การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ

นางสาวเรขา จรัสตระกูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF THERMOPLASTIC POLYURETHANE/POLYPROPYLENE BLENDS VIA REACTIVE BLENDING TECHNIQUE

Miss Rekha Jaruttrakool

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ
โดย	นางสาวเรขา จรัสตระกูล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

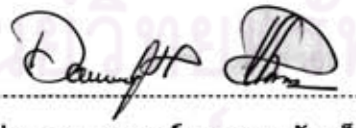
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรขา จรัสตระกูล: การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ.PREPARATION OF THERMOPLASTIC POLYURETHANE/POLYPROPYLENE BLENDS VIA REACTIVE BLENDING TECHNIQUE อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.ดวงหทัย เพ็ญตระกูล จำนวนหน้า 127 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนด้วยการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยนำมาลิอิกแอนไฮไดรด์มาทำปฏิกิริยาในระหว่างการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ร่วมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (ทีพียู) และพอลิโพรพิลีน (พีพี) รวมทั้งไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต รวมทั้งสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต และการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ ส่วนสมบัติทางความร้อนถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลคาลอริมิทรีและเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส ผลการทดสอบที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสมและที่ใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ทางการค้าเป็นสารช่วยผสม โดยพบว่าพอลิเมอร์ผสม ทีพียู/พีพี ที่มีอัตราส่วนการผสม 80/20 มีสมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนอื่นๆ ที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสม จึงเลือกใช้อัตราส่วนการผสมดังกล่าวในการทดลองขั้นต่อมาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมด้วยการใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสมและการผสมแบบรีแอกทีฟ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสมมีความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การยืดตัวที่จุดขาดลดลง อุณหภูมิกลาสทรานสิชันและอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟพบว่าพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟมีการยืดตัวที่จุดขาดสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางค้าเป็นเป็นสารช่วยผสมแสดงถึงประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้ากันได้ที่ดีกว่า โดยพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟที่มีปริมาณสารช่วยผสม 3 ส่วนโดยน้ำหนักใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์ผสมและใช้ ตัวริเริ่ม 2.0% มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด

ภาควิชาวัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต.....เรขา จรัสตระกูล.....
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2551	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5072442023: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORD: THERMOPLASTIC POLYURETHANE, REACTIVE BLEND, PP-*g*-MA, TPU, PP

REKHA JARUTTRAKOOL: PREPARATION OF THERMOPLASTIC POLYURETHANE/ POLYPROPYLENE BLENDS VIA REACTIVE BLENDING TECHNIQUE.

THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PRANUT POTIYARAJ, PH.D.,

THESIS CO-ADVISOR: ASST.PROF.DUANGHATHAI PENTRAKOON, PH.D.,

127 pp.

In this research, reactive blending of thermoplastic polyurethane (TPU) and polypropylene (PP) was studied. Grafting of maleic anhydride (MAH) onto TPU/PP blends was performed by a twin screw extruder in the presence of dicumyl peroxide (DCP). Mechanical and dynamic mechanical properties as well as morphology of the blends were investigated by tensile testing, dynamic mechanical analysis and scanning electron microscopy, respectively. Thermal properties of the blends were characterized by differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. The obtained results were compared with those of the uncompatibilized blends and the blends compatibilized with a commercial PP-*g*-MA. The results from tensile testing revealed that the uncompatibilized TPU/PP blend at the weight ratio of 80/20 exhibited better properties than those of the uncompatibilized blends. Thus, the TPU/PP blending ratio of 80/20 was then adopted for the subsequent comparative study of the compatibilization efficiency between the normal melt blending and the reactive blending. In the case of normal melt blending, the tensile strength and modulus increased with increasing amount of PP-*g*-MA while the elongation at break decreased. Tg and Tm of the blends increased with increasing the amount of commercial PP-*g*-MA. The tensile strength and elongation at break of reactive blending with DCP 2.0% at the equivalent of compatibilizer of 3 phr were highest among the other blend. The elongation at break of reactive blends was also higher than that of the uncompatibilized blends and normal melt blends indicating better compatibilization efficiency. The result from DSC and DMA indicated that, at the equivalent amounts of compatibilizer of 3 and 5 phr, Tg of reactive blends with DCP 2.0% was lower than that of reactive blends with DCP 0.6% and the normal melt blends also demonstrating enhanced compatibility.

Department: Materials Science Student's signature...Rekha Jaruttrakool

Field of study: Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature ...Pranut Potiyaraj

Academic year: 2008 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัตถุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ คือ

1. รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และกรุณาในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผศ.ดร. ดวงหทัย เพ็ญตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย

4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. บริษัท เอช เอ็ม ซี โปลิเมอร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน และเงินสนับสนุนงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1. บทนำ 1

2. วารสารปริทรรศน์ 4

2.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน..... 4

2.2 พอลิโพรพิลีน..... 7

2.3 มาลิอิกแอนไฮไดรด์..... 10

2.4 พอลิเมอร์ร่วมแบบกิ่ง..... 11

2.5 พอลิเมอร์ผสม..... 14

2.6 กระบวนการผสม..... 20

2.7 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์..... 25

2.8 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์..... 34

2.9 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์..... 37

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 39

3. วิธีการทดลอง 44

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานวิจัย..... 44

3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย..... 45

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 47

3.4 ขั้นตอนการวิจัย..... 49

หน้า

4. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง 61

4.1 ผลของปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม..... 61

4.1.1 ความทนแรงดึง มอดุลัสดึงและการยืดตัวที่จุดขาด..... 61

4.1.2 สัณฐานวิทยา..... 65

4.1.3 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่วิเคราะห์ด้วย

เทคนิค TGA 67

4.2 ผลของปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม..... 68

4.2.1 ความทนแรงดึง มอดุลัสดึงและการยืดตัวที่จุดขาด..... 69

4.2.2 สัณฐานวิทยา..... 72

4.2.3 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่วิเคราะห์ด้วย

เทคนิค TGA 73

4.2.4 สมบัติทางความร้อนจากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง

ปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน..... 73

4.2.5 สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมจากเทคนิค DMA..... 76

4.3 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ 77

4.3.1 ความทนแรงดึง มอดุลัสดึงและการยืดตัวที่จุดขาด..... 78

4.3.2 สัณฐานวิทยา..... 79

4.3.3 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่วิเคราะห์ด้วย

เทคนิค TGA 81

4.3.4 สมบัติทางความร้อนจากเทคนิค DSC 83

4.3.5 สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมจากเทคนิค DMA..... 86

5. สรุปผลการทดลอง 90

รายการอ้างอิง..... 92

ภาคผนวก..... 97

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 127

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน..... 6

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่
แบบหมุนทางเดียวกัน และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน..... 23

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางด้านความเค้นและความเครียดของพลาสติกแต่ละประเภท..... 30

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย..... 44

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (A85G4819)..... 45

ตารางที่ 3.3 สมบัติของพอลิโพรพิลีน (HP 400K)..... 46

ตารางที่ 3.4 สมบัติของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน
(Fusabond®P MZ203D)……..... 46

ตารางที่ 3.5 สมบัติของมาลิอิกแอนไฮไดรด์..... 47

ตารางที่ 3.6 สมบัติของไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์..... 47

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน
พอลิโพรพิลีนและ มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน..... 49

ตารางที่ 3.8 พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนร้อยละ
80/20 โดยน้ำหนัก มาลิอิกแอนไฮไดร์ และ ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์..... 51

ตารางที่ 3.9 สภาวะในการอัดรีดของเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่..... 52

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีน
ปริมาณต่าง..... 67

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ
มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพพรพิลีน..... 73

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ
20 โดยน้ำหนัก โดยมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารช่วยผสม
และวิธีในการผสม..... 82

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลง
ปริมาณสารช่วยผสม..... 84

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 พันธะยูรีเทน (urethane linkage)..... 4

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน..... 6

รูปที่ 2.3 โครงสร้างเชิงเส้นของพอลิโพรพิลีน..... 8

รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพีลีนแบบต่างๆ..... 10

รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน
ด้วยสารเริ่มต้นปฏิกิริยา..... 12

รูปที่ 2.6 สมมติฐานกลไกการเกิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน..... 13

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน..... 13

รูปที่ 2.8 ลักษณะการกระจายตัวของเฟสกระจายตัวในเฟสหลักของพอลิเมอร์ผสม..... 15

รูปที่ 2.9 เครื่องอัดรีดเม็ดพลาสติก (extruder)..... 21

รูปที่ 2.10 ลักษณะการหมุนและกันขบกันของสกรูคู่..... 22

รูปที่ 2.11 เครื่องอัดเข้ากับแบบแบบอัตโนมัติ..... 25

รูปที่ 2.12 ลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638..... 26

รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
(stress-strain curve) ของพลาสติกโดยทั่วไป..... 27

รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
และเส้นสัมผัสที่ใช้หาค่ามอดุลัส..... 28

รูปที่ 2.15 การหาความเหนียวของชิ้นทดสอบ..... 29

รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติก
แต่ละประเภท..... 30

รูปที่ 2.17 ความเค้นและความเครียดที่เกิดจากการสั่นนอกเฟสสำหรับชิ้นทดสอบ
ที่เป็นวิสโคอิลาสติกเชิงเส้น..... 31

รูปที่ 2.18 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต..... 33

รูปที่ 2.19 การวิเคราะห์โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมท..... 35

รูปที่ 2.20 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC..... 36

รูปที่ 2.21 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส..... 37

หน้า

รูปที่ 2.22 TGA เทอร์โมแกรม..... 37
รูปที่ 2.23 องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด..... 38
รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder, Thermo Prism)..... 52
รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยเครื่องอัดแบบ (compression moulding)..... 53
รูปที่ 3.3 แม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ..... 53
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 10K).... 54
รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง..... 54
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต..... 55
รูปที่ 3.7 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลแสกนนิงคาลอริมิเตอร์
(differential scanning calorimeter, Mettler Toledo รุ่น DSC822)..... 56
รูปที่ 3.8 เครื่องเทอร์โมกราวิเมทริแอนนาไลเซอร์
(thermal gravimetric analyzer, Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^{e})..... 57
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด
(scanning electron microscope, Jeol-6400)..... 57
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกผสมและการวิเคราะห์ทดสอบพอลิเมอร์ผสม
ระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน..... 58
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกผสมและการวิเคราะห์ทดสอบพอลิเมอร์ผสม
ระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และมาลิอิกแอนไฮไดรด์
ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม..... 59
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกผสมและการวิเคราะห์ทดสอบพอลิเมอร์ผสม
ระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน
ด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟ..... 60
รูปที่ 4.1 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ.... 61
รูปที่ 4.2 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ..... 63
รูปที่ 4.3 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีน
ปริมาณต่างๆ..... 64

หน้า

รูปที่ 4.4 สัญฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม ร้อยละ (ก) 20 (ข) 30 (ค) 40 และ (ง) 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีกำลังขยาย 1,500 เท่า..... 65

รูปที่ 4.5 TGA thermogram ของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีน ปริมาณต่างกัน..... 67

รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสม..... 69

รูปที่ 4.7 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสม..... 70

รูปที่ 4.8 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณ ต่างๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสม..... 71

รูปที่ 4.9 สัญฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (ก) 0 (ข) 3 (ค) 5 และ (ง) 10 phr โดยมีกำลังขยาย 1,500 เท่า..... 72

รูปที่ 4.10 TGA thermogram ของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้า..... 74

รูปที่ 4.11 DSC thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ พอลิโพรพิลีน 3 5 และ 10 phr..... 75

รูปที่ 4.12 tan delta เทียบกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีน เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ความถี่ 0.1 1 10 และ 100 Hz 76

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีน เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณสารช่วยผสม..... 77

รูปที่ 4.14 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสม เป็น 3 5 และ 10 phr..... 78

รูปที่ 4.15 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสมเป็น 3 5 และ 10 phr..... 79
รูปที่ 4.16 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสมเป็น 3 5 และ 10 phr..... 80
รูปที่ 4.17 สัญฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสมและเทคนิคในการผสม (ก) 3 phr ของ PP-*g*-MA ทางการค้า (ข) 5 phr ของ PP-*g*-MA ทางการค้า (ค) 10 phr ของ PP-*g*-MA ทางการค้า (ง) 3 phr ของ DCP 0.6% (จ) 5 phr ของ DCP 0.6% (ฉ) 10 phr ของ DCP 0.6% (ช) 3 phr ของ DCP 2.0% (ฌ) 5 phr ของ DCP 2.0% (ญ) 10 phr ของ DCP 2.0%..... 81
รูปที่ 4.18 DSC thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 3 phr 84
รูปที่ 4.19 DSC thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และมีปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 5 phr..... 85
รูปที่ 4.20 DSC thermograms ของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และมีปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 10 phr 86
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr..... 87
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 5 phr..... 88
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 10 phr..... 88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์เส้นตรง เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate) และไดออล (diol) มีพันธะยูรีเทน (-NH-CO-O-) อยู่ในสายโซ่หลัก โครงสร้างของพอลิเมอร์จะประกอบด้วยสองเฟสที่ไม่เข้ากันเรียกว่าสายโซ่ส่วนแข็ง (hard segment) และสายโซ่ส่วนนิ่ม (soft segment) ซึ่งสายโซ่ส่วนแข็งจะกระจายตัวอยู่ในสายโซ่ส่วนนิ่ม เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหทางกายภาพ สายโซ่ส่วนแข็งแสดงสมบัติในด้านความแข็งแรงโดยสายโซ่ส่วนแข็งจะเป็นไดไอโซไซยาเนตหรือไกลคอลโมเลกุลเล็กๆ ส่วนสายโซ่ส่วนนิ่มแสดงลักษณะที่ยืดหยุ่น ซึ่งได้จากสารตั้งต้นที่เป็นพอลิเอสเทอร์ พอลิอีเทอร์ หรือไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น สัดส่วนระหว่างสายโซ่ทั้งสองนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามชนิดและปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้จากโครงสร้างซึ่งมีลักษณะดังที่ได้กล่าวมานั้น ทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีสมบัติที่หลากหลาย คือเป็นได้ทั้งอิลาสโตเมอร์และเทอร์โมพลาสติกที่มีความเหนียว มีสมบัติเด่นคือสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีความต้านทานต่อการขัดถูและความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ดี พิมพ์ติดสีได้ง่าย รวมทั้งมีความต้านทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการเหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ เครื่องฉีดพลาสติก และเครื่องอัดแบบ เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจะมีความคงรูปที่ดี จากสมบัติที่หลากหลายนี้ทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในระยะเวลาอันรวดเร็ว และมีการนำเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนไปใช้งานในด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ชิ้นส่วนภายในและภายนอกรถยนต์ สายเคเบิล แผ่นซีท เป็นต้น แต่เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกชนิดนี้ไม่สามารถแข่งขันกับพลาสติกอื่นที่ใช้กันโดยทั่วไปได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการค้นคว้าวิจัยเพื่อลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์จากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน โดยนำไปผสมกับพลาสติกชนิดอื่นที่มีราคาไม่สูงนัก เพื่อลดปริมาณการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนลงและปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการ

นำไปใช้งาน เช่น ผสมพอลิสไตรีนลงในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน เพื่อเพิ่มความแข็งเกร็ง ความโปร่งใส ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และเพิ่มความเหนียว ความทนแรงกระแทก ความเป็นอิลาสติก และความทนแรงดึงให้กับพอลิสไตรีน หรือเติมพอลิไวนิลคลอไรด์ลงในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน เพื่อเพิ่มความทนไฟ ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และลดต้นทุนในการผลิต เป็นต้น โดยพลาสติกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนคือพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกทางอุตสาหกรรมที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป มีความใส เหนียว มีความทนทานต่อการขีดข่วนสูง ทนสารเคมีได้ดี มีความเป็นระเบียบในโครงสร้างสูง ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้ยังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ และสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายกระบวนการและง่ายต่อการควบคุมการผลิต โดยงานวิจัยต่างๆพบว่าพลาสติกทั้งสองชนิดนี้สามารถเข้ากันได้ไม่ดีนัก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีงานวิจัยที่พยายามปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยผสมชนิดต่างๆ เช่น พอลิโพรพิลีนที่ดัดแปรด้วยมาลิอิกและกราฟต์ด้วยพอลิเอทิลีนออกไซด์ ((PP-MA)-*g*-PEO) พอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยเอมีนปฐมภูมิ (PP-*g*-NHR) พอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยเอมินทุติยภูมิ (PP-*g*-NH_2) และมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (PP-*g*-MA) เป็นต้น ซึ่งพบว่าสารช่วยผสมดังกล่าวนี้สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้นได้ในระดับหนึ่ง สารช่วยผสมดังกล่าวทำหน้าที่ลดค่าแรงตึงผิวและปรับปรุงการยึดเกาะกันระหว่างผิว (interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ โดยเกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) ของสายโซ่หรือเกิดลักษณะคล้ายสะพานเชื่อมระหว่างเฟส (bridging) ซึ่งทำให้พอลิเมอร์สามารถเข้ากันได้มากขึ้น แต่ข้อจำกัดที่สำคัญอย่างหนึ่งของการใช้สารช่วยผสมที่เป็นบล็อคหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง คือ สารช่วยผสมที่เติมลงไปอาจเข้าไปอยู่ในเฟสของพอลิเมอร์ตัวใดตัวหนึ่งมากกว่าที่จะอยู่ระหว่างรอยต่อของเฟสทั้งสองและยากที่จะกระจายสารช่วยผสมให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งรอยต่อของเฟส โดยการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนด้วยการใช้สารช่วยผสมทั้งชนิดและปริมาณที่เหมาะสม สามารถทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายและมีสมบัติเชิงกลที่ดี สารช่วยผสมชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน คือ มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (PP–*g*-MA) แต่ผลจากงานวิจัยที่ผ่านมาหลายชิ้นบ่งชี้ว่า มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนสามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้บางส่วนเท่านั้น ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมในบางอัตราส่วนมี

ค่าด้อยกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และในทางทฤษฎีพบว่าการผสมพอลิเมอร์แบบรีแอกทีฟ (reactive blending) สามารถแก้ไขข้อจำกัดของการใช้สารช่วยผสมและทำให้พอลิเมอร์สามารถเข้ากันได้ดีกว่าการผสมโดยการเติมสารช่วยผสมลงไประหว่างการผลิต ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนด้วยการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยให้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ลงบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนระหว่างกระบวนการผลิต และใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทั้งนี้มุ่งหวังว่าจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองให้ดีขึ้น และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น

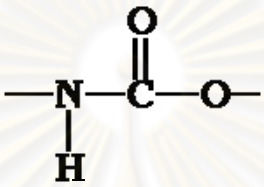
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
วารสารปริทรรศน์

2.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane)

2.1.1 พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU)

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีพันธะยูรีเทนอยู่ในสายโซ่หลัก ซึ่งลักษณะของพันธะยูรีเทนแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พันธะยูรีเทน (urethane linkage)

พอลิยูรีเทนเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างหมู่แอลกอฮอร์ (alcohol) และหมู่ไอโซไซยาเนต (isocyanate) ซึ่งหมู่แอลกอฮอร์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาต้องมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) มากกว่า 2 หมู่อยู่ในหนึ่งโมเลกุล ซึ่งเรียกว่าไดออล (diol) หรือโพลีออล (polyol) และหมู่ไอโซไซยาเนตต้องมีหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งหมู่ในหนึ่งสายโซ่เช่นกัน ซึ่งจะเป็นไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate) โดยการเกิดปฏิกิริยานั้นจะแสดงดังสมการด้านล่างคือ

O=C=N-R-N=C=O + HOR'OH $\rightarrow$ [-OOC-NH-R-NH-COO-R'-]

ไดไอโซไซยาเนต ไดออล พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนแบ่งเป็น 3 รูปแบบใหญ่ๆคือ

1) โฟมนิ่มหรือโฟมยืดหยุ่น โฟมชนิดนี้สามารถรองรับน้ำหนักได้ดี จึงนิยมนำมาทำเป็นเบาะรองรับต่างๆสำหรับเฟอนิเจอร์ โฟมชนิดนี้ทนทานต่อตัวทำละลายและความร้อนได้ดี

2) โฟมแข็ง (rigid foam) โฟมชนิดนี้คล้ายกับโฟมนิ่มแต่มีปริมาณการเชื่อมขวาง

(degree of cross-linked) ที่มากกว่า มีความต้านทานต่อการกดดัน ใช้เสริมช่องว่างในส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา เช่น ปีกเครื่องบิน โฟมชนิดนี้มีสมบัติในการนำความร้อนต่ำมากจึงใช้เป็นฉนวนในกระติกน้ำแข็งหรือในตู้เย็น นอกจากนี้ยังใช้ทำส่วนประกอบของเรือเพื่อให้การลอยตัวดีขึ้น

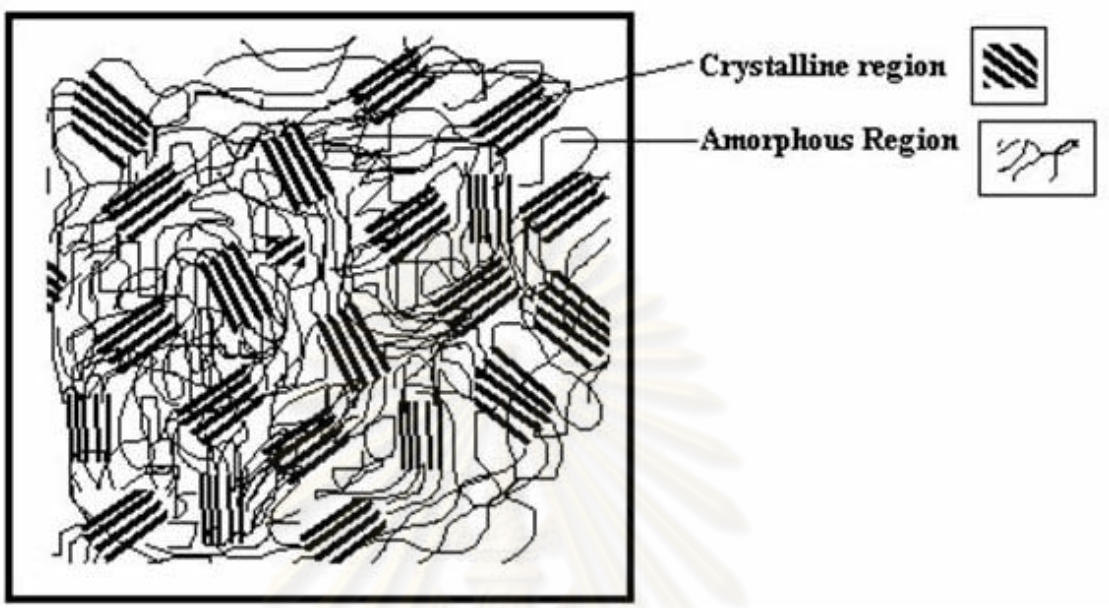
3) ยางพอลิยูรีเทน (polyurethane elastomer) พอลิยูรีเทนชนิดนี้จะมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยางมักนำไปใช้ทำเป็นล้อยางหรือยางกันกระแทก ยางพอลิยูรีเทนยังสามารถแบ่งได้เป็นอีก 3 ประเภทคือ cast elastomers, millable polyurethane elastomers และ thermoplastic polyurethane

2.1.2 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU)

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) เป็นพอลิยูรีเทนที่มีการปรับปรุงสมบัติให้มีลักษณะของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจึงมีสมบัติเด่นๆคือ มีความยืดหยุ่น (flexible) คล้ายยาง และสามารถหลอมเหลวได้หลายครั้งเหมือนเทอร์โมพลาสติก และเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีสมบัติคล้ายเทอร์โมพลาสติก พอลิเมอร์ชนิดนี้จึงสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกทั่วๆไปได้เช่น การบด (milling) การรีดพลาสติก (calendaring) การอัดรีด (extrusion) หรือการฉีดเข้าแบบ (injection moulding) เป็นต้น

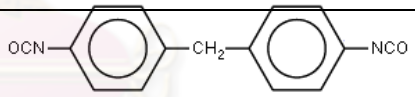
สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสายโซ่ส่วนนิ่ม (soft segment) และสายโซ่ส่วนแข็ง (hard segment) ซึ่งสายโซ่ส่วนแข็งเกิดจากไดไอโซไซยาเนตและไดออลสายโซ่สั้นๆ (short chain diol) ซึ่งเป็นเฟสสัณฐาน (crystalline phase) ส่วนสายโซ่ส่วนนิ่มจะเกิดจากไดออลสายโซ่ยาวๆ (long chain diol) ซึ่งเป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous phase) โดยปกติแล้วสายโซ่ส่วนแข็งและสายโซ่ส่วนนิ่มจะแยกเป็นสองเฟสที่ไม่เข้ากัน โดยสายโซ่ส่วนแข็งจะกระจายตัวอยู่ในสายโซ่ส่วนนิ่ม เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหทางกายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สายโซ่ส่วนแข็งจะแสดงสมบัติด้านความแข็งแรง (hardness) มอดุลัส (modulus) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ส่วนสายโซ่ส่วนนิ่มจะแสดงลักษณะของความยืดหยุ่นคล้ายยาง และการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature properties) สัดส่วนระหว่างสายโซ่ทั้งสองนี้ สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามชนิดและปริมาณของสารตั้งต้นหรือมอนอเมอร์ที่ใช้ โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนแสดงดังตารางที่ 2.1 ทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีสมบัติที่หลากหลาย โดยมีคุณสมบัติเด่นคือใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีความต้านทานต่อการขัดถู

และความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ดี พิมพ์ติดสีได้ง่าย รวมทั้งมีความต้านทานต่อการทนน้ำมันและตัวทำละลายที่ดี [1]



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [2]

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [3]

วัตถุดิบ	โครงสร้างทางเคมี
Isocyanate	
	Methylene-bis(4-phenyl isocyanate), MDI
Macro-glycol	OH-polyester-OH
	OH-polycapa-OH
	OH-polyether-OH
Chain extender	$HO-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-OH$
	1,4 butane diol

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆตามชนิดของไดออลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ

1) Polyester - based TPUs เกิดจากไดไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับไดออลชนิดที่เป็นพอลิเอสเทอร์ ซึ่งเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีในด้านสมบัติทางกายภาพ มีเสถียรภาพทางด้านความร้อน (thermo oxidative stability) และมีความต้านทานต่อน้ำมันได้ดี (oil resistance) เนื่องจากพอลิเอสเทอร์มีขั้ว จะไม่ทำปฏิกิริยากับสารประเภทน้ำมันซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว

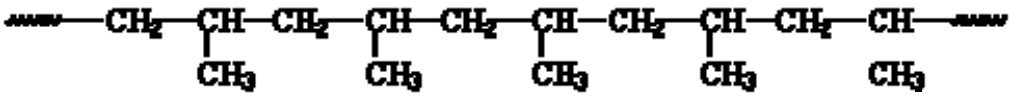
2) Polyether-based TPUs ไดออลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นพอลิอีเทอร์ (polyether) ซึ่งเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนชนิดนี้สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature properties) ต้านทานต่อการดูดน้ำ (hydrolytic stability) ทำให้สามารถใช้งานได้ดีในที่ที่มีความชื้นสูง เนื่องจากส่วนที่ไม่มีขั้วของพอลิอีเทอร์จะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและต้านทานต่อจุลินทรีย์ (resistance to microbial attack) เป็นต้น

เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยมีค่าความแข็ง (hardness) ตั้งแต่ 70 shore A ถึง 80 shore D และมีลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกจึงสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆได้หลากหลาย จึงนิยมนำเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย โดยนิยมนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางด้านยานยนต์ (automotive applications) ทั้งส่วนประกอบที่ใช้ภายนอกและภายในรถ สายยาง (hosing) ท่อ (tubing) รางใส่อาหารสัตว์ (animal tags) เป็นต้น [4]

2.2 **พอลิโพรพิลีน** (Polypropylene, PP)

พอลิโพรพิลีน (PP) เป็นพอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างเชิงเส้นดังรูปที่ 2.3 โดยเริ่มแรก ในปี ค.ศ. 1954 แนตตา (Natta) ได้ประสบความสำเร็จในการเตรียมพอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เนื่องจากแนตตาได้นำตัวเร่งที่ซีเกลอร์ (Ziegler) ค้นพบมาใช้เตรียมพอลิโพรพิลีน พบว่าได้พอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงแตกต่างกันไป ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้แตกต่างกันไปด้วย ซึ่งพอลิโพรพิลีนที่สังเคราะห์ได้ที่สำคัญแบบหนึ่งคือไอโซแทคติคพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene) ซึ่งมีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทีลีน

(polyethylene) แต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่าและแข็งแรงกว่า ได้มีการใช้ตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta) เพื่อผลิตพอลิโพรพิลีนและเริ่มผลิตในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1957 เป็นต้นมา



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเชิงเส้นของพอลิโพรพิลีน [5]

การเตรียมพอลิโพรพิลีนโดยฟรีแรดิคอลแบบรวมตัวจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากวิธีการนี้โอกาสเกิดแอลลิลแรดิคอล (allyl radical) มาก ซึ่งแอลลิลแรดิคอลเป็นแรดิคอลที่ค่อนข้างเสถียร ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ จึงทำให้ได้สารน้ำหนักโมเลกุลสั้น ส่วนวิธีการเตรียมให้ได้พอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงคือ กระบวนการแบบซีเกลอร์-แนตตา ซึ่งนิยมใช้ตัวเร่งที่เรียกว่า ซีเกลอร์-แนตตา ที่นิยมใช้คือ ติเตเนียมไตรคลอไรด์ (titanium trichloride) กับอลูมิเนียมไตรเอธิล (aluminium triethyl) อลูมิเนียมไตรบิวทิล (aluminium tributyl) กับอลูมิเนียมไดเอธิลโมโนคลอไรด์ในแนพธา (aluminium diethylmonochloride) ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 8 ชั่วโมง จะได้พอลิเมอร์ถึง 80 – 85 เปอร์เซ็นต์ เทคนิคพอลิเมอไรเซชันมักจะใช้แบบแขวนลอยมากกว่าแบบสารละลาย โดยการควบคุมน้ำหนักโมเลกุลทำได้โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวย้ายสายโซ่ หรืออาจปรับเปลี่ยนสัดส่วนและความเข้มข้นของตัวเร่ง อุณหภูมิ หรือความดันของมอนอเมอร์ สารที่ได้ออกมาหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลงคือ ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน อะแทกติกโพลิโพรพิลีน ตัวทำละลาย และโมโนเมอร์ ซึ่งการแยกไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีนออกจากสารประเภทอื่นๆ สามารถทำได้โดยผ่านของผสมที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ไปยัง flash drum เพื่อแยกโมโนเมอร์ที่เหลือออกไป แล้วผ่านเข้าเครื่องเซนตริฟิวจ์ เพื่อแยกตัวทำละลายซึ่งละลายอะแทคติกโพลิโพรพิลีนออกไป จากนั้นจะแยกตัวเร่งออกด้วยเมธานอลผสมกรดเกลือเล็กน้อย แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

พอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากการใช้ตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตา จะได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 60,000 ถึง 200,000 ความหนาแน่นประมาณ 90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเป็นผลึกสูงถึงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ชนิดนี้ดีมาก มีความแข็งแรง เหนียว และมีความทนแรงดึงที่สูง มีความทนแรงกระแทกดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 15 องศา

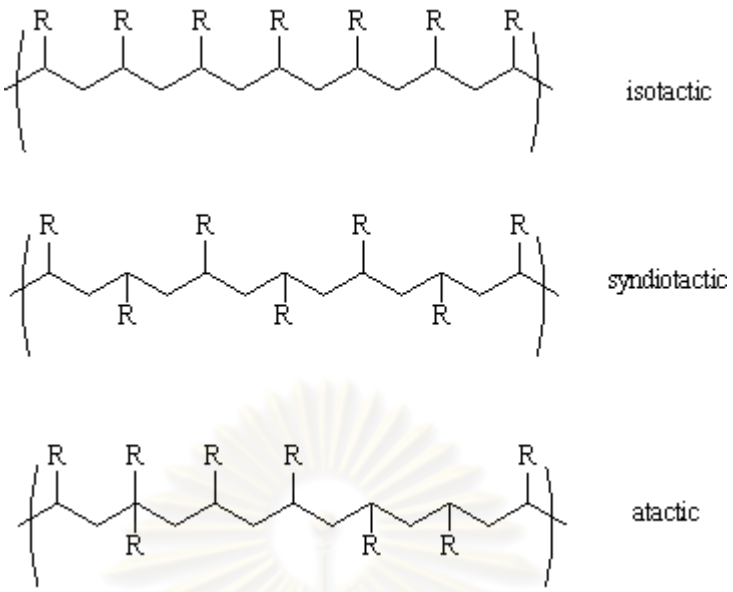
เซลเซียส มีจุดหลอมเหลวประมาณ 165 – 175 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน จึงทนความร้อนได้สูงกว่า นอกจากนี้ความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนยังช่วยสกัดกั้นการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี ไอน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้ต่ำ ทนกรดและเบสได้ดี สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆได้ง่าย และราคาถูก ส่วนข้อจำกัดของพอลิโพรพิลีนคือ มีความเปราะและแตกง่ายที่อุณหภูมิต่ำๆ เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ชอบน้ำ ติดสียาก เสถียรต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์ต่ำกว่าพอลิเอทีลีน ดังนั้นก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารป้องกันการออกซิเดชัน (antioxidant) และสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงอัลตราไวโอเลต (UV stabilizer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ [6,7]

พอลิโพรพิลีนมีการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิล (methyl group) ที่ยื่นออกมาเป็นกิ่งก้านอยู่ด้านนอกของสายโซ่โมเลกุล ได้เป็นแบบต่างๆกัน ทำให้คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีนมีความหลากหลาย ซึ่งการจำแนกพอลิโพรพิลีนตามหมู่เมทิลที่ยื่นออกมานั้น สามารถแบ่งได้ 3 แบบตามรูปที่ 2.4 คือ

1) ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene) หมู่เมทิลจะยึดเกาะอย่างสม่ำเสมอในลักษณะมีทิศทางไปทางใดทิศทางหนึ่งของสายโซ่โมเลกุลหลัก โดยจะอยู่ด้านเดียวกันของระนาบและต่อซ้ำๆกันไป ทำให้มีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ทำให้ความเป็นผลึกสูง ซึ่งส่งผลให้ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากที่สุด ทนความร้อนและทนต่อการละลายได้ดี

2) ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene) หมู่เมทิลจะยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลหลักที่สลับตำแหน่งข้ามไปข้ามมาอย่างเป็นระเบียบ มีความสม่ำเสมอ และต่อซ้ำๆกันไป การจัดเรียงตัวเป็นไปได้ดี แต่หนาแน่นน้อยกว่าไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน จึงมีความเป็นผลึกอยู่ในระดับปานกลาง มีความแข็งแรงแต่ไม่มากเท่าไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน

3) อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (atactic polypropylene) หมู่เมทิลจะยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลหลักเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่ลำบาก ส่งผลให้การเรียงตัวไม่หนาแน่น ปริมาณความเป็นผลึกน้อย ความแข็งแรงจึงต่ำ

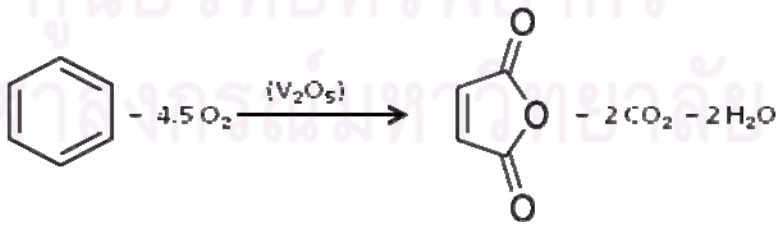


รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพีลีนแบบต่างๆ [8]

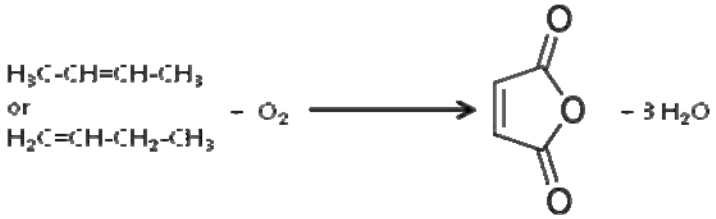
พอลิโพรพิลีนสามารถนำไปใช้งานประเภทต่างๆได้ ได้แก่ ด้ามแปรงสีฟัน ของเด็กเล่น ถังน้ำมันในรถยนต์ กันชนรถยนต์ ซึ่งผลิตด้วยวิธีฉีดแบบ (injection moulding) เป็นต้น ส่วนการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการอื่นๆเช่น งานเป่าฟิล์ม (blown film) ใช้ทำผลิตผลิตภัณฑ์ที่คล้ายกับพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) แต่มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงกว่า เช่น ถุงร้อน พลาสติกหุ้มซองบุหรี่ ซองบะหมี่สำเร็จรูป เป็นต้น [9]

2.3 **มาลิอิกแอนไฮไดรด์** (Maleic anhydride)

1. นำเบนซีนมาทำปฏิกิริยาคะตะไลติกออกซิเดชันด้วยออกซิเจน ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้



หรือ 2. นำบิวทินมาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

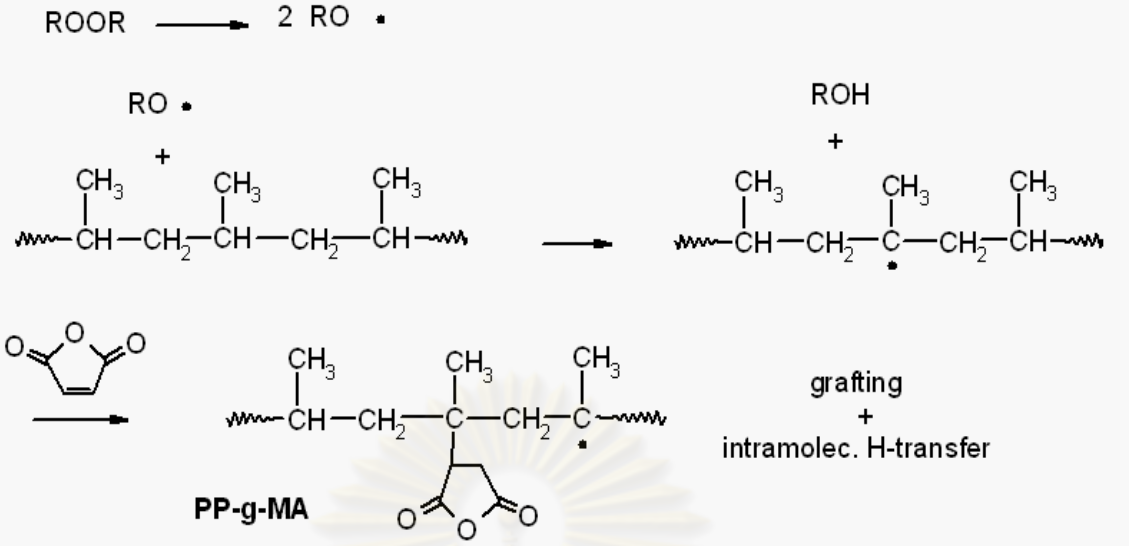


นิยมนำมาลิอิกแอนไฮไดรด์มาใช้ในการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ให้มีสภาพชอบน้ำมากขึ้น [10]

2.4 **พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง** (Graft copolymers)

พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (graft copolymers) คือ พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขา (side chain) โดยส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขานี้มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างจากสายพอลิเมอร์หลัก โครงสร้างเบื้องต้นของโคพอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยสายโซ่หลักเป็นหน่วยซ้ำหรือโฮโมพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง และมีโครงสร้างกิ่งก้านเป็นหน่วยซ้ำหรือโฮโมพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งส่วนที่แยกออกจากสายโซ่หลักหรือกิ่งก้านมีความสำคัญในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง เช่น มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนออกไซด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน จะมีกิ่งก้านเป็นมาลิอิกแอนไฮไดรด์และพอลิเอทิลีนออกไซด์ ตามลำดับ ส่วนสายโซ่หลักคือ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น

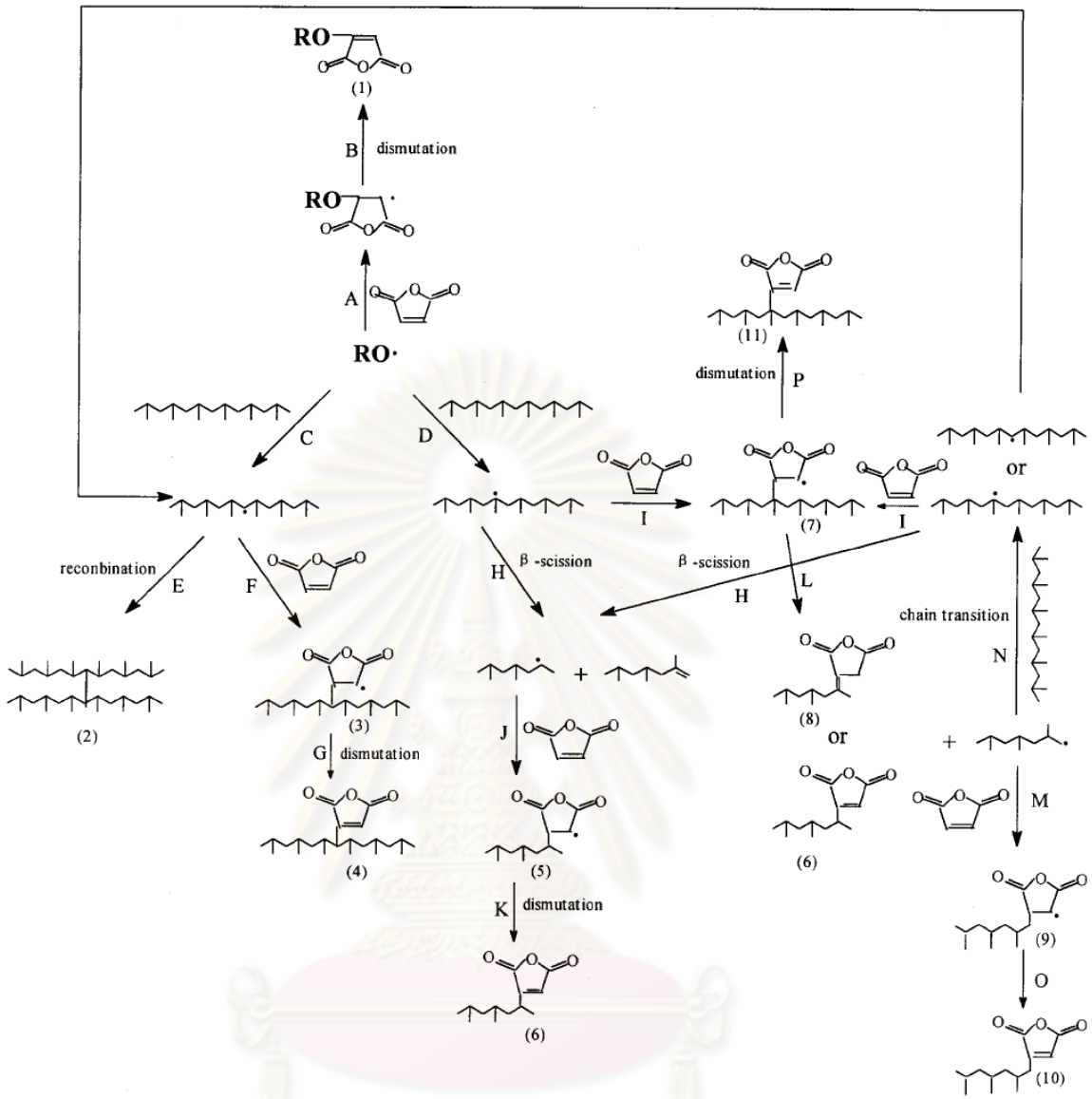
ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง จะใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบฟรีแรดิคอล ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยการฉายรังสี (irradiation) หรือการใช้สารเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยการฉายรังสีจะให้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ที่สูง สะดวกและรวดเร็ว แต่เครื่องมือที่ใช้มีราคาแพง และมีความยุ่งยากทางด้านเทคนิค ส่วนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยใช้สารเริ่มต้นปฏิกิริยานั้น จะมีความยุ่งยากน้อยกว่า แต่ได้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ที่ต่ำกว่า มีความปลอดภัยมากกว่าและไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง โดยสารเริ่มต้นปฏิกิริยาที่ใช้มีหลายชนิด เช่น โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulfate) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) เป็นต้น [6]



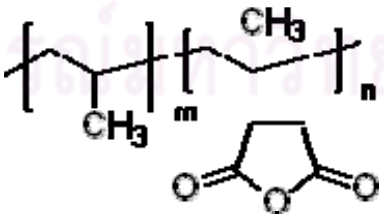
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน
ด้วยสารเริ่มต้นปฏิกิริยา [11]

การสังเคราะห์มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน สามารถทำได้หลากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการแบบสารละลาย กระบวนการหลอมเหลว (melt blending) เป็นต้น โดยกระบวนการหลอมเหลวสามารถใช้เครื่องมือต่างๆได้มากมาย เช่น ทอร์ครีโอมิเตอร์ (torque rheometer) เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) เป็นต้น โดยการสังเคราะห์มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ด้วยกระบวนการหลอมเหลวได้มีการเสนอสมมติฐานกลไกการเกิดปฏิกิริยาไว้ในรูปที่ 2.6 และโครงสร้างของมาลิอิกแอนไฮไดร์กราฟต์พอลิโพรพิลีน แสดงดังรูปที่ 2.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 สมมติฐานกลไกการเกิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน [12]

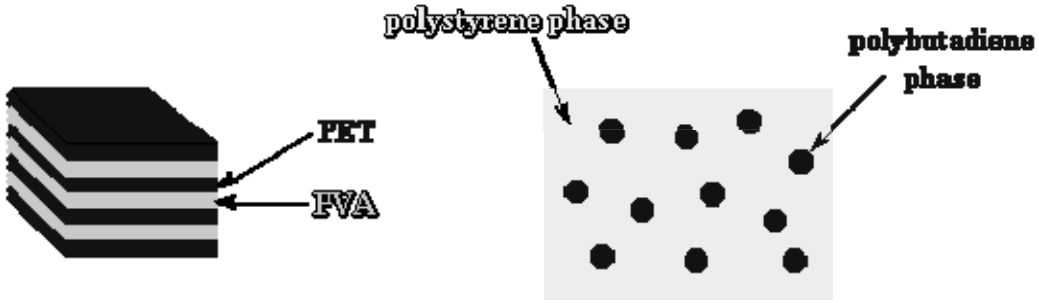


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน [13]

2.5 **พอลิเมอร์ผสม** (Polymer blend)

พอลิเมอร์ผสมคือ การนำพอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์อย่างน้อยสองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ๆขึ้นมา รวมทั้งปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสมนั้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างจากสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน รวมทั้งสามารถปรับปรุงให้พอลิเมอร์ผสมมีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้โดยการเลือกชนิด และปรับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมให้มีความเหมาะสม พอลิเมอร์ผสมได้รับความสนใจมากในระบบอุตสาหกรรมทั้งนี้สามารถทำได้ง่ายและประหยัดกว่าเมื่อเทียบกับการคิดค้นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆขึ้นมา ในการผสมพอลิเมอร์แต่ละชนิดเข้าด้วยกันนั้น เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบต่างๆของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันด้วย เช่น โครงสร้าง สมบัติ ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้ว ระบบพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วย 2 เฟสคือ เฟสหลัก (matrix phase) และดิสเพอร์สเฟส (disperse phase) ซึ่งเฟสหลักหรือเมทริกซ์เฟสเป็นเฟสของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ในพอลิเมอร์ผสม โดยเฟสหลักจะเป็นตัวกำหนดสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม ส่วนเฟสกระจายตัวหรือดิสเพอร์สเฟส เป็นเฟสของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่าในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งจะกระจายตัวอยู่ในเฟสหลัก ซึ่งการกระจายตัวของดิสเพอร์สเฟสอาจอยู่ในรูปเส้นใย ทรงกลม แผ่นหรือโครงสร้างที่เป็นแผ่นบาง (lamellae) เป็นต้น เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิบิวตะไดอีน หรือ HIPS (High Impact Polystyrene) โดยเฟสของพอลิบิวตะไดอีนซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลม กระจายตัวอยู่ในเฟสของพอลิสไตรีน โดยอนุภาคของพอลิบิวตะไดอีนจะช่วยรับแรงกระแทก ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเหนียว ไม่เปราะง่าย หรือพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลท (polyethylene terephthalate, PET) กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างที่เป็นแผ่น (lamellae) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งพอลิเมอร์ผสมนี้จะนำไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทขวดเครื่องดื่มประเภทน้ำอัดลม โดย PET จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับขวด ในขณะที่ PVA จะมีสมบัติในการเก็บกักก๊าซได้ดี



รูปที่ 2.8 ลักษณะการกระจายตัวของดิสเพอร์สเฟสในเฟสหลักของพอลิเมอร์ผสม [14]

การผสมพอลิเมอร์ผสมแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ [15]

1) การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Reactive blending)

พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันจะต้องมีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิเมอร์ต่างชนิดกันทำให้เกิดพันธะทางเคมีขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมพลาสติกนั้นๆ ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมที่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง เช่น

Chemical blends Interpenetrating Polymer Network (IPN) จะเตรียมโดยทำให้พอลิเมอร์ตัวหนึ่งเกิดการเชื่อมขวาง (cross-linking) แล้วบวมตัวในมอนอเมอร์อีกตัวหนึ่ง หลังจากนั้นทำให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) และเชื่อมขวางกัน สุดท้ายแล้วจะเกิดการไขว้กันของพอลิเมอร์ 2 ชนิด

Semi – Interpenetrating Polymer Network (SIPN) จะเป็นการผสมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายๆหมู่เข้าด้วยกันกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์แล้วจึงทำให้เกิดพอลิเมอไรเซชัน เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบร่างแหไขว้กันกับพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติก

Interpenetrating Elastomeric Networks (IEN) จะทำให้การเชื่อมขวางพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของลาเทกซ์ โดยจะทำหลังจากเกิดภาวะที่ของเหลวเป็นก้อนหนาหนืดแล้ว

Simultaneous Interpenetrating Polymer (SIN) จะผสมพอลิเมอร์ต่างๆเข้าด้วยกันโดยจะเกิดโฮโมพอลิเมอร์ไรเซชันและโครงสร้างแบบเชื่อมขวางในเวลาเดียวกัน แต่ไม่เกิดกลไกที่มีแรงกระทำระหว่างกัน

2) การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Non – reactive blending)

การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง หรือเรียกว่าการผสมเชิงกลนั้นจะอาศัยแรงเฉือนของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม ทำให้พอลิเมอร์มีสายโซ่ที่สั้นลง เกิดการกระจายตัว และผสมกันได้ดีขึ้น โดยจะผสมพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) หรืออุณหภูมิหลอมเหลว (melt temperature, T_m) ในกรณีที่พอลิเมอร์ที่ต้องการผสมเข้าด้วยกันเป็นแบบ อสัณฐาน (amorphous) และกึ่งผลึก (semi - crystalline) ตามลำดับ เครื่องมือที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ด้วยการผสมเชิงกล เช่น เครื่องอัดรีด (extruder) เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (two – rolls mill) เป็นต้น การผสมด้วยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ ทำให้เป็นวิธีการผสมที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก ตัวอย่างการผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้องคือ

Mechanochemical Blends ผสมพอลิเมอร์ด้วยแรงเฉือนสูงๆ เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว โดยฟรีแรดิคัลที่เกิดขึ้นจะรวมตัวเป็นของผสมเชิงซ้อน ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบที่เป็นบล็อกและพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

Solution – Cast Blends พอลิเมอร์จะถูกละลายในตัวทำละลายแล้วเทลงในแบบ หลังจากนั้นจึงระเหยตัวทำละลายออก พอลิเมอร์ที่จะผสมด้วยวิธีการนี้ได้จะต้องสามารถละลายในตัวทำละลายได้

Latex Blends เป็นการผสมพอลิเมอร์กับน้ำเข้าด้วยกัน จนกระทั่งพอลิเมอร์กระจายตัวได้ดีในน้ำซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีลักษณะเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นก้อนหนาหนืด (coagulated)

ปัญหาของการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันคือ ความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกันมีความแตกต่างกัน สมบัติความเป็นขั้วต่างกัน ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเป็น 2 เฟส มีแรงตึงระหว่างพื้นผิวสูง (surface tension) และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่แย่ลง ดังนั้นเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น จึงต้องมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ผสม โดยการปรับปรุงความเข้ากันได้นั้นทำได้หลายวิธี คือ [16]

1) ความเข้ากันได้ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Miscibility)

ความเข้ากันได้ทางอุณหพลศาสตร์ เป็นหลักการที่มีการนำไปใช้ไปใช้ประโยชน์ใน

อุตสาหกรรมเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปี (enthalpy, $\triangle H$) และเอนโทรปี (entropy, $\triangle S$) ที่มีผลต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing, $\triangle G$) ดังสมการที่ 2.1

$$\triangle G = \triangle H - T\triangle S \qquad 2.1$$

โดยที่

$\triangle G$ = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม

$\triangle H$ = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม

$\triangle S$ = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

T = อุณหภูมิ (K)

โดยทั่วไปแล้ว $\triangle S$ ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการรวมตัวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด มักมีค่าเป็นบวกเสมอ เนื่องจากมีจำนวนของการจัดเรียงโมเลกุลที่เป็นไปได้มากขึ้นเมื่อทั้งสองส่วนผสมกัน ในขณะที่ $\triangle H$ มักมีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นบวก และพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ชอบที่จะเกิดเมื่อค่า $\triangle H$ เป็นบวกน้อยๆ

การผสมที่สามารถทำให้พอลิเมอร์เกิดความเข้ากันได้นั้น $\triangle G$ ต้องมีค่าเป็นลบ ($\triangle G < 0$) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

- การผสมที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Mixture) ภายในระบบจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นลบ ($\triangle H < 0$) นั่นคือ การผสมสามารถเข้ากันได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบมากขึ้น จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง

- การผสมที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Mixture) ภายในระบบของผสมไม่มีแรงดึงดูดระหว่างกัน ซึ่งจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นบวก ($\triangle H > 0$) ดังนั้นการผสมจะสามารถเข้ากันได้ดี เมื่อ $T\triangle S$ มีค่ามากกว่า $\triangle H$ เพื่อให้ $\triangle G$ มีค่าเป็นลบ ซึ่งการผสมที่เข้ากันได้ดีนั้นจะสามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง หรือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ

2) การเติมบล็อกหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง(Addition of Block or Graft Copolymer)

การเติมบล็อกหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับความนิยม ในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยบล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โครงสร้างทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสมโดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

2. ไดบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์

3. ไดบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมา มีประสิทธิภาพสูงกว่าไดบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

สารช่วยผสมมีหน้าที่ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยลดแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสในภาวะหลอมเหลว ทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในแมทริกซ์ หรือช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนระหว่างเฟส รวมทั้งเพิ่มความคงตัวของขนาดของดิสเฟอร์สเฟสภายใต้การอบบ่ม (annealing)

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

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม เกิดจากการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไอออนิก กับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์ หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการ

เกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโอเลฟินส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสม ที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพง

4) การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันระหว่างการผสม (In-situ Grafting copolymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งหรือพอลิเมอไรเซชันในระหว่างการผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปร เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่องเช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

1. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (initiator) ในระหว่างการผสม

2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น

3. เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งโดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง

4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) [16,17]

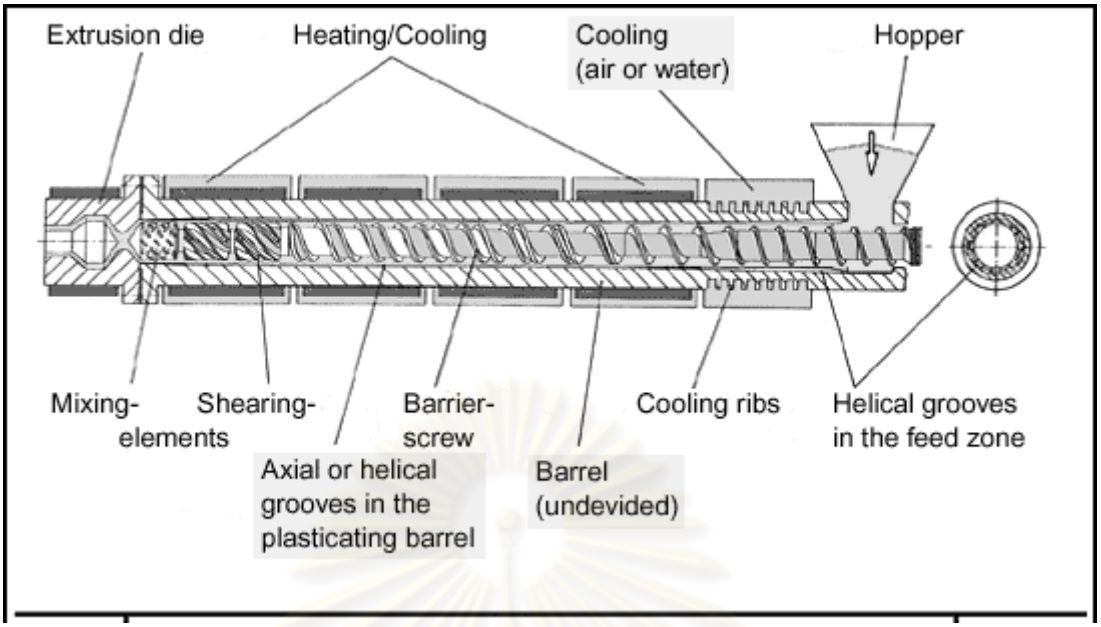
2.6 กระบวนการผสม

การผสมเม็ดพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การผสมด้วยวิธีการหลอมเหลวพอลิเมอร์ (melt mixing) ทั้งนี้เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย และไม่ยุ่งยากในการระเหยตัวทำละลายออกโดยทั่วไปสามารถแบ่งการผสมออกเป็น 2 ชนิด คือ การผสมภายในแบบทีละชุด (internal batch mixing) เช่น เครื่องผสมแบบแบนบิวรี (banbury mixer) และการผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixing) เช่นเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และสกรูคู่ (twin screw extruder) ซึ่งจะขอกล่าวแต่การผสมแบบต่อเนื่องเท่านั้น ทั้งนี้เพราะการผสมแบบต่อเนื่องเป็นวิธีการผสมที่ได้รับความนิยมในการผสมเม็ดพลาสติกในอุตสาหกรรม [18]

2.6.1 การผสมแบบต่อเนื่อง

การผสมแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) สามารถใช้ผสมเม็ดเทอร์โมพลาสติกได้ทุกชนิด แต่มีข้อจำกัดคือพลาสติกที่จะผสมด้วยเทคนิคนี้เมื่ออ่อนตัวจะต้องมีความหนืดสูง ทั้งนี้เพื่อว่าเมื่อพลาสติกผ่านหัวดายออกมาจะต้องคงรูปได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ไม่ยุบตัวมารวมกัน พลาสติกที่นิยมนำมาเข้ากระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (extruder) ส่วนใหญ่จะเป็นพลาสติกประเภท โพลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) และพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP)

การผสมแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 พอลิเมอร์ซึ่งอยู่ในรูปเม็ดหรือรูปผงจะถูกผสมอย่างหยาบๆก่อนจะเข้าสู่กรวยเติม (hopper) จากนั้นเม็ดพลาสติกก็จะถูกป้อนเข้าสู่สกรู (screw) แล้วเคลื่อนตัวไปตามกระบอกอัดรีด (barrel) ด้วยแรงขับเคลื่อนของสกรู และมีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจากแถบให้ความร้อน (band heaters) ในกระบอกอัดรีดนี้พอลิเมอร์จะเกิดการหลอมเหลวทั้งจากความร้อนที่ให้และความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของพอลิเมอร์ด้วยกัน หรือพอลิเมอร์กับเครื่องอัดรีด โดยความลึกของร่องสกรูจะลดลงตามความยาวของสกรูเพื่อเป็นการเพิ่มความดันให้แก่พอลิเมอร์หลอมเหลว จากนั้นด้วยแรงขับเคลื่อนของสกรู พอลิเมอร์หลอมเหลวจะไหลออกจากหัวดาย (die) ที่มีรูปแบบต่างๆกัน



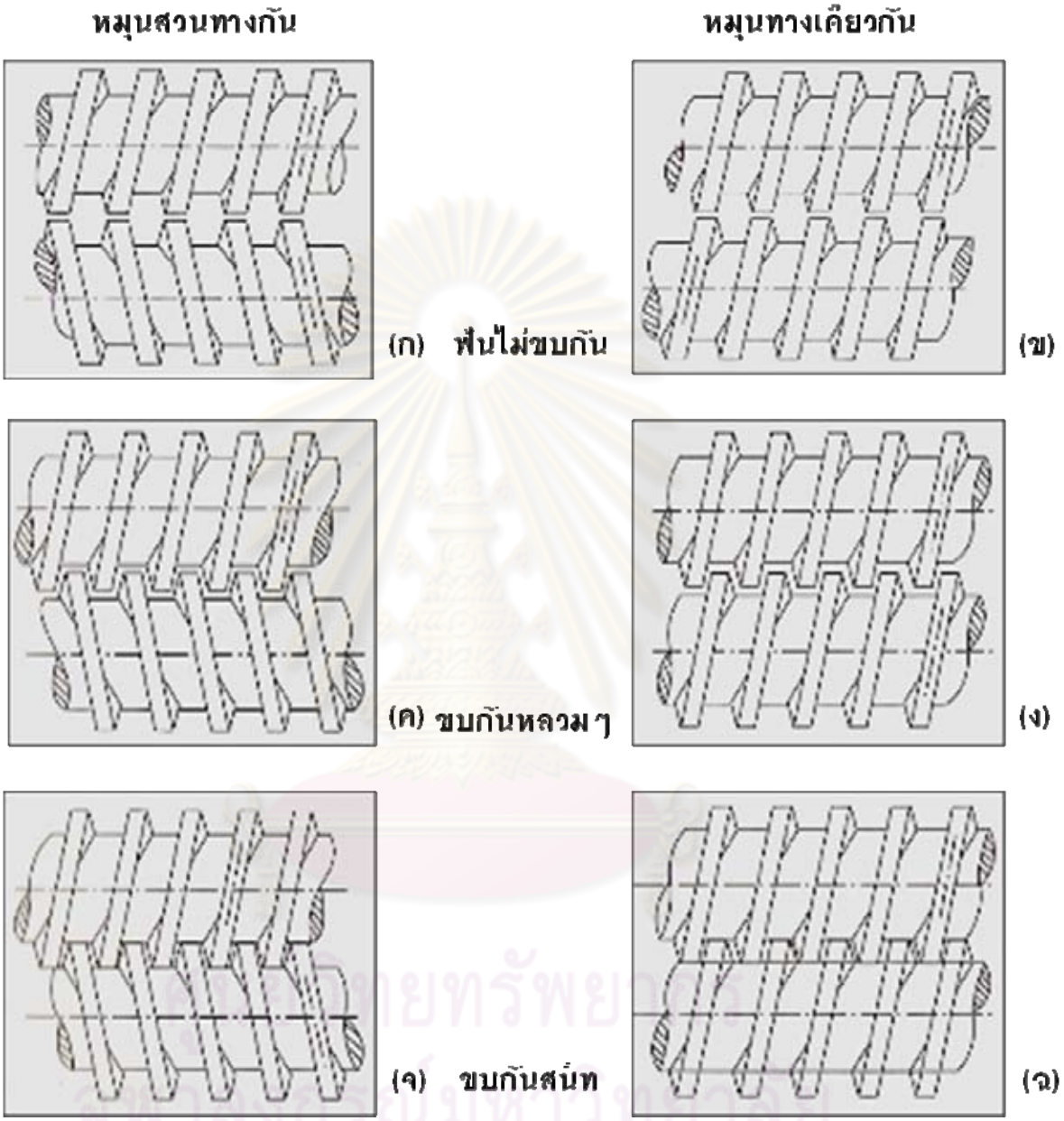
รูปที่ 2.9 เครื่องอัดรีดเม็ดพลาสติก (extruder) [19]

การผสมเม็ดพลาสติกที่ดีนั้น เม็ดพลาสติก สารเติมแต่ง (additive) หรือสารเสริมแรง (reinforce) จะต้องมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และขนาดของอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสจะมีขนาดเล็กๆ การผสมด้วยเครื่องอัดรีดให้มีประสิทธิภาพ และรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียว (homogenous) ได้นั้น นอกจากจะขึ้นกับสมบัติของเม็ดพลาสติกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ในช่วงต่างๆของกระบอกอัดรีด ความเร็วรอบสกรู การออกแบบสกรูและหัวดาย เป็นต้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งเครื่องอัดรีดตามจำนวนของสกรูได้เป็นเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวและเครื่องอัดรีดสกรูคู่

เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) จะมีสกรูเพียงอันเดียวอยู่ในกระบอกอัดรีด เครื่องอัดรีดประเภทนี้มีการนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากมีการผลิตที่ง่าย ราคาของเครื่องไม่แพงมากนักเมื่อเทียบกับเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และง่ายต่อการบำรุงรักษา และใช้ได้กับพอลิเมอร์หลากหลายชนิด

เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) เครื่องอัดรีดประเภทนี้จะมีสกรู 2 ตัวหมุนอยู่ในกระบอกอัดรีด โดยแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบสกรูหมุนไปทางเดียวกัน (co-rotating) และแบบหมุนสวนทางกัน (counter rotating) นอกจากนี้ยังแบ่งออกตามลักษณะของการขบกันของฟัน

เกลียว คือทั้งแบบฟันเกลียวขบกันในร่อง และไม่ขบกัน ฟันเกลียวแบบขบกันยังแบ่งเป็นแบบขบกันสนิทและขับกันอย่างหลวมๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะการหมุนและกันขบกันของสกรูคู่

เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียว (co-rotating twin screw extruder) นั้นทุกๆรอบของการหมุนของสกรูคู่จะหมุนไปทางเดียวกัน ส่วนเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน (counter-rotating twin screw extruder) สกรูจะหมุนสวนทางกัน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการผสมที่

สูงเมื่อเทียบกับเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทิศทางเดียว และเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว หลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูคู่คือ สกรูแต่ละตัวจะปรับสภาพเป็นห้องปิด (closed chamber) ทำหน้าที่ลำเลียงพลาสติกจากกรวยเติม ไปยังปลายเกลียวโดยไม่มีการส่งผ่านให้กับห้องใกล้เคียง โดยหลักการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แรงลากสูง (drag forces) ซึ่งมีผลทำให้การเฉือนต่ำและความร้อนเกิดขึ้นจากการเฉือนน้อย ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนำไปใช้ผลิตพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวต่อความร้อน เช่น พีวีซี ซึ่งใช้ในการผลิตท่อ และ profile ที่ทำด้วย rigid-PVC ได้มีการเปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียว และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

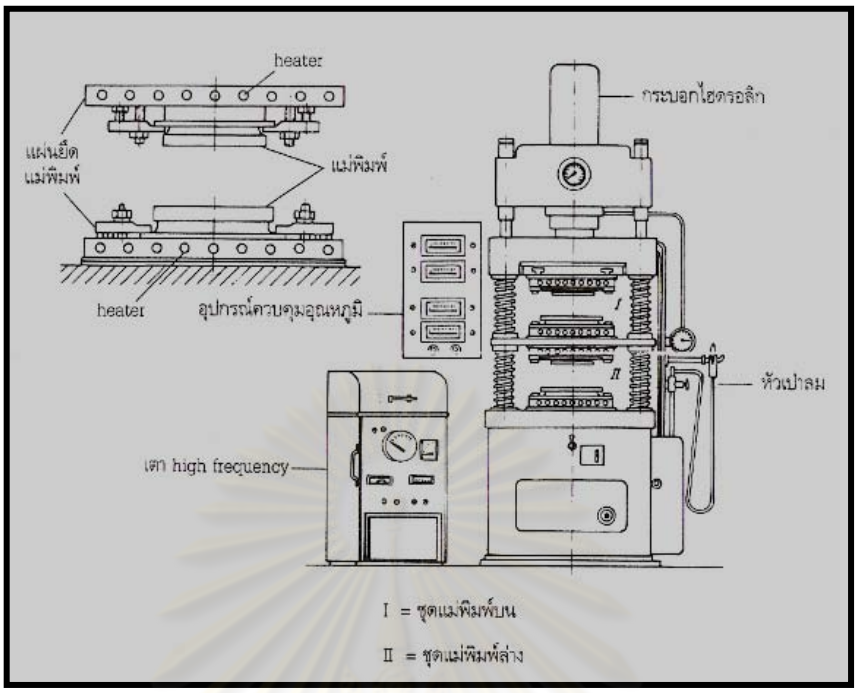
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทางเดียวกัน และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนสวนทางกัน [20]

ชนิดของเครื่องอัดรีด	สกรูเดี่ยว	สกรูคู่หมุนทางเดียว		สกรูคู่หมุนสวนทาง
		ความเร็วต่ำ	ความเร็วสูง	
หลักการ	แรงเสียดสีระหว่างกระบอกอัดรีดกับพอลิเมอร์และพอลิเมอร์กับสกรู	ขึ้นกับแรงเสียดสีเหมือนในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว	ขึ้นกับแรงเสียดสีเหมือนในเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว	การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เกิดโดยหลักการของปั๊ม
การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
การผสม	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง-สูง	สูง
แรงเฉือน	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
การทำความสะอาดด้วยพอลิเมอร์เองขณะผสม	น้อย	ปานกลาง-สูง	สูง	ต่ำ
ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง-สูง	สูง
ความร้อนที่เกิดขึ้น	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ

2.6.2 การอัดแบบ (compression moulding)

การอัดแบบ (compression moulding) เป็นการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการเติมพลาสติกลงในแม่พิมพ์เปิด แล้วใช้ความดันอัดปิดแม่พิมพ์พร้อมทั้งให้ความร้อน เพื่อให้พลาสติกไหลเข้าไปแทนที่ช่องว่างในแม่พิมพ์ เกิดรูปทรงของชิ้นงานขึ้นมา โดยพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการอัดแบบจะเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หรือเทอร์โมเซตที่มีการพอลิเมอร์ไรต์เป็นบางส่วนแล้ว (partially polymerized thermosetting) ตัวอย่างของพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกเช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิโพรพิลีน พอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์ที่เติมสารเติมแต่งแล้วเป็นต้น ส่วนตัวอย่างของพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่มีการพอลิเมอร์ไรต์เป็นบางส่วนแล้ว เช่น ยางที่มีการผสมสารเติมแต่งต่างๆลงไปแล้ว แต่ยังไม่เกิดการ cure เป็นต้น โดยเมื่อยางผ่านกระบวนการอัดเข้ากับแบบ ก็จะเกิดการพอลิเมอไรต์ที่สมบูรณ์หรือเกิดการ cure คือเกิดโครงสร้างร่างแห (cross linking) ขึ้น ทำให้ยางเกิดการคงรูปและนำไปใช้งานได้ต่อไป

การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัดแบบจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าแท่นอัดพลาสติก ซึ่งแท่นอัดพลาสติกมีอยู่มากมายหลายแบบ และได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้แท่นอัดสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติเพื่อความสะดวกในการผลิตชิ้นงาน ตัวอย่างเครื่องอัดเข้ากับแบบแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดชิ้นงานทรงแบน แสดงดังรูปที่ 2.11 ส่วนปัญหาของการขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีการอัดเข้ากับแบบ ส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาเกี่ยวกับการส่งผ่านความร้อน (heat transfer) และปัญหาการไหลของพลาสติก (flow or elastic deformation) โดยถ้าพลาสติกที่นำมาขึ้นรูปมีความหนามาก ความร้อนตรงบริเวณพื้นผิวของพลาสติกซึ่งติดกับแม่แบบจะมีความร้อนมากกว่าตรงกลางของพลาสติก ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในพลาสติกเพราะความร้อนกระจายไปได้ไม่ทั่วถึงชิ้นงาน ส่วนปัญหาด้านการไหลของพลาสติกนั้น ถ้ามีการขึ้นรูปรูปทรงที่ซับซ้อนแล้วพลาสติกไม่สามารถไหลไปได้เต็มโมล์ (mould) จะทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ [21,22]

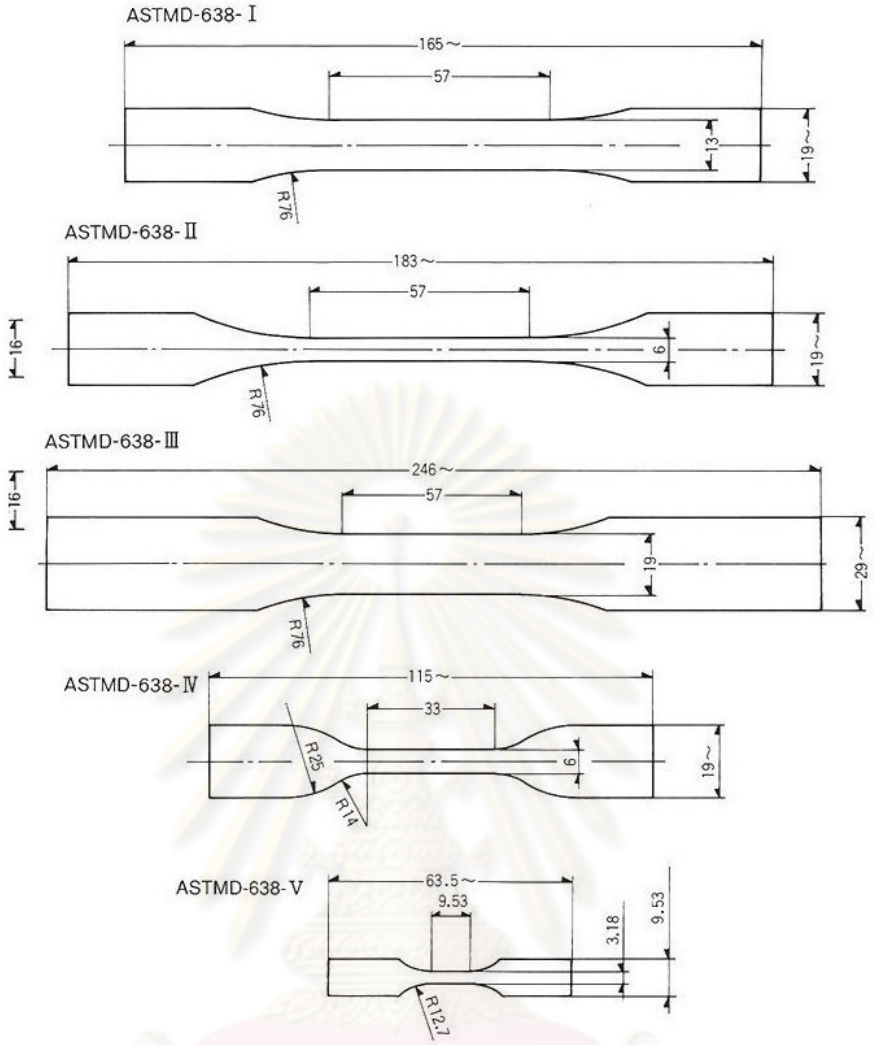


รูปที่ 2.11 เครื่องอัดเข้ากับแบบแบบอัตโนมัติ [18]

2.7 สมบัติเชิงกลของพลาสติก

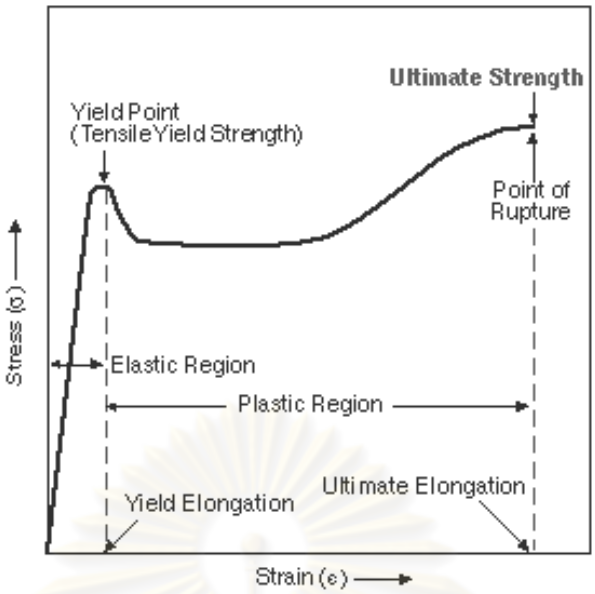
2.7.1 สมบัติด้านแรงดึง

การวัดความทนแรงดึงของวัสดุ จะวัดตามมาตรฐาน ASTM D638-03 ซึ่งกำหนดชิ้นทดสอบให้มีลักษณะมีพื้นที่หน้าตัดในบริเวณที่ต้องการวัดความเครียดอยู่ในบริเวณตรงกึ่งกลางชิ้นงาน และมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่สำหรับการจับยึดในบริเวณปลาย หรือมีลักษณะคล้ายดัมเบล (dumbbell) ซึ่งชิ้นงานที่เป็นดัมเบลนี้เวลาเกิดการแตกหักจะเกิดบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงสุด (เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดต่ำที่สุด) ประเภทของชิ้นทดสอบแรงดึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลัก ซึ่งขนาดและลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 กำหนดไว้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 [23]

การทดสอบความทนแรงดึงนิยมใช้เครื่อง universal testing machine ในการทดสอบ โดยชิ้นงานจะถูกยึดปลายทั้งสองข้างด้วยหัวจับ (test grip และ fixture) ของเครื่องทดสอบ โดยใช้แรงดึงและอัตราเร็วในการดึงคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อชิ้นงานเกิดการขาดออกจากกัน จะได้กราฟระหว่างแรงและการยืด ซึ่งนิยมแสดงออกมาในรูปของความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) ของพลาสติกโดยทั่วไป [24]

สามารถคำนวณหาความเค้นดึง (tensile stress, δ) ได้จากสมการที่ 2.2

$$\delta = \frac{F}{A} \qquad 2.2$$

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

F คือ แรงดึงที่ให้กับชิ้นงาน มีหน่วยเป็นหน่วยของแรง เช่น นิวตัน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร หรือ ตารางมิลลิเมตร

ความเครียดดึง (tensile strain, ε) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$\varepsilon = \frac{L - L_o}{L_o} = \frac{\Delta L}{L_o} \qquad 2.3$$

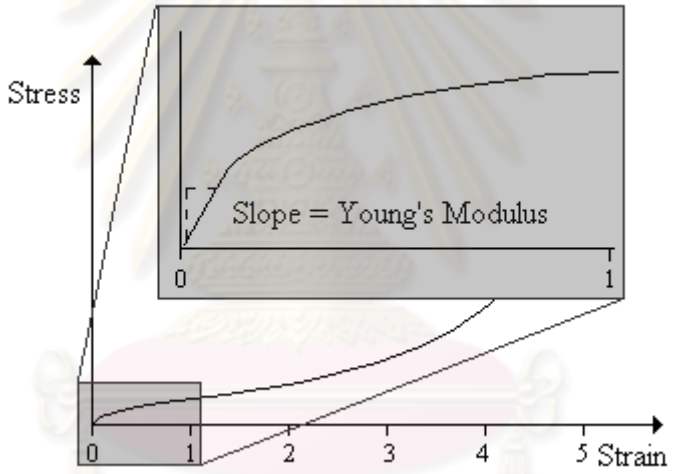
โดยที่

ε คือ ความเครียดตึง *(tensile strain)* ไม่มีหน่วย

L_o คือ ความยาวเริ่มต้น มีหน่วยเป็นหน่วยของความยาว เช่น มิลลิเมตร

L คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของชิ้นทดสอบเมื่อได้รับแรง F มีหน่วยเป็นหน่วยของความยาว

มอดุลัสของความยืดหยุ่น (elastic modulus) หรือ ค่ามอดุลัสของยังส์ (Young's modulus, E) เป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ หรือหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียดในช่วงที่ค่าความเครียดยังมีค่าน้อยๆอยู่ ซึ่งในช่วงนี้วัสดุยังคงแสดงสภาพความยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถหาได้ดังรูปที่ 2.14



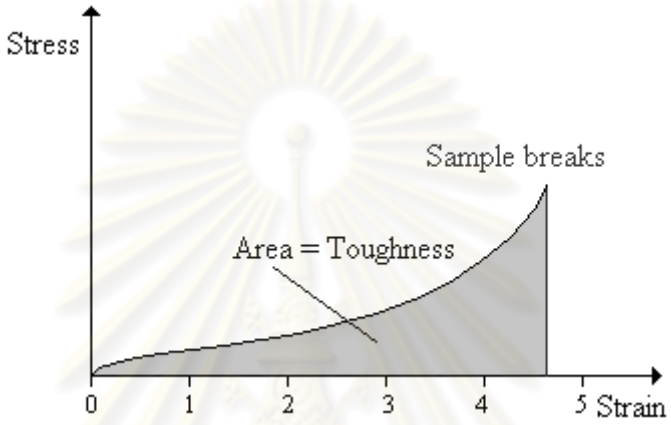
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
และเส้นสัมผัสที่ใช้หาค่ามอดุลัส[25]

ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (proportional limit) เป็นค่าความเค้นที่จุดสุดท้ายบนเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุที่แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

จุดคราก (yield point) เป็นจุดที่วัสดุเปลี่ยนสมบัติจากการเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือกล่าวได้ว่าเมื่อเลยจากจุดนี้ไปแล้ว วัสดุจะไม่สามารถกลับมาคงรูปร่างหรือสภาพแบบเดิมได้อีก ที่จุดครากนี้จะสามารถหาค่าความเค้นหรือค่าความ

ต้านทางแรงสูงสุด (yield strength) ได้ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงแรงมากสุดที่จะทำให้วัสดุเปลี่ยนสภาพอย่างถาวร

พื้นที่ใต้กราฟของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดบ่งบอกถึง ค่าความเหนียว (toughness) ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งเป็นค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักขึ้นได้ โดยวัสดุที่มีความเหนียวจะมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าวัสดุที่มีความเปราะ ค่าความเหนียวของพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การหาความเหนียวของชิ้นทดสอบ [25]

พลาสติกแต่ละประเภทจะมีสมบัติเชิงกลต่างๆกัน แต่โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งประเภทพลาสติกจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ออกเป็นกลุ่มๆดังนี้

พลาสติกที่มีสมบัตินิ่มและไม่แข็ง (soft and weak) พลาสติกกลุ่มนี้ได้แก่ เทฟลอนและโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน เป็นต้น

พลาสติกที่มีสมบัตินิ่มและเหนี่ยว (soft and tough) พลาสติกกลุ่มนี้ได้แก่ โพลิเอทิลีน เป็นต้น

พลาสติกที่มีสมบัติแข็งเปราะ (hard and brittle) พลาสติกกลุ่มนี้ได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

พลาสติกที่มีสมบัติแข็งแรง (hard and strong) พลาสติกกลุ่มนี้ได้แก่ โพลิแอซิทัลหรือโพลิออกซีเมทิลีน เป็นต้น

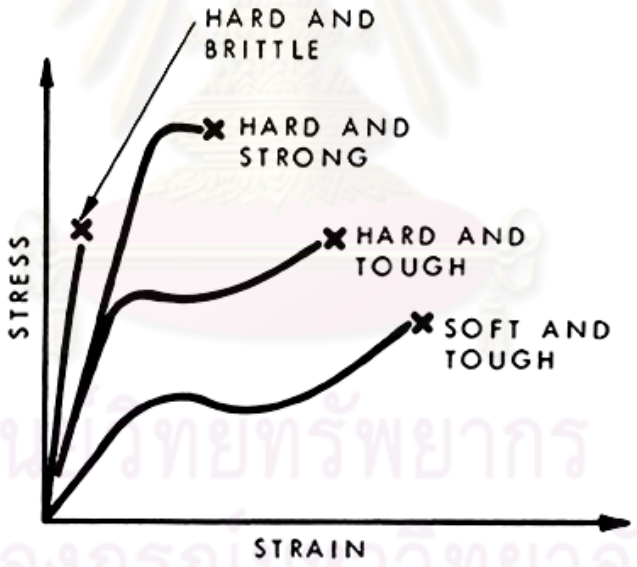
พลาสติกที่มีสมบัติแข็งและเหนียว (hard and tough) พลาสติกกลุ่มนี้ได้แก่ โพลิคาร์บอเนต เป็นต้น [26]

สมบัติเชิงกลของพลาสติกแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางด้านความเค้นและความเครียดของพลาสติกแต่ละประเภท [27]

ประเภทของพลาสติก	มอดุลัส	ความเค้น ณ จุดคราก	ความเค้นสูงสุด	ระยะการยืดตัวที่จุดขาด
Soft and weak	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
Soft and tough	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
Hard and brittle	สูง	ไม่ชัดเจน	ปานกลาง	ต่ำ
Hard and strong	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง
Hard and tough	สูง	สูง	สูง	สูง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกแต่ละประเภทแสดงดังรูปที่ 2.16



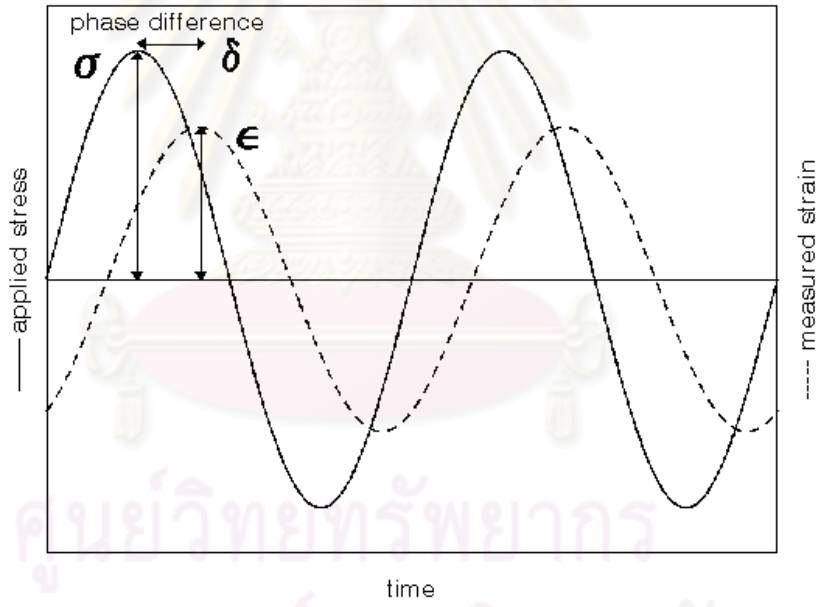
รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกแต่ละประเภท [28]

2.7.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต เป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ ที่ใช้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติวิสโคอิลาสติกของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ เวลา ความถี่ ความเค้น หรือตัวแปรเหล่านี้ประกอบกัน เทคนิคนี้เป็นการทำให้ตัวอย่างเกิดการเสีย

รูปร่าง (deformation) ภายใต้แรงดึง (tension) หรือแรงเฉือน (shear) เป็นจังหวะกลับไปกลับมา หรือเป็นวัฏจักร (oscillatory load)

เมื่อให้แรงกระทำบนชิ้นทดสอบที่เป็นพอลิเมอร์ซึ่งแสดงสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกเชิงเส้น (linear viscoelastic solid) ชิ้นงานดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นในรูปวัฏจักรของสัญญาณคลื่นรูปซายน์ (sinusoidal stress cycle) ความเค้นที่ชิ้นทดสอบได้รับส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดตามมาในรูปวัฏจักรของคลื่นรูปซายน์ด้วยเช่นกัน แต่มีการเลื่อนตำแหน่งของเฟสไปจากเดิมเท่ากับมุมเฟส ลักษณะสัญญาณการตอบสนองที่เกิดขึ้นดังกล่าว สามารถนำไปใช้ในการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุได้ การเลื่อนตำแหน่งของเฟสแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่วัสดุที่เป็นวิสโคอิลาสติกความเครียดจะเกิดตามหลังเฟสความเค้นเป็นมุม δ โดยที่ $0^{o} < \delta < 90^{o}$ โดยจากสมการที่ 2.4 – 2.6 สามารถใช้ในการคำนวณสมบัติของวัสดุที่เป็นวิสโคอิลาสติกได้



รูปที่ 2.17 ความเค้นและความเครียดที่เกิดจากการสั่นนอกเฟส
สำหรับชิ้นทดสอบที่เป็นวิสโคอิลาสติกเชิงเส้น [29]

$$\frac{\text{peak stress}}{\text{peak stral}} = G^{*} \qquad 2.4$$

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \qquad 2.5$$

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \qquad 2.6$$

โดยที่ G^* = มอดุลัสเชิงซ้อน (complex modulus)

G' = มอดุลัสในเฟส (in-phase modulus)

G'' = มอดุลัสนอกเฟส (out – phase modulus)

δ = มุมเฟส (phase angle)

ค่ามอดุลัสพลวัตเชิงซ้อน (complex dynamic modulus, E*) คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด ที่ทุกๆเวลา สามารถใช้ในการอธิบายสมบัติทางกลพลวัตของสารได้ โดยหาได้จากสมการ 2.7

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \exp(i\delta) \qquad 2.7$$

หรือเขียนอยู่ในรูปสมการใหม่ดังสมการที่ 2.8 ให้อยู่ในรูปของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพได้ดังนี้

$$E^* = E' + E'' \qquad 2.8$$

โดยที่

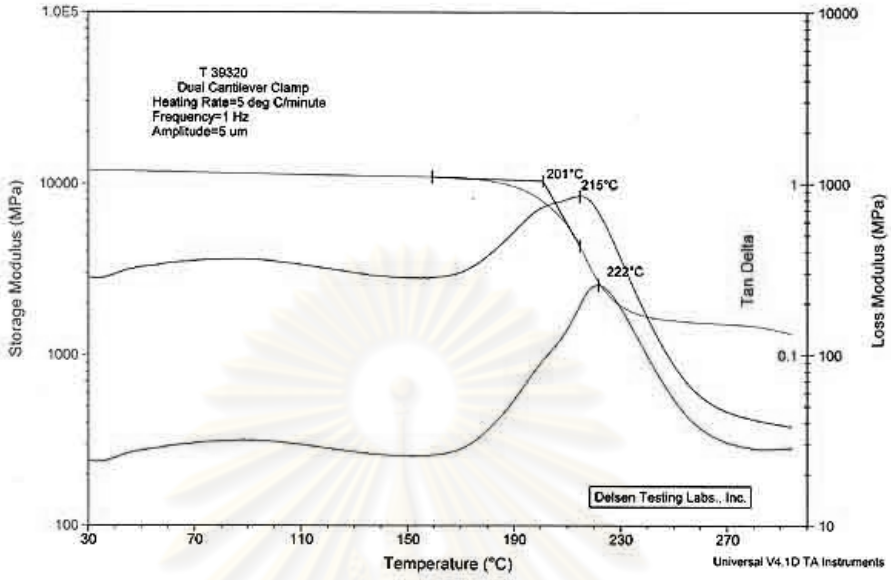
E’ = จำนวนจริง หรือมอดุลัสสะสม (storage modulus) ซึ่งเป็นอัตราส่วนต่อพลังงานสูงสุดที่เก็บไว้ต่อหนึ่งวัฏจักร

E” = จำนวนจินตภาพ หรือมอดุลัสของการสูญเสีย (loss modulus) มีค่าเท่ากับอัตราส่วนต่อพลังงานที่ถูกใช้ให้หมดไปต่อหนึ่งหน่วยวัฏจักร

และอีกค่าหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการวัดสมบัติเชิงกลพลวัตคือค่า loss tangent หรือ tanδ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสของการสูญเสียและมอดุลัสสะสม ดังสมการที่ 2.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$tan\delta = \frac{E''}{E'} \qquad 2.9$$



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต [30]

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต นอกจากใช้หาค่า loss modulus storage modulus และ tanδ แล้ว ยังสามารถประยุกต์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature) อุณหภูมิการอ่อนตัว (softening temperature) การคืบ (creep) และ stress relaxation ได้อีกด้วย [31]

2.8 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์

การวัดสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ ช่วยให้สามารถเลือกชนิดและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อน โดยสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยสมบัติทางความร้อนที่รู้จักกันดีของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) เป็นต้น

สำหรับพอลิเมอร์ผสมการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิหลอมเหลว เป็นสิ่งที่สำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวสามารถบ่งบอกความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมนั้นๆ โดยถ้าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล พอลิเมอร์ผสมจะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงค่าเดียว แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถเข้ากันได้จะปรากฏการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่ง และมีการเปลี่ยนแปลงที่แคบ ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่นำมาผสมกัน แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้เป็นบางส่วน จะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่กว้าง ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการเข้ากันได้เพียงบางส่วนของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง เทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางด้านความร้อนของพอลิเมอร์ผสม คือ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมนั้น นิยมวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส (Thermogravimetry Analysis, TGA)

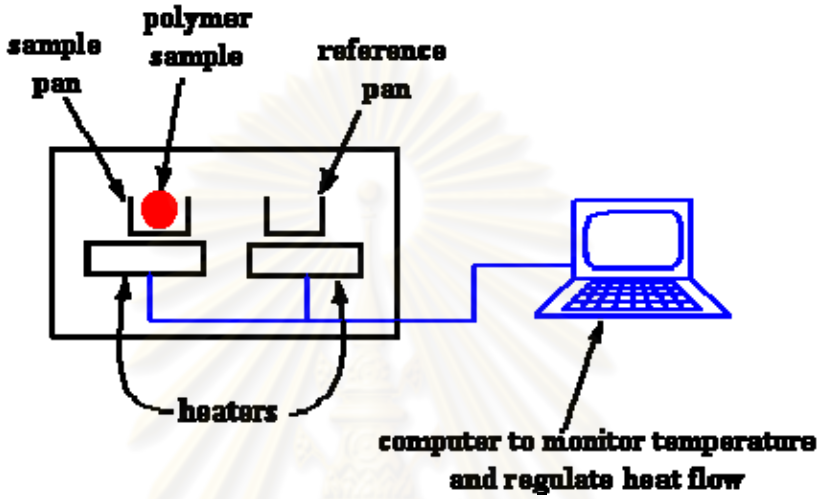
2.8.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี เป็นเทคนิคเกี่ยวกับการวัดการไหลของความร้อน (heat flow) ที่ให้แก่ชิ้นทดสอบเทียบกับสารอ้างอิง เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางคุณภาพและปริมาณ (qualitative and quantitative) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเมอร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดและคายความร้อน (endothermic and exothermic process) หรือการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อนจำเพาะ (heat capacity) ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์พอลิเมอร์แต่ละชนิดได้ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอรีมิเตอร์ (differential scanning calorimeter) ที่ใช้งานกันมี 3 ชนิดคือ

1) Heat flux DSC นิยมใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีความสม่ำเสมอของ base line
2) Power Compensation DSC ให้ความละเอียดของ DSC curve ที่ดี และอัตราการเพิ่มความร้อนและการเย็นตัวที่รวดเร็ว
3) DSC ที่ใช้ Tzero technology เป็นการรวมเอาข้อดีของ heat flux DSC และ power compensation DSC เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ [31]

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลิริเมทรีนั้น จะ

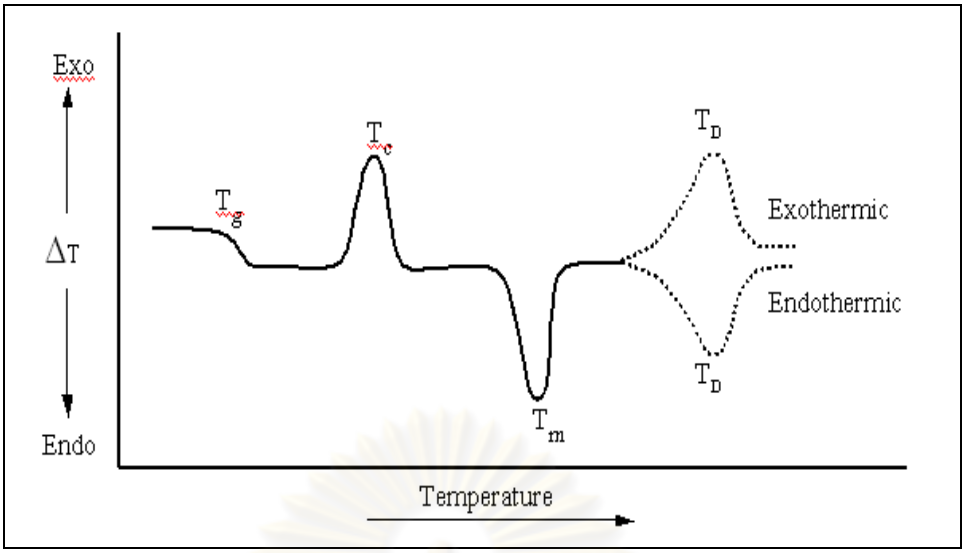
บรรจุตัวอย่างลงในเซลล์ ซึ่งจะเป็นอะลูมินัมแพน (aluminium pan) จากนั้นเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและเซลล์อ้างอิง (reference cell) จะถูกวางไว้บนตัวทำความร้อน (thermoelectric disk) ที่บรรจุอยู่ในเตาเผา (furnace) เมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง จะเกิดความแตกต่างของ heat flow ระหว่างสารตัวอย่างและเซลล์อ้างอิง ซึ่งเครื่อง DSC จะบันทึกและนำมาคำนวณ ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิต่างๆของสารตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การวิเคราะห์โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี [32]

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี สามารถใช้หาอุณหภูมิต่างๆได้ดังรูปที่ 2.20 นอกจากนี้ยังสามารถหาความบริสุทธิ์ เสถียรภาพทางความร้อน เวลาและอุณหภูมิในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ปริมาณการเติมสารเติมแต่ง (additive) ที่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวหรืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ซึ่งจะส่งผลต่อความยาก-ง่ายในการผลิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน หรือความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

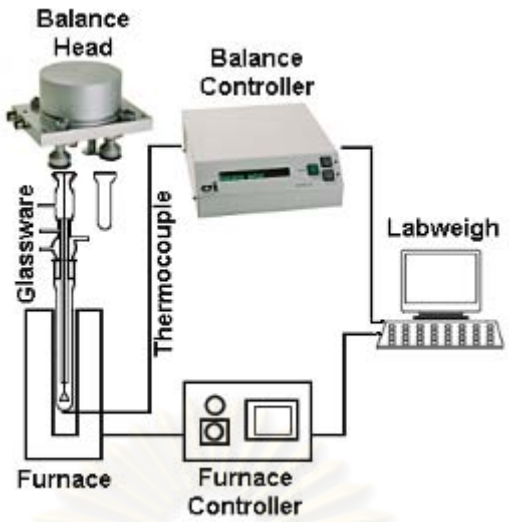


รูปที่ 2.20 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC [33]

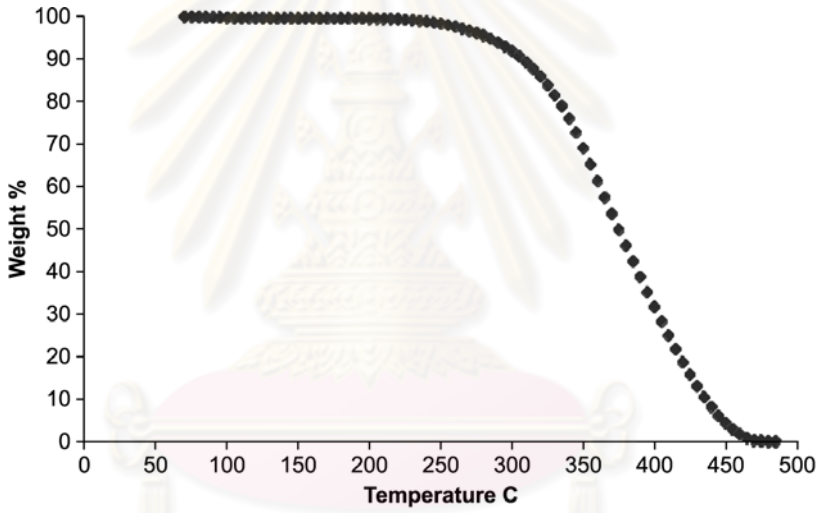
2.8.2 เทอร์โมกราวิเมทรีแอนนาไลซิส (thermo gravimetry analysia)

การวิเคราะห์สมบัติทางด้านความร้อนของพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส (thermo Gravimetry analysis, TGA) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน หรือเป็นฟังก์ชันกับเวลาเมื่ออุณหภูมิคงที่ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ฮีเลี่ยม อากาศ หรือแก๊สอื่นๆ การวิเคราะห์จะทำในระบบปิด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer) เครื่องจะประกอบด้วยเตาเผา (furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (temperature programmer) ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และมีระบบการชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบ เครื่องมือวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.21 เส้นกราฟ TGA ให้ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยอยู่ในรูปของน้ำหนักที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 2.22 ประโยชน์หลักของ TGA ได้แก่ การหาอุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition temperature, T_d) การเกิดออกซิเดชัน และความมีเสถียรภาพ (stability) ของพอลิเมอร์ เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทีจีเอ คือ อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ พื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และความหนาของหน้าตัดชิ้นตัวอย่างอาจมีผลต่อการลดลงของการส่งผ่านความร้อน ทั้งจากความร้อนที่เข้าไปหรือความร้อนของปฏิกิริยา



รูปที่ 2.21 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส [34]



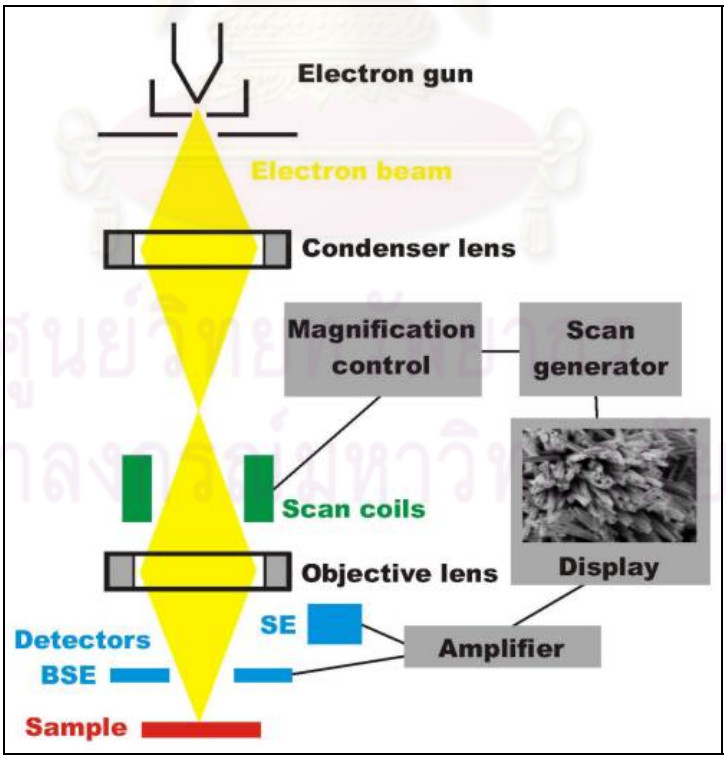
รูปที่ 2.22 TGA เทอร์โมแกรม

2.9 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์

การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อความเข้าใจในสมบัติของพอลิเมอร์ผสมนั้นๆ ซึ่งเป็นการศึกษาเฟสของพอลิเมอร์ผสม รวมทั้งขนาด และการกระจายตัวในดิสเพอร์สเฟส ตลอดทั้งแรงดึงดูดระหว่างผิวของแต่ละเฟส ซึ่งวิธีตรวจสอบสัณฐานวิทยาวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมคือ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) [6]

2.9.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นทดสอบด้วยความละเอียดสูง เมื่ออิเล็กตรอน ซึ่งมีความเร็วสูงพุ่งเข้าชนผิวของชิ้นทดสอบ ภายใต้สูญญากาศ อิเล็กตรอนจะเกิดการสะท้อนและเปล่งรังสีออกมาจากผิวหน้าของชิ้นทดสอบ อิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ ซึ่งเกิดจากการกระเจิงกลับ (back – scattered primary electron) อิเล็กตรอนนี้มีทิศทางเบี่ยงเบนไปจากทิศทางที่พุ่งเข้าชน เนื่องจากเกิดปฏิสัมพันธ์กับนิวคลีไอ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เกิดขึ้นเนื่องจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิซึ่งตกกระทบ (incident primary electron) บนชิ้นทดสอบแทรกซึมทะลุทะลวงเข้าสู่เนื้อของชิ้นทดสอบเกิดการอิออไนเซชัน (ionization) และเปล่งรังสีกลับมา อิเล็กตรอนทุติยภูมินี้มีพลังงานค่อนข้างต่ำ เนื่องจากหัวอ่านของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ส่องกราดในแนวของชิ้นทดสอบ ภาพผิวหน้าของชิ้นทดสอบเกิดจากการสร้างภาพด้วยหลอดแสดงภาพในรูปแสงซึ่งเกิดจากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ และแสงซึ่งเกิดจากการเปล่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมา การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [35]

การตรวจสอบวัสดุพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดมีปัญหา 2 อย่างคือ ประการแรก พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำมาก และประจุถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็วบนชิ้นทดสอบเมื่อมันถูกยิงด้วยลำแสงอิเล็กตรอน ถ้าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด สนามอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยประจุกระทบกับลำแสงอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนที่สร้างสัญญาณจะเกิดการรบกวนภาพได้ การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการทำการเคลือบชิ้นทดสอบด้วยสารซึ่งนำไฟฟ้าได้ดี (conductive coating) ปัญหาอย่างที่สองคือ วัสดุพอลิเมอร์มักจะถูกทำลายด้วยพลังงานจากการทะลุทะลวงของอิเล็กตรอนทำให้เกิดรอยตำหนิ (artifacts) ขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ควรใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งทำให้กำลังขยายและความละเอียดลดลง ปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ต้องการชิ้นทดสอบที่มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 10 มิลลิเมตร) โดยวัสดุที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวหน้าของชิ้นทดสอบ คือ ทองคำ เพราะเป็นวัสดุที่ระเหยได้ง่าย นอกจากทองคำแล้ว วัสดุอื่นๆก็สามารถใช้เคลือบผิวหน้าของชิ้นทดสอบได้ เช่น ทองคำผสมพาลาเดียม อลูมิเนียม คาร์บอน เป็นต้น

การเคลือบผิวชิ้นทดสอบมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ชิ้นทดสอบสามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นในการเคลือบผิวชิ้นทดสอบ จึงควรเคลือบผิวให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่ต้องการตรวจสอบ และการเคลือบต้องต่อเนื่องติดต่อเป็นผิวเดียวกันตลอด เพื่อให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้าบนพื้นที่ทั้งหมดที่สัมผัสลำอิเล็กตรอน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shadi และคณะ [36] ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน เพื่อนำไปใช้ทดแทนพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride) ที่ใช้ในการผลิตถุงเลือด ทั้งนี้เนื่องจากพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นพลาสติกที่มีความเปราะง่าย เมื่อนำมาผลิตเป็นถุงเลือดจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเติมแต่งประเภทพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) ลงไปเพื่อทำให้พลาสติกมีความยืดหยุ่น (flexible) มากขึ้น ซึ่งพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP) ซึ่งเป็นอันตรายต่อปอด หัวใจและไต จึงต้องมีการคิดค้นพัฒนาพลาสติกชนิดใหม่ๆขึ้นมาใช้แทนพอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปทำเป็นถุงเลือด ทางคณะผู้วิจัยจึงสนใจพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Haake internal mixer ที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมต่างๆกัน

จากผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวไม่เกิดแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน และที่ทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมยกเว้นที่อัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงมากกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้เป็นถุงใส่เลือด โดยพบว่าที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมที่สุดในการผลิตเป็นถุงใส่เลือด ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าความทนแรงดึงสูงที่สุด มีการดูดซึมน้ำที่สูงและมีความเข้ากันได้กับเลือดที่ดี

Bajsic และ Rek [37] ศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20:80 และ 80:20 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์storage modulus, loss modulus และ loss tangent ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนบริสุทธิ์ พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมทั้งสองอัตราส่วน พบว่าค่า storage modulus และ loss tangent มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) ของพอลิโพรพิลีนมีค่าลดลง โดยกราฟมีความกว้างเพิ่มขึ้นแต่ความเข้มของกราฟจะลดลง ส่วนผลของมอดุลัสสะสม แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมมี 2 ตำแหน่งซึ่งเป็นของพอลิเมอร์สองชนิด และพอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดุลัสสะสมในช่วงระหว่างพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกัน จึงสรุปได้ว่าพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถผสมและเข้ากันได้เป็นบางส่วนเท่านั้น

Wallheinke และคณะ [38] ศึกษาความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน โดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) โดยผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก ใช้พอลิเอทิลีนโคอะคริลิกแอซิด (ethylene-co-acrylic acid) ร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนัก เป็นสารช่วยผสม มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดอะคริลิกในโคพอลิเมอร์ เป็นร้อยละ 0 4 และ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดอะคริลิกในโคพอลิเมอร์เท่ากับร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดี ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่าสารช่วยผสมสามารถปกคลุมอนุภาค

ของพอลิโพรพิลีนและเกิดลักษณะเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดสามารถบ่งบอกรูปร่างของอนุภาคและความเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (homogeneity) ของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมได้ ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน จะบ่งบอกรายละเอียดของโครงสร้างภายใน (inner structure) ของอนุภาค

Tang และคณะ [39] ศึกษากลไกและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน โดยใช้พอลิโพรพิลีนที่ดัดแปรด้วยมาลิอิก (PP-MA) และพอลิโพรพิลีนที่ดัดแปรด้วยมาลิอิกและกราฟต์ด้วยพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PP-MA)-*g*-PEO เป็นสารช่วยผสม เปรียบเทียบความเข้ากันได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analysis, DMA) และฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transfer infrared spectroscopy, FTIR) ซึ่งเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนร้อยละ 75:25 โดยน้ำหนัก และเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสมที่ร้อยละ 0 2 5 และ 10 โดยน้ำหนัก จากการสังเกตด้วย SEM พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสมจะไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเลย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ (PP-MA)-*g*-PEO มากขึ้นเป็นร้อยละ 2-5 โดยน้ำหนัก การเชื่อมต่อระหว่างพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถเข้ากันได้ดีขึ้น ส่วนผลของการเติม PP-MA ลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อเติม PP-MA ที่มีปริมาณของมาลิอิกมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมจะสามารถเข้ากันได้ดีขึ้น ผลของ FTIR ซึ่งบ่งบอกถึงกลไกของสารช่วยผสมที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมพบว่า PEO สร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ N-H ในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ดี ส่วนมาลิอิก จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับออกซิเจนอะตอมในสายโซ่ส่วนนิ่มและหมู่วงแหวนในสายโซ่ส่วนแข็งของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนมีความแข็งแรงกว่าการแลกเปลี่ยนประจุ ดังนั้น (PP-MA)-*g*-PEO จึงเป็นสารช่วยผสมที่ดีมาก ในขณะที่ PP-MA ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้บางส่วน

Lu และคณะ [40] ได้ศึกษาเปรียบเทียบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่กราฟต์ด้วยมอนอเมอร์สามชนิดคือ มาลิอิก (PP-*g*-MA)

อะมีนปฐมภูมิ (primary amine, PP-*g*-NH_2) และอะมีนทุติยภูมิ (secondary amine, PP-*g*-NHR) ผลการทดลองด้านสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ชิ้นทดสอบจะหลุดออกจากที่จับที่เปอร์เซ็นต์ความเค้นที่มากกว่า 1200 เปอร์เซ็นต์โดยที่ชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก และพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่กราฟต์ด้วยอะมีนทุติยภูมิมีค่ามอดุลัสที่มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์ด้วยอะมีนปฐมภูมิ และมาลิอิก ตามลำดับ ส่วนผลของสมบัติเชิงกลพลวัตพบว่า ค่า storage modulus ของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์อะมีนทุติยภูมิมีค่ามากกว่าพอลิโพรพิลีนกราฟต์อะมีนปฐมภูมิเป็นสองเท่า และพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีน กราฟต์อะมีนปฐมภูมิมีค่า storage modulus เป็นสองเท่าของพอลิเมอร์ผสมจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิก เช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PP-*g*-NHR มีความสามารถในการเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ดีกว่า PP-*g*-NH_2 และ PP-*g*-MA

Marissa และคณะ [41] นำขยะจากพอลิยูรีเทนมาบดให้เป็นผงแล้วผสมกับพอลิโพรพิลีนและปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้ SEBS, PP-*g*-MA, EPDM-*g*-MA และ SEBS-*g*-MA ที่ร้อยละ 5,10,15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผสมพอลิเมอร์โดยใช้เครื่อง co-rotating intermeshing twin screw extruder จากผลการทดลองพบว่า tensile strength ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ PP-*g*-MA เป็นสารช่วยผสมโดยเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ในขณะที่การเติมสารช่วยผสมอื่นๆทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่า tensile strength มีค่าลดลง ดังนี้คือ SEB-*g*-MA > EPDM-*g*-MA > SEBS ส่วนผลของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (elongation at break) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น ดังนี้คือ SEBS-*g*-MA < EPDM-*g*-MA < SEBS ในขณะที่การใช้ PP-*g*-MA เป็นสารช่วยผสมจะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม

Shi และคณะ [12] ศึกษากลไกของปฏิกิริยาการกราฟต์มาลิอิกบนพอลิโพรพิลีน ภายในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นสารเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator) อุณหภูมิของแต่ละโซนในเครื่องผสม จาก hopper จนถึงหัวดาย (die) คือ

175, 190,190 และ 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบของสกรู 120 รอบต่อนาที โดยพบว่าไม่มีโอลิโกเมอร์ (oligomer) ของมาลิอิกหรือโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) เกิดขึ้นเลย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยกำหนดไว้ 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎี มาตรฐานการทดสอบ และสืบค้นเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่น วารสารเชิงวิชาการทั้งใน และต่างประเทศ รวมทั้งการสืบค้นข้อมูลจากอินเตอร์เน็ต

2) วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และวิธีการทดลอง

3) จัดเตรียมวัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

4) ดำเนินงานวิจัย โดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูริเทนและพอลิโพรพิลีนแบบใช้และไม่ใช้สารช่วยผสม และเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟ รวมทั้งทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว

5) วิเคราะห์ผลการวิจัย สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

โครงการวิจัยนี้ใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้น 18 เดือน ตั้งแต่วันที่ 20 ตุลาคม 2550 ถึงวันที่ 20 เมษายน 2552 โดยมีแผนการดำเนินงาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน/เดือน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	━	━	━	━	━													
2		━	━	━	━	━												
3			━	━	━	━	━											
4						━	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━	━	
5														━	━	━	━	━

3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย

1) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU) ชื่อทางการค้า Huntsman Irogran® เกรด A85G4819 สำหรับการใช้งานที่ต้องการความใส ซื้อจากบริษัท เอเบิลวัน เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด โดยมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (A85G4819)

สมบัติ	หน่วย	มาตฐานการทดสอบ	A85G4819
ความถ่วงจำเพาะ	-	ISO 2781	1.22
ความทนแรงดึงที่ 100%	MPa	ISO 37	6
ความทนแรงดึงที่ 300%	MPa	ISO 37	30
ความทนแรงดึง ณ จุดขาด	MPa	ISO 37	28
การยืดตัวที่จุดขาด	%	ISO 37	500
ความแข็ง shore A	-	ISO 868	85
ความแข็ง shore D	-	ISO 868	37
Tear strength	N/m^2	ISO 34B	90
ความต้านทานต่อการขัดถู	mm^3	ISO 4649	35
จุดหลอมเหลว	^{O}C	Internal method	115-160

2) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ชื่อทางการค้า PP Moplen เกรด HP 400K ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอช เอ็ม ซี โปลิเมอร์ เป็นพอลิโพรพิลีนประเภทโฮโมพอลิเมอร์ โดยมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของพอลิโพรพิลีน (HP 400K)

สมบัติ	หน่วย	มาตฐานการทดสอบ	HP 400K
ดัชนีการไหล	Dg/min	ASTM D1238	4
ความหนาแน่น	g/cm^3	ASTM D792B	0.90
ความทนแรงดึงที่จุดคราก	MPa	ASTM D638	33
การยืดตัว ณ จุดคราก	%	ASTM D638	11
มอดุลัสการดัดโค้ง (flexural Modulus)	MPa	ASTM D790A	1400
ความทนแรงกระแทกที่ 230^{O}C	J/m	ASTM D256A	32

3) มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (Maleic anhydride graft polypropylene, PP-*g*-MA) ชื่อทางการค้า Fusabond ® P MZ203D ซื้อจากบริษัท เคมิคอล อินโนเวชัน จำกัด มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (Fusabond®P MZ203D)

สมบัติ	หน่วย	มาตฐานการทดสอบ	MZ203D
ดัชนีการไหล	g/10min	ASTM D1238	102
ความหนาแน่น	g/cm^3	ASTM D792	0.94
ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในสายโซ่	Wt%	FTIR	high
จุดหลอมเหลว	^{O}C	ASTM D3418	160

4) มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) จาก Fluka มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.5 ใช้ในการกราฟต์ลงบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ

ตารางที่ 3.5 สมบัติของมาลิอิกแอนไฮไดรด์

สมบัติ	หน่วย	ค่าที่ได้
ความบริสุทธิ์	%	97
จุดหลอมเหลว	^{O}F	51-54

5) ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) จาก Fluka มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.6 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ

ตารางที่ 3.6 สมบัติของไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์

สมบัติ	หน่วย	ค่าที่ได้
ความบริสุทธิ์	%	98
น้ำหนักโมเลกุล	-	270.37
จุดหลอมเหลว	^{O}C	40

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมพลาสติกผสมและชิ้นทดสอบ

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1) เครื่องบด ball mill ใช้ในการผสมเม็ดพลาสติกในขั้นต้น ให้เม็ดพลาสติกสามารถเข้ากันได้ดี ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder, Thermo Prism) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัดแบบ (compression molding, LabTech Engineering company, Ltd) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 100K) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis, Metter Toledo รุ่น DMA/SDTA 861^{e}) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 การวิเคราะห์ทางความร้อน

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1) เครื่องดิฟเฟอแรนเซียลสแกนนิงคาลอรีมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, Mettler Toledo รุ่น DSC822) ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) เครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^{e}) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ถาดอลูมิเนียม ของภาควิชาเคมีเทคนิค และครูซิเบิลอะลูมินา ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope. Jeol-6400) ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) แท่งทองเหลืองสำหรับวางชิ้นงาน ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

3.4.1.1 การผสมเม็ดพลาสติกให้เข้ากันก่อนอัดรีดเป็นเม็ดพลาสติกผสม

การเตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนแบ่งออกเป็น 3 สูตรคือ

1) เตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน โดยไม่ใช้สารช่วยผสม (compatibilizer)

2) เตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารช่วยผสม

3) เตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟ

การเตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน โดยไม่ใช้สารช่วยผสม และใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารช่วยผสม มีขั้นตอนดังนี้คือ

1) อบเม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 80 องศาเซลเซียสใน vacuum oven ก่อนการใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากเม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

2) ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ด้วยเครื่อง ball mill เป็นเวลา 15 นาที

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนของเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (wt%)	พอลิโพรพิลีน (wt%)	มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (phr)
100	0	0,3,5,10
80	20	0,3,5,10
70	30	0,3,5,10
60	40	0,3,5,10
50	50	0,3,5,10
0	100	0,3,5,10

การเตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟ มีขั้นตอนดังนี้คือ

1) อบเม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 80 องศาเซลเซียสใน vacuum oven ก่อนการใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากเม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

2) ละลายไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์และมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในอะซิโตน หลังจากนั้นนำไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการผสมด้วย ball mill เป็นเวลา 15 นาทีแล้ว ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.8 ปล่อยทิ้งไว้ในอากาศประมาณ 10 นาทีเพื่อให้อะซิโตนระเหยออกจนหมด เมื่ออะซิโตนระเหยไปแล้ว มาลิอิกแอนไฮไดรด์และไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ จะไปเกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดพลาสติก ทำให้เกิดการกระจายที่ดีขึ้น [45]

พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ จะใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดกราฟต์ของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ลงบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน โดยพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟจะแบ่งสูตรการเตรียมเป็น 2 สูตร โดยใช้ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์เท่ากันคือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม

สูตรที่ 1 ใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม

สูตรที่ 2 ใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม

การคำนวณปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ และไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ในพอลิเมอร์ผสมสามารถคำนวณได้จาก

ตัวอย่าง เตรียมพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ ใช้ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม และไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม โดยเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมทั้งหมด 3 phr

สมมติ เตรียมพอลิเมอร์ผสม 100 กรัม โดยผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน 80 กรัม พอลิโพรพิลีน 20 กรัม และสารช่วยผสม 3 กรัม

ในสารช่วยผสม 100 กรัม ต้องใส่มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 5 กรัม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 0.6 กรัม และพอลิโพรพิลีน 94.4 กรัม โดยในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม 100 กรัม จะใส่สารช่วยผสม 3 กรัม

ดังนั้นต้องใส่มาลิอิกแอนไฮไดรด์ $\frac{5 \times 3}{100}$ = 0.15 กรัม

ใส่ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ $\frac{0.6 \times 3}{100}$ = 0.018 กรัม

ใส่พอลิโพรพิลีน $\frac{94.4 \times 3}{100}$ = 2.835 กรัม

ในอัตราส่วนอื่นๆ สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีเดียวกัน

ตารางที่ 3.8 พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนร้อยละ 80/20 โดยน้ำหนัก มาลิอิกแอนไฮไดร์ และ ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์

ปริมาณสารช่วยผสม (phr)	พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ ใช้ได้คิวมิวเปอร์ออกไซด์ 0.6 %			พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ ใช้ได้คิวมิวเปอร์ออกไซด์ 2.0 %		
	ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (wt%)	มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (wt%)	ปริมาณพอลิโพรพิลีน (wt%)	ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (wt%)	มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (wt%)	ปริมาณพอลิโพรพิลีน (wt%)
3	0.018	0.15	2.832	0.06	0.15	2.79
5	0.03	0.25	4.72	0.1	0.25	4.65
10	0.06	0.5	9.44	0.2	0.5	9.3

3.4.1.2 การอัดรีดเป็นเม็ดพลาสติกผสม

นำเม็ดพลาสติกที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.4.1.1 มาขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และแสดงสภาวะการขึ้นรูปไว้ในตารางที่ 3.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder, Thermo Prism)

ตารางที่ 3.9 สภาวะในการอัดรีดของเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

สภาวะในการอัดรีด	กระบวนการอัดรีด
	อุณหภูมิในการอัดรีด (^{O}C)
โซนที่ 1	165
โซนที่ 2	175
โซนที่ 3	178
โซนที่ 4	183
โซนที่ 5	185
ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	185*
ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	120**

หมายเหตุ

* ความเร็วรอบสกรูของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้และไม่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์เป็นสารช่วยผสม

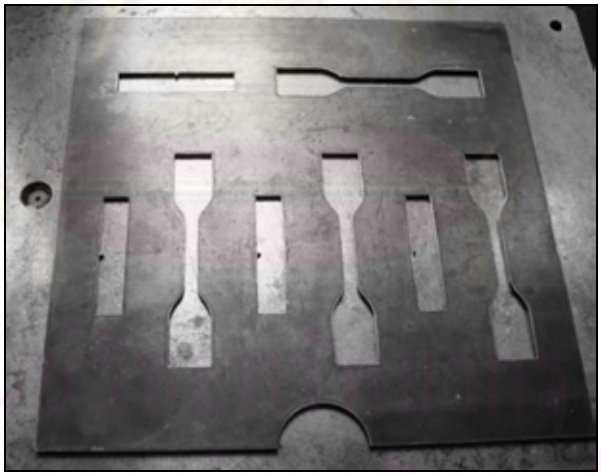
** ความเร็วรอบสรูของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.1.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.4.1.2 มาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ ด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัดแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้แม่แบบ (mold) ในการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.3 อุณหภูมิในการขึ้นรูป 180 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์

รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยเครื่องอัดแบบ (compression moulding)



รูปที่ 3.3 แม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

3.4.2 <u>การทดสอบสมบัติเชิงกล</u>

3.4.2.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 $\pm$ 2 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D638-03 ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 100K) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงใน

รูปที่ 3.4 โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบที่ 4 แสดงดังรูปที่ 3.5 ใช้ load cell ขนาด 100 กิโลนิวตัน อัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างที่หนีบ 65 มิลลิเมตร ความยาวเกจ (gauge length) 25 มิลลิเมตร ทำการทดสอบอย่างน้อยสูตรละ 5 ชิ้น

รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine, Lloyd รุ่น LR 10K)

รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง

3.4.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

ทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, Mettler Toledo รุ่น DMA/SDTA 861^{e}) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้ตัวจับแบบ shear เพื่อจับชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานมีขนาด 5x5x1 มิลลิเมตร ใช้ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบระหว่าง -100 องศา

เซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ความถี่ 1 เฮิร์ท (Hz) และใช้แก๊สไนโตรเจนเหลวในการลดอุณหภูมิในการทดสอบ

รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

3.4.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอรีมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, Mettler Toledo รุ่น DSC822) ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 วิธีการวิเคราะห์ในขั้นแรกจะนำพอลิเมอร์ผสมน้ำหนักประมาณ 3 – 5 มิลลิกรัม บรรจุในถาดอะลูมิเนียม และปิดผนึกให้เรียบร้อย โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ ระหว่าง -100 องศาเซลเซียส ถึง 250 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหลของแก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปที่ 3.7 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลแสกนนิงคาลอริมิเตอร์

(differential scanning calorimeter, Mettler Toledo รุ่น DSC822)

3.4.3.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิคทีจีเอ

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^{e}) ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 3.8 วิธีการวิเคราะห์ในขั้นแรกจะนำพอลิเมอร์ผสมประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครูซิเบิลอะลูมินา โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ระหว่าง 50 องศาเซลเซียส ถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่ไหลด้วยอัตราเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของพอลิเมอร์ผสม

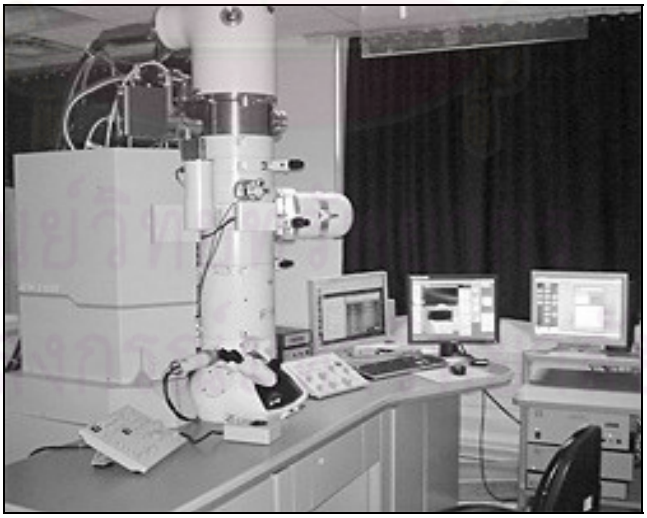
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.8 เครื่องเทอร์โมกราวิเมทริแอนาไลเซอร์

(thermal gravimetric analyzer, Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^{e})

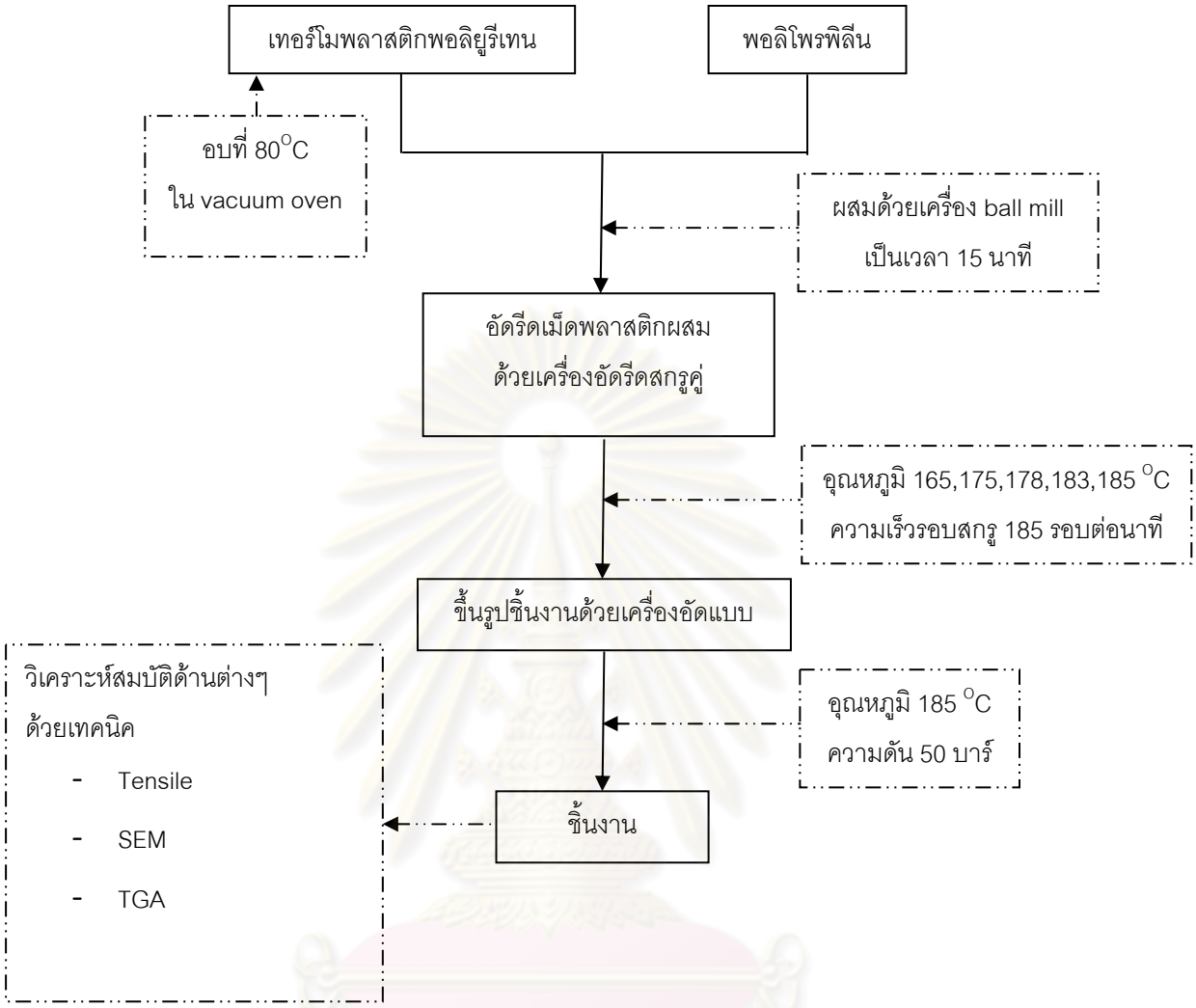
3.4.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, Jeol-6400) แสดงในรูปที่ 3.9 ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม



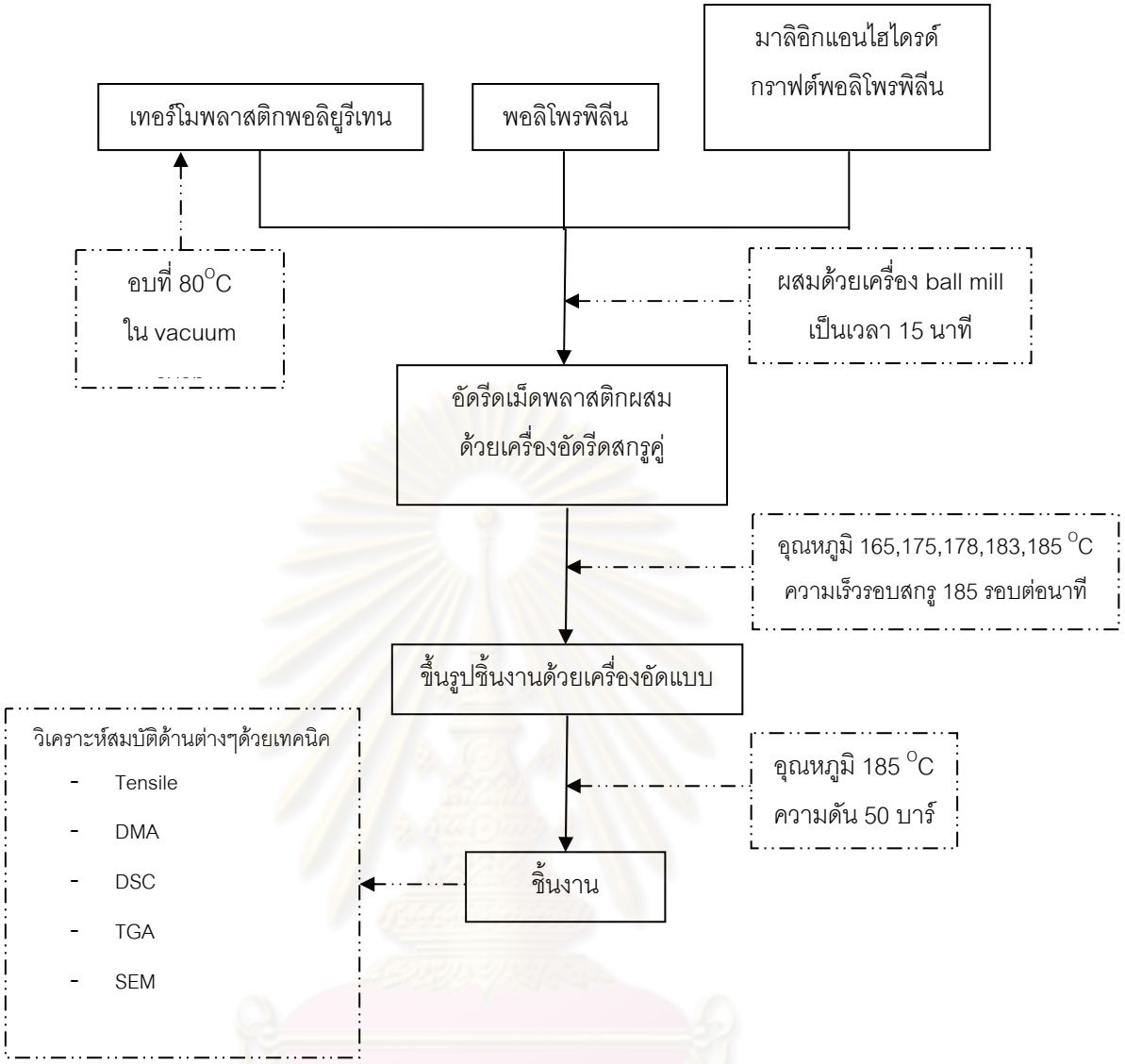
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

การผสมเม็ดพลาสติกในแต่ละขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.10 3.11 และ 3.12



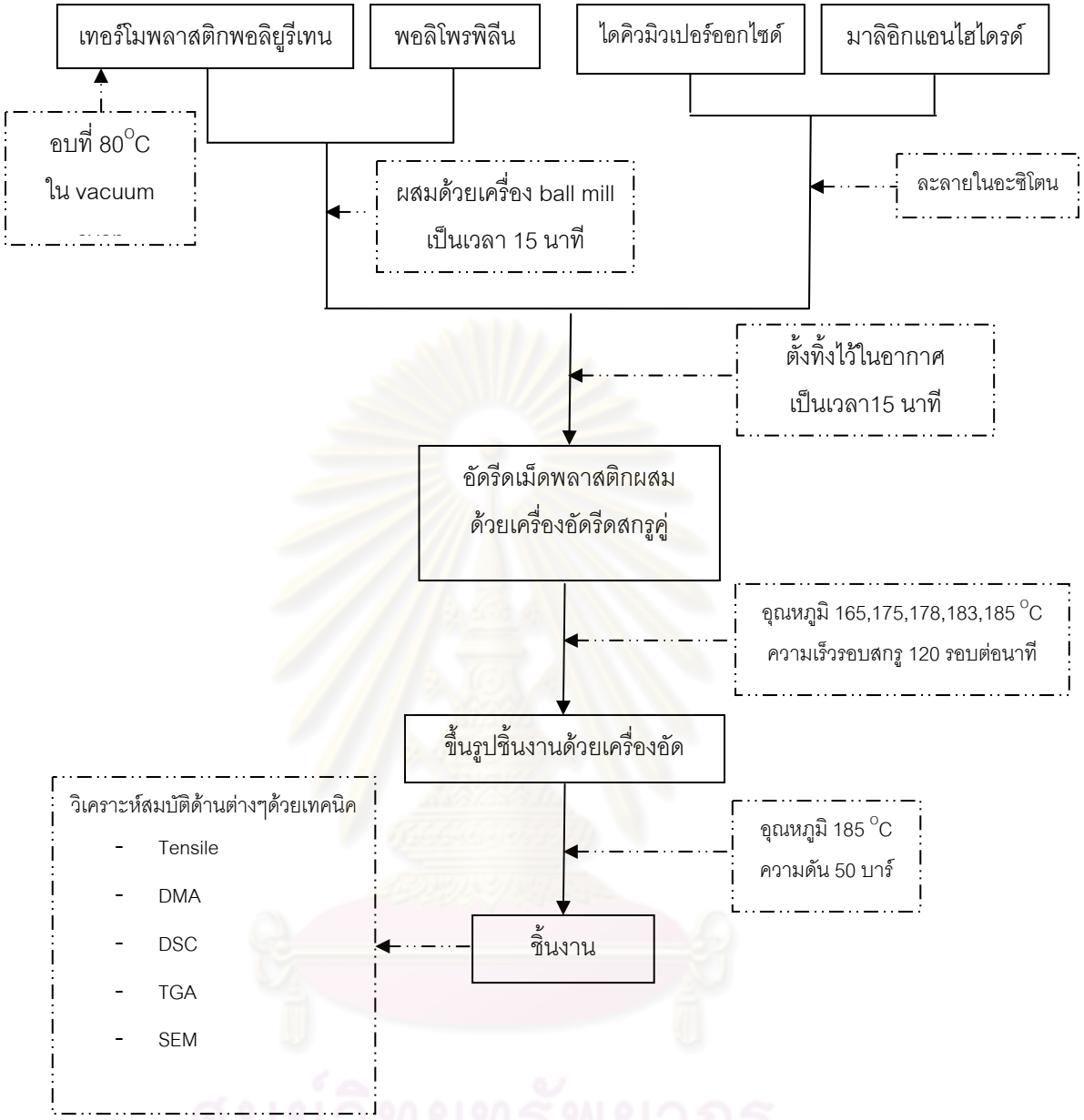
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกผสมและการวิเคราะห์ทดสอบพอลิเมอร์ผสม
ระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกผสมและการวิเคราะห์ทดสอบพอลิเมอร์ผสม
ระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และมาลิอิกแอนไฮไดรด์
ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการผสมเม็ดพลาสติกผสมและการวิเคราะห์ทดสอบพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

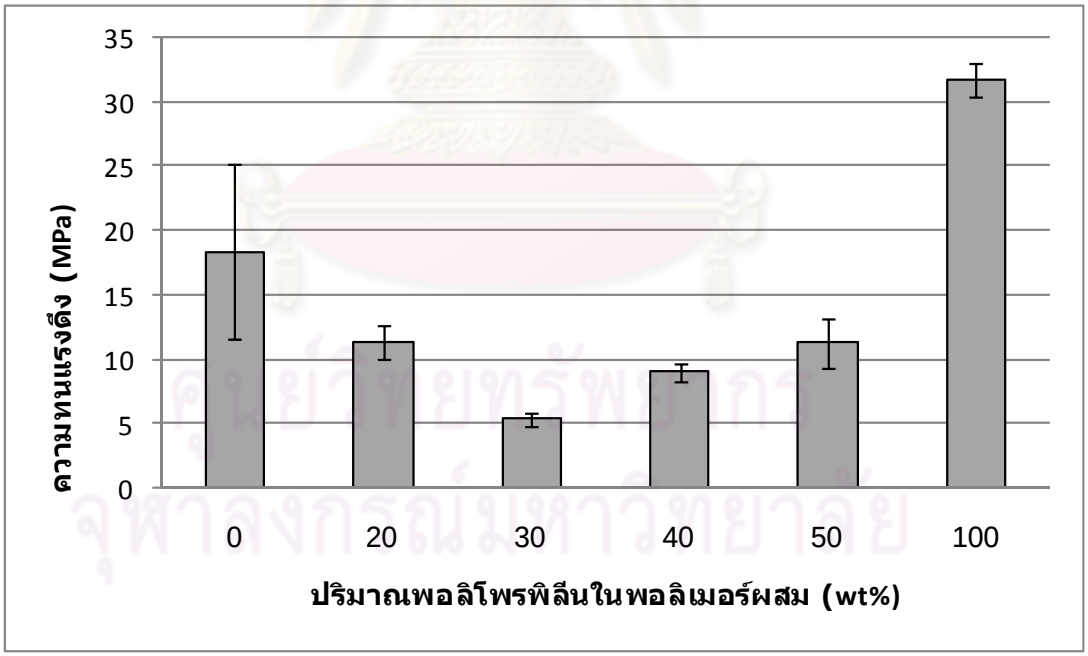
วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม

ในขั้นตอนแรกได้ศึกษาผลของปริมาณพอลิโพรพิลีน ที่มีผลต่อสมบัติด้านแรงดึง สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาโดยนำเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่างๆ มาผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ตัดเป็นเม็ด แล้วนำเม็ดพลาสติกที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ (compression moulding) โดยในระบบของพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก

4.1.1 สมบัติด้านแรงดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับความทนแรงดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.1

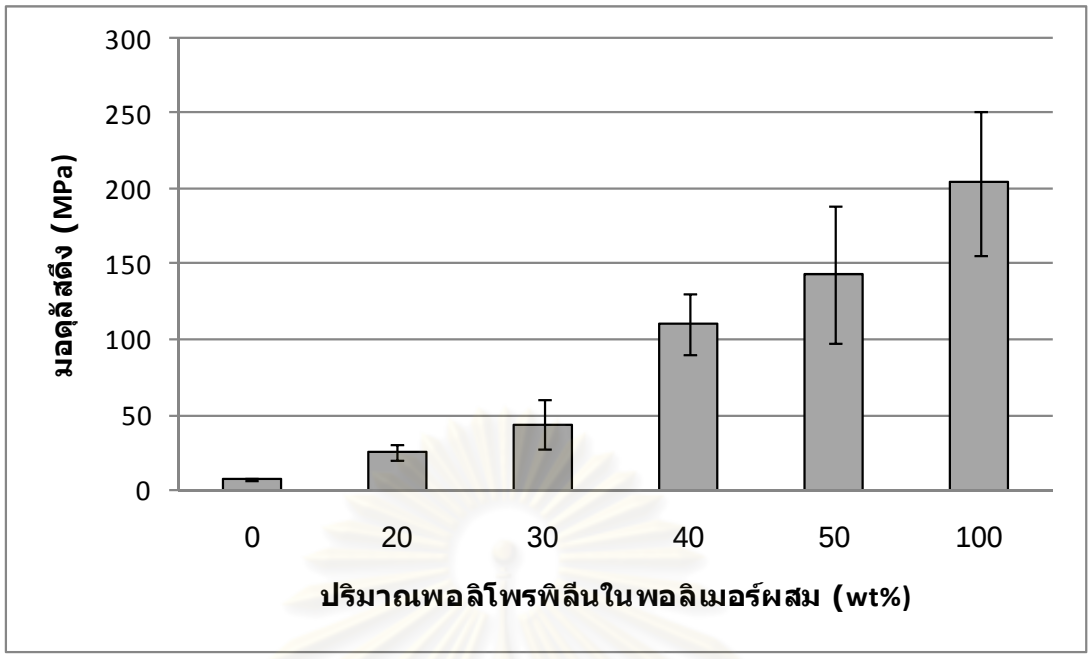


รูปที่ 4.1 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ โดยความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนมีค่าเท่ากับ 31.70 MPa ซึ่งมากกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีความทนแรงดึงเท่ากับ 18.37 MPa เพราะพอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันไม่ได้

(incompatible) และความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (non-homogeneity) สูง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีความเป็นขั้ว ในขณะที่พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกที่ไม่มีขั้ว และพลังงานอิสระที่ผิวของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีค่าสูง ดังนั้นเมื่อเติมพอลิโพรพิลีนลงในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยว (cohesive strength) ของเฟสทั้งสองมีค่าต่ำ เพราะพอลิโพรพิลีนไปขัดขวางการยึดเหนี่ยวระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงต่ำลง [36] และจากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนน้อยๆ และพบว่าที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้น พอลิโพรพิลีนจะเกิดการรวมตัวกันเป็นเฟสใหญ่ขึ้น ทำให้พอลิโพรพิลีนไปขัดขวางการแลกเปลี่ยนพันธะไฮโดรเจนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ส่งผลให้เฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและรอยต่อระหว่างเฟสไม่แข็งแรง จึงเกิดการแตกหักได้ง่าย ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าต่ำ ในขณะที่เมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเท่ากับร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงดึงมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่อัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณของพอลิโพรพิลีนที่มากขึ้น และเกิดการรวมตัวกันเกิดเป็นเฟสต่อเนื่องอีกเฟสหนึ่งขึ้นมา และเนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความทนแรงดึงมากกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ส่งผลให้ความทนแรงดึงเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่ง และที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนอื่นๆ แสดงถึงความเข้ากันได้ดีที่อัตราส่วนดังกล่าว และจากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงลักษณะเป็นรูปตัวยู ซึ่งแสดงถึงว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน (incompatible blend)[42]

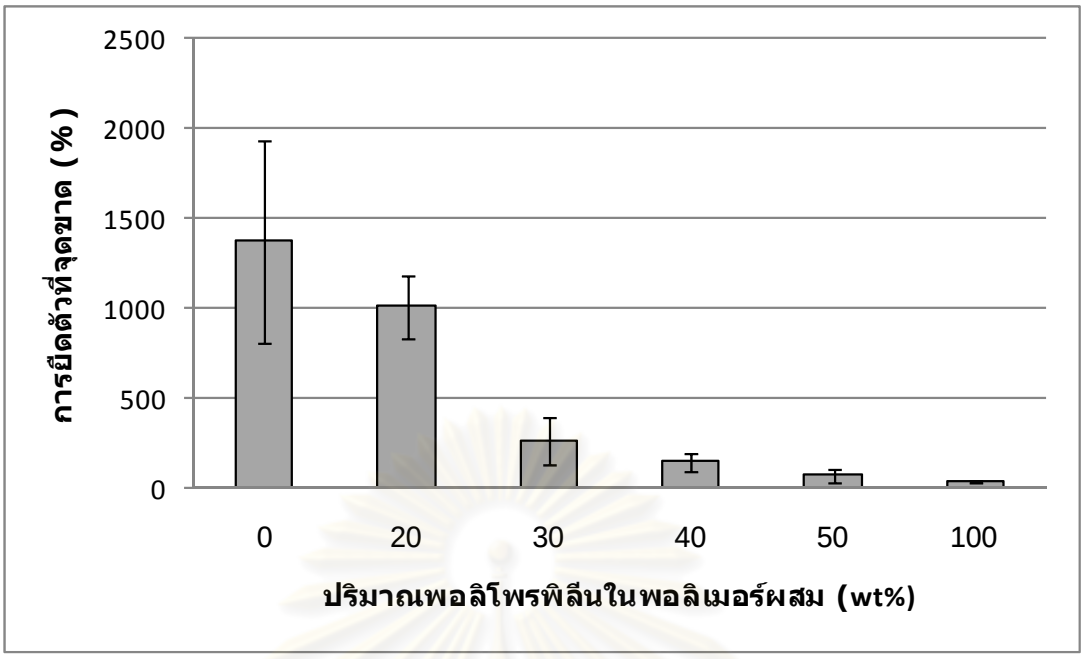
ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับมอดุลัสดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่า พอลิโพรพิลีนมีมอดุลัสดึงเท่ากับ 204.03 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่ามอดุลัสดึงของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.28 MPa การที่มอดุลัสดึงของพอลิโพรพิลีน มีค่ามากกว่ามอดุลัสดึงของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน เนื่องมาจาก พอลิโพรพิลีนมีลักษณะที่เป็นพลาสติกแข็งตึง (stiffness) ยืดตัวได้น้อย ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีลักษณะคล้ายยาง เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจึงมีการยืดตัวที่ดีกว่า ทำให้ค่าความเครียดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีค่ามาก ส่งผลให้ค่ามอดุลัสดึงมีค่าต่ำ และมอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีค่ามอดุลัสดึงสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน เมื่อเติมพอลิโพรพิลีนลงในเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ลักษณะของค่ามอดุลัสดึงที่สูงกว่าของพอลิโพรพิลีนจึงแสดงออกมาให้เห็น [42]

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับการยืดตัวที่จุดขาด แสดงไว้ในรูปที่ 4.3

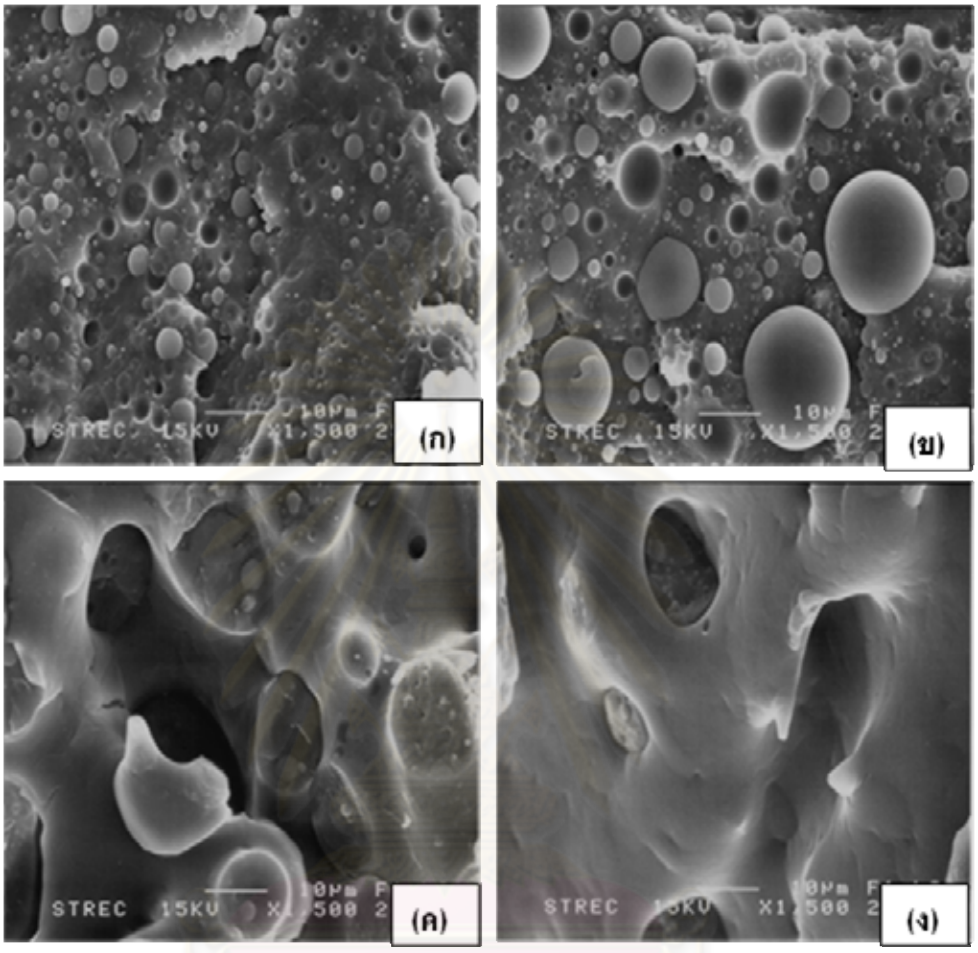


รูปที่ 4.3 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ

จากการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมมีผลต่อการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเคลื่อนที่ได้น้อยลง และเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีลักษณะคล้ายยาง มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำ มีสมบัติการยืดตัวที่ดี แต่พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกแข็งและมีสมบัติการยืดตัวต่ำ [40] ดังนั้นเมื่อนำเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมและเมื่อเกิดการดึงยืด เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ทำหน้าที่เป็นเฟสหลักจะเกิดการยืดตัวได้มาก แต่พอลิโพรพิลีนเกิดการยืดตัวได้น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างการยืดดึง (pull out) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์มีค่าต่ำลง และเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิโพรพิลีนจากร้อยละ 20 เป็น 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าการยืดตัวที่จุดขาดลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม เพราะเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้นความเข้ากันไม่ได้ ระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนมากขึ้น จึงทำให้การยืดตัวที่จุดขาดมีค่าต่ำลง

4.1.2 สัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



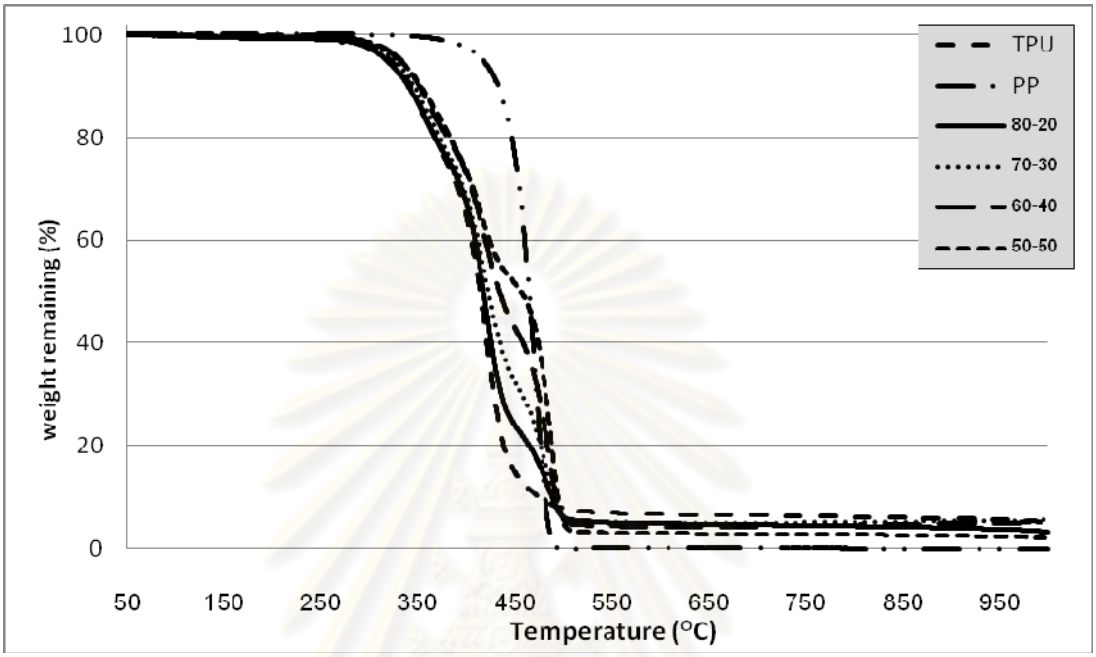
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมร้อยละ (ก) 20 (ข) 30 (ค) 40 และ (ง) 50 น้ำหนัก โดยมีกำลังขยาย 1,500 เท่า

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นสองเฟส โดยเฟสหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเล็กๆ กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องอีกเฟสหนึ่ง ซึ่งเฟสที่กระจายตัวคือพอลิโพรพิลีนเพราะมีปริมาณน้อยกว่า ส่วนเฟสที่ต่อเนื่องคือเฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนซึ่งมีปริมาณมากกว่าในพอลิเมอร์ผสม และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมไม่แสดงการยึดเกาะกันของทั้งสองเฟส แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ไม่ดี จากรูปที่ 4.4 (ก) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม แสดงลักษณะที่เฟสของพอลิโพรพิลีนกระจายตัวอยู่ในเฟสของเทอร์โมพลาสติก

พอลิยูรีเทน โดยขนาดของเฟสพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.4 (ข) ซึ่งเป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เมื่อขนาดของเฟสพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวมีค่ามาก แรงตึงผิวมีค่าน้อย แรงยึดเกาะกันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมแข็งแรงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสที่มีขนาดใหญ่ [36] และพบว่า มีการหลุดออก (pull out) ของเฟสพอลิโพรพิลีนในปริมาณที่มาก ซึ่งเกิดในขณะที่หักชิ้นทดสอบเพื่อนำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยา แสดงให้เห็นว่า แรงยึดเกาะกันระหว่างเฟสพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีค่าต่ำ เฟสของพอลิโพรพิลีนจึงหลุดออกได้ง่าย เมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า เฟสของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วสูง พอลิเมอร์ทั้งสองจึงเกิดการรวมตัวกันเองได้ดีกว่าการรวมกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง และเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้น โอกาสที่เฟสที่กระจายตัวอยู่จะเกิดการรวมตัวกันก็เพิ่มมากขึ้นด้วย รูปที่ 4.4 (ค) และ (ง) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยพบว่าที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวแสดงสัณฐานวิทยาในลักษณะที่เป็นเฟสต่อเนื่องร่วมกัน (co-continuous phase) ทั้งนี้เกิดเนื่องมาจากความสามารถในการรวมตัวกัน (coalescence) ของเฟสพอลิโพรพิลีนและในขณะที่ทำการผสมพอลิเมอร์มีการให้แรงเฉือน (shear energy) ไม่เพียงพอที่จะทำให้เฟสของพอลิโพรลีนแตกออกจากกันได้ [43] ที่อัตราส่วนนี้แสดงถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์จะลดต่ำลง แต่เนื่องจากว่าพอลิเมอร์ผสมแสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แต่ละตัวออกมา สมบัติเชิงกลจึงดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งที่อัตราส่วนนี้เฟสของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่ การกระจายตัวไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำที่สุด จากสัณฐานวิทยาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ไม่ดี และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนต่างๆกัน พบว่าที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เฟสของพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็ก กระจายตัวดี และมีการหลุดออกของเฟสในปริมาณน้อย ส่งผลให้ที่อัตราส่วนนี้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.1.3 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับอุณหภูมิการสลายตัว แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 TGA thermogram ของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ

ปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม (wt%)	อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว (^{O}C)
0	320.1, 389.9
20	321.2
30	324.9
40	327.0
50	333.4
100	436.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

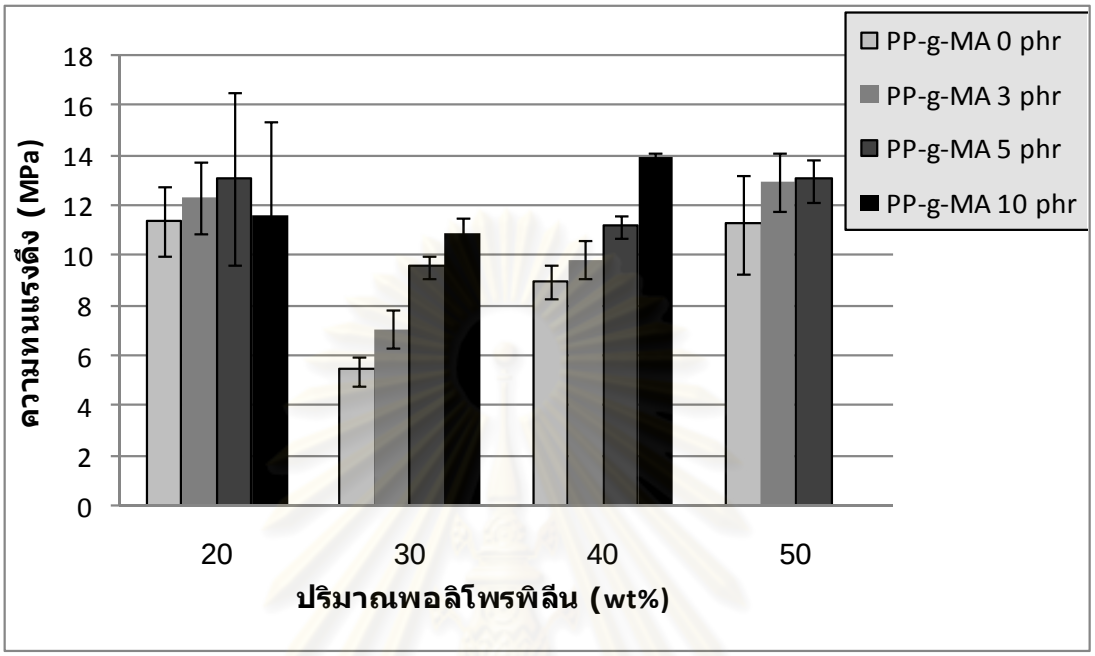
จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.1 โดยพบว่าพอลิโพรพิลีนมีการสลายตัวขั้นเดียว และอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 438.7 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนมีความเป็นระเบียบสูง แข็งแรง จึงทนความร้อนได้ดี ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีการสลายตัวสองขั้น คือที่อุณหภูมิประมาณ 320.1 และ 389.9 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวที่ประมาณ 320 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของพันธะยูรีเทน (urethane bond) โดยปกติพันธะยูรีเทนจะมีอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 150- 250 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิยูรีเทน เช่น พอลิยูรีเทนที่เกิดจากสารตั้งต้นที่เป็น methylene-bis(4-phenyl isocyanate), MDI และบิวตะไดออล (butadiol) มีอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวประมาณ 300 องศาเซียล ส่วนที่อุณหภูมิในการสลายตัวที่ 390 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ MDI และ polyester-diol ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิยูรีเทน [44] เมื่อเติมพอลิโพรพิลีนลงในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 321 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิโพรพิลีนเป็นร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของพอลิโพรพิลีน ซึ่งอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน และการเพิ่มขึ้นของพอลิโพรพิลีนจะช่วยให้อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นด้วย

4.2 ผลของปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณ มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม ที่มีผลต่อสมบัติด้านแรงดึง สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา โดยในระบบของพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ชื่อทางการค้า Fusabond® P MZ203D จากบริษัท เคมิคัล อินโนเวชัน จำกัด ปริมาณ 3 5 และ 10 phr

4.2.1 **สมบัติด้านแรงดึง**

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนกับความทนแรงดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.6

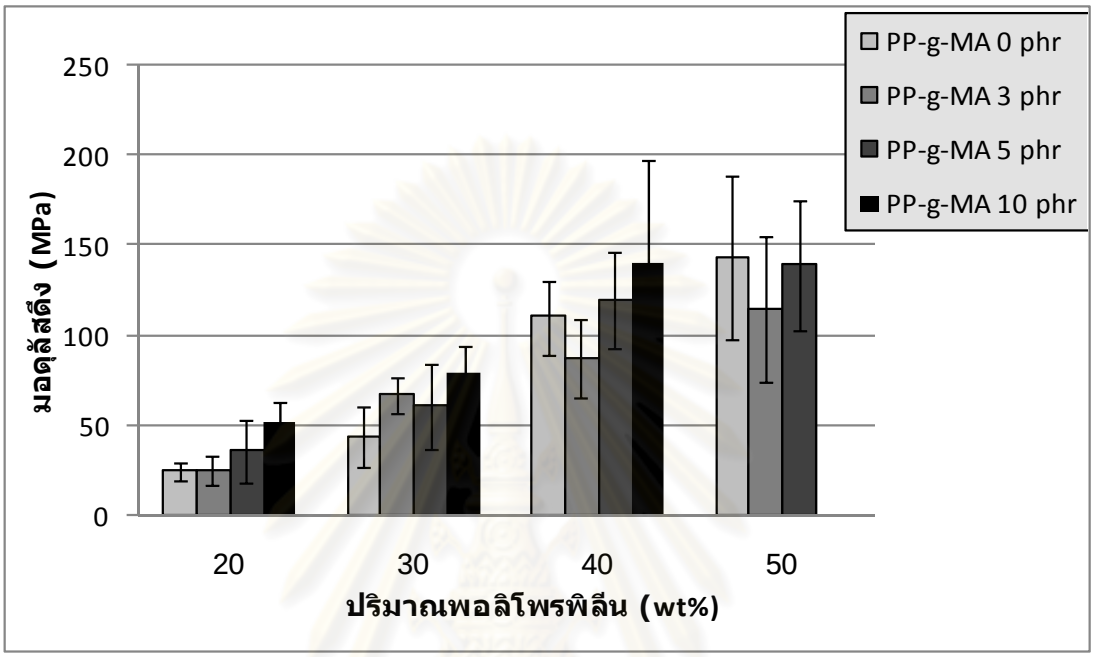


รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสม

จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่อัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และค่าความทนแรงดึงมีค่ามากกว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารช่วยผสม ทั้งนี้ที่ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสมในปริมาณที่มากขึ้นนั้นเนื่องมาจากมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีน โดยส่วนที่เป็นมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้ว จะสามารถเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และส่วนของพอลิโพรพิลีนในมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน จะจับกับพอลิโพรพิลีนซึ่งไม่มีขั้วเหมือนกัน ซึ่งจะช่วยให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีมากยิ่งขึ้น [39] และยังช่วยในเรื่องการกระจายตัวของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมอีกด้วย โดยที่อัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 50 โดยน้ำหนักไม่สามารถเตรียมชิ้นทดสอบได้ และที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีน

เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มเป็น 10 phr ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเล็กน้อย [45]

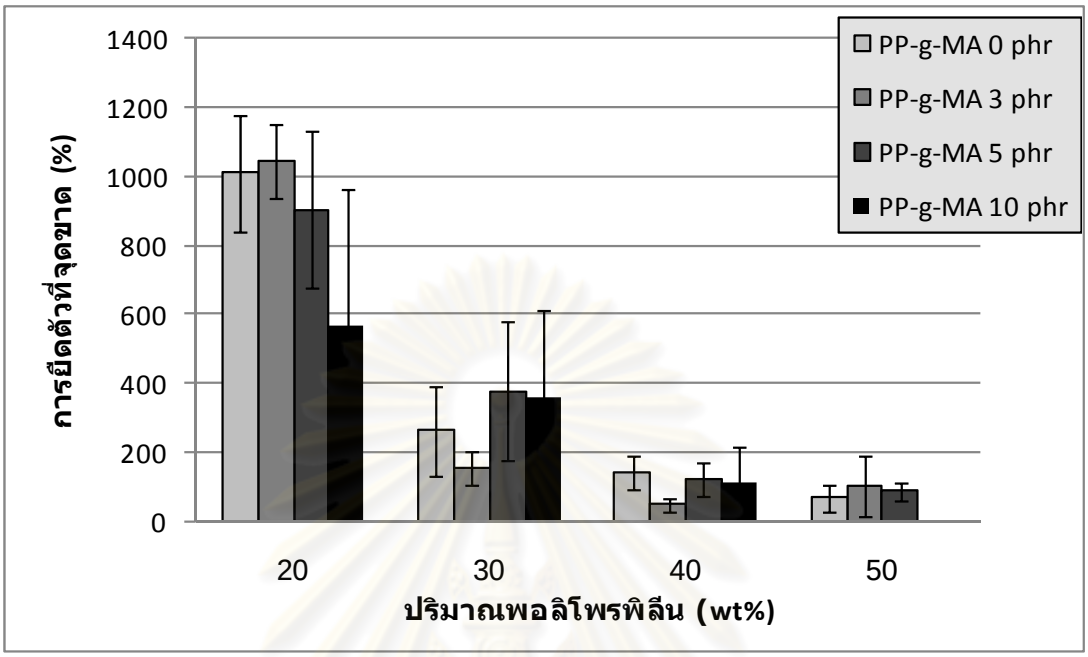
ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนกับมอดุลัสดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสม

จากการทดสอบพบว่า ที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนช่วยให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเท่ากับ 3 phr พอลิเมอร์ผสมมีมอดุลัสดึงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีปริมาณไม่เพียงพอ เมื่อเทียบกับปริมาณของพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เฟสของพอลิโพรพิลีนเกิดการรวมตัวกัน แต่เมื่อปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเป็น 5 และ 10 phr มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมเพียงพอที่จะทำให้พอลิโพรพิลีนมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับการยืดตัวที่จุดขาด แสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยพอลิโพรพิลีนปริมาณต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสม

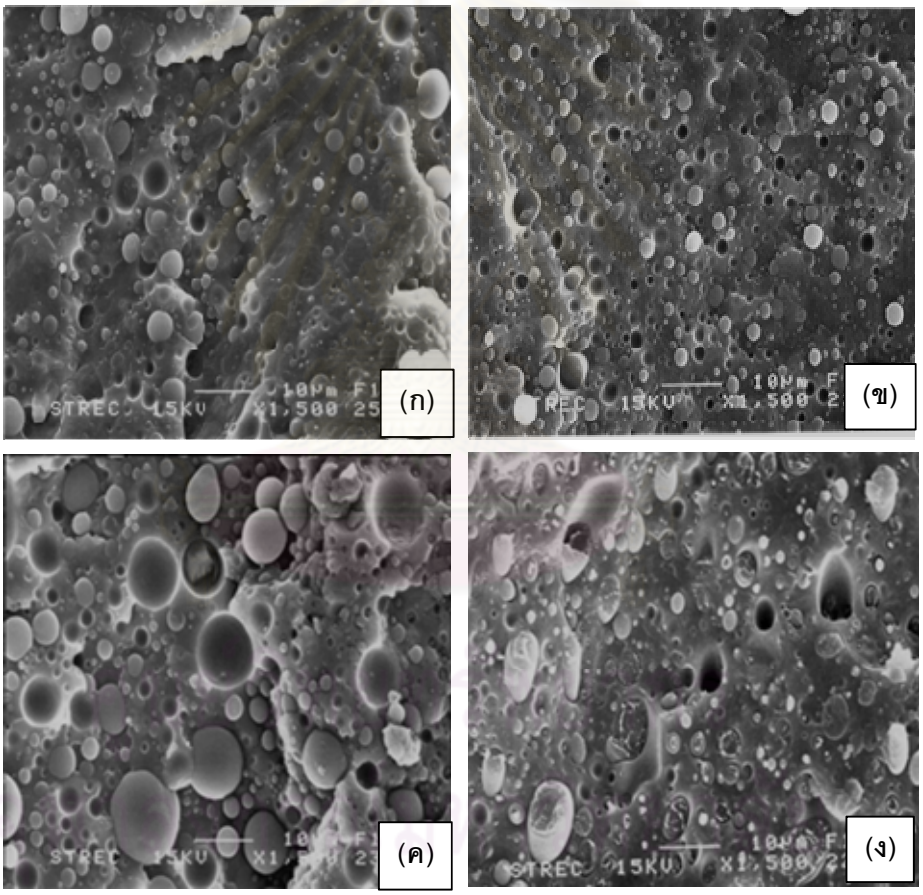
เมื่อผสมมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก การยืดตัวที่จุดขาดแปรผกผันกับปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือ เมื่อปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรค์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน เมื่อชิ้นทดสอบเกิดการดึงยืด เฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจะเกิดการยืดออก แต่จะถูกยึดไว้ด้วยเฟสของพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีอัตราการดึงยืดที่ต่ำกว่า เมื่อปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น การยืดตัวที่จุดขาดจึงมีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนนี้พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มจาก 3 เป็น 5 phr การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์

ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเพิ่มเป็น 10 phr การยืดตัวที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง [41]

เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมพบว่าที่พอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ดีที่สุด ที่ทุกการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

4.2.2 **สัณฐานวิทยา**

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับสัณฐานวิทยา แสดงไว้ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน (ก) 0 (ข) 3 (ค) 5 และ (ง) 10 phr โดยมีกำลังขยาย 1,500 เท่า

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อใส่มาลิอิก

แอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 3 - 5 phr เฟสของพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กลงและกระจายตัวดีกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีขึ้นของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็น 10 phr พบว่าเฟสของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีช่องว่างที่เกิดจากการหลุดออกของเฟสพอลิโพรพิลีนที่มีขนาดใหญ่ แสดงให้เห็นว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของพอลิโพรพิลีนและเฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม ที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 3 – 5 phr

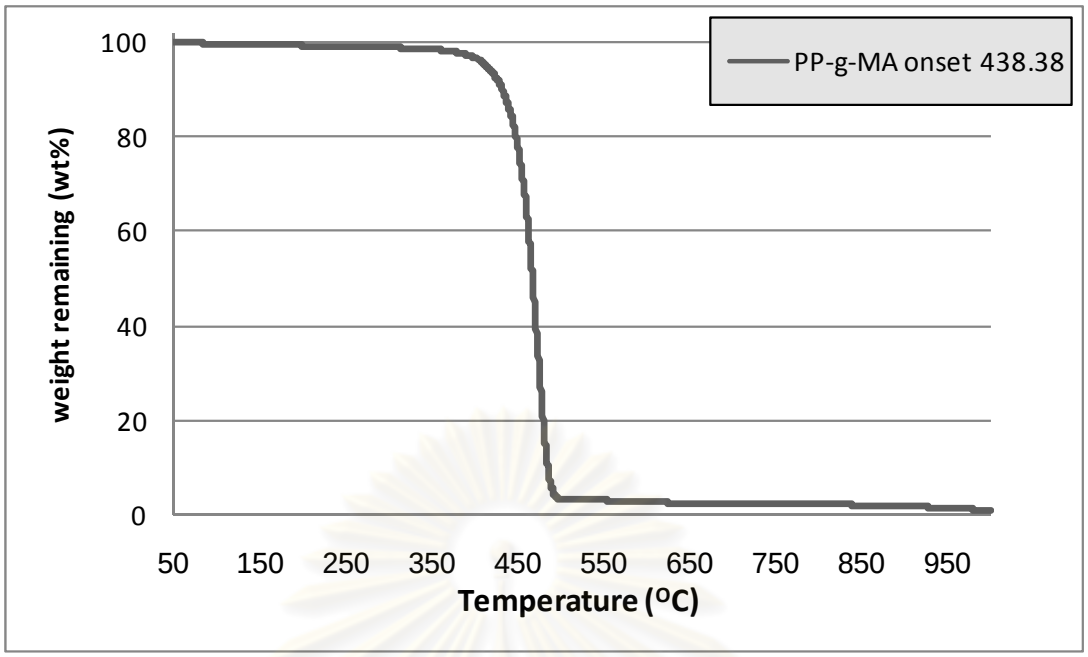
4.2.3 **เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค** TGA

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมกับอุณหภูมิการเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน แสดงไว้ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

ปริมาณพอลิโพรพิลีน (wt%)	ปริมาณสารช่วยผสม (phr)			
	0	3	5	10
20	321.2	324.9	324.3	323.2
30	324.9	325.8	322.9	322.9
40	337.0	316.6	321.1	318.0
50	333.4	317.8	318.9	317.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

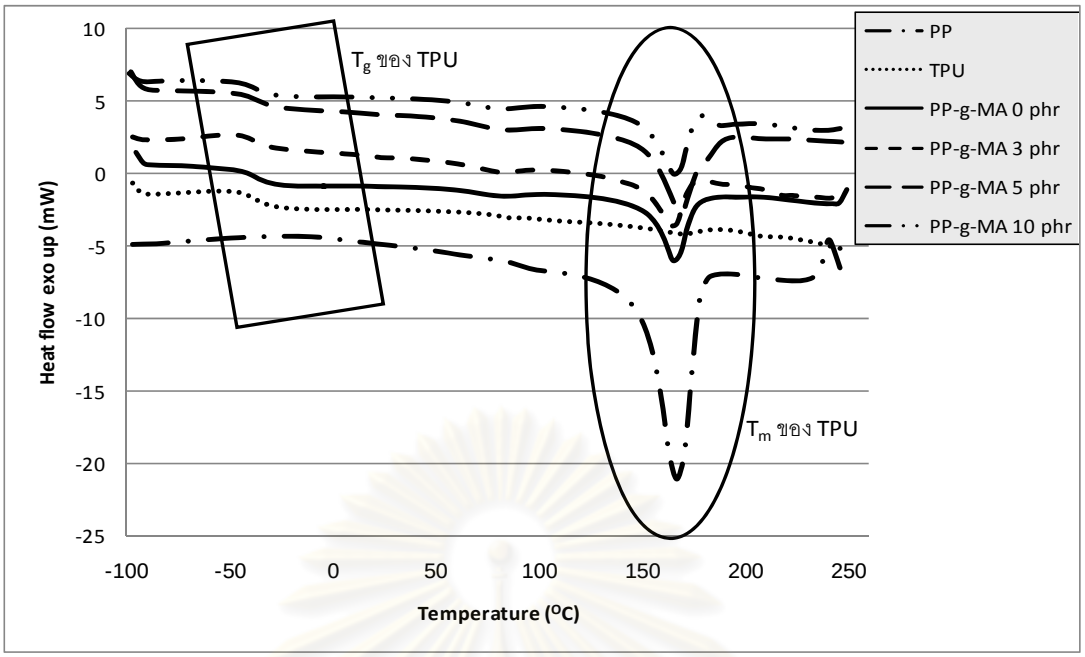


รูปที่ 4.10 TGA thermogram ของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้า

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมทางการค้ามากขึ้น อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ยังมีค่ามากกว่าอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยเป็น 3 5 และ 10 phr ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของสารช่วยผสมมีค่าประมาณ 440 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิโพรพิลีน ดังนั้นในการใส่สารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณ 3 5 และ 10 phr จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม

4.2.4 สมบัติทางความร้อนจากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน

อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็น 3 5 และ 10 phr แสดงไว้ในรูปที่ 4.11



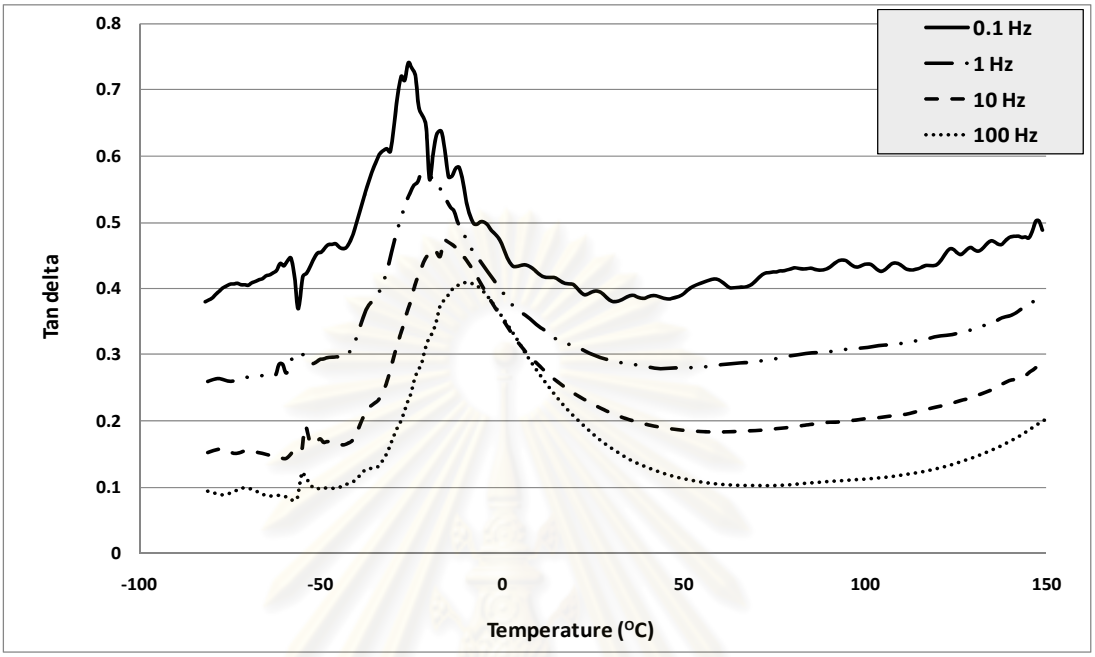
รูปที่ 4.11 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม
ที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ
มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 3 5 และ 10 phr

จากการศึกษาสมบัติทางด้านความร้อนด้วยเทคนิค DSC ไม่สามารถหาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิโพรพิลีนได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้อัตราการเพิ่มความร้อนที่เร็วเกินไป ส่งผลให้ไม่สามารถตรวจพบอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิโพรพิลีนได้ ส่วนอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนคือ -36.0 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสายโซ่ส่วนนิ่ม (soft segment) เมื่อเติมพอลิโพรพิลีนลงในพอลิเมอร์ผสมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงเหลือ -38.1 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับการยืดตัวที่จุดขาดที่มีแนวโน้มลดลง

เมื่อเพิ่มปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนลงในสารช่วยผสม พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มมากขึ้น ส่วนที่เป็นมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในสารช่วยผสมซึ่งมีความเป็นขั้วจะสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไอมีด (imide group) ในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ ส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์สูงมากขึ้น [41]

4.2.5 **สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมจากเทคนิค** DMA

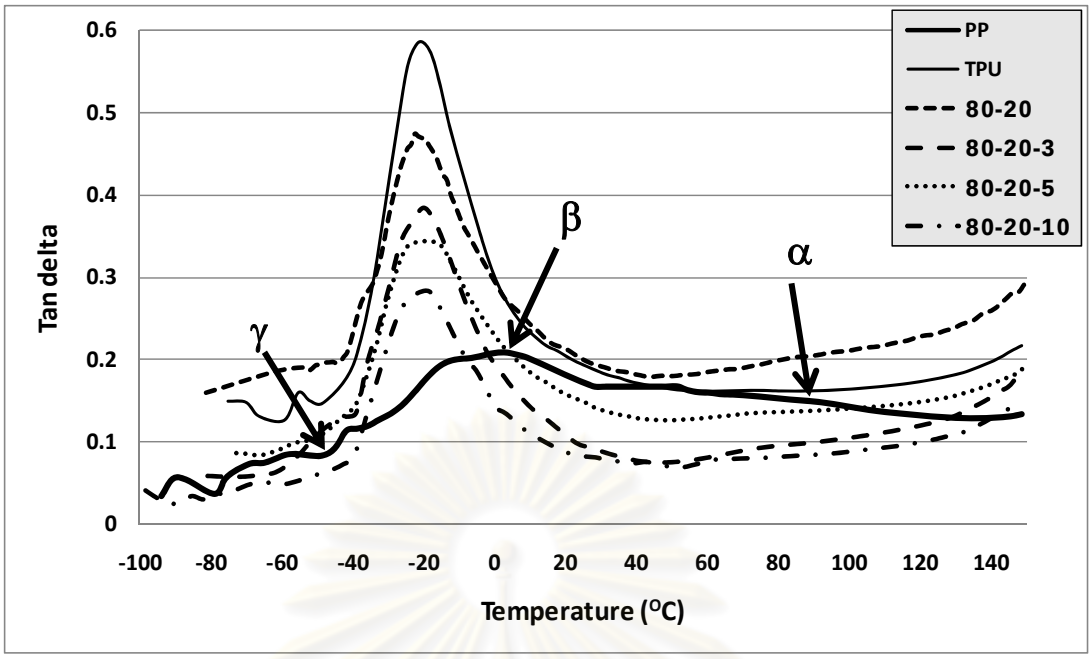
Tan delta พอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่ความถี่ต่างๆกัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 tan delta เทียบกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ความถี่ 0.1 1 10 และ 100 Hz

จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA จะเห็นได้ว่าที่ทุกความถี่ของการทดลองจะมีแนวโน้มของพีกเหมือนกัน โดยค่าจะ shift ไปตามความถี่ที่เพิ่มมากขึ้น แสดงว่าที่ความถี่สูงขึ้นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่อ่านได้จะสูงมากขึ้นด้วย ดังนั้นเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเทคนิค DSC มากที่สุดจึงเลือกที่ความถี่ 1Hz มาทำการวิเคราะห์ผล

ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีน เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็น 3 5 และ 10 phr แสดงไว้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีน เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสม

จากกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพอลิโพรพิลีนที่แสดง relaxation peak ที่อุณหภูมิต่างๆ 3 ค่าคือที่อุณหภูมิประมาณ -45.1(γ) 15.6 (β) และ 90.5 (α) องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิ - 45.1 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิของการเคลื่อนที่ของหมู่เมทิล (methyl group) และ เอทิลีน (ethylene group) ของสายโซ่พอลิโพรพิลีน ส่วนที่ 15.6 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิของส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของพอลิโพรพิลีน และที่อุณหภูมิ 91.5 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ามากที่สุดเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลง relaxation ที่เด่นชัดที่สุดของพอลิโพรพิลีน โดยพีคของพอลิโพรพิลีนมีลักษณะที่กว้างแสดงถึงความเป็นผลึก (crystalline) ของพอลิเมอร์ [37]

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อปริมาณของมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิค DSC

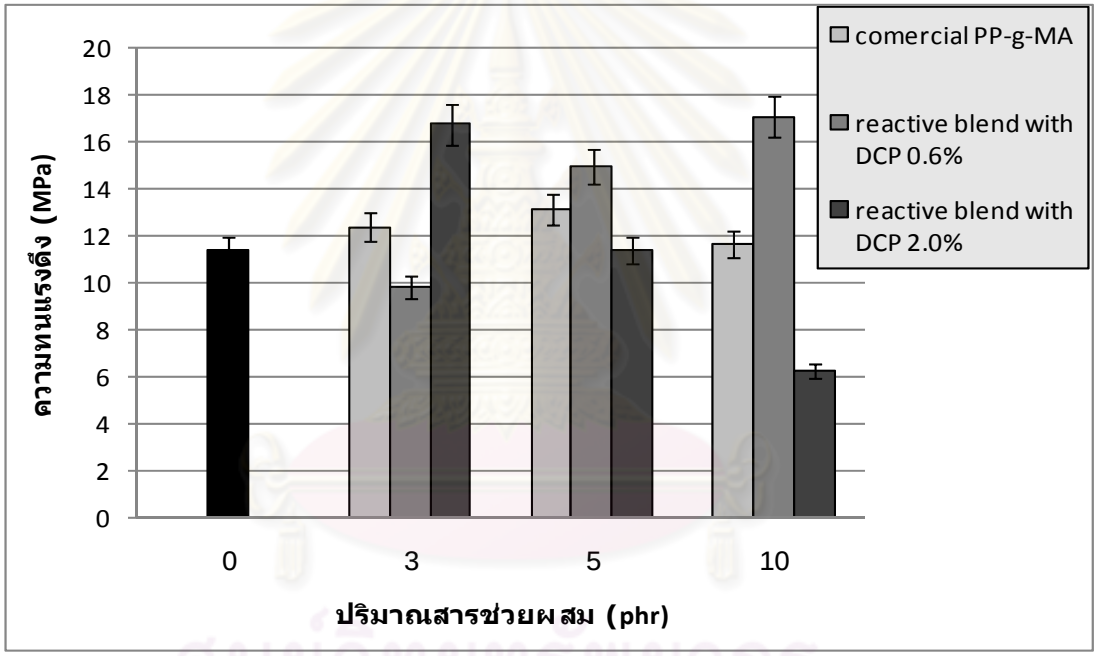
4.3 พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของเทคนิคที่ใช้ในการผสม โดยผสมพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ ใช้ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์เพื่อให้เกิดการกราฟต์ลงบนสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนในปริมาณเทียบเท่ากับการใช้สารช่วยผสม 3 5 และ 10 phr และใช้ไดคิวมิว

เปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มในปริมาณร้อยละ 0.6 และ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสมแล้วทดสอบสมบัติด้านแรงดึง สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลพลวัต ของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสม ที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปริมาณสารช่วยผสม 3 5 และ 10 phr

4.3.1 **สมบัติด้านแรงดึง**

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยผสม เทคนิคที่ใช้ผสม กับความทนแรงดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสมเป็น 3 5 และ 10 phr

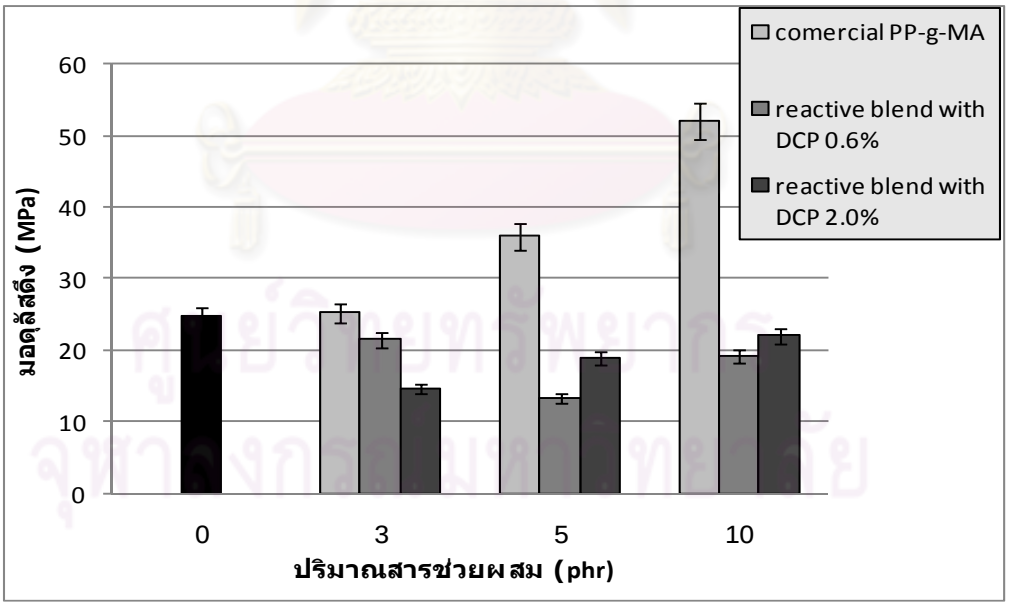
จากการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม มีค่าเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสมมีแนวโน้มลดลงและพอลิเมอร์ผสมที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารช่วยผสม จะมีความทนแรงดึงลดลงเมื่อใช้ปริมาณสารช่วยผสม 10 phr เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสมที่เท่ากันพบว่า

ที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr พอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสมมีความทนแรงดึงสูงที่สุด ในขณะที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 5 และ 10 phr พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีความทนแรงดึงต่ำที่สุดเช่นกัน

ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ ที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

ที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากระหว่างกระบวนการผสมสายโซ่พอลิโพรพิลีนสามารถเกิดการตัดของสายโซ่ (β - scission) ทำให้สายโซ่ของพอลิโพรพิลีนมีขนาดสั้นลง [12,45] ส่งผลให้ความทนแรงดึงมีค่าลดลง

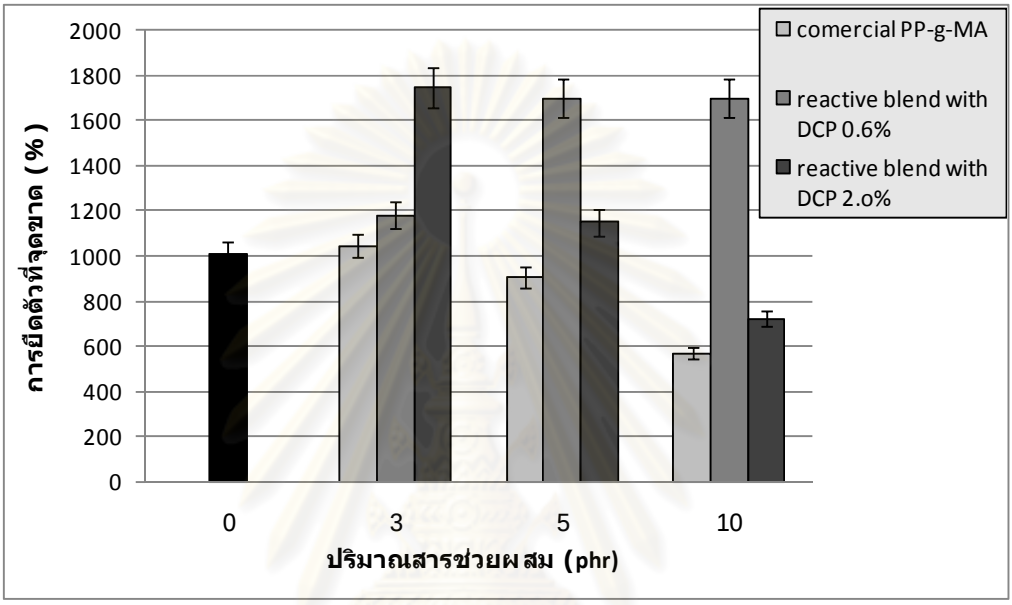
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยผสม เทคนิคที่ใช้ผสม กับมอดุลัสดึง แสดงไว้ในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลง
ปริมาณของสารช่วยผสมเป็น 3 5 และ 10 phr

จากการทดสอบพบว่าที่ทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์ผสมที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสม มีมอดุลัสดึงมากกว่าพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 และ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วย

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยผสม เทคนิคที่ใช้ผสม กับการยืดตัวที่จุดขาด แสดงไว้ในรูปที่ 4.16

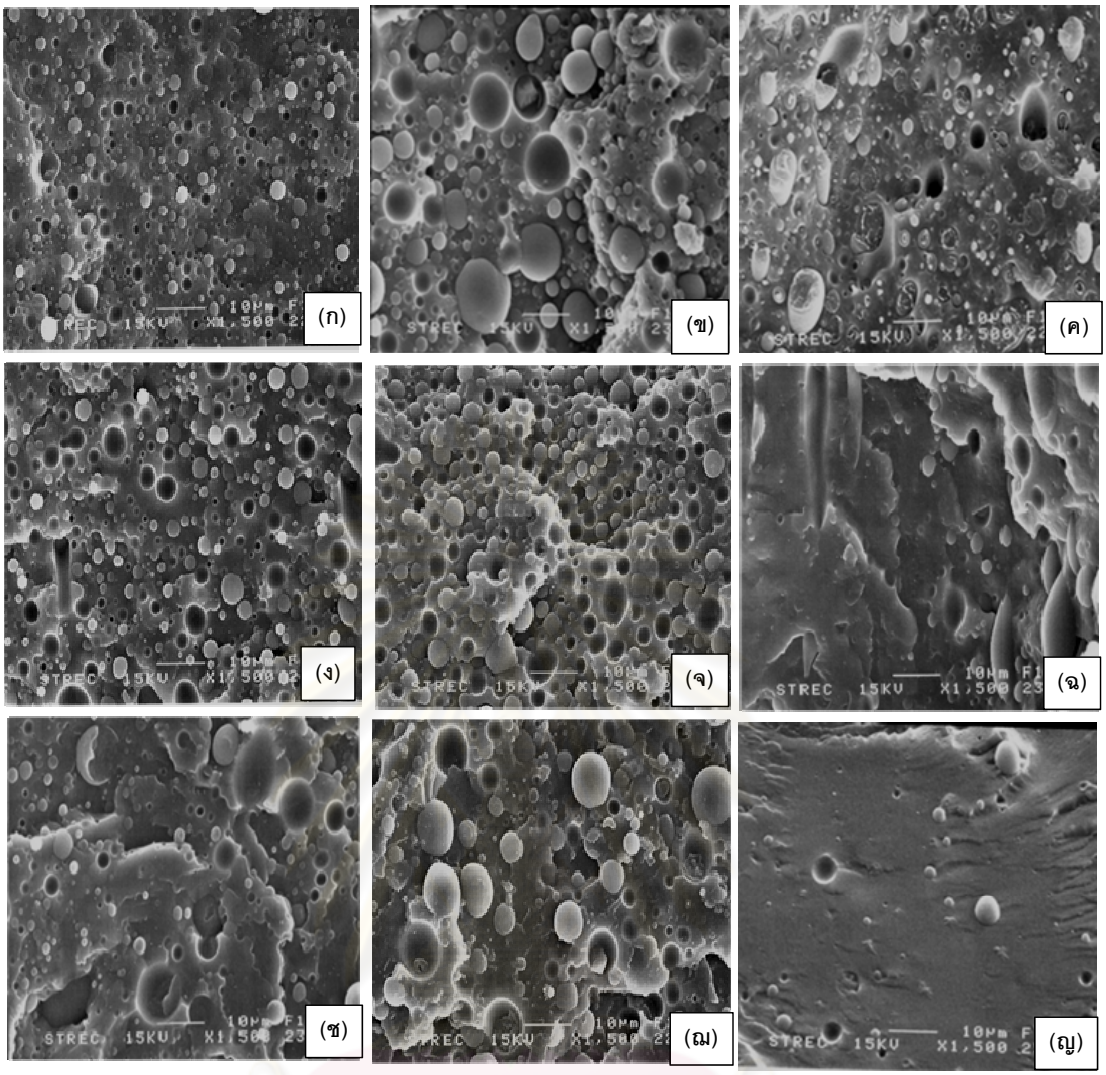


รูปที่ 4.16 การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารช่วยผสมเป็น 3 5 และ 10 phr

จากการทดสอบพบว่า พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอคที่มีความทนแรงดึงที่จุดขาดมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสม โดยพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณสารช่วยผสม 5 phr และปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม มีความทนแรงดึง ณ จุดขาดมากที่สุด

4.3.2 สัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสมและเทคนิคที่ใช้ในการผสม แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสมและเทคนิคในการผสม (ก) 3 phr ของ PP-g-MA ทางการค้า (ข) 5 phr ของ PP-g-MA ทางการค้า (ค) 10 phr ของ PP-g-MA ทางการค้า (ง) 3 phr ของ DCP 0.6% (จ) 5 phr ของ DCP 0.6% (ฉ) 10 phr ของ DCP 0.6% (ช) 3 phr ของ DCP 2.0% (ฌ) 5 phr ของ DCP 2.0% (ญ) 10 phr ของ DCP 2.0%

จากการทดสอบพบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของสารผสมเมื่อปริมาณสารผสมเป็น 3 – 5 phr ขนาดของเฟสพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดี แต่ที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr เฟสของพอลิโพรพิลีนจะพบช่องว่าง ซึ่งเกิดจากการหลุดออกของเฟสของพอลิโพรพิลีนระหว่างการเตรียมชิ้นทดสอบมากกว่าที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 5 phr ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่อัตราส่วนนี้มีค่าต่ำกว่า และที่ปริมาณของสารช่วยผสมเท่ากับ 10 phr สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะแสดงลักษณะที่เป็นเฟสเชื่อมกัน และเห็นเฟสของพอลิโพรพิลีนกระจายอยู่เล็กน้อย

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม พบว่าที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr เฟสของพอลิโพรพิลีนขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดี เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มเป็น 5 phr เฟสของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีร่องรอยการหลุดออกของเฟสพอลิโพรพิลีน และที่ 10 phr ของปริมาณสารช่วยผสม พบว่า ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนดังกล่าวมีลักษณะที่เรียบ และมีการกระจายตัวของเฟสพอลิโพรพิลีนเพียงเล็กน้อย

4.3.3 **เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค** TGA

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารช่วยผสม เทคนิคที่ใช้ในการผสม และอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว เมื่อได้รับความร้อน แสดงไว้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารช่วยผสม และวิธีในการผสม

ปริมาณสารช่วยผสม (phr)	สารช่วยผสมทางการค้า	พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 0.6 wt%	พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 2.0 wt%
0	321	-	-
3	325	325	321
5	324	329	323
10	323	330	328

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 และ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสมมีอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวเพิ่มมากขึ้นและมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ทั้งนี้อาจเนื่องมากจากการที่ปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้นจะช่วยทำให้พอลิโพรพิลีนกระจายตัวในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ดีขึ้น โดยพอลิโพรพิลีนมีอุณภูมิในการเริ่มสลายตัวเท่ากับ 438 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ซึ่งมีค่าประมาณ 320 องศาเซลเซียส เมื่อเฟสพอลิโพรพิลีนมีการกระจายตัว

ที่ดีขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ทั้งระบบมีความทนความร้อนเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมจึงเพิ่มมากขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง พอลิเมอร์ผสมที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสม กับพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 และ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 ต์โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม มีอุณหภูมิการเริ่มสลายตัวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสมที่เท่ากัน

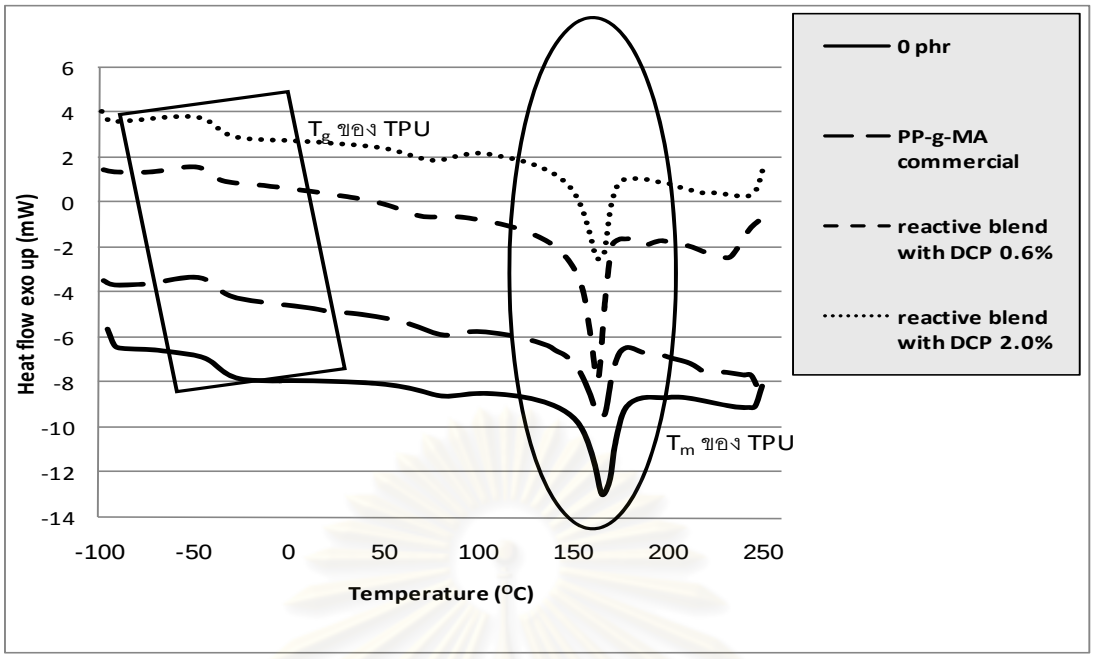
4.3.4 **สมบัติทางความร้อนจากเทคนิค** DSC

DSC thermograms ของพอลิเมอร์ผสม ที่ปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน 3 5 และ 10 phr เมื่อใช้เทคนิคในการผสมต่างๆกัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารช่วยผสม

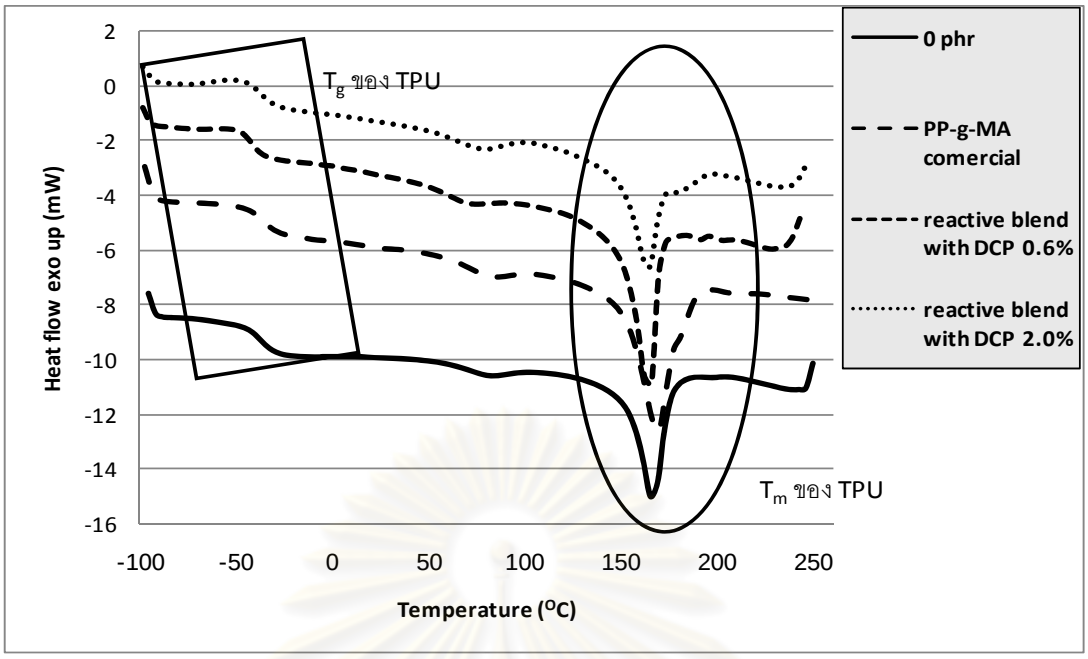
ปริมาณสารช่วยผสม (phr)	อุณหภูมิหลอมเหลว (^{O}C)		
	สารช่วยผสมทางกาค้า	ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 0.6 wt%	ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 2.0 wt%
0	165.9	-	-
3	164.2	161.8	163.2
5	168.8	163.0	163.5
10	165.9	162.9	167.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr

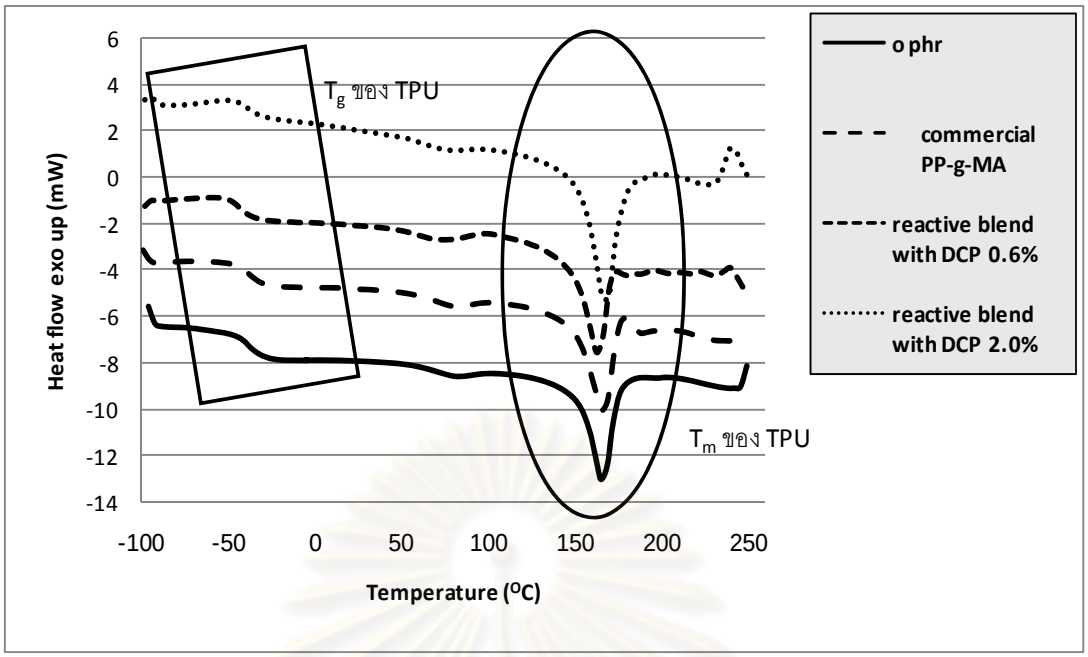
เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมไม่ต่างกันมากนัก กล่าวคือ พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมทางการค้ามีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -38.10 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่มีปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม ซึ่งมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -36.96 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -41.21 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด โดยเมื่อพอลิเมอร์มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำสายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้ดี ส่งผลให้มีการดึงยืดที่ดี ส่วนอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ทั้งสามไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.19 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 5 phr

เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของสารช่วยผสมเท่ากับ 5 phr พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมทางการค้ามีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -35.75 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ ที่ใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม ซึ่งมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -37.20 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -41.88 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการทดสอบทางด้านแรงดึง ส่วนอุณหภูมิหลอมเหลวนั้น พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสมมีอุณหภูมิหลอมเหลวมากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

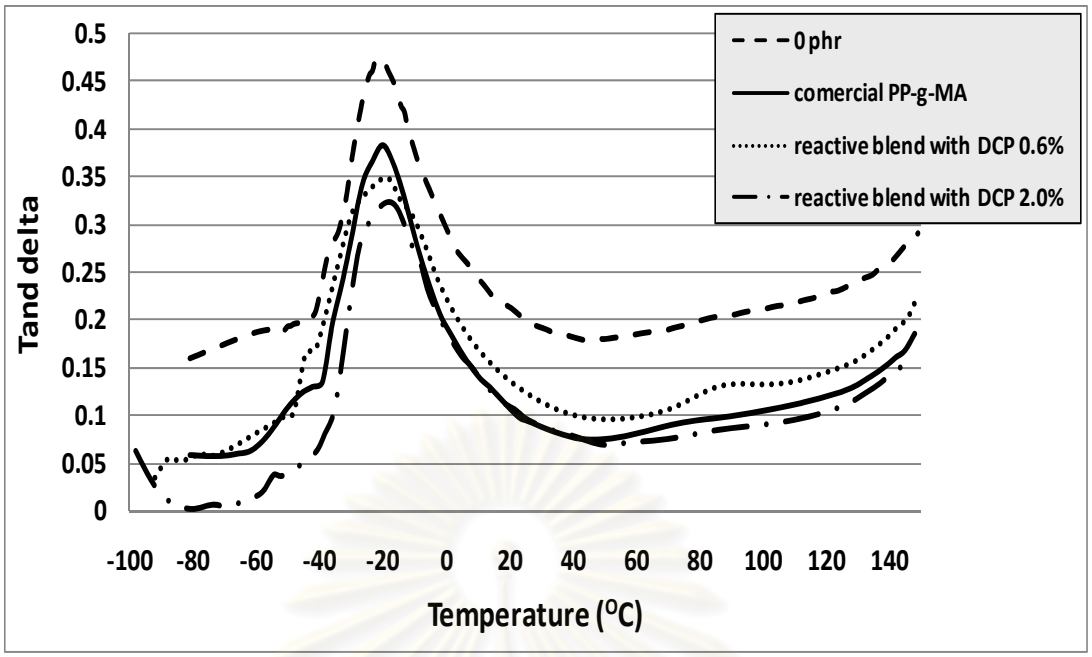


รูปที่ 4.20 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 10 phr

เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของสารช่วยผสมเท่ากับ 10 phr พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมทางการค้ามีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -36.87 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมแบรีแอกทีฟ ที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม ซึ่งมีค่าเท่ากับ -38.05 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -41.73 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการทดสอบทางด้านแรงดึง ส่วนอุณหภูมิหลอมเหลวนั้น พบว่าพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักมีอุณหภูมิหลอมเหลวมากที่สุดเท่ากับ 167.09 องศาเซลเซียส

4.3.5 **สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมจากเทคนิค** DMA

ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสม 3 phr เมื่อใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสม และเมื่อใช้เทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟที่ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 และ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม แสดงไว้ในรูปที่ 4.21

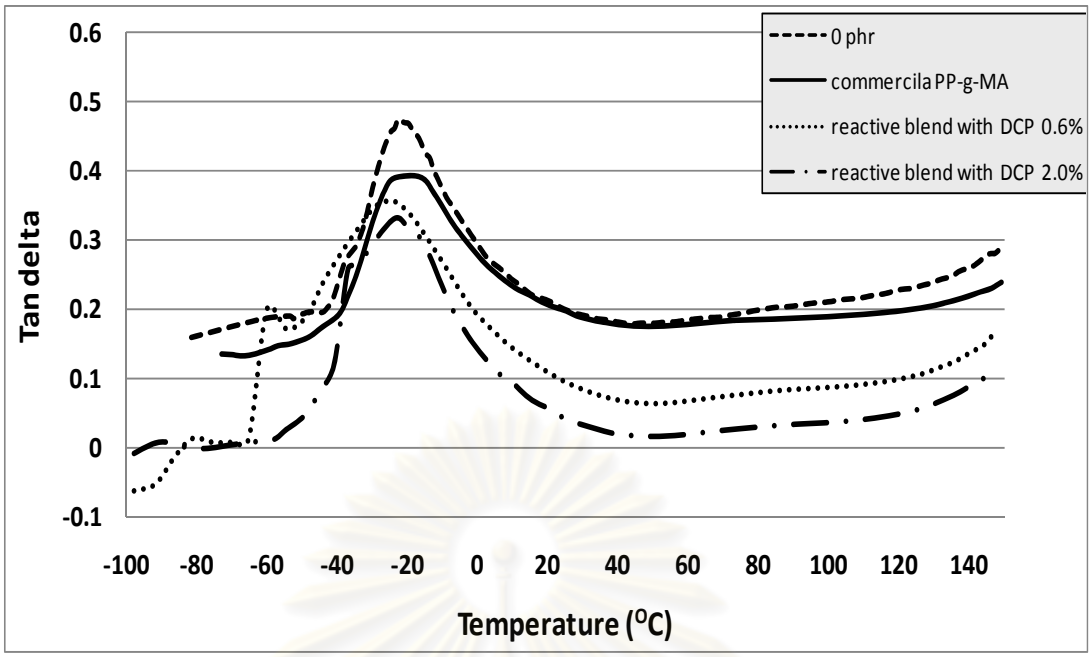


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta `กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม
ที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr

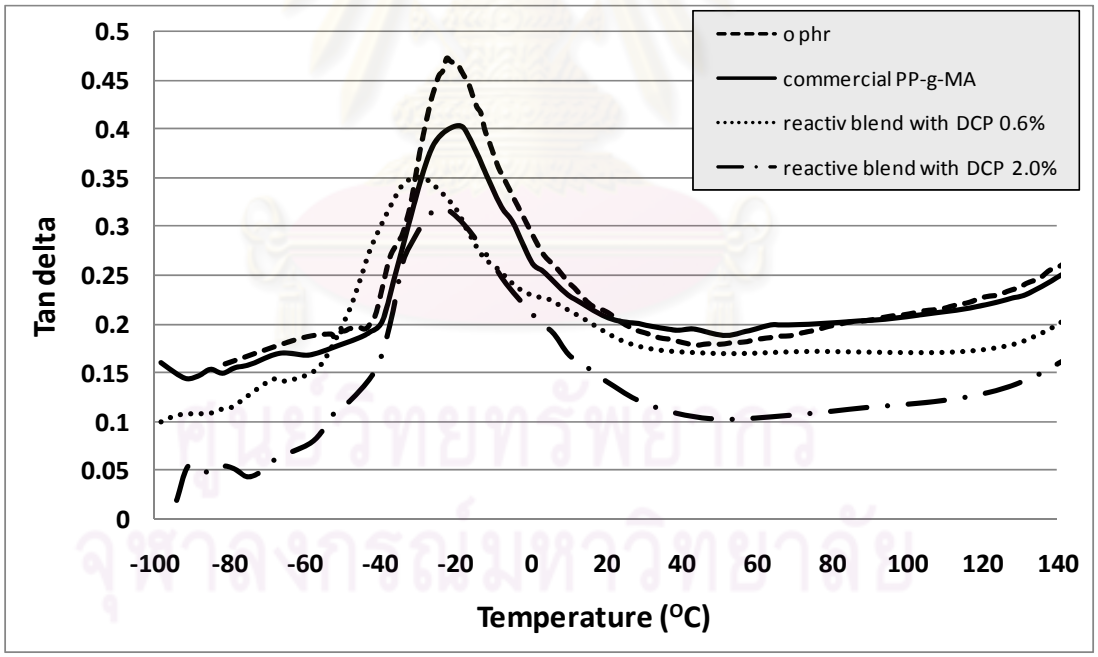
จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสม 3 phr ของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีค่าใกล้กัน และมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่สารช่วยผสม

ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณสารช่วยผสม 5 และ 10 phr ทั้งที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสมและที่ใช้เทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟโดยใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 และ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta `กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม
ที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 5 phr



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan delta `กับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม
ที่ปริมาณสารช่วยผสมเท่ากับ 10 phr

จากการทดสอบพบว่า tan delta ของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสมจะมี

อุณหภูมิกลาส ทรานซิชันสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ และพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเทคนิค DSC

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน แสดงลักษณะความเข้ากันไม่ได้ (immiscible blend) อย่างชัดเจน โดยพิจารณาได้จากการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเป็นสองเฟส และไม่แสดงการยึดเกาะกันระหว่างเฟสต่อเนื่องและดิสเพอร์สเฟส ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าต่ำ และเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มที่จะมีความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การยืดตัวที่จุดขาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนกำลังเปลี่ยนจากการเป็นดิสเพอร์สเฟสกลายเป็นเฟสต่อเนื่องนั่นเอง จากการพิจารณาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสมพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดจึงเลือกนำมาใช้ในการทดลองขั้นต่อมา

เมื่อเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมพบว่า พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น ทั้งนี้พิจารณาได้จากการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด โดยเมื่อเติมสารช่วยผสมในปริมาณที่มากขึ้น อนุภาคของพอลิโพรพิลีนซึ่งมีขนาดเล็กลง และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม โดยเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมมากขึ้น สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มดีขึ้น และเมื่อใช้วิธีการผสมแบบรีแอกทีฟประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้ากันได้ยิ่งดีขึ้นอีก พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ผสมด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสม มีความทนแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้และไม่ใช้สารช่วยผสมอื่นๆ แต่เมื่อปริมาณของสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนดังกล่าวจะมีสมบัติเชิงกลลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลของการที่พอลิโพรพิลีนเกิดการสลายตัว (degradation) และพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมด้วยวิธีการผสมแบบรีแอกทีฟ มีการยึดตัวที่จุดขาดที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้และใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนทางการค้าเป็นสารช่วยผสม

ผลจากการศึกษาอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมพบว่า เมื่อปริมาณพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่วนการใส่สารช่วยผสมทางการค้า ไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมทางการค้ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิโพรพิลีน และอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมทางการค้าและพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้สารช่วยผสม

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันจากเทคนิค DSC และ DMA พบว่าเมื่อปริมาณสารช่วยผสมทางการค้าเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มมากขึ้น และพบว่าที่ปริมาณของสารช่วยผสมเท่ากับ 3 phr พอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของสารช่วยผสมมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำที่สุด และที่ 5 และ 10 phr พบว่าพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟที่ใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำที่สุด ซึ่งเมื่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีค่าต่ำ สายโซ่พอลิเมอร์จะสามารถเคลื่อนตัวได้ง่าย ส่งผลให้มีความทนแรงดึงที่ดี การยืดตัวที่จุดขาดมีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมทางการค้าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยผสมที่เท่ากัน พอลิเมอร์ผสมที่ผสมด้วยเทคนิคต่างกัน มีอุณหภูมิการหลอมเหลวไม่ต่างกันมากนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสมที่มีผลต่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดรีสกรูคู่ในการผสมพอลิเมอร์ผสม ซึ่งอาจใช้เครื่องผสมแบบอื่นๆเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมได้

5.2.2 สามารถศึกษาชนิดของสารช่วยผสมอื่นๆ โดยเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสมระหว่างกระบวนการผสม และการผสมพอลิเมอร์ผสมแบบรีแอกทีฟ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Ma, E.C. Thermoplastic Polyurethane Elastomers. Walker B.M.; and Rader C.P., Handbook of Thermoplastic Elastomers, 224-255. New York : Van Nostrand Reinhold, 1988.

[2] Hegde. R.R., Dahiya. K.A., Polymer crystallinity [online]. Available from http:// www.engr.utk.edu/…/Polymer%20Crystallinity.htm [2009,January 10]

[3] พร้อมภูมิ พันธุ์วิโรจน์ และสริญญา รัตนกิจโกศล การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีน.รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[4] Schollenberger C.S. Thermoplastic Polyurethane Elastomers. Bhowmick A.K.; and Stephens H.L., Handbook of Elastomers, 387-416. London : CRC Press, 2000.

[5] Polymer Science Learning Center. Polymer crystallinity [online]. Available from http://www.pslc.ws/macrogoss/intro.html, [2009,January 10]

[6] ปรีชา พหลเทพ. โพลิเมอร์(high polymers). 500. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง,2546

[7] ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล. พอลิเมอร์เบื้องต้น 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2546.

[8] Isotactic polypropylene. Available from http://www.chem.latech.edu/~hji/polymer/14oct09/14oct09.htm. [2009, January 10]

[9] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์.เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2527

[10] Walter, W. Handbook of Organic Chemistry. England :Prentice hall Europe, 1996.

[11] Institute of Applied Synthetic Chemistry. Available from http:/octeh7.tuwien.ac.at/Reaktiv_sk_e.html. [2009, January 10]

[12] Shi, D.,Yang. J., Yao. Z., Wang. Y., Suang. H., Jing. W., Yin. J., Costa. G., Functionalization of isotactic polypropylene with maleic anhydride by reactive extrusion: mechanism of melt grafting. Polymer 42 2001 : 5549-5557.

[13] Sigma - Aldrich Co. Reproduction of any materials from the site is strictly forbidden without permission [online]. Available from http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=20202945 [2009, January 14]

[14] miscible polymer blends. Polymer Science Learning Center, Department of Polymer Science, University of Southern Mississippi. Available from http:/pslc.ws/mactest/iblend.htm [2009, January 14]

[15] สุชาดา จงประกอบของ.การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการแบบสารละลายเพื่อใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิเอไมด์ 6.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548

[16] Paul, D.R., and Bucknall, C.B.Polymer Blends volume 1. Formulation, New York : John Wiley & sons,2000.

[17] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. พอลิเมอร์ผสม (polymer blend) [online]. Available from http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_5_2548_polymer_blend.pdf [2009, January 16]

[18] บรรเลง ศรนิล.เทคโนโลยีพลาสติก.1000. 17.กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2548

[19] extruder. Available from http://www.extrudex.de/01Helibar/Verfahrenseinheit-Eng.gift [2009, January 16]

[20] สุภโชค ตันพิชัย.พอลิเมอร์ผสมจากผงพอลิโพรพิลีนและขวดเพตใช้แล้วที่บดด้วยเทคนิคพัลเวอไรเซชัน.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548

[21] แม้น อมรสิทธ์.วัสดุวิสวกรรม-Principles of Materials Science and Engineering. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท๊อป จำกัด, 2547.

[22] Tadmor, Z., and Gogos C.G. Principles of Polymer Processing. Singapore : John wiley & sons,1979.

[23] DUMBELL CO., LTD. Super bumbell cotters abailable [extracted] list of corresponding standards [online]. Available from http://www.1.odm.ne.jp /aal63880/CUTTER01-E.htm [2009, January 20]

[24] stress-strain curve. Available from http://www.scudc.scu.edu/cmdoc/dg_doc/ Develop/material/property/a2200002.htm. [2009, January 20]

[25] National Science Foundation's Division of Undergraduate Education. Available From http://www.lasalle.edu/academ/chem/polymersRus/Resources/Mechanical. htm [2009, January 20]

[26] American Nation Standard. ASTM D638-03 Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. 2004.

[27] จินตมัย สุวรรณประทีป.การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),2546

[28] Blaga., A. Properties and behabiour of Plastics [online]. Available from http://irc. -cnrc.gc.ca/images/cbd/157f02e.gif [2009, January 20]

[29] Price. D.. Available from http://www/anasys.co.uk/library/dma1.htm [2009, January 21]

[30] Grand Central Avenue Glendale. Delsen Testing Laboratories [online]. Available from http://www.sithiphorn.com/newweb/newsletter/18-5-2005-1116391425.pdf [2009,January 21]

[31] ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล.การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง,2545.

[32] Differential Scanning Calorimetry Polymer Science Learning Center, Department Of Polymer Science, University of Southern Mississippi. Available from http://pslc.ws/macrogcss/dsc.html [2009, January 22]

[33] DSC thrmograms. Available from http://www.pslc.ws/Macrogoss/intro.html. [2009,January 10]

[34] AC compacting LLC. Available from http://www.accompacting.com/html/ci/Microbalance.html. [2009, January 22]

[35] F.Krumeic. inorganic chemistry [online].Available from http://www.microscopy.ethzCh/sem.htm. [2009, January 23]

[36] Ajili, S. H., Ebrahimi, N. G., Khorasani, M. T. Study on thermoplastic polyurethane/ polypropylene (TPU/PP) blend as a blood bag . Iranian Polymer Journal 2003 :179 - 184.

[37] Bajsic, E.G. and Rek,V .Dynamic mechanical study of thermoplastic polyurethane/ Polypropylene blends.e-polymer 2004 : 1-10.

[38] Wallheinke, K., Heckmann, W.,Potschke, P., Stutz, H. Localizing Compatibilizers In Immiscible Blends by SEM. Polymer Testing 1997 : 247 – 255.

[39] Tang, T., Jing, X., Huang, B.Studies on Compatibilization of Polypropylene/ Thermoplastic Polyurethane Blends an Mechanism of Compatibilization. J. Macromol. SCI.PHYs 1994 : 287 -305.

[40] Lu, Q. W., Macosko, C. W., Horrion, J. Compatibilized blends of thermoplastic polyurethane (TPU) and polypropylene. Macromolecular Symposia 2003 : 221 – 232.

[41] Paglicawan, M. A., Balasubramanian, M., Zhang, Z. X., Kim, J. K. Waste PU/PP blends with improved technological properties. Polym.-Plast. Technol.Eng 2008 :47 – 52.

[42] Bajsic, E.G.,Smit, I., Leskovac, M.Blends of Thermoplastic Polyurethane and Polypropylene. I. Mechanical and Phase Behavior.Wiley InterScience 2006 : 3980 -3985.

[43] Ajili, S. H., Ebrahimi, N. G., Khorasani, M. T. Study on thermoplastic polyurethane/ polypropylene (TPU/PP) blend as a blood bag material. J, Appl.polymer. Sci 2003 :2496 – 2501

[44] รติรัตน์ สินวีรุทัย. การศึกษาสมบัติภายใต้แรงดึง โครงสร้างและความทนต่อสารเคมีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิไดเมทิลไซโลเซน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,2544

[45] Di, Y. L., Kang, M. Q., Zhao, Y. H., Yan, S. R., Wang, X. K. Morphology and mechanical properties of blends of thermoplastic polyurethane and polyolefins. J.Appl.Polym. Sci 2006 : 875 - 883.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆกัน

1. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 80:20

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	11.78	28.78	997.41
2	10.39	19.60	853.71
3	13.21	25.09	1227.33
4	14.85	20.00	1462.25
5	11.94	30.46	1130.69
Average	12.43	24.79	1134.28
SD	1.68	4.95	231.13
MAX	14.85	30.46	1462.25
MIN	10.39	19.60	853.71
MAX+	2.42	5.67	327.97
MIN-	2.04	5.19	280.57

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 70:30

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	4.49	26.56	236.25
2	5.38	34.41	177.53
3	5.85	55.16	274.44
4	5.77	36.26	478.52
5	5.63	66.80	154.61
Average	5.42	43.84	264.27
SD	0.55	16.58	128.78
MAX	5.85	66.80	478.52
MIN	4.49	26.56	154.61
MAX+	0.43	22.96	214.25
MIN-	0.93	17.28	109.66

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 60:40

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	9.56	96.51	104.03
2	9.12	119.90	126.27
3	8.25	141.06	111.54
4	8.35	89.80	156.29
5	9.66	103.70	222.58
Average	8.99	110.19	144.14
SD	0.66	20.57	48.20
MAX	9.66	141.06	222.58
MIN	8.25	89.80	104.03
MAX+	0.67	30.87	78.44
MIN-	0.74	20.40	40.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 50:50

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	9.89	159.08	32.01
2	13.01	215.03	127.81
3	11.89	125.17	60.79
4	13.11	120.54	84.76
5	8.65	96.84	41.82
Average	11.31	143.33	69.44
SD	1.97	45.82	38.35
MAX	13.11	215.03	127.81
MIN	8.65	96.84	32.01
MAX+	1.80	71.70	58.37
MIN-	2.66	46.49	37.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. พอลิโพรพิลีน

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	32.23	229.57	37.98
2	31.42	246.98	45.63
3	32.24	194.14	37.62
4	33.01	224.22	35.58
5	29.61	125.24	40.57
Average	31.70	204.03	39.48
SD	1.30	47.98	3.87
MAX	33.01	246.98	45.63
MIN	29.61	125.24	35.58
MAX+	1.31	42.95	6.16
MIN-	2.09	78.79	3.90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:3

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	12.06	28.39	1020.07
2	14.14	15.38	1144.74
3	10.27	17.74	873.80
4	12.48	34.25	1121.83
5	12.86	30.62	1069.14
Average	12.36	25.28	1045.91
SD	1.41	8.27	107.66
MAX	14.14	34.25	1144.74
MIN	10.27	15.38	873.80
MAX+	1.78	8.97	98.82
MIN-	2.10	9.89	172.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:5

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	17.21	19.67	1213.88
2	8.28	27.55	613.75
3	11.32	60.00	769.58
4	14.27	23.13	986.32
5	14.44	49.59	933.85
Average	13.10	35.99	903.48
SD	3.41	17.78	226.94
MAX	17.21	60.00	1213.88
MIN	8.28	19.67	613.75
MAX+	4.11	24.01	310.40
MIN-	4.82	16.31	289.72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:10

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	8.77	59.56	240.88
2	11.17	46.71	660.89
3	15.68	40.71	971.04
4	15.24	68.01	900.19
5	7.26	45.48	77.34
Average	11.62	52.09	570.07
SD	3.77	11.31	396.60
MAX	15.68	68.01	971.04
MIN	7.26	40.71	77.34
MAX+	4.05	15.92	400.97
MIN-	4.37	11.39	492.72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 3 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	9.31	26.34	1147.15
2	10.59	14.65	1221.29
3	11.73	25.23	1478.93
4	8.61	21.01	965.15
5	8.74	20.66	1086.21
Average	9.80	21.58	1179.75
SD	1.34	4.61	191.77
MAX	11.73	26.34	1478.93
MIN	8.61	14.65	965.15
MAX+	1.93	4.76	299.19
MIN-	1.18	6.93	214.59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

10. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 5 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	15.84	11.05	1881.13
2	14.78	11.11	1816.60
3	11.23	16.45	1176.15
4	17.49	12.34	1897.42
5	15.34	16.27	1702.29
Average	14.94	13.44	1694.72
SD	2.30	2.71	299.86
MAX	17.49	16.45	1897.42
MIN	11.23	11.05	1176.15
MAX+	2.55	3.01	202.70
MIN-	3.71	2.39	518.57

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 10 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	14.17	18.49	1633.43
2	23.34	26.74	1209.97
3	16.01	18.23	1883.97
4	16.03	15.87	1884.93
5	15.83	17.00	1871.33
Average	17.07	19.27	1696.73
SD	3.59	4.31	292.37
MAX	23.34	26.74	1884.93
MIN	14.17	15.87	1209.97
MAX+	6.27	7.47	188.21
MIN-	2.91	3.40	486.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 3 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	17.48	16.47	1780.35
2	19.63	14.18	1954.60
3	16.96	16.69	1749.51
4	14.45	13.23	1545.34
5	15.17	12.98	1709.28
Average	16.74	14.71	1747.82
SD	2.04	1.77	146.89
MAX	19.63	16.69	1954.60
MIN	14.45	12.98	1545.34
MAX+	2.89	1.98	206.79
MIN-	2.29	1.73	202.48

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

13. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 5 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	14.97	19.67	1563.57
2	11.11	19.70	1060.46
3	11.90	21.38	1177.37
4	9.40	17.76	972.28
5	9.41	16.27	968.15
Average	11.36	18.95	1148.37
SD	2.29	1.97	247.21
MAX	14.97	21.38	1563.57
MIN	9.40	16.27	968.15
MAX+	3.61	2.42	415.20
MIN-	1.96	2.69	180.21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

14. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 เโดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 10 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	9.09	20.75	970.15
2	5.59	23.55	666.35
3	4.58	22.11	551.66
4	7.65	20.32	932.56
5	4.48	23.65	490.42
Average	6.28	22.08	722.23
SD	2.02	1.54	218.89
MAX	9.09	23.65	970.15
MIN	4.48	20.32	490.42
MAX+	2.81	1.58	247.93
MIN-	1.79	1.76	231.81

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

15. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

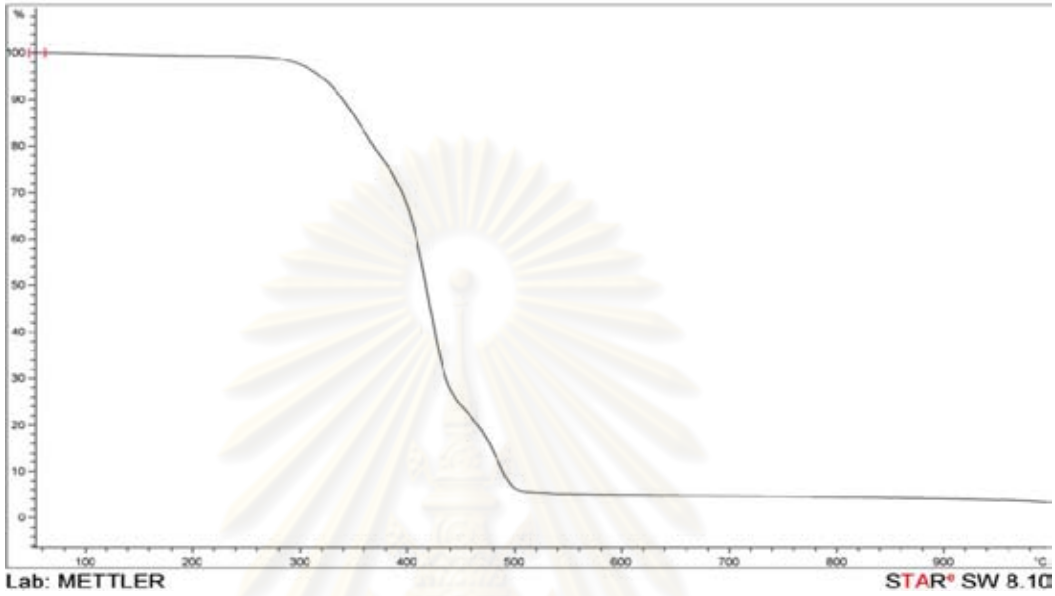
ชิ้นงาน	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสดึง (MPa)	การยืดตัวที่จุดขาด (%)
1	22.57	6.46	1689.64
2	22.26	7.60	1769.30
3	22.60	8.06	1742.32
4	17.52	6.59	1186.81
5	6.88	7.70	459.64
Average	18.37	7.28	1369.54
SD	6.77	0.71	561.82
MAX	22.60	8.06	1769.30
MIN	6.88	6.46	459.64
MAX+	4.23	0.77	399.76
MIN-	11.49	0.82	909.90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

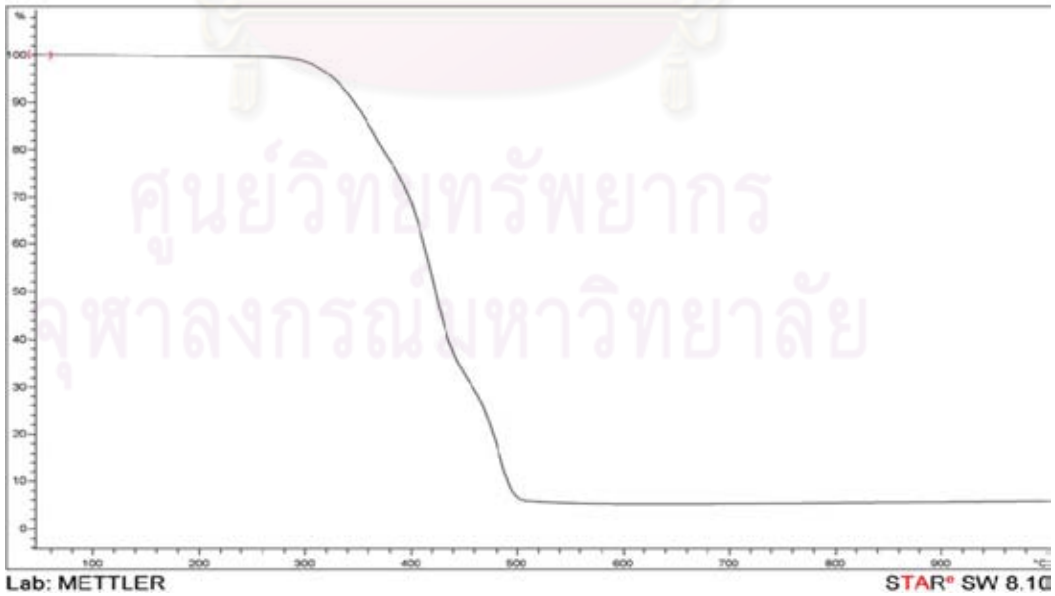
ภาคผนวก ข

TGA Thermogram **ของพอลิเมอร์ผสม**

1. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 80:20

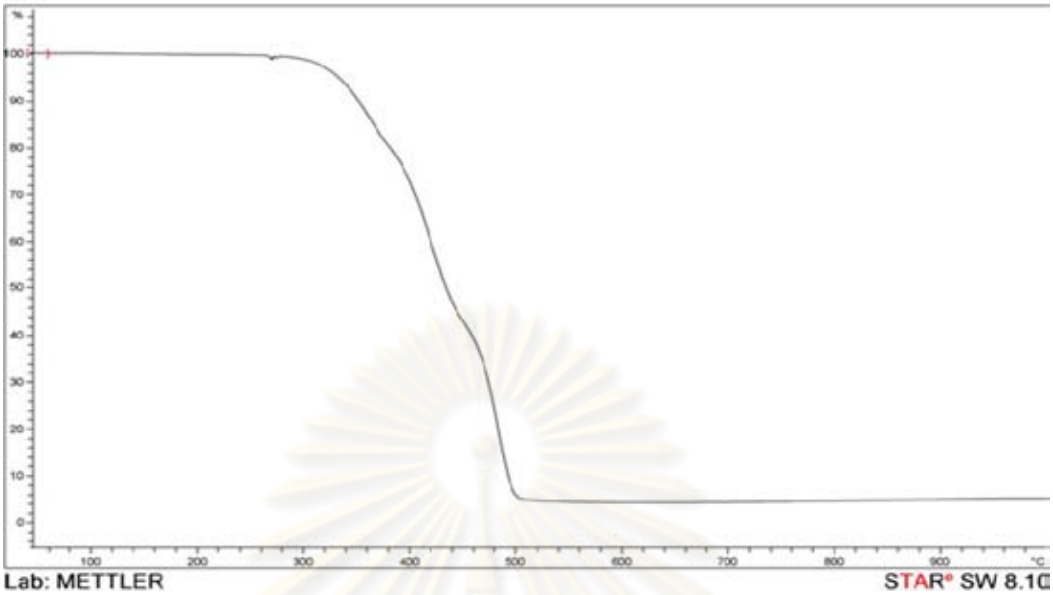


2. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 70:30

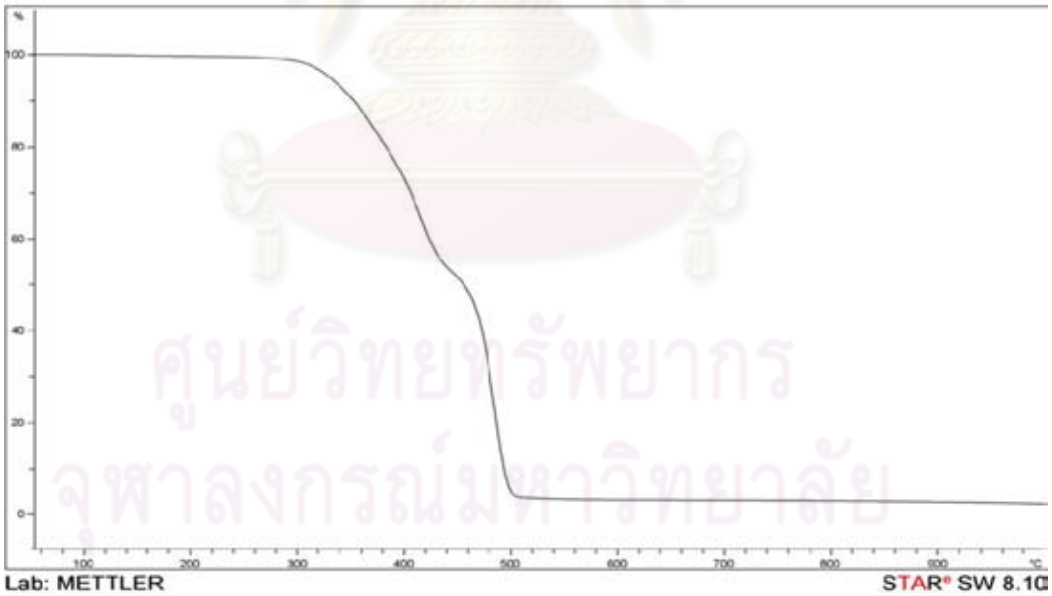


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 60:40

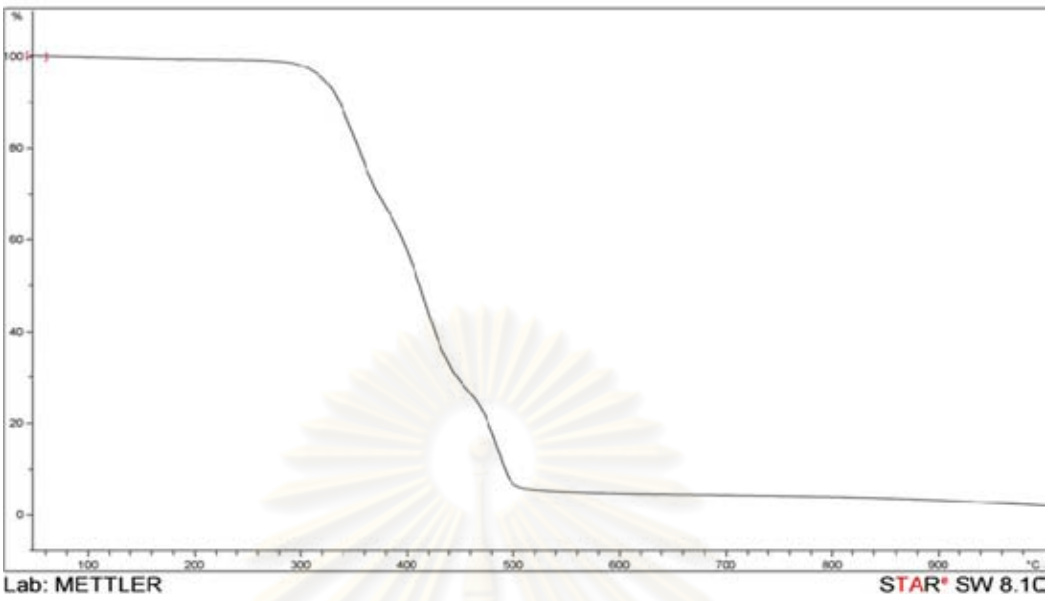


4. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 50:50

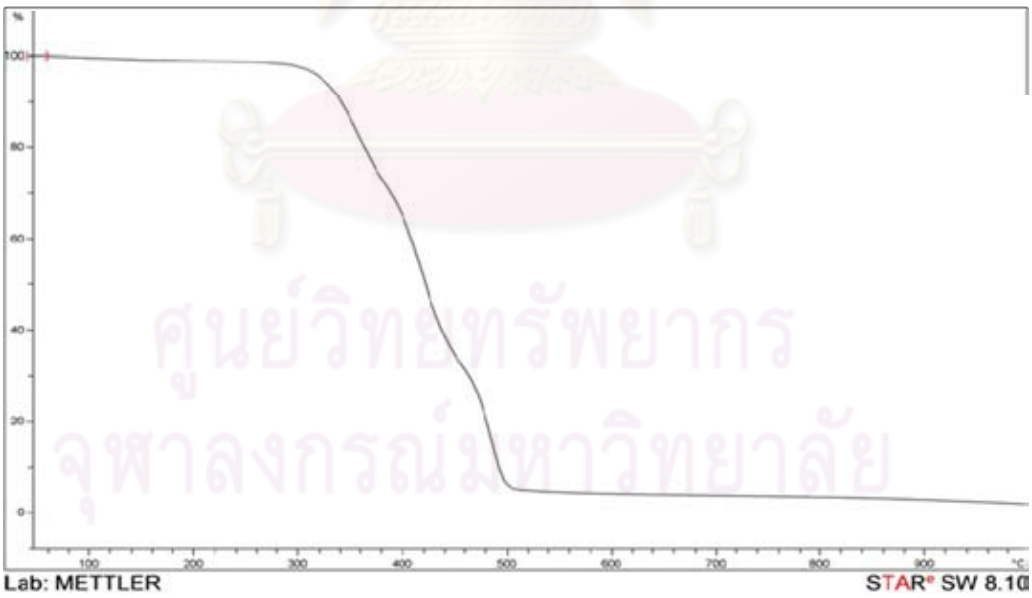


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. พอลิโพรพิลีน

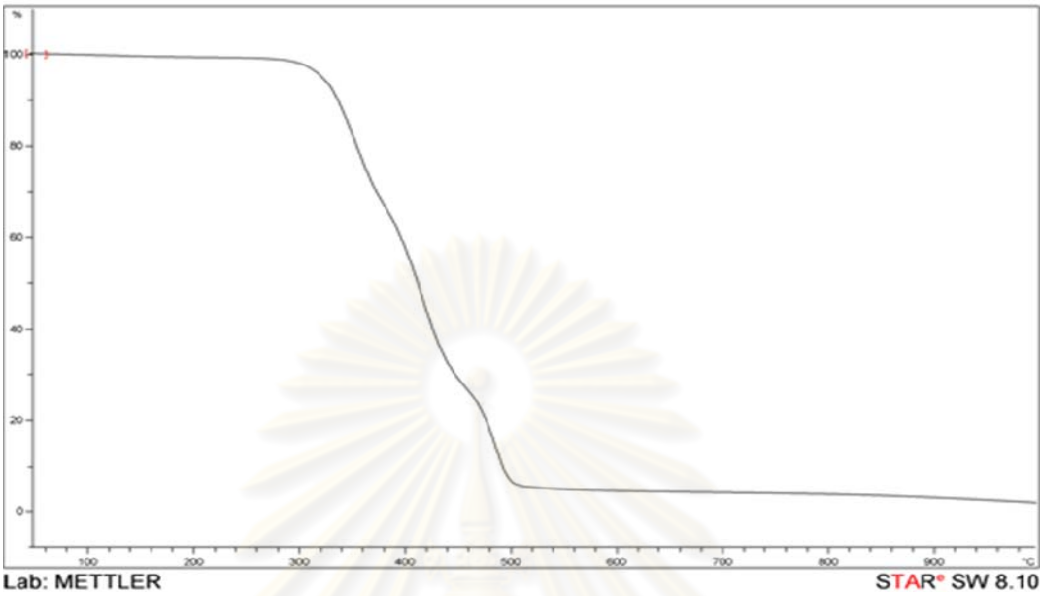


6. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:3

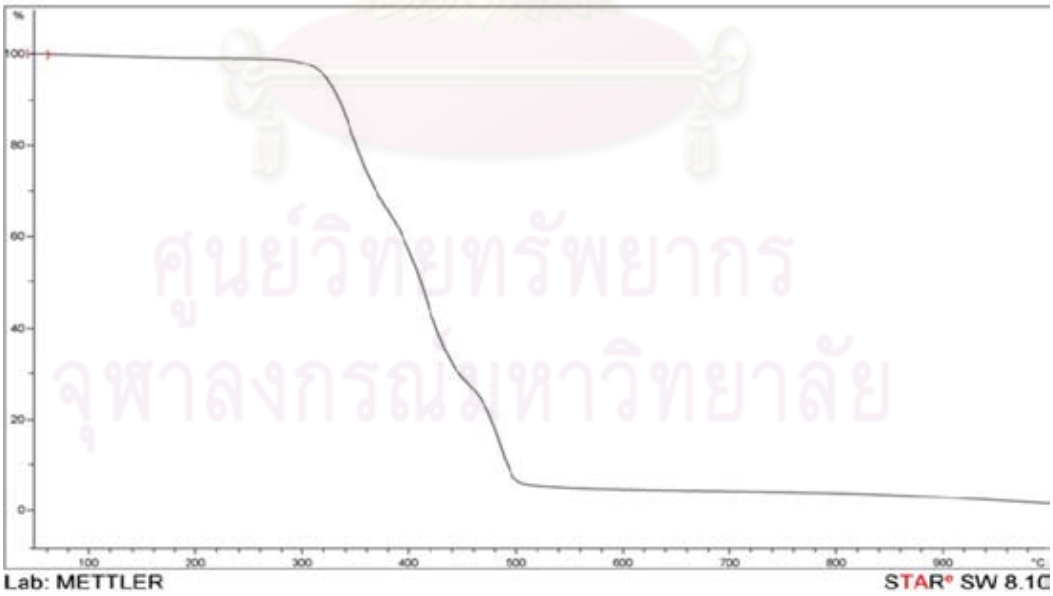


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:5

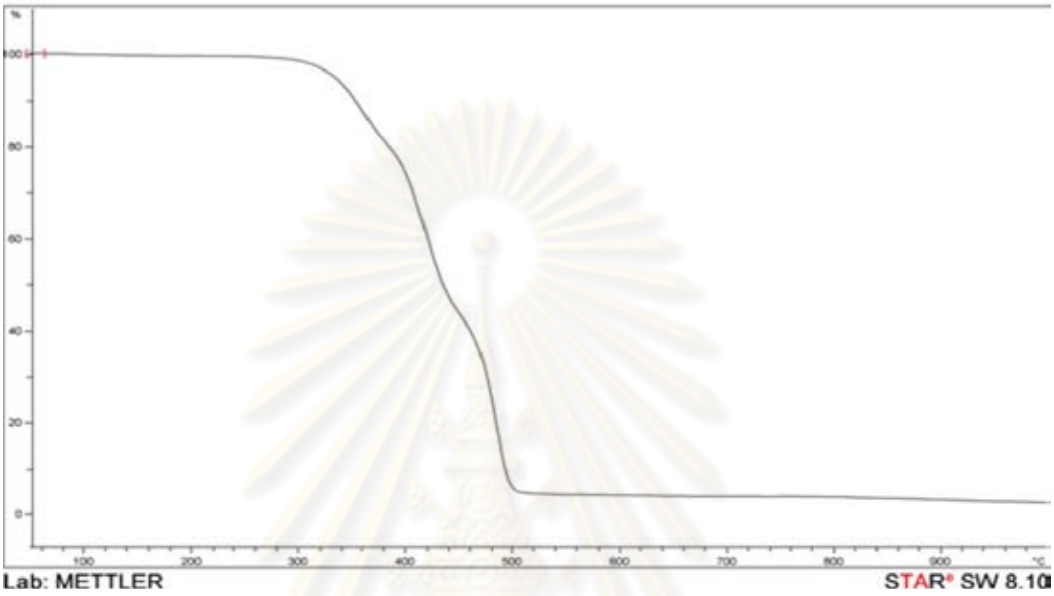


8. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:10

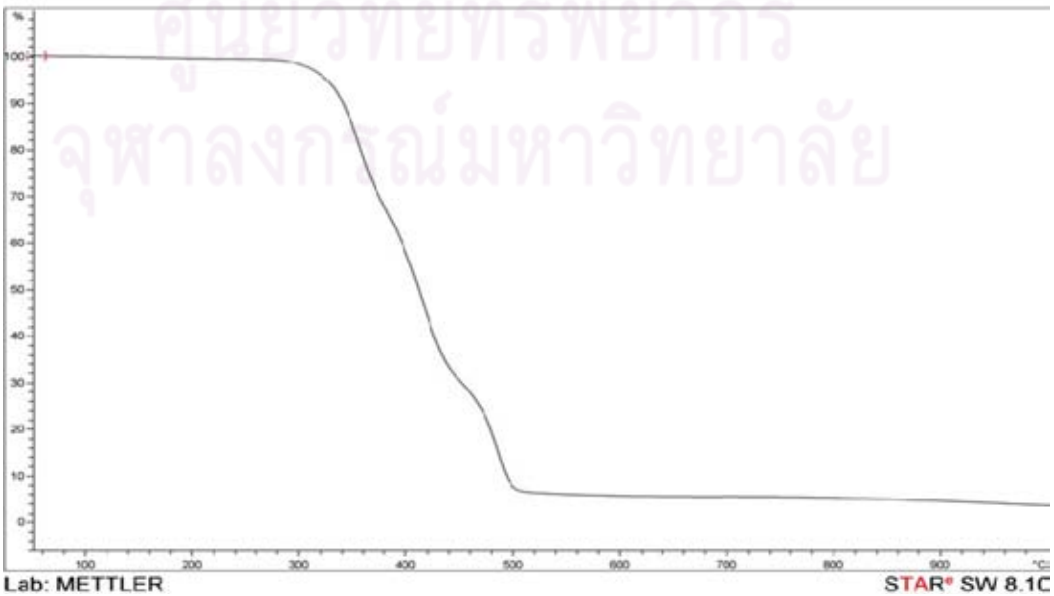


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 3 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

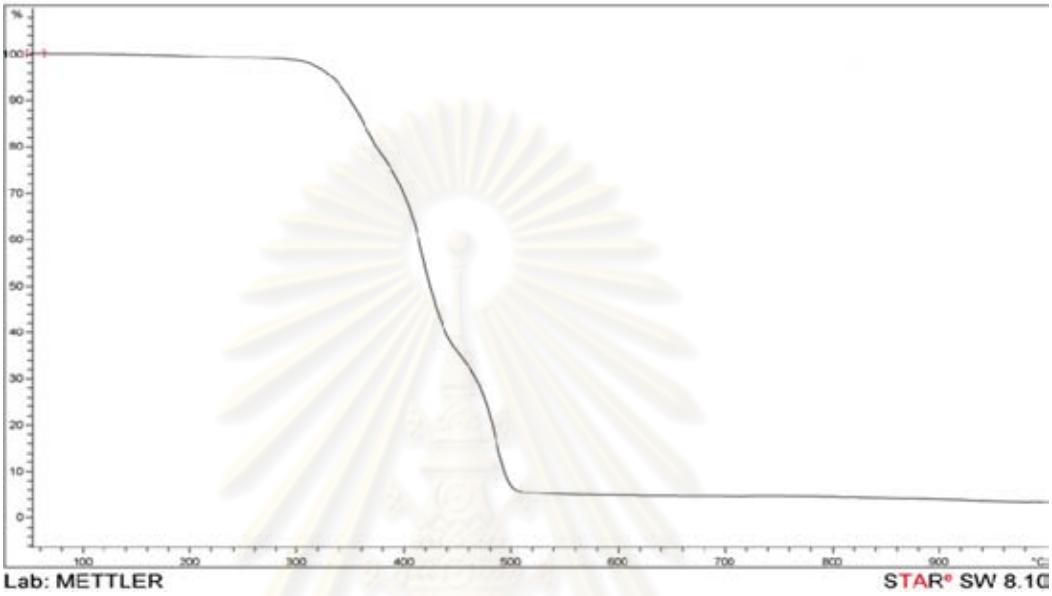


10. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 5 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

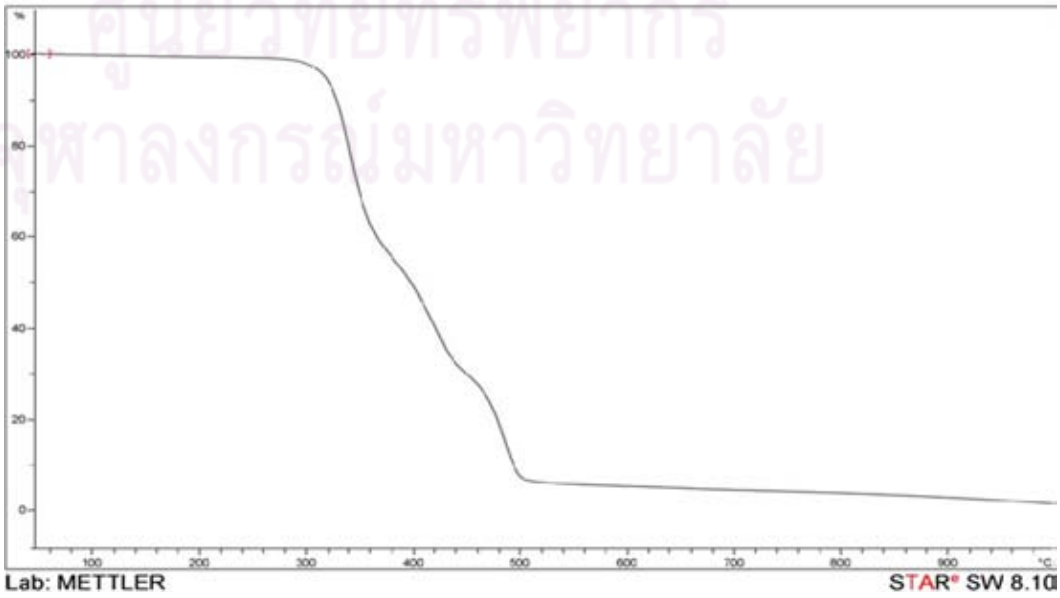


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

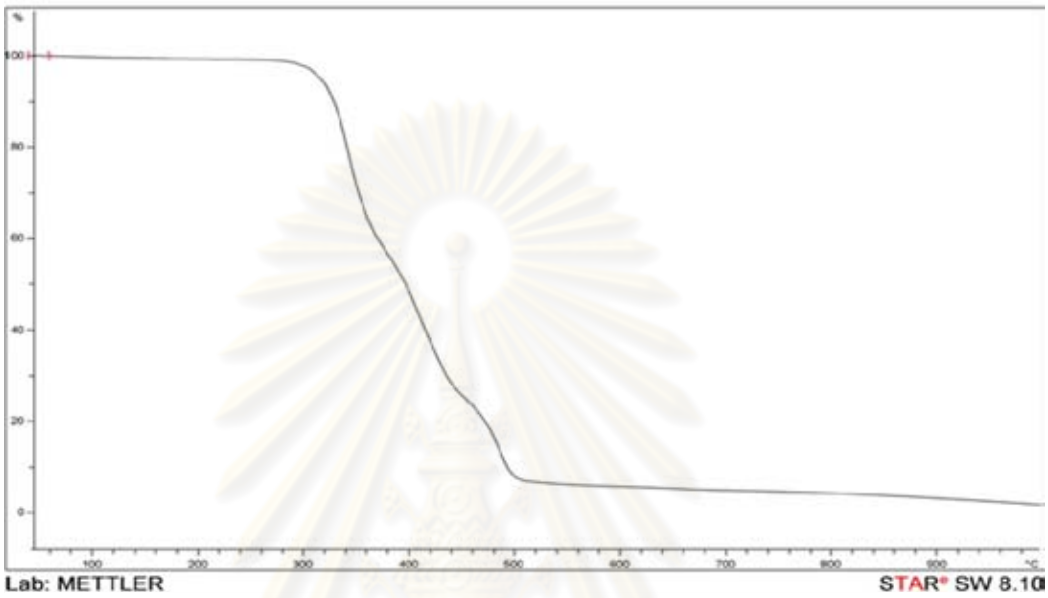
11. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 10 ส่วนในร้อยส่วน (phr)



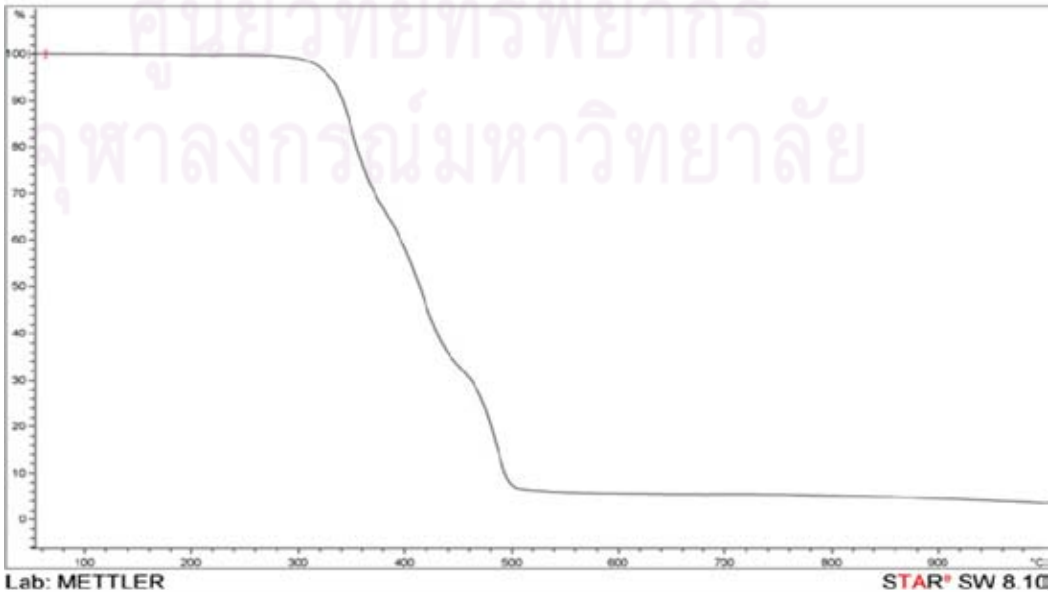
12. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 3ส่วนในร้อยส่วน (phr)



13. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 5 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

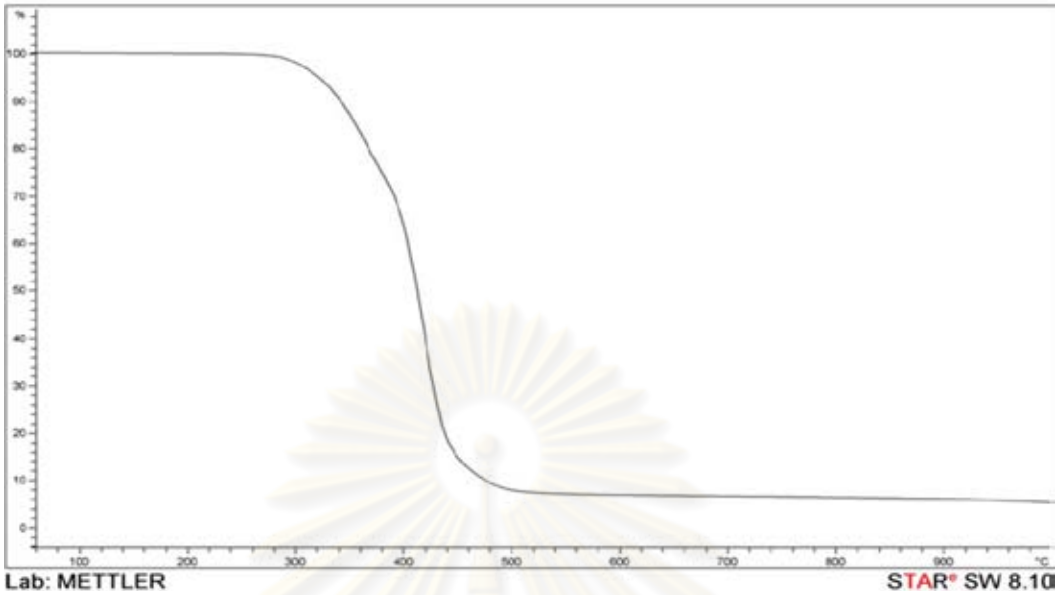


14. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 10 ส่วนในร้อยส่วน (phr)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

15. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

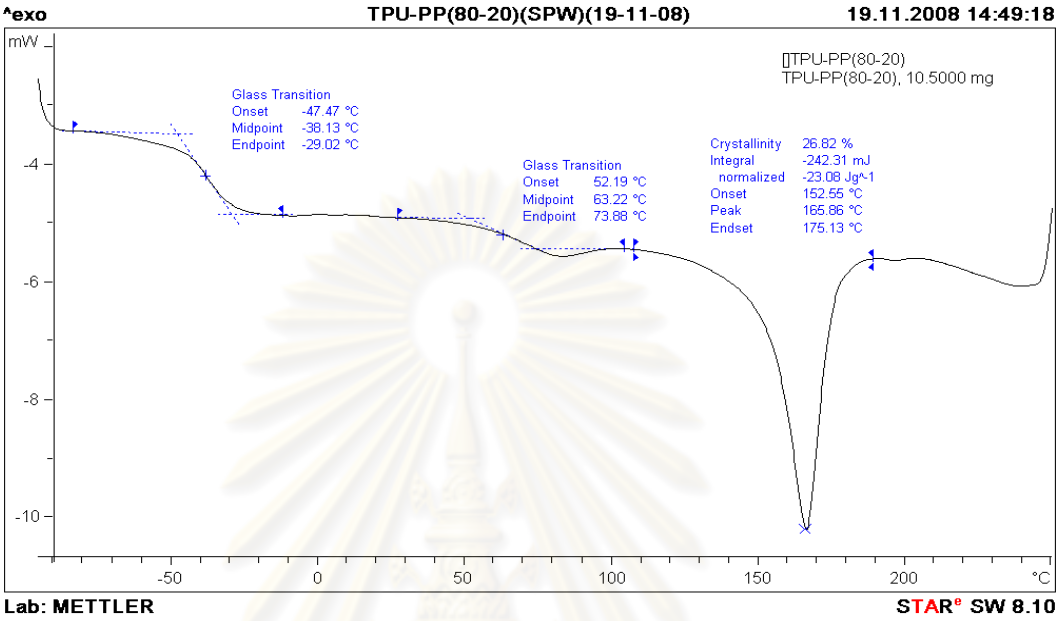


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

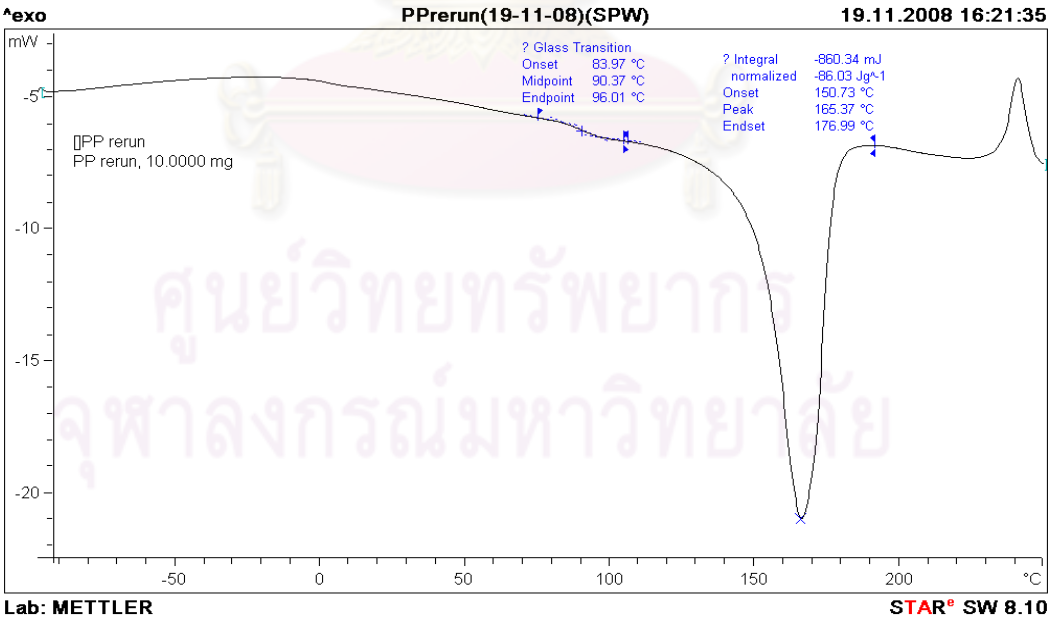
ภาคผนวก ค

DSC Thermogram **ของพอลิเมอร์ผสม**

1. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีน ที่อัตราส่วน 80:20

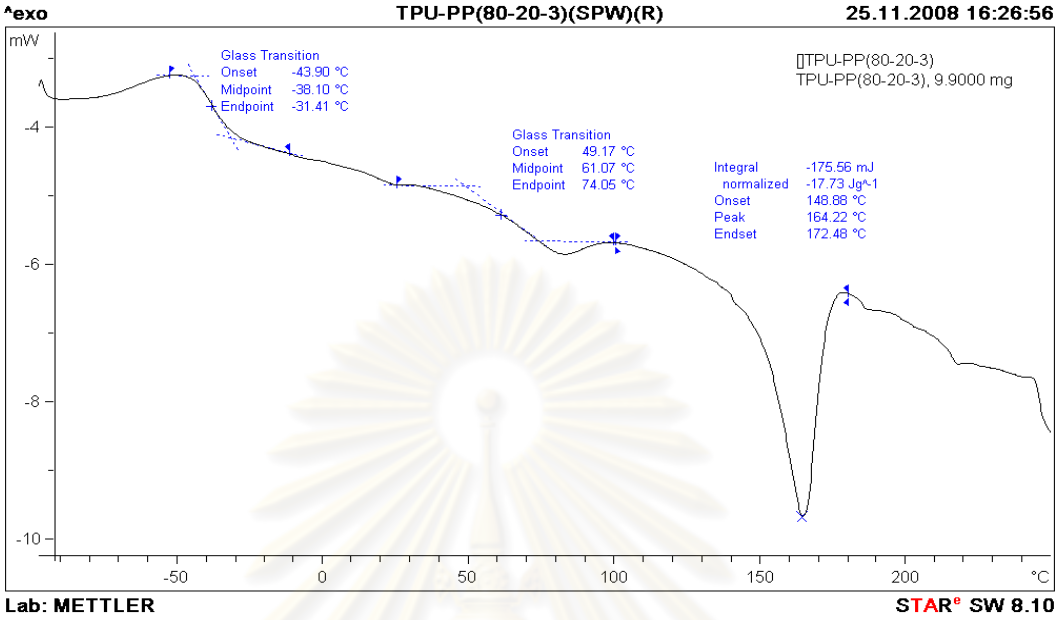


2. พอลิโพรพิลีน

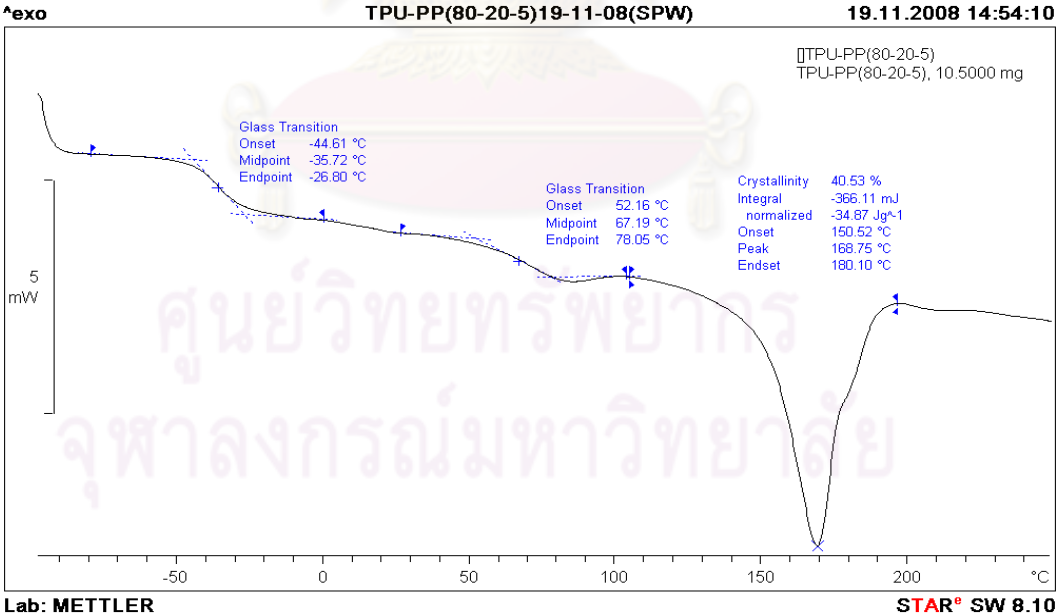


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:3

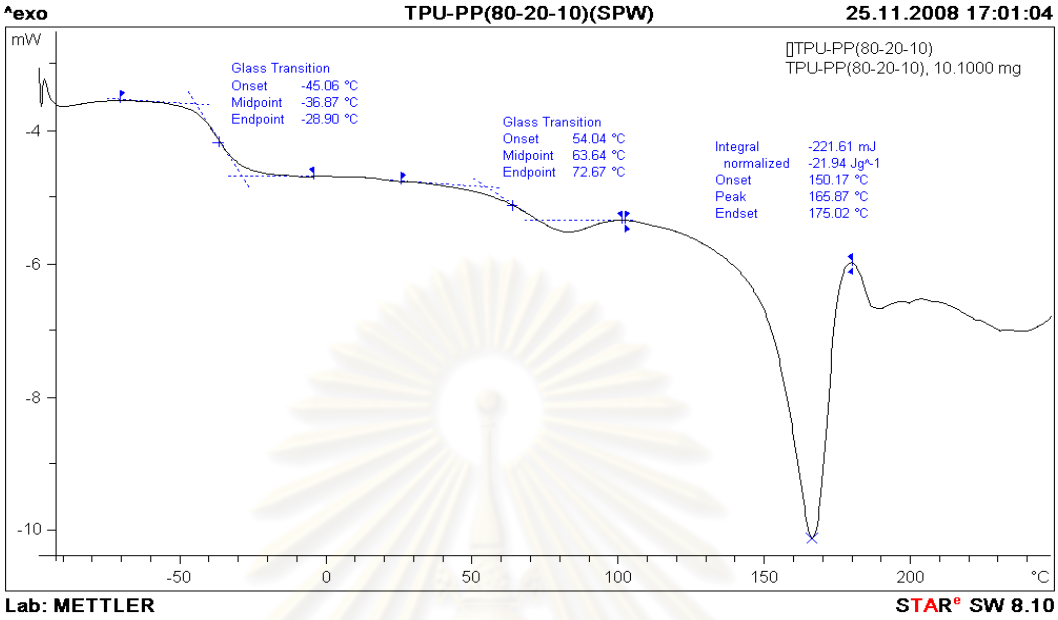


4. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:5

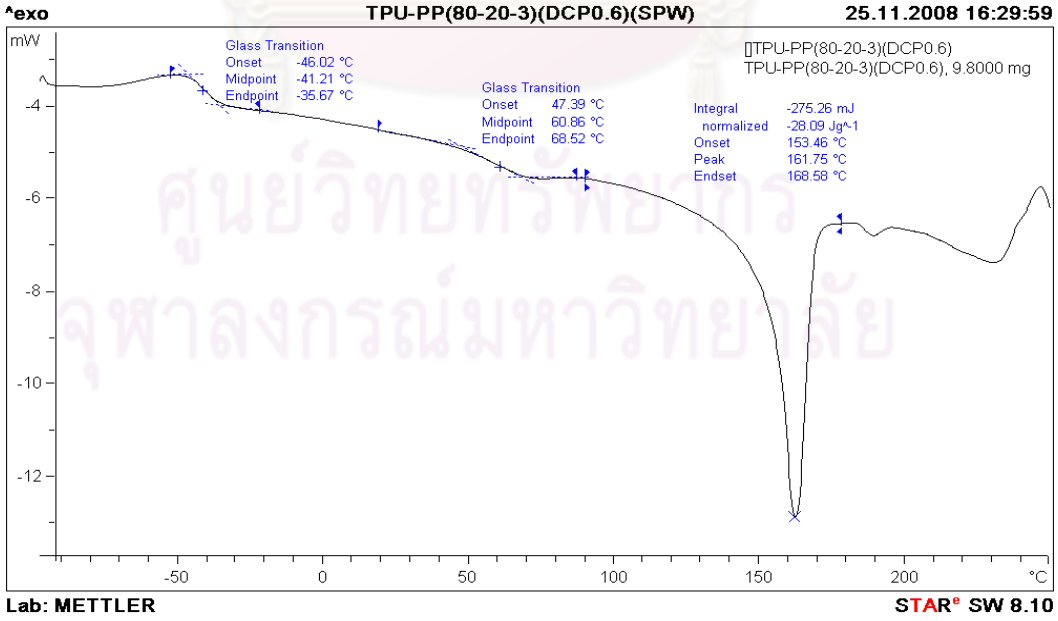


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน และ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกต์แอนไฮไดรด์ทางการค้า ที่อัตราส่วน 80:20:10

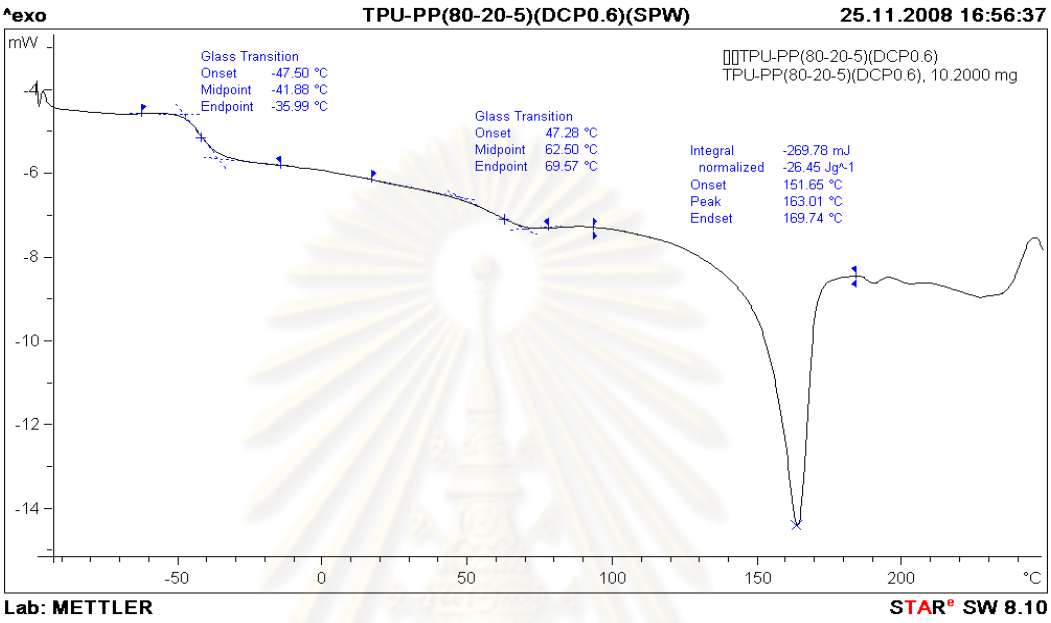


6. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 เโดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 3 ส่วนในร้อยส่วน (phr)

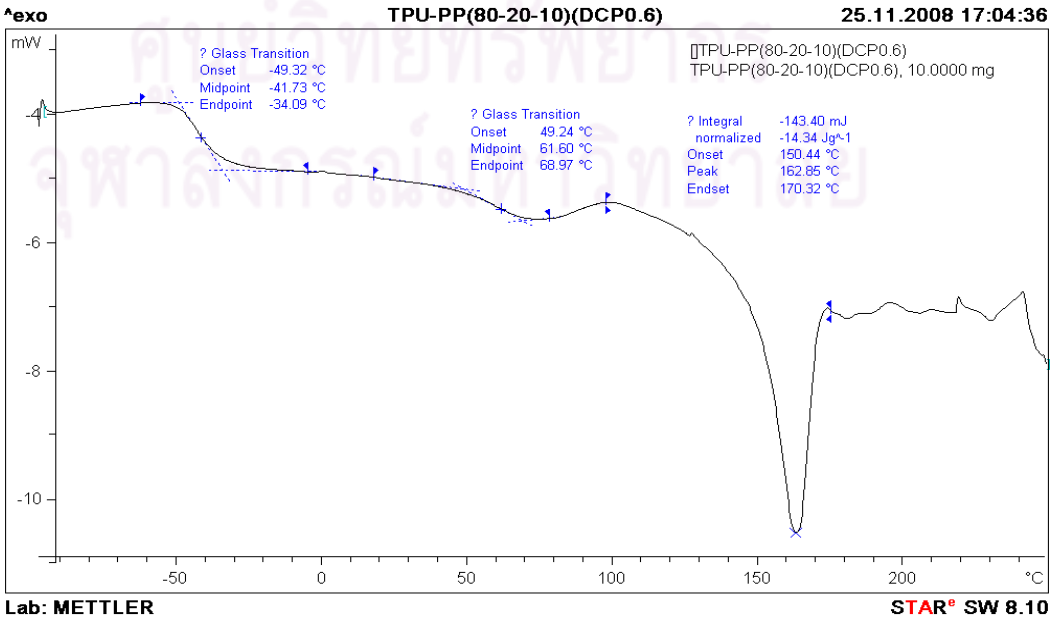


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

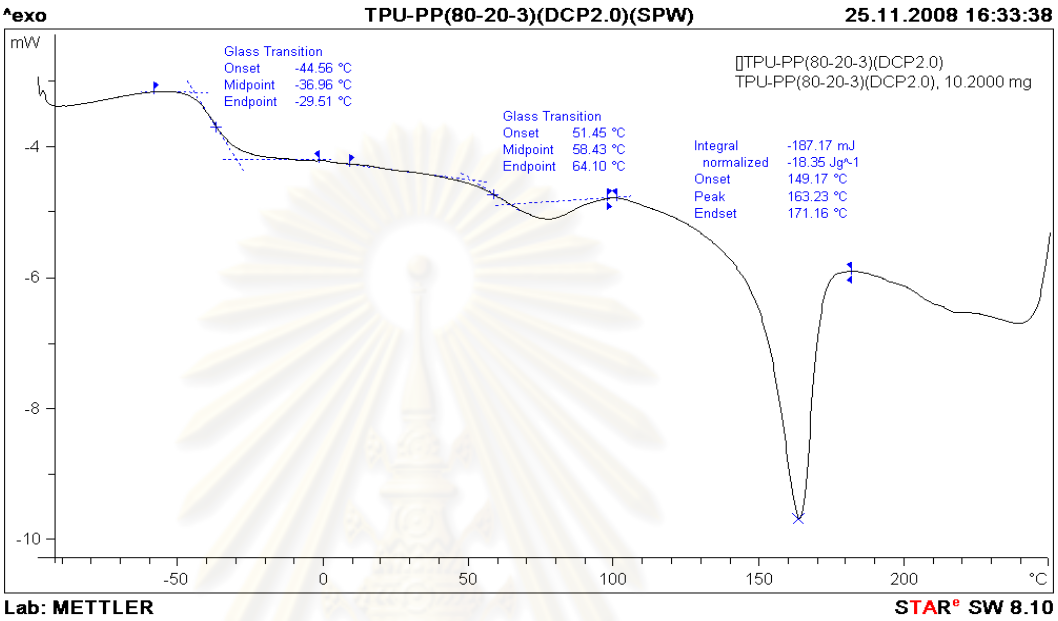
7. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 5 ส่วนในร้อยส่วน (phr)



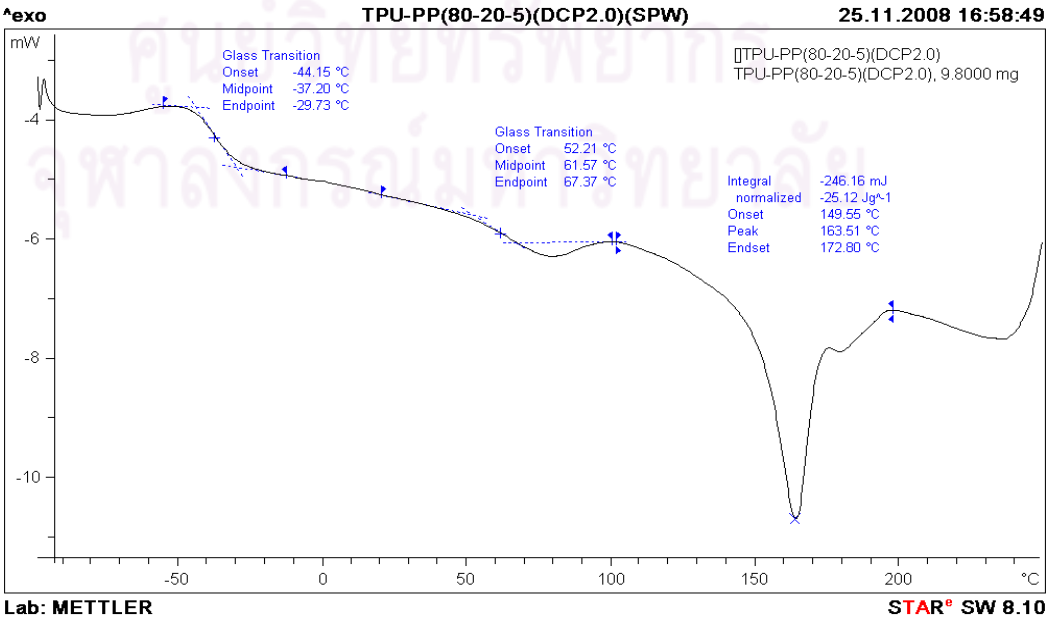
8. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 10 ส่วนในร้อยส่วน (phr)



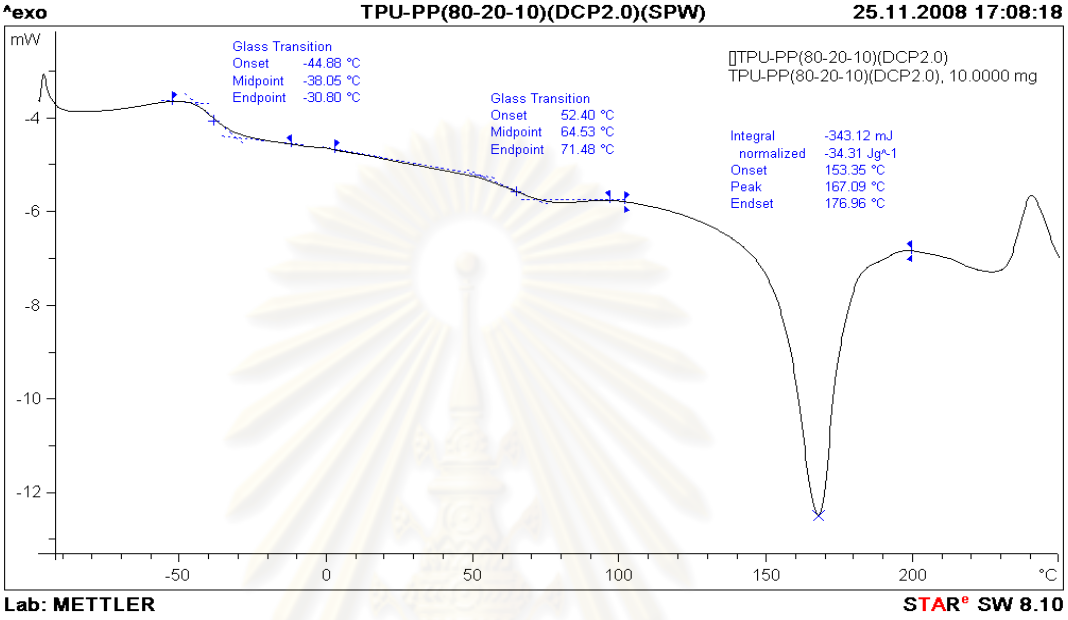
9. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 3 ส่วนในร้อยส่วน (phr)



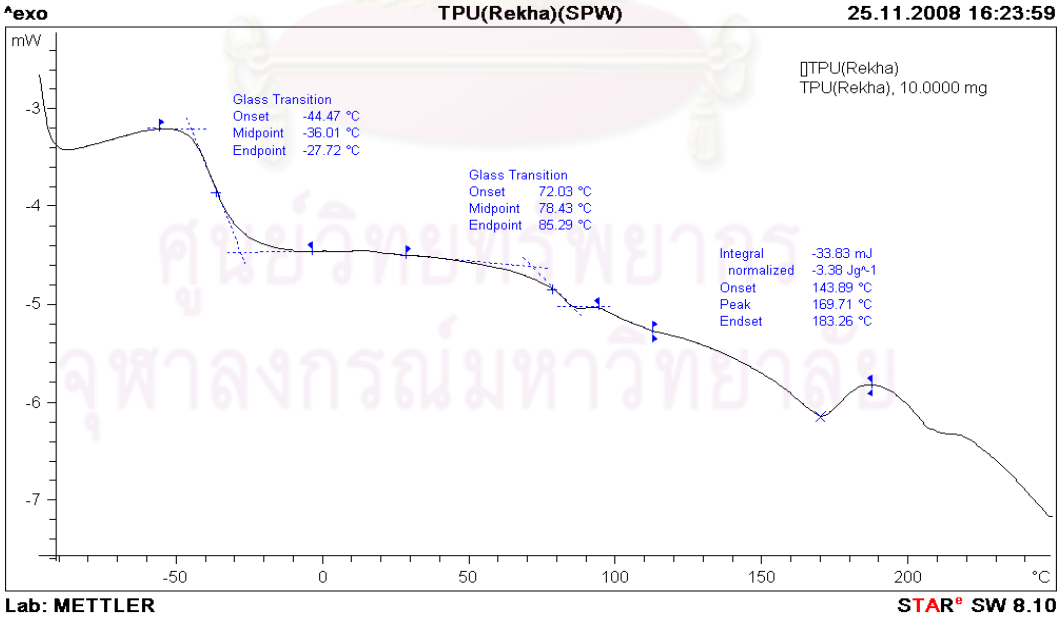
10. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 5 ส่วนในร้อยส่วน (phr)



11. พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 80:20 ด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ โดยใช้มาลิอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักของปริมาณสารช่วยผสม โดยก่อให้เกิดสารช่วนผสมในกระบวนการผสม 10 ส่วนในร้อยส่วน (phr)



12. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเรขา จรัสตระกูล เกิดวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2526 ที่ จ.กาญจนบุรี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา พ.ศ. 2548 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตรพอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย