

คอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/
โพลลาสโทไนต์

นางสาวสุชัญญา เกตุทองมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPOSITES OF THERMOPLASTIC POLYURETHANE/POLYPROPYLENE-*g*-MALEIC
ANHYDRIDE/WOLLASTONITE

Miss Suchanya Ketthongmongkol

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลลอสโตน
โดย	นางสาวสุชัญญา เกตุทองมงคล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร)

สุทัศน์ญา เกตุทองมงคล : คอมพอลสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน
 กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โวลลาสโทไนต์. (COMPOSITES OF
 THERMOPLASTIC POLYURETHANE/POLYPROPYLENE-G-MALEIC
 ANHYDRIDE/WOLLASTONITE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.เสาวรจณ์
 ช่วยจุลจิตร์, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมคอมพอลสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน
 กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โวลลาสโทไนต์ด้วยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว ซึ่งการใส่
 พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนก็เพื่อ
 ปรับปรุงเสถียรภาพเชิงมิติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ขณะที่โวลลาสโทไนต์ถูกใช้เพื่อลด
 ต้นทุนและปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลสิต โวลลาสโทไนต์
 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 2000 เมช สารประกอบที่ได้จากการอัดรีดถูกเตรียมโดยการผสม
 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และโวลลาสโทไนต์
 ปริมาณต่างๆ ซึ่งเมื่อนำไปทำการตัดเม็ดแล้วได้ถูกขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ
 และเครื่องฉีดแบบ ผลของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และโวลลาสโทไนต์ต่อ
 ดัชนีการหลอมไหล สมบัติด้านความทนแรงดึง เสถียรภาพทางความร้อน ความสามารถในการ
 การลุกไหม้ และสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวัด
 ดัชนีการหลอมไหล เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน
 (ทีจีเอ) เครื่องวัดดัชนีออกซิเจน และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดสอบ
 แสดงให้เห็นว่า โวลลาสโทไนต์มีบทบาทสำคัญไม่เพียงแต่เพิ่มความแข็งตั้งแต่ยังเพิ่ม
 เสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีกด้วย สำหรับคอมพอลสิตที่มี
 องค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/
 โวลลาสโทไนต์เท่ากับ 100/5/40 แสดงการปรับปรุงค่ายังสัมมอดูลัสและเสถียรภาพทางความ
 ร้อนมากที่สุด นอกจากนี้ ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบมีสมบัติดีกว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูป
 ด้วยการอัดแบบ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553.....

#5272584623:MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : TPU / PP-g-MA / WOLLASTONITE / COMPOSITES

SUCHANYA KETTHONGMONGKOL : COMPOSITES OF THERMOPLASTIC

POLYURETHANE/POLYPROPYLENE-G-MALEIC ANHYDRIDE/

WOLLASTONITE. ADVISOR : ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 80

pp.

In this work, composites of thermoplastic polyurethane (TPU)/polypropylene-g-maleic anhydride (PP-g-MA)/wollastonite were prepared by melt mixing process. PP-g-MA was incorporated into TPU matrix in order to improve the dimensional stability of the TPU, whereas wollastonite was utilized to reduce cost and improve the mechanical strength and thermal stability of the composites. Wollastonite with particle size of 2000 mesh was used in this work. Extrusion compounding was performed by mixing TPU with different loadings of PP-g-MA and wollastonite. The extrudates were granulated and then fabricated into test specimens using either compression or injection molding machine. The effects of PP-g-MA and wollastonite on melt flow index, tensile properties, thermal stability, flammability and morphology of TPU were investigated using the melt flow indexer, universal testing machine, thermogravimetric analyzer, oxygen indexer and scanning electron microscope, respectively. The results showed that wollastonite plays an important role for improving not only the stiffness but also the thermal stability of the TPU. For TPU/PP-g-MA/wollastonite composites, the composition of 100/5/40 shows the optimal improvement in Young's modulus and thermal stability. Moreover, specimens fabricated by injection molding provided better properties than those fabricated by compression molding.

Department : Materials Science.....

Student's Signature.....

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology.....

Advisor's Signature.....

Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเชื่อใจเพื่อเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำงานวิจัย อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และการแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ อย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษมา แสงวัฒนาโรจน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี และรองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี ให้คำแนะนำด้านวิชาการและการวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. ศูนย์ด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (Center for Petroleum, Petrochemical and Advanced Materials) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย

5. บริษัท เอ็ช เอ็ม ซี โปลิเมอร์ จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

6. บริษัท เคมีคัล อินโนเวชัน ที่เชื่อใจเพื่อวัสดุดิบ สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย และเชื่อใจเพื่อเครื่องมือในการทำงานวิจัย

7. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เชื่อใจเพื่อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2. วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	3
2.2 พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	6
2.2.1 พอลิโพรพิลีน.....	6
2.2.2 มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	7
2.3 สารตัวเติม.....	8
2.3.1 ไวลลาสโทไนต์.....	11
2.4 วัสดุคอมพอสิต.....	14
2.5 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก.....	16
2.5.1 การอัดแบบ.....	16
2.5.2 การฉีดแบบ.....	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3. วิธีการทดลอง.....	20
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ.....	20
3.2.2 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	20
3.3 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง.....	21

บทที่	หน้า
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	21
3.4.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์/โพลลาสโตนต์คอมพอสิต.....	22
3.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	23
3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	24
3.6.1 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง.....	24
3.6.2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหล.....	26
3.6.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	26
3.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....	27
3.6.5 การทดสอบค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด.....	28
3.6.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	28
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	30
4.1 ลักษณะพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	30
4.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	31
4.2.1 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ายังส์มอดุลัส.....	31
4.2.2 เสถียรภาพทางความร้อน.....	32
4.2.3 สัณฐานวิทยา.....	33
4.3 สมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	34
4.3.1 ดัชนีการหลอมไหล.....	35
4.3.2 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส์มอดุลัส	35
4.3.2.1 ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบ.....	35
4.3.2.2 ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ.....	37
4.3.3 สมบัติเชิงกลพลวัต.....	41
4.3.4 เสถียรภาพทางความร้อน.....	46
4.3.5 ดัชนีออกซิเจนจำกัด.....	47
4.3.6 สัณฐานวิทยา.....	49
5 สรุปผลการทดลอง.....	53

บทที่	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	63
ภาคผนวก ค.....	71
ภาคผนวก ง.....	72
ภาคผนวก จ.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80

สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากไดออกซินิด พอลิเอสเทอร์และพอลิอีเทอร์.....	5
2.2	สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	8
2.3	การใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุในอุตสาหกรรมพลาสติก.....	11
2.4	สมบัติทางกายภาพของโพลลาสโพนต์.....	13
2.5	การใช้โพลลาสโพนต์ในอุตสาหกรรมพลาสติก.....	14
3.1	ส่วนผสมและอัตราส่วนของคอมพอลสิต.....	22
3.2	ขนาดขึ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638-03 (type IV).....	25
4.1	ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ายังสัมมูล์ของพอลิเมอร์ผสม ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ.....	31
4.2	ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ายังสัมมูล์ของพอลิเมอร์ผสม ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ.....	31
4.3	ผลการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และพอลิเมอร์ผสม.....	33
4.4	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วที่วิเคราะห์จากกราฟแทนเจนต์สัญญาณเสียงของพอลิเมอร์ คอมพอลสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ.....	44
4.5	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วที่วิเคราะห์จากกราฟแทนเจนต์สัญญาณเสียงของพอลิเมอร์ คอมพอลสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ.....	44
4.6	อุณหภูมิสลายตัวและเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของพอลิเมอร์คอมพอลสิต.....	47

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างสายโซ่ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	3
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ 4,4'-methylene diphenyl diisocyanate.....	4
2.3	โครงสร้างทางเคมีของ 1,4-butanediol.....	4
2.4	โครงสร้างทางเคมีของ Poly(propylene glycol).....	4
2.5	โครงสร้างทางเคมีของ Poly(tetramethylene glycol).....	5
2.6	โครงสร้างทางเคมีของ Poly(1,4-butane diol adipate).....	5
2.7	โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	6
2.8	โครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน.....	7
2.9	การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน.....	7
2.10	การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน.....	7
2.11	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	8
2.12	รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม.....	9
2.13	โครงสร้างของโพลลาสโตน.....	12
2.14	ลักษณะอนุภาคของโพลลาสโตน.....	12
2.15	วัสดุคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงลักษณะต่างๆ.....	15
2.16	เครื่องอัดแบบ.....	16
2.17	เครื่องฉีดแบบ.....	17
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.2	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	22
3.3	เครื่องอัดแบบ.....	23
3.4	เครื่องฉีดแบบ.....	24
3.5	ขั้นตอนทดสอบบัติความทนแรงดึง.....	24
3.6	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD รุ่น LR 100K).....	25
3.7	เครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล.....	26
3.8	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	27
3.9	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	27
3.10	เครื่องทดสอบดัชนีออกซิเจน.....	28

ภาพที่		หน้า
3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
4.1	คอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์/โพลลาสโตนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ.....	30
4.2	คอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์/โพลลาสโตนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ	30
4.3	ที่เจาะเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเล อิกแอนไฮไดรด์และพอลิเมออร์ผสม.....	33
4.4	สัณฐานวิทยาของพอลิเมออร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ..	34
4.5	ดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนคอมพอสิตทั้งที่ใส่ และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	35
4.6	ความทนแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนคอมพอสิตที่ใส่ และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด แบบ.....	36
4.7	การยืดตัว ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนคอมพอสิต ที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ อัดแบบ.....	36
4.8	ยังสัมมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนคอมพอสิตที่ใส่และ ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ	37
4.9	ความทนแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนคอมพอสิตที่ใส่ และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด แบบ.....	38
4.10	การยืดตัว ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนคอมพอสิต ที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ ฉีดแบบ.....	38
4.11	ยังสัมมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนคอมพอสิตที่ใส่และ ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ	39
4.12	เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและ ฉีดแบบ.....	40

ภาพที่	หน้า
4.13	เปรียบเทียบการยึดตัว ณ จุดขาด ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ..... 40
4.14	เปรียบเทียบค่ายังสัมมอดูล์ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ..... 41
4.15	แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลีโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ..... 42
4.16	แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ..... 42
4.17	แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลีโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ..... 43
4.18	แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ..... 43
4.19	ที่จีเอเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลีโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก..... 46
4.20	ที่จีเอเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 46
4.21	ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิเมอร์คอมพอสิต..... 48
4.22	ลักษณะชิ้นงานภายหลังการทดสอบค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด..... 48
4.23	สัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 49
4.24	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ..... 50

บทที่ 1

บทนำ

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ได้รวมสมบัติที่ดีของทั้งยางและพลาสติกไว้ด้วยกัน ซึ่งแตกต่างจากพอลิไวนิลที่ถูกพลาสติกไฮด์ เพราะเมื่อพลาสติกไฮเซอร์หลุดออกจากพอลิไวนิลจะมีผลทำให้พอลิไวนิลเปราะและแตกเสียหายได้ง่ายขณะใช้งาน และเนื่องจากความเป็นเทอร์โมพลาสติกจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไปได้ เช่น การอัดรีด การเป่าแบบ การฉีดแบบ และการอัดแบบ เป็นต้น นอกจากนี้ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนยังมีสมบัติดีเด่นหลายประการ ได้แก่ มีความทนแรงดึง แรงฉีกขาด และการขีดถู ความต้านทานน้ำมันและตัวทำละลายสูง และมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้ดี เป็นต้น

การผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนจะเป็นการรวมสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยพอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกที่มีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ มีความทนสารเคมีดีเยี่ยม มีความแข็งแรง และความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ ยังขึ้นรูปได้ง่าย และราคาถูก อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่สามารถเข้ารวมตัวกันได้ เพราะมีความแตกต่างของสภาพขั้ว และมีแรงดึงระหว่างผิวสูง ซึ่งความไม่เข้ากันเนื่องจากการไม่มีอันตรกิริยาระหว่างภูมิภาคที่แตกต่างกันทำให้พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ไม่มีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์และสมบัติของผลิตภัณฑ์ไม่ได้รับการปรับปรุงเท่าที่ควร และอาจส่งผลให้สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนต่ำลง ดังนั้น การใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์แทนพอลิโพรพิลีนไฮโดรพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนผ่านทางหมู่ที่มีขั้วโดยไม่จำเป็นต้องใส่สารช่วยผสม ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมี modulus และความคงขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีน อย่างไรก็ตาม พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนไฮโดรพอลิเมอร์ แต่การใส่ในปริมาณมากจะมีผลทำให้ต้นทุนของวัตถุดิบสูงขึ้น ดังนั้น จึงควรใส่ในปริมาณไม่มากนักแต่ยังคงมีส่วนปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ แล้วใส่สารตัวเติมอนินทรีย์ที่สามารถเข้ารวมตัวกับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้มาเสริมการปรับปรุงทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ โดยสารตัวเติมอนินทรีย์ที่ใช้ควรมีราคาถูก เพราะวัตถุประสงค์หลักของการใช้สารตัวเติมอนินทรีย์ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต ได้แก่ ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มความคงรูป อย่างไรก็ตาม การใส่

สารตัวเติมอินทรีย์ในปริมาณสูงอาจมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นจนไม่เหมาะสมกับการใช้งานในหลายๆ ด้าน

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โพลีเอทิลีนไทรโคเทอซึ่งเป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต ซึ่งปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเป็นสารตัวเติมในพลาสติก ยาง และสี เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยอาศัยสมบัติของแร่อินทรีย์ร่วมกับพอลิเมอร์ในการเพิ่มสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน ความคงขนาด นอกจากนี้ การใช้โพลีเอทิลีนไทรโคเทอที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการขีดข่วน และความทนแรงกระแทกสูงกว่าการใช้วัสดุอื่น รวมทั้งโพลีเอทิลีนไทรโคเทอยังมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ต่างๆ และเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนไม่มีความต้านทานการติดไฟ โดยจะถูกเผาไหม้เมื่อได้รับความร้อนได้เช่นเดียวกับสารอินทรีย์หลายๆ ชนิด พร้อมกับปลดปล่อยควันพิษและลดปริมาณออกซิเจนบริเวณรอบๆ ซึ่งในการใช้งานบางอย่างอาจต้องการสมบัติด้านการติดไฟ ดังนั้น การใช้โพลีเอทิลีนไทรโคเทอจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มสมบัติด้านการติดไฟนี้ ซึ่งหากงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในราคาที่ถูกลง เพื่อที่จะนำไปใช้ทดแทนพลาสติกบางชนิดที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

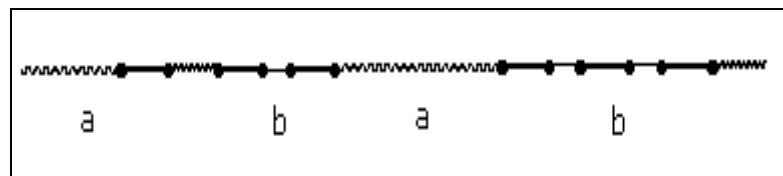
บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU)

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ จึงได้รวมสมบัติที่ดีทั้งของอีลาสโตเมอร์และพลาสติกไว้ด้วยกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นคล้ายอีลาสโตเมอร์ และเนื่องจากความเป็นเทอร์โมพลาสติกจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไปได้ เช่น การอัดรีด (extrusion) การเป่าแบบ (blow molding) การฉีดแบบ (injection molding) และการอัดแบบ (compression molding) เป็นต้น นอกจากนี้ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนยังมีสมบัติดีเด่นหลายประการ ได้แก่ มีความทนแรงดึง แรงฉีกขาด และการขัดถู ความต้านทานน้ำมันและตัวทำละลายสูง และมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้ดี เป็นต้น [1]

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน มีโครงสร้างเป็นแบบบล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) ประกอบด้วยส่วนของสายโซ่แข็ง (hard segments) โดยจะเป็นส่วนของไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate) และไดออลสายโซ่สั้น (short-chain diol) ส่วนของสายโซ่นิ่ม (soft segments) จะเป็นส่วนของไดออลสายโซ่ยาว (long-chain diol) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยสายโซ่แข็งจะเป็นส่วนที่ทำให้มีความแข็งเกร็ง (rigid) ที่อุณหภูมิห้องและแสดงสมบัติด้านความแข็ง (hardness) ในขณะที่ส่วนของสายโซ่นิ่มจะมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้อง [2]



a) soft segments

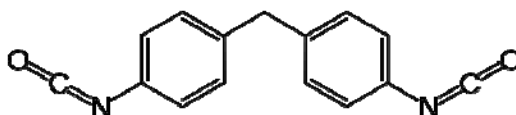
b) hard segments

รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายโซ่ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [3]

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตและไดออล [4] ดังนี้

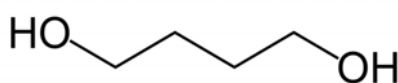
1. ไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanates) ประกอบด้วยหมู่ NCO อยู่ในโมเลกุล และนิยมใช้อะโรมาติกไอโซไซยาเนต (aromatic isocyanates) ในการสังเคราะห์เนื่องจากมีหมู่ที่ว่องไว

ในการทำปฏิกิริยามากกว่าอะลิฟาติกไอโซไซยาเนต (aliphatic isocyanates) และที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์มากที่สุด คือ 4,4'-methylene diphenyl diisocyanate (4'4'-MDI) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.2



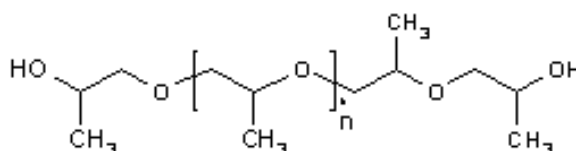
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ 4,4'-methylene diphenyl diisocyanate [5]

2. ไดออล (Diols) เป็นอีกส่วนประกอบที่มีความสำคัญในการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ไดออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือไดออลสายโซ่สั้น เช่น เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และบิวเทนไดออล (butane diol) จะทำหน้าที่เป็นเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ (chain extenders) โดยไดออลสายโซ่สั้นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ คือ 1,4-butane diol ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.3

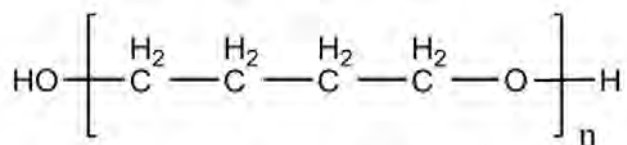


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ 1,4-butanediol [6]

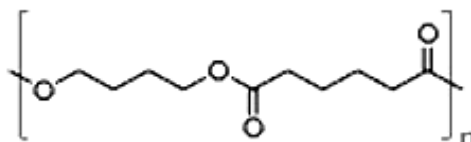
ไดออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (น้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 8000) ซึ่งเป็นไดออลสายโซ่ยาวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ พอลิเอสเตอร์พอลิออล (polyester polyols) และพอลิอีเทอร์พอลิออล (polyether polyols) ตัวอย่างของไดออลสายโซ่ยาวที่ใช้สังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ได้แก่ poly(propylene glycol), poly(tetramethylene glycol), poly(1,4-butane diol adipate) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4-2.6



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ poly(propylene glycol) [7]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ poly(tetramethylene glycol) [8]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ poly(1,4-butane diol adipate) [9]

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จาก ไดออกซินิดพอลิเอสเทอร์และพอลิอีเทอร์

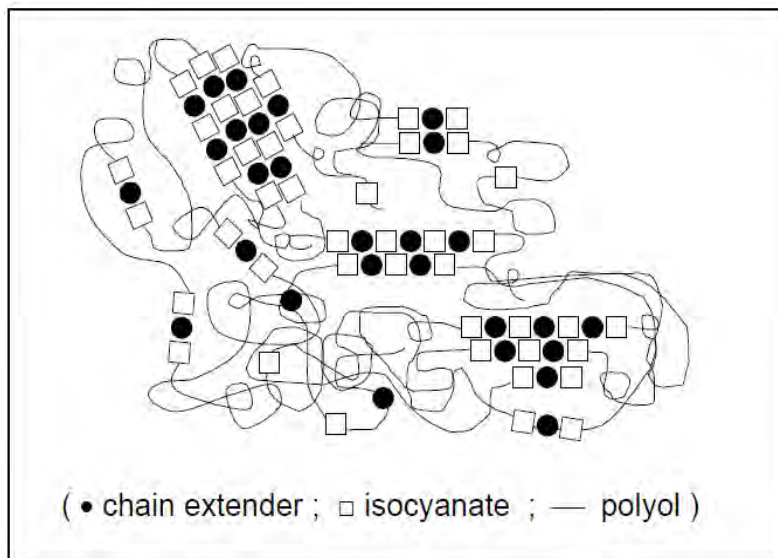
ตารางที่ 2.1 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากไดออกซินิด พอลิเอสเทอร์และพอลิอีเทอร์ [10]

สมบัติ	พอลิเอสเทอร์	พอลิอีเทอร์
Wear resistance	+	-
Load bearing, Compression set	+	-
Low temperature flexibility	-	+
Hydrolytic resistance	-	+
Heat aging	+	-
Swelling in oil, grease, solvents, water	+	-
O ₂ , O ₃ , and U.V. stability	+	-
Stability to energetic radiation	+	-
Microbe and fungus resistance	-	+

+ favorable

- unfavorable

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีโครงสร้างเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนของ
 อสัณฐานของไดออลสายโซ่ยาว และส่วนอสัณฐานของไดไอโซไซยานาตและไดออลสายโซ่สั้น ดัง
 แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [2]

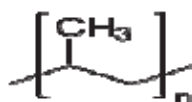
สมบัติโดยทั่วไปของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

- มีความยืดหยุ่นสูง
- มีความต้านทานต่อการขีดถูได้ดีเยี่ยม
- ต้านทานการฉีกขาดได้ดี
- ทนทานต่อน้ำมันและไขมัน
- มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม
- สามารถในการนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- มีความโปร่งใสสูง

2.2 พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

2.2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) [11]

พอลิโพรพิลีนเตรียมจากแก๊สโพรพิลีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบโคออร์ดิเนชัน
 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-นัตตา (Ziegler-Natta Catalyst) ในการเตรียมพอลิโพรพิลีนที่มี
 น้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างแบบไอโซแทกติกสูงถึง 95-99% รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างทาง
 เคมีของพอลิโพรพิลีน

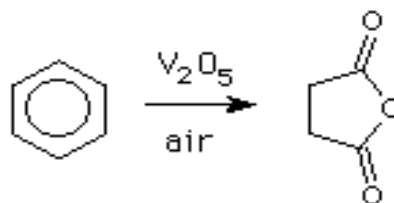


รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน [12]

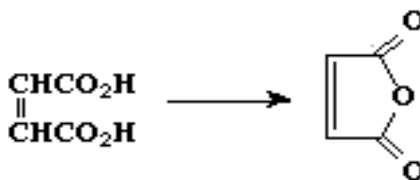
ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอดปราศจากสาขาโซ่กิ่ง มีความเป็นผลึกสูง มีจุดหลอมตัว 165 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเพียง 0.905 กรัม/ซม³ และเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงทำให้พอลิเมอร์นี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก เหนียว แข็งเกร็ง อุณหภูมิหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีน ทำให้พอลิโพรพิลีนเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า ยังคงรักษาความแข็งแรงและรูปทรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส พอลิโพรพิลีนไม่ละลายได้ในตัวทำละลายใดๆ ณ อุณหภูมิห้อง แต่ละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส สามารถทนกรดและเบสได้ดี รวมทั้งเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป

2.2.2 มาเลอิกแอนไฮไดรด์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารอินทรีย์ มีสูตรเคมี $C_2H_2(CO)_2O$ สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ ยังสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงไว้ในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน [14]

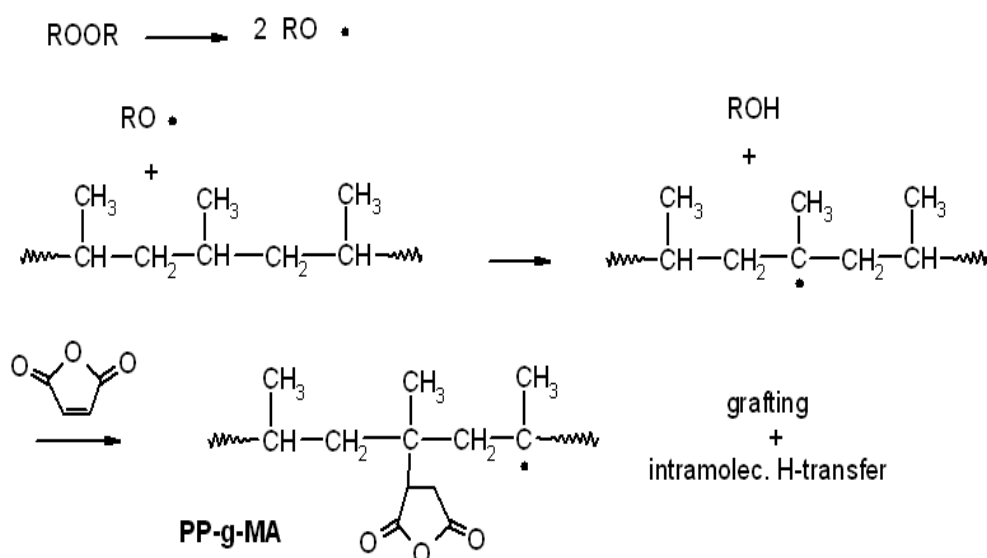


รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน [15]

ตาราง 2.2 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [16]

Molar mass	98.06 g/mol
Appearance	White crystals
Density	1.48 g/cm ³
Melting point	52.8 °C
Boiling point	202 °C

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ สามารถทำได้หลายกระบวนการ ทั้งกระบวนการแบบสารละลายและกระบวนการแบบหลอมเหลว โดยกระบวนการแบบหลอมเหลวสามารถใช้เครื่องมือในการผสมได้หลายประเภท เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เป็นต้น ปฏิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ปฏิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [17]

2.3 สารตัวเติม (Fillers) [18,19]

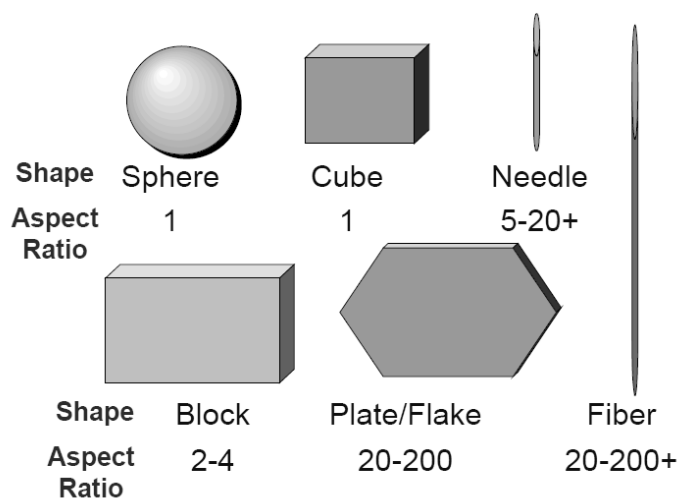
สารตัวเติม หมายถึง สารที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ สารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น โพลลาสไทน์ ทัลก์ แคลเซียมคาร์บอเนต แก้ว ไมกา และเยื่อไม้ เป็นต้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. สารตัวเติมชนิดไม่ทำปฏิกิริยา (inert filler) หรือสารเพิ่มเนื้อ (extender) ใช้สำหรับลดต้นทุนการผลิต สมบัติที่เปลี่ยนแปลงในเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารตัวเติมชนิดนี้มีหลายประการ เช่น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มอดุลัสการยืดตัว ความต้านการกดทับ ความต้านแรงบิดโค้งเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว ความแข็งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัว (heat deflection temperature) เพิ่มขึ้น และลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น

2. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมชนิดที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกผสมให้ดีขึ้นได้ สมบัติที่เปลี่ยนแปลงในเทอร์โมพลาสติกเมื่อผสมตัวเติมเสริมแรง มีหลายประการ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านการกดทับ มอดุลัส และการยืดตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัวเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว เป็นต้น

การนำสารตัวเติมไปใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกต้องพิจารณาสมบัติที่สำคัญหลายประการเช่น

- ลักษณะอนุภาค (particle shape) อนุภาคของสารตัวเติมมีรูปร่างต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ได้แก่ ทรงกลม (sphere) ทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ (cube) บล็อก (block) แผ่นหรือเกล็ด (plate or flake) เส้นใย (fiber) แบบเข็มหรือแท่ง (needle or acicular) โดยมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของอนุภาค (aspect ratio) แตกต่างกันซึ่งจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตมาก



รูปที่ 2.12 รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม

- การกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution) มีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติก สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยใช้ตะแกรงร่อน ถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยวิธีการตกตะกอน

- พื้นที่ผิว (surface areas) เนื่องจากการยึดเกาะระหว่าง 2 ภูมิภาค คือ พอลิเมอร์และสารตัวเติมจะเกิดขึ้นที่ผิว ดังนั้น หากพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตสูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถวัดพื้นที่ผิวได้โดยใช้หลักการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ตามวิธีเบรนนอร์-เอมเมท์-เทลเลอร์ (BET)

- การจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle packing) เป็นความสามารถในการจัดเรียงของอนุภาคในวัสดุคอมพอสิต โดยจะพิจารณาในรูปของสัดส่วนการรวมตัว (packing fraction) ซึ่งได้แก่ ปริมาตรทั้งหมดที่สารตัวเติมใช้ในการจัดเรียงตัวในภูมิภาคของพอลิเมอร์เมื่อปริมาณสารตัวเติมที่ใช้สูงสุด ดังนั้น สารตัวเติมที่มีค่าสัดส่วนการรวมตัวสูงแสดงว่ามีพอลิเมอร์แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมมาก การสัมผัสกันของอนุภาคต่ำ ซึ่งทำให้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลดี

- ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) เป็นสมบัติที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่ทำการขึ้นรูป

สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุ (mineral fillers) ในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างของอนุภาคแบบเดี่ยว แต่มีบางชนิด เช่น ทัลค์ เคาลิน โดยทั่วไปมีรูปร่างอนุภาคเป็นแบบแผ่นแต่จะมีรูปร่างอนุภาคแบบอื่นปะปนอยู่ด้วย ขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบและกระบวนการผลิต [20]

ผลของการใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุขึ้นอยู่กับ

- รูปร่างของอนุภาค (shape)
- ขนาดของอนุภาค (size)
- พื้นที่ผิวของอนุภาค (surface area)
- ความเข้ากันได้ของอนุภาคสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (particle-matrix compatibility)

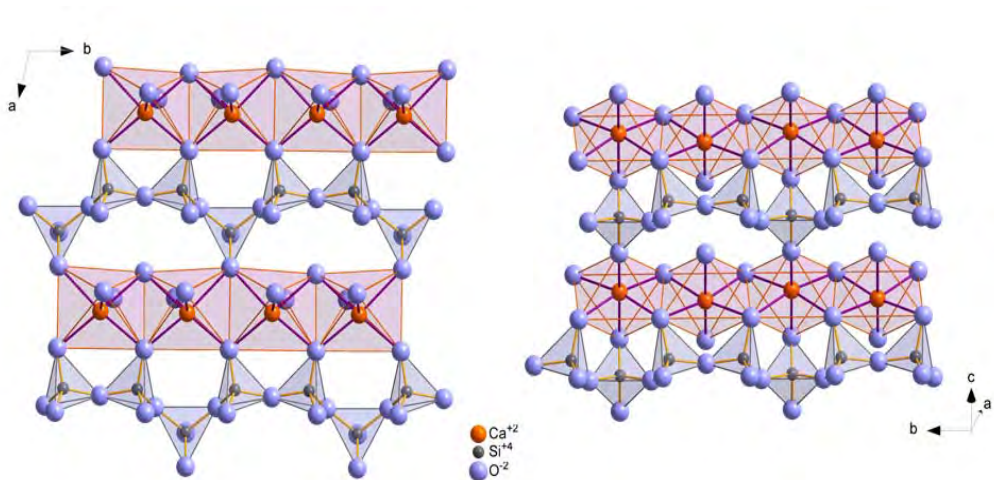
ตารางที่ 2.3 แสดงการใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมพลาสติก

ตาราง 2.3 การใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุในอุตสาหกรรมพลาสติก [21]

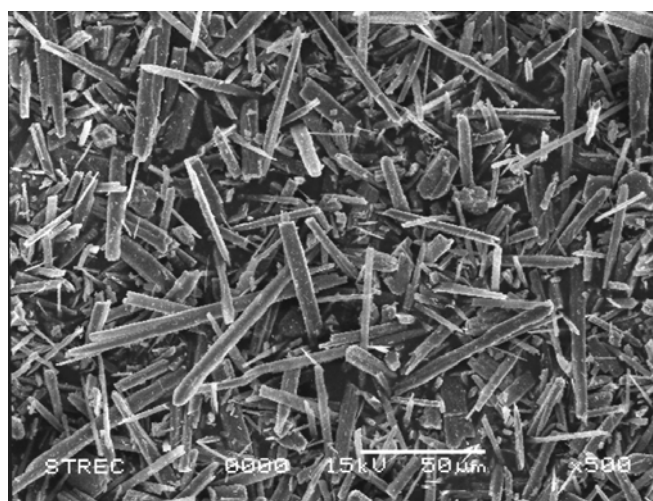
สารตัวเติมจากแร่ธาตุ	พอลิเมอร์	หมายเหตุ
แบไรต์ (Barytes)	PU	ช่วยเพิ่มความ ถ่วงจำเพาะ
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	PVC, ABS, fluoroplastics, polyolefins, PP, PS, epoxy, phenolic, TPE, PU	เป็นสารตัวเติมที่มีการ ใช้งานอย่างแพร่หลาย
เฟลด์สปาร์ (Feldspar)	PVC, acrylic, PP, PS, epoxy	ทนทานต่อสภาพ อากาศและสารเคมี
เคลลิน (Kaolin)	TPE, nylon, polyolefins, PU, PVC	ใช้งานมากที่สุดในการ ทำสายไฟ และสาย เคเบิล
ไมกา (Mica)	PP, ABS, fluoroplastics, nylon, PC, TPE, polyolefins, thermosets	มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ช่วยในการเสริมแรงได้
ซิลิกา (Silica)	epoxy, ABS, polyolefins, PS, PVC, TPES, PU	เสริมความแข็งแรง ให้กับพลาสติก
ทัลค์ (Talc)	PP, Nylon, polyolefins, PVC, phenolic, PU, PS	ทำให้พลาสติกมีความ แข็งตึง และความ ต้านทานต่อการคืบ
โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite)	Nylon, PC, TPE, PP, PS, polyolefins, thermosets	เพิ่มความทนแรงดึง

2.3.1 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite) [22]

โวลลาสโทไนต์ เป็นแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ถูกตั้งชื่อตามผู้ค้นพบ William Hyde Wollaston ซึ่งเป็นนักเคมีชาวอังกฤษ โวลลาสโทไนต์เป็นแคลเซียมซิลิเกตประกอบไปด้วยธาตุแคลเซียม ซิลิกอน และออกซิเจน มีสูตรทางเคมี คือ CaSiO_3 โวลลาสโทไนต์ประกอบด้วย CaO ร้อยละ 48.28 และ SiO_2 ร้อยละ 51.72 ลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.13 และมีลักษณะอนุภาคเป็นรูปเข็ม (acicular or needle-like structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของโวลลาสโทไนต์ [23]



รูปที่ 2.14 ลักษณะอนุภาคของโวลลาสโทไนต์

โวลลาสโทไนต์ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมเซรามิกและการเคลือบผิว ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากโวลลาสโทไนต์ มีสมบัติเป็นสารคู่ควบและเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูกสำหรับพอลิเมอร์ สมบัติโดยทั่วไป คือ ดูดซึมความชื้นต่ำ มีสีขาวไปจนถึงสีเหลืองน้ำตาล มีความต้านทานไฟฟ้าได้ดีเยี่ยม มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง การใช้งานสามารถใช้ได้ทั้งกับเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตพลาสติก และอีลาสโตเมอร์

โพลลาสโตนีสามารถนำมาใช้งานแทนแร่ใยหิน เนื่องจากโพลลาสโตนีมี aspect ratio สูง (อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนา) ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากการที่โพลลาสโตนีมีอนุภาคเป็นผลึกรูปเข็มทำให้มีสมบัติที่ดีในด้านความแข็งแรง ความหยุ่นตัว และความสม่ำเสมอของขนาดผลึกภัณฑ์ ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของโพลลาสโตนี

ตาราง 2.4 สมบัติทางกายภาพของโพลลาสโตนี [24]

Appearance	White
Morphology	acicular
Molecular Weight	116
Specific Gravity	2.9
Refractive Index	1.63
pH	9.9
Water Solubility (g/100cc)	0.0095
Density (lbs./cu.ft.)	181
Bulking Value (gal./lbs.)	0.0413
Mohs Hardness	4.5
Coefficient of Expansion (mm/mm/°C)	6.5×10^{-6}
Melting Point (°C) - theoretical	1540

การนำโพลลาสโตนีมาใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกจะช่วยปรับปรุงความทนทานของพอลิเมอร์คอมพอสิต เนื่องจากการที่โพลลาสโตนีมีอนุภาคเป็นรูปเข็ม นอกจากนี้ โพลลาสโตนียังช่วยเพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ด้านทานการติดไฟ การใช้โพลลาสโตนีเกรดที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ได้ผลึกภัณฑ์ที่มีความต้านทานการชูดซิด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าการใช้วัสดุอื่นๆ ตารางที่ 2.5 แสดงการใช้งานของโพลลาสโตนีในอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ

ตารางที่ 2.5 การใช้โพลีเอสเตอร์ในอุตสาหกรรมพลาสติก [22]

การใช้งาน	สมบัติ
Molded/plated nylon	เพิ่มความแข็งแรงและช่วยลดต้นทุนการผลิต
Friction products	ทดแทนการใช้แร่ใยหิน ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เพิ่มความแข็งแรง และความต้านทานความร้อน
Molded epoxy	การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี
Automotive undercoat	มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี
Molded phenolics	เพื่อลดต้นทุน เพิ่มความแข็งแรง และสมบัติทางไฟฟ้า
Electrical motor commutators, junction boxes	เพื่อสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และลดต้นทุนการผลิต
Molded rubber	มีสมบัติเชิงกลที่ดีและความต้านทานสารเคมี
Polyester sanitary fixtures	ให้ลักษณะพื้นผิวที่สวยงาม และความแข็งแรง

2.4 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials) [25]

วัสดุคอมโพสิต หมายถึง วัสดุซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิด มีวิวัฒนาการที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 วิวัฒนาการขึ้นไป และสามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างวิวัฒนาการได้แม้ในระดับจุลภาค (microscopic) โดยวัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วยวิวัฒนาการเสริมแรง (reinforce phase) ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเส้นใย อนุภาค แผ่นหรือชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิวัฒนาการกระจาย (dispersed phase) อยู่ในเมทริกซ์ (matrix) ที่อาจเป็นโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์

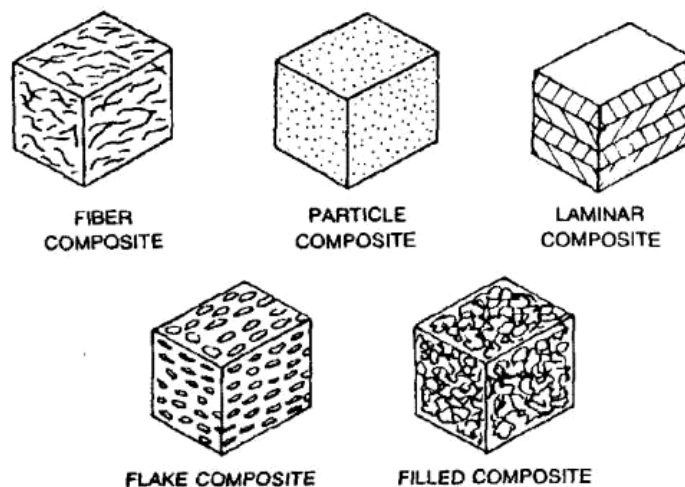
การแบ่งประเภทของวัสดุคอมโพสิตอาจแบ่งตามเมทริกซ์ได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (Fiber-reinforced polymers, FRP)
2. กลุ่มที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก (Ceramic-matrix composite, CMC)
3. กลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (Metal-matrix composite, MMC)

นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตอาจแบ่งตามลักษณะของสารตัวเติมเสริมแรง ได้ดังนี้

1. คอมโพสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibrous composites)
2. คอมโพสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นอนุภาค (Particulate composites)
3. คอมโพสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นชิ้นเล็กๆ (Flake composites)
4. คอมโพสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นชั้นหรือแผ่น (Laminar or layered composites)

รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของวัสดุคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงลักษณะต่างๆ



รูปที่ 2.15 วัสดุคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงลักษณะต่างๆ

วัสดุพอลิเมอร์ที่ถูกผลิตในทางการค้าส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมพอสิต เช่น อะคริโลไนไตรลบิวทาไดอีนสไตรีนโคพอลิเมอร์ โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผสมสารเติมแต่งต่างๆ ตามประเภทการใช้งาน ยางผสมสารเติมแต่ง เทอร์โมเซตเรซินผสมตัวเติม และพลาสติกผสมเส้นใยแก้ว เป็นต้น สาเหตุที่นิยมใช้วัสดุคอมพอสิตมากกว่าพอลิเมอร์เนื้อเดียว เนื่องจากมีข้อดีเหนือกว่าหลายประการ ได้แก่

- เพิ่มความแข็งตึง ความแข็งแรง และคงรูปร่างได้ดีกว่า
- เพิ่มความเหนียว และความต้านแรงกระแทก
- ทำให้คุณสมบัติการบิดตัวสูงขึ้น
- ลดการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ
- ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า
- ลดต้นทุนการผลิต

วัสดุคอมพอสิตอาจมีทั้งข้อดีบางประการดังกล่าว ขณะเดียวกันอาจมีข้อเสียด้วย ดังนั้นในการใช้งานต้องพิจารณาทั้งข้อดีและข้อเสียของวัสดุแต่ละชนิด ข้อเสียของวัสดุคอมพอสิต เช่น ความหนืดเพิ่มขึ้น การขึ้นรูปยาก และอาจทำให้สมบัติเชิงกล และทางฟิสิกส์บางประการลดลง เป็นต้น สมบัติของวัสดุคอมพอสิตขึ้นอยู่กับสมบัติของส่วนประกอบต่างๆ เช่น ลักษณะของตัวเติม ลักษณะสัณฐานวิทยาของระบบ และลักษณะผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่แตกต่างกัน เป็นต้น

ปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม (polymer-filler interaction) มี 4 แบบ คือ

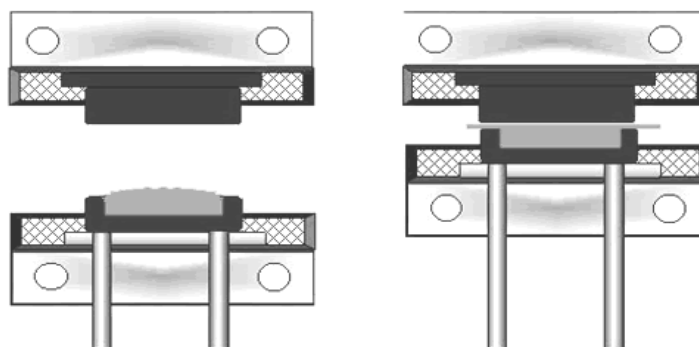
1. อนุภาคเดี่ยวและอนุภาคที่รวมตัวเป็นกลุ่มของสารตัวเติมอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ ลักษณะตัวเติมจะทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง
2. อนุภาคของสารตัวเติมกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยพอลิเมอร์จะเคลือบที่ผิวของสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมลักษณะนี้จะมีค่าความทนแรงดึงเพิ่มเล็กน้อย และการยืดตัวลดลง ซึ่งเป็นลักษณะการผสมสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนในการผลิต
3. เกิดการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และผิวของอนุภาคสารตัวเติม ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น ซึ่งกรณีนี้สารตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง
4. เกิดพันธะทางเคมีระหว่างพอลิเมอร์และผิวของอนุภาคสารตัวเติม ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มขึ้นซึ่งในกรณีนี้สารตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง

2.5 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก

2.5.1 การอัดแบบ (Compression molding) เป็นวิธีการขึ้นรูปสำหรับวัสดุหลายชนิด เช่น เซรามิก โลหะ พอลิเมอร์ และวัสดุคอมพอสิต สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการอัดแบบกระทำโดยเติมผงหรือเม็ดพลาสติกในแม่พิมพ์เปิด แล้วใช้ความดันอัดปิดแม่พิมพ์พร้อมทั้งให้ความร้อน ทำให้พลาสติกเข้าไปแทนที่หลุมแบบรูปทรงของชิ้นงาน ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ แท่นอัด (press) ประกอบด้วยลูกสูบที่สามารถให้แรงอัดได้ และแม่พิมพ์ (mould) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

พอลิเมอร์ที่นิยมใช้วิธีการขึ้นรูปแบบนี้คือ

- พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosetting polymer)
- คอมพาวนด์ (Compounds)
- พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic polymer)



รูปที่ 2.16 เครื่องอัดแบบ [26]

ปัจจัยสำคัญในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

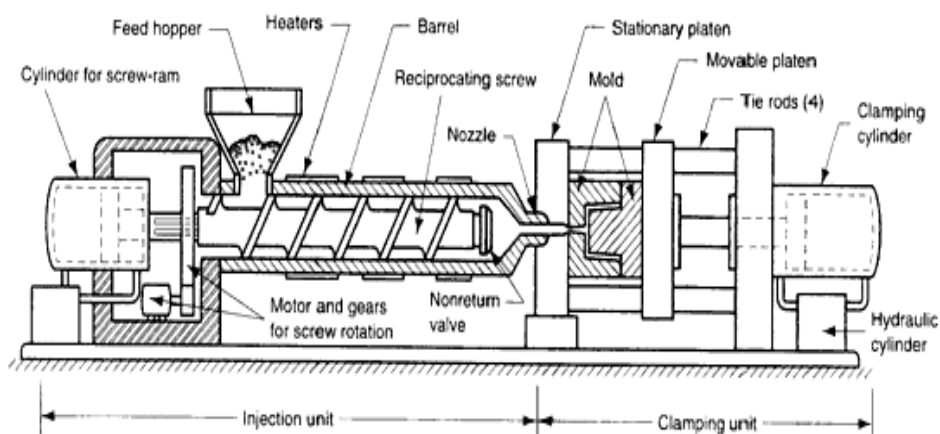
- ปริมาณวัสดุที่เหมาะสม
- อุณหภูมิที่ใช้ในการอัด และการเลือกใช้อุปกรณ์ให้ความร้อน
- ความดันหรือแรงที่ใช้ในการอัด ซึ่งจำเป็นต้องใช้ให้เหมาะสมเพื่อป้องกันและลด

การเกิดครีป (flash) บริเวณรอยประกบของแม่พิมพ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับกาให้ความร้อนก่อนอัด ความสูงของชิ้นงาน ความหนา รูปทรงของชิ้นงาน และความเรียบของผิวแม่พิมพ์ [27]

2.5.2 การฉีดแบบ (Injection) เป็นการฉีดพลาสติกที่ถูกหลอมเข้าไปในแม่แบบ (mold) ที่ประกบกันอยู่ และถูกควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำเพื่อทำให้พลาสติกหลอมนั้นแข็งตัวได้ ผลิตภัณฑ์จะถูกนำออกมาโดยการเปิดแม่แบบ ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ ส่วนการฉีด (injection unit) และส่วนการยึดแม่แบบ (clamping unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.17

โดยส่วนการฉีดจะฉีดหรืออัดพลาสติกหลอมเข้าไปในแม่แบบด้วยความดันสูง เนื่องจากพลาสติกหลอมเหลวมีความหนืดสูง ส่วนที่เป็นส่วนการยึดแม่แบบจะทำการยึดแม่แบบที่ประกบกันอยู่ด้วยแรงที่มากพอที่จะไม่ทำให้พลาสติกหลอมดันเปิดแม่แบบหรือเกิดครีป (flash) ขึ้นที่ผลิตภัณฑ์

การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีดแบบเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีความรวดเร็วในการผลิต ชิ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายลักษณะ อีกทั้งยังมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน ผลิตภัณฑ์ประมาณ 60% ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ผลิตภัณฑ์จะมีน้ำหนักอยู่ในช่วงประมาณ 5 กรัม–90 กิโลกรัม [28]



รูปที่ 2.17 เครื่องฉีดแบบ [29]

ข้อดีของกระบวนการฉีดแบบ

- เป็นกระบวนการผลิตโดยตรงจากเรซินเป็นผลิตภัณฑ์
- ต้องการการตกแต่งเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย หรือไม่จำเป็น
- สามารถทำระบบการผลิตให้เป็นการทำงานแบบอัตโนมัติได้อย่างสมบูรณ์
- มีความสามารถในการผลิตซ้ำได้ดี
- อัตราการผลิตสูง
- สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีการแทรกวัสดุอื่นร่วมเข้าไปกับพลาสติกได้ [30]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Singh และคณะ [31] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/ยางซิลิโคน/โพลลาสโทไนต์ โดยการใส่โพลลาสโทไนต์ (aspect ratio ~ 5:1) ที่ปริมาณต่างๆ กัน (10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก) แล้วทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง แรงกระแทก และแรงดัดโค้ง รวมทั้งอุณหภูมิแ่นตัวเนื่องจากความร้อน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใส่โพลลาสโทไนต์ในพอลิโพรพิลีนเมื่อปริมาณโพลลาสโทไนต์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกของชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากลดลง แต่ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีรอยบาก ความทนแรงดัดโค้ง โมดูลัสดัดโค้ง และอุณหภูมิแ่นตัวเนื่องจากความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

Lu และคณะ [1] ได้ทำการเปรียบเทียบความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและฟังก์ชันแนลพอลิโพรพิลีน (functionalized polypropylene) ชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) พอลิโพรพิลีนกราฟต์เอมีนองศาที่ 1 (PP-g-NH₂) และพอลิโพรพิลีนกราฟต์เอมีนองศาที่ 2 (PP-g-NHR) โดยการผสมสารเหล่านี้แบบหลอมเหลวกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน แล้วตรวจสอบความเข้ากันได้ด้วยสมบัติด้านรีโอโลยี (rheology) สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้ากันได้จะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้: PP-g-NHR > PP-g-NH₂ > PP-g-MA ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาของเอมีน (องศาที่ 1 และองศาที่ 2) กับพันธะยูรีเทนที่แข็งแรงกว่า ซึ่งมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่า และมีสัณฐานวิทยาที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ละเอียดและเสถียรมากกว่า

Di และคณะ [32] ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโอฟีนส์ (80:20) ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการผสมด้วยกระบวนการหลอมเหลว และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบ

สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึง และสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties) ผลการตรวจสอบ พบว่า ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น รวมทั้งสมบัติความทนแรงดึง และสมบัติเชิงกลพลวัตได้รับการปรับปรุงเมื่อได้ใส่ PE-g-MA ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งนอกจากทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมแล้ว ยังช่วยปรับปรุงด้านความคงรูปของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

Pinto และคณะ [33] ได้ศึกษาผลของการใส่อะลูมิเนียมไตรไฮดรต (aluminum trihydrate) ร่วมกับไมกา (mica) เป็นสารหน่วงไฟในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ โดยตรวจสอบด้วยการลุกไหม้ในแนวตั้ง (vertical burning) (UL94) และวัดดัชนีออกซิเจน (oxygen index) (ASTM D2863) ผลจากการตรวจสอบ พบว่าการใส่อะลูมิเนียมไตรไฮดรตในปริมาณ 70 และ 80 phr ได้แสดงผลของการเป็นสารหน่วงไฟในระดับ V2 และการใส่ไมกาปริมาณ 20 phr ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเป็นสารหน่วงไฟของอะลูมิเนียมไตรไฮดรต ซึ่งการปรับขึ้นงานให้มีความต้านการติดไฟอยู่ในระดับ V0 และ V1 จำเป็นต้องใส่อะลูมิเนียมไตรไฮดรตในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ขึ้นรูปได้ยาก

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Desmopan 786 E)
2. พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond 514D) ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัทเคมีคัล อินโนเวชัน (Chemical Innovation)
3. ไวลลาสโทไนต์ (Wollastonite XYNFW-XA) จากบริษัท Pacific Comma Trading Ltd.

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

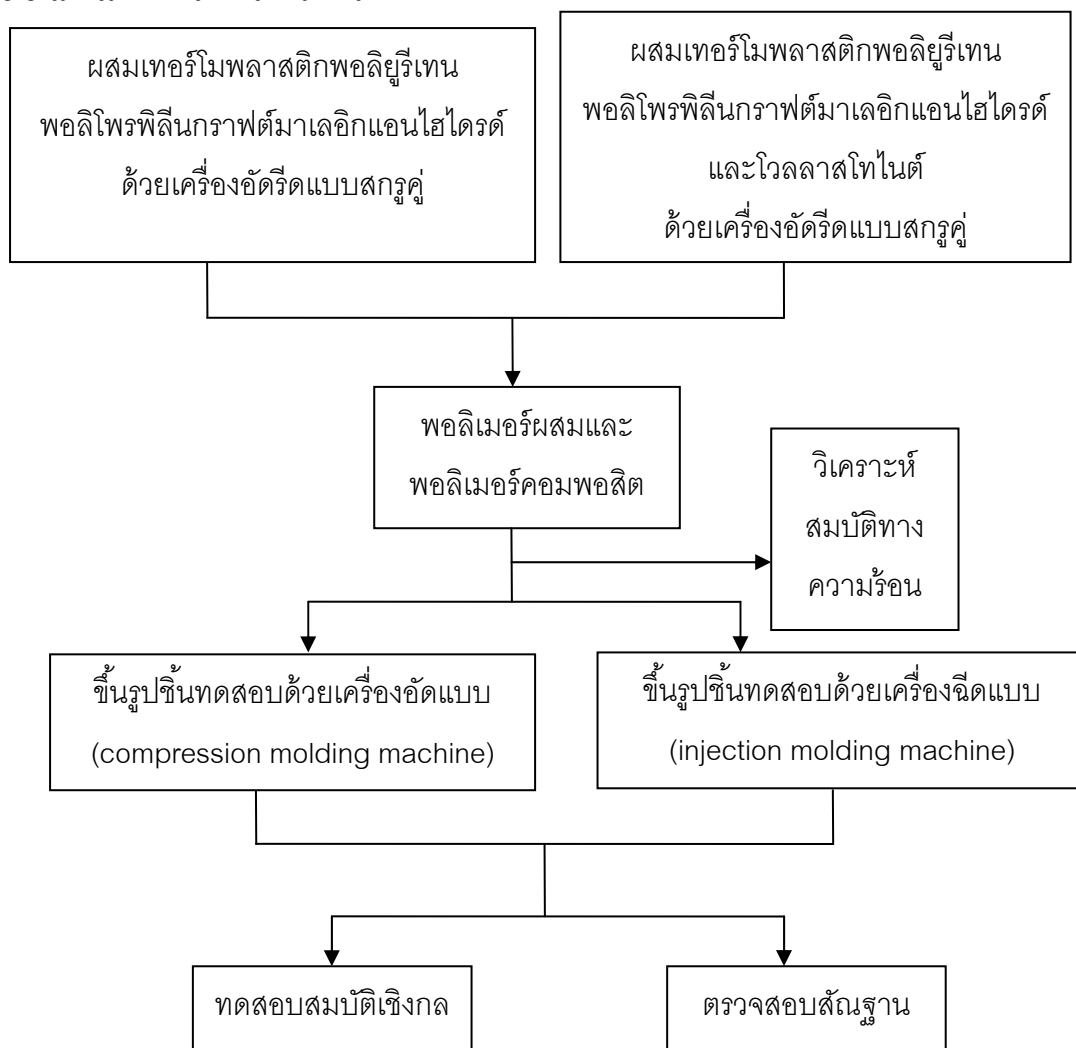
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) รุ่น Thermo prism
2. เครื่องอัดแบบ (compression molding machine) ของ Lab Tech Engineering
3. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Toshiba machine EC 130S (บริษัทเคมีคัล อินโนเวชัน)

3.2.2 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) รุ่น LLOYD LR100K
2. เครื่องวัดดัชนีการไหล (Melt Flow Indexer, MFI) รุ่น Kayeness 7053
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM 5800 LV
4. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851°
5. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) รุ่น METTLER TOLEDO DMA861°
6. เครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Indexer, LOI) รุ่น Stanton Redcroft

3.3 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 เตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

นำเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มาผสมในอัตราส่วน 100/5 และ 100/10 โดยน้ำหนัก ทำการเขย่าให้เข้ากัน นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 3.2) โดยใช้อุณหภูมิในการผสมของไซนต่างๆ ดังนี้ 195 190 180 170 และ 165 องศาเซลเซียส ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 50 รอบต่อนาที แล้วทำการตัดเม็ด (pelletized) เพื่อใช้ขึ้นรูปขึ้นทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

3.4.2 เตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/ โพลลาสโตนีคคอมพอสิต

นำเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และโพลลาสโตนีคมาผสมในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการเขย่าให้เข้ากันก่อนนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ภายใต้ภาวะเช่นเดียวกับข้อ 3.4.1 แล้วจึงตัดเป็นเม็ดเพื่อใช้ขึ้นรูปขึ้นทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและอัตราส่วนของคอมพอสิต

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	พอลิโพรพิลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (phr)	โพลลาสโตนีค (phr)
100	0	10
100	0	20
100	0	30
100	0	40
100	5	10
100	5	20
100	5	30
100	5	40

3.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

3.5.1 นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 และ 3.4.2 ไปขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยใช้ภาวะของการขึ้นรูป ดังนี้

อุณหภูมิ	190 องศาเซลเซียส
เปิดไล่อากาศ	3 ครั้ง
เวลา Pre-heat	5 นาที 20 วินาที
เวลาอัดก่อนเปิดไล่อากาศ	20 วินาที
เวลาอัดหลังเปิดไล่อากาศ	4 นาที
เวลาในการหล่อเย็น	7 นาที



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดแบบ

3.5.2 นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 และ 3.4.2 ไปขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.4) โดยใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และความดัน 50 เมกะปาสคัล



รูปที่ 3.4 เครื่องฉีกแบบ

3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.6.1 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงด้วยชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.6) โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	1	กิโลนิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	50	มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ตารางที่ 3.2 ขนาดชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638-03 (type IV)

มิติ (มิลลิเมตร)		ความคลาดเคลื่อน
W-Width of narrow section	3.18	±0.5
L-Length of narrow section	9.53	±0.5
W0-Width over-all, min	...	+6.4
W0-Width over-all, min	9.53	+3.18
L0-Length over-all, min	63.5	no max
G-Gage length	7.62	±0.25
G-Gage length	...	±0.13
D-Distance between grips	25.4	±5
R-radius of fillet	12.7	±1
R0-Outer of radius(Type IV)	...	±1



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD รุ่น LR 100K)

3.6.2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหล

ทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล (รูปที่ 3.7) โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส และกดด้วยน้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม แล้วบันทึกผลการทดลองในหน่วยกรัม/10 นาที



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล

3.6.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (รูปที่ 3.8) โดยใช้โหมดแรงเฉือน (shear mode) ขึ้นทดสอบมีขนาด 5 x 5 x 2 มิลลิเมตร โดยใช้ช่วงอุณหภูมิของการวิเคราะห์จาก -80 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 3 องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์หีสสมบัติเชิงกลพลวัต

3.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.9) โดยนำชิ้นทดสอบที่มีน้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครุฑิเบิลอะลูมินา โดยใช้ช่วงอุณหภูมิของการวิเคราะห์จาก 50 ถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที และวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลผ่าน (gas flow rate) เท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

3.6.5 การทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด

ทำการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (LOI) โดยการหาปริมาณร้อยละของออกซิเจนต่ำที่สุดในภาวะบรรยากาศผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจนที่ทำให้วัสดุสามารถลุกไหม้ในแนวตั้งได้อย่างต่อเนื่อง ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบดัชนีออกซิเจน (รูปที่ 3.10) สำหรับใช้ตรวจสอบความสามารถในการติดไฟของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D2863 ชั้นทดสอบมีขนาด 100 x 6.5 x 3 มิลลิเมตร แล้วบันทึกค่าออกซิเจนที่ใช้ในการลุกไหม้



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบดัชนีออกซิเจนจำกัด

3.6.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของชั้นทดสอบที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.11) โดยทำการเคลือบทองบนพื้นผิวก่อนทำการตรวจสอบด้วยกำลังขยาย 500 เท่า และ 1500 เท่า



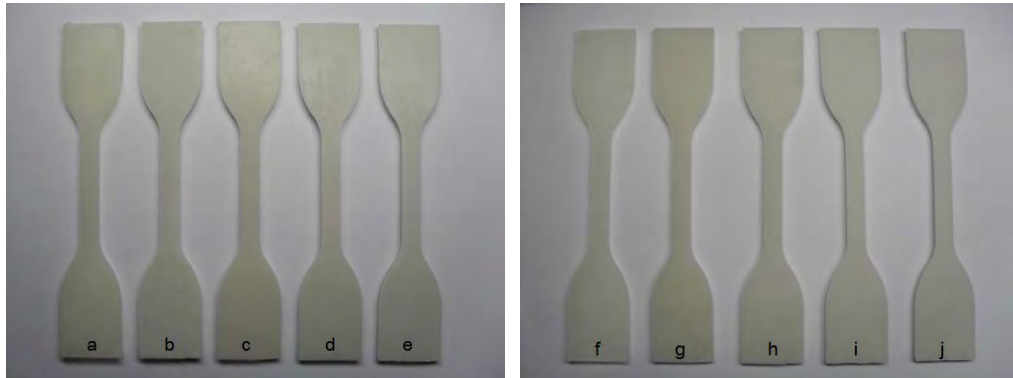
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

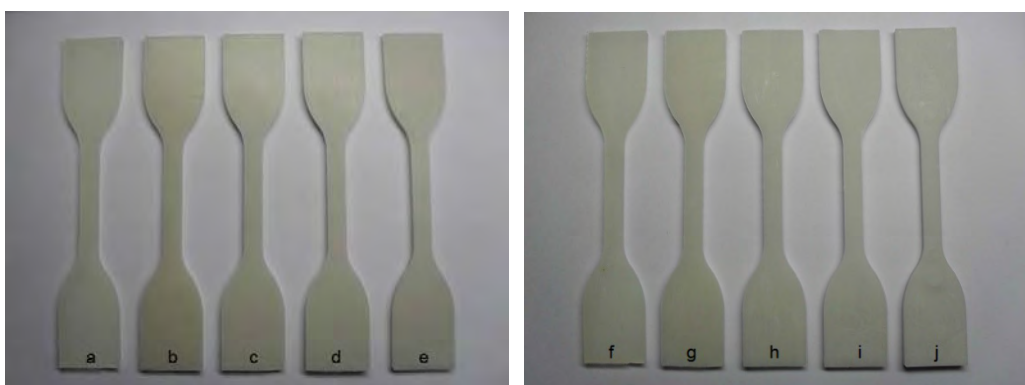
4.1 ลักษณะพอลิเมอร์คอมพอสิต

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบ



รูปที่ 4.1 คอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โวลลาสโทไนต์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ (a) 100/0, (b) 100/0/10, (c) 100/0/20, (d) 100/0/30, (e) 100/0/40, (f) 100/5/0, (g) 100/5/10, (h) 100/5/20, (i) 100/5/30, และ (j) 100/5/40

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ



รูปที่ 4.2 คอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โวลลาสโทไนต์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (a) 100/0, (b) 100/0/10, (c) 100/0/20, (d) 100/0/30, (e) 100/0/40, (f) 100/5/0, (g) 100/5/10, (h) 100/5/20, (i) 100/5/30, และ (j) 100/5/40

จากรูปแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีสีขาวอมเหลืองและค่อนข้างใส ซึ่งเมื่อเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงไปปริมาณ 5 และ 10 phr ไม่ทำให้ลักษณะของชิ้นงานเปลี่ยนไป แต่เมื่อเติมโพลลาสโตนต์เข้าไปทำให้ชิ้นงานมีสีขุ่นและทึบแสงมากขึ้นตามปริมาณโพลลาสโตนต์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ชิ้นงานยังมีผิวเรียบเนียน ทั้งที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการอัดแบบและฉีดแบบ

4.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม

4.2.1 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดุลัส

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ ตามมาตรฐาน ASTM D638 แสดงไว้ในตารางที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

องค์ประกอบ (TPU/PP-g-MA)	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ยังสัมมอดุลัส (MPa)
100/0	22.8	2323	8.6
100/5	20.5	1883	13.3
100/10	17.5	1681	14.5

ตารางที่ 4.2 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ

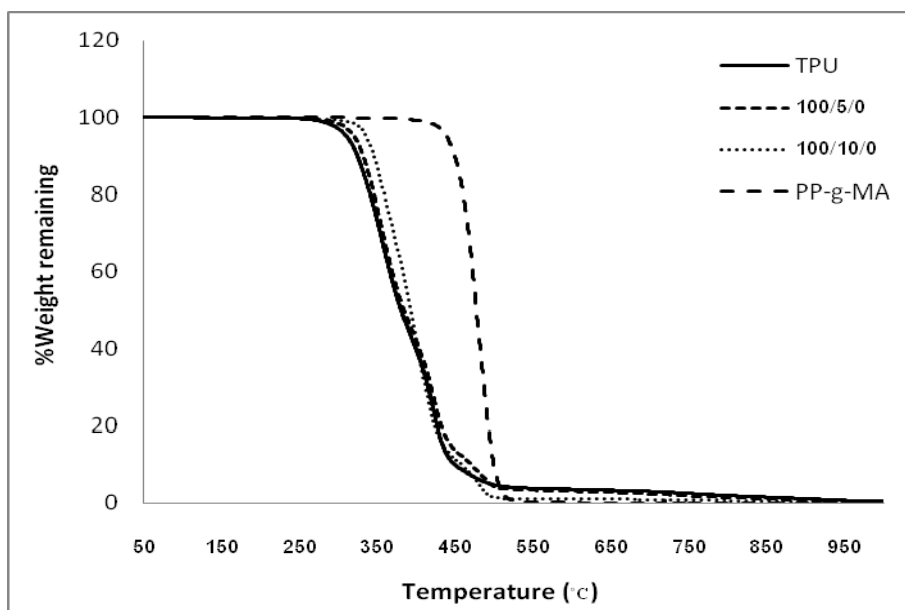
องค์ประกอบ (TPU/PP-g-MA)	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ยังสัมมอดุลัส (MPa)
100/0	23.1	2392	8.8
100/5	21.4	1882	17.0
100/10	20.7	1803	17.4

จากผลการทดสอบ พบว่า พอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนบริสุทธิ์ หากแต่ยังสัมผัสค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีความแข็งตึง (stiffness) และเสถียรภาพเชิงมิติ (dimensional stability) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งตึงและมอดุลัสสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ซึ่งส่งผลให้ทั้งความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมยังมีความยืดหยุ่นเหลืออยู่ โดยสังเกตจากการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานที่ยังมีค่าค่อนข้างสูง และการที่ความทนแรงดึงลดลงไม่มากนักอาจเนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง และการที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบมีความทนแรงดึงสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบในลำดับเดียวกัน อาจเนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ดีกว่านั่นเอง นอกจากนี้ พบว่า การใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 5 phr ทั้งที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบหรือฉีดแบบทำให้ชิ้นงานมีสมบัติด้านความทนแรงดึงโดยรวมดีกว่าการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 10 phr ดังนั้นจึงทำการเลือกพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เท่ากับ 100/5 ไปเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตต่อไป

4.2.2 เสถียรภาพทางความร้อน

รูปที่ 4.3 แสดงที่จีเอเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ในช่วงอุณหภูมิ 50-1000 องศาเซลเซียส และตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$) อุณหภูมิสลายตัว 50% ($T_{50\%}$) และเปอร์เซ็นต์ชาร์ (%char) ที่หาได้จากรูปที่ 4.3

จากตาราง พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนบริสุทธิ์ เนื่องจาก T_{onset} , $T_{end\ set}$ และ $T_{50\%}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่า พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีส่วนช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มี T_{onset} ที่ค่อนข้างสูง (453 องศาเซลเซียส) เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน



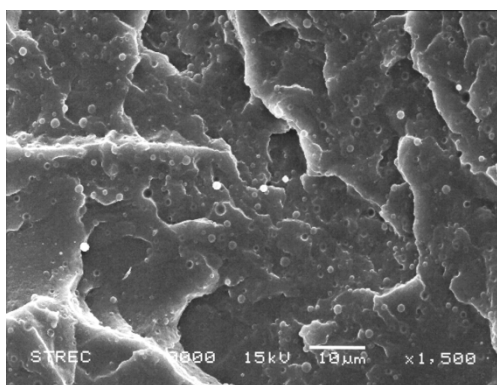
รูปที่ 4.3 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน พอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิเมอร์ผสม

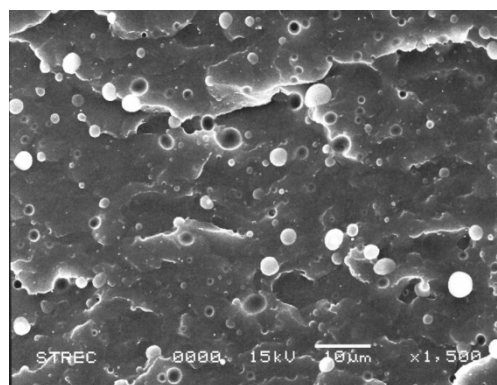
องค์ประกอบ (TPU/PP-g-MA)	T_{onset} (°C)	$T_{end set}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	% char
100/0/0	314	452	380	0.4
100/5/0	324	506	384	0.4
100/10/0	335	508	392	0.5

4.2.3 สันฐานวิทยา

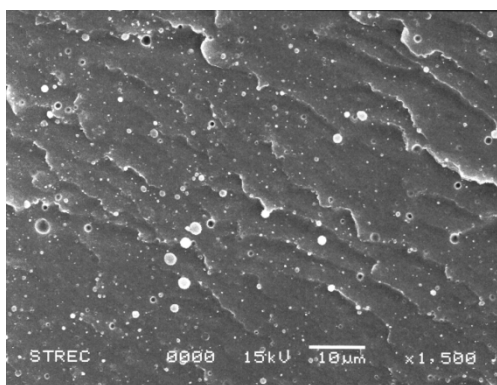
รูปที่ 4.4 แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ ซึ่งตรวจสอบจากรอยแตกหักของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500 เท่า



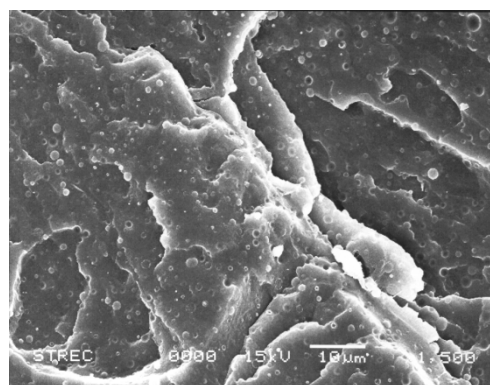
100/5/0 (compression)



100/10/0 (compression)



100/5/0 (injection)



100/10/0 (injection)

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ

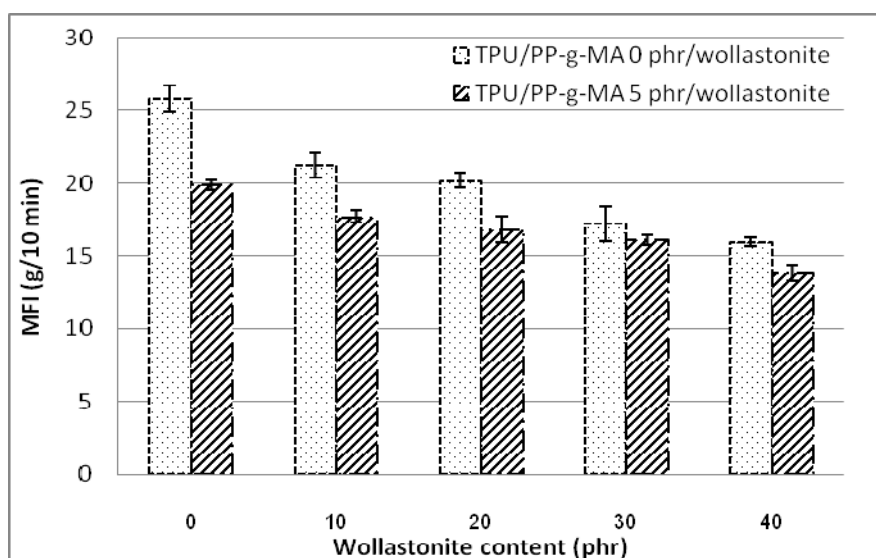
จากภาพถ่ายที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปแบบที่ 4.4 พบว่า อนุภาครูปทรงกลมของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ดีและสม่ำเสมอ แต่เมื่อปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มมากขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า รอยแตกหักของชิ้นงานมีลักษณะหยาบซึ่งแสดงถึงความยืดหยุ่นและอ่อนเหนียว (ductile) ของทั้งเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและพอลิเมอร์ผสม

4.3 สมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ผลจากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงได้นำพอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อัตราส่วน 100/5 ไปผสมกับโวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 phr โดยเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ กับคอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ

4.3.1 ดัชนีการหลอมไหล

เม็ดพลาสติกของคอมพอลิซของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์ทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ การใส่โวลลาสโทไนต์มีผลทำให้ดัชนีการหลอมไหลมีค่าลดลง เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้น โดยดัชนีการหลอมไหลมีค่าลดลงตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของโวลลาสโทไนต์และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ขัดขวางการเคลื่อนไหวของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลทำให้การกระจายตัวของโวลลาสโทไนต์ลดลง ถ้ากระบวนการขึ้นรูปมีแรงเฉือนต่ำ

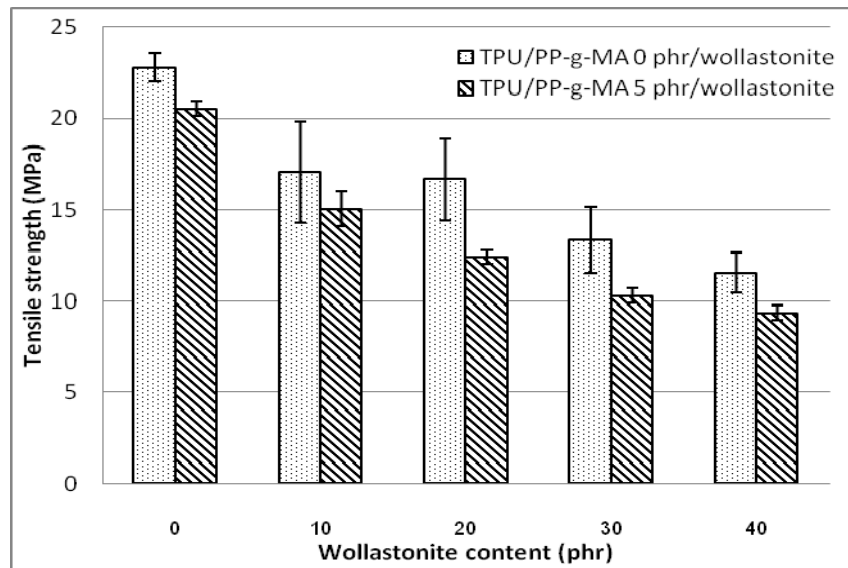


รูปที่ 4.5 ดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์คอมพอลิซทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

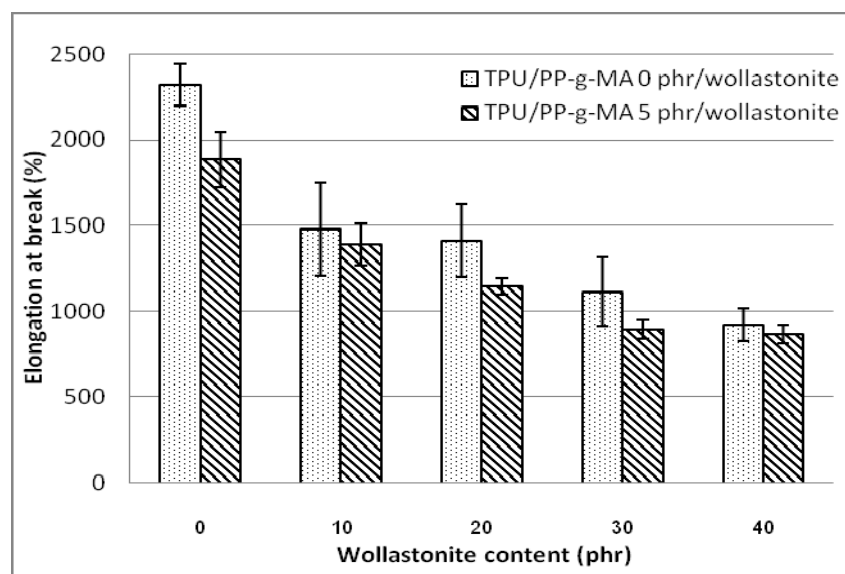
4.3.2 ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดูลัส

4.3.2.1 ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบ

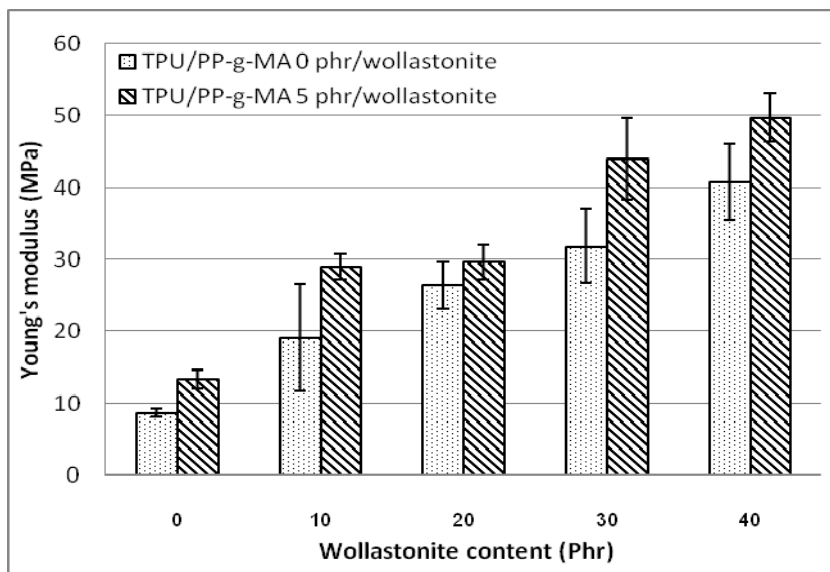
รูปที่ 4.6-4.8 แสดงค่าความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดูลัสของคอมพอลิซของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์ทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ



รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสไทต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ



รูปที่ 4.7 การยืดตัว ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสไทต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

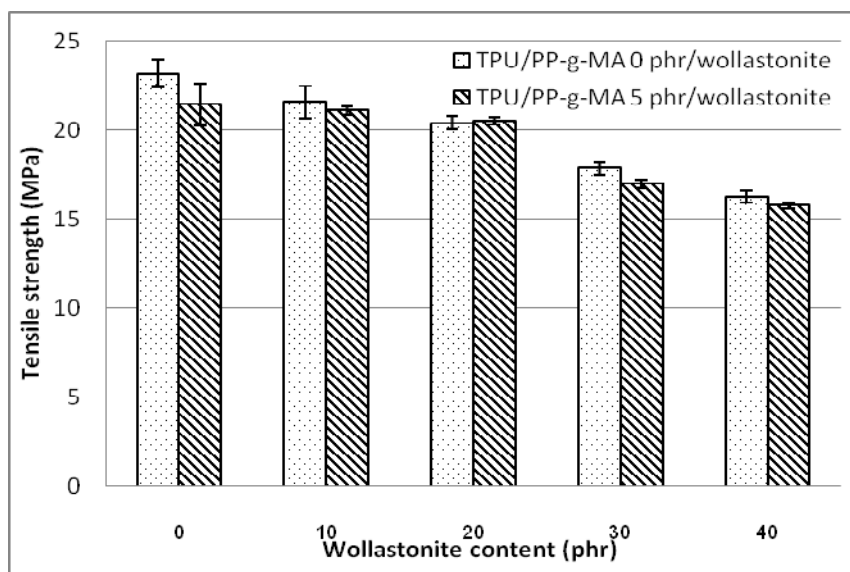


รูปที่ 4.8 ยังสัมมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

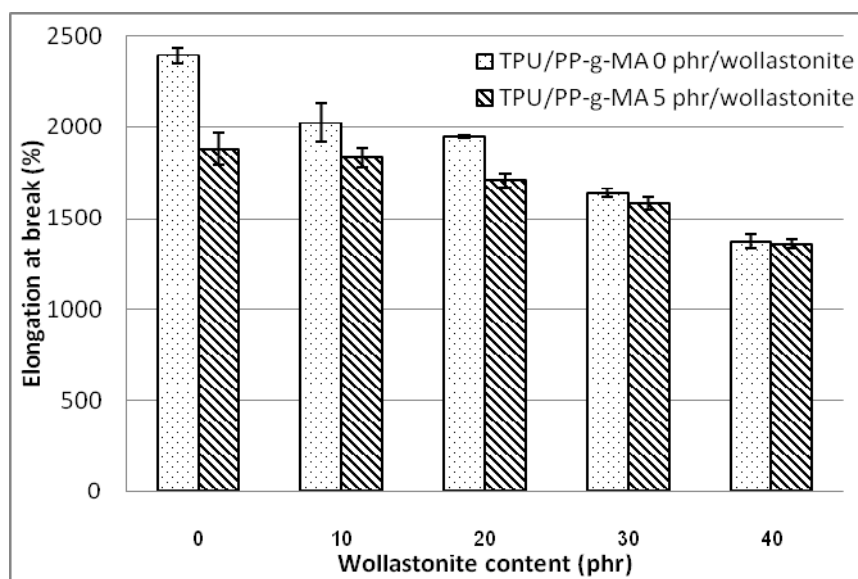
รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยคอมพอสิตที่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr มีความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และใส่โวลลาสโทไนต์ในลำดับเดียวกัน ส่วนรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่ายังสัมมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยคอมพอสิตที่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr มียังสัมมอดุลัสสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และใส่โวลลาสโทไนต์ในลำดับเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งดึงของทั้งพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และโวลลาสโทไนต์มีผลทำให้ความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตมีค่าลดลง ขณะที่ยังสัมมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.2.2 ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ

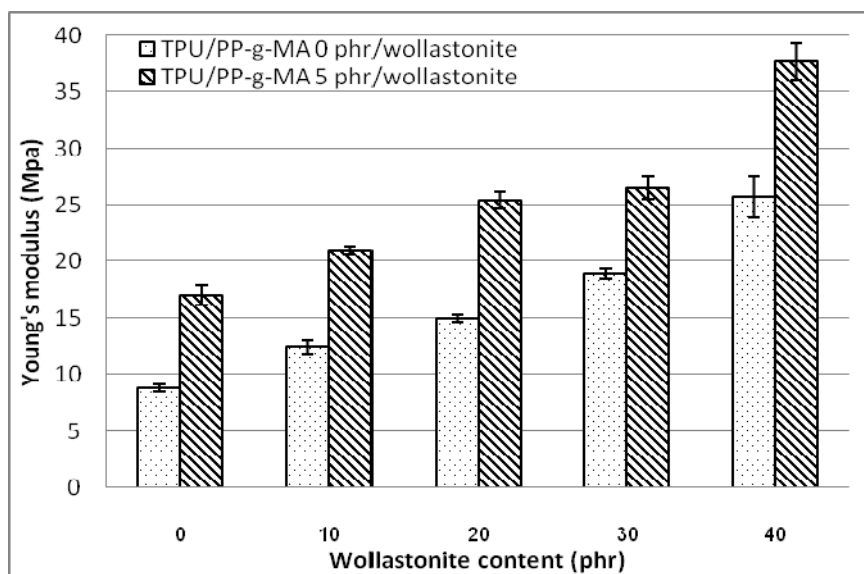
รูปที่ 4.9-4.11 แสดงความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดุลัสของคอมพอสิตของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสโทไนต์ทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสไทต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



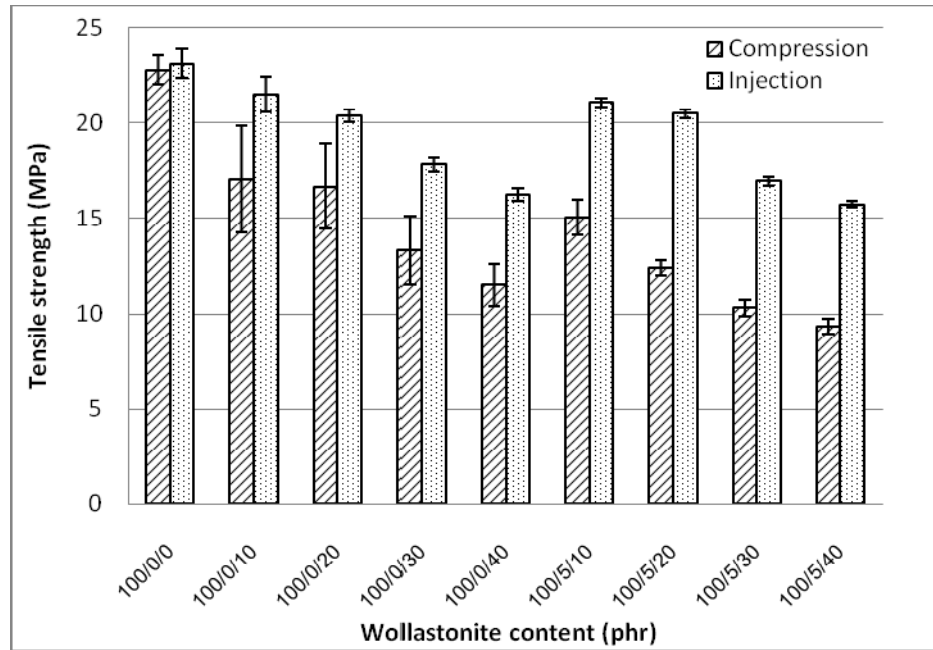
รูปที่ 4.10 การยืดตัว ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสไทต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



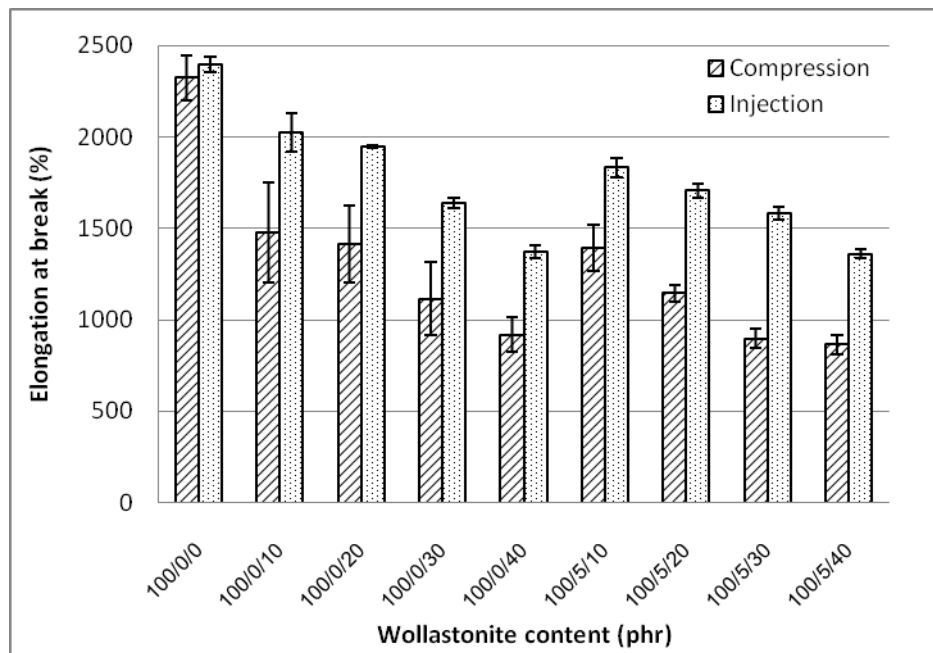
รูปที่ 4.11 ยังส์มอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสไทต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ

รูปที่ 4.9-4.11 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส์มอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โวลลาสไทต์คอมพอสิต ทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์มีแนวโน้มไปทางเดียวกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบมีค่ามากกว่าของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบในลำดับเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบทำให้ส่วนประกอบต่างๆ กระจายตัวในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ดีกว่ากระบวนการอัดแบบ นอกจากนี้ ยังส์มอดุลัสของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบมีค่าต่ำกว่าที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ ทั้งนี้อาจเนื่องจากโวลลาสไทต์กระจายตัวได้ไม่ดีจึงเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน และขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน [34] จึงมีผลทำให้มีมอดุลัสสูงกว่า และการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบจะมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ เนื่องจากแต่ละชิ้นงานจะมีการกระจายตัวของส่วนประกอบต่างๆ ที่สม่ำเสมอและเท่าๆ กัน

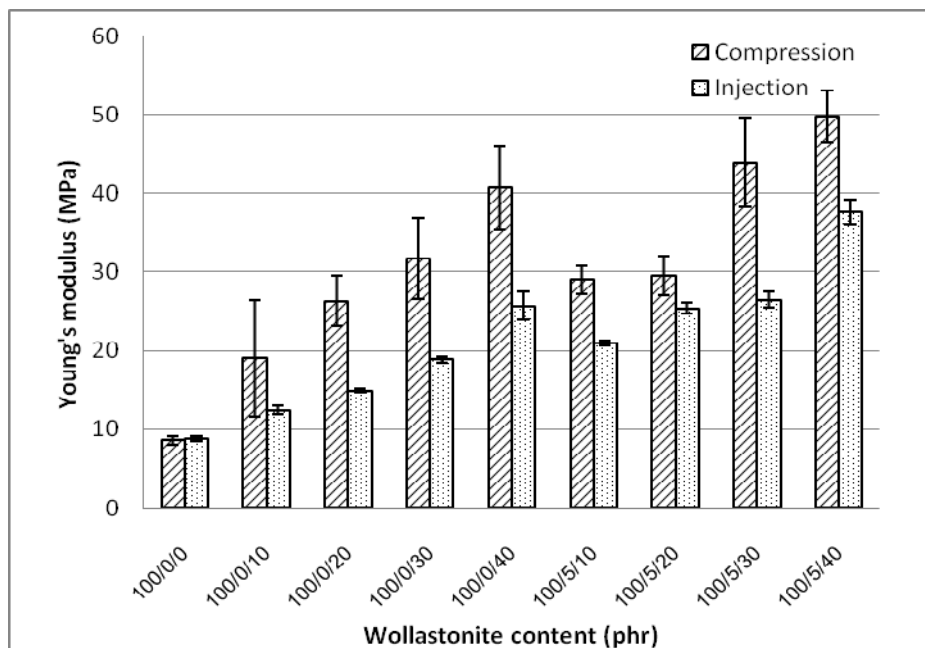
ผลของความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส์มอดุลัสเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปที่ต่างกัน แสดงการเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4.12-4.14



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการยืดตัว ณ จุดขาด ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ

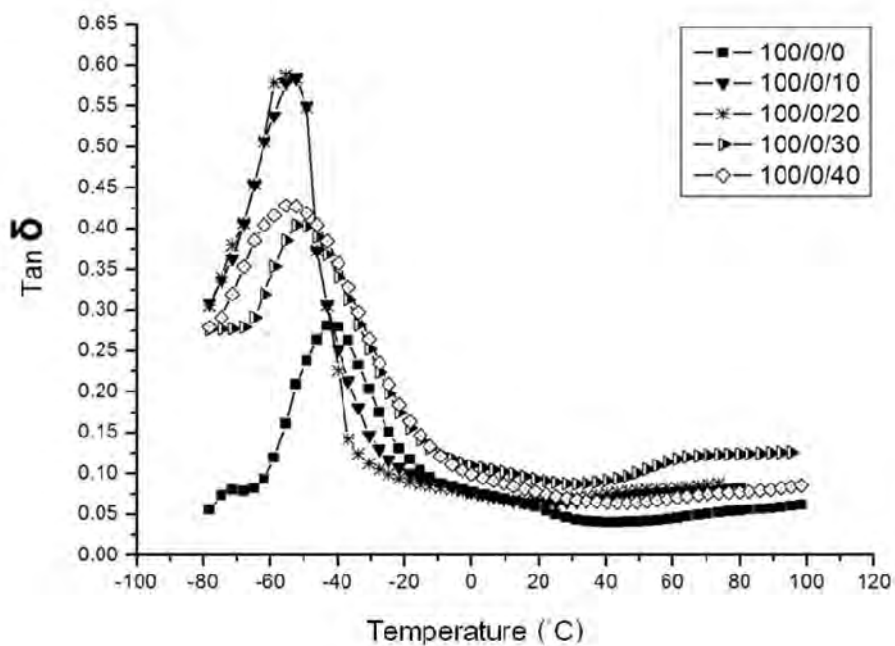


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่ายังส์มอดุลัสของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ

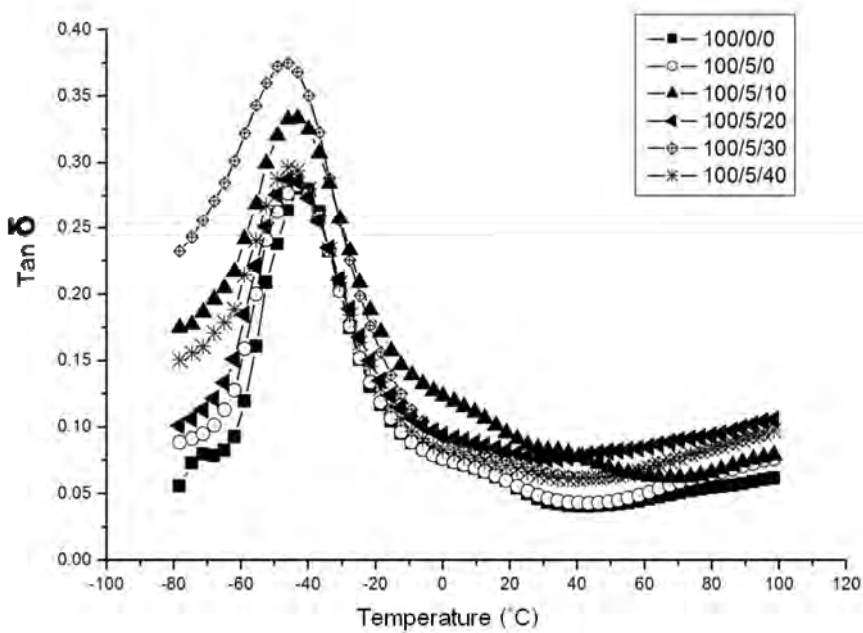
รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตกับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน พบว่า การขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่ต่างกัน ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติด้านความทนแรงดึงแตกต่างกัน เนื่องจากโพลลาสโตนต์มีอนุภาคเป็นรูปเข็มจึงเกิดการจัดเรียงตัวตามแนวที่ได้รับแรงจากกระบวนการฉีดแบบ และยังมีการกระจายตัวที่ดีกว่าอีกด้วย จึงไม่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และในทางกลับกัน รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบมีค่ายังส์มอดุลัสสูงกว่าที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ก็ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.3.3 สมบัติเชิงกลพลวัต

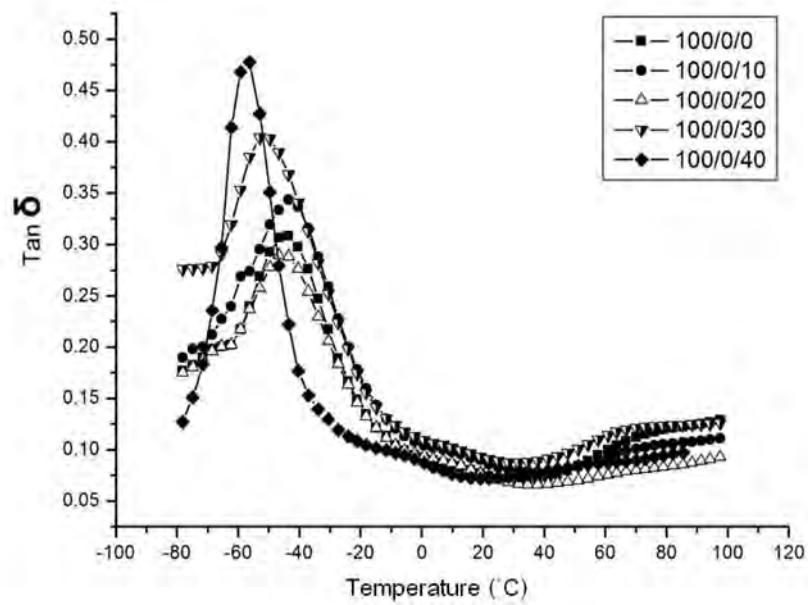
การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตเพื่อศึกษาหาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ ซึ่งวิเคราะห์จากแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$) ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในรูปที่ 4.15-4.18 และตารางที่ 4.4 และ 4.5



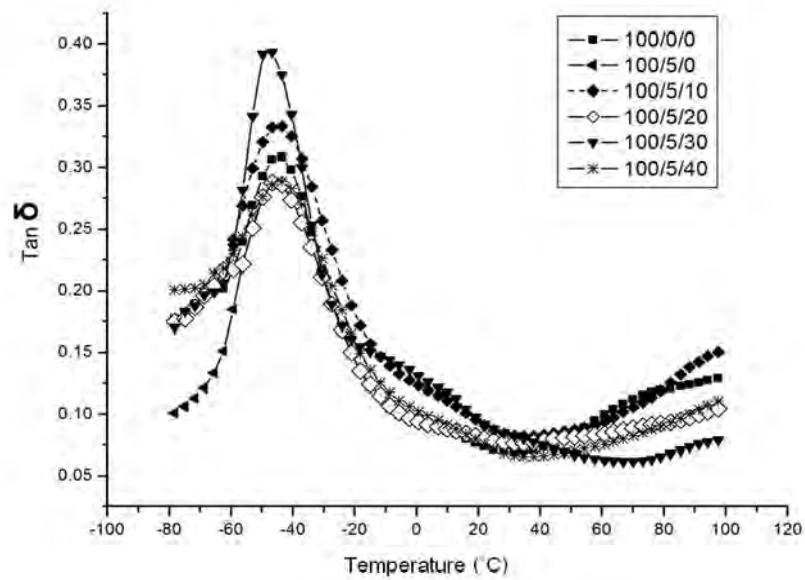
รูปที่ 4.15 แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอทิลีน/โพลีเอทิลีนคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบเป็นฟังก์ชันกับอนุหภูมิ



รูปที่ 4.16 แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอทิลีน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลีเอทิลีนคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบเป็นฟังก์ชันกับอนุหภูมิ



รูปที่ 4.17 แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลีเอพอกซีเรซินที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.18 แทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลีเอพอกซีเรซินที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วที่วิเคราะห์จากกราฟแทนเจนต์สูญเสีย
ของพอลิเมอร์คอมพอลสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

ส่วนประกอบ (TPU/PP-g-MA/Wollastonite)	อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (°C)
100/0/0	-44
100/0/10	-45
100/0/20	-48
100/0/30	-50
100/0/40	-52
100/5/0	-43
100/5/10	-45
100/5/20	-46
100/5/30	-46
100/5/40	-48

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วที่วิเคราะห์จากกราฟแทนเจนต์สูญเสีย
ของพอลิเมอร์คอมพอลสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ

ส่วนประกอบ (TPU/PP-g-MA/Wollastonite)	อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (°C)
100/0/0	-44
100/0/10	-40
100/0/20	-44
100/0/30	-52
100/0/40	-53
100/5/0	-43
100/5/10	-41
100/5/20	-42
100/5/30	-46
100/5/40	-44

รูปที่ 4.15 แสดงแทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนไนด์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการอบการอัดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ซึ่งจากความสูงของพิกแทนเจนต์สูญเสียพบว่า การใส่โพลลาสโตนไนด์ปริมาณ 30 phr ทำให้คอมพอสิตที่ได้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าที่ใส่โพลลาสโตนไนด์ปริมาณ 40 phr และที่ปริมาณ 10 และ 20 phr จะมีความสูงของพิกแทนเจนต์สูญเสียที่สูงกว่าเนื่องจากปริมาณที่น้อยเกินไปทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

รูปที่ 4.16 แสดงค่าแทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลลาสโตนไนด์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ซึ่งจากความสูงของพิกแทนเจนต์สูญเสียพบว่า การใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr ช่วยการกระจายตัวของโพลลาสโตนไนด์เมื่อใส่ในปริมาณมากในคอมพอสิตเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.17 แสดงแทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสโตนไนด์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการอบการฉีดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ซึ่งจากความสูงของพิกแทนเจนต์สูญเสียพบว่า การใส่โพลลาสโตนไนด์ปริมาณ 20 phr ทำให้คอมพอสิตที่ได้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าที่ใส่โพลลาสโตนไนด์ปริมาณ 10 phr (ปริมาณน้อยไปที่จะกระจายตัวสม่ำเสมอ) และปริมาณ 30 และ 40 phr (ปริมาณมากจนกระจายตัวได้ยากเพราะความหนืดที่เพิ่มขึ้น)

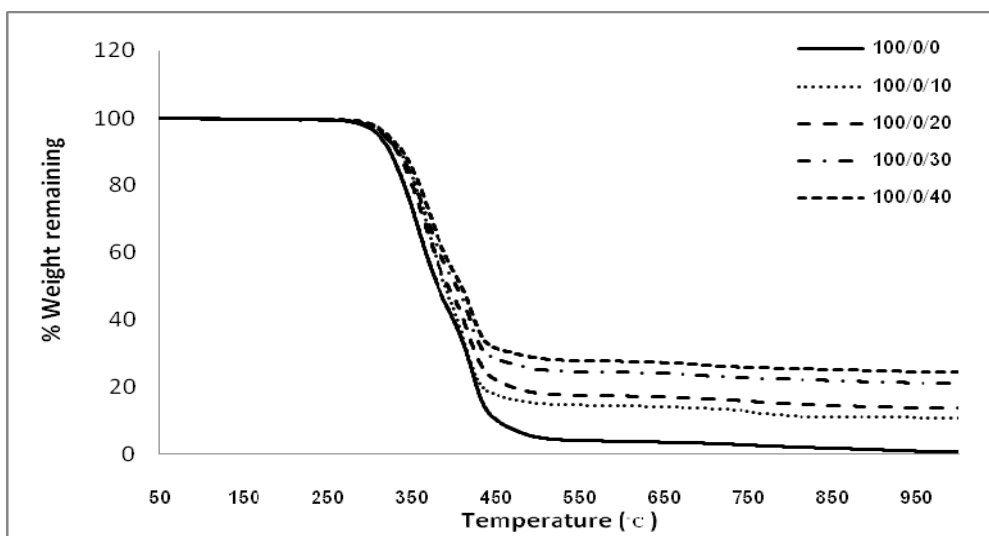
รูปที่ 4.18 แสดงค่าแทนเจนต์สูญเสียของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลลาสโตนไนด์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ซึ่งให้ผลไปในทำนองเดียวกับที่ขึ้นรูปด้วยการอบการอัดแบบ

ตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วของพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยการอบการอัดแบบมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณโพลลาสโตนไนด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงความยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ที่อุณหภูมิต่ำลง อาจเนื่องจากโครงข่ายของอนุภาครูปเข็มของโพลลาสโตนไนด์ที่ไม่จัดเรียงตัวมีปริมาตรอิสระ (free volume) ให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้มากขึ้น

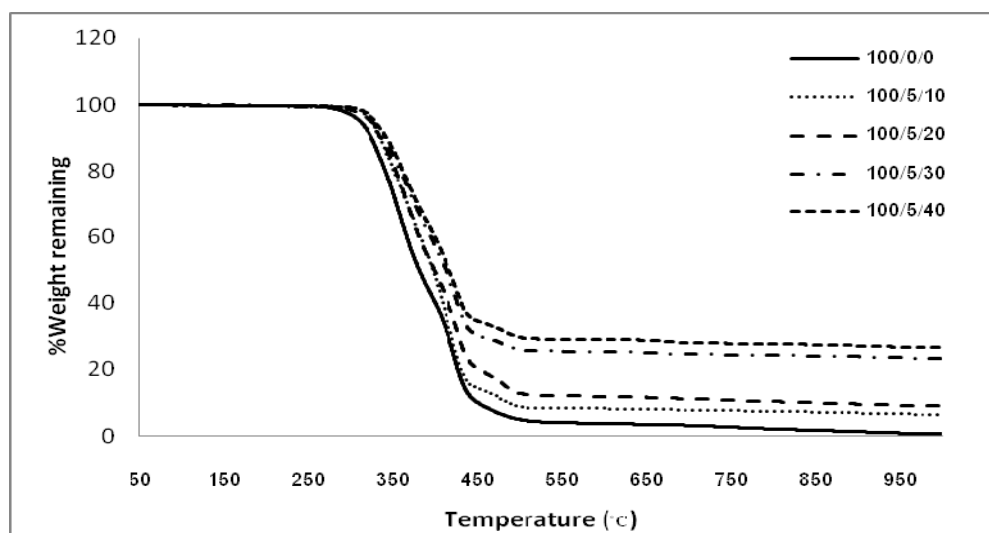
ตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วของพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยการอบการฉีดแบบมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะโพลลาสโตนไนด์มีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรจึงมีเนื้อแน่นกว่า แต่เมื่อปริมาณโพลลาสโตนไนด์เพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 40 phr อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกาะกลุ่มที่ทำให้การจัดเรียงตัวลดลงและปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น

4.3.4 เสถียรภาพทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ซึ่งเป็นการวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปของวัสดุพอลิเมอร์โดยการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิ 50-1000 องศาเซลเซียส แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 และ 4.20 และตารางที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$) อุณหภูมิสลายตัว 50% ($T_{50\%}$) และเปอร์เซ็นต์ชาร์ (%char) ที่หาได้จากรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ทีจีเอเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลีเอพอกซีเรซิน



รูปที่ 4.20 ทีจีเอเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรต์/โพลีเอพอกซีเรซิน

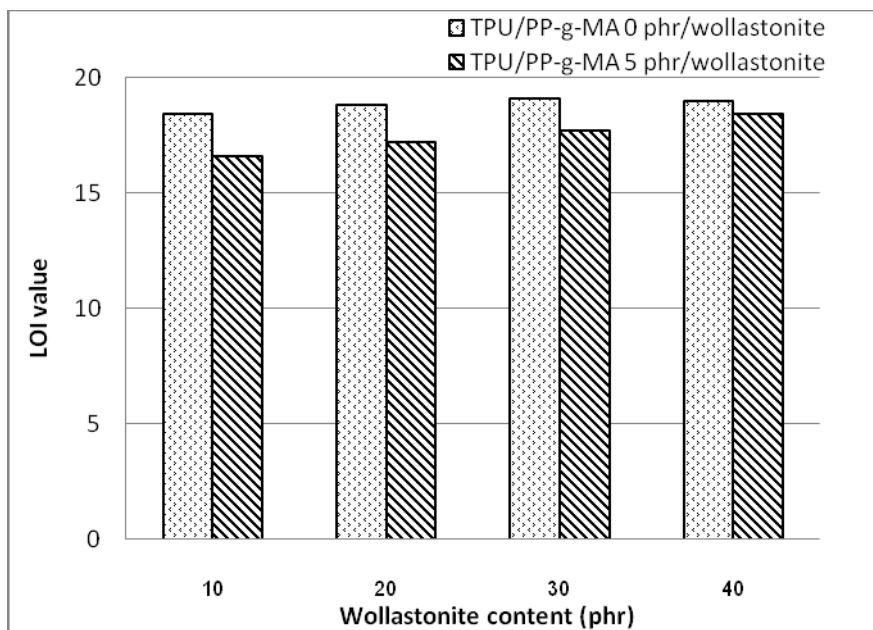
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิสลายตัวและเปอร์เซ็นต์ชาร์ของพอลิเมอร์คอมพอสิต

ส่วนประกอบ (TPU/PP-g-MA/Wollastonite)	T _{onset} (°C)	T _{end set} (°C)	T _{50%} (°C)	Char (%)
100/0/0	314	452	380	0.4
100/0/10	324	443	389	10.6
100/0/20	327	447	393	13.7
100/0/30	328	452	402	21.0
100/0/40	333	456	408	24.3
100/5/0	324	506	384	0.4
100/5/10	326	508	396	6.5
100/5/20	328	509	398	9.3
100/5/30	329	513	412	23.4
100/5/40	330	523	416	26.6

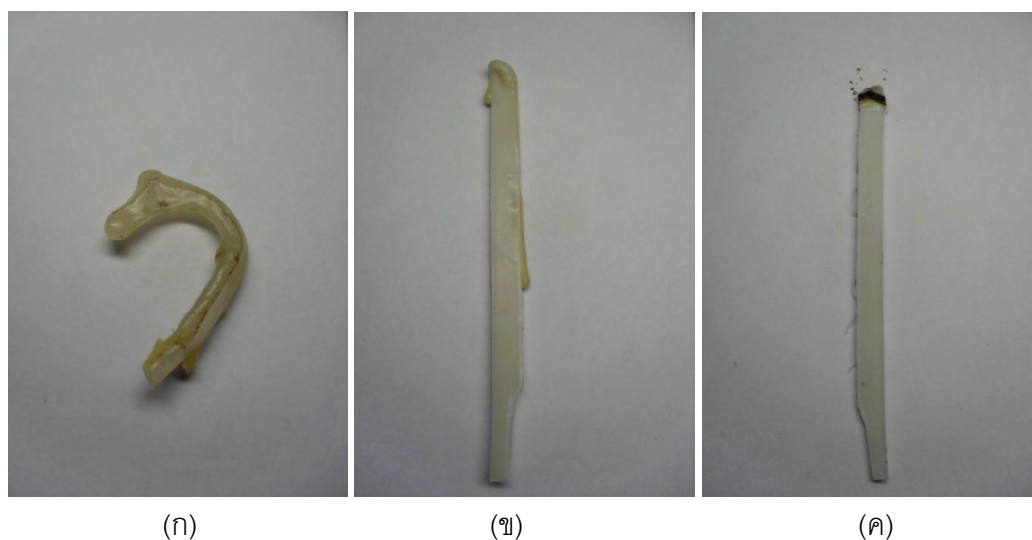
รูปที่ 4.19 และ 4.20 และตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิเริ่มสลายตัว อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว อุณหภูมิสลายตัว 50% และเปอร์เซ็นต์ชาร์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโวลลาสโทไนต์เป็นสารตัวเติมสารอนินทรีย์ที่ทนความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์

4.3.5 ดัชนีออกซิเจนจำกัด

ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิเมอร์คอมพอสิตถูกตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2863-06a ซึ่งเป็นปริมาณร้อยละของออกซิเจนต่ำสุดในภาวะบรรยากาศผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจนที่ทำให้วัสดุสามารถลุกไหม้ในแนวตั้งอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.21 และลักษณะของชิ้นงานภายหลังการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิเมอร์คอมพอสิต



(ก)

(ข)

(ค)

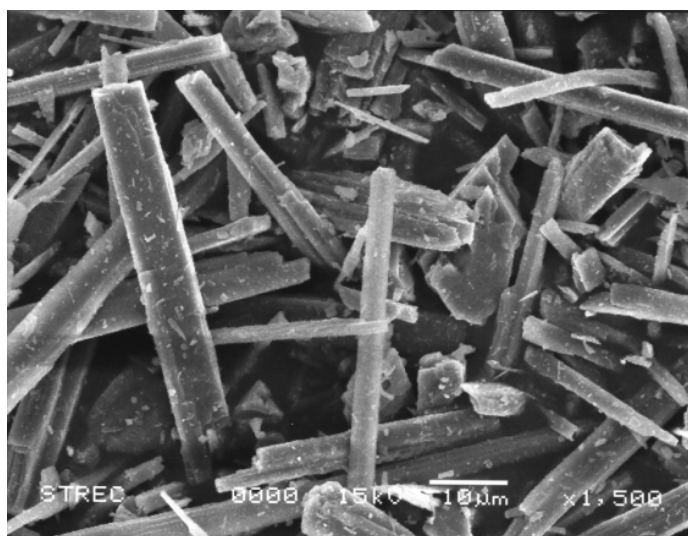
รูปที่ 4.22 ลักษณะชิ้นงานภายหลังการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของ

(ก) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (ข) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/โพลลาสไทน์คอมพอสิต และ (ค) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิไพโรฟีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลลาสไทน์คอมพอสิต

จากการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด พบว่า ชี้นงานของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนไม่สามารถหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดได้ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเมื่อติดไฟจะเกิดการลุกไหม้ หลอมและลามลงด้านล่างอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.22(ก) และเมื่อเติมโพลีเอทิลีนเข้าไปในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีผลทำให้ดัชนีออกซิเจนจำกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อติดไฟจะเกิดการหลอมหยุดแต่ไม่เกิดการลามไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.22(ข) เช่นเดียวกับเมื่อใส่โพลีเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรต์ในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ทำให้ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเหนี่ยวนำให้เกิดชาร์ปคอลลุมผิวของชี้นงานที่เกิดการลุกไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.22(ค) ซึ่งป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสกับผิวของชี้นงานทำให้ชี้นงานดับไฟได้เร็วกว่าและไม่เกิดการหลอมหยุด

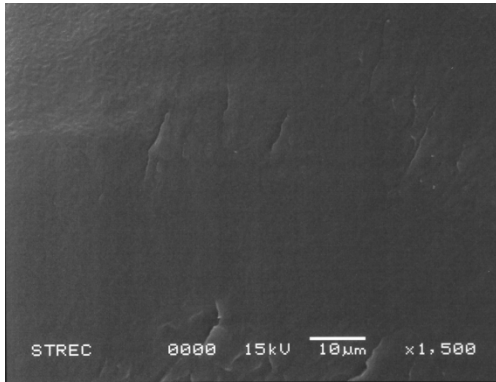
4.3.6 สัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.23 แสดงสัณฐานวิทยารูปเข็มของโพลีเอทิลีนซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500 เท่า

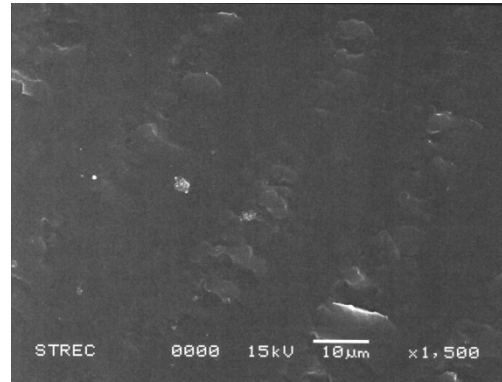


รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยารูปเข็มของโพลีเอทิลีน

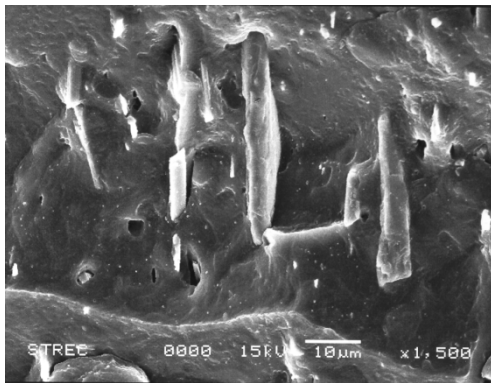
รูปที่ 4.24 แสดงสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรต์/โพลีเอทิลีนคอมพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500 เท่า



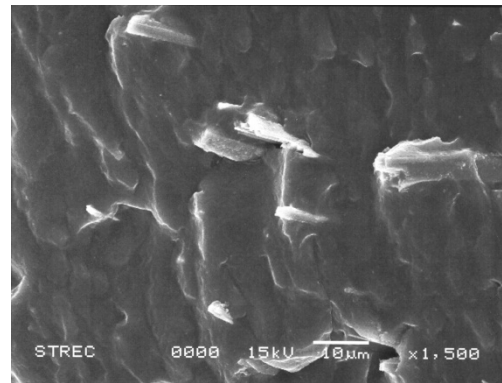
100/0/0 (compression)



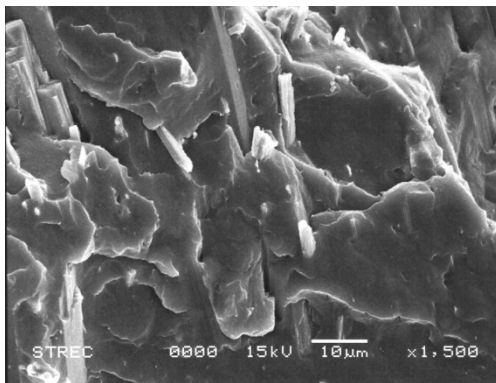
100/0/0 (injection)



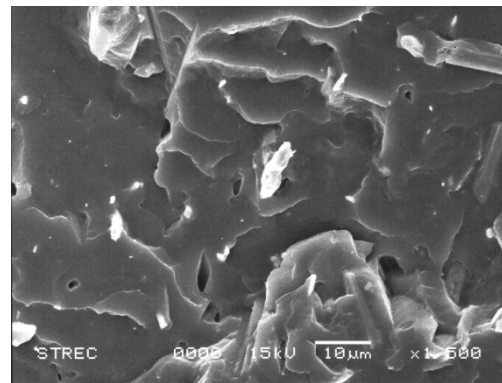
100/0/10 (compression)



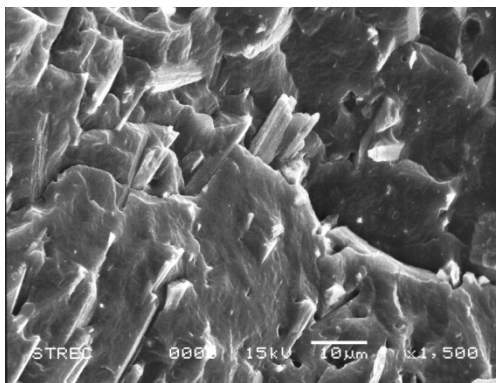
100/0/10 (injection)



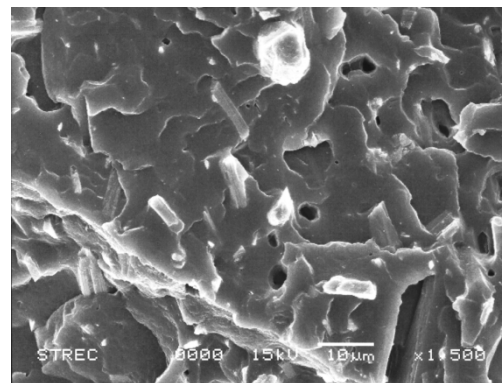
100/0/20 (compression)



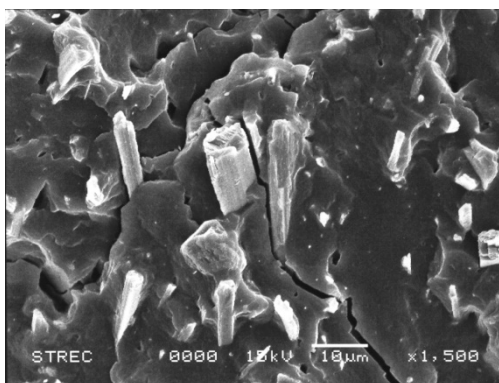
100/0/20 (injection)



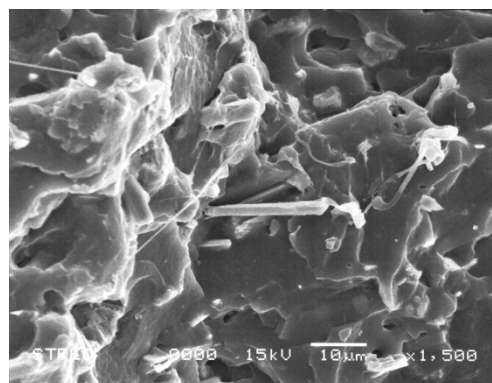
100/0/30 (compression)



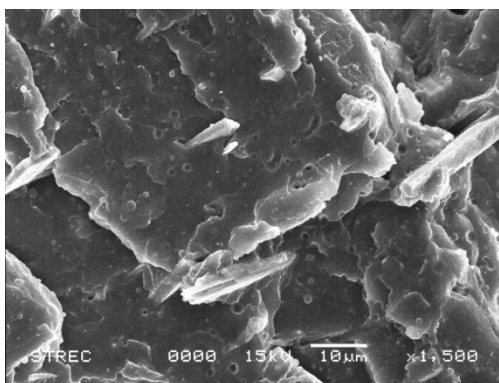
100/0/30 (injection)



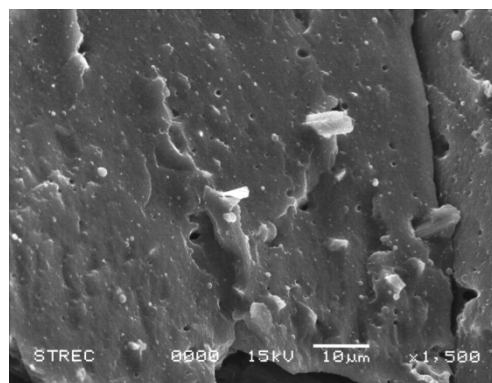
100/0/40 (compression)



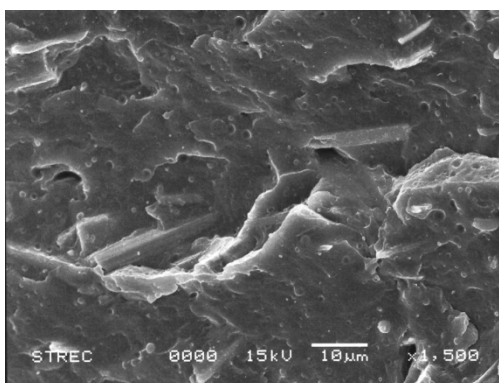
100/0/40 (injection)



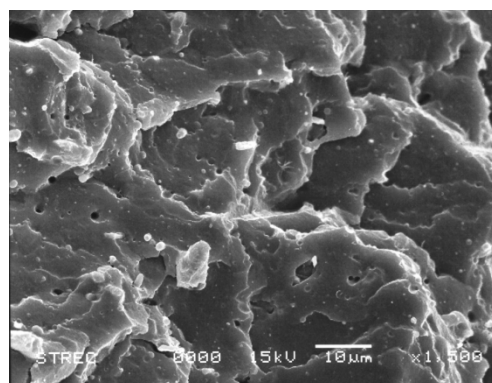
100/5/10 (compression)



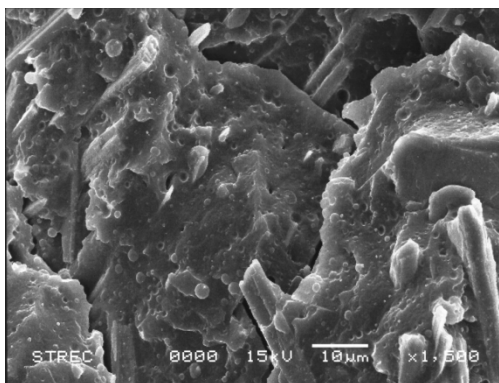
100/5/10 (injection)



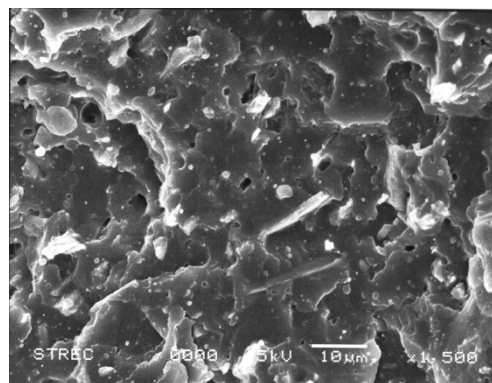
100/5/20 (compression)



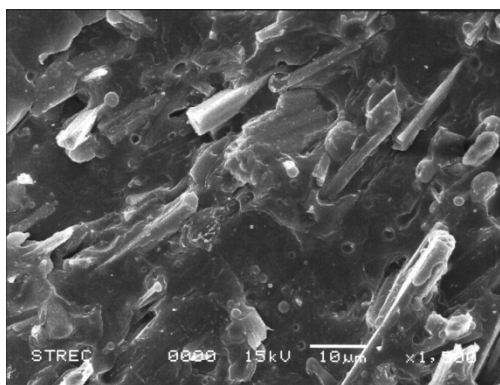
100/5/20 (injection)



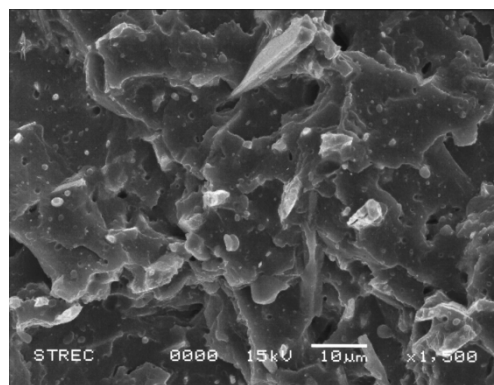
100/5/30 (compression)



100/5/30 (injection)



100/5/40 (compression)



100/5/40 (injection)

รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบและฉีดแบบ

รูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่า พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และโพลลาสโทไนต์กระจายตัวในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ดี เนื่องจากสภาพมีขั้วที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวยังขึ้นกับปริมาณและกระบวนการขึ้นรูปอีกด้วย โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบทำให้โพลลาสโทไนต์มีการกระจายตัวและจัดเรียงตัวในหลายทิศทาง ส่วนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ พบว่า โพลลาสโทไนต์มีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องมือ (machine direction, MD) จึงส่งผลทำให้มีสมบัติเชิงกลแตกต่างจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบด้านความทนแรงดึง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่า พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง แต่ทำให้ยังสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาสมบัติโดยรวม พบว่า ปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต คือ 5 phr

5.1.2 การศึกษาสมบัติด้านความทนแรงดึงของคอมพอสิตระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โพลลาสโตน พบว่า พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง แต่ยังสัมผัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณโพลลาสโตนที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 กระบวนการขึ้นรูปมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบมีสมบัติด้านความทนแรงดึงดีกว่าที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

5.1.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่า การใส่โพลลาสโตนในคอมพอสิตปริมาณน้อยหรือมากเกินไปทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และส่งผลทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าต่ำลง ซึ่งการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ช่วยให้การกระจายตัวของโพลลาสโตนในคอมพอสิตดีขึ้นเมื่อใส่ในปริมาณมาก

5.1.5 การใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ไม่มีผลทำให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตเปลี่ยนแปลง แต่การใส่โพลลาสโตนมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

5.1.6 จากการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด พบว่า ชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนไม่สามารถหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดได้ และเมื่อเติมโพลลาสโตนเข้าไปในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีผลทำให้ดัชนีออกซิเจนจำกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อติดไฟจะเกิดการหลอมหยดแต่ไม่เกิดการลามไฟ และถ้าใส่โพลลาสโตนในพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้ดัชนีออกซิเจนจำกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และทำให้ชิ้นงานดับไฟได้เร็วกว่าและไม่เกิดการหลอมหยด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีความหนืดต่ำเกินไปไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ ทำให้พอลิเมอร์ไหลออกมาจากจิ้งแข็งและอุดตันหัวฉีด จึงควรผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น หรือใส่สารตัวเติมลงไป จะทำให้ความหนืดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสูงขึ้นและเหมาะกับการขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ

5.2.2. การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอลิเตอจใช้สารตัวเติมอื่นๆ เพื่อปรับปรุงค่าความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอลิเตอให้สูงขึ้น เช่น มอนต์มอริลโลไนต์

รายการอ้างอิง

- [1] Lu,Q.W. and Macosko,C.W. Comparing the compatibility of various functionalized polypropylenes with thermoplastic polyurethane (TPU), Polymer, 45 (2004): 1981-1991
- [2] Merquinsa. What's a polyurethane (Online). Available from:<http://www.merquinsa.com/whats/whatsaPU.pdf>, (2011, March 6).
- [3] Poliuretanos. Correlations between structure and properties (Online). Available from: <http://www.poliuretanos.com.br/Ingles/Chapter1/17Correlations.htm>, (2011, April 11).
- [4] Oertel G. Polyurethane Handbook. 2nd ed. 1, Munich, Vienna, New York: Hanser, 1993.
- [5] Wikimedia commons. Methylene diphenyl diisocyanate (Online). Available from: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:4,4%27methylene_diphenyl_diisocyanate.svg, (2011, January 31).
- [6] Wikidoc. Index of images (Online). Available from: <http://www.wikidoc.org/images/8/86/1,4-butanediol.png>, (2010, October 14).
- [7] LookChem. Polypropylene glycol (Online). Available from: <http://www.lookchem.com/Polypropylene-Glycol/>, (2010, October 14).
- [8] Wikipedia. Bestand:Poly(tetramethylene ether)glycol (Online). Available from: [http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand: Poly\(tetramethylene_ether\)glycol.png](http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Poly(tetramethylene_ether)glycol.png), (2010, October 14).
- [9] Polysciences Company. Polymers (Online). Available from: http://www.polysciences.com/Catalog/epartment/Product/98/categoryId_303/productId_737/, (2010, October 10).
- [10] Oertel,G. Polyurethane Handbook. 2nd ed. Volume 3, Munich, Vienna, New York: Hanser, 1993.
- [11] ชัยวัฒน์ เชนวานิชย์. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ โอเอสพริ้นติ้งเฮาส์, 2527.
- [12] Wikipedia. Polypropylene (Online). Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>, (2010,January 31)

- [13] เรขา จรัสตระกูล. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคการผสมแบบรีแอกทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [14] Missouri University of Science and Technology. The Notes for Polymer and Coatings Science-Chapter Three (Online). Available from : <http://web.mst.edu/~wlf/chem381/chap32.html>, (2010, July 27).
- [15] Chester,E. and Claff,Jr. A Translator's Guide to Organic Chemical Nomenclature Part XII (Online). Available from: <http://translationjournal.net/journal//05org.htm>, (2011 March 9).
- [16] Wikipedia. Maleic anhydride (Online). Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Maleic_anhydride, (2011, February 6).
- [17] Institute of Applied Synthetic Chemistry Vienna University of Technology. Reactive Extrusion (Online). Available from: http://otech7.tuwien.ac.at/reaktiv_sk_e.html, (2010, July 27).
- [18] พิไลลักษณ์ พิทยอภิพล และภคณมน หงวนไธสง. การเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/ทัลก์/แมกนีเซียมออกไซด์ฟิล์ม.โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [19] R.T. Vanderbilt Company. Mineral Fillers for Rubber and Plastics (Online). Available from: <http://www.rtvanderbilt.com/FillersIntroWeb.pdf>, (2011, March 9).
- [20] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [21] Robinson,S. (Business Development Manager-Minerals). High Performance Fillers 2006 (Online). Available from: <http://www.rtvanderbilt.com/>, (2011, March 6).
- [22] พนิดา แสงสว่าง และพุลลิสรี รัตนนิมมกุล. การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงปอสเตอร์ชนิดไม่ยึดตัวกับแร่วอลลาสไตน์.โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [23] Wikimedia Commons. Wollastonite (Online). Available from: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wollastonite_a_%2B_c.png?uselang=de, (2011, March 5).
- [24] The European Specialty Minerals Association. (Member of IMA-Europe). Wollastonite (Online). Available from: www.ima-eu.org, (2010, September 20).
- [25] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ (Online). Available from:

- http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=169&Itemid=178, (2011, March 7).
- [26] Charles Sturt University. (Engineering Studies). Manufacturing with Polymers (Online). Available from: http://hsc.csu.edu.au/engineering_studies/transport/3059/manuf_polymer.html, (2011, March 8).
- [27] มัณฑนา โอภาสประภาสิต. Polymer Processing. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา กระบวนการผลิตพอลิเมอร์. 2550.
- [28] เจริญ นาคะสวรรค. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์นิติธรรม, 2542.
- [29] PlasticTech. Injection Molding Machine and Tolling (Online). Available from: <http://www.plasticstech.info/equipment/injection-molding-machine/>, (2011, March 9).
- [30] รัชนา สิริสุข. Injection Molding. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชากระบวนการผลิตพอลิเมอร์. 2550
- [31] Singh,U.P., Biswas,B.K. and Ray,B.C. Evaluation of mechanical properties of polypropylene filled with wollastonite and silicon rubber, Materials Science and Engineering A, 501 (2009): 94-98.
- [32] Di,Y., Kang,M., Zhao,Y., Yan,S. and Wang,X. Morphology and mechanical properties of blends of thermoplastic polyurethane and polyolefins, Journal of Applied Polymer Science, 99 (2006): 875-883.
- [33] Pinto,U.A., Visconte,L.L.Y., Gallo,J. and Nunes,R.C.R. Flame retardancy in thermoplastic polyurethane elastomers (TPU) with mica and aluminium trihydrate(ATH), Polymer Degradability and Stability, 69 (2000): 257-260.
- [34] Rao,K.H., Forssberg,K.S.E. and Forsling,W. Interfacial interactions and mechanical properties of mineral filled polymer composites: wollastonite in PMMA polymer matrix, Colloids and Surfaces, 133 (1998): 107-117.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ดัชนีการหลอมไหล

ตารางก-1 ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต

TPU	Melt flow index (g/10 min)
	24.96
	26.87
	26.63
	25.81
	24.87
Average	25.83
SD	0.92

TPU/PP-g-MA	Melt flow index (g/10 min)
100/5	19.74
	19.54
	20.35
	20.14
	19.72
Average	19.90
SD	0.33

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/0/10	20.66
	22.51
	20.24
	21.55
	21.28
Average	21.25
SD	0.87

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/0/20	19.55
	20.73
	20.74
	20.10
	19.87
Average	20.20
SD	0.53

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/0/30	18.11
	18.45
	15.93
	15.86
	17.74
Average	17.22
SD	1.23

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/0/40	15.78
	16.14
	15.59
	15.96
	16.45
Average	15.98
SD	0.33

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/5/10	17.45
	18.43
	17.31
	17.79
	17.55
Average	17.71
SD	0.44

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/5/20	16.86
	17.28
	17.28
	15.27
	17.42
Average	16.82
SD	0.89

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/5/30	15.66
	16.50
	16.36
	16.24
	15.94
Average	16.14
SD	0.34

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Melt flow index (g/10 min)
100/5/40	14.71
	13.39
	13.29
	14.17
	13.66
Average	13.84
SD	0.59

ภาคผนวก ข
สมบัติด้านความทนแรงดึง

ตารางข-1 สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบ

TPU	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
	21.92	2180.80	8.55
	23.31	2395.20	8.09
	23.24	2391.90	9.20
Average	22.82	2322.63	8.61
SD	0.78	122.84	0.56

TPU/PP-g-MA	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5	20.11	1705.40	13.20
	20.54	2013.30	14.61
	20.94	1930.70	12.07
Average	20.53	1883.13	13.29
SD	0.41	159.37	1.27

TPU/PP-g-MA	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/10	14.21	1298.10	14.20
	19.97	1972.30	14.76
	18.31	1773.70	14.57
Average	17.49	1681.37	14.51
SD	2.96	346.45	0.28

ตารางข-2 สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบ

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/10	17.90	1547.90	26.54
	19.34	1707.10	11.73
	13.95	1178.30	18.95
Average	17.06	1477.77	19.07
SD	2.79	271.29	7.41

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/20	19.25	1659.40	26.03
	15.60	1278.80	29.74
	15.20	1301.70	23.30
Average	16.68	1413.30	26.35
SD	2.23	213.44	3.23

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/30	14.44	1212.00	37.41
	14.37	1246.70	27.32
	11.26	882.38	30.60
Average	13.36	1113.69	31.78
SD	1.81	201.07	5.15

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/40	11.62	890.48	35.22
	10.41	841.98	45.73
	12.60	1025.60	41.52
Average	11.54	919.35	40.82
SD	1.10	95.15	5.29

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/10	15.39	1346.60	28.98
	15.79	1531.60	27.27
	14.00	1296.80	30.83
Average	15.06	1391.67	29.03
SD	0.94	123.72	1.78

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/20	12.83	1114.70	27.11
	12.34	1197.40	32.04
	12.05	1123.00	29.62
Average	12.41	1145.03	29.59
SD	0.40	45.54	2.46

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/30	10.53	910.64	48.31
	10.57	938.49	46.03
	9.85	837.11	37.55
Average	10.32	895.41	43.96
SD	0.41	52.38	5.67

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/40	9.34	923.75	49.65
	8.96	820.33	46.59
	9.79	856.00	53.13
Average	9.36	866.69	49.79
SD	0.42	52.53	3.27

ตารางข-3 สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ

TPU	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
	23.87	2350.50	8.48
	22.32	2435.20	8.95
	23.25	2391.90	9.13
Average	23.15	2392.53	8.85
SD	0.78	42.35	0.33

TPU/PP-g-MA	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5	20.10	1945.00	16.16
	22.13	1920.70	17.00
	22.11	1780.90	17.83
Average	21.45	1882.20	17.00
SD	1.17	88.57	0.84

TPU/PP-g-MA	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/10	20.62	1843.10	17.94
	21.94	1863.50	16.54
	19.44	1703.20	17.86
Average	20.67	1803.27	17.45
SD	1.25	87.26	0.78

ตารางข-4 สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/10	21.47	2016.50	11.90
	22.54	2130.80	13.06
	20.67	1922.00	12.46
Average	21.56	2023.10	12.47
SD	0.94	104.56	0.58

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/20	20.68	1958.30	15.24
	20.51	1942.00	15.00
	20.00	1943.90	14.64
Average	20.39	1948.07	14.96
SD	0.35	8.91	0.30

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/30	17.58	1617.20	19.06
	17.73	1632.50	18.42
	18.28	1666.80	19.23
Average	17.87	1638.83	18.90
SD	0.37	25.40	0.43

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/0/40	16.43	1352.10	27.76
	15.90	1352.80	25.30
	16.49	1414.20	24.14
Average	16.28	1373.03	25.73
SD	0.33	35.65	1.85

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/10	20.92	1894.40	20.69
	21.01	1805.20	21.14
	21.38	1800.10	21.27
Average	21.10	1833.23	21.03
SD	0.25	53.03	0.31

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/20	20.40	1717.80	24.55
	20.77	1739.80	25.93
	20.37	1664.90	25.80
Average	20.51	1707.50	25.42
SD	0.22	38.50	0.76

TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/30	17.19	1564.30	27.19
	17.00	1557.00	25.34
	16.74	1619.00	27.04
Average	16.98	1580.10	26.52
SD	0.23	33.89	1.03

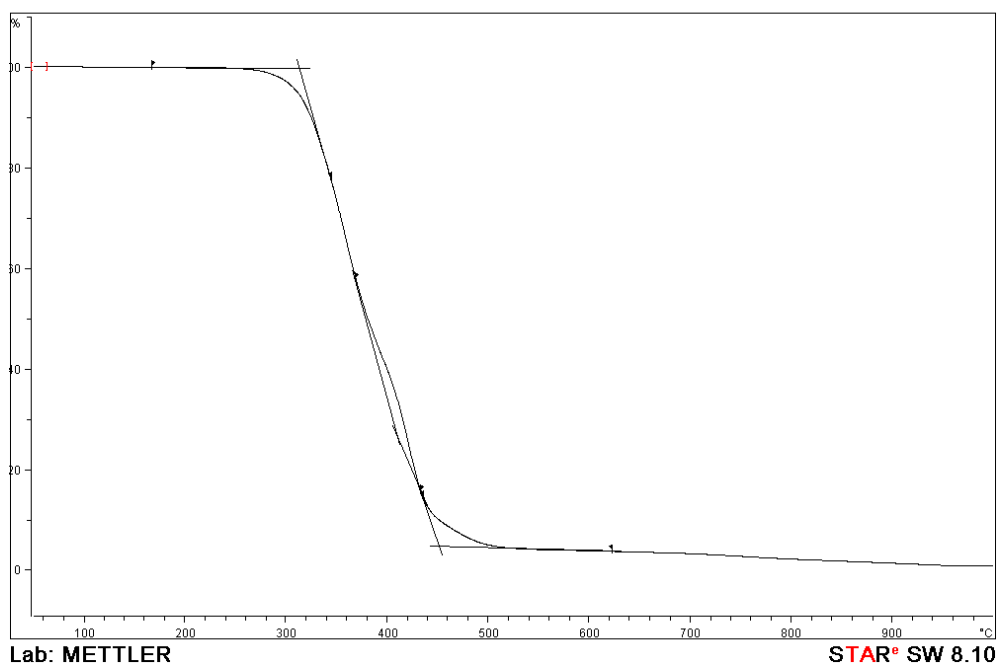
TPU/PP-g-MA/ Wollastonite	Tensile Strength (MPa)	Elongation @ Break (%)	Young's Modulus (MPa)
100/5/40	15.90	1360.60	35.85
	15.57	1335.90	38.90
	15.83	1382.70	38.31
Average	15.77	1359.73	37.69
SD	0.17	23.41	1.62

ภาคผนวก ค
อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของคอมพอสิต

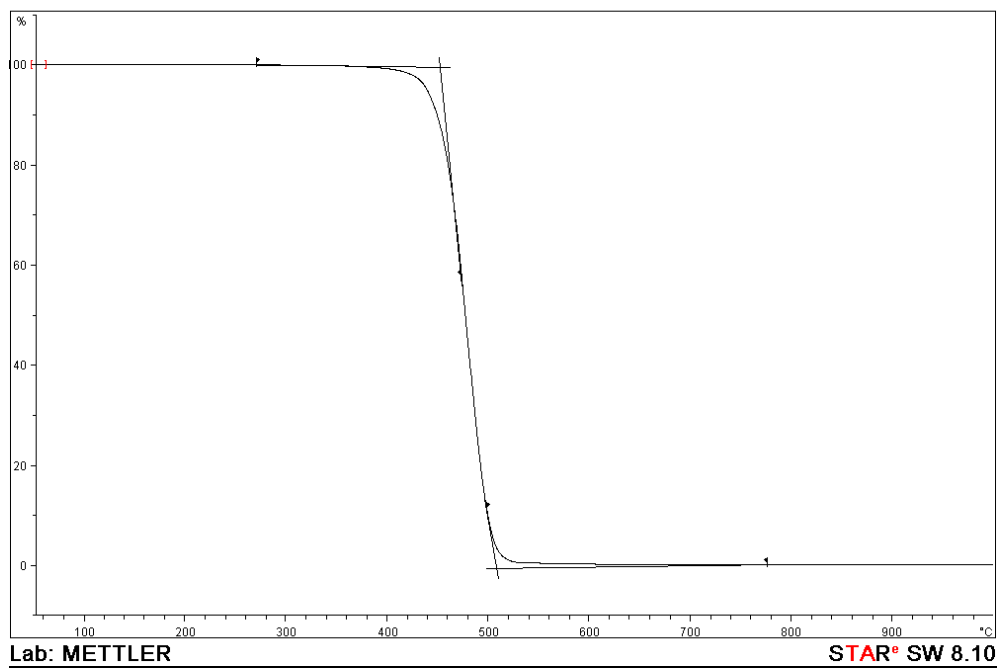
ตารางค-1 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิต

Composition (TPU/PP-g-MA/wollastonite)	อุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัว (T_d , °C)		
	I	II	III
100/0/0	314	410	-
100/0/10	324	423	-
100/0/20	327	425	-
100/0/30	328	427	-
100/0/40	333	436	-
100/5/0	324	417	470
100/5/10	326	432	474
100/5/20	328	437	476
100/5/30	329	438	477
100/5/40	330	440	484

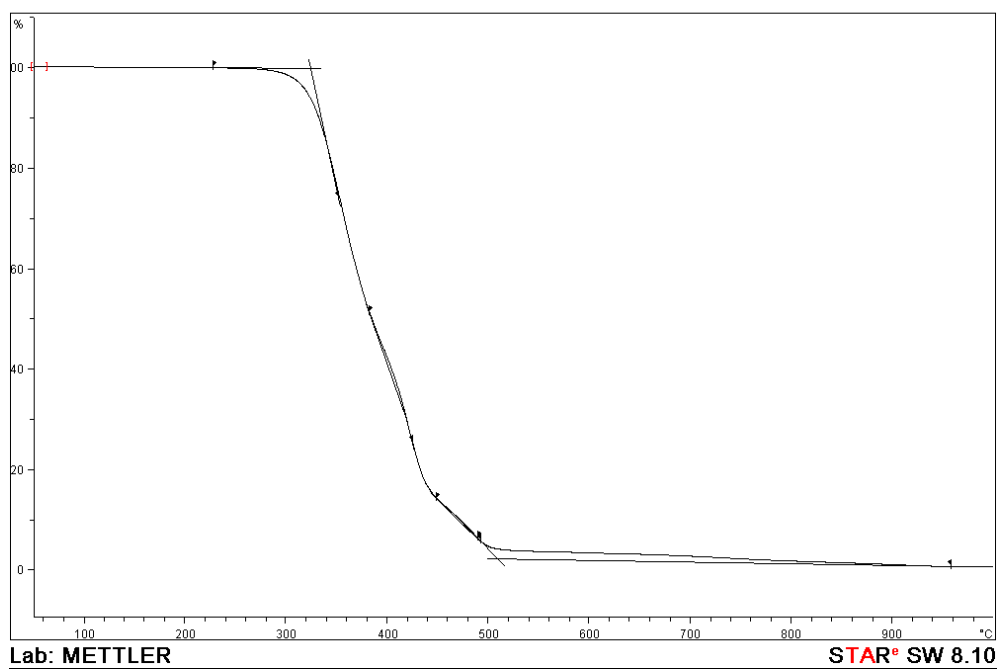
ภาคผนวก ง
TGA thermograms



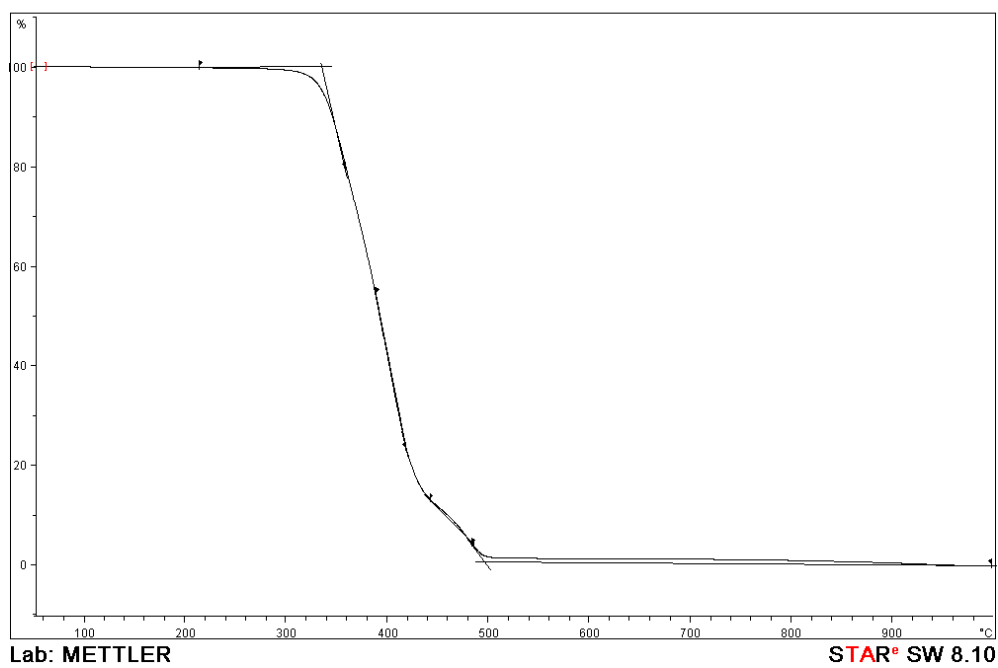
รูปง-1 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต



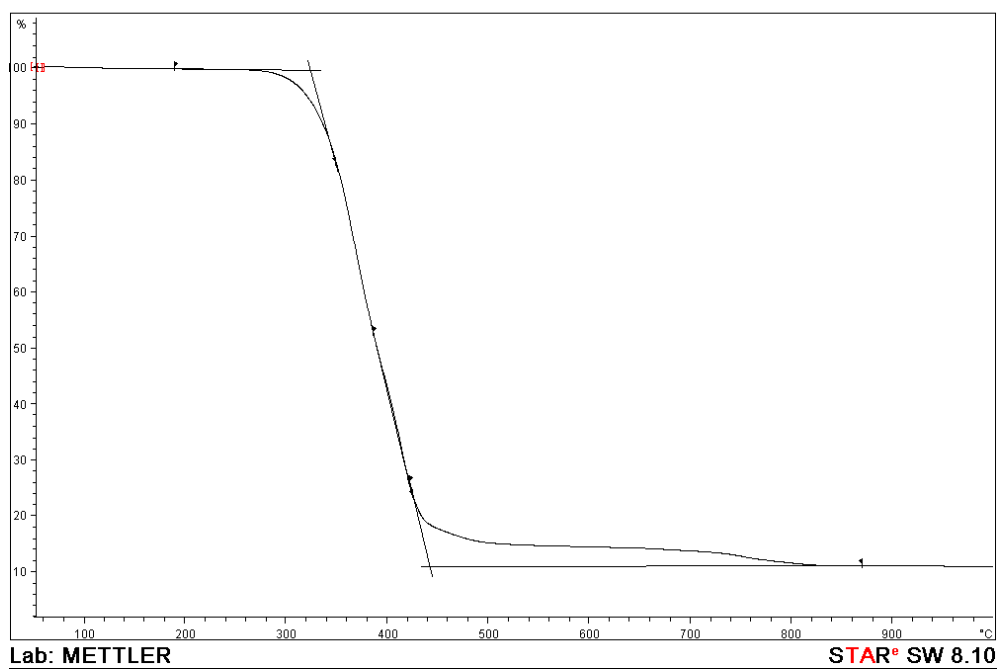
รูปง-2 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์



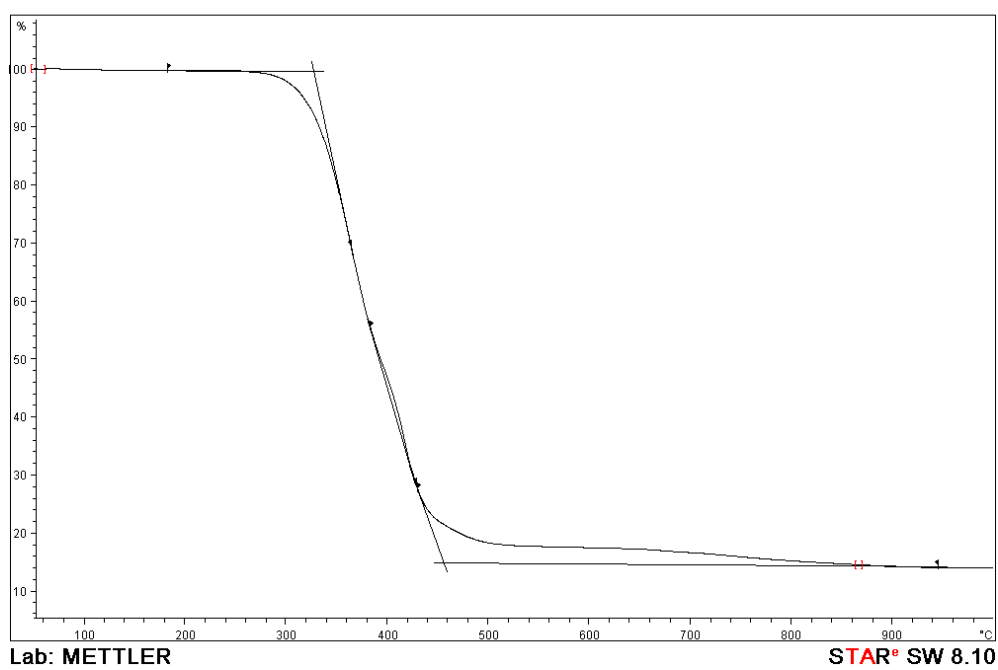
รูปง-3 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA (100/5)



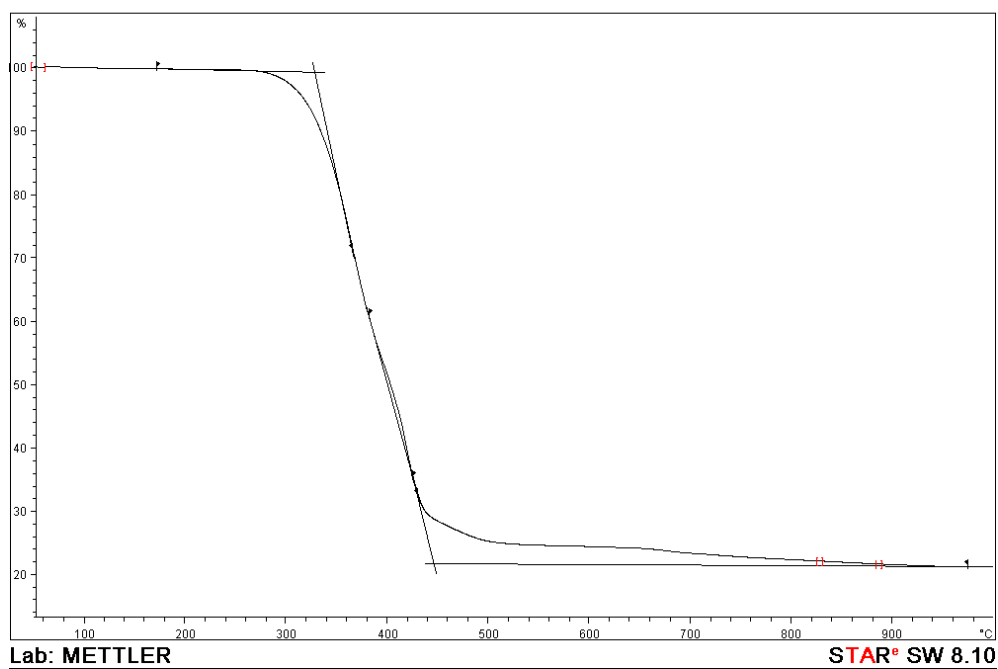
รูปง-4 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA (100/10)



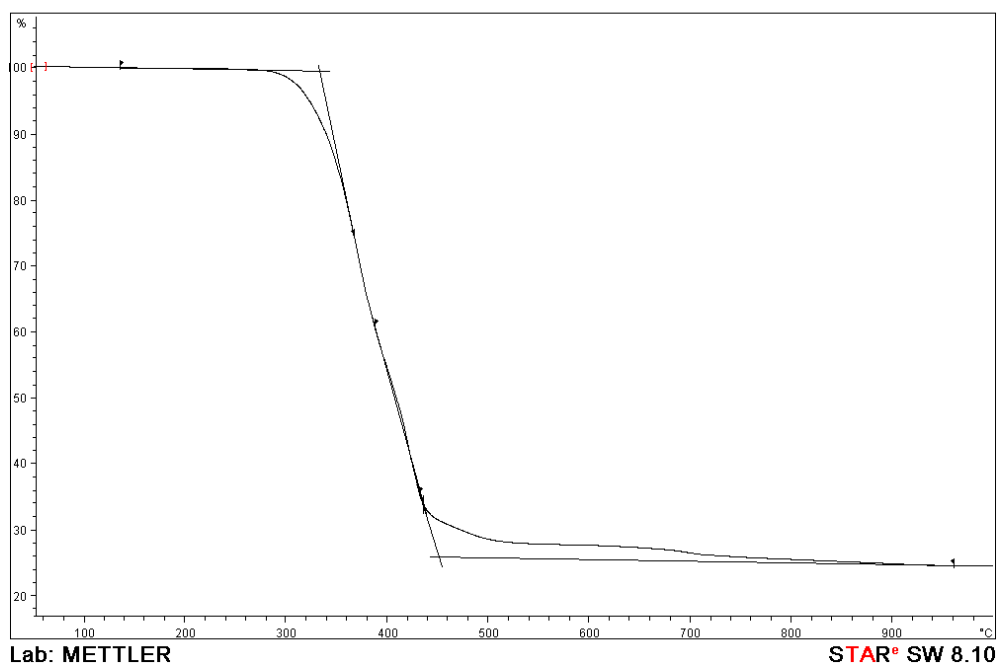
รูปง-5 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/0/10)



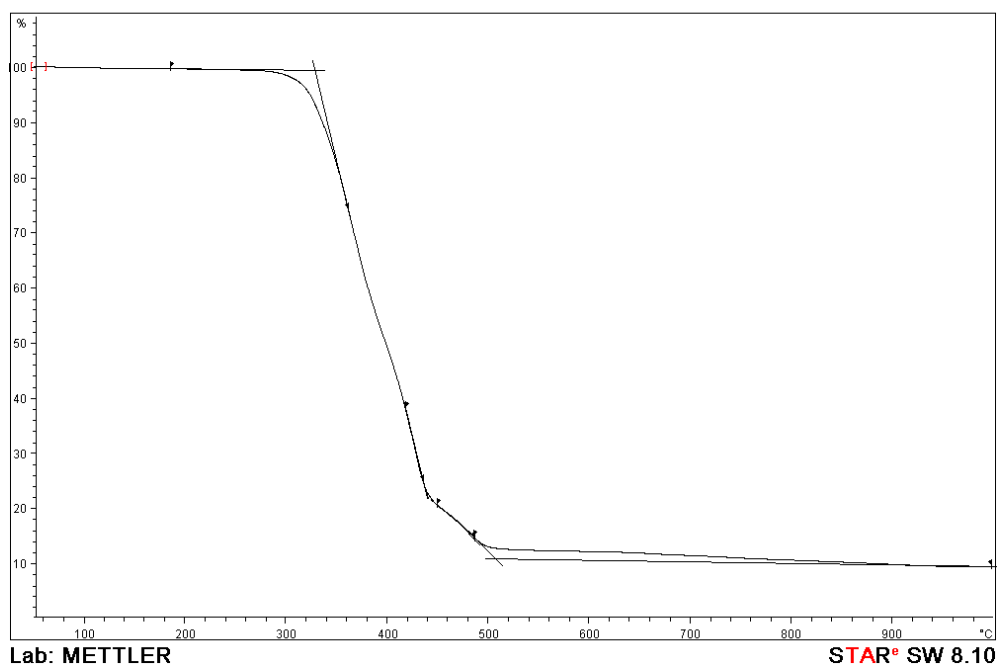
รูปง-6 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/0/20)



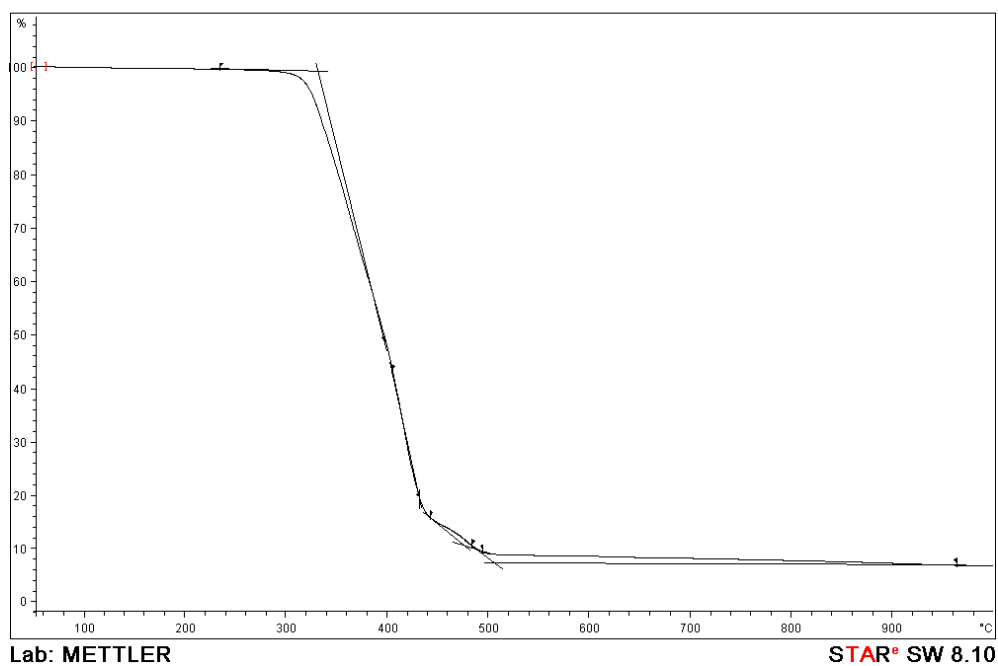
รูปง-7 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/0/30)



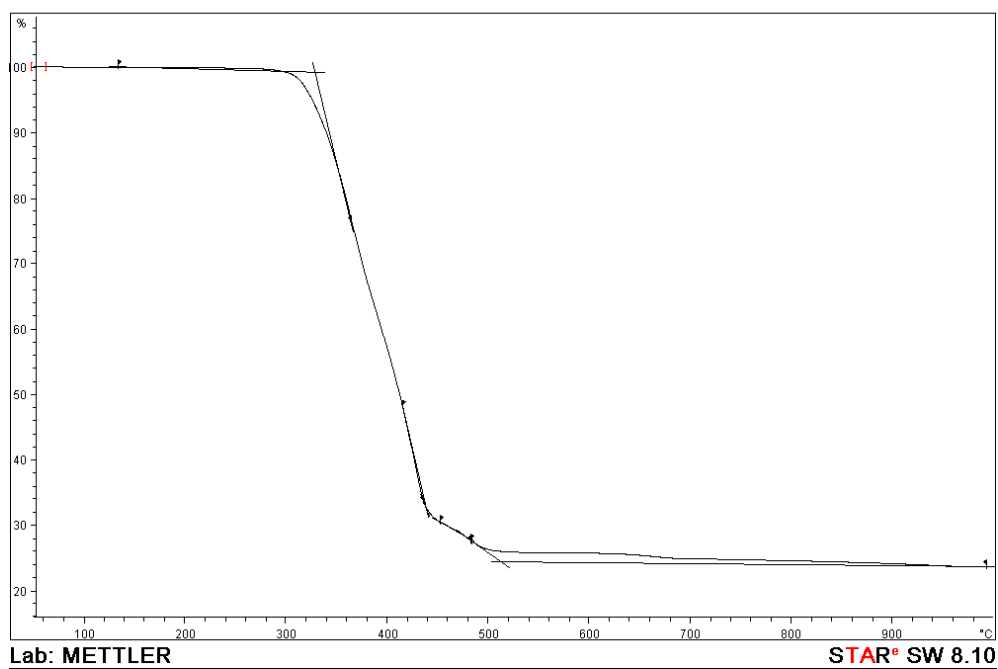
รูปง-8 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/0/40)



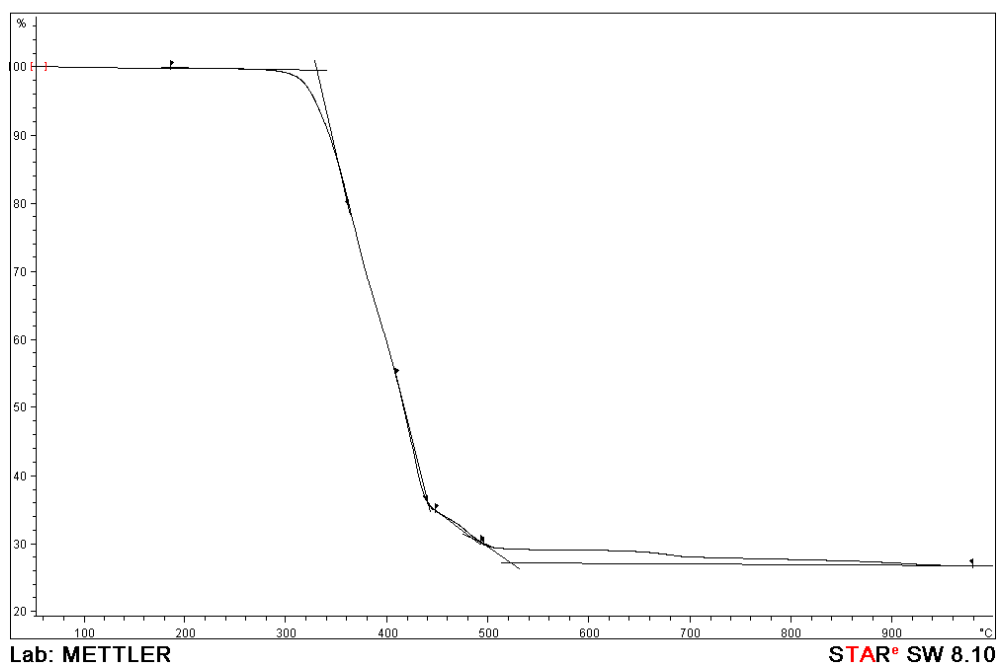
รูปง-9 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/5/10)



รูปง-10 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/5/20)



รูปง-11 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/5/30)



รูปง-12 ที่จีเอเทอร์โมแกรมของ TPU/PP-g-MA/Wollastonite (100/5/40)

ภาคผนวก จ

รูปชิ้นงานหลังทดสอบหาค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัด



รูปจ-1 TPU



รูปจ-2 100/5/0



รูปจ-3 100/0/10



รูปจ-4 100/0/20



รูปจ-5 100/0/30



รูปจ-6 100/0/40



រូបៈ-7 100/5/10



រូបៈ-8 100/5/20



រូបៈ-9 100/5/30



រូបៈ-10 100/5/40

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุชัญญา เกตุทองมงคล เกิดเมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อใน
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และ
สำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2553