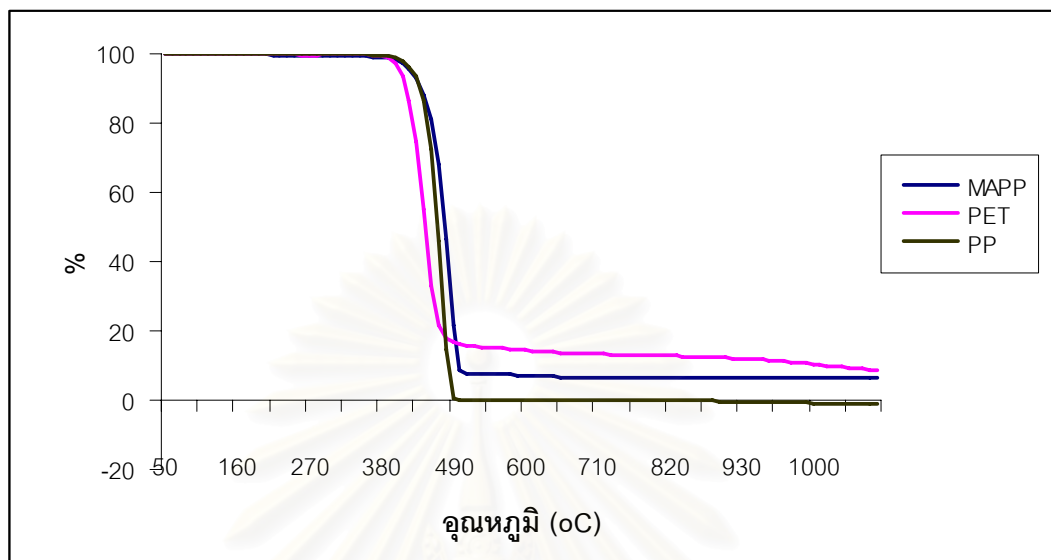
ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	44.6	1380.0	1650.0	10.2
2	45.1	1354.0	1650.0	10.2
3	45.7	1340.0	1650.0	10.4
4	45.8	1351.0	1650.0	10.1
5	46.6	1349.0	1650.0	9.8
Average	45.5	1354.8	1650.0	10.1
SD	0.7	13.4	0.0	0.2
MAXIMUM	44.6	1340.0	1650.0	9.8
MINIMUM	46.6	1380.0	1650.0	10.4
MAX +	1.0	25.2	0.0	0.2
MAX -	0.9	14.8	0.0	0.3

32) พอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr ซึ่งทำการบดเฉพาะเพตเท่านั้นด้วยตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

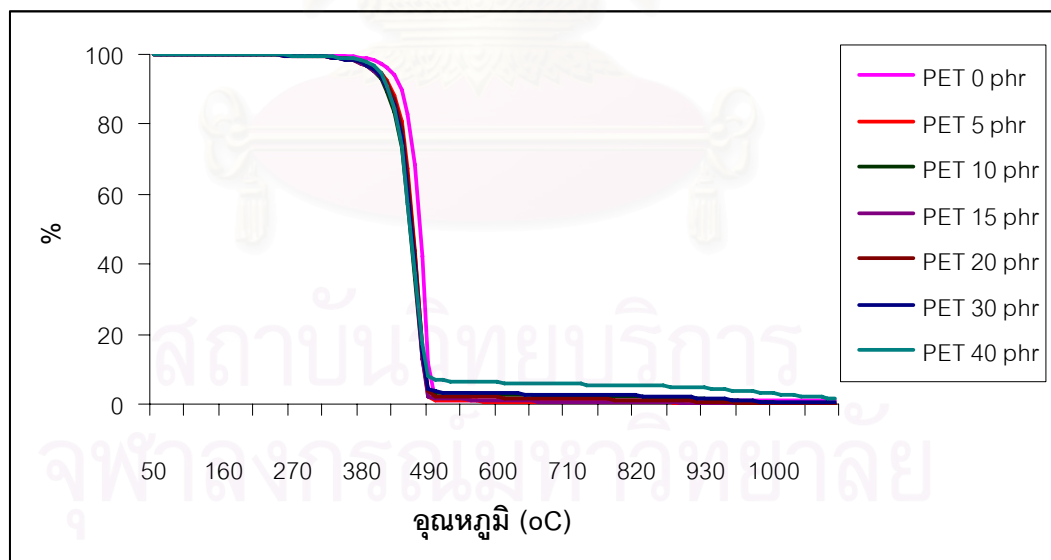
ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัวออก ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (Mpa)
1	34.9	18.7	429.2
2	34.9	17.6	431.1
3	34.8	19.1	432.1
4	34.8	18.6	433.4
5	34.9	18.7	436.3
Average	34.8	18.5	432.4
SD	0.1	0.5	2.4
MAXIMUM	34.8	17.6	429.2
MINIMUM	34.9	19.1	436.3
MAX +	0.1	0.5	3.9
MIN -	0.1	0.9	3.2

ชั้นทดสอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสดัดโค้ง (MPa)	ความทนแรงกระแทก (J/mm ²)	ดัชนีการไหล (g/ 10mins)
1	45.7	1386.0	1650.0	9.5
2	45.8	1363.0	1650.0	9.5
3	45.9	1394.0	1650.0	9.6
4	46.4	1358.0	1650.0	9.7
5	48.0	1363.0	1885.0	9.4
Average	46.3	1372.8	1697.0	9.5
SD	0.8	14.4	94.0	0.1
MAXIMUM	45.7	1358.0	1650.0	9.4
MINIMUM	48.0	1394.0	1885.0	9.7
MAX +	1.6	21.2	188.0	0.2
MAX -	0.7	14.8	47.0	0.2

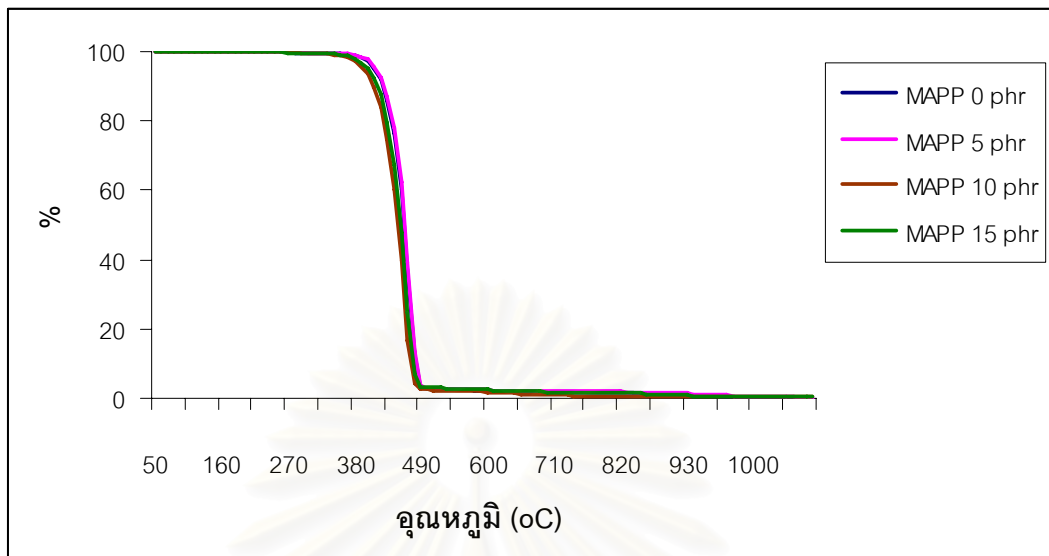
ภาคผนวก ข



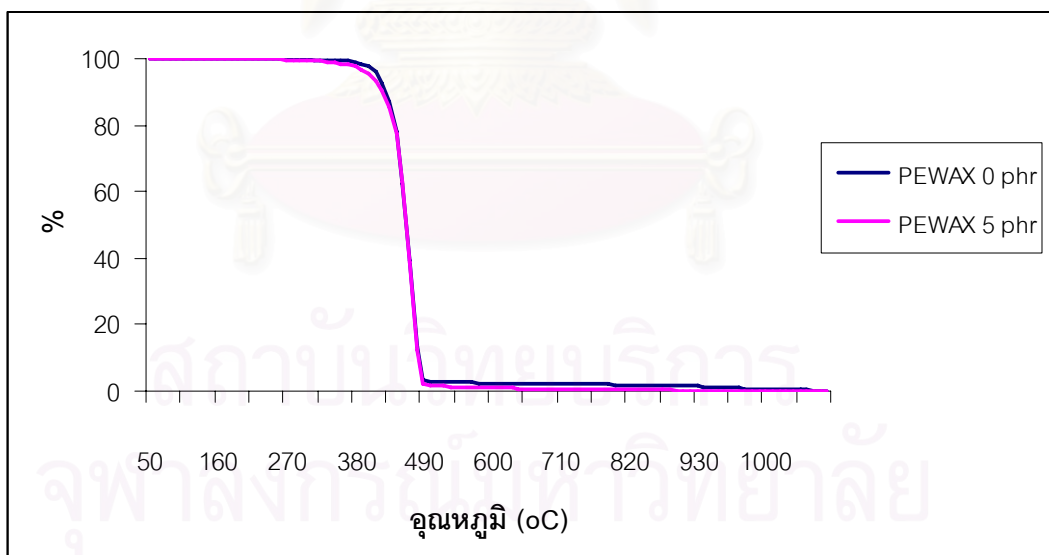
รูปที่ 1 อุณหภูมิการสลายตัวของมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิโพรพิลีน เพต และพอลิโพรพิลีน ที่ผ่านการอบ



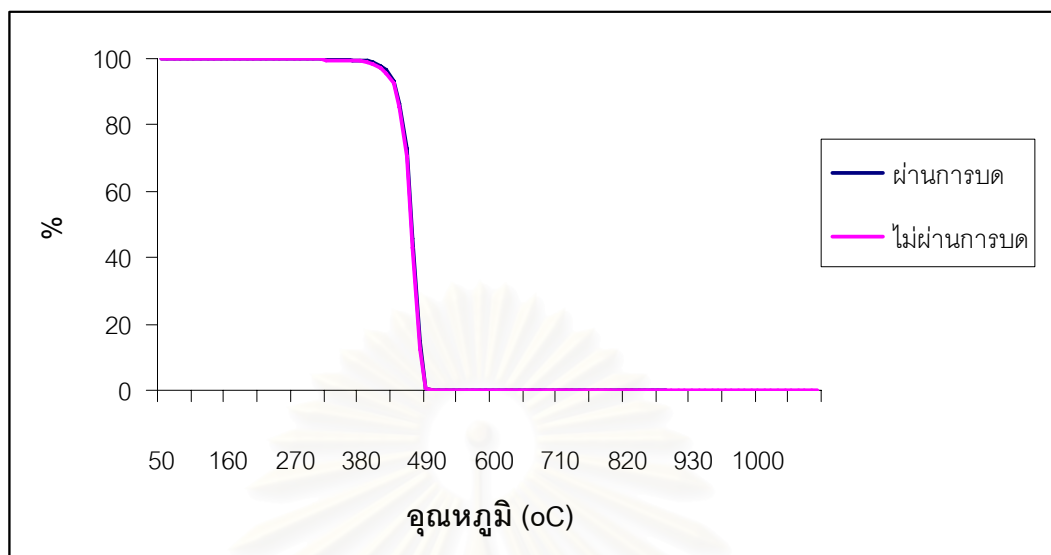
รูปที่ 2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีพอลิโพรพิลีน 100 phr พอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และเพต 0-40 phr



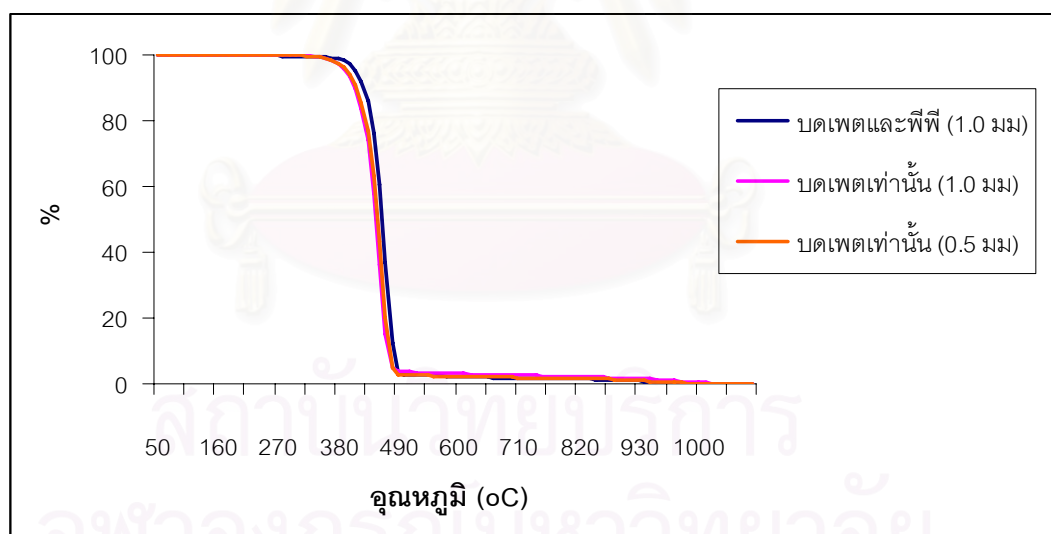
รูปที่ 3 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และ มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0-15 phr



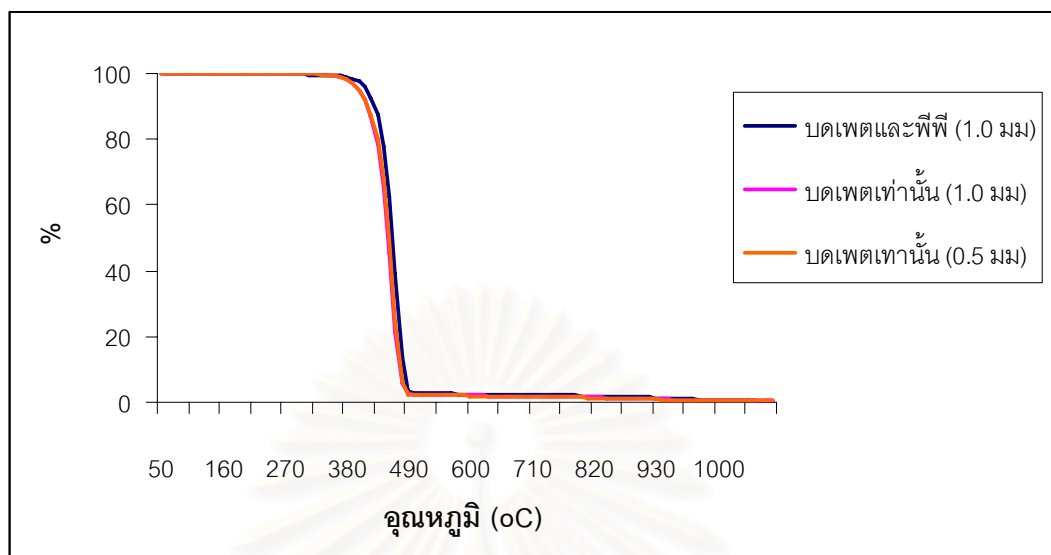
รูปที่ 4 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr มาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 0-5 phr



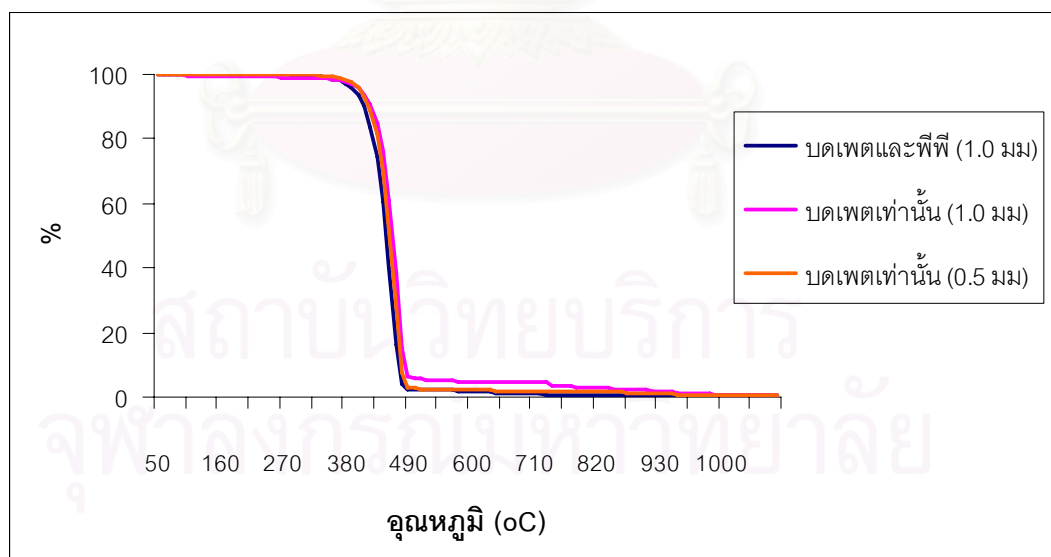
รูปที่ 5 เกลียวกราฟทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบ



รูปที่ 6 เกลียวกราฟทางความร้อนของของพอลิเมออร์นสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0 phr โดยมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบดและขนาดของตะแกรง

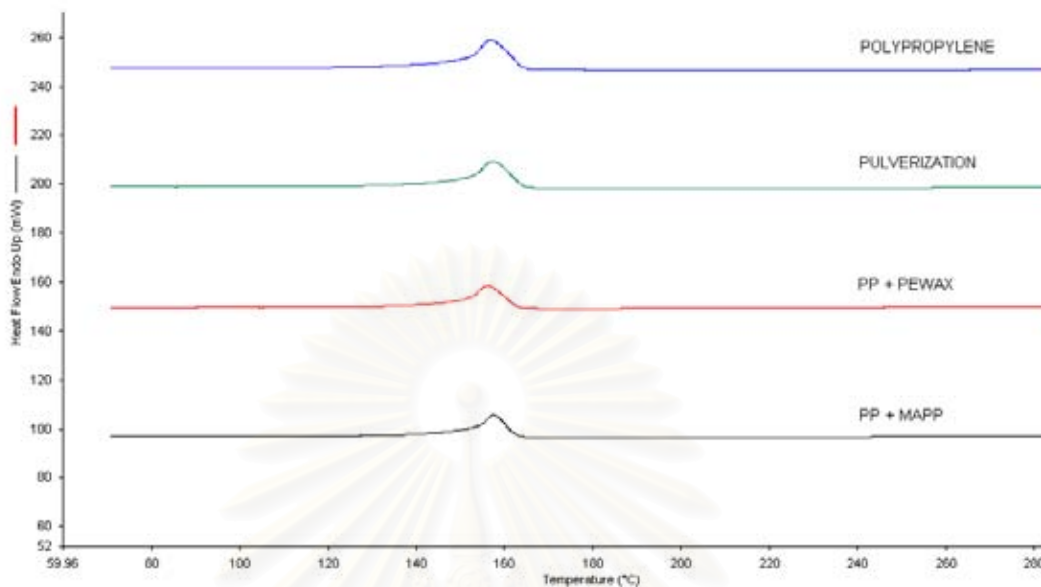


รูปที่ 7 เสร็จสภาพทางความร้อนของของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr โดยมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบดและขนาดของตะแกรง

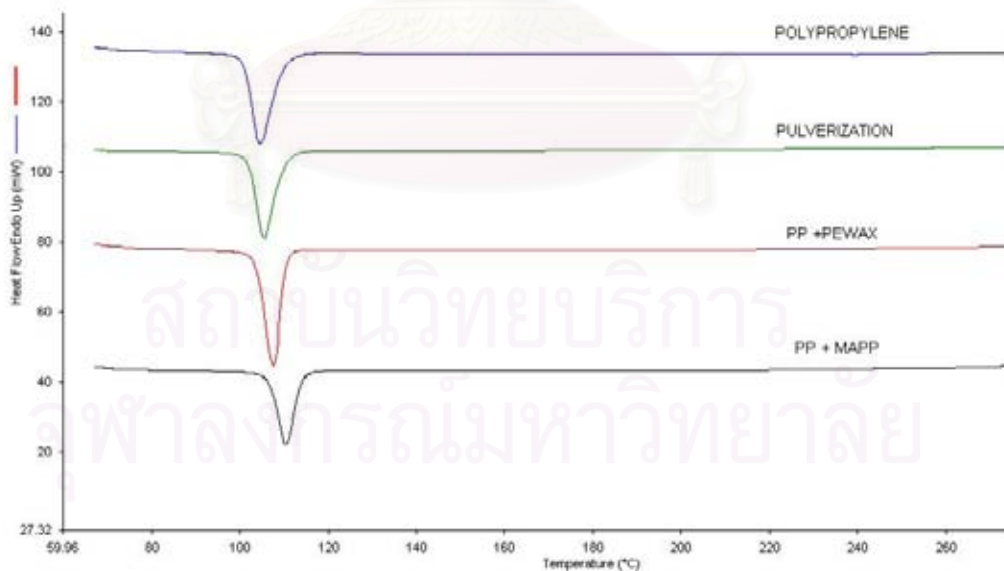


รูปที่ 8 เสร็จสภาพทางความร้อนของของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr โดยมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบดและขนาดของตะแกรง

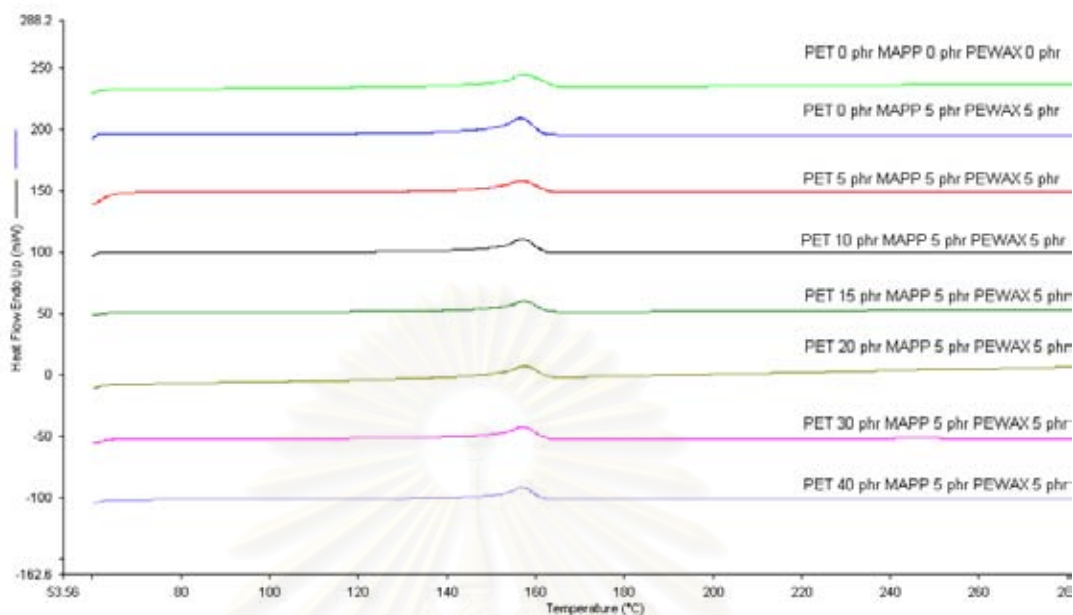
ภาคผนวก ค



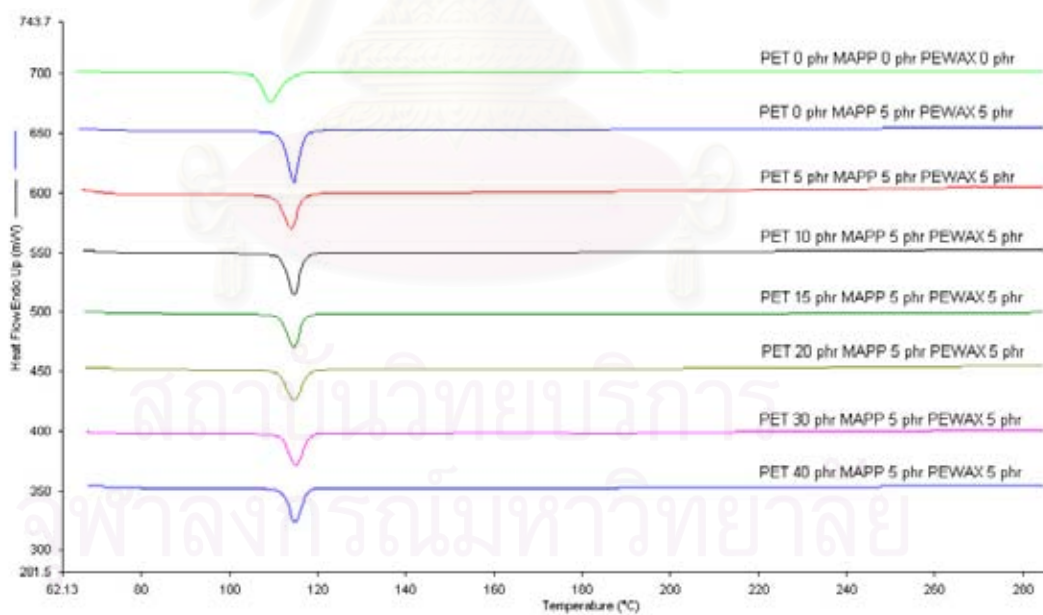
รูปที่ 1 อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบด พอลิโพรพิลีนที่ผ่านที่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr และพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน



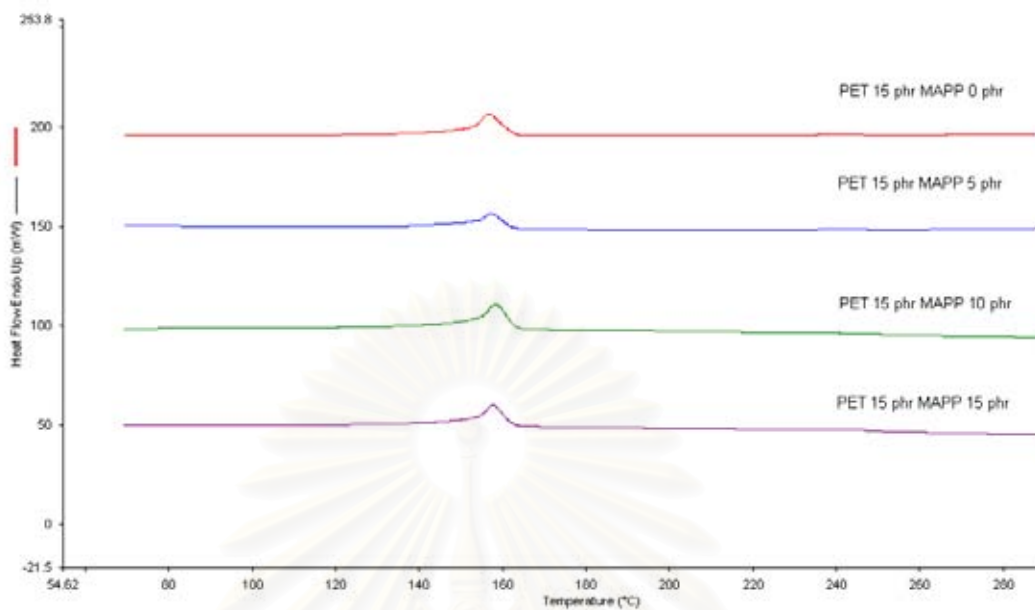
รูปที่ 2 อุณหภูมิการก่อผลึก และปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด พอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดพอลิโพรพิลีนที่ผ่านที่มีการผสมพอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr และพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดที่มีการผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน



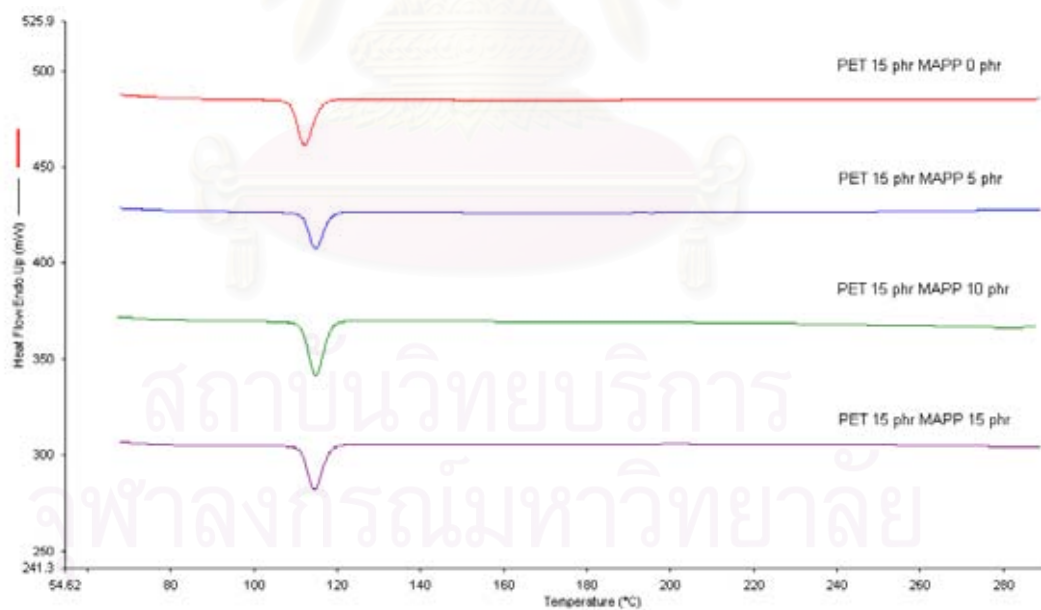
รูปที่ 3 อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีพอลิโพรพิลีน 100 phr พอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และเพต 0-40 phr



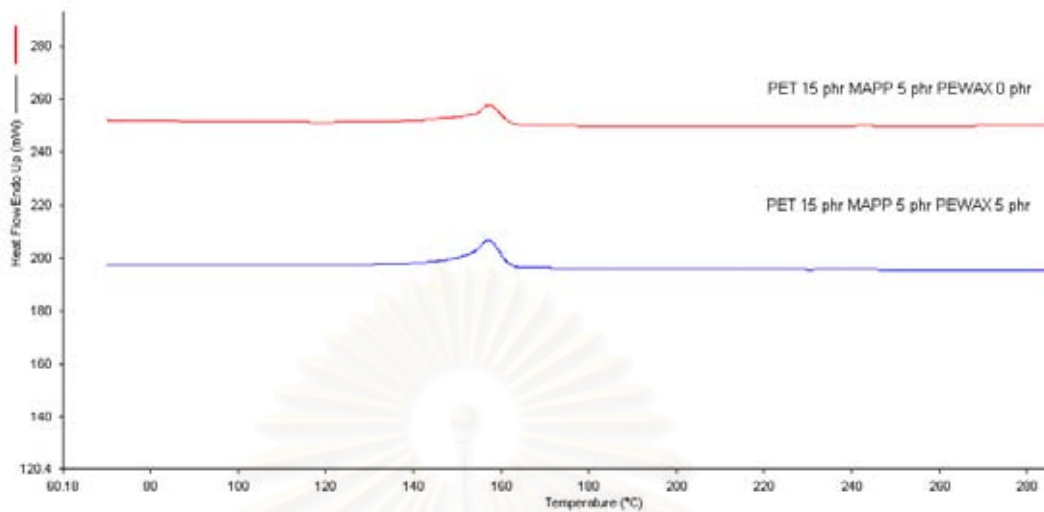
รูปที่ 4 อุณหภูมิการเกิดผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีพอลิโพรพิลีน 100 phr พอลิเอทิลีนแวกซ์ 5 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และเพต 0-40 phr



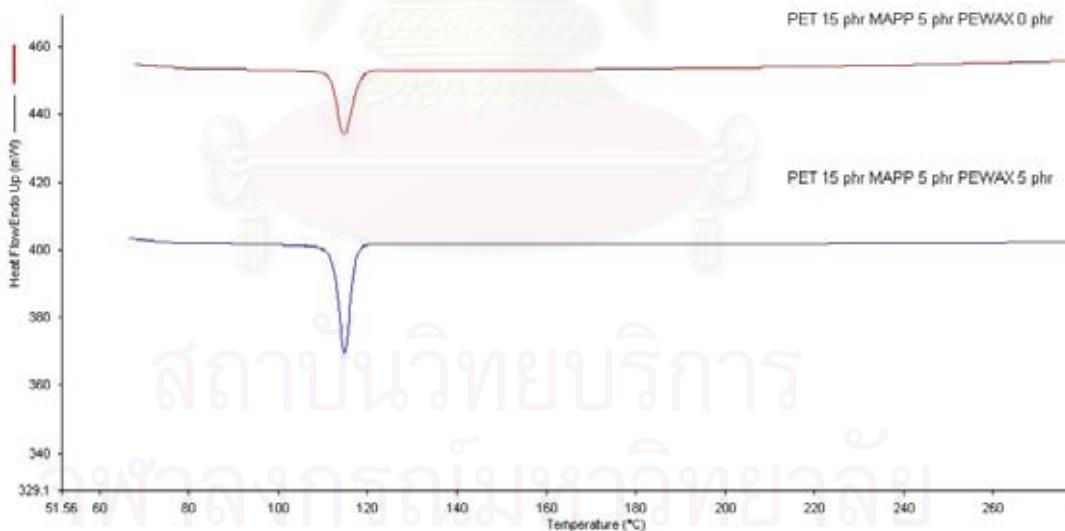
รูปที่ 5 คุณลักษณะหกลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0-15 phr



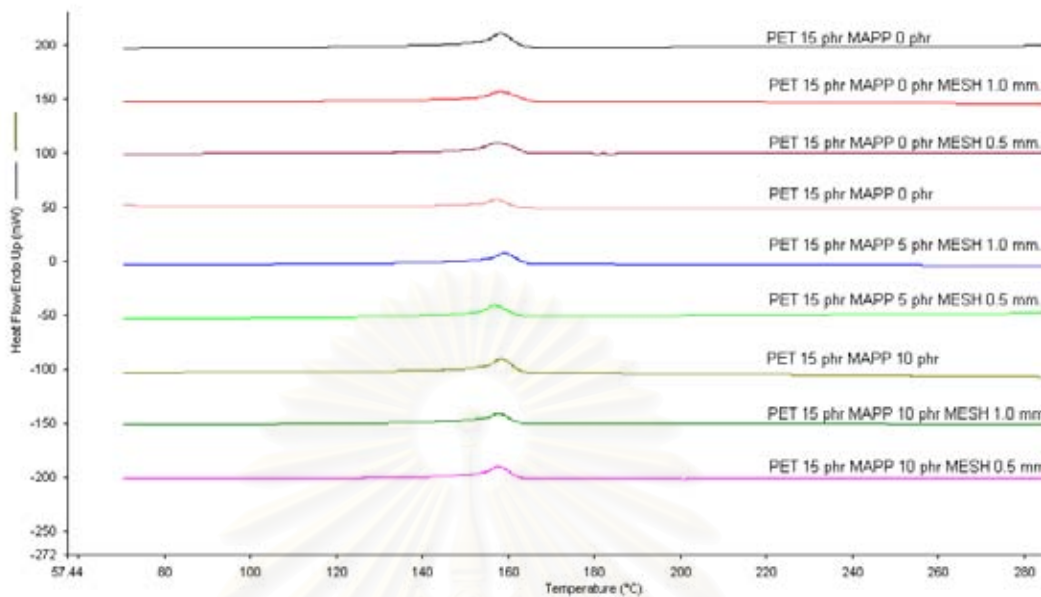
รูปที่ 6 คุณลักษณะการเกิดผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0-15 phr



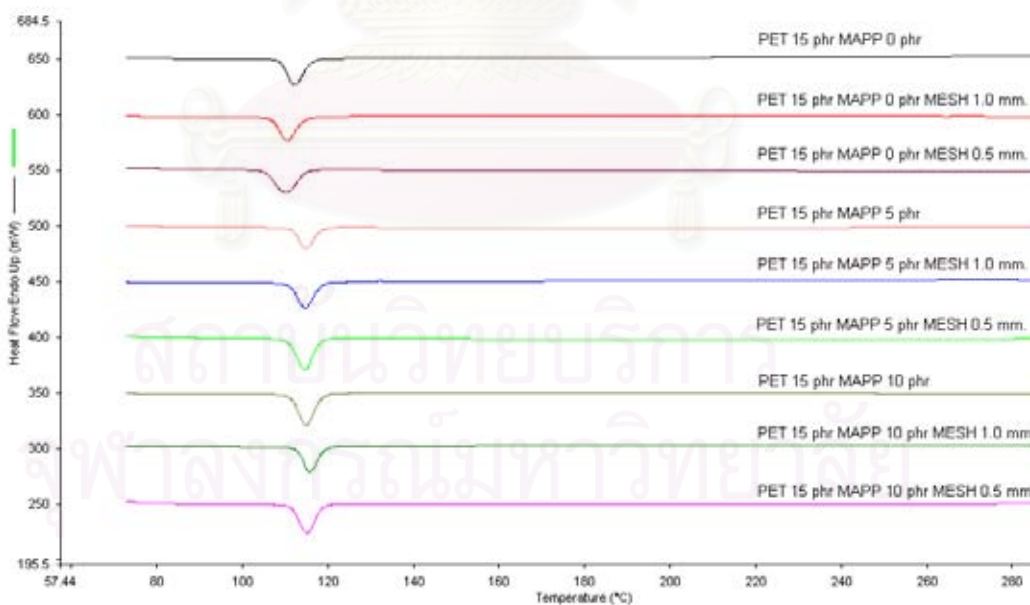
รูปที่ 7 อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 0-5 phr



รูปที่ 8 อุณหภูมิการเกิดผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr และพอลิเอทิลีนแวกซ์ 0-5 phr



รูปที่ 9 อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และ มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0-5 phr โดยมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบด และขนาดของตะแกรง



รูปที่ 10 อุณหภูมิการเกิดผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิโพรพิลีน 100 phr เพต 15 phr และมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 0-5 phr โดยมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบดและขนาดของตะแกรง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุภโชค ตันพิชัย เกิดเมื่อวันที่ 5 มีนาคม พ.ศ. 2525 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา พอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2546 โดยระหว่างการศึกษาชั้นนั้นได้รับรางวัลนิสิตผู้ทำคุณประโยชน์ให้แก่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในฐานะประธานเชียร์ในปี พ.ศ. 2545 และในปีเดียวกันนี้ยังได้รับประกาศนียบัตรเนื่องจาก ดำรงตำแหน่ง รองประธานกลุ่มจัดนิทรรศการในศาลาพระแก้วและหัวหน้าฝ่ายประชาสัมพันธ์ ในงานจุฬาวิชาการ ปีพ.ศ. 2545 หลังจากนั้นได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเทอมต้น ปีการศึกษา 2547 ปี ซึ่งระหว่างการศึกษาชั้นนั้น ได้ถูกคัดเลือกให้ได้รับทุนอุดหนุน “ผู้ช่วยสอน” และสำเร็จการศึกษาในเทอมปลาย ปีการศึกษา 2548 รวมระยะเวลาในการศึกษาทั้งสิ้น 2 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย