



การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
ที่นำมาแปรรูปใช้ใหม่ผสมพอลิคาร์บอเนตและสารเติมแต่ง



โดย
นางสาวกัญญกานต์ ลากโกคาชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
ที่นำมาแปรรูปใช้ใหม่ผสมพอลิคาร์บอเนตและสารเติมแต่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

FEASIBILITY STUDY OF MECHANICAL PROPERTY ENHANCEMENT OF RECYCLED
POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) WITH POLYCARBONATE AND ADDITIVES



By

Miss Kanyakarn Lappokachai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Polymer Science and Engineering

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตที่นำมาแปรรูปใช้ใหม่ผสมพอลิคาร์บอเนตและสารเติมแต่ง ” เสนอโดย นางสาวกัลยگانต์ ลากโศคาชัย เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เข้มชะปะบุตร)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ดร.บวรกิตติ์ เนคมานุรักษ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

...../...../.....



56402208 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต/พอลิคาร์บอเนต/รีไซเคิล/สารเติมแต่ง/เม็ดแก้ว/สารยึดต่อสายโซ่
โมเลกุล/เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต/ไพโรเมลลิติกไดแอนไฮไดรด์

กัลยกานต์ ลากโกคาชัย : การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาแปรรูปใช้ใหม่ผสมพอลิคาร์บอเนตและสารเติมแต่ง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และ ผศ.ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร. 139 หน้า.

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำขยะจากขวดน้ำพลาสติกมาหลอมขึ้นรูปใช้ใหม่ (RPET) ให้เหมาะสมต่อการใช้งานเชิงวิศวกรรม ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ RPET ด้วยการผสมกับพอลิคาร์บอเนต (PC) ในอัตราส่วน 80/20 w/w และ chain extender 2 ชนิด ประกอบด้วย Pyromellitic dianhydride (PMDA) และ Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% พบว่าการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% มีความเหมาะสมในการเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลของ RPET และ RPET กับ PC มากกว่าการเติม PMDA ทุกปริมาณ ยืนยันได้จากทดสอบความเหนียวของสายละลายเจือจางพอลิเมอร์ (IV) และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสมากขึ้นจากการที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของทั้งสองเฟสเคลื่อนที่เข้าหากัน สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมศึกษาจากการทดสอบการดึงยืดและการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก ผลการทดสอบพบว่า การเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% ทำให้ RPET/PC มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า %Elongation at break และค่า Impact strength ของพอลิเมอร์ผสม

ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาลำดับการผสมของ glass bead เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET และ PC ซึ่งมีการเติม MDI ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิต รวมถึงศึกษาลักษณะการเคลื่อนย้าย (Migration) ของ glass bead ด้วยเทคนิค DMA พบว่าการเติม glass bead สามารถเพิ่มความเสถียรทางความร้อนและความแข็งเกร็ง (Young's Modulus) ให้กับพอลิเมอร์ผสมได้อย่างเด่นชัด ในขณะที่ค่า % Elongation at break ลดลงจากการมี glass bead เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล อีกทั้ง glass bead ไม่สามารถปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมพอสิตได้แม้จะพบการเปียกผิวที่ระหว่าง glass bead กับพอลิเมอร์ โดยที่การผสม glass bead กับ PC ก่อนแล้วนำไปผสมกับ RPET และเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% จะได้วัสดุคอมพอสิตที่มีค่า Young's Modulus สูงที่สุดเนื่องจาก glass bead เกิดการเคลื่อนย้ายออกจากเฟส PC ที่เหนียวมากกว่าไปหาเฟส RPET ได้ยาก จึงช่วยเพิ่มความแข็งเกร็งให้แก่เฟส PC และเสริมแรงให้แก่เฟส RPET ซึ่งเป็นเฟสหลักในการผสม

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

56402208 : MAJOR : (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

KEY WORD : POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)/POLYCARBONATE/RECYCLE/ADDITIVES/
GLASS BEAD/CHAIN EXTENDER/METHYLENE DIPHENYL DIISOCYANATE/
PYROMELLITIC DIANHYDRIDE

KANYAKARN LAPPOKACHAI : FEASIBILITY STUDY OF MECHANICAL PROPERTY ENHANCEMENT
OF RECYCLED POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) WITH POLYCARBONATE AND ADDITIVES. THESIS
ADVISORS : ASST. PROF. NATTAKARN HONGSRIPHAN, D.Eng., AND ASST. PROF.

PAJAERA PATANATHABUTR, Ph.D. 139 pp.

This research was aimed to recycle plastics waste from post-consumer water bottles (poly(ethylene terephthalate) or RPET) to be used in engineering application. The study was divided into two parts. The first part was performed to improve mechanical properties of RPET by blending with polycarbonate (PC) in a ratio of 80/20 w/w and adding Pyromellitic dianhydride (PMDA) or Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) with content of 0.5, 0.7 and 0.9 wt% as chain extenders. It was found that RPET/PC with 0.9% of MDI could increase intrinsic viscosity (IV) more effectively than using all content of PMDA. This confirms from study of intrinsic viscosity. It also improved compatibility between phases from the shifting of glass transition temperatures (T_g) of both RPET and PC phases toward each other. Mechanical properties were studied using tensile and notched Izod impact tests, which the results showed that the addition of MDI with 0.9 wt% into the RPET/PC blends improved mechanical, especially %Elongation at break and Impact strength.

In the second part, effect of blending sequence of glass beads into RPET/PC blend adding MDI was studied in terms of mechanical and thermal properties of the composites. Migration pattern was also investigated by mean of DMA study. The results indicated that glass beads could improve thermal stability and increase modulus of RPET/PC significantly. But, %Elongation at break of composite decreased due to glass beads prohibited mobility of polymer molecules. Impact strength was poorly deteriorated, although good interfacial adhesion between glass beads and polymer matrix was observed. Mixing glass beads into PC, and then blended with RPET and MDI 0.9 wt% gave the highest Young's Modulus, because glass beads could not migrate from highly viscous PC phase into RPET phase, thus they improved rigidity of PC phases and then reinforced RPET matrix phases.

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2015

Thesis Advisors' signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีน เทเรพทาเลตที่นำมาแปรรูปใช้ใหม่ผสมพอลิคาร์บอเนตและสารเติมแต่ง (Feasibility study of mechanical property enhancement of recycled poly(ethylene terephthalate) with polycarbonate and additives) สามารถสำเร็จลุล่วงได้จากกลุ่มบุคคลต่อไปนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร ที่คอยให้คำปรึกษา ให้แนวคิด แนวทางในการแก้ไขปัญหา ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการแก่ผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำความรู้ความสามารถที่มี สร้างสรรค์งานวิจัยชิ้นนี้จนประสบความสำเร็จ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เข้มชะปะบุตร และ ดร.บวรกิตติ เนคมานุรักษ์ ที่ได้สละเวลามาให้คำปรึกษา คำแนะนำ เพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาแก่ผู้วิจัยต่อไป

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ และคำแนะนำ ที่มีความสำคัญต่องานวิจัย

ขอบพระคุณ ดร.วุฒิพงษ์ รังสีสันติวานนท์, ดร.พัชรี ลากสุริยกุลม, นางสาวสินินาถ ทองจ้อย, นางสาวรัชนิกร เชื้อสะอาด และนายเชาวน์ ศรีเพชรดี จากงานบริการเทคนิค ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่อง Injection molding สำหรับการขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ

ขอบพระคุณคุณพินิจ เจียนระลึก และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช ผู้ประสานงานช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านสารเคมี และอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ คอยช่วยเหลือ คอยผลักดัน ตลอดงานวิจัยของข้าพเจ้าสามารถประสบความสำเร็จได้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณ ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จไปอีกก้าวหนึ่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
กรอบแนวคิดของงานวิจัย	2
ขอบเขตการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย	3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากผลงานวิจัย	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends).....	6
การนำสารพอลิเมอร์กลับมาใช้ใหม่	14
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Polyethylene Terephthalate (PET).....	15
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Polycarbonate (PC).....	18
สารเติมแต่งในพลาสติก (Additives of plastics).....	19
สารคู่ควบ (Coupling agent).....	22
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Chain extender	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	32
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	33
วิธีการวิจัย.....	34

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
การตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหลอมผสมของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ด้วยเทคนิค FTIR	45
อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อความหนืดของ สารละลายเจือจาง RPET/PC.....	50
อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อความหนืดหลอมเหลว ของ RPET/PC	55
อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน และความเข้ากันได้ของ RPET/PC	57
อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อสมบัติทางเชิงกลของ RPET/PC.....	58
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender	67
ผลของลำดับการผสม RPET, PC, glass bead ต่อความเสถียรทางความร้อนด้วย เทคนิค TGA.....	73
ผลของลำดับการผสม RPET, PC , glass bead ต่อสมบัติทางความร้อนด้วย DMA.....	78
ผลของลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ คอมพอสิต	81
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ glass bead และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับ การผสมแตกต่างกัน	87
5 สรุปผลการทดลอง	91
ศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC.....	91
ศึกษาผลของลำดับการหลอมผสม RPET, PC และ glass bead ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบผสม	92
ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม.....	98
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	117

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย	120
ภาคผนวก ง การพัฒนาตนเอง.....	128
ประวัติผู้วิจัย.....	139



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงค่าความหนืดที่เหมาะสม ของ PET ในการใช้งานด้านต่างๆ.....17
2.2	แสดงสมบัติทั่วไปของ PET..... 17
2.3	แสดงชนิดโซ่เส้นที่เหมาะสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ..... 23
2.4	ตัวอย่าง Chain extender สำหรับการเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลของ PET..... 24
2.5	แสดงสมบัติทั่วไปของ PMDA..... 24
2.6	แสดงสมบัติทั่วไปของ MDI 26
3.1	แสดงสูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยน ปริมาณ chain extender..... 34
4.1	แสดงค่า Intrinsic viscosity (IV) ของชิ้นงานทดสอบทุกสูตร 54
4.2	แสดงค่า Melt flow index (MFI) ภายใต้สภาวะ 260 °C/2.16 kg..... 56
4.3	แสดงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของ RPET, PC และ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender 58
4.4	แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขจากการทดสอบเชิงกลของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและ มีการเติม chain extender..... 59
4.5	แสดงรูปแบบและสัดส่วนการผสม RPET, PC , glass bead และ MDI..... 73
4.6	แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากเทคนิค TGA ของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มี และมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิต 77
4.7	แสดงข้อมูลของสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ที่ได้จากเทคนิค DMA..... 79
4.8	แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขจากการทดสอบเชิงกลของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 81

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ลักษณะต่างๆของ Dispersed phase ใน Matrix phase ของพอลิเมอร์ผสม..... 12
2.2	โครงสร้างหน่วยซ้ำของ Polyethylene Terephthalate 15
2.3	ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่าง Di-acid และ Di-alcohol..... 16
2.4	ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) 16
2.5	การพอลิเมอร์ไรเซชันแบบหลอมเหลว (Melt polymerization) 16
2.6	โครงสร้างหน่วยซ้ำของ Polycarbonate ที่ผลิตจาก Bisphenol A..... 18
2.7	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิคาร์บอเนต 18
2.8	รูปร่างพื้นฐานของอนุภาค..... 21
2.9	แสดงการคำนวณ Aspect ratio 21
2.10	แสดงการการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง..... 22
2.11	โครงสร้างทางเคมีของ PMDA 24
3.1	แสดงกระบวนการเตรียม Flake recycled PET 34
3.2	ขั้นตอนการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ 35
3.3	เครื่อง Moisture Analyzer..... 36
3.4	เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก..... 36
3.5	การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสม 36
3.6	แสดงการจัดเครื่องมือและตำแหน่งต่างๆ ในการทดลองวัดค่าความหนืดโดยใช้ viscometer..... 37
3.7	เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพลาสติกหลอมเหลว (Melt Flow Indexer)..... 38
3.8	เครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุแบบทั่วไป (Universal testing machine)..... 38
3.9	เครื่องทดสอบวัสดุแบบตีหรือกระแทก (Impact Tester) 39
3.10	เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)..... 39
3.11	เครื่อง Fourier Transform Spectroscopy 40
3.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 40
3.13	เครื่อง SPUTTER..... 40
3.14	เครื่อง Thermo gravimeter analyzer (TGA)..... 42
4.1	FTIR สเปกตรัมของ RPET 45
4.2	FTIR สเปกตรัมของ PC..... 46

ภาพที่	หน้า
4.3 FTIR สเปกตรัมของ RPET/PC.....	47
4.4 aliphatic aromatic carbonate.....	48
4.5 FTIR สเปกตรัมของ chain extender (a) PMDA และ (b) MDI.....	48
4.6 FTIR สเปกตรัมของ RPET/PC ที่เติม chain extender ปริมาณ 0.9 wt% เท่ากัน ประกอบด้วย (a) PMDA และ (b) MDI.....	50
4.7 แสดงกราฟ stress กับ strain แสดงพฤติกรรมกรรมการแตกหักแบบเปราะ ของชิ้นงานทดสอบ.....	60
4.8 แสดงกราฟ stress กับ strain แสดงพฤติกรรมกรรมการแตกหักแบบเหนียว ของชิ้นงานทดสอบ.....	60
4.9 แสดงค่า %Elongation at break ของ RPET, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender.....	63
4.10 แสดงค่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Young's Modulus) ของ RPET, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender.....	64
4.11 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของ RPET, RPET/PC ที่ไม่มี และมีการเติม chain extender ชิ้นงานทดสอบ.....	66
4.12 แสดงสัญญาณวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบแรงดึง (tensile test) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและมีการเติม chain extender.....	68
4.13 แสดงสัญญาณวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับ แรงกระแทก (Impact testing) ของ RPET และ PC.....	70
4.14 แสดงสัญญาณวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับ แรงกระแทก (Impact testing) ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender.....	71
4.15 แสดงกราฟ TGA ของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI.....	74
4.16 แสดงกราฟ DTG ของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI.....	75
4.17 แสดงกราฟ TGA ของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์ คอมพอลิไซต์ที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ.....	76
4.18 แสดงกราฟ DTG ของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์ คอมพอลิไซต์ที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ.....	76

4.19	แสดงกราฟ Tan δ ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และ พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ.....	80
4.20	แสดงกราฟ Loss Modulus ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ.....	81
4.21	แสดงกราฟ stress กับ strain แสดงพฤติกรรมความแตกหักของ RPET/PC ที่การเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน.....	82
4.22	แสดงค่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Young's Modulus) ของ RPET/PC ที่การเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม แตกต่างกัน.....	84
4.23	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของ RPET/PC ที่การเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม แตกต่างกัน.....	85
4.24	แสดงค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile stress at break) ของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน...	85
4.25	แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน.....	86
4.26	แสดงพื้นผิวของ glass bead ก่อนและหลังทำการปรับสภาพผิว	87
4.27	แสดงสัญญาณวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบแรงดึง (tensile test) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead แตกต่างกัน.....	89
4.28	แสดงสัญญาณวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับแรง กระแทก (Impact testing) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead แตกต่างกัน	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ในปัจจุบันพลาสติก ได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างหนึ่ง ที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวัน เนื่องจากสามารถผลิตให้มีคุณสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยขึ้นกับการเลือกใช้วัตถุดิบ ปฏิกริยาเคมี กระบวนการผลิต และกระบวนการขึ้นรูปทรงต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาแทนทรัพยากรธรรมชาติได้หลายอย่าง เช่น ไม้ เหล็ก เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบา และมีขอบเขตการใช้งานได้กว้างขวาง ส่งผลให้ปริมาณการใช้พลาสติกยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณความต้องการของผู้บริโภค แต่ข้อเสียที่สำคัญอย่างยิ่งของการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติก คือ ไม่สามารถสลายตัวได้เองตามธรรมชาติในเวลาอันสั้น โดยวิธีการกำจัดขยะพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปฝัง (Burial) การนำไปถมดิน (Landfill) และการนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิง (Incineration) โดยวิธีดังกล่าวนี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อาทิ ภาวะโลกร้อน มลพิษจากการเผาขยะพลาสติก เป็นต้น ปัจจุบันจึงมีการหาวิธีการกำจัดขยะพลาสติกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยพบว่าการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เป็นทางเลือกทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติก เนื่องจากทำให้ขยะพลาสติกไม่ต้องถูกนำไปฝังกลบ ช่วยลดการใช้ทรัพยากร และเพิ่มมูลค่าแก่ขยะพลาสติก[1]

โดยขยะพลาสติกที่ควรนำไปหลอมกลับมาใช้ใหม่มากที่สุด คือ ขยะจากขวดน้ำพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) เนื่องจากชีวิตประจำวันของมนุษย์นั้นมีความจำเป็นต้องบริโภคน้ำจึงเป็นสาเหตุของการเกิดขยะจากขวดน้ำพลาสติกตามมา โดยปัญหาที่พบเมื่อนำขวดน้ำพลาสติกกลับมาหลอมใช้ใหม่ (RPET) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีคุณภาพต่ำลง เนื่องจาก PET เป็นพลาสติกที่สลายตัวได้ง่ายในกระบวนการหลอมขึ้นรูปซ้ำจากการมีความชื้น ความร้อน สิ่งเจือปน (PVC, กาว และสารเติมแต่งต่างๆ เป็นต้น) ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PET ลดลง จากการที่สายโซ่โมเลกุลของ PET ขาดออกจากกัน สังเกตได้จากค่า Intrinsic viscosity (η) มีค่าลดลง[2]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลผ่านการเติม Chain extender[3] ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีตั้งแต่ 2 หมู่ฟังก์ชันขึ้นไป มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่ของ PET โดยสามารถเติมลงไปในการหลอมผสมปกติ ส่วนวิธีลด

การสลายตัวทางความร้อนและปฏิกิริยา Hydrolysis สามารถใช้เทคนิค Solid state polymerization[4] แต่เป็นเทคนิคที่มีราคาแพง ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานทำให้ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม ส่วนเทคนิค Low temperature solid state extrusion[5] ยังเป็นเทคนิคที่ไม่แพร่หลาย และวิธีการปรับปรุงสมบัติของ RPET ด้วยการเติมพอลิเมอร์ชนิดอื่นลงไป[6] ได้แก่ PC LLDPE และ ABS เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ขยายขอบเขตการนำไปใช้ในงานที่หลากหลายมากขึ้น หรือจะเป็นการเติมสารเพิ่มคุณสมบัติการทนแรงกระแทก (Impact modifier) เช่น อีลาสโตเมอร์ [7] ยาง[8] และการเติมสารเสริมแรงจำพวก glass bead, clay และ fiber เป็นต้น

พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความน่าสนใจในการนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้แก่ RPET เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองเป็นพอลิเอสเทอร์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยา Transesterification ในช่วงการหลอมผสม ทำให้ลดการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด[9] ดังนั้นหากทำให้ระบบพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET กับ PC เข้ากันได้ดี สมบัติเชิงกลจะเพิ่มสูงขึ้นและมีขอบเขตการใช้งานที่กว้างขึ้น ส่วน glass bead ที่เติมลงไปนั้นเป็นอนุภาคอนินทรีย์ที่มีค่า Aspect ratio ต่ำและพื้นที่ผิวน้อย จึงสามารถเติมในปริมาณที่สูงได้โดยส่งผลกระทบต่อค่า Melt strength ของพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อย อีกทั้งยังเพื่อเพิ่มความเสถียรทางรูปร่างและเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ[10] ทั้งนี้ลำดับการเติม glass bead ลงในกระบวนการหลอมผสมนั้นจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้แตกต่างกัน

จากงานวิจัยข้างต้นจึงมีแนวคิดในการศึกษาหาชนิดและปริมาณของ Chain extender ที่เหมาะสมแก่ RPET/PC โดย Chain extender ที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 2 ชนิด คือ Methylenediphenyl diisocyanate (MDI) และ Pyromellitic dianhydride (PMDA) ซึ่งมีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากันชนิดกัน จากนั้นได้มีการศึกษารูปแบบลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ที่แตกต่างกันต่อสมบัติเชิงกลจากการเคลื่อนย้าย (Migration) ของ glass bead สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบผสม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC

1.2.2 ศึกษาผลของรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบผสม

1.3 กรอบแนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะจากขวดน้ำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ (RPET) โดยใช้กระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ ซึ่งในวิธีการนี้จะส่งผลให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน

และจากปฏิกิริยา Hydrolysis ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PET ขาดจากกัน ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุล ความหนืดและสมบัติเชิงกลของ PET ลดลง[2] เพื่อที่จะทำให้ RPET มีสมบัติเชิงกลที่ดีเหมาะสมต่อการใช้งานเชิงวิศวกรรม จึงควรปรับปรุงสมบัติของ RPET ด้วยการผสมพอลิคาร์บอเนต (PC) ในปริมาณที่เหมาะสมปริมาณหนึ่ง และเพิ่มความเข้ากันได้เชิงเคมีของพอลิเอสเทอร์ทั้งสองชนิดด้วยการใช้ chain extender โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานิตและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล ความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลให้แก่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET กับ PC นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น เช่น ความแข็งเกร็งของวัสดุ (Modulus) เพื่อใช้สำหรับงานเชิงวิศวกรรมด้วยการเติม glass bead ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาลำดับของการผสม glass bead ลงในพอลิเมอร์ผสมต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตที่ได้ รวมทั้งสนใจศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้าย (Migration) ของ glass bead ในวัสดุคอมพอสิตเมื่อมีลำดับการผสมที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 เตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/PC ซึ่งมีสัดส่วนการผสมระหว่าง RPET กับ PC เป็น 80/20 w/w โดยปริมาณ chain extender ที่ใช้ประกอบด้วย 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ตัดให้เป็นเม็ด จากนั้นนำเม็ดที่ได้ไปทดสอบความหนืด สมบัติทางความร้อน ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเพื่อทดสอบแรงดึง ความสามารถในการรับแรงกระแทก และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ส่วนที่ 2 เตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ประกอบด้วย RPET, PC และ glass bead ซึ่งมีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ โดยสัดส่วนการผสมของ RPET/PC คงที่เป็น 80/20 w/w และใช้ glass bead ปริมาณ 5 wt% ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ตัดให้เป็นเม็ด จากนั้นนำเม็ดที่ได้ไปทดสอบ สมบัติทางความร้อน และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเพื่อทดสอบแรงดึง ความสามารถในการรับแรงกระแทกและลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1.4 ขอบเขตการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.4.1 PET นำมาจากขวดน้ำพลาสติกตราศิลปินที่ผ่านการใช้งานแล้ว
- 1.4.2 ใช้อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม RPET/PC เป็น 80/20 w/w เพียงอัตราส่วนเดียว
- 1.4.3 chain extender ที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด ประกอบด้วย Methylenediphenyl diisocyanate (MDI) และ Pyromellitic dianhydride (PMDA)
- 1.4.4 glass bead ที่ใช้ในงานวิจัยเป็น Hollow glass microsphere ที่ผ่านการปรับสภาพผิวทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารคู่ควบไซเลน 3-Glycidyloxypropyl trimethoxy silane (GPS)

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

1.5.3 ดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC

ส่วนที่ 1 เตรียม RPET, PC และ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ส่วนที่ 2 เตรียม RPET/PC ที่มีการเติม chain extender ปริมาณ 0.5, 0.7, และ 0.9 wt% ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ส่วนที่ 3 พิสูจน์เอกลักษณ์ RPET, PC และ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ปริมาณ 0.5, 0.7, และ 0.9 wt%

ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของพอลิเมอร์ผสม เพื่อยืนยันความเข้ากันได้ทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR

วัดความหนืดของพอลิเมอร์ ด้วยวิธีการ Solution viscosity และ Melt viscosity ศึกษาสมบัติทางความร้อนเพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค DSC ศึกษาสมบัติเชิงกลผ่านการทดสอบการดึงยึด (Tensile testing) และความต้านทานต่อการรับแรงกระแทก (Impact testing)

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ และการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม ด้วยเทคนิค SEM

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบผสม

ส่วนที่ 1 การปรับสภาพผิวของ glass bead ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารคู่ควบไซเลน 3-Glycidyloxypropyltrimethoxy silane (GPS)

ส่วนที่ 2 เตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ดังนี้

รูปแบบที่ 1 RPET/glass bead/chain extender/PC

รูปแบบที่ 2 (RPET/glass bead)/chain extender/ PC

รูปแบบที่ 3 (PC/glass bead)/chain extender/RPET

ส่วนที่ 3 พิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้ง 3 รูปแบบ

ศึกษาสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่อง Thermo gravimeter analyzer (TGA)

ศึกษาสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ด้วยเทคนิค Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

ศึกษาสมบัติเชิงกล ผ่านการทดสอบการดึงยืด (Tensile testing) และ ความต้านทานต่อการรับแรงกระแทก (Impact testing)

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อดูการกระจายตัวของ glass bead และแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง glass bead กับพอลิเมอร์ ในแต่ละรูปแบบการผสมด้วยเทคนิค SEM

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

1.5.5 เสนอส่วนหนึ่งของผลงานวิจัยในรูปแบบของการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ

1.5.6 จัดทำรายงานผลงานวิจัย และเสนอผลงานวิจัยเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากผลงานวิจัย

1.6.1 สามารถหาชนิดและปริมาณ chain extender ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/PC ที่สามารถทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น

1.6.2 สามารถทราบการเคลื่อนย้าย (Migration) ของ glass bead เมื่อในระบบผสมต่างๆ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิต

1.6.3 สามารถเพิ่มมูลค่าขยะจากขวดน้ำพลาสติก และช่วยลดปริมาณของขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบัน ช่วยลดปัญหาในการจัดหาพื้นที่สำหรับการฝังกลบ และลดปริมาณมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของขยะจากขวดน้ำพลาสติก

1.6.4 สามารถเผยแพร่ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยสู่สาธารณชน เพื่อให้เกิดแนวทางในการพัฒนางานวิจัยอื่นๆเป็นลำดับต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends)[11]

การผสม (Blending) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรม อาจจะเป็นการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ หรือผสมกับสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้สมบัติที่หลากหลายตามความต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน อีกทั้งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ทำให้มีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยไม่ต้องใช้เวลาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมาซึ่งต้องใช้เวลาและอาจต้องใช้ต้นทุนสูงในการสังเคราะห์ พอลิเมอร์ที่เกิดจากการผสมมีคุณสมบัติ เช่น เมื่อผสมกันแล้วช่วยให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Strength) มีความเหนียว (Toughness) เพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรงต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance) เพิ่มมากขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมบางชนิดสามารถปรับปรุงโครงสร้างให้บิดโค้งงอแปรรูป (Processability) ให้เหมาะสมต่อการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีสมบัตินิ่งตัว (Product uniformity) สามารถเปลี่ยนแปลงสูตรการผลิตได้อย่างรวดเร็วและให้อัตรามผลผลิตที่มีปริมาณสูงขึ้น (High productivity) นอกจากนี้ยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมอีกด้วย

2.1.1 ความเข้ากันได้ (Compatibility)[12]

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม คือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าในระดับโมเลกุล ซึ่งความเข้ากันได้จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ มวลโมเลกุล สัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสอง และสถานะของการผสม โดยขึ้นกับวิธีการผสม อุณหภูมิและเวลา พอลิเมอร์บางชนิดผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากันได้ (Incompatible blend) บางชนิดมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน (Partially compatible blend) และบางชนิดสามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด (Completely compatible blend)

2.1.1.1 ผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากัน เมื่อพอลิเมอร์ผสมไม่เข้ากัน จะพบการแยกเฟสอย่างชัดเจน ไม่มีการผสมกันในระดับโมเลกุลส่งผลให้แรงกระทำระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) ไม่ดี ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่มีการแลกเปลี่ยนสมบัติระหว่างกัน ทำให้เมื่อมีแรงกระทำในขณะใช้งานจะเกิดการแตกหักได้ง่าย

2.1.1.2 ผสมกันแล้วมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน พอลิเมอร์ที่ได้จะมีได้หลายเฟส ซึ่งเป็นระบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous system) และเกิดขอบเขตขึ้น ซึ่งอาจมีหรือไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสก็ได้ โดยสามารถเกิดสัณฐานวิทยาได้หลายแบบดังนี้

Heterogeneous multi-phase พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่มีการผสมเข้ากัน พบการแยกเฟสอย่างชัดเจน

Interpenetrating polymer network (IPN) พอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้บางส่วน ซึ่งเป็นการแยกเฟส A กับ B อยู่ด้วยกัน โดยที่เฟส A จะประกอบด้วยพอลิเมอร์ B แต่มีปริมาณที่น้อยกว่าเรียกเฟส A ว่า A rich phase และเรียกเฟส B ว่า B rich phase เมื่อมีพอลิเมอร์ B อยู่มากกว่า A ซึ่งทั้งสองเฟสไม่ได้แยกกันอย่างเด็ดขาดและไม่ได้เป็นเฟสที่มีสารบริสุทธิ์เพียงตัวเดียว

Droplet particle in continuous phase เป็นสัณฐานวิทยาเข้ากันได้บางส่วนโดยมี B rich phase เป็น Continuous phase และ A rich phase อยู่ในรูปอนุภาคที่กระจายอยู่ใน B rich phase เรียกว่า Dispersed phase

2.1.1.3 ผสมกันแล้วเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เห็นขอบเขต (Boundary) ของการแยกเฟส ถ้าหากพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดี สมบัติของพอลิเมอร์ผสมอาจจะหักล้างกันหรืออาจเสริมกันก็ได้

การผสมกันของพอลิเมอร์ที่ดีต้องสามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด เพราะจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ แต่ถ้าหากการผสมกันของพอลิเมอร์ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้หมดจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ คือ ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน และเฟสแต่ละเฟสของพอลิเมอร์จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกันเองของแต่ละเฟส ทำให้พอลิเมอร์มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลภายในต่ำลง และทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆต่ำกว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งถือว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีคุณภาพและไม่ควรนำไปใช้งาน ดังนั้นถ้าหากจะทำการเตรียมผสมพอลิเมอร์ต้องคำนึงความเข้ากันได้เป็นสำคัญ

2.1.1.4 วิธีการวิเคราะห์ถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ทำได้หลายวิธี โดยสามารถแบ่งเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ

วิธีทางตรง

การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope , SEM) โดยถ้าหากเห็นเนื้อพอลิเมอร์ผสมเป็นเฟสเดียวแสดงว่าพอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเข้ากันได้

พิจารณาจากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ไม่ยุ่งยาก เช่น Differential scanning calorimetry, DSC และให้ผลที่แน่นอน การหา T_g นั้นจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมโดยที่ T_g จะเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนสมบัติอย่างชัดเจน หากเป็น Incompatible หรือ Partially compatible blend จะปรากฏค่า T_g สองค่าหรือเป็น Broadening ของทั้งสอง T_g

วิธีทางอ้อม

การวัดความหนืด (Viscosity) ของพอลิเมอร์ผสมผลที่ได้

การวัดสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ซึ่งอาจวัดได้จากความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ซึ่งวิธีนี้เป็นการทดสอบสมบัติหลังจากผสมว่ามีข้อบกพร่อง (Defect) ในการผสมหรือไม่ เช่น ถ้าหากเป็น Incompatible มันจะเกิดการแยกเฟสกันทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่องของพอลิเมอร์ เนื่องจากมันไม่มีแรงกระทำระหว่างเฟส

2.1.1.5 การพิจารณาความเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในการพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.1

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

โดยที่

- ΔG_m = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม
- ΔH_m = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม
- ΔS_m = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม
- T = อุณหภูมิ (K)

โดยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดจะเข้ากันได้นั้นก็ต่อเมื่อ ΔG_m ของการผสมมีค่าเป็นลบ ($\Delta G_m < 0$) และถ้า ΔG_m เป็นลบแสดงว่า ΔS_m มีค่าที่มากซึ่งหมายความว่า ΔS_m เป็นค่าที่ควบคุมการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ดังนั้น ถ้า

พิจารณาค่า ΔS_m เมื่อ ΔG_m เป็นลบ ค่า ΔS_m ต้องมีค่า ≥ 0 แต่ถ้า ΔS_m มีค่า ~ 0 ตัวที่ควบคุมความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ คือค่า ΔH_m

ถ้าค่า ΔG_m ของการผสมเป็นบวก ($\Delta G_m > 0$) ที่อุณหภูมิหนึ่ง พอลิเมอร์สองชนิดที่นำมาผสมกันเกิดการแยกเฟส ดังนั้นเพื่อให้การผสมเข้ากันได้ (ค่า ΔG_m ต้องเป็นลบ) ของผสมจะต้องคายพลังงาน ($\Delta H_m < 0$) แต่ถ้าเป็นของผสมที่ดูดพลังงาน ($\Delta H_m > 0$) จะผสมเข้ากันได้ที่อุณหภูมิสูง

2.1.1.6 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of block or graft copolymers)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์นั้นได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์

โคพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์

โคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมา จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

2.1.1.7 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of functional/reactive polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม มักเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอเลฟินส์ (Olefin) โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิด

ปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิเอเลฟินกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

2.1.1.8 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์โรเซชันในระหว่างการผสม (In-situ grafting polymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์โรเซชันระหว่างการผสม หรือ Reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาตัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม เช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ Reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสมอาจมีได้ดังนี้

เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์: จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (Initiator) ในระหว่างการผสม

เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (Interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น

เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง

ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ (Morphology) ของพอลิเมอร์ผสม

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของส่วนประกอบที่นำมาผสมกัน และเทคนิคที่ใช้ในการผสม

2.1.2.1 ปัจจัยทางธรรมชาติของส่วนประกอบ

อัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio) คือ อัตราส่วนความหนืดของเฟสที่กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ผสมซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีน้อย (Dispersed phase) ต่อความหนืดของเฟสหลักของพอลิเมอร์ผสมซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีมาก (Matrix phase) ดังสมการที่ 2.2

$$\text{Viscosity} = \frac{\text{Dispersed phase}}{\text{Matrix phase}} \quad (2.2)$$

โดยพอลิเมอร์ผสมที่มีความหนืดของ Dispersed phase ต่ำกว่า Matrix phase จะมีลักษณะทางกายภาพของ Dispersed phase ที่ละเอียด และการกระจายของ Dispersed phase จะมีความสม่ำเสมอ(Uniform) ในทางตรงข้ามถ้า Dispersed phase มีความหนืดสูงกว่า Matrix phase การกระจาย Dispersed phase ในพอลิเมอร์ผสมจะค่อนข้างหยาบ หรือหากพิจารณาจากค่า Viscosity ratio ของพอลิเมอร์ผสมต่ำ ทำให้ Dispersed phase จะมีขนาดเล็กและถ้าค่า Viscosity ratio ของพอลิเมอร์ผสมสูง Dispersed particle จะมีขนาดใหญ่

องค์ประกอบ (Composition) การเพิ่มสัดส่วนของ Dispersed phase จะทำให้ออนุภาค (Particle) ของมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเข้าร่วมตัวกันของ Dispersed phase อย่างไม่ก็ตาม ความตึงผิว (Interfacial tension) ของคู่พอลิเมอร์ที่นำมาผสมจะมีผลต่อการเข้าร่วมกันเฟสดังกล่าวคือหากค่าความตึงผิวต่ำจะสามารถลดการเข้าร่วมตัวกันของ Dispersed particle ได้

ความยืดหยุ่น (Elasticity) เนื่องจากความเป็น Viscoelastic ของส่วนประกอบในพอลิเมอร์ผสมสามารถส่งผลต่อลักษณะการไหลของพอลิเมอร์ผสมในระหว่างกระบวนการผสมได้ พอลิเมอร์ผสมที่มีความยืดหยุ่นสูงจึงมักกลับคืนรูปเดิมได้ง่าย จึงทำให้ความยืดหยุ่นสามารถส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของ Dispersed particle ได้

2.1.3 ปัจจัยจากเทคนิคที่ใช้ในการผสมมีหลายแบบ ดังนี้

การผสมภายใต้แรงเชิงกล (Mechanical blending) เป็นวิธีการผสมพอลิเมอร์ผ่านเครื่องมือ เช่น เครื่องรีดสองลูกกลิ้ง(Two roll mill) เครื่องผสมภายใน(Internal mixer) และเครื่องอัดรีด (Extruder) ซึ่งการแตกตัวของ Dispersed phase จะค่อนข้างหยาบ อย่างไรก็ตามสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเร็ว เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม

การผสมในสภาวะสารละลาย (Solution blending) เป็นการผสมที่ต้องอาศัยการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย ซึ่งมี 2 วิธีหลักๆ คือ Casting ทำได้โดยการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย (Solvent) และนำสารละลายที่ได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาผสมกัน จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายออกไป และ Freeze drying ทำเหมือนการ Casting แต่เอาตัวทำละลายออกด้วยการระเหิด ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ และการแยกตัวทำละลายออกจากพอลิเมอร์ผสมได้

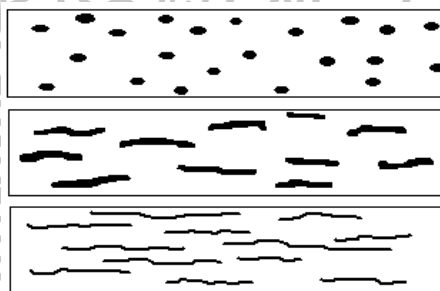
การผสมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerisation) พอลิเมอร์จะถูกผสมภายใต้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion) ในระบบที่มีองค์ประกอบของโมโนเมอร์ (Monomer) อิมัลซิฟายเออร์(Emulsifier) และตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ที่ละลายได้ในตัวกลาง วิธีนี้การกระจายตัวและแตกตัวของ Dispersed phase จะค่อนข้างดี

การผสมผ่านปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลต่างชนิดในสภาวะหลอม (Reactive blending) เป็นการผสมที่มักมีการเติมสารพวกโคพอลิเมอร์ (Copolymer) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา แลกเปลี่ยน (Trans reactive catalyst) ลงไปเพื่อปรับปรุงความเข้ากันของคู่พอลิเมอร์ที่ไม่เข้ากัน (Incompatible) โดยสารดังกล่าวจะลดแรงตึงผิวของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน หรือทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ ในระหว่างการผสมแบบหลอม (Melt blending) พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

อย่างไรก็ตามแต่ละเทคนิคที่ใช้ในการผสมนั้น การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับ การได้รับแรงเฉือน (Shear stress) ที่ได้รับในระหว่างการผสมด้วย โดยเมื่อพอลิเมอร์ที่ได้รับแรงเค้นเฉือนในระหว่างการผสมสูงอุณหภูมิของ Dispersed phase จะเล็กลง

2.1.4 ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (Morphology of polymer blends) [13]

การจัดเรียงตัวหรือลักษณะวิทยาของแต่ละเฟสในพอลิเมอร์ผสมอาจมีลักษณะของ Dispersed phase กระจายอยู่ใน Matrix phase ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดย Dispersed phase อาจจะมีลักษณะเป็นทรงกลม แผ่น หรือเส้นใยดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะต่างๆของ Dispersed phase ใน Matrix phase ของพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมจะขึ้นกับอัตราส่วนการผสม อัตราส่วนของความหนืดในแต่ละองค์ประกอบ แรงตึงผิว และภาวะของการผสม โดยองค์ประกอบที่มีปริมาณที่มากกว่าจะมีแนวโน้มเป็น Matrix หรือเฟสหลัก โดยขนาดของ Dispersed phase จะถูกควบคุมได้ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมของ Dispersed phase ต่อไป Dispersed phase สามารถเกิดการกลับเฟส (Phase inversion) เปลี่ยนเป็นเฟสหลัก โดยก่อนถึงจุดนี้ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะเกิดการกลับเฟสทั้ง 2 เฟส เรียกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ว่า Co-continuous

2.1.5 การย่อยสลายและการนำกลับมาใช้ใหม่ [14]

อิทธิพลของการเชื่อมโยง คือ สายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเชื่อมโยงซึ่งกันและกันระหว่างโมเลกุล ถ้าการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของสารพอลิเมอร์นั้นไม่มากพอจะทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปในโมเลกุลของสารพอลิเมอร์เหล่านั้น ซึ่งทำให้เกิดสภาพการพองตัวที่

เรียนว่า วุ้น (Gel formation) กรณีนี้สารพอลิเมอร์ต้องมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลสูง แต่ถ้าแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับสารพอลิเมอร์มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลในสารพอลิเมอร์กันเอง จะทำให้สารพอลิเมอร์นั้นละลายในตัวทำละลาย ซึ่งความสามารถในการละลายของสารพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของสารพอลิเมอร์

การย่อยสลายสารพอลิเมอร์ เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติในลักษณะที่มีการแตกออกของโครงสร้างหลังจากที่นำพอลิเมอร์นั้นไปใช้แล้ว การย่อยสลายในสารพอลิเมอร์ แบ่งออกเป็น 6 ประเภท ดังนี้

การย่อยสลายโดยใช้พลังงานความร้อน (Thermal degradation) พอลิเมอร์ที่ใช้ทำงานกับอุณหภูมิสูง ๆ จะเกิดการย่อยสลายโดยใช้สายโซ่โมเลกุลจะแตกออกหรือฉีกขาดทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง

การย่อยสลายโดยใช้พลังงานกล (Mechanical degradation) พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวๆ บางครั้งเมื่อได้รับแรงกระทำภายนอกอาจทำให้เกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง

การย่อยสลายโดยพลังงานแสงหรือรังสียูวี (Photo degradation) พอลิเมอร์ที่นำไปใช้งาน ส่วนมากจะต้องถูกแสงเกือบทั้งสิ้น โดยการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น มีหมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิลิซัน ซึ่งทำหน้าที่เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดราต พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลต์ (Alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

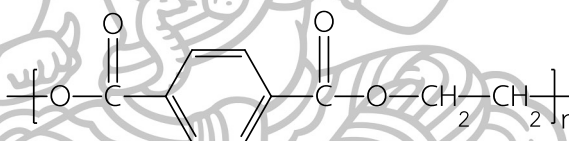
การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

2.2 การนำสารพอลิเมอร์กลับมาใช้ใหม่

พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกโดยมากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้หลักสำคัญในการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประสิทธิผล ประกอบด้วยขั้นตอนการเก็บวัสดุที่ใช้แล้ว การแยกสิ่งเจือปนออกได้ง่าย และการทำให้เกิดตลาดแก่วัสดุที่ผ่านกระบวนการหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้พลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ จะต้องมีการแสดงชนิดของพลาสติกที่ใช้ โดยทำเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีลูกศรอยู่สามด้าน (Three sided triangular arrow) เพื่อแยกวัสดุที่แตกต่างออกจากกันมีตัวเลขอยู่ตรงกลางและมีตัวอักษรอยู่ข้างใต้ เพื่อแสดงเรซินที่ใช้ทำภาชนะนั้น

ส่วนพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต ไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้แต่สามารถนำมาเป็นสารเติมแต่งทำให้สมบัติของพลาสติกผสมดีขึ้น โดยทั่วไปเมื่อพลาสติกที่นำมาผสมมีมากชนิดสมบัติที่ได้จึงแตกต่างกัน พลาสติกมีทั้งประเภทที่มีขั้ว (เช่น ขวด PET เป็นต้น) และไม่มีขั้ว (เช่น HDPE เป็นต้น) ทำให้ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสมลงไปเพื่อให้เกิดการผสมกันดีขึ้น สารพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะใส่สารเติมแต่งประเภทสตาบิไลเซอร์ (Stabiliser) ลงไปเพื่อป้องกันการเสื่อมสลายของวัสดุพอลิเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้ความร้อน รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และอากาศ การเสื่อมเหล่านี้สังเกตจากการเปลี่ยนสี สมบัติทางเชิงกลลดลง การเกิดรอยร้าวที่ผิววัสดุ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างของสารสตาบิไลเซอร์ ได้แก่ ผงสีซึ่งเป็นสารอินทรีย์ของโลหะออกไซด์และเกลือของโลหะเป็นหลัก จะมีความทึบแสงที่สุด ทนต่อความร้อนและแสงแดด เช่น ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium oxide, TiO_2) เพื่อให้สีเหลือง สีน้ำตาล และสีแดง หรือสารคาร์บอนแบค (Carbon black) ซึ่งเป็นตัวดูดซับการแผ่รังสีของอัลตราไวโอเล็ตสำหรับผลิตชิ้นงานที่ต้องการมีสีดำ

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Polyethylene Terephthalate (PET)[15]



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างหน่วยซ้ำของ Polyethylene Terephthalate

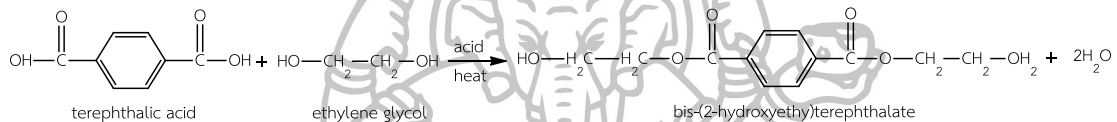
PET จัดเป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุดและผลิตมากที่สุดในเชิงการค้าสถิติในปี 1974 พบว่าทั่วโลกได้ผลิตพอลิเมอร์นี้ 3×10^9 ปอนด์ซึ่งโดยส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้งานเส้นใยสังเคราะห์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต จัดเป็นพอลิเอสเทอร์เชิงเส้นตรงที่อิมพอร์ตที่สำคัญที่สุด เป็นพอลิเมอร์แข็ง ไม่มีสี เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นตรงที่มีการจัดของหมู่ต่างๆค่อนข้างเป็นระเบียบ และมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงพอลิเมอร์นี้จึงมีความเป็นผลึกสูงมีจุดหลอมตัว $265^{\circ}C$ นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อดทนอุณหภูมิห้อง

พอลิเมอร์นี้มีความเป็นผลึกสูงและมีหมู่ที่มีสภาพขั้ว (-C-) ภายในโมเลกุล พอลิเมอร์นี้จึงละลายได้เฉพาะในตัวทำละลายที่สามารถให้โปรตอนได้ เช่น การละลายได้ ณ อุณหภูมิห้องในคลอริเนตและฟลูออรีเนต อะซิติกอะซิด (เช่น Cl_3COOH , F_3COOH) ฟีนอลและกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ณ อุณหภูมิสูงจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ บางชนิด เช่น อนนิโซล (Anisole) อะโรมาติกคีโตน (Aromatic ketones) ไดบิวทิลฟทาเลต (Dibutyl phthalate) และไดเมทิลซัลโฟน (Dimethyl sulfone)

พอลิเมอร์นี้ทนทานต่อน้ำและกรดอินทรีย์ที่เจือจางได้เป็นอย่างดีและจะสลายตัวลงโดยกรดไนตริกและกรดซัลฟูริกเข้มข้น เบสแก่ เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็สามารถทำให้พอลิเมอร์นี้เสื่อมคุณภาพได้เช่นกัน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถทนต่อการสลายโมเลกุลแบบโฟโตเคมีคัลได้ดีมาก แต่ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมตัวของมัน อาจเกิดการสลายโมเลกุลบางส่วนได้ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์หลักของการสลายโมเลกุลโดยความร้อน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์(CO₂) อะซีอัลดีไฮด์ (CH₃CHO) และกรดเทเรฟทาเลก

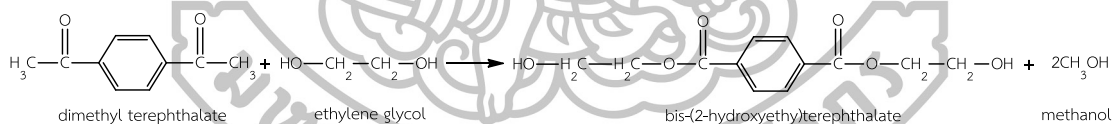
2.3.1 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เตรียมได้ 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) ระหว่าง Di-acid และ Di-alcohol โดยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างกรดเทเรฟทาลิก (Terephthalic acid, TPA) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) ดังภาพที่ 2.3



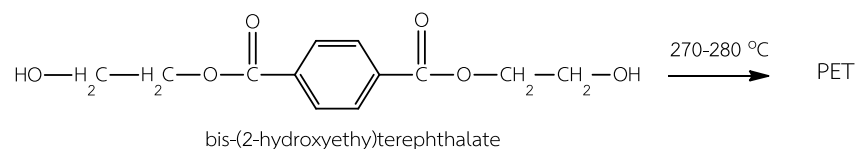
ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่าง Di-acid และ Di-alcohol

แบบที่ 2 เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) โดยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (Ester interchange) ระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate, DMT) และเอทิลีนไกลคอล ซึ่งอาจเรียกว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

ขั้นต่อมา หลังจากนั้นจะมีการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 270-280 °C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ปฏิกิริยาจะดำเนินไปจนได้ PET ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในขั้นนี้เรียกว่าเป็นการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบหลอมเหลว (Melt polymerization) ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การพอลิเมอร์ไรเซชันแบบหลอมเหลว (Melt polymerization)

2.3.2 คุณสมบัติที่สำคัญของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต[16]

เป็นพลาสติกใส แข็ง ทนแรงกระแทกดี ไม่เปราะแตกง่าย และกันแก๊สซึมผ่านดี ใช้ทำขวดบรรจุน้ำดื่ม ขวดน้ำมันพืช เป็นต้น สามารถนำมารีไซเคิลเป็นเส้นใย สำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอน เป็นต้น อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตขวดหรือเส้นใยคุณภาพสูงมีความจำเป็นต้องใช้ PET ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีค่าความหนืด $IV > 0.7 \text{ dL/g}$ และ PET ที่มีปริมาณผลึกสูงนั้นจะมีสมบัติทางกายภาพที่ดี แข็งแรง และไม่เปราะแตกง่าย

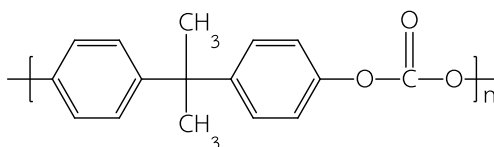
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนืดที่เหมาะสม ของ PET ในการใช้งานด้านต่างๆ

การใช้งาน	IV(dL/g)
เทปบันทึกเสียง	0.60
เส้นใย	0.65
ขวดน้ำอัดลม	0.73 - 0.80
เส้นใยเชิงวิศวกรรม	0.85

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทั่วไปของ PET

T_g	73-80 °C (163-176 °F)
T_m	245-265 °C (473-509°F)
ความหนาแน่น	1,29-1.40 g/cm ³
Typical yield, 25 mm film	30 m ² /kg (21,000 in ² /lb)
Tensile strength	48.2-72.3 mPa (7.0-10.5 x 10 ³ psi)
Tensile modulus	2,756-4,135 mPa (4-6 x 10 ⁵ psi)
Elongation at brake	30-3,000 %
Tear strength, film	30 g/ 25 mm (0.066 lb/mil)
WVTR	390-510 g mm/m ² day at 37.8°C, 90% RH
O ₂ Permeability, 25°C	1.2-2.4 x 10 ³ cm ³ mm/m ² day atm
CO ₂ Permeability, 25°C	5.9-9.8 x 10 ³ cm ³ mm/m ² day atm
Water absorption, 0.32 cm thick, 24 hour	0.1-0.2%

2.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Polycarbonate (PC)[17]



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างหน่วยซ้ำของ Polycarbonate ที่ผลิตจาก Bisphenol A

พอลิคาร์บอเนตเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic Polymer) ในตระกูล Polyester ถูกจัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกวิศวกรรม ซึ่งมีหมู่ Carbonate ($-O-(C=O)-O-$) อยู่ในโครงสร้าง

2.4.1 คุณสมบัติที่สำคัญของพอลิคาร์บอเนต

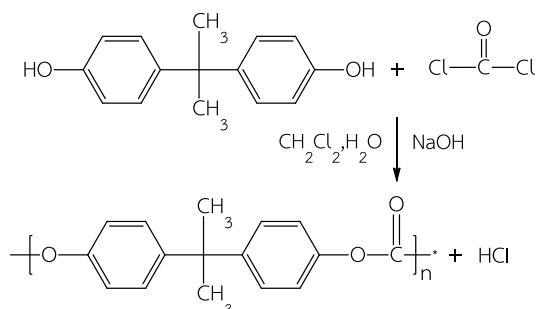
จุดหลอมเหลวสูงประมาณ 270°C โปร่งใส แข็ง ทนแรงกระแทกได้ดี ใช้เป็นสารประกอบสำหรับงานขึ้นรูปเป็นหลัก เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และความคงทนต่อการเสีรूपจากความร้อน

2.4.2 กระบวนการผลิตพอลิคาร์บอเนต

สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ 2 ชนิดคือ บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) กับฟอสจีน (Phosgene) โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างหน้าวิภาค (Interfacial polycondensation) โดยปฏิกิริยาทำในที่ที่มีเมทิลีนคลอไรด์กับน้ำ และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เกิดขึ้น สามารถแยกได้เป็นสองขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 การผลิตฟอสจีน (COCl_2) จากคลอรีน (Cl_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกิริยาระหว่างฟอสจีนและบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) ในสารละลายของเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene Chloride) โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณมากถูกเติมระหว่างปฏิกิริยาที่สอง เพื่อทำให้เกิดบิสฟีนอลเอและเพื่อเร่งปฏิกิริยาโดยทำให้กรดเกลือ (Hydrochloric Acid) ที่เกิดจากปฏิกิริยามีสภาพเป็นกลาง ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตที่ผลิตจากกระบวนการนี้ถูกทำให้ตกตะกอนในรูปเป็นของแข็ง หลังจากผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ การเหวี่ยงแยกเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลายและตามด้วยการอบแห้งจนเกิดเป็นผงพอลิคาร์บอเนต

2.4.3 อันตรายในขั้นตอนการผลิต

ในประเทศไทยเคยเกิดเหตุการณ์ก๊าซฟอสจีนรั่วในโรงงานของบริษัทไทยโพลีคาร์บอเนต จำกัด ในนิคมอุตสาหกรรมผาแดง มาบตาพุด จังหวัดระยอง เมื่อวันที่ 6 มีนาคม 2543 ส่งผลให้เจ้าหน้าที่ของโรงงานเสียชีวิต 1 คน และชาวบ้านในชุมชนใกล้เคียงเจ็บป่วยจำนวนมาก

2.4.4 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิคาร์บอเนต

ใช้ทำขวดนมเด็ก ถ้วยชาม ส่วนประกอบรถยนต์ กระจกหน้า หมวกนักบิน แวนตานิรภัย เลนส์กล้องถ่ายภาพ แผ่นซีดีรอม หลังคาโปร่งแสง เครื่องป้องกันอัคคีภัย เครื่องกรองเลือด เครื่องแลกเปลี่ยนออกซิเจนในเลือด ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องฆ่าเชื้อโรคด้วยความร้อน เป็นต้น

2.4.5 อันตรายต่อผู้บริโภค

จากการศึกษาพบว่าขวดน้ำดื่มที่ทำจากพอลิคาร์บอเนตจะแพร่สารบิสฟีนอลเอ ออกมามากกว่าปกติถึง 55 เท่าเมื่อใส่น้ำร้อน ไม่ว่าจะเป็ขวดเก่าหรือขวดใหม่ก็ตาม ซึ่งการศึกษาโดย US FDA ในสภาพการใช้งานปกติพบว่าการแพร่ของบิสฟีนอลเอ จากขวดน้ำขนาด 5 แกลลอนเข้าไปในน้ำที่เก็บไว้ 39 สัปดาห์ อยู่ในช่วง 0.1-4.7 ส่วนในพันล้านส่วน

2.4.6 ข้อควรคำนึง

พลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากการรีไซเคิลจะมีคุณภาพต่ำกว่าก่อนรีไซเคิล (เช่นเดียวกับพลาสติกอื่น ๆ)

2.5 สารเติมแต่งในพลาสติก(Additives of plastic)[18]

สารเติมแต่งเป็นเคมีภัณฑ์ที่ผสมในพอลิเมอร์ เพื่อช่วยในการผลิตหรือขึ้นรูป (Processing aid) ช่วยเสริมให้พลาสติกมีสมบัติที่ดีขึ้น ป้องกันพลาสติกจากการเสื่อมสภาพ สามารถกำหนดสมบัติของผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะลงมือผลิตได้ พลาสติกที่ปราศจากสารเติมแต่งเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปมักประสบปัญหาจากการเสื่อมสภาพ การเกิดสี และขึ้นงานพลาสติกติดกับเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งการเติมสารเติมแต่งในพลาสติกจะลดปัญหาดังกล่าว

พอลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งผสมอยู่ เรียกว่า คอมพาวด์ (Compound) ส่วนกรรมวิธีในการผสมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์ เรียกว่า คอมพาวด์ดิ้ง (Compounding) การคอมพาวด์จะต้องคำนึงถึง

เครื่องมือที่เหมาะสม ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ ความสามารถกำหนดสมบัติของผลิตภัณฑ์ก่อนที่
จะลงมือผลิต การจำแนกประเภทของสารเติมแต่งตามหน้าที่ สามารถแบ่งได้ ดังนี้

- ฟิลเลอร์ (Filler)
- สารสี (Colourant)
- พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)
- สารหน่วงการติดไฟ (Flame retarders)
- สารหล่อลื่น (Lubricant)
- สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti-ageing additives)

2.5.1 ฟิลเลอร์ (Filler)

ฟิลเลอร์เป็นสารเติมแต่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่แตกต่างจาก
พอลิเมอร์ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภทอนินทรีย์แต่อาจเป็นประเภทอินทรีย์ก็ได้

ฟิลเลอร์อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ

ประเภทที่ 1 ฟิลเลอร์เฉื่อย (Inert filler) หรือเอ็กซ์เทนเดอร์ (Extender) เป็นฟิลเลอร์
ที่ผสมลงไปเพื่อปริมาณและลดต้นทุนการผลิต

ประเภทที่ 2 ฟิลเลอร์ชนิดเสริมแรง (Reinforcing filler) ฟิลเลอร์ประเภทนี้ช่วยให้
สมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกดีขึ้น เช่น ทนทานต่อการยืดดึง หรือ ค่ามอดูลัสของการ
โค้งงอดีขึ้น

ฟิลเลอร์ทั้งเอ็กซ์เทนเดอร์และชนิดเสริมแรง เมื่อผสมในพลาสติกจะช่วยเพิ่มค่ามอดูลัสของ
การยืดหยุ่นและความแข็งตึงให้แก่พลาสติกไม่มากนักน้อย การเสริมแรงด้วยไฟเบอร์เท่านั้นจะช่วย
ปรับปรุงความทนทานต่อการยืดดึงได้ ฟิลเลอร์ที่รูปร่างทรงกลมจะช่วยเพิ่มความแกร่งของพลาสติกที่
อุณหภูมิสูงได้บ้างแต่ไม่ดีเหมือนฟิลเลอร์เสริมแรงชนิดไฟเบอร์ ฟิลเลอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ
เช่น ทัลด์ (Talc) หรือ ไมกา (Mica) จะช่วยเพิ่มสมบัติดังกล่าวนี้ได้อย่างเด่นชัด

2.5.1.1 สมบัติฟิลเลอร์

- สะอาด ปราศจากสารเจือปน และความชื้น ไม่เป็นพิษ
- เฉื่อย ไม่ละลาย และมีเสถียรภาพทางความร้อน
- ดูดซึมความชื้นและสารเติมแต่งชนิดอื่นๆต่ำ
- ทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย
- สมบัติและโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป
- มีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ
- ไม่ขัดสีเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป

2.5.1.2 ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยและการกระจายขนาดอนุภาคของฟิลเลอร์ (Average particle size and size distribution)

ควรมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 40 ไมโครเมตร

กรณีต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลต้องมีอนุภาคที่ละเอียดมาก คือ น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร

ฟิลเลอร์ที่ขนาดอนุภาคยิ่งละเอียด พลาสติกจะมีความแข็งแรงสูงขึ้น

ฟิลเลอร์ที่มีการกระจายขนาดอนุภาคที่แคบ พลาสติกจะมีสมบัติดีกว่าฟิลเลอร์ที่มีการกระจายขนาดอนุภาคที่กว้าง

2.5.1.3 รูปร่างของอนุภาค (Particle shape)



ภาพที่ 2.8 รูปร่างพื้นฐานของอนุภาค[18]

ภาพที่ 2.9 แสดงการคำนวณ Aspect ratio[18]

(Aspect ratio คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนา)

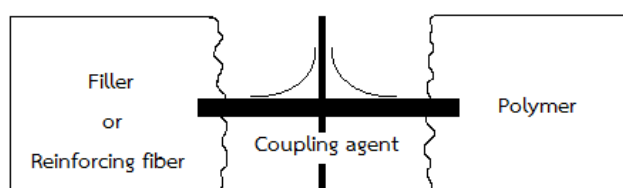
2.5.1.4 เม็ดแก้วทรงกลม(Glass bead)

เม็ดแก้วทรงกลมไม่ว่าตันหรือกลวง จัดเป็นฟิลเลอร์ที่มีรูปแบบที่ค่อนข้างใหม่ เม็ดแก้วทรงกลมชนิดตันมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.004-5 มิลลิเมตร แต่นิยมในช่วง 4-44 ไมโครเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 2.5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10 - 250 ไมโครเมตร แรงเฉือนระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากรูปทรงกลมให้พื้นที่ผิวต่ำที่สุด ดังนั้นสมบัติในการไหลจึงค่อนข้างดี ทำให้สามารถผสมฟิลเลอร์ประเภทนี้ในพลาสติกได้ในปริมาณมาก

ผิวของแก้วโดยปกติจะยึดจับเนื้อพลาสติกได้ไม่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ Coupling agent ช่วย โดยที่ส่วนหนึ่งของโมเลกุลของ Coupling agent สามารถทำปฏิกิริยากับผิวของเม็ดแก้วและอีกส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่รวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับพลาสติกได้ โดย Coupling agent ที่ใช้กันมาก ได้แก่ พวกไซเลน (Silane) และพวกไททาเนต (Titanates)

2.6 สารคู่ควบ(Coupling agent)[10]

สารคู่ควบ (Coupling agent) คือ สารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ (Hydrophobic) กับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง (Hydrophilic) โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงด้วยการสร้างพันธะที่แข็งแรงแก่เฟสทั้งสอง ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แสดงการการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง

2.6.1 รูปแบบทั่วไป



โดย M คือ โลหะ ได้แก่ ซิลิคอน ไททานเนียม หรือ เซอร์โคเนียม
 X คือ หมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับพอลิเมอร์
 R คือ หมู่อินทรีย์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างหมู่ X กับโลหะ
 R'O คือ หมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง

2.6.2 กลไกการปรับปรุงการยึดระหว่างฟิลเลอร์หรือเส้นใยกับพอลิเมอร์

ปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างหมู่สารคู่ควบกับฟิลเลอร์ OR' ของสารคู่ควบกับหมู่ OH ที่พื้นผิวฟิลเลอร์



หมู่ OR' ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความชื้นที่พื้นผิวของฟิลเลอร์เกิดเป็นหมู่ OH ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับฟิลเลอร์ต่อ



2.6.2 การยึดระหว่างสารคู่ควบกับพอลิเมอร์

เกิดจากหมู่ X ของสารคู่ควบเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์โดยหมู่ X มีแตกต่างกันหลายชนิดเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

สารคู่ควบที่หมู่ X คือ หมู่ไวนิล หรือหมู่อะคริลิก จะใช้กับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวหรือ พอลิโอเลฟินชนิดเชื่อมขวาง

สารคู่ควบที่หมู่ X คือ หมู่อะมิโน จะใช้กับอีพอกซีเรซินหรือพอลิเอไมด์

2.6.3 ตัวอย่างและการนำไปใช้งานของ Coupling agent ประเภทไซเลน

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดไซเลนที่เหมาะสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ[10]

ไซเลน	พลาสติก
Vinyl-triethoxy silane	} Unsaturated polyesters, Pololefins , PVC , PS , ABS SAN , PMMA
Vinyl-tris (2-methoxy) silane	
r-metha acyloxypropyltrimethoxy silane	
r-aminoproyltriethoxy silane	Epoxy , phenolic and melamine Resins , PA ,PHR , PP ,PE PMMA , PC
r-glycixproltrimethoxy silane	Epoxy , phenolic and melamine Resine, unsaturated polyester, PUR, PVC , PC ,PS , ABS, SAN,PA PP, PE, polysulfides
r-mercaptopropytrimethoxy silane	Phenolic and epoxy resins , PVC,PS, EPPM, polysulfones ,polysulfides.

2.7 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Chain extender[5]

Chain extender (หรือ coupling agent) สามารถเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จากการสลายตัวทางความร้อนที่มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยา hydrolysis ของพอลิเอสเทอร์ หรือปรับปรุงพฤติกรรมกลไกของพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มค่า Melt strength ของพอลิเมอร์นั้นๆ Chain extender มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาอย่างน้อย 2 กลุ่ม เพื่อทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่ของพอลิเอสเทอร์ (หมู่ Hydroxyl, -OH กับหมู่ Carboxyl, -COOH) โดย Chain extender บางชนิดที่ใช้อาจให้ปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการซึ่งส่งผลกระทบต่อขอบเขตการใช้งาน โดย Chain extender สามารถเติมลงไปบนเครื่องอัดรีด (สกรูเดี่ยวหรือคู่) ขณะหลอมผสมได้เลย ข้อดีของการเติม Chain extender คือ ต้นทุนต่ำ ทำปฏิกิริยารวดเร็ว และมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

2.7.1 Chain extender ของ PET

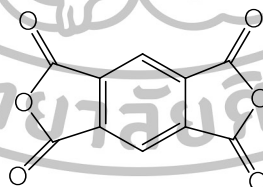
Bifunctional chain extender คือ สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันทั้งสองอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ เพื่อทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายของ PET ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นโซ่ตรง เช่น Diepoxides, Diisocyanates หรือ Bis(oxazoline) สามารถเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ PET ได้ ส่วน Polyfunctional chain extender คือ สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นกิ่ง

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่าง Chain extender สำหรับการเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลของ PET[5]

Compound	Tradename	Manufacturer	Addition rate (wt%)
Pyromellitic dianhydride	PMDA	Nippon Shokubai Allco Chemical	0.05–2 % and preferably around 0.15 %–0.25 % ^a
Trimellitic anhydride	TMA	–	–
Phenylenebisoxazoline	PBO	Mikuni (Japan)	0.4–1.5, and preferably 0.4–0.6
Carbonyl bis(1-caprolactam)	Allinco CBC	DSM	–
Diepoxide bisphenol A-diglycidyl ether	Epon 1009 ^b	Shell	0.6
Diepoxide bisphenol A-diglycidyl ether	Epon 828 ^b	Shell	0.6
Tetraepoxide tetraglycidyl diaminodiphenylmethane resins (TGDDM)	MY721	Ciba SC	0.4–0.6
Triphenylphosphite	TPP	Various	0.2–0.8

2.7.1.1 Pyromellitic dianhydride (PMDA)

โครงสร้างทางเคมี



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของ PMDA

สมบัติทั่วไปของ PMDA

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทั่วไปของ PMDA

Appearance	White crystals
Assay [wt-% by HPLC]	≥ 99.5
TMA [wt-% by HPLC]	≤ 0.2

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทั่วไปของ PMDA (ต่อ)

Free Acid [wt-%]	≤ 0.5
Melting Point [°C]	286–288
Specific Gravity [g/ml at 20°C]	1.68
Flash Point [°C]	> 200
Angle of repose [°]	28–41
Insoluble Matter [ppm]	≤ 15
Fraction of particles [%]	
> 500 μm	≤ 5.0
> 80 μm	≥ 95.0

หน้าที่หลักของ PMDA และการนำไปใช้

เป็นสารทำให้คงรูปที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับ Epoxy resins (Coating adhesive และ Moldings)

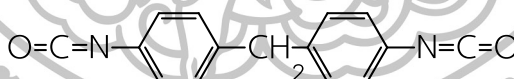
เป็น Chain extender สำหรับ Polyester resins

เป็นสารเติมแต่งแก่ PVC

ปรับปรุงค่า Melt strength และ Tensile strength ของ PET และ PBT

2.7.1.2 Methylene diphenyl diisocyanate (MDI)

โครงสร้างทางเคมี



ภาพที่ 12 โครงสร้างทางเคมีของ MDI

หน้าที่หลักของ MDI และการนำไปใช้

เป็น chain extender สำหรับ Polyester resin โดย isocyanate group (NCO) สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ hydroxyl end group และหมู่ carboxyl end group ของ polyester

ปรับปรุงความเข้ากันได้ของ polyester

ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง และชนิดยืดหยุ่น

ผลิตสารเคลือบผิว กาว และอีลาสโตเมอร์ (Elastomer)

สมบัติทั่วไปของ MDI

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติทั่วไปของ MDI

Molecular formula:	$C_{15}H_{10}N_2O_2$
Molecular weight:	250.3
Melting point:	39.5°C
Boiling point:	210°C at 7 hPa
Vapour pressure at 20°C:	$< 10^{-5}$ hPa
1 ml/m ³ (ppm) =	10.4 mg/m ³
1 mg/m ³ =	0.96 ml/m ³ (ppm)

ความปลอดภัย[19]

หากร่างกายได้รับ MDI มากเกินไปจะเกิดผลด้านลบต่อระบบทางเดินหายใจ ซึ่งอาจพัฒนาไปสู่การเป็นโรคหืด ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการควบคุม อย่างเข้มงวด ไม่ให้ผู้ปฏิบัติงาน ได้รับ MDI มากเกินขีดจำกัดในระหว่างการทำงาน อย่างไรก็ตามหากผลของการรับ MDI เข้าสู่ร่างกาย ได้พัฒนาจนแสดงอาการของโรคหืดและผู้ป่วยเกิดความไวต่อไดไอโซไซยาเนต ในกรณีนี้แม้ว่าความเข้มข้นของ MDI ที่ผู้ป่วยได้รับจะน้อยกว่าขีดจำกัดมาก แต่ก็อาจเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดอาการหอบหืดได้

MDI ในรูปไอ ละอองลอย หรือของเหลวที่ระเหิดเป็นไอ อาจก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อดวงตา นอกจากนี้ MDI ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อผิวหนังในระดับปานกลาง โดยอาจทำให้ผิวหนังเกิดการแพ้หรืออักเสบซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก แม้ว่า MDI จะมีความเป็นพิษต่ำเมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินอาหารแต่ความเป็นพิษจะสูงขึ้นเมื่อร่างกายได้รับ MDI เข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ อย่างไรก็ตามเมื่อศึกษาถึงผลในระยะยาวของการได้รับ MDI ที่มีต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานกลับไม่พบความสัมพันธ์เชิงคลินิกนอกเหนือไปจากการพัฒนาของอาการในระบบทางเดินหายใจ ไม่ควรให้ความร้อนหรือพ่น MDI ยกเว้นแต่จะควบคุมเชิงวิศวกรรมอย่างเข้มงวดและผู้ปฏิบัติงานต้องสวมเครื่องป้องกันร่างกาย

MDI มีความเป็นพิษต่ำต่อสัตว์บกและสัตว์น้ำ โดย MDI จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นพอลิยูเรีย (Polyureas) ซึ่งอยู่ในรูปของแข็งและมีสมบัติเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น MDI ที่หกจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพียงเล็กน้อย

กลุ่มผู้ผลิตหลักของ MDI ต่างก็เป็นสมาชิกของสถาบันไอโซไซยาเนตนานาชาติ (International Isocyanate Institute) ซึ่งมีเป้าหมายในการสนับสนุนการจัดการ MDI และ TDI อย่าง

ปลอดภัยในสถานประกอบการ ชุมชน และ สิ่งแวดล้อม ข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการ อุปกรณ์ป้องกันร่างกาย การเฝ้าสังเกต การขนส่งเคลื่อนย้าย การเก็บรักษา การสูมตัวอย่างและวิเคราะห์ MDI การจัดการกับอุบัติเหตุ สุขภาพ และประเด็นสิ่งแวดล้อมมีการจัดพิมพ์ไว้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

N.Torres และคณะ[2] ศึกษาสมบัติทางความร้อน ประกอบด้วย glass transition temperature, melting temperature และ%Crystallinity สมบัติเชิงกล ได้แก่ Young's modulus, %Elongation at break และ Impact strength ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ (VPET) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่จากขวดน้ำพลาสติก (RPET) ก่อนและหลังกระบวนการฉีดขึ้นรูปโดยในงานวิจัยนี้มีการใช้ RPET 2 ชนิด คือ Homogeneous deposits และ Heterogeneous deposit (มีสิ่งเจือปน เช่น PVC และ กาว) โดยพบว่าการมีสิ่งเจือปน และความชื้นใน RPET ส่งผลให้เกิดการตกผลึกได้ง่ายกว่า VPET อีกทั้งยังเหนียวนำไปเกิดการแตกออกของสายโซ่โมเลกุลในช่วงการหลอมผสมซึ่งทำให้ค่า Intrinsic viscosity และ Molecular weight มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยในผลการทดลองพบว่า VPET มีพฤติกรรมแบบแตกหัก Ductile มีค่า Elongation at break > 200% ในขณะที่ RPET มีพฤติกรรมแตกหักแบบ Brittle มีค่า elongation at break < 10% จึงสามารถสรุปได้ว่า VPET และ RPET มีความแตกต่างกันของปริมาณผลึก การมีสิ่งเจือปนอยู่ ประวัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันระหว่าง VPET และ RPET

F. Fraïsse และคณะ[6] ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ผ่านการใช้งานแล้ว(RPET) กับพอลิคาร์บอเนต (PC) เพื่อนำมาใช้แทนพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) แต่ พบว่า PET นั้นมักเกิดการสลายตัวทางเคมีและเชิงกลในช่วงการหลอม ดังนั้นในกระบวนการหลอม PET กลับมาใช้ใหม่ต้องมีการควบคุมและระวังอย่างมาก โดยในขั้นตอนแรกก่อนทำการหลอมต้องทำการทดลองเพื่อหาระดับการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุล PET นอกจากนี้ยังทำการปรับปรุงสมบัติของ RPET ด้วยการผสมกับ PC และศึกษาความเข้ากันได้ของ RPET และ PC โดยพบว่ามีเข้ากันได้ระหว่าง RPET กับ PC จากการเกิดปฏิกิริยา Transesterification ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม RPET/PC ในขั้นตอนหลอมผสม อีกทั้งได้มีการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม RPET/PC จากการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมระหว่าง RPET กับ PC เป็น 80/20, 70/30 และ 50/50 w/w ผ่านเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เพื่อแสดงให้เห็นว่ากระบวนการอัดรีดที่ผ่านการควบคุมอย่างเหมาะสมมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ผสม PET/PC ที่มีอัตราส่วน 80/20 w/w ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

Souad Mbarek และคณะ[20] ได้ทำการศึกษากระบวนการนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ผ่านการใช้งานแล้ว (RPET) มาหลอมใช้ใหม่ ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา Transesterification และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม RPET/PC โดยในงานวิจัยใช้วิธีการหลอมผสม PET/PC ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ในการศึกษาได้ใช้อัตราส่วน RPET/PC คงที่ เพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมหรือไม่เติมตัวเร่ง Sn ในการศึกษาระดับความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมสามารถทราบได้จากการศึกษา DSC, SEM และการทดสอบเชิงกล พบว่า ตัวเร่ง Sn มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยา Transesterification ในการหลอมผสม การทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสม RPET/PC ในอัตราส่วน 80/20 w/w ส่งผลให้ขนาดของเฟสที่กระจายตัวมีขนาดเล็กที่สุด จากการเกิดปฏิกิริยา Transesterification ได้เป็น Copolymer ระหว่าง RPET และ PC โดยการทดสอบ DSC พบว่าค่า T_m ของ RPET มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PC เพิ่มขึ้น หากมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ค่า T_{cc} ของ PET/PC ที่มีการเติมตัวเร่งมีค่ามากกว่าที่ไม่มีการเติมตัวเร่ง ในระบบการผสมทั้ง 2 พบว่าค่า %Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นจากการผสม PC ลงไปใน PET ซึ่ง PET/PC จะแสดงสมบัติ Tensile ได้ดีเมื่อ PET เป็นเฟสหลัก การเติมตัวเร่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยา Transesterification เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของ RPET/PC จาก copolymer ที่เกิดขึ้นจะไปช่วยลดแรงดึงผิวหน้าซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับเป็นอิมัลซิฟายเออร์ และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต่อสมบัติ Toughness และลักษณะสัญญาณวิทยาของเฟสที่กระจายตัว อย่างไรก็ตามหากมีปริมาณตัวเร่งมากเกินไปจะเร่งให้เกิดการสลายตัวของสายโซ่ทำให้วัสดุมีความเปราะ

N. TORRES และคณะ[3] ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ (VPET) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่จากขวดน้ำพลาสติก (RPET) ด้วยการเติม Chain extender ในช่วงการหลอมผสม เนื่องจากนำ PET ที่ใช้แล้วมาหลอมใหม่นั้นเกี่ยวข้องกับการสลายตัวทางความร้อน และปฏิกิริยา Hydrolytic ซึ่งทำให้ค่า Intrinsic viscosity และสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง โดยการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลสามารถควบคุมได้จากการใช้ Chain extender ซึ่งจากการทำ Preliminary test พบว่าการใช้ Diisocyanates มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่ของ Virgin PET มากกว่าการใช้ Bisoxazolines หรือ Diepoxides ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน โดยการปรับปรุงทางเคมีของ VPET ด้วย Diisocyanates ให้ค่า Molecular weight และ Intrinsic viscosity ($\overline{M}_w > 60,000$ g/mol และ $[\eta] > 1$ dL/g) ซึ่งสูงกว่า PET บริสุทธิ์ ($\overline{M}_w > 40,000$ g/mol และ $[\eta] > 0.70$ dL/g) ส่วนการปรับปรุงทางเคมีของ RPET ด้วย Diisocyanates เหนี่ยวนำให้ Molecular weight มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 30,000 เป็น 51,000 g/mol ส่วนค่า Intrinsic viscosity มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.60 เป็น 0.84 dL/g และสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า %Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 300% จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงทางเคมีของ RPET ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปนั้นเป็นวิธีที่น่าสนใจในมุมมองของ

อุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถทำให้วัสดุรีไซเคิลมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับ PET บริสุทธิ์ ภายในขั้นตอนเดียว

Xianwen Tang และคณะ[21] ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงความเหนียวของ PET ด้วยการนำ Recycled PET (RPET) ผสมกับ Polycarbonate (PC) และ Methylenediphenyl diisocyanate (MDI) มาหลอมผสมแบบเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องอัดรีด ผลการทดลองจากการวัดค่า Intrinsic viscosity และค่า Melt viscosity มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถนำมายืนยันได้ว่า Molecular weights ของ PET มีค่าเพิ่มขึ้นผ่านปฏิกิริยาการต่อสายโซ่ (Chain extending reaction) ผลของ FTIR และ DMA สามารถพิสูจน์ได้ว่าเกิด RPET-PC copolymers เพื่อยืนยันความเข้ากันได้ของเฟส RPET และเฟส PC นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม MDI ส่งผลกระทบบต่อพฤติกรรมการตกผลึกของ RPET จากการทดสอบ DSC โดยปริมาณการเกิดผลึกของ RPET มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ MDI เพิ่มมากขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า MDI มีผลต่อพอลิเมอร์ผสม RPET/PC คือ ทำให้ค่า molecular weight เพิ่มสูงขึ้น ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น พฤติกรรมการเกิดผลึกลดลง และค่า Notched-Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 17.3 เป็น 70.5 kJ/m²

Weihong Guo และคณะ[22] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม Recycled poly(ethylene terephthalate)/bisphenol A polycarbonate/poly(styrene-b-(ethylene-co-butylene)-b-styrene) (RPET/PC/SEBS) ด้วยเทคนิค Low temperature solid state extrusion เนื่องจากในท่ามกลางหลากหลายวิธีที่ใช้ในการจัดการขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่นั้น เทคนิคการหลอมผสมเป็นวิธีที่ง่าย โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค Low-temperature solid-state extrusion ทำการหลอมผสม RPET/PC/SEBS พบว่าเกิดการสลายตัวทางความร้อนและจากปฏิกิริยา Hydrolytic ของ PET ลดลง เมื่อตั้งอุณหภูมิในเครื่องอัดรีดอยู่ระหว่าง T_g และ T_{cc} อีกทั้งค่า %Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด 15.9% เป็น 103.6 % และ Notched Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันคือจาก 8.6 kJ/m² เป็น 20.4 kJ/m² จากการศึกษาความเร็วในการหมุนสกรูพบว่าความเร็วที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 100 และ 150 rpm เนื่องจากความเร็วรอบของสกรูมีผลต่ออัตราส่วนความหนืดซึ่งในช่วงดังกล่าวนี้มีความเหมาะสมต่อการผสม RPET และ PC เนื่องจากทำให้เกิดการกระจายตัวของเฟสรองทั้ง PC และ SEBS มีความละเอียดและมีขนาดเล็กประมาณ 1 mm โดย Chain extender ที่ใช้งานในงานวิจัยคือ Methylenediphenyl diisocyanate (MDI) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่ทั้ง 2 ข้างของ Recycled PET คือ Carboxyl group และ Hydroxyl group การทดสอบ FTIR สามารถยืนยันได้ว่าเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในกระบวนการผสม โดย Chain extender ไม่เพียงแต่เพิ่ม molecular weight ของ PET และ PC เพียงเท่านั้นยัง

ช่วยทำให้เกิด PET-g-PC copolymer จากการทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานอีกด้วย และเมื่อทำการศึกษา SEM พบว่ามีโครงสร้างของเส้นใยขนาดไมโครอยู่ในชิ้นงานตัวอย่าง

Fugen Daver และคณะ[23] ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ผ่านการใช้งานแล้ว (RPET) ซึ่งถูกปรับปรุงด้วยการอัดรีดแบบเกิดปฏิกิริยา เนื่องจาก RPET มีค่า Melt strength และ Viscosity ต่ำ ดังนั้นการจะนำ RPET มาใช้ในงาน Blow moulding จำเป็นต้องมีค่า Melt strength ที่สูง ในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อนำ RPET ไปทำการหลอมด้วยเครื่องอัดรีดโดยตรงส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PET ลดลง แต่หากนำไปผสมกับ Pyromellitic Dianhydride (PMDA) พบว่าสามารถปรับปรุงพฤติกรรมการไหลของ RPET ได้ มีการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาของ RPET ที่เติม PMDA ด้วยเครื่อง Parallel plate rheometer เปรียบเทียบกับ RPET และ VPET พบว่า RPET ที่เติม PMDA ให้ค่า Complex viscosity และ Storage modulus สูงกว่า RPET โดยค่าที่เพิ่มขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากการเติม PMDA ลงใน RPET หากเติมปริมาณ PMDA มากไปจะส่งผลต่อสมบัติ Viscoelastic ซึ่งมีความสัมพันธ์โครงสร้างโมเลกุลของ RPET ที่เติม PMDA โดยจากการศึกษาพฤติกรรมการไหลสามารถยืนยันได้ว่า RPET มีค่า Molecular weight เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม PMDA ที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าหากเติม PMDA มากกว่า 0.25 wt% ทำให้วัสดุเกิดโครงสร้างโมเลกุลแบบกิ่ง

Yong Peng และคณะ[8] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของ Recycled Poly(ethylene terephthalate) /Bisphenol A Polycarbonate/(E/nBA/GMA) รวมถึงศึกษาลำดับการผสม PET PC และ E/nBA/GMA (PTW) ผ่านเทคนิค Low temperature solid state extrusion (LTSSE) ซึ่งพบว่าการเติม PTW สามารถปรับปรุงความเหนียว (Toughness) ของพอลิเมอร์ได้ สังเกตได้จากค่า Impact strengths มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากการทดสอบ Tensile ในกรณีที่ทำกรเตรียม Pre blend โดยการหลอมผสม PC กับ PTW ก่อนจากนั้นนำเม็ด Pre blend ที่ได้ไปหลอมผสมกับ PET เป็นลำดับสุดท้าย ((PC/PTW)/RPET) พบว่าความแข็งแรงของวัสดุที่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สันฐานวิทยาของ (PC/PTW)/RPET เป็นสิ่งยืนยัน เนื่องจากอนุภาค PC เข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ PET ทำให้สันฐานวิทยา มีความเรียบ (มีความเสถียร) ในกรณีที่ทำกรเตรียม pre blend โดยการหลอมผสม RPET กับ PTW ก่อนจากนั้นนำเม็ด Pre blend ที่ได้ไปหลอมผสมกับ PC เป็นลำดับสุดท้าย ((RPET/PTW) /PC) พบว่าการเตรียม Pre blend PET/PTW มีความเหนียวแตกต่างกับ PC ทำให้ PC เกิดปฏิกิริยากับ PTW ได้ยาก ส่วนการทดสอบ DSC ชี้ให้เห็นว่าปริมาณผลึกของเมทริกซ์ PET มีค่าแตกต่างกันของแต่ละระบบผสม โดย PET/PTW/PC > PET/PC/PTW > (PC/PTW)/PET

OU Yuchun และคณะ[24] ได้ศึกษาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวที่มีผลต่อการตกผลึกและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต Poly(ethylene terephthalate)/glass bead โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวนั้นสามารถศึกษาได้จากสัณฐานวิทยาของวัสดุจาก SEM และ Parallel plate rheometer ซึ่งผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวต่อพฤติกรรมการตกผลึกและสมบัติเชิงกลถูกศึกษาผ่าน DSC และการทดสอบเชิงกล (Tensile Flexural และ Impact) ตามลำดับ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า glass bead ทำหน้าที่เป็น สารก่อผลึก (nucleating agent) ให้แก่ PET และพบว่าแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างผิวที่ดีของ PET และ glass bead จะส่งผลให้สมบัติ Tensile ของวัสดุคอมพอสิตดีขึ้น โดย glass bead ที่เติมลงไปในวัสดุ PET มี 3 แบบ คือ 1) ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Untreated glass bead) 2) ปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ -Aminopropyl Triethoxy Silane(KH-550) และ 3) ปรับปรุงพื้นผิวด้วย Epoxy resin (BY-94) กับ γ -Aminopropyl Triethoxy Silane (KH-550) เมื่อทำการทดสอบพบว่าสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิต PET/Untreated glass bead จากชิ้นงาน Impact พบว่ามีความเปราะ แต่ชิ้นงาน PET/KH550 glass bead แสดงให้เห็นถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของ glass bead ที่เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายจากการที่หมู่ปลายของไฮเลน(หมู่ Amino) ทำปฏิกิริยากับ PET ในกรณี PET/BY-94+KH550 glass bead พบว่ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวที่ดีที่สุด เนื่องจากหมู่ปลายของ Epoxy ทำปฏิกิริยาข้างหนึ่งกับ KH550 glass bead และอีกข้างหนึ่งทำปฏิกิริยากับ PET (หมู่ hydroxyl และ carbonyl) ในช่วงการหลอมผสม



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) ในงานวิจัยมีลักษณะเป็นเกล็ด สีขาวขุ่น ได้มาจากการบดขูดน้ำพลาสติกตราศิลปินที่ผ่านการใช้งานแล้ว

3.1.2 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ที่ใช้ในงานวิจัย คือ WONDERLITE[®] เกรด PC-122 ลักษณะเป็นเม็ดใส ไม่มีสี ดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM 1238 เท่ากับ 22 กรัม/10 นาที (สภาวะทดสอบ 300 °C/1.2 kg) จากบริษัท Chimei-asahi Corporation, ไต้หวัน

3.1.3 Glass bead (Hollow glass microsphere, HGMS) เกรด iM30K ได้รับความอนุเคราะห์จาก 3M ประเทศไทย

3.1.4 ฟีนอล (Phenol) มีลักษณะของแข็งใสไม่มีสี จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด

3.1.5 1,1,2,2-เตตระคลอโรอีเทน (1,1,2,2-tetrachloroethane, TCE) มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด

3.1.6 เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate, MDI) มีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ด สีขาว จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด

3.1.7 ไพโรเมลลิติคไดแอนไฮไดรด์ (Pyromellitic dianhydride, PMDA) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด

3.1.8 3-Glycidyloxypropyltrimethoxy silane (GPS) มีลักษณะเป็นของเหลวใส จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด

3.1.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว

3.1.10 กรดแอสติก (Acetic acid)

3.1.11 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.12 เอทานอล (Ethanol)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.1 เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) ยี่ห้อ Bosco รุ่น BG 2523 ประเทศไทย

3.2.2 เครื่องวัดความชื้น (Moisture analyzer) รุ่น HX204 บริษัท Mettler-Toledo ประเทศไทย

3.2.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder) รุ่น SHJ-25 บริษัท Yongteng ประเทศจีน

3.2.4 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine) รุ่น S-2000i100B บริษัท FANUC Roboshot

3.2.5 เครื่อง laser cutter

3.2.6 ตู้อบแห้งแบบลมหมุน (air-circulating oven)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimetry, DSC) รุ่น DSC 1 บริษัท Mettler Toledo

3.3.2 เครื่องศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสาร (Thermogravimeter analyzer , TGA) รุ่น TGA/DSC 1 บริษัท Mettler Toledo

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) GABO รุ่น EPLEXOR QC 25)

3.3.4 เครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุแบบทั่วไป (Universal testing machine) รุ่น 5969 บริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.5 เครื่องทดสอบวัสดุแบบตีหรือกระแทก (Impact Tester) ชื่อทางการค้า Swick รุ่น Pendulum Impact Tester B5102.202 4 J

3.3.6 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพลาสติกหลอมเหลว (Melt Flow Indexer) รุ่น Galaxy Melt D7050 บริษัท Kayeness Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Tabletop Microscope TM3030 บริษัท HITACHI

3.3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี Fourier Transform Spectroscopy (FTIR) รุ่น Vertex 70 บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี

3.3.9 Cannon-Ubbelohde Viscometer, Size 1B

3.3.10 ปิเปตต์ (pipette) ขนาด 2 และ 10 ml

3.3.11 เครื่องวัดค่า pH

3.3.12 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

3.4 วิธีการวิจัย

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสมและการขึ้นรูป RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ chain extender ประกอบด้วย 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% เพื่อใช้ศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1.1 เตรียม RPET ให้มีลักษณะเป็น flake จากขวดน้ำพลาสติกตราศิลปินที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยนำขวดน้ำมาลอกฉลากออก ตัดส่วนฝาขวด (HDPE) และส่วนก้นขวดทิ้งเพื่อให้สะดวกต่อการทำความสะอาดภายในตัวขวด นำขวดไปล้างน้ำเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากนั้นตากแดดให้แห้ง เมื่อขวดน้ำแห้งแล้วทำการตัดแบ่งกลางขวด บีบขวดให้แบน แล้วนำเข้าเครื่องบดพลาสติก (grinder)



ภาพที่ 3.1 แสดงกระบวนการเตรียม Flake recycled PET

3.4.1.2 นำ RPET และ PC อบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนทำการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เพื่อกำจัดความชื้นและป้องกันการเกิดปฏิกิริยา hydrolysis ในระหว่างการหลอมผสม โดยใช้อุณหภูมิหลอมผสมตั้งแต่ hopper ถึง die คือ 200-240-250-250-250-240-230-250 °C ความเร็วรอบในการผสม 60 รอบ/นาที เส้น extrudate ที่ไหลออกมาจากหัวตายถูกลากผ่านน้ำและเข้าเครื่องตัดเม็ด เพื่อนำไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบต่อไป ซึ่งสูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสมทั้งหมดถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ chain extender

สูตร	PET (wt%)	PC (wt%)	Chain extender (wt%)	
			MDI	PMDA
RPET	100	0	0	0
PC	0	100	0	0
RPET/PC	80	20	0	0
PMDA0.5	79.6	19.9	0	0.5

ตารางที่ 3.1 แสดงสูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ chain extender (ต่อ)

สูตร	PET (wt%)	PC (wt%)	Chain extender (wt%)	
			MDI	PMDA
PMDA0.7	79.44	19.86	0	0.7
PMDA0.9	79.28	19.82	0	0.9
MDI0.5	79.6	19.90	0.5	0
MDI0.7	79.44	19.86	0.7	0
MDI0.9	79.28	19.82	0.9	0

หมายเหตุ : อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET และ PC คือ 80/20 w/w



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

3.4.1.3 ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Injection molding machine เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล

อบเม็ดพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรจากข้อ 3.4.1.2 ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น หลังจากนั้นทำการวัดค่าปริมาณน้ำในเม็ดพอลิเมอร์ผสม (Water content) ด้วยเครื่อง moisture analyzer ซึ่งต้องมีค่า Water content น้อยกว่า 0.02% ถึงจะนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding machine อุณหภูมิในการฉีดตั้งแต่ hopper ถึง nozzle คือ 260-250-220-180-50 °C โดยอุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ 80 °C ชิ้นงานที่ได้ใน 1 shot ประกอบด้วย dumbbell-shaped tensile bars ตามมาตรฐาน ASTM D638 type I เพื่อใช้ในการทดสอบ Tensile testing 1 ชิ้น และ rectangular shapes สำหรับทดสอบ Flexural ตามมาตรฐาน ASTM D790 1 ชิ้น จากนั้นทำการแบ่งครึ่งชิ้นงาน Flexural เพื่อใช้ทดสอบ Notched Izod Impact tester ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยใช้เครื่อง laser cutter



ภาพที่ 3.3 เครื่อง Moisture Analyzer



ภาพที่ 3.4 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก
(Injection molding machine)

3.4.1.4 พิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสม

3.4.1.4.1 Solution viscosity ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM-D4603

เตรียมตัวทำละลายผสมระหว่าง Phenol กับ TCE ในอัตราส่วน 60/40 w/w ที่อุณหภูมิห้อง

เตรียมสารละลายเจือจางของพอลิเมอร์ผสมความเข้มข้น 0.5 g/dL โดยการนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมหนักประมาณ 0.2525 กรัม ละลายใน Phenol/TCE ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 110 °C พร้อมการปั่นกววนตลอดเวลาด้วยแท่ง magnetic bar เป็นเวลา 30 นาที หรือจนกว่าเม็ดพอลิเมอร์ผสมละลายจนหมด ดังภาพที่ 3.5 เพื่อให้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3.5 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสม

ทำการล้าง Cannon Ubbelohde Type 1B Viscometer ให้สะอาดด้วย acetone 2-3 ครั้ง ตามด้วย Phenol/TCE ในปริมาณครั้งละน้อย ๆ 2 ครั้ง จากนั้นเป่าด้วยอากาศเย็นไล่ตัวทำละลายผสมให้ระเหยออกจนหมด

ยัด Viscometer ให้อยู่ในแนวตั้งในอ่างน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 °C ตลอดการทดสอบด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยน้ำในอ่าง ต้องท่วมระดับ D ของ viscometer เล็กน้อยตามภาพที่ 3.6

ทำการปิเปตตัวทำละลายผสม (C_0) 10 มิลลิลิตร เติมลงไปในห้อง C ของ viscometer ที่ควบคุมอุณหภูมิในอ่างไว้ที่ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามภาพที่ 3.6 เป็นเวลา 15 นาที เพื่อปรับอุณหภูมิภายนอก และภายใน viscometer ทำการดูดตัวทำละลายผสมจากช่อง A ให้อยู่เหนือขีด E เล็กน้อยด้วยจุกยาง โดยขณะที่ทำการดูดสาร ต้องใช้นิ้วปิดช่อง B ไว้ จากนั้นปล่อยจุกยาง บันทึกเวลาที่ตัวทำละลาย เคลื่อนที่จากขีด E ถึงขีด F 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ทำการปิเปตสารละลายพอลิเมอร์ผสม ความเข้มข้น 0.5 g/dL (C_1) 10 มิลลิลิตร เติมลง ไปในห้อง C ของ viscometer ที่ควบคุมอุณหภูมิในอ่างไว้ที่ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วทำการทดสอบเหมือนตัว ทำละลายผสม บันทึกเวลาที่สารละลายพอลิเมอร์ผสม เคลื่อนที่จากขีด E ถึงขีด F 3 ครั้ง แล้วนำมา หาค่าเฉลี่ย

นำข้อมูลที่ได้อมาคำนวณหา intrinsic viscosity (η) จากสมการความสัมพันธ์ของ Billmeyer ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta = 0.25(\eta_r - 1 + 3 \ln \eta_r)/c \quad (3.1)$$

โดยกำหนดให้

η_r คือ ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) มีค่าเท่ากับ t/t_0

t คือ เวลาของการไหลของสารละลายเฉลี่ย หน่วย วินาที

t_0 คือ เวลาของการไหลของตัวทำละลายเฉลี่ย หน่วย วินาที

C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วย กรัมต่อเดซิลิตร



ภาพที่ 3.6 แสดงการจัดเครื่องมือและตำแหน่งต่างๆ ในการทดลองวัดค่าความหนืดโดยใช้ viscometer

3.4.1.4.2 Melt viscosity ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM-D1238

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นก่อนทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรในสภาวะหลอมเหลว ออกมาเป็นค่าดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ผ่านเครื่อง Melt flow indexer โดยสภาวะในการทดสอบอยู่ที่อุณหภูมิ 260 °C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ซึ่งค่าดัชนีการไหลแต่ละสูตรได้ถูกรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบสูตรละ 3 ครั้ง ในหน่วยกรัม/10 นาที



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพลาสติกหลอมเหลว (Melt Flow Indexer)

3.4.1.4.3 การทดสอบการดึงยืด (Tensile testing)

ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-type I ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 °C ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุแบบทั่วไป (Universal testing machine) โดยขึ้นงานก่อนทดสอบต้องเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ใช้อัตราเร็วในการดึง 10 mm/min และใช้ load cell ขนาด 50 kN จากนั้นทำการบันทึกค่า Young's Modulus, %Elongation at break และ Tensile stress at break แล้วนำข้อมูลมาทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากชิ้นงานที่มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างน้อย 5 ชิ้นงาน เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่เตรียมได้แต่ละสูตรการผสม



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุแบบทั่วไป (Universal testing machine)

3.4.1.4.4 การทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing)

ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Notched Izod Impact testing ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C โดยขึ้นงานก่อนทำการทดสอบต้องเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ขั้นตอนการทดสอบให้ยึดชิ้นงานกับฐานของเครื่องทดสอบให้แน่น โดยหันรอยบากเข้าหา Pendulum ขนาด 4 จูล ทำการปล่อย Pendulum ให้ตกลงมากระทบกับชิ้นงาน บันทึกค่าพลังงานที่ได้จากเครื่องเพื่อใช้คำนวณค่าพลังงานเฉลี่ยต่อพื้นที่ของรอยแตก (Impact strength) หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากชิ้นงานที่มีค่าใกล้เคียงกันอย่างน้อย 10 ชิ้นงาน เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลที่เตรียมได้แต่และสูตรการผสม



ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบวัสดุแบบตีหรือกระแทก (Impact Tester)

3.4.1.4.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การทดสอบจะกระทำภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยบรรจุเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดสอบลงใน alumina pan ประมาณ 5-10 มิลลิกรัม และทำการศึกษาโหมดให้ความร้อน-ทำให้เย็นตัว-ให้ความร้อน (Temperature scan) ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 300°C อัตราการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัว $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ โดยการให้ความร้อนขั้นแรกเพื่อเป็นการกำจัดประวัติทางความร้อน (heat history) จากการเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตร จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วให้ความร้อนอีกครั้งจะได้ข้อมูล อุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์แต่ละสูตรที่สภาวะเดียวกัน



ภาพที่ 3.10 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

3.4.1.4.6 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Fourier Transform Spectroscopy (FTIR)

เตรียม KBr disc โดยการบดพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรนำไปผสมกับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่ผ่านการอบไล่ความชื้น ในอัตราส่วน 1:9 แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก จนได้แผ่นกลมแบน หลังจากนั้นนำแผ่น KBr disc ของแต่ละสูตร ใส่ลงในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่องทดสอบเพื่อทำการผ่านคลื่น IR ในช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ถูกส่งด้วยคลื่น 16 ครั้ง มี resolution 4 cm^{-1} นำพีคที่ปรากฏจากเครื่องทดสอบมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นต่อไป



ภาพที่ 3.11 เครื่อง Fourier Transform Spectroscopy

3.4.1.4.7 การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)

ชิ้นงานที่นำมาศึกษาประกอบด้วย ชิ้นงานหลังจากการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) และ การทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) เพื่อดูพฤติกรรมหลังการเสียรูปของพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตร การยึดติดกันระหว่างเฟส และความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม โดยนำชิ้นงานเหล่านี้จะถูกนำไปติดบนแผ่นกระจกที่หุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ จากนั้นติดเทปกาวคาร์บอนบนชิ้นงานเพื่อใช้ในการระบายประจุ จากนั้นนำไปเคลือบแพลทินัมด้วยเครื่อง SPUTTER เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของสนามไฟฟ้าสถิตย์บนตัวอย่างจากการฉายอิเล็กตรอนที่จำเป็นในระหว่างการถ่ายภาพ นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทำการวิเคราะห์ด้วย SEM ต่อไป



ภาพที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)



ภาพที่ 3.13 เครื่อง SPUTTER

3.4.2 ขั้นตอนการเตรียมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมพอสิตการที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ที่แตกต่างกัน

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษารูปแบบลำดับของการผสม RPET, PC และ glass bead ซึ่งมีทั้งหมด 3 รูปแบบ ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิต รวมถึงพฤติกรรมการเคลื่อนย้าย (Migration) ของ glass bead โดย glass bead ที่ใช้ได้ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย NaOH และสารควบคู่ควบไซเลน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการเติมชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล ความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC ที่จากขั้นที่ 3.4.1 ซึ่งโดยขั้นตอนการเตรียมอย่างละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.4.2.1 การปรับสภาพผิวของ glass bead ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5 โมลาร์ [25] และสารควบคู่ควบไซเลน 3-Glycidyloxypropyltrimethoxy silane (GPS)

นำ glass bead แบบ Hollow glass microsphere (HGMS) ปริมาณ 10 กรัม แช่ในสารละลาย NaOH 0.5 โมลาร์ ปริมาณ 400 มิลลิลิตร โดยมีการปั่นกวนด้วย magnetic bar นาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 °C หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อเจือจางความเป็นเบส ทำการสะเทินให้เป็นกลางอีกครั้งด้วย acetic acid และล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมี pH เท่ากับ 7 (เป็นกลาง) นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ เพื่อนำไปปรับสภาพผิวด้วยสารควบคู่ควบไซเลน 3-Glycidyloxypropyltrimethoxy silane (GPS) ต่อไป

นำ glass bead ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย NaOH เรียบร้อยแล้วมาทำการพ่นสารละลายไซเลน 3-Glycidyloxypropyltrimethoxy silane ใน ethanol ลงไปเคลือบบนผิวของ glass bead ให้ทั่ว หลังจากนั้นนำไปอบไล่ ethanol ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จะได้ glass bead ที่พร้อมสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.4.2.2 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC และ Glass แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ดังนี้

ในขั้นตอนนี้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET และ PC มีค่าคงที่ คือ 80/20 w/w และปริมาณ glass bead ที่ใช้คือ 5 wt%

รูปแบบที่ 1 RPET/glass bead/chain extender/PC : ทำการหลอมผสม RPET, PC, glass bead (GB) และ chain extender 1 สูตรที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ในขั้นที่ 3.4.1 พร้อมกันทั้งหมด

รูปแบบที่ 2 (RPET/glass bead)/chain extender/ PC : ทำการ Pre-blend โดยการหลอมผสม RPET กับ glass bead (GB) จากนั้นนำเม็ด Pre-blend (RPET/GB) ที่ได้ไปหลอมผสมกับ PC และ chain extender 1 สูตรที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ในขั้นที่ 3.4.1 เป็นลำดับสุดท้าย

รูปแบบที่ 3 (PC/glass bead)/chain extender/RPET : ทำการ Pre-blend โดยการหลอมผสม PC กับ glass bead (GB) จากนั้นนำเม็ด Pre-blend (PC/GB) ที่ได้ไปหลอมกับ RPET และ chain extender 1 สูตรที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ในขั้นที่ 3.4.1 เป็นลำดับสุดท้าย

โดยการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้ง 3 รูปแบบนี้ ก่อนการหลอมผสมต้องนำ RPET, PC และ glass bead ออบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนทำการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ อุณหภูมิหลอมผสมตั้งแต่ hopper ถึง die คือ 200-240-250-250-250-240-230-250 °C ความเร็วรอบในการผสม 60 รอบ/นาที เส้น extrudate ที่ไหลออกมาจากหัวตาย ถูกลากผ่านน้ำและเข้าเครื่องตัดเม็ด

3.4.2.3 เม็ดพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้ถูกนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding machine เหมือนในขั้นที่ 3.4.1.3 แต่มีการปรับเปลี่ยน สภาวะในการฉีด โดยอุณหภูมิในการฉีดตั้งแต่ hopper ถึง nozzle คือ 240-235-220-180-50 °C มีอุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ 80 °C

3.4.2.4 พิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.4.2.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)

เตรียมชิ้นงานขนาด 5 mm x 3 cm x 3.2 mm นำไปเข้าเครื่อง DMA ทดสอบโดยใช้โหมด tension mode ช่วงอุณหภูมิทดสอบ 30-200 °C ความถี่สำหรับการทดสอบ 10 Hz Static strain 0.1% Dynamic strain 0.05% ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 °C/นาที

3.4.2.4.2 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่อง Thermo gravimeter analyzer (TGA)

การทดสอบจะกระทำภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยบรรจุเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดสอบลง alumina pan ประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C /นาที



ภาพที่ 3.14 เครื่อง Thermo gravimeter analyzer (TGA)

3.4.2.4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต ประกอบด้วย การทดสอบการดึงยืด (Tensile testing) การทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) สภาวะในการทดสอบเหมือนขั้นที่ 3.4.1.4.3 และ 3.4.1.4.4 ตามลำดับ

3.4.2.4.4 การศึกษานำโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ขั้นตอนการทดสอบเหมือนขั้นที่ 3.4.1.4.7



บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจากขวดน้ำที่นำมาแปรรูปใช้ใหม่ (RPET) โดยการเติมพอลิคาร์บอเนต (PC) และสารเติมแต่ง (additive) เนื่องจากการนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่มีความเกี่ยวข้องกับความร้อนและความชื้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PET เกิดการขาดออกจากกัน จากการสลายตัวทางความร้อนและจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ตามลำดับ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุล ความหนืด และสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง

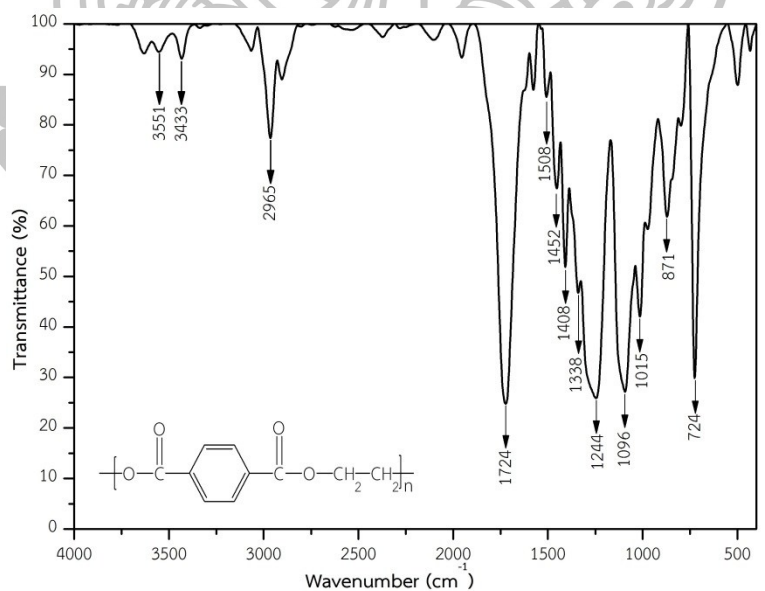
จากปัญหาที่เกิดขึ้นพบว่า การเติมพอลิเมอร์ชนิดอื่นและสารเติมแต่งเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก สามารถเติมลงไประหว่างกระบวนการหลอมผสมได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ตอน ประกอบด้วย ตอนที่ 1 ศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC โดยปริมาณการเติมพอลิคาร์บอเนต (PC) คือ 20 wt% ซึ่ง PC นั้นเป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ เช่นเดียวกับ RPET ส่วน chain extender ที่ใช้ ประกอบด้วย MDI และ PMDA ซึ่งเป็นสารโมเลกุลเล็ก ที่มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่ของพอลิเอสเทอร์[5] โดยปริมาณที่ใช้ในการศึกษา คือ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ส่วนตอนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบผสม โดย glass bead ที่ใช้เป็น Hollow glass microsphere ซึ่งผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารควบคู่ไซเลน 3-Glycidyloxypropyltrimethoxy (GPS) โดยปริมาณที่ใช้ในการศึกษา คือ 5 wt%

4.1 ศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC

4.1.1 การตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหลอมผสมของ RPET/PC ที่ไม่มี และมีการเติม chain extender ด้วยเทคนิค FTIR

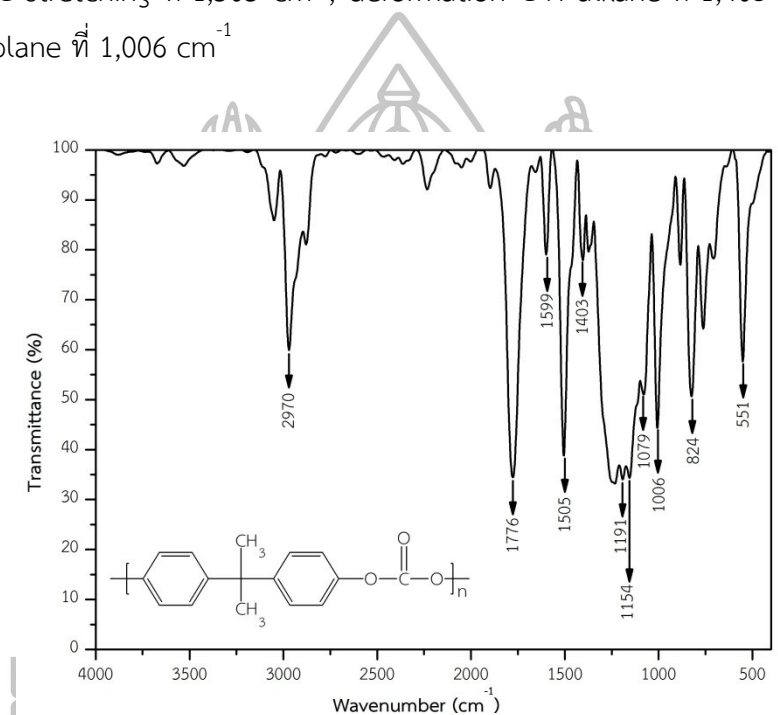
เทคนิค FTIR เป็นเทคนิคที่ถูกใช้ในการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างและยืนยันปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหลอมผสมของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พอลิเมอร์ดูดกลืนเพื่อใช้ในการสั่น (vibration) ของโมเลกุลในรูปแบบต่างๆ

ภาพที่ 4.1 แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่สำคัญและเป็นลักษณะเฉพาะของ RPET [26-28] ได้แก่ hydroxyl end group ที่ $3,551\text{ cm}^{-1}$, carbonyl overtone ที่ $3,433\text{ cm}^{-1}$, C=O stretching ของ aliphatic ester พบที่ $1,724\text{ cm}^{-1}$, C-H bending ที่ $1,452\text{ cm}^{-1}$, deformation C-H alkane ที่ $1,338\text{ cm}^{-1}$, asymmetric C-C-O stretching ของ carbon ใน aromatic ring ที่ $1,244\text{ cm}^{-1}$, O-C-C asymmetric stretching ที่ $1,096\text{ cm}^{-1}$, out of plane bending ของ aromatic C-H ที่ 871 cm^{-1} , aromatic C-H wagging ที่ 724 cm^{-1} โดยตำแหน่งทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ไม่ปรากฏใน PC นอกจากนี้ยังพบ C-H asymmetric stretching ที่ $2,965\text{ cm}^{-1}$, aromatic C-C stretching ที่ $1,508\text{ cm}^{-1}$, deformation C-H alkane ที่ $1,408\text{ cm}^{-1}$ และ C-H bending in plane ที่ $1,015\text{ cm}^{-1}$



ภาพที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของ RPET

ภาพที่ 4.2 แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่สำคัญและเป็นลักษณะเฉพาะของ PC [28, 29] ได้แก่ CH₃ stretching พบที่ 2,970 cm⁻¹, C=O stretching ของ amorphous aromatic carbonate ที่ 1,776 cm⁻¹, C-C band stretching ใน benzene ring stretching ที่ 1,599 cm⁻¹, Isopropylidene ที่ 1,991 cm⁻¹, C-H stretching ที่ 1,154 cm⁻¹, C-C-C Bending ที่ 1,079 cm⁻¹, para-substituted phenol rings ในสายโซ่หลักของ PC ที่ 824 cm⁻¹ และ (CH₂)_n โดย n ≥ 4 (Alkane) ที่ 551 cm⁻¹ โดยตำแหน่งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ไม่ปรากฏใน RPET นอกจากนี้ยังพบ aromatic C-C stretching ที่ 1,505 cm⁻¹, deformation C-H alkane ที่ 1,403 cm⁻¹ และ C-H bending in plane ที่ 1,006 cm⁻¹

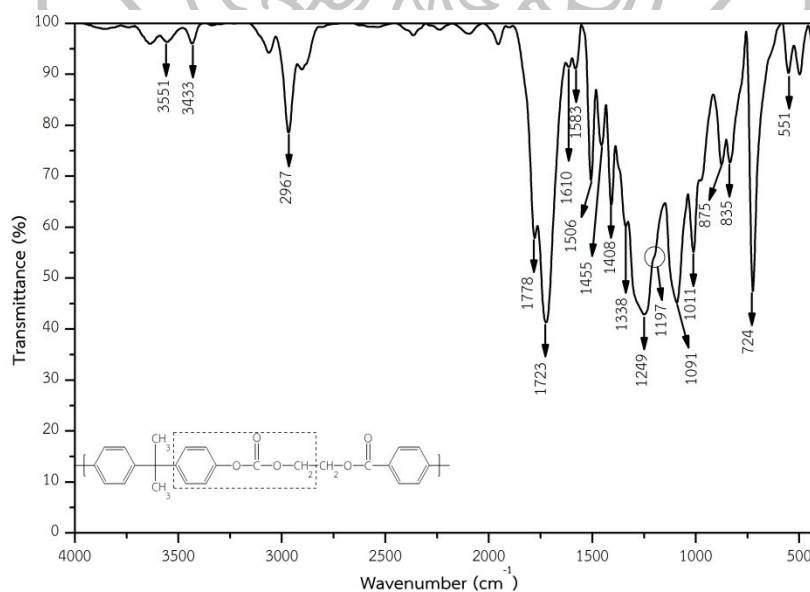


ภาพที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของ PC

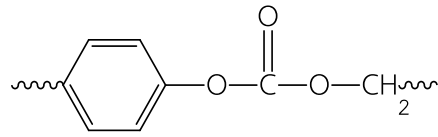
ภาพที่ 4.3 แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่สำคัญซึ่งพบใน RPET/PC ที่มีอัตราส่วนการผสม 80/20 w/w สามารถนำมายืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง RPET กับ PC ได้จากการเปลี่ยนแปลงหรือการเคลื่อนของพีคไปจากตำแหน่งเดิม โดยจากการทดสอบ FTIR พบว่า ตำแหน่งพีคของ RPET/PC ที่ปรากฏประกอบไปด้วยพีคที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง RPET และ PC เพราะเป็นพอลิเมอร์ผสม แต่สังเกตเห็นได้ว่าพีคมีความเข้มที่ลดลงหรือมีการเคลื่อนจากตำแหน่งเดิมเล็กน้อย เนื่องจากอัตราส่วนผสมระหว่าง RPET กับ PC ไม่เท่ากัน และโครงสร้างที่ได้หลังจากการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการหลอมผสม ตามลำดับ

ตำแหน่งของพีคที่พบใน RPET/PC ประกอบด้วย 1) para-substituted phenol rings ที่อยู่ในสายโซ่หลักของ PC (824 cm⁻¹) พบที่ 835 cm⁻¹ ใน RPET/PC 2) พบการเปลี่ยนแปลงของพีค Isopropylidene ใน PC (1,991 cm⁻¹) ที่มีความเข้มสูงและแคบกลับปรากฏเป็นเพียงแค้ไหล่

(shoulder) ที่ $1,197\text{ cm}^{-1}$ ใน RPET/PC 3) การเคลื่อนตำแหน่งของพีคบริเวณ C-H bending ของ RPET จาก $1,452$ เป็น $1,455\text{ cm}^{-1}$ ใน RPET/PC 4) asymmetric C-C-O stretching ของ carbon ใน aromatic ring ของ RPET ที่ $1,244\text{ cm}^{-1}$ เคลื่อนไปที่ $1,249\text{ cm}^{-1}$ ใน RPET/PC 5) O-C-C asymmetric stretching ของ RPET ที่ $1,096\text{ cm}^{-1}$ ถูกเคลื่อนไปที่ $1,091\text{ cm}^{-1}$ ใน RPET/PC 6) มีการเคลื่อนจากบริเวณ aromatic C-H out of plane bending ที่ 871 cm^{-1} (RPET) เป็น 875 cm^{-1} ปรากฏการดูดกลืนของ C=O stretching ถึง 2 ตำแหน่ง บริเวณ $1,778$ และ $1,723\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งตำแหน่งที่ปรากฏเป็นการเคลื่อนพีคของ C=O stretching ใน PC กับ RPET ที่ $1,776$ และ $1,724\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ โดยการพบ C=O stretching 2 ตำแหน่ง ใน RPET/PC นั้น เป็นการยืนยันว่าในระหว่างกระบวนการหลอมผสมมีการเกิด RPET/PC copolymer จากการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ระหว่าง RPET กับ PC ผ่านปฏิกิริยา transesterification โดย C=O stretching ที่เกิดขึ้นเป็นส่วน of aliphatic aromatic carbonate ที่มีโครงสร้างดังภาพที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ LAFI M. AL-OMAIRI[28] ได้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ในระหว่างการหลอมผสมผ่านเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ความเร็วรอบ 100 rpm ของ PC, PTT และ PBT จากเทคนิค FTIR พบ C=O stretching ของ aliphatic aromatic carbonate ที่ $1,777\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับที่พบในงานวิจัย นอกจากนี้ RPET/PC ยังตรวจพบ hydroxyl end group ที่ $3,551\text{ cm}^{-1}$, carbonyl overtone ที่ $3,433\text{ cm}^{-1}$, C=O stretching ของ aliphatic ester ที่ $1,724\text{ cm}^{-1}$, deformation C-H alkane ที่ $1,338$ และ $1,408\text{ cm}^{-1}$, aromatic C-H wagging ที่ 724 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคตำแหน่งเดียวกับที่พบใน RPET ขณะที่พบ $(\text{CH}_2)_n$ โดย $n \geq 4$ (Alkane) ที่ 551 cm^{-1} ตำแหน่งเดียวกับ PC



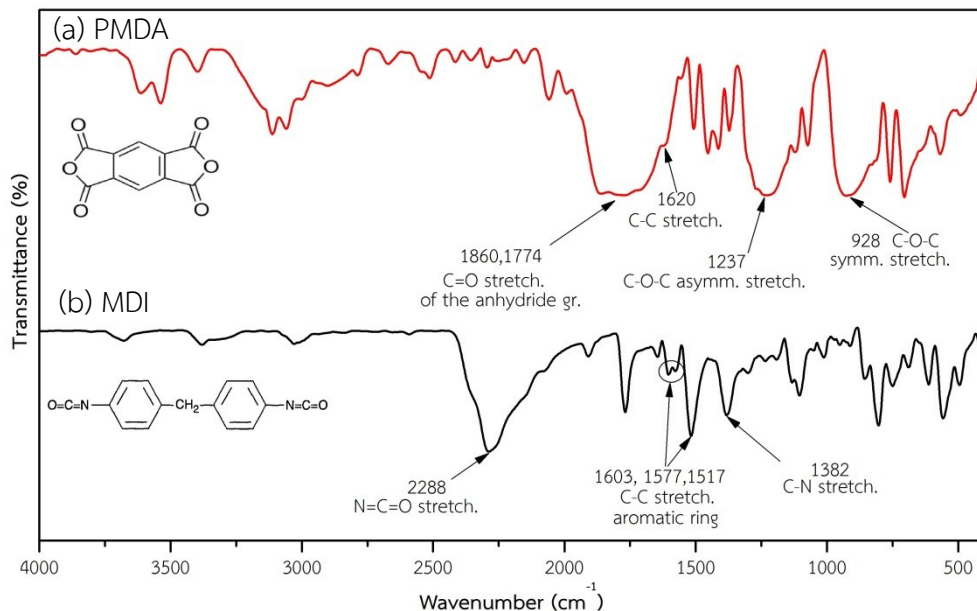
ภาพที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของ RPET/PC



ภาพที่ 4.4 aliphatic aromatic carbonate

chain extender ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย PMDA และ MDI นั้นมีชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่ของ RPET กับ PC แตกต่างกัน โดยได้แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโครงสร้างของ chain extender แต่ละชนิดไว้ดังนี้

จากภาพที่ 4.5(a) ได้แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่สำคัญและเป็นลักษณะเฉพาะของ PMDA [30, 31] ประกอบด้วย C=O stretching ของ anhydride group (O=C-O-C=O) 2 บริเวณ คือ 1,860 และ 1,774 cm^{-1} , C-C stretching ของ benzene ring ที่ 1,620 cm^{-1} , C-O-C asymmetric และ symmetric stretching ของ anhydride ที่ตำแหน่ง 1,237 และ 928 cm^{-1} ตามลำดับ ขณะที่ภาพที่ 4.5(b) ได้แสดงตำแหน่งการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญใน MDI [30, 32] ประกอบด้วย isocyanate group (-N=C=O stretching) ที่ 2,288 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่ของพอลิเอสเตอร์ อีกทั้งยังพบ C-C stretching ใน aromatic ring บริเวณ 1,603, 1,577 และ 1,517 cm^{-1} , C-N stretching ที่ 1,382 cm^{-1} และส่วนของหมู่ CH_2 ที่ 912 cm^{-1} (wagging)

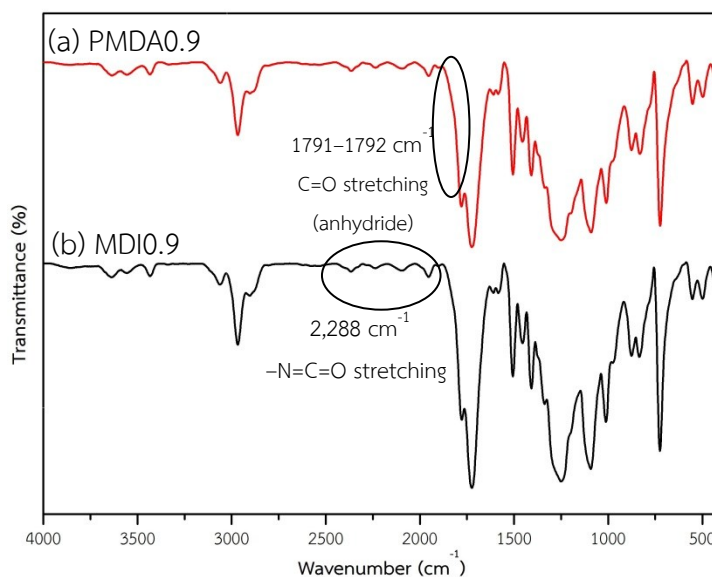


ภาพที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของ chain extender (a) PMDA และ (b) MDI

เนื่องจากการเติม PMDA หรือ MDI ลงในระหว่างการหลอมผสม RPET กับ PC ทุกปริมาณ พบว่ากราฟที่ปรากฏมีตำแหน่งความยาวคลื่นเหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกพิจารณากราฟของ RPET/PC ที่มีการเติม chain extender ปริมาณเท่ากัน คือ 0.9 wt% เนื่องจากเป็นปริมาณการเติมที่คาดว่า chain extender สามารถเกิดปฏิกิริยากับ RPET และ PC ในระหว่างการหลอมผสมมากที่สุด

ภาพที่ 4.6(a) แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่สำคัญของ RPET/PC ที่มีการเติม PMDA ปริมาณ 0.9 wt% พบว่า PMDA กับ RPET และ PC เกิดปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการหลอมผสมเนื่องจากไม่สามารถตรวจพบพีคบริเวณ $1,791-1,792\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่ง C=O stretching ของ anhydride โดย PMDA สามารถเชื่อมต่อกับ RPET และ PC ด้วยพันธะเอสเทอร์จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง anhydride group ใน PMDA กับ hydroxyl end group ของ RPET กับ PC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yong L. และคณะ[33] ที่ได้ทำการยืนยันการเกิดเคมีระหว่างหมู่ anhydride ของ PE-g-MA กับ hydroxyl end group ของ RPET จากการไม่พบพีคของ C=O stretching ของ anhydride จึงทำให้ตำแหน่งพีคที่ตรวจวัดมีลักษณะคล้ายกับ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender

ภาพที่ 4.6(b) แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่สำคัญของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% เพื่อใช้ในการยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการหลอมผสมด้วยเทคนิค FTIR พบว่ากราฟ FTIR สเปกตรัมไม่พบสัญญาณของ isocyanate group ($-N=C=O$ stretching) ที่ $2,288\text{ cm}^{-1}$ ของ MDI ในพอลิเมอร์ผสม แสดงให้เห็นว่า isocyanate group ได้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์กับหมู่ปลายสายโซ่ของ RPET กับ PC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yong L. และคณะ[33] ที่ได้ทำการยืนยันการเกิดเคมีระหว่าง isocyanate group ของ MDI กับ hydroxyl end group และ carboxyl end group ของ RPET จากการไม่พบพีคของ $-N=C=O$ stretching ของ MDI ใน RPET แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่สามารถตรวจพบพีคของพันธะเอไมด์ ($-NH-CO-$) บริเวณ $1,663$ กับ $1,582\text{ cm}^{-1}$ จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง isocyanate group กับ carboxyl end group ใน RPET และ PC รวมถึงไปถึงตำแหน่งของพันธะ urethane บริเวณ $1,690-1,740\text{ cm}^{-1}$ จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง isocyanate group กับ hydroxyl end group ใน R-PET และ PC เนื่องจากเป็นตำแหน่งซ้อนทับกับ C=O stretching ของ RPET กับ PC ดังที่งานวิจัยของ Xianwen T. และคณะ[21] ได้รายงานผล FTIR ของ RPET/PC (70/30 w/w) กับ MDI ไว้ คาดว่ามีสาเหตุมาจากปริมาณ MDI ที่ทำการเติมลงไปในการหลอมผสมมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับองค์ประกอบในการผสมทั้งหมด จึงทำให้พีคมีความเข้มที่ต่ำจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ส่งผลให้ตำแหน่งพีคที่ตรวจวัดได้จึงแสดงลักษณะคล้ายกับ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender เช่นเดียวกัน ของ RPET/PC ที่มีการเติม PMDA ปริมาณ 0.9 wt%



ภาพที่ 4.6 FTIR สเปกตรัมของ RPET/PC ที่เติม chain extender ปริมาณ 0.9 wt% เท่ากัน ประกอบด้วย (a) PMDA และ (b) MDI

นอกจากนี้ในงานวิจัยได้มีการศึกษาความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ในรูปแบบสารละลายเจือจางและแบบหลอมเหลวของพอลิเมอร์ เพื่อใช้ในการสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการหลอมผสมเช่นเดียวกับเทคนิค FTIR ในหัวข้อถัดไป

4.1.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายเจือจาง RPET/PC

ค่า Intrinsic viscosity (IV) เป็นค่าที่แสดงถึงความหนืดของสารละลายเจือจางพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบ ด้วยเทคนิค Ubbelohde Viscometer โดยการเพิ่มขึ้นของค่า IV นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุล จึงนำเทคนิคนี้มาใช้เพื่อศึกษาตัวแปรที่สามารถปรับปรุงน้ำหนักโมเลกุลของ RPET ได้แก่ PC, chain extender ประกอบด้วย PMDA และ MDI ที่ปริมาณการเติม 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% และยังสามารถใช้ยืนยันถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างการหลอมผสม

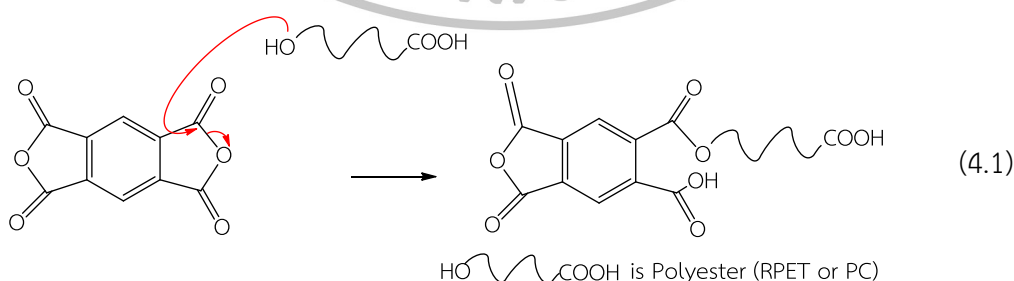
จากตารางที่ 4.1 ได้แสดงค่า IV ของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender พบว่า การหลอมผสม PC ลงไปใน RPET เพียงอย่างเดียว การเติม PMDA ทุกปริมาณ และ MDI ปริมาณ 0.5 และ 0.7 wt% ลงใน RPET/PC แสดงค่า IV ที่น้อยกว่า RPET โดยคาดว่าปริมาณปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วงหลอมผสมระหว่าง RPET กับ PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender มีปริมาณน้อยหรืออาจมีผลพลอยได้ (by product) ที่ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว โดยค่า IV ของ RPET, PC และ RPET/PC มีค่าเท่ากับ 0.75, 0.50 และ 0.59 dL/g

ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่า IV ของ RPET/PC นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง RPET กับ PC ยืนยันได้ว่าในระหว่าง การหลอมผสมมีการเกิดการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ผ่านปฏิกิริยา transesterification เกิดขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ RPET/PC ที่มีการเติม chain extender ทั้ง 2 ชนิด ที่ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% พบว่าค่า IV มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการเติม chain extender มากขึ้น โดยในกรณีที่มีการเติม PMDA ลงใน RPET/PC ค่า IV มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือ 0.48, 0.50 และ 0.51 dL/g ตามลำดับ ขณะที่การเติม MDI ลงใน RPET/PC สามารถเห็นการเพิ่มขึ้นของค่า IV ตามปริมาณการเติม MDI ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คือ 0.62, 0.66 และ 0.78 dL/g ตามลำดับ โดยเฉพาะการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC ให้ค่า IV ที่มากกว่า RPET (0.75 dL/g)

จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม RPET กับ PC ในกรณีที่ใช้ PMDA ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลของ RPET หรือ RPET กับ PC พบว่า บางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) โดยน้ำที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการสลายตัวของ สายโซ่พอลิเมอร์ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อไป ส่งผลให้ค่า IV ที่น้อย ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการทำ ปฏิกิริยาระหว่าง PMDA กับ RPET ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยของ Firas A. และคณะ[34] พบว่าได้น้ำเป็น ผลพลอยได้ (by product) ได้เช่นกัน

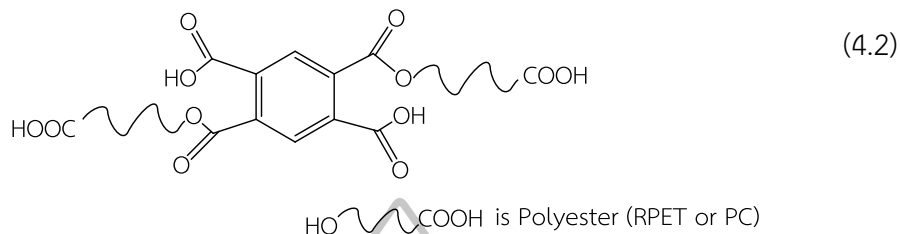
กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุล RPET หรือ RPET กับ PC ด้วย PMDA จะ เกิดขึ้นจาก hydroxyl end group (นิวคลีโอไฟล์) ของ RPET และ PC ไปสร้างพันธะโคเวเลนต์ โดย การเปิดวงแหวนของ anhydride (อิเล็กโตรไฟล์) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการเติม PMDA ดังสมการต่อไปนี้

(a) Blocking reaction เป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลของ PMDA เชื่อมต่อกับพอลิเอสเทอร์ 1 โมเลกุล

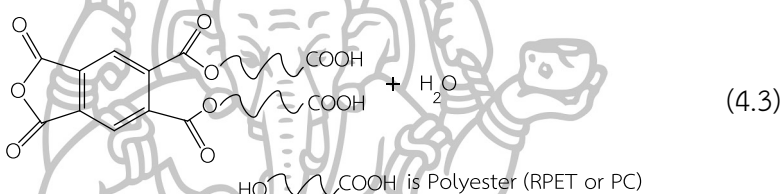


(b) Coupling reaction เป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลของ PMDA เชื่อมต่อกับพอลิเอสเทอร์ 2 โมเลกุล ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี

กรณี 1

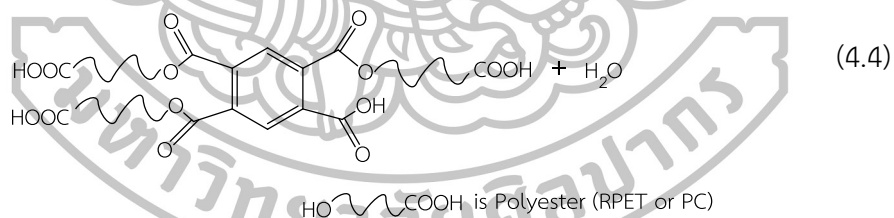


กรณี 2

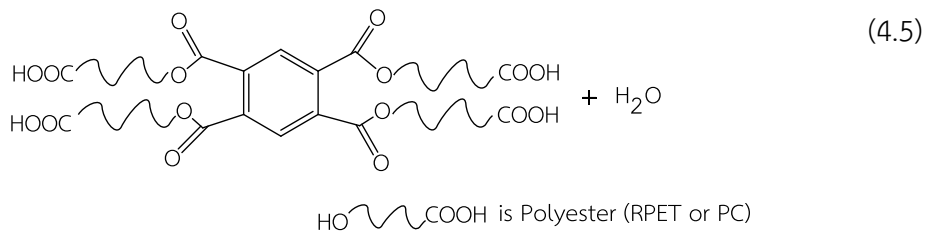


(c) Branching reactions เป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลของ PMDA เชื่อมต่อกับพอลิเอสเทอร์ มากกว่า 2 โมเลกุล ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี

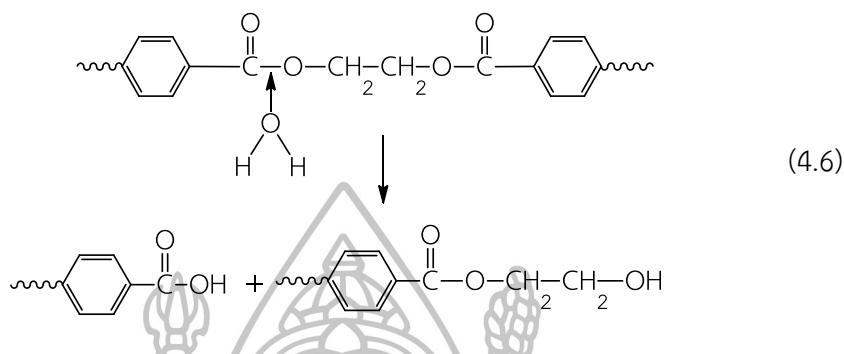
กรณี 1



กรณี 2



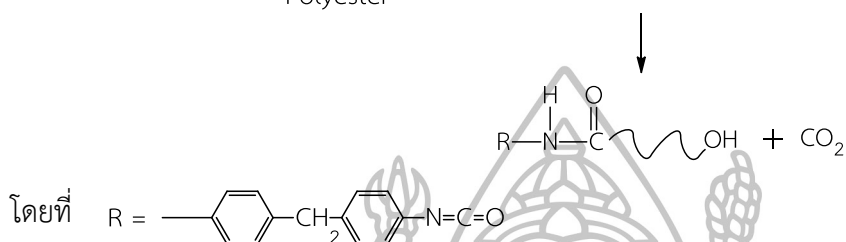
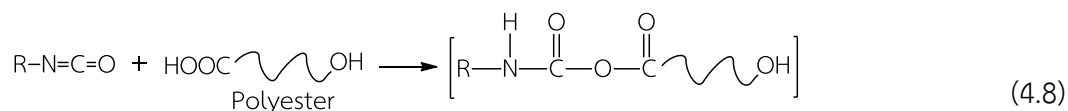
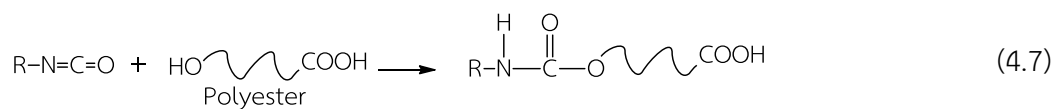
จากสมการของการเกิดปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า สมการที่ 4.3-4.5 มีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อไป ดังสมการที่ 4.6 ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแตกออก



ขณะที่เมื่อใช้ MDI ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับสายโซ่โมเลกุลของ RPET หรือ RPET กับ PC ในช่วงการหลอมผสม พบว่าให้ค่า IV มากกว่าการใช้ PMDA เมื่อเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าการใช้ MDI มีปริมาณการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่าการใช้ PMDA ในการทำปฏิกิริยากับ RPET หรือระหว่าง RPET กับ PC เนื่องจาก MDI สามารถทำปฏิกิริยากับ hydroxyl end group (-OH) และ carboxyl end group (-COOH) ของ RPET กับ PC โดยไม่ทำให้เกิดผลพลอยได้ (by product) ที่ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการสลายตัวขณะหลอมผสมในสถานะเดียวกัน จึงทำให้ค่า IV เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม MDI คือ 0.62, 0.66 และ 0.78 dL/g ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบ RPET/PC ที่มีการเติม chain extender ปริมาณเท่ากัน คือ 0.9 wt% พบว่า การใช้ PMDA ให้ค่า IV เพียง 0.51 dL/g ขณะที่ MDI มีค่า IV ถึง 0.78 dL/g ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่า RPET (0.75 dL/g) โดยการเพิ่มขึ้นของค่า IV นี้สามารถใช้ในการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาเคมี ความว่องไว และปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเชื่อมต่อกับสายโซ่โมเลกุลให้แก่ RPET หรือ RPET กับ PC ในช่วงการหลอมผสม ซึ่งการเติม chain extender มากขึ้นนั้นเปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเชื่อมต่อกับหมู่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณ chain extender ทั้ง PMDA และ MDI ที่เติมในงานวิจัยนี้ไม่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันแบบโครงสร้างร่างแห (crosslink) เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรสามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในตัวทำละลาย Phenol/TCE

กลไกการทำปฏิกิริยาระหว่าง MDI กับ RPET หรือ RPET กับ PC ถูกแสดงไว้ในสมการที่ 4.7 และ 4.8 โดย isocyanate group (-NCO) ใน MDI นั้นสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้ง hydroxyl end group (-OH) และ carboxyl end group (-COOH) ของ RPET และ PC โดยปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นช่วงการหลอมผสม มีดังนี้



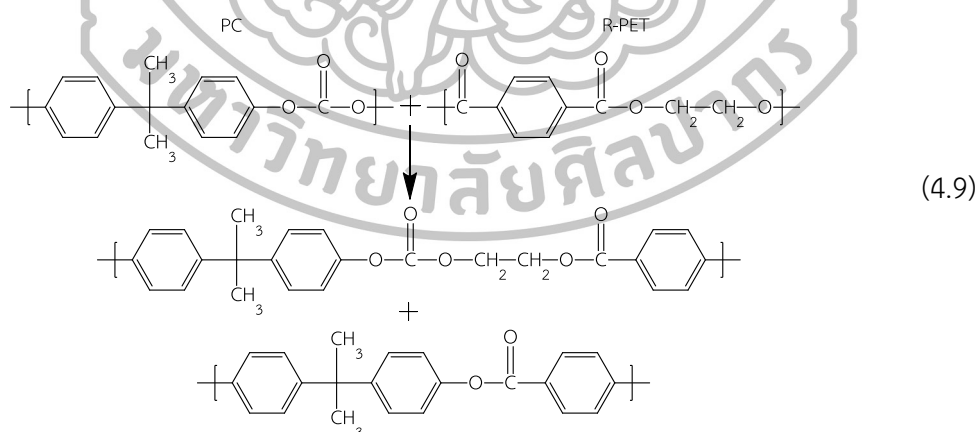
เห็นได้ว่า isocyanate group จะทำปฏิกิริยากับ hydroxyl end group ของพอลิเอสเทอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสายโซ่โมเลกุลที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะยูรีเทน (urethane linkage) ขณะที่เมื่อ isocyanate group ทำปฏิกิริยากับหมู่ carboxyl end group ของพอลิเอสเทอร์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น คาร์บอนไดออกไซด์กับสายโซ่โมเลกุลที่มีพันธะเอไมด์ (amide linkages) ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีสอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Torres[3] ที่มีการเติม MDI และ HMDI ลงใน RPET และ VPET สามารถทำให้ค่า IV และน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างการหลอมผสม ตารางที่ 4.1 แสดงค่า Intrinsic viscosity (IV) ของชิ้นงานทดสอบทุกสูตร

Sample	Intrinsic viscosity (IV) [η] (dL/g)
RPET	0.75
PC	0.50
RPET/PC	0.59
PMDA0.5	0.48
PMDA0.7	0.50
PMDA0.9	0.51
MDI0.5	0.62
MDI0.7	0.66
MDI0.9	0.78

4.1.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อความหนืดหลอมเหลวของ RPET/PC

Melt flow index (MFI) หรือดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว สามารถอธิบายความหนืดของพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบได้ อีกทั้งยังเป็นการศึกษาทางอ้อมในการบอกถึงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยถ้าผลการทดสอบมีค่า MFI ต่ำ หรือมีความหนืดสูง จะแสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลที่มีค่าสูง ในขณะที่ค่า MFI สูง หรือมีความหนืดต่ำ จะแสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลที่มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ศึกษาผลของการเติม PC และ chain extender ประกอบด้วย PMDA และ MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ต่อความหนืดของ RPET ที่สภาวะทดสอบเดียวกันและสามารถสนับสนุนถึงการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการหลอมผสม

จากตารางที่ 4.2 ได้แสดงค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวออกมาเป็นค่า Melt flow index (MFI) มีหน่วยเป็นกรัมต่อ 10 นาที ทดสอบที่อุณหภูมิ 260 °C น้ำหนักกด 2.16 kg พบว่าเมื่อหลอมผสม PC ลงใน RPET ไปเพียงอย่างเดียว ทำให้ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากค่า MFI ที่ลดลงจาก 146.49 เป็น 64.28 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ทำให้ค่า MFI ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยา transesterification ระหว่าง RPET (ester) กับ PC (carbonate) ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันเป็น RPET/PC copolymer โดย PC ที่มีความหนืดสูง (MFI ของ PC มีค่าเท่ากับ 10.80 กรัมต่อ 10 นาที) ช่วยเพิ่มความหนืดให้แก่ RPET ซึ่งสมการการเกิดปฏิกิริยา transesterification ระหว่าง RPET กับ PC มีลักษณะคล้ายกับที่เกิดขึ้นในการหลอมผสม PC, PTT และ PBT ในงานวิจัยของ LAFI M. AL-OMAIRI [28] ดังสมการที่ 4.9



และเมื่อเปรียบเทียบค่า MFI ของ RPET/PC ที่มีการเติม chain extender แตกต่างกัน 2 ชนิด เพื่อใช้ในการทำหน้าที่เชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลระหว่าง RPET หรือ RPET กับ PC พบว่า การใช้ MDI สามารถเพิ่มความหนืดให้แก่ RPET/PC ตั้งแต่ปริมาณการเติมเพียง 0.5 wt% ขณะที่การเติม

PMDA ลงใน RPET/PC พบว่าความหนืดกลับมีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ถึงแม้จะใช้ปริมาณการเติมถึง 0.9 wt% บ่งบอกได้ว่าชนิดและปริมาณการเติม chain extender มีผลต่อความหนืดของ RPET/PC

ค่า MFI ของ RPET/PC ที่เติม PMDA ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% มีค่าเท่ากับ 146.09, 124.71 และ 68.78 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ค่า MFI ของ RPET/PC ที่มีเติม PMDA ทุกปริมาณ มีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender คาดว่าปริมาณการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ PMDA ในการเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลของ RPET หรือ RPET กับ PC ในช่วงการหลอมผสมมีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) ทำให้มีการเชื่อมกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลน้อย จากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่อมีการเติม PMDA ปริมาณมากขึ้น พบว่าค่า MFI จะมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณ PMDA ที่มากขึ้นแสดงถึงการมีหมู่ว่างไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเชื่อมต่อ RPET หรือ RPET กับ PC มากขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลยาวและมีความเกาะของโครงสร้างมากขึ้น จึงทำให้เคลื่อนที่ผ่านทางหัวดายได้ยาก เวลาที่พอลิเมอร์ไหลผ่านทางหัวดายจึงมากขึ้น

ส่วนค่า MFI ของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% มีค่าลดลงตามปริมาณการเติมอย่างเห็นได้ชัด คือ 62.08, 46.99 และ 19.79 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ ซึ่งจากการสังเกตพบว่าการเติม MDI เพียง 0.5 wt% ลงใน RPET/PC ให้ค่า MFI ที่ใกล้เคียงกับ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender (64.28 กรัมต่อ 10 นาที) อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเติม chain extender ที่เท่ากันพบว่า MDI สามารถทำหน้าที่เชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลของ RPET หรือ RPET กับ PC ได้ดีกว่า PMDA สังเกตได้จากค่า MFI ของ RPET/PC ที่เติม MDI มีค่าต่ำกว่า RPET/PC ที่เติม PMDA ทุกปริมาณ แสดงให้เห็นว่าการเติม MDI ลงใน RPET/PC ระหว่างการหลอมผสม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่มีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) ในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เหมือนกับ PMDA จึงทำให้ RPET/PC มีค่าหนืดที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% แสดงการลดลงของ MFI มีค่าเท่ากับ 19.79 กรัมต่อ 10 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PC (10.80 กรัมต่อ 10 นาที)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Melt flow index (MFI) ภายใต้สภาวะ 260 °C/2.16 kg

Sample	Melt flow index(MFI), g/10 min
RPET	146.49
PC	10.80
RPET/PC	64.28
PMDA0.5	146.09

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Melt flow index (MFI) ภายใต้สภาวะ 260 °C/2.16 kg (ต่อ)

Sample	Melt flow index(MFI), g/10 min
PMDA0.7	124.71
PMDA0.9	68.78
MDI0.5	62.08
MDI0.7	46.99
MDI0.9	19.79

4.1.4 อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและความเข้ากันได้ของ RPET/PC

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์สมระหว่าง RPET และ PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender สามารถยืนยันได้จากเทคนิค DSC โดยการดูจากเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบ

จากตารางที่ 4.3 ได้แสดงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของ RPET, PC และ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่า T_g ของ RPET และ PC ปรากฏที่อุณหภูมิ 79.16 และ 142.92 °C ตามลำดับ ขณะที่ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ปรากฏ T_g 2 ตำแหน่ง คือ 82.16 และ 130.28 °C ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ระหว่าง T_g ของ RPET และ PC โดยคาดว่า T_g ตำแหน่งแรกเป็น T_g ของ RPET ที่ปรากฏในตำแหน่งอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม ส่วน T_g ตำแหน่งที่สองเป็นของ PC ปรากฏในตำแหน่งอุณหภูมิลดลงจากเดิม ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เป็นแบบ partial miscible blend โดยคาดว่ามีการเกิด RPET/PC polymer ผ่านปฏิกิริยา transesterification ระหว่าง RPET และ PC [35] สนับสนุนได้จากการพบ C=O stretching ของ aliphatic aromatic carbonate ที่บริเวณ 1,778 cm^{-1} จากการทดสอบ FTIR ในข้อที่ 4.1.1 และเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก เมื่อ RPET/PC มีการเติม chain extender 2 ชนิด ประกอบด้วย PMDA กับ MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% พบว่า T_g ปรากฏ 2 ตำแหน่ง โดยค่า T_g มีการเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากกว่าไม่มีการเติม chain extender

ในกรณีที่มีการเติม PMDA ลงใน RPET/PC พบ T_g 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่ง T_g ของ RPET ปรากฏที่ 85.4 8, 87.15 และ 86.32 °C ตามลำดับ ส่วน T_g ของ PC มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณการเติม PMDA ที่เพิ่มขึ้น คือ 133.44, 132.41 และ 133.46 °C ตามลำดับ ขณะที่เมื่อเติม MDI ลงใน RPET/PC พบ T_g 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่ง T_g ของ RPET คือ 85.55, 88.18 และ 87.1 °C ตามลำดับ โดย T_g ของ PC มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมอย่างเห็นได้ชัด เป็น 141.08, 136.77 และ 130.95 °C ตามลำดับ จากผลการทดลองที่พบแสดงให้เห็นว่าการใช้ MDI มี

ประสิทธิภาพในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ได้ดีกว่าการใช้ PMDA ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% สามารถทำให้ RPET และ PC เข้ากันได้มากที่สุดหรือมีการเกิด RPET/PC copolymer มากที่สุดจากทุกสูตรการผสมนั่นเอง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของ RPET, PC และ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender

Sample	T_g (°C)	
	PET phase	PC phase
RPET	79.16	-
PC	-	142.92
RPET/PC	82.16	130.28
PMDA0.5	85.48	133.44
PMDA0.7	87.15	132.41
PMDA0.9	86.32	133.46
MDI0.5	85.55	141.08
MDI0.7	88.18	136.77
MDI0.9	87.1	130.95

4.1.5 อิทธิพลของชนิดและปริมาณการเติม chain extender ที่มีผลต่อสมบัติทางเชิงกลของ RPET/PC

การนำพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตที่ผ่านการใช้งานแล้วมาหลอมขึ้นรูปใหม่ (RPET) พบว่ามักเกิดการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลในระหว่างกระบวนการหลอม ทำให้สายโซ่และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่ำลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ดีของ PET สูญเสียไป โดยเฉพาะความเหนียวที่เป็นสมบัติที่โดดเด่นของ PET ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ N.Torres และคณะ[2] ที่พบว่าสมบัติเชิงกลของ PET บริสุทธิ์ (VPET) และ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (RPET) แสดงสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน โดย VPET มีพฤติกรรมแตกหักแบบเหนียว (Ductile) ขณะที่ RPET มีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ (Brittle) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเติม PC และ chain extender 2 ชนิด ประกอบด้วย PMDA กับ MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของ RPET ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) และการทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ซึ่งผลของการทดสอบเชิงกลได้ถูกแสดงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขจากการทดสอบเชิงกลของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender

Sample	Tensile testing		Impact testing
	Young's Modulus (MPa)	Elongation (%)	Notched Impact strength(kJ/m ²)
RPET	958.4 ± 5.63	11.35 ± 1.35	4.64 ± 0.32
PC	803.21 ± 10.56	152.43 ± 8.36	73.4 ± 2.28
RPET/PC	1053.38 ± 4.91	11.51 ± 1.48	5.34 ± 0.57
PMDA0.5	1046.34 ± 3.47	6.73 ± 0.68	2.86 ± 0.62
PMDA0.7	1084.7 ± 5.76	5.28 ± 0.97	2.75 ± 0.55
PMDA0.9	1044.78 ± 11.13	10.35 ± 1.08	3.78 ± 0.65
MDI0.5	959.24 ± 26.33	11.37 ± 0.34	5.05 ± 0.24
MDI0.7	911.52 ± 16.94	162.86 ± 14.78	6.19 ± 0.27
MDI0.9	942.29 ± 39.64	381.95 ± 15.19	5.96 ± 0.33

4.1.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

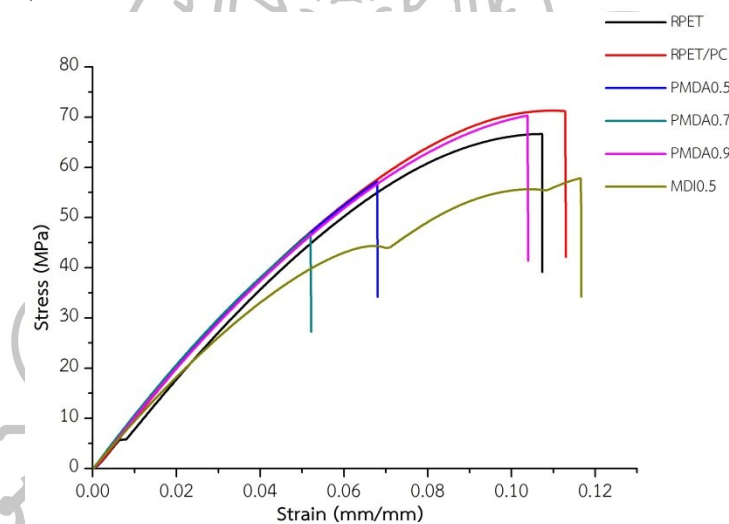
การทดสอบแรงดึงของ RPET, PC และ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุแบบทั่วไป (Universal testing machine) โดยใช้อัตราการดึง 10 mm/min และ load cell ขนาด 50 kN สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวพฤติกรรมกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) ซึ่งข้อมูลทั้งหมดนี้ถูกนำมาวิเคราะห์ผลของการเติม PC และ chain extender ประกอบด้วย PMDA กับ MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ต่อสมบัติเชิงกลเมื่อได้รับแรงดึง อีกทั้งยังช่วยในการยืนยันถึงความเข้ากันได้และการยึดเหนี่ยวกันระหว่าง RPET กับ PC

จากการพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) ของชิ้นงานทดสอบทุกสูตร พบว่าเกิดพฤติกรรมการเสียรูป 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

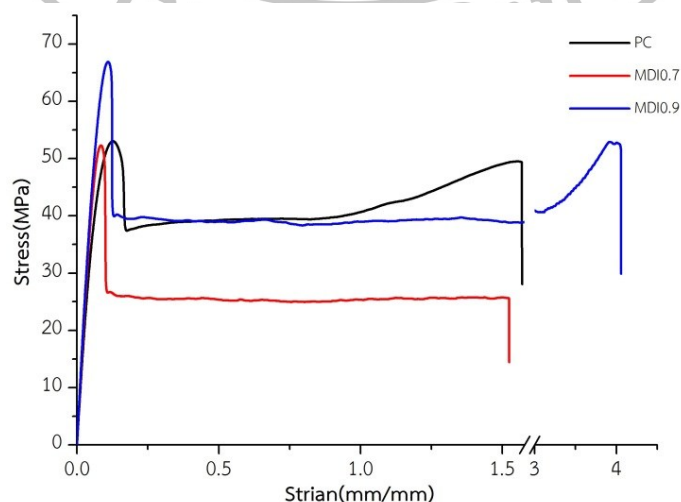
รูปแบบที่ 1 เป็นการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) ประกอบด้วย RPET, RPET/PC, RPET/PC ที่มีการเติม PMDA ทุกปริมาณ และ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% ดังภาพที่ 4.7 โดยกราฟที่ได้ไม่มีการปรากฏจุด yield หรือไม่เกิดการเปลี่ยนจากอีลาสติก (elastic) เป็นแบบพลาสติก (plastic deformation) บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานระหว่างการ

แตกหักน้อยของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) มีค่าน้อย

รูปแบบที่ 2 การแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) ประกอบด้วย PC, RPET/PC ที่มีเติม MDI ปริมาณ 0.7 และ 0.9 wt% ดังภาพที่ 4.8 โดย RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.7 wt% แสดงกราฟที่มีการปรากฏของจุด yield, การเกิดคอคอด (necking) และ cold drawing ตามลำดับ ก่อนเกิดการแตกหัก ในขณะที่ PC บริสุทธิ์ และ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% หลังจากการเกิด cold drawing แล้วยังมีการเพิ่มขึ้นของความเครียด (strain hardening) ที่ระดับการดึงยืดสูง ก่อนจะเกิดการแตกหัก บ่งบอกได้ว่าชิ้นงานทดสอบความสามารถดูดซับพลังงานระหว่างการแตกหักที่สูง ซึ่งสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) มีค่าสูง โดยสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก คือ เมื่อใช้ MDI ปริมาณ 0.9 wt% ใน RPET/PC สามารถเกิด strain hardening ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเหมือนกับ PC



ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟ stress กับ strain แสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะของชิ้นงานทดสอบ



ภาพที่ 4.8 แสดงกราฟ stress กับ strain แสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวของชิ้นงานทดสอบ

จากการทดสอบแรงดึงพบว่า %Elongation at break และ Young's Modulus ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในการผสมของชิ้นงานแต่ละสูตร โดยเมื่อ %Elongation at break สูงขึ้นจะพบว่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Young's Modulus) จะลดลง

เมื่อ RPET/PC มีการเติม PMDA ไปทำหน้าที่เป็น chain extender พบว่าชิ้นงานมีความแข็งแรง สันเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ดังภาพที่ 4.7 โดยค่า %Elongation at break ที่ได้มีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ในทุกปริมาณการเติม PMDA โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติม PMDA ปริมาณ 0.7 wt% ใน RPET/PC แสดงค่า %Elongation at break น้อยที่สุด แต่ในขณะเดียวกันค่า Young's modulus กลับมีค่าสูงกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ดังภาพที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

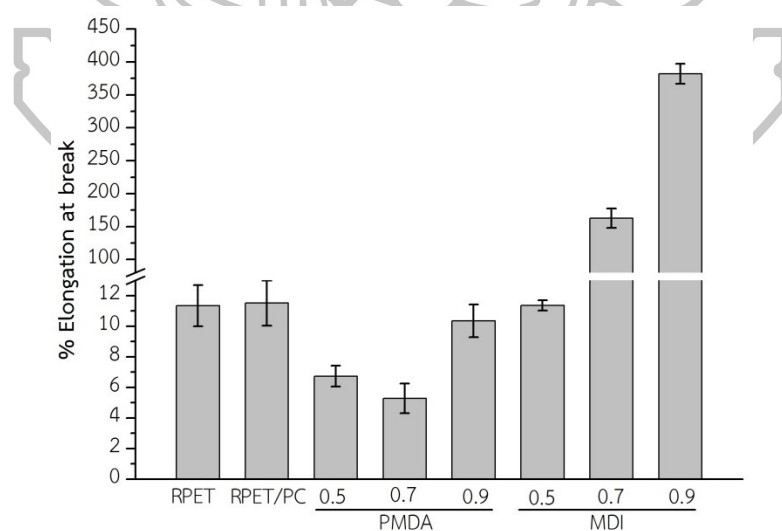
สาเหตุที่การเติม PMDA ลงใน RPET/PC แล้ว %Elongation at break มีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender อย่างเห็นได้ชัด คาดว่ามีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการใช้ PMDA เป็นตัวเชื่อมต่อ RPET หรือ PET กับ PC มีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง ยืนยันได้จากค่า IV ที่มีค่าน้อยหรือจากค่า MFI ที่สูงกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ซึ่งได้อธิบายไว้ในข้อที่ 4.1.2 และ 4.1.3 โดยกลไกการทำปฏิกิริยาได้อธิบายอย่างละเอียดไว้ในตอนที่ 4.1.2 อีกสาเหตุหนึ่งมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ที่ไม่แข็งแรงจากการใช้ PMDA เป็นตัวเชื่อมต่อ สนับสนุนจากการศึกษาสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึง พบว่าการไม่มีและมีการเติม PMDA ทุกปริมาณแสดงการแยกเฟสกันระหว่าง RPET ซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสหลักกับอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ คือ PC ทำหน้าที่เป็นเฟสรอง โดยค่า %Elongation at break ที่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาค PC, การยึดติดกันระหว่าง RPET และ PC หลังได้รับแรงดึงรวมถึงปริมาณการหลุดออกของ PC (debonding) โดยภาพที่ 4.12(d) และ 4.12(e) แสดงรอยแตกของ RPET/PC ที่มีเติม PMDA ปริมาณ 0.5 และ 0.7 wt% ตามลำดับ พบว่าภาพทั้ง 2 แสดงอนุภาคของ PC ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม (droplet particle) และการหลุดออกของ PC ซึ่งให้เห็นถึงการยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ที่ไม่แข็งแรง โดยบริเวณที่มีการยึดติดไม่ดีหรือตำแหน่งที่ PC หลุดออกจาก RPET จะเกิดเป็นจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) โดยเฉพาะ RPET/PC ที่มีเติม PMDA 0.7 wt% ทำให้เกิดการถ่ายโอนแรงไม่ดีระหว่าง RPET และ PC จึงมีความสามารถในการยึดตัวต่ำ ในขณะเดียวกันค่า Young's Modulus กลับให้ค่าสูงกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender เนื่องจากโครงสร้าง RPET/PC copolymer ที่เกิดขึ้นจากการใช้ PMDA เป็นตัวเชื่อมต่อสายโซ่ระหว่าง RPET กับ PC ในช่วงการหลอมผสมนั้นโครงสร้างมีความเกาะกันมากกว่า RPET/PC copolymer ที่ RPET กับ PC มีการเชื่อมต่อกันผ่านปฏิกิริยา transesterification ทำให้เมื่อ RPET/PC ที่มีเติม PMDA ปริมาณ 0.7 wt% ได้รับแรงดึงสายโซ่ที่มีโครงสร้างเกาะกันจะเกิด

การจัดเรียงตัวได้ยาก อีกทั้ง PC ที่กระจายตัวอยู่มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซโม่เลกุล ทำให้ค่า Young's Modulus จึงมีค่าที่สูง ขณะที่ภาพที่ 4.12(f) แสดงรอยแตกบริเวณผิวชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึงของ RPET/PC ที่มีเติม PMDA ปริมาณ 0.9 wt% พบรูปร่างของ PC ทั้งที่เป็นอนุภาคทรงกลม และเกิดการยืดของ PC ตามแนวการดึง (elongated) แสดงให้เห็นว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ดีขึ้น จึงทำให้เกิดการถ่ายโอนแรงระหว่าง RPET กับ PC ได้ดีขึ้น ชิ้นงานสามารถยืดได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณการหลุดออกของ PC ลดลงหรือจุกตรวมแรงเค้น (stress concentration) ลดลงนั่นเองจึงส่งผลให้ค่า Young's Modulus ลดลงเช่นกัน

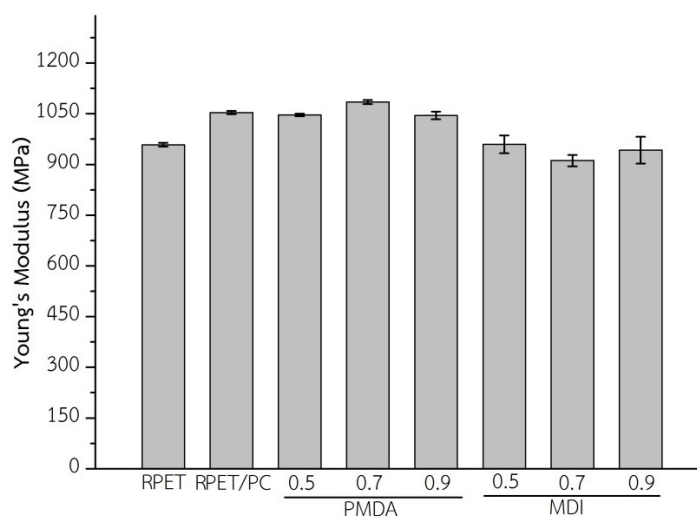
เมื่อ RPET/PC มีการเติม MDI ทำหน้าที่เป็น chain extender ลงไป พบว่า RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% เป็นชิ้นงานที่มีความแข็งแรงเปรียบเทียบกับ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ในภาพที่ 4.7 โดยค่า %Elongation at break ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อปริมาณการเติม MDI ลงใน RPET/PC มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.7 และ 0.9 wt% พบว่าชิ้นงานมีความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ดังภาพที่ 4.8 โดยค่า %Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม MDI ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.9 ขณะที่ค่า Young's Modulus ของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ทุกปริมาณมีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender โดย RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% แสดงค่า Young's Modulus สูงที่สุดเนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งแรง ขณะที่ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.7 และ 0.9 wt% มีค่า Young's Modulus น้อยกว่า RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% เนื่องจากชิ้นงานมีความเหนียวมากขึ้น ดังภาพที่ 4.10

การเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% ลงใน RPET/PC แสดงค่า %Elongation at break ไม่แตกต่างจาก RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อสังเกตค่า IV พบว่า RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% มีค่าสูงและค่า MFI มีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender ซึ่งแสดงถึงความยาวของสายโซโม่เลกุลที่มากขึ้นเมื่อมีการเติม MDI ลงไปเพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อกับสายโซโม่เลกุล อีกทั้งยังเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึง ในภาพ 4.12(c) และ 4.12(g) พบว่าทั้ง RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% เห็นการแยกเฟสกันระหว่าง RPET กับ PC แต่ขนาดของอนุภาค PC ที่กระจายตัวใน RPET มีขนาดเล็กลง เมื่อมีการเติม MDI ลงไป 0.5 wt% ซึ่งการที่ขนาดของอนุภาค PC เล็กลง และปริมาณการหลุดของ PC น้อย แสดงให้เห็นถึงการยึดติดระหว่างเฟส (interfacial adhesion) ที่ดี มีแรงตึงผิวต่ำ (interfacial tension) และการเกิดเป็นจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) น้อย ทำให้ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.5 wt% มีค่า Young's Modulus น้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender และเมื่อมี

การเติม MDI ปริมาณ 0.7 และ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC พบสิ่งที่น่าสนใจคือ ค่า %Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender จาก 11.51% เป็น 162.8% และ 381.95% ตามลำดับ ซึ่งค่า %Elongation at break ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า IV และค่า MFI ที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเกิด RPET/PC copolymer จากการใช้ MDI เชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุล RPET กับ PC เกิดขึ้นปริมาณมาก ทำให้มีความเข้ากันได้ระหว่าง RPET และ PC ที่ดี ยืนยันได้จากค่า T_g ผ่านเทคนิค DSC พบว่า T_g ของทั้ง 2 พอลิเมอร์เคลื่อนที่เข้าหากันอย่างมาก และจากการศึกษาสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึงดังภาพที่ 4.12(h) และ 4.12(i) พบว่าพื้นผิวชิ้นงานมีการยึดของเนื้อพอลิเมอร์จนมีลักษณะคล้ายเส้นใย (fibrillar structure) ซึ่งไม่สามารถระบุตำแหน่งของ RPET และ PC ในภาพได้ เนื่องจากเฟสของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ถูกทำให้ยึดจนผสมดูเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เนื่องจากไม่พบการกระจายตัวและการหลุดของ PC ใน RPET สามารถสนับสนุนได้ว่า MDI สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่าง RPET กับ PC เกิดเป็น RPET/PC copolymer ได้ดี และเกิดเป็นจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) น้อย โดยเฉพาะ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% เป็นชิ้นงานที่มีความเหนียวมากที่สุด เนื่องจากพบการยึดออกของพอลิเมอร์จนมีลักษณะคล้ายเส้นใย (fibrillar structure) ที่เด่นชัดมาก นอกจากนี้ยังมีการเกิด strain hardening ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเกิดผลึกจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ระหว่างทำการดึงยึด และเมื่อชิ้นงานมีความเหนียวที่มากขึ้นนั้น จะสังเกตว่าค่า Young's Modulus ลดลงเช่นกัน



ภาพที่ 4.9 แสดงค่า %Elongation at break ของ RPET, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender



ภาพที่ 4.10 แสดงค่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Young's Modulus) ของ RPET, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender

4.1.5.2 การทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing)

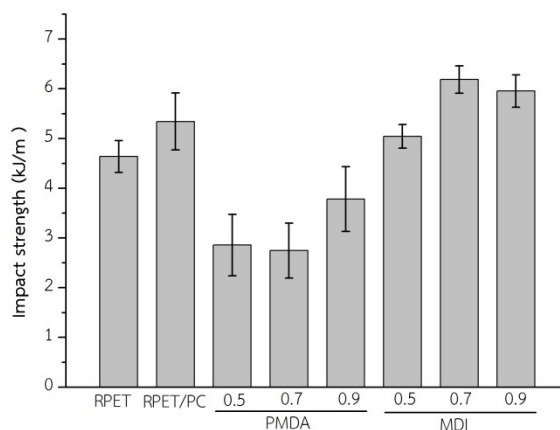
เป็นการทดสอบเพื่อใช้อธิบายความเหนียว (Toughness) ของชิ้นงานทดสอบ ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสม รวมถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ RPET กับ PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ผ่านค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) โดยหากมีการยึดเหนี่ยวที่ดีระหว่าง RPET กับ PC จะทำให้มีการถ่ายโอนแรงที่ดี กล่าวคือถ้าชิ้นงานมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มาก ค่า Impact strength จะมีค่าสูง นอกจากนี้ค่า Impact strength ยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับภาพสัณฐานวิทยาบริเวณผิวชิ้นงานหลังได้รับแรงกระแทก ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบชิ้นงานแบบ Notched Izod Impact testing ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องวางชิ้นงานทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มหนัก 4 จูล เข้ากระแทกกับด้านที่มีรอยบาก

หลังจากการทดสอบพบว่าชิ้นงานทุกสูตรเกิดการแตกแบบ Complete Break ยกเว้น PC มีการแตกแบบ Partial Break ภาพที่ 4.11 ได้แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของ RPET, PC, RPET/PC และ RPET/PC ที่มีการเติมชนิดและปริมาณ chain extender ต่างๆ โดยจากภาพจะเห็นได้ว่าเมื่อเติม PC ลงไปใน RPET ทำให้ค่า Impact strength สูงขึ้น จาก 4.64 เป็น 5.34 kJ/m^2 แต่การเติม PMDA ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC กลับทำให้ค่า Impact strength มีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender โดยมีค่าเท่ากับ 2.86, 2.75 และ 3.78 kJ/m^2 ตามลำดับ ในขณะที่การเติม MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC แสดงค่า Impact strength มีค่าเท่ากับ 5.05, 6.19 และ 5.96 kJ/m^2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเติม MDI ปริมาณ 0.7 และ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC ให้ค่า Impact strength ที่สูงกว่าทั้ง RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender และ RPET

สาเหตุที่ค่า Impact strength ลดลงเมื่อมีการเติม PMDA ลงใน RPET/PC คาดว่ามาจากปฏิกิริยาเคมีที่ PMDA กับ RPET หรือระหว่าง RPET กับ PC ที่เกิดขึ้น มีน้ำเป็นผลพลอยได้ในการทำปฏิกิริยา (by product) ซึ่งน้ำที่เกิดสามารถทำให้สายโซ่ของพอลิเอสเทอร์เกิดการสลายตัวผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยเฉพาะ RPET เนื่องจากเป็นพอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และเป็นองค์ประกอบหลักในการผสมจึงมีโอกาสเกิดการสลายตัวจากง่ายกว่า PC ส่งผลให้ RPET ซึ่งเป็นเฟสหลักสูญเสียความเหนียวจากเดิม ส่วนกรณีการผสม RPET กับ PC ที่ไม่มีการเติม chain extender นั้นปฏิกิริยาการเชื่อมต่อระหว่าง RPET กับ PC เกิดผ่าน transesterification ทำให้ไม่มีน้ำเป็นผลพลอยได้ในการทำปฏิกิริยา (by product) ความเหนียวของ RPET ซึ่งเป็นเฟสหลักจึงไม่สูญเสียไป เมื่อศึกษาภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานหลังได้รับแรงกระแทก RPET/PC ที่มีการเติม PMDA ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ดังภาพที่ 4.14(c-d), 4.14(e-f) และ 4.14(g-h) ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า สังเกตเห็นได้ว่าการแยกเฟสระหว่าง RPET กับ PC น้อยลงและมีการเชื่อมต่อระหว่าง RPET กับ PC ที่ดีขึ้นตามปริมาณ PMDA ที่มากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาที่ให้น้ำเป็นผลพลอยได้น้อยลง เนื่องจากการเติม PMDA ที่มากขึ้นแสดงถึงการมีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเชื่อมตอสายโซ่โมเลกุลของ RPET กับ PC ได้มากขึ้น โดยในภาพ 4.14(c-d) เป็นภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของ RPET/PC ที่มีการเติม PMDA ปริมาณ 0.5 wt% หลังได้รับแรงกระแทก แสดงการแยกเฟสกันระหว่าง RPET กับ PC อย่างเห็นได้ชัด และพบช่องว่างระหว่าง RPET กับ PC รวมไปถึงการหลุดออกของ PC ที่เป็นเฟสกระจายใน RPET ซึ่งบ่งบอกถึงการยึดติดกันระหว่าง RPET และ PC ที่ไม่ดี โดยช่องว่างต่างๆที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) ทำให้เมื่อได้รับแรงกระแทกจึงเกิดการถ่ายโอนแรงที่ไม่ดี เนื่องจาก PC ยังทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานได้ไม่เต็มที่ และ RPET ซึ่งเป็นเฟสหลักมีความเหนียวที่ลดลงจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ค่า Impact strength จึงมีค่าต่ำ แต่เมื่อปริมาณการเติม PMDA มากขึ้น แสดงถึงปริมาณปฏิกิริยาการเชื่อมต่อ RPET กับ PC ที่มากขึ้น สังเกตได้จากการหลุดออกของ PC ลดลงและการยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ที่ดีขึ้น ดังภาพ 4.14(e-f) ซึ่งทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถถ่ายโอนแรงระหว่าง RPET กับ PC ได้ดี ส่งผลให้ PC ทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานได้เพิ่มขึ้น และปริมาณการสลายตัวของ RPET เกิดขึ้นน้อยลง โดยเฉพาะภาพที่ 4.14(g-h) พบว่า RPET/PC ที่มีการเติม PMDA ปริมาณ 0.9 wt% แสดงลักษณะของ PC ที่มีทั้งเป็นอนุภาคทรงกลมและลักษณะยึดตามแนวแรงที่ได้รับแรงกระแทก พบการหลุดออกของ PC น้อยมาก ซึ่งให้เห็นถึงการยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ที่ดี ปริมาณการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นจากการใช้ PMDA ที่เพิ่มขึ้นในการเชื่อมตอสายโซ่โมเลกุลระหว่าง RPET กับ PC ทำให้เมื่อได้รับการกระแทกจึงเกิดการถ่ายโอนแรงที่ดี และเนื่องจากมีจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) น้อย จึงทำให้ PC สามารถดูดซับพลังงานได้เพิ่มขึ้น การสลายตัวของ RPET ลดลงเนื่องจากมีน้ำเป็นผลพลอยได้น้อยลง ส่งผลให้ RPET

ที่เป็นเฟสหลักสูญเสียความเหนียวน้อยลง ค่า Impact strength จึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า Impact strength ที่ได้ยังคงมีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender โดยจากการศึกษาภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender หลังได้รับแรงกระแทก กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า ในภาพที่ 4.14(a-b) สังเกตเห็นทั้งส่วนที่มีการแยกเฟสระหว่าง RPET กับ PC และส่วนที่ RPET กับ PC ยึดผสมดูเป็นเนื้อเดียว แสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดที่ดีระหว่างเฟส

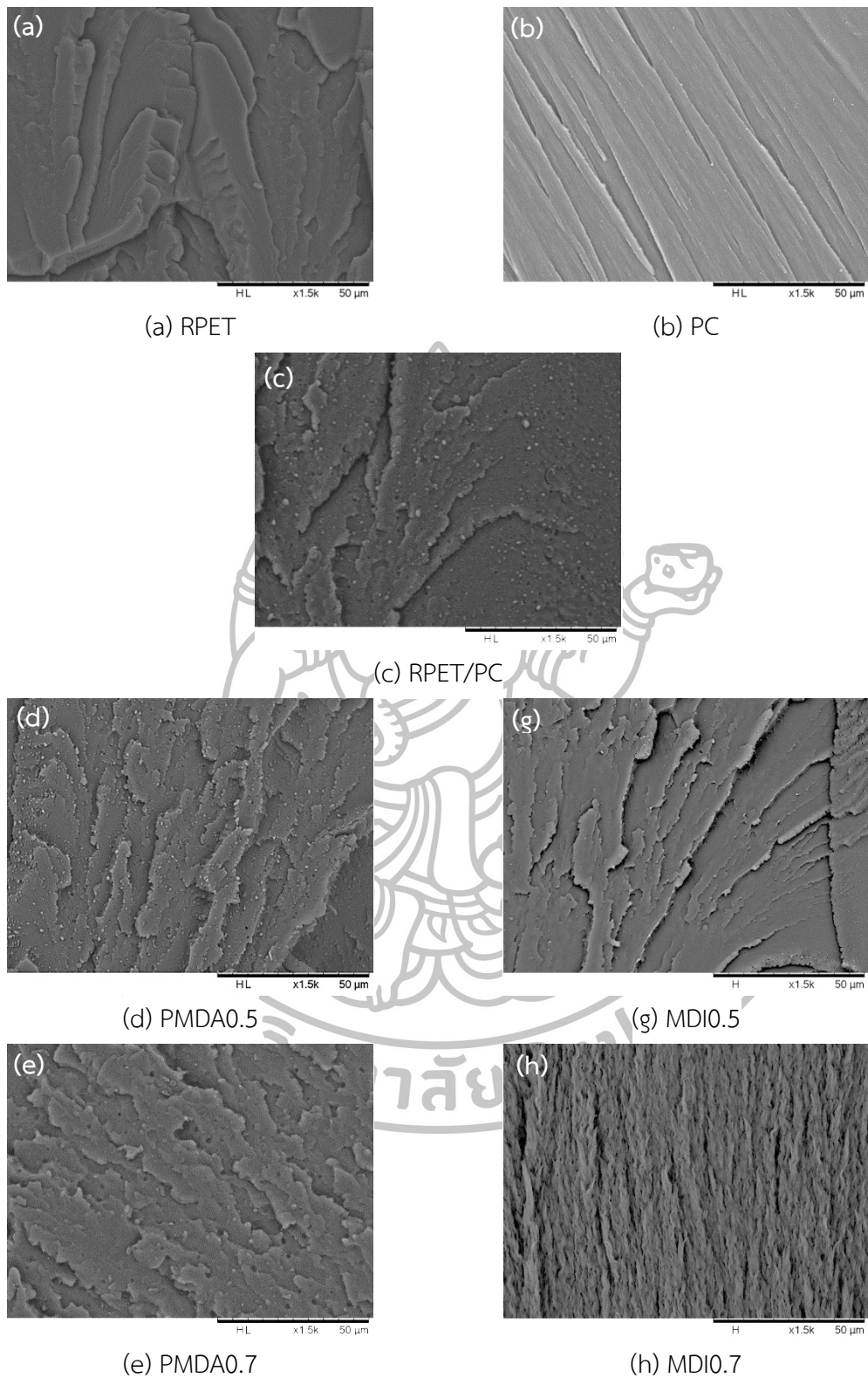
กรณีการเติม MDI ลงใน RPET/PC พบว่าการใช้ MDI เพียง 0.5 wt% ให้ค่า Impact strength ใกล้เคียงกับ RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender และเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม MDI เป็น 0.7 และ 0.9 wt% พบว่าค่า Impact strength สูงกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม chain extender และ RPET ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการใช้ MDI เชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุล RPET กับ PC ในช่วงการหลอมผสม ไม่เกิดน้ำเป็นผลพลอยได้หลังจากทำปฏิกิริยา (by product) เหมือนกับ PMDA ทำให้พอลิเอสเทอร์ไม่เกิดการสลายตัวผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ความเหนียวซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของ RPET และ PC ไม่สูญเสียไป โดยเมื่อใช้ MDI ปริมาณสูงขึ้น ยิ่งเพิ่มปริมาณการเชื่อมต่อสายโซ่ ความเข้ากันได้ และการเกิด RPET/PC copolymer ระหว่าง RPET และ PC มากขึ้น เนื่องจากปริมาณ MDI ที่มากขึ้นสัมพันธ์กับการมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายทั้งสองข้างของ RPET และ PC คือหมู่ Hydroxyl และหมู่ Carboxyl มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% หลังได้รับแรงกระแทก ดังภาพที่ 4.14(i-j), 4.14(k-l) และ 4.14(m-n) ตามลำดับ โดยใช้กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า พบว่าชิ้นงานมีการแตกหักแบบเหนียว เนื่องจากบริเวณรอยแตกของชิ้นงานมีความหยาบ และแนวการแตกไม่เป็นระเบียบ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากไม่สามารถจำแนกเฟส RPET กับ PC หรือการหลุดออกของ PC บริเวณรอยแตกของชิ้นงานได้ ทำให้เมื่อได้รับแรงจึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ดี และทำให้ดูดซับพลังงานได้มาก



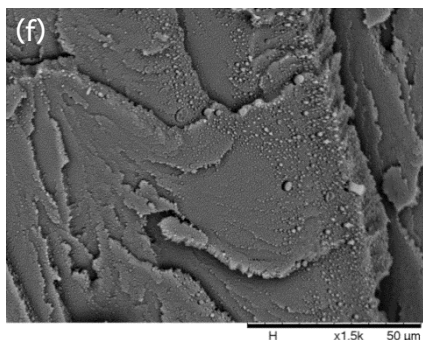
ภาพที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของ RPET, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ชิ้นงานทดสอบ

4.1.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender

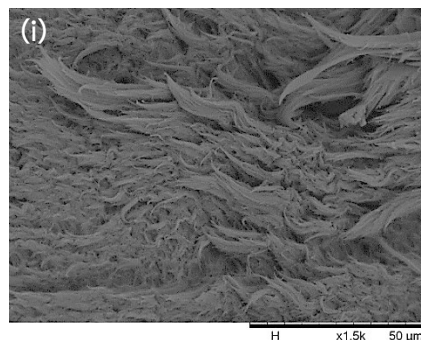
การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเทคนิคที่สามารถบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมวิธีหนึ่ง โดยสังเกตจากภาพบริเวณรอยแตกของชิ้นงานทดสอบหลังการทดสอบเชิงกล ในภาพที่ 4.12 ได้แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานหลังถูกทดสอบแรงดึง ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าการเติม MDI มีความสามารถในการเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลระหว่าง RPET กับ PC ได้ดีกว่าการใช้ PMDA อย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ปริมาณการเติมเพียง 0.5 wt% เนื่องจากขนาดอนุภาค PC ที่กระจายตัวอยู่ใน RPET เมื่อใช้ MDI มีขนาดเล็กกว่าการใช้ PMDA ดังภาพที่ 4.12(g) และ 4.12(d) ตามลำดับ ซึ่งขนาดอนุภาค PC ที่เล็กลงนั้นสามารถแสดงให้เห็นถึงการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว RPET กับ PC ที่มาก (interfacial adhesion) การหลุดออกของอนุภาค PC น้อย และเมื่อเติม MDI ปริมาณ 0.7 wt% ลงใน RPET/PC ไม่สามารถระบุตำแหน่งของ RPET กับ PC เนื่องจากไม่พบการกระจายของอนุภาค PC ใน RPET ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ที่ดี และความเข้ากันได้ที่มากขึ้นทำให้เมื่อ RPET/PC ได้รับแรงดึง เฟสทั้งสองเกิดการดึงยึดไปด้วยกันจนทำให้เฟสมีความต่อเนื่องเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะคล้ายเส้นใย (fibrillar structure) ดังภาพที่ 4.12(h) ขณะที่การเติม PMDA ปริมาณ 0.7 wt% ลงใน RPET/PC ยังคงแสดงการแยกเฟสระหว่าง RPET กับ PC อย่างเห็นได้ชัด และพบการหลุดออกของ PC จาก RPET ดังแสดงในภาพที่ 4.12(e) เมื่อเติม MDI 0.9 wt% ลงใน RPET/PC พบว่าภาพมีลักษณะคล้ายคลึงกับ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.7 wt% คือไม่สามารถระบุตำแหน่งของ RPET กับ PC ได้ โดยมีการเกิดคล้ายเส้นใย (fibrillar structure) มากขึ้นจากเดิม ในขณะที่การเติม PMDA ปริมาณ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC ยังคงเห็นการแยกเฟสระหว่าง RPET กับ PC แต่ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็ก และเกิดการหลุดออกน้อยลง แสดงให้เห็นว่าการเติม MDI สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง RPET กับ PC ได้ดีกว่าการใช้ PMDA เนื่องจาก isocyanate group ใน MDI สามารถทำปฏิกิริยากับ hydroxyl end group และ carboxyl end group ของ RPET กับ PC โดยยิ่งปริมาณการเติม MDI ที่เพิ่มขึ้น ยิ่งทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกิด RPET/PC copolymer มากขึ้นนั่นเอง สนับสนุนได้จากการเคลื่อนที่ของค่า T_g เข้ามาใกล้กันมากกว่าการใช้ PMDA รวมไปถึงค่า IV ที่มีสูงและค่า MFI ที่มีค่าน้อยกว่าการใช้ PMDA ซึ่งสามารถนำมายืนยันการเกิดปฏิกิริยาได้เป็นอย่างดี ในขณะที่การเติม PMDA ทุกปริมาณแสดงการแยกเฟสระหว่าง RPET กับ PC เนื่องจาก anhydride group ของ PMDA ทำปฏิกิริยาได้เพียงกับ hydroxyl end group ของพอลิเอสเทอร์ (RPET และ PC) อีกทั้งบางปฏิกิริยามีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) จึงส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่าง RPET กับ PC ไม่ดีเท่าการใช้ MDI



ภาพที่ 4.12 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบแรงดึง (tensile test) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



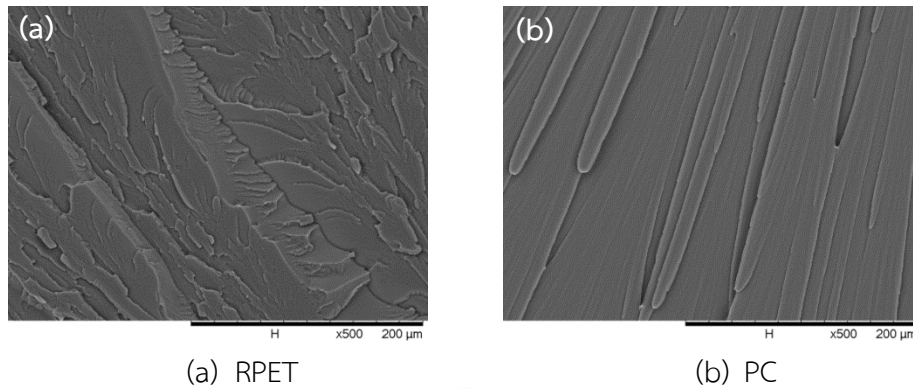
(f) PMDA0.9



(i) MDIO.9

ภาพที่ 4.12 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบแรงดึง (tensile test) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า(ต่อ)

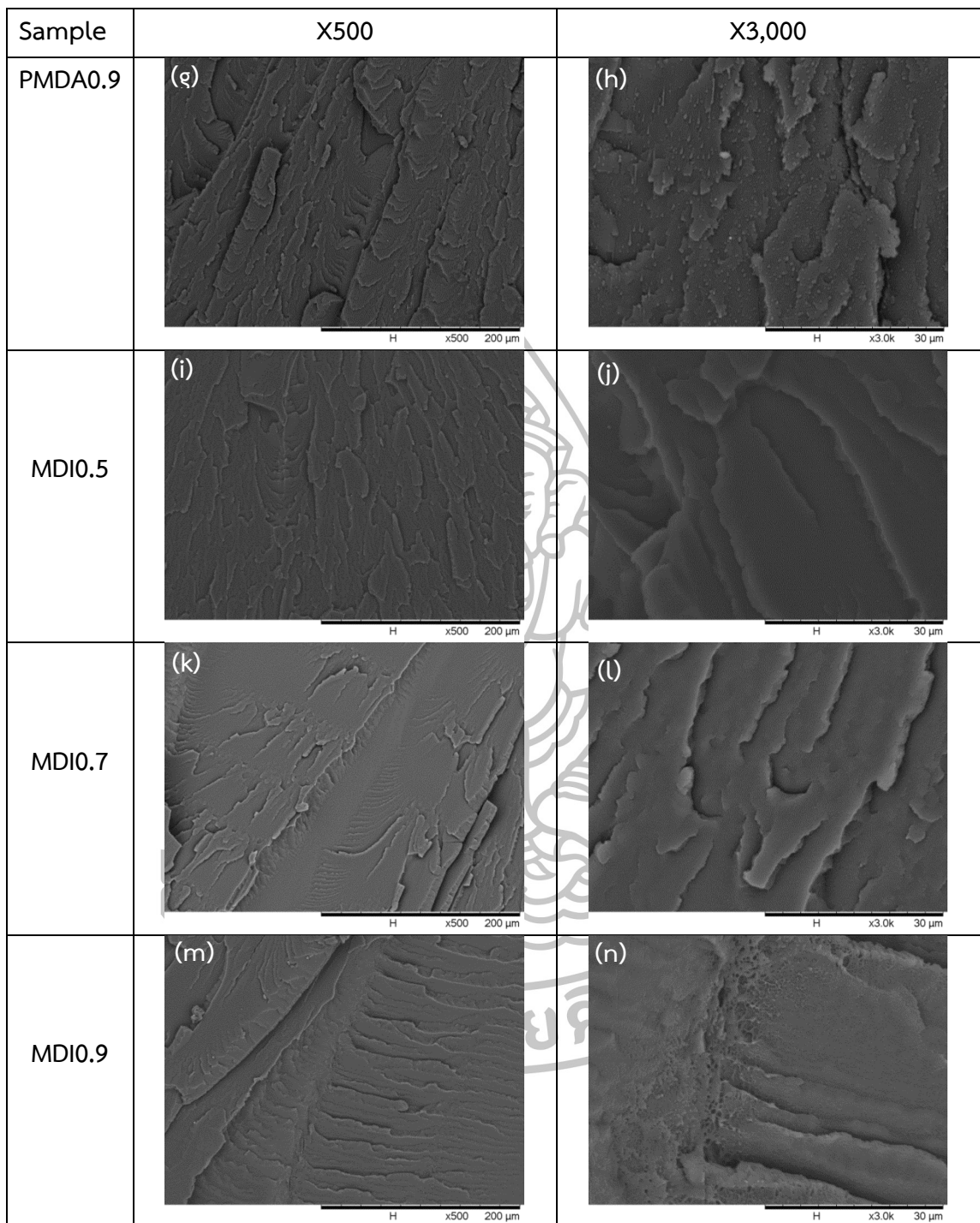
ภาพที่ 4.13 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานหลังถูกทดสอบแรงกระแทกของ RPET และ PC ที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยภาพที่ 4.13(a) เป็นของ RPET พบว่าผิวของชิ้นงานมีความขรุขระ มีริ้วการแตกหักที่ไม่เป็นระเบียบ ส่วนภาพที่ 4.13(b) เป็นของ PC จะเห็นได้ว่าเนื้อ PC เกิดการยึดไปตามแนวการให้แรง แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 ภาพนี้มีการแตกหักแบบเหนียว ซึ่งเป็นสมบัติที่โดดเด่นของ RPET กับ PC และเมื่อนำ PC หลอมผสมกับ RPET พบว่าชิ้นงานมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจาก RPET เนื่องจากรอยแตกของชิ้นงาน RPET/PC ในภาพที่ 4.14(a-b) แสดงบริเวณที่เกิดการยึดออกของเนื้อพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ได้โดยคาดว่าเป็นการยึดออกของทั้งสองเฟส และบริเวณที่อนุภาค PC กระจายตัวอยู่ใน RPET จากนั้นเมื่อทำการเติมชนิดและปริมาณของ chain extender ประกอบด้วย PMDA และ MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% เพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลของ RPET หรือ RPET กับ PC พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยการเติม PMDA ลงใน RPET/PC ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ดังภาพที่ 4.14 (c-d), 4.14(e-f) และ 4.14(g-h) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเติม PMDA ที่มากขึ้นจะช่วยลดการหลุดออกของอนุภาค PC และเพิ่มการยึดติดระหว่าง RPET กับ PC ได้มากขึ้น โดยเฉพาะที่ปริมาณการเติม PMDA ปริมาณ 0.9 wt% ลักษณะของ PC ที่ฝังอยู่ใน RPET เปลี่ยนจากลักษณะทรงกลมกลายเป็นเส้นยึดตามแนวการรับแรง ขณะที่สัณฐานวิทยาของ RPET/PC เมื่อเติม MDI ปริมาณ 0.5, 0.7 และ 0.9 wt% ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.14(i-j), 4.14(k-l) และ 4.14(m-n) ตามลำดับ พบว่าไม่เห็นการแยกเฟสระหว่าง RPET กับ PC ตั้งแต่การเติม MDI เพียง 0.5 wt% แสดงให้เห็นว่าการใช้ MDI สามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง RPET กับ PC ได้ดีกว่าการเติม PMDA โดยเฉพาะการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC พบสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะยึดของเนื้อพอลิเมอร์ผสมตามแนวการรับแรง และไม่สามารถจำแนกตำแหน่งของ RPET กับ PC ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ดี ส่งผลให้สามารถดูดซับพลังงาน และถ่ายโอนแรงระหว่างเฟสได้ดี



ภาพที่ 4.13 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ของ RPET และ PC ที่กำลังขยาย 500 เท่า

Sample	X500	X3,000
PET/PC	(a) Scale bar: 200 μm	(b) Scale bar: 30 μm
PMDA0.5	(c) Scale bar: 200 μm	(d) Scale bar: 30 μm
PMDA0.7	(e) Scale bar: 200 μm	(f) Scale bar: 30 μm

ภาพที่ 4.14 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ที่กำลังขยาย 500 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 4.14 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender ที่กำลังขยาย 500 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ (ต่อ)

จากการศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC พบว่าการใช้ MDI ปริมาณ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC สามารถเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ RPET ได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่นๆ ยืนยันได้จากค่า IV และ MFI นอกจากนี้ MDI ยังทำหน้าที่เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง RPET กับ PC โดยการเกิด RPET/PC copolymer ซึ่งยืนยันได้จากค่า T_g ของ RPET กับ PC ที่เคลื่อนเข้าใกล้กันมากที่สุด และยังสามารถปรับปรุงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจากภาพสัณฐานวิทยาที่ไม่พบการแยกเฟสที่ชัดเจน รวมไปถึงสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง %Elongation at break และค่า Impact strength ดังนั้น RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% จึงเป็นสูตรที่ให้ผลโดยรวมดีที่สุดใน การนำกลับมาใช้ในงานเชิงวิศวกรรม

4.2 ศึกษาผลของลำดับการหลอมผสม RPET, PC และ glass bead ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบผสม

ในการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการหลอมผสม RPET, PC และ glass bead แตกต่างกัน โดยจำนวนรูปแบบลำดับการผสมรวมถึงสัดส่วนขององค์ประกอบในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 สังเกตได้ว่าทุกรูปแบบลำดับการผสมมีสัดส่วนองค์ประกอบที่เท่ากัน โดยการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตแต่ละรูปแบบต้องผ่านความร้อน 1-2 ครั้ง ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ซึ่งการผ่านความร้อนหลายๆรอบจะส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว และส่งผลต่อสมบัติต่างๆที่ลดลง ดังนั้นการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตแต่ละรูปแบบจำเป็นต้องเติม chain extender เพื่อช่วยในการเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ โดย chain extender ที่เลือกใช้ คือ MDI ปริมาณ 0.9 wt% ซึ่งเป็นชนิดและปริมาณที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงน้ำหนักโมเลกุล ความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC จากการวิเคราะห์ที่ในหัวข้อที่ 4.1 ดังนั้นผลการทดลองของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% เป็นหลัก

glass bead ที่เลือกใช้ในงานวิจัย คือ Hollow glass microsphere ประกอบด้วย ผิวแก้วชั้นนอกที่มีความแข็งตึง (stiffness) ภายในบรรจุก๊าซเฉื่อย ลักษณะเป็นทรงกลมกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 13-20 μm ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic filler) ที่มีน้ำหนักเบา ช่วยลดการใช้เนื้อพอลิเมอร์ และสามารถเพิ่มความแข็งแรงแก่พอลิเมอร์คอมพอสิต[36] ได้ถูกทำการปรับสภาพผิวทั้งหมด 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 ปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย NaOH เพื่อเป็นการทำความสะอาดพื้นผิว เพิ่มความหยาบแก่พื้นผิว และเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (interfacial interlocking) และที่สำคัญคือเป็นการเติมหมู่ -OH ให้เข้าไปอยู่บนผิวของ glass bead (hydroxylate) ขั้นตอนที่ 2 นำ glass bead ที่ปรับสภาพผิวด้วย NaOH มาทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลน 3-Glycidyloxypropyl trimethoxy silane (GPS) ใน ethanol ทำให้ glass

bead มีหมู่ Epoxide อยู่บริเวณผิวสามารถทำปฏิกิริยากับ hydroxyl end group (-OH) และ carboxyl end group (-COOH) ของ RPET กับ PC ขณะหลอมผสม[37]

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงรูปแบบและสัดส่วนการผสม RPET, PC , glass bead และ MDI

sample	Extrusion 1 st				Extrusion 2 nd		
	RPET (wt%)	PC (wt%)	GB (wt%)	MDI (wt%)	RPET (wt%)	PC (wt%)	MDI (wt%)
RPET/PC/GB	75.28	18.82	5	0.9	0	0	0
(RPET/GB)/PC	75.28	0	5	0	0	18.82	0.9
(PC/GB)/RPET	0	18.82	5	0	75.28	0	0.9

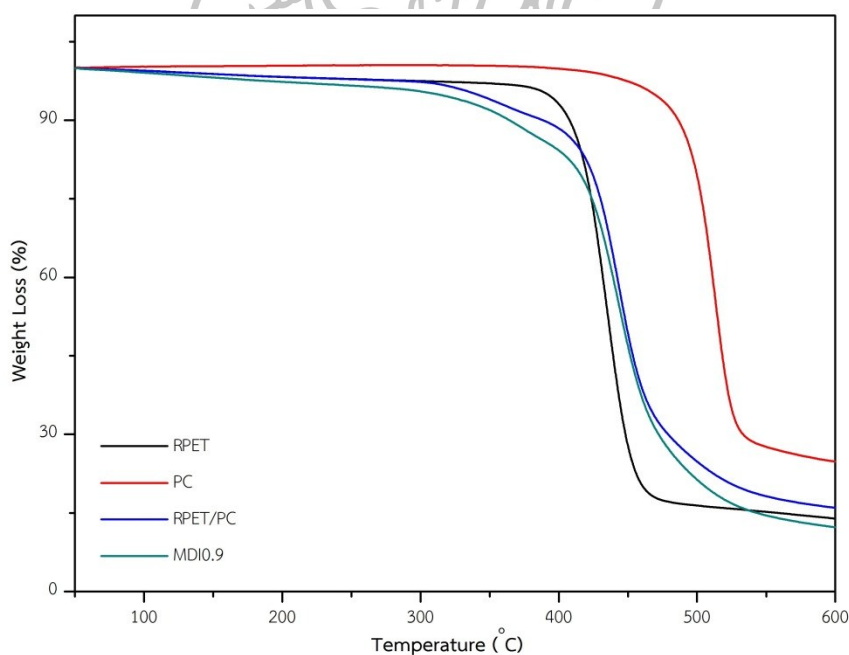
4.2.1 ผลของลำดับการผสม RPET, PC, glass bead ต่อความเสถียรทางความร้อนด้วย

เทคนิค TGA

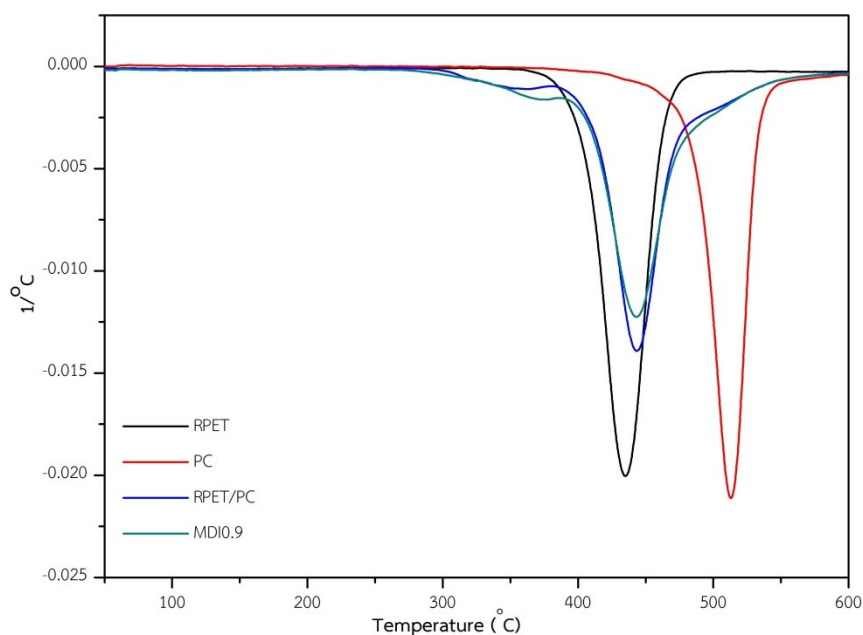
การนำพอลิเมอร์คอมพอสิตมาทดสอบด้วยเทคนิค TGA นั้นเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 50-600 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศ N₂ ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย โดยหลักการคือทำการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สามารถนำมาอธิบายความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC, glass bead แตกต่างกันได้ และผลของการเติม glass bead จากกราฟ TGA ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำหนักที่เหลือจากการสลายตัวทางความร้อนกับอุณหภูมิ และกราฟ DTG เป็นกราฟอนุพันธ์ของ TGA เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของน้ำหนักชิ้นงานที่สูญเสียไปต่ออุณหภูมิ

จากภาพที่ 4.15 และ 4.16 เป็นกราฟ TGA และ DTG ของ RPET, PC, RPET/PC, PET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% ตามลำดับ ได้มีการสรุปข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากเทคนิค TGA ไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่า RPET และ PC แสดงการสลายตัวทางความร้อนเพียงขั้นเดียว โดยอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ของ RPET กับ PC ปรากฏที่ 434.94 และ 512.80 °C ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET กับ PC ทั้งที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% มีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนคล้ายคลึงกัน คือ ปรากฏการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้นตอน โดยการสลายตัวขั้นแรกปรากฏเป็นไหล่พิค (shoulder) ซึ่งคาดว่าเป็นตำแหน่งที่เกิดการสลายตัวของสายโซ่เมกกุลสั้นๆของ RPET ที่ไม่เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่าง RPET กับ PC โดยอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ในขั้นแรกของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% มีค่าสูงกว่า RPET/PC ที่ไม่มีการเติม MDI แสดงให้เห็นว่าการใช้ MDI ทำให้เกิดเชื่อมต่อกันระหว่าง RPET หรือ RPET กับ PC ได้มากผ่านการทำปฏิกิริยาของ isocyanate group ของ MDI กับหมู่ hydroxyl end group (-OH) และ carboxyl end group (-COOH) ของ RPET กับ PC ขณะที่

RPET/PC เกิดการการเชื่อมต่อนระหว่าง RPET กับ PC ผ่านเพียงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ (transesterification) เท่านั้น ส่วนการสลายตัวขั้นที่สองเป็นตำแหน่งที่ RPET ซึ่งเฟสหลักใน RPET/PC เกิดการสลายตัวทางความร้อน โดยพบว่า การเติม PC สามารถเพิ่มความเสถียรทางความร้อนของ RPET ได้ ยืนยันได้จากค่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) มีค่าสูงขึ้นจาก 434.94 เป็น 444.40 °C แต่เมื่อมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจาก RPET/PC ที่ไม่มีการเติม MDI คือมีค่าเท่ากับ 443.36 °C ในขั้นที่สามไม่ปรากฏเป็นพีคอย่างเด่นชัดโดยมีลักษณะซ้อนทับ (overlap) กับการสลายตัวขั้นที่สองทำให้ไม่สามารถหาค่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ในขั้นนี้ได้ ซึ่งคาดว่า เป็นตำแหน่งที่ RPET/PC copolymer และ PC ได้เกิดการสลายตัว จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติม MDI เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องเติมลงในขั้นตอนสุดท้ายของการหลอมผสมในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ประกอบด้วย RPET/PC/GB, (RPET/GB)/PC และ (PC/GB)/RPET เพื่อลดการสลายตัวทางความร้อน และช่วยเชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุล ขณะทำการหลอมผสม



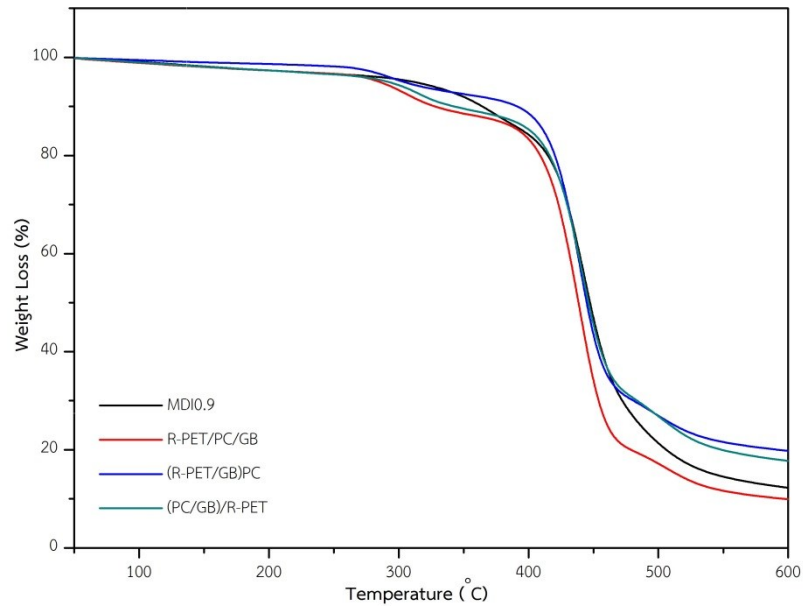
ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟ TGA ของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI



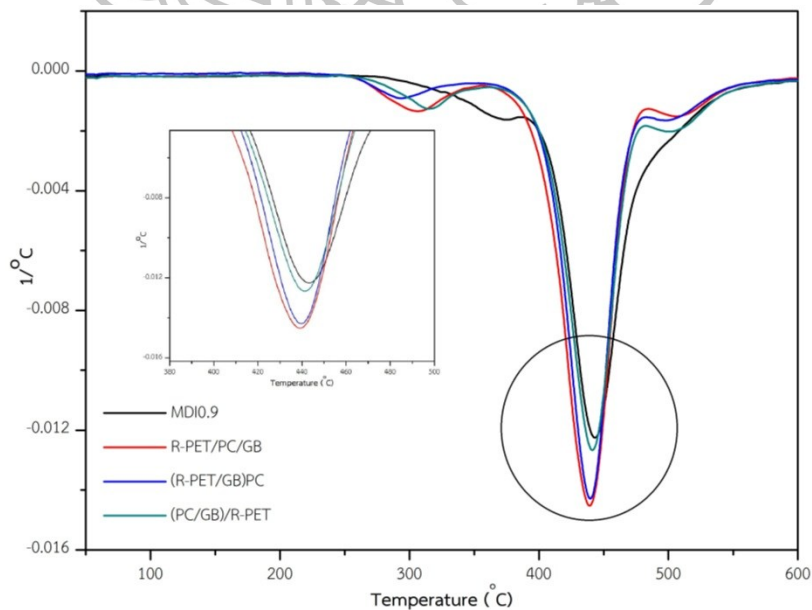
ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟ DTG ของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI

จากภาพที่ 4.17 และ 4.18 แสดงกราฟ TGA และ DTG ของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ประกอบด้วย RPET/PC/GB, (RPET/GB)/PC และ (PC/GB)/RPET พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้งหมดเกิดการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้นตอน โดยขั้นแรกและขั้นที่สามมีลักษณะเป็นไหล่พิค (shoulder) ชัดเจนมากขึ้น จากตารางที่ 4.6 ได้แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขของพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเทคนิค TGA พบว่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ในขั้นที่สองและขั้นที่สามของพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ RPET, RPET/PC copolymer กับ PC เกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน ตามลำดับ ขณะที่อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ในขั้นแรกซึ่งเป็นตำแหน่งที่สายโซ่สั้นๆของ RPET การเกิดการสลายตัวมีความแตกต่างกันเมื่อมีลำดับการผสมต่างกัน โดยพบว่า (PC/GB)/RPET มีค่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) มากที่สุดในพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้งหมด ตามด้วย RPET/PC/GB และ (RPET/GB)/PC ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า (PC/GB)/RPET มีปริมาณสายโซ่สั้นๆของ RPET เกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยสิ่งที่น่าสนใจที่พบคือ (RPET/GB)/PC เป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ในระหว่างการเตรียม RPET ต้องผ่านความร้อนถึง 2 ครั้ง เช่นเดียวกับ (PC/GB)/RPET ที่ PC ต้องผ่านความร้อน 2 ครั้งเช่นเดียวกัน แต่กลับพบว่าค่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ในขั้นที่สอง กลับมีค่าใกล้เคียงกับ RPET/PC/GB ซึ่งเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ผ่านความร้อนระหว่างหลอมเพียง 1 ครั้ง แสดงให้เห็นถึงความเสถียรทางความร้อนที่ดีโดยสาเหตุที่ทำให้ค่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ต้องผ่านความร้อน

ถึง 2 ครั้ง คาดว่ามาจาก glass bead ซึ่งเป็น Inorganic filler ที่มีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่า พอลิเมอร์จึงสามารถช่วยดูดซับพลังงานความร้อนและหน่วงการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ ได้ อีกสาเหตุหนึ่งคือการเติม MDI เพื่อทำให้หน้าที่เชื่อมต่อสายโซ่พอลิเมอร์เข้าด้วยกัน ช่วยชะลอการสลายตัวทางความร้อน



ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟ TGA ของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ



ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟ DTG ของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากเทคนิค TGA ของ RPET, PC, RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิต

Sample	step1			step2			Step3			%Residue
	T _{onset}	T _{max}	T _{end}	T _{onset}	T _{max}	T _{end}	T _{onset}	T _{max}	T _{end}	
RPET	415.21	434.94	453.62	-	-	-	-	-	-	16.60
PC	495.81	512.94	526.29	-	-	-	-	-	-	26.91
RPET/PC	327.24	366.97	367.9	424.63	444.4	469.23	-	-	-	18.03
MDI0.9	352.27	377.91	378.51	423.86	443.36	472.43	-	-	-	14.48
RPET/PC/GB	281.90	306.36	327.78	416.26	439.01	458.74	499.49	509.67	530.56	11.56
(RPET/GB)/PC	273.56	292.53	313.15	419.34	439.71	457.43	483.48	501.99	517.43	21.93
(PC/GB)/RPET	293.53	316.83	332.52	420.03	441.27	459.46	496.17	505.76	527.4	19.96

4.2.2 ผลของลำดับการผสม RPET, PC, glass bead ต่อสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ด้วย DMA

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ทั้งหมด 3 รูปแบบด้วยเทคนิค DSC พบว่าปรากฏตำแหน่ง T_g ของ RPET เท่านั้นไม่สามารถตรวจพบตำแหน่ง T_g ของ PC ในพอลิเมอร์คอมพอสิตได้ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องความละเอียดอ่อนของเครื่องมือ อีกทั้งปริมาณการเติม PC ในระบบผสมมีปริมาณน้อย แต่การใช้เทคนิค DMA สามารถตรวจวัดค่า T_g ได้ทั้ง RPET และ PC จากพิกของกราฟ $\tan \delta$

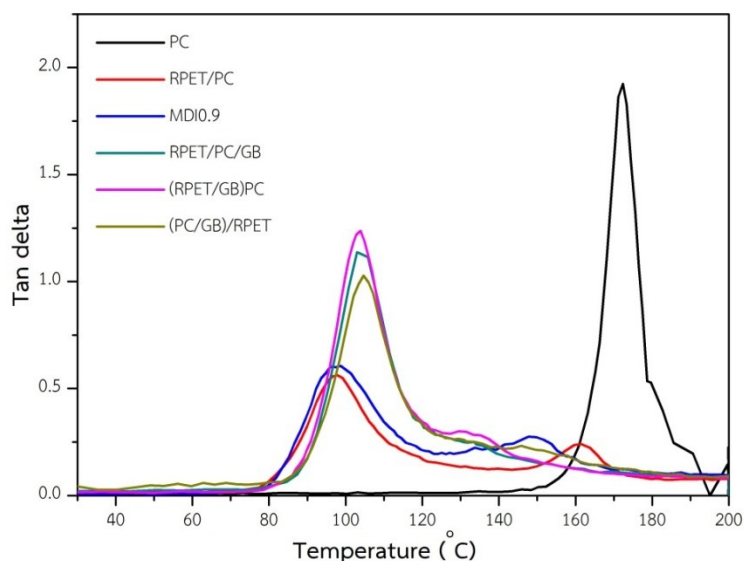
ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟ $\tan \delta$ ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ พบว่าปรากฏพิก 2 ตำแหน่ง ซึ่งสอดคล้องกับค่า T_g ของ RPET และ PC โดยได้มีการสรุปเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.7 จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเมื่อหลอมผสม RPET กับ PC ร่วมกับ MDI ปริมาณ 0.9 wt% ทำให้ T_g มีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้นสังเกตจากการเคลื่อนเข้าหากันของพิกโดยค่า T_g ของ RPET และ PC ใน RPET/PC มีค่าเท่ากับ 97.89 และ 161.50 °C ตามลำดับ เมื่อมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC ปรากฏว่าค่า T_g ของ RPET มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จาก 97.89 เป็น 98.70 °C ขณะที่ค่า T_g ของ PC ใน RPET/PC นั้นมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด จาก 161.50 เป็น 147.70 °C แสดงให้เห็นว่า MDI สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง RPET กับ PC ได้ จากการเกิด RPET/PC copolymer ระหว่างการหลอมผสม

เมื่อมีการเติม glass bead หลอมผสมกับ RPET, PC และ MDI ปริมาณ 0.9 wt% โดยมีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ พบว่า RPET/PC/GB ซึ่งเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้จากการผสมองค์ประกอบทั้งหมดพร้อมกันใน 1 ขั้นตอน เห็นได้ว่า T_g ของ RPET มีการเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นเล็กน้อยจาก 98.70 เป็น 103 °C ในขณะที่ T_g ของ PC มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด จาก 147.70 เป็น 133.50 °C เมื่อเปรียบเทียบกับ RPET/PC ที่มีการเติมเพียง MDI ปริมาณ 0.9 wt% ส่วนในกรณีของ (RPET/GB)/PC ที่เป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการผสม 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกนำ glass bead ไปผสมกับ RPET ซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสหลัก จากนั้นนำไปผสมกับ MDI และ PC ซึ่งเป็นเฟสรองในขั้นตอนสุดท้าย ก็พบค่า T_g ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับ RPET/PC/GB ขณะที่การปรากฏค่า T_g ของ RPET กับ PC ใน (PC/GB)/RPET นั้นแตกต่างจากพอลิเมอร์คอมพอสิต 2 รูปแบบก่อนหน้านี้ โดยค่า T_g ของ PC ใน (PC/GB)/RPET กลับมีค่าสูงกว่าที่พบใน RPET/PC ที่มีการเติมเพียง MDI ปริมาณ 0.9 wt% จาก 147 เป็น 149 °C และเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยกันจะเห็นได้ว่าค่า T_g ของ PC ใน (PC/GB)/RPET มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตรูปแบบอื่นๆ สิ่งที่เกิดขึ้นนี้คาดว่ามีส่วนมาจากการกระจายตัวและการเคลื่อนย้าย (Migration) ของ glass bead ในแต่ละรูปแบบลำดับการผสม การที่ (PC/GB)/RPET พบค่า T_g ของ PC ที่สูงกว่าพอลิเมอร์

คอมพอสิตรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากการผสม glass bead ลงใน PC ที่มีความหนืดสูง เมื่อนำไปหลอมผสมกับ MDI และ RPET ที่มีความหนืดต่ำ ทำให้ glass bead เคลื่อนออกจาก PC สู่อ RPET ได้น้อย ส่งผลให้ T_g ของ PC ใน (PC/GB)/RPET มีค่าสูงขึ้น ขณะที่ RPET/PC/GB เป็นการเติม glass bead ลงไปผสมกับ RPET, PC และ MDI พร้อมกันใน 1 ขั้นตอน ทำให้ glass bead สามารถเข้าไปอยู่ได้ทั้ง 2 เฟส แต่คาดว่าโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในเฟสของ RPET เนื่องจาก RPET มีความหนืดที่ต่ำและเป็นเฟสหลักของการผสม ทำให้ glass bead เข้าไปได้ง่าย ส่วนกรณี (RPET/GB)/PC เป็นการนำ glass bead ผสมกับ RPET ที่เป็นเฟสหลักซึ่งมีความหนืดต่ำ การมี glass bead อยู่ใน RPET ทำให้ความหนืดสูงขึ้นแต่ยังคงมีความหนืดที่น้อยกว่า PC ค่อนข้างมาก ทำให้เมื่อนำไปผสมกับ MDI และ PC ในขั้นที่ 2 glass bead จะมีการเคลื่อนจาก RPET เข้าไปใน PC ได้น้อย แสดงให้เห็นว่า RPET/PC/GB และ (PC/GB)/RPET เป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เฟสของ PC มี glass bead อยู่ปริมาณน้อย จึงแสดงตำแหน่งของ T_g คล้ายคลึงกันเนื่องจาก glass bead ส่วนใหญ่กระจายอยู่ใน RPET ค่า T_g ของ PC จึงมีค่าน้อย ขณะที่ค่า T_g ของ PC ใน (PC/GB)/RPET มีค่าสูง เนื่องจาก glass bead ส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ใน PC ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เกิดได้ยาก สอดคล้องกับของวิจัยของ K.C. Yung และคณะ[38] ที่พบว่าเมื่อมีการเติม hollow glass microsphere (HGM) ลงในอีพอกซีคอมพอสิต ทำให้ T_g ของคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง HGM กับพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้นจากการมี HGM อยู่ภายใน

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลของสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ที่ได้จากเทคนิค DMA

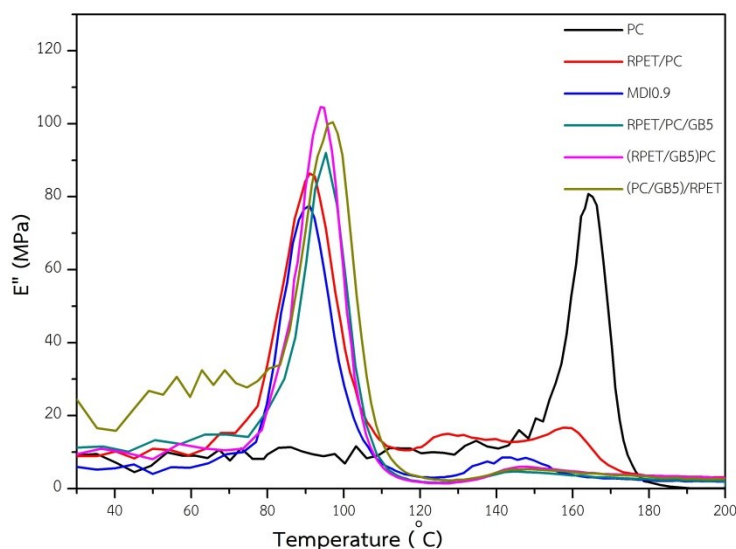
Sample	Peck Tan δ		Peck Loss modulus (E'') (MPa)
	$T_{g,PET}$ ($^{\circ}C$)	$T_{g,PC}$ ($^{\circ}C$)	
PC	-	172.27	80.78
RPET/PC	97.89	161.50	86.40
MDI0.9	98.70	147.70	77.57
RPET/PC/GB	103.00	133.50	92.07
(RPET/GB)/PC	103.90	133.30	104.55
(PC/GB5)/RPET	104.70	149.60	100.52



ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟ Tan δ ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และ พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ

ค่า Loss modulus (E'') สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับพลังงานของพอลิเมอร์ จากภาพที่ 4.20 พบว่าการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% ลงใน RPET/PC แสดงค่า E'' ลดลงจาก 86.40 (RPET/PC) เป็น 77.57 MPa โดยสาเหตุที่ทำให้ค่า E'' ลดลงนั้นมาจากการเติม MDI ในลงการหลอมผสม RPET กับ PC ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความเหนียวมากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นและเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนขณะตั้งจากการทดสอบ DMA

สิ่งที่น่าสนใจคือเมื่อทำการเติม glass bead ลงในการหลอมผสม RPET, PC และ MDI ปริมาณ 0.9 wt% ทุกรูปแบบลำดับการผสม ส่งผลให้ค่า E'' มีค่าสูงกว่า RPET/PC และ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสม 2 ขั้นตอน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า glass bead ที่เติมลงไปสามารถเข้าไปเสริมแรงให้พอลิเมอร์ โดย glass bead นั้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ค่า E'' สูงขึ้น สามารถสนับสนุนได้จากงานวิจัยของ Runzhou Huang และคณะ [39] ที่พบว่าเมื่อมีปริมาณการเติม glass fiber ลงใน HDPE ทำให้มีค่า E'' สูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ อีกทั้งค่า E'' นั้นยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม glass fiber ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของ glass fiber ทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานมากขึ้น ลดความสามารถในการยืดหยุ่น และจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์



ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟ Loss Modulus ของ RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ

4.2.3 ผลของลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต

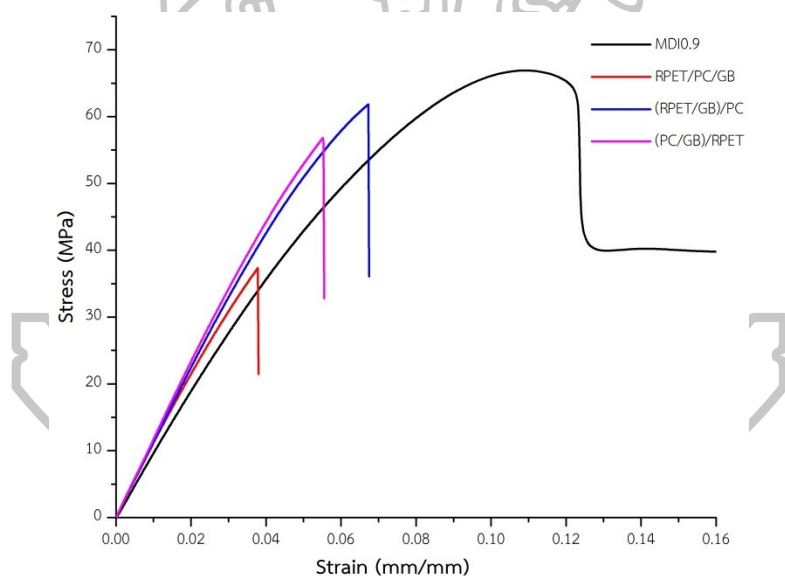
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ประกอบด้วย RPET/PC/GB, (RPET/GB)/PC และ (PC/GB)/RPET ถูกศึกษาเปรียบเทียบกับ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% เพื่อศึกษาผลของการเติม glass bead และรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC, glass bead โดยสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) และการทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ซึ่งผลของการทดสอบเชิงกลได้ถูกแสดงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.8 ตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขจากการทดสอบเชิงกลของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน

Sample	Tensile testing			Impact testing
	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile stress at break (MPa)	Notched impact strength (kJ/m ²)
MDI0.9	942.29 ± 39.64	381.95 ± 1.24	48.59 ± 15.19	5.96 ± 0.33
RPET/PC/GB	1143.84 ± 24.85	4.24 ± 0.95	42.69 ± 8.94	4.45 ± 0.26
(RPET/GB)/PC	1120.74 ± 4.98	6.34 ± 0.72	58.6 ± 4.98	4.21 ± 0.35
(PC/GB)/RPET	1178.96 ± 6.33	5.65 ± 0.44	57.64 ± 3.56	4.31 ± 0.15

4.2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุแบบทั่วไป (Universal testing machine) มีอัตราการดึง 10 mm/min และ load cell ขนาด 50 kN โดยข้อมูลที่ได้เกี่ยวข้องกับพฤติกรรม การแตกหักของชิ้นงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus), ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile stress at break) โดยสรุปข้อมูลเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.8

จากการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) ในภาพที่ 4.21 พบว่าการเติม glass bead ลงในการหลอมผสม RPET, PC และ MDI ปริมาณ 0.9 wt% ทุกรูปแบบลำดับการผสม มีพฤติกรรม การแตกหักแบบเปราะทั้งหมดเนื่องจากกราฟที่ได้ไม่มีการปรากฏจุด yield หรือไม่เกิดการเปลี่ยนจากอีลาสติก (elastic) เป็นแบบพลาสติก (plastic deformation) ขณะที่ RPET/PC ที่การเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% มีการแตกหักแบบเหนียวดังที่ได้ อธิบายไว้ในข้อที่ 4.1.5.1



ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟ stress กับ strain แสดงพฤติกรรม การแตกหักของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน

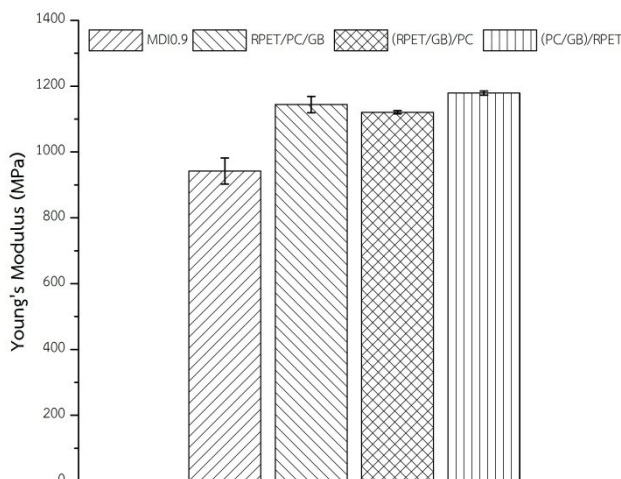
จากภาพที่ 4.22-4.24 ได้แสดงค่าความสามารถต้านทานการเปลี่ยนรูป (Young's modulus) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile stress at break) ตามลำดับ ของ RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมแตกต่างกัน พบว่าการเติม glass bead ลงในการ หลอมผสม RPET, PC และ MDI ปริมาณ 0.9 wt% ทุกรูปแบบลำดับการผสม มีค่า Young's

Modulus และ Tensile stress at break สูงขึ้น ขณะที่ %Elongation at break มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับ RPET/PC ที่มีการเติมเพียง MDI ปริมาณ 0.9 wt%

ผลการทดลองที่เกิดขึ้นดังกล่าวคาดว่ามีสาเหตุมาจาก glass bead ที่กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เป็น Inorganic filler ขนาดเล็กระดับไมโครเมตร มีความแข็งตึง (stiffness) มากกว่าพอลิเมอร์ได้เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเมื่อได้รับแรงดึง จึงทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีความสามารถต้านทานการเปลี่ยนรูป (Young's Modulus) มากขึ้น ในขณะที่ค่า %Elongation at break กลับมีค่าลดลงเมื่อมีการเติม glass bead เนื่องจากความสามารถในการยึดตัวของ glass bead และพอลิเมอร์แตกต่างกันเมื่อได้รับแรงดึง โดย glass bead จะมีความสามารถในการยึดตัวที่ต่ำ (stiffness) ในขณะที่พอลิเมอร์มีความสามารถในการยึดตัวสูงกว่า (ductile) จึงทำให้พอลิเมอร์ที่มีการเติม glass bead มีความสามารถในการยึดตัวที่น้อยลงหรือมีความเปราะมากขึ้นนั่นเอง จากการศึกษาภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหลังการทดสอบแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมแตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบดังภาพที่ 4.27 พบว่า glass bead มีการเปียกผิวกับพอลิเมอร์ได้ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาที่ีระหว่าง glass bead กับพอลิเมอร์ สอดคล้องกับค่า Tensile stress at break ที่มีค่าสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมแตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบนั้นพบว่า (PC/GB)/RPET มีค่า Young's Modulus สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1178.96 MPa เนื่องจากเป็นรูปแบบการผสมที่ glass bead ส่วนใหญ่กระจายอยู่ในเฟส PC ซึ่งเป็นเฟสรองสนับสนุนได้จากค่า T_g ของ PC ใน (PC/GB)/RPET ที่มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตรูปแบบอื่น โดยการที่เฟส PC มี glass bead อยู่ทำให้ความเหนียวของ PC ลดลง และเกิดเป็นเฟสที่แข็งแรงมากขึ้น (Rigid) เมื่อนำไปหลอมผสมกับ RPET ที่เป็นเฟสหลักในการผสมซึ่งมีความแข็งเกร็ง (Rigid) ที่เป็นลักษณะเด่นอยู่แล้ว ดังตารางที่ 4.4 ได้แสดงค่า Young's Modulus ของ RPET และ PC ไว้ นอกจากนี้ยังมีการเติม MDI เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมต่อกับสายโซ่โมเลกุล RPET หรือระหว่าง RPET กับ PC จึงทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองส่งเสริมซึ่งกันและกัน ถัดมาคือ RPET/PC/GB และ (RPET/GB)/PC แสดงค่า Young's Modulus เท่ากับ 1143.84 และ 1120.74 MPa ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวบ่งบอกได้ว่า การผสมแบบชั้นตอนเดียวของ RPET/PC/GB นั้น glass bead มีโอกาสเข้าไปกระจายอยู่ใน RPET และ PC ขณะที่ (RPET/GB)/PC เป็นการผสมแบบ 2 ชั้นตอนโดยเป็นการนำ glass bead ไปผสมกับ RPET ที่เป็นเฟสหลักมีความเหนียวต่ำก่อนถึงไปผสมกับ PC ที่มีความเหนียวสูง ส่งผลให้ glass bead เคลื่อนที่เข้าไปใน PC ได้น้อยกว่า ดังนั้นการผสมแบบ RPET/PC/GB จึงมีค่า Young's Modulus สูงกว่าแบบ (RPET/GB)/PC เนื่องจากปริมาณของ glass bead ที่อยู่ใน PC ของ PET/PC/GB มีมากกว่า (RPET/GB)/PC ซึ่งเมื่อมีปริมาณ glass bead อยู่ในเฟส PC มากจะทำให้เฟสรองมีความแข็งแรง (Rigid) โดย RPET มีความแข็งแรง (Rigid) เป็นลักษณะ

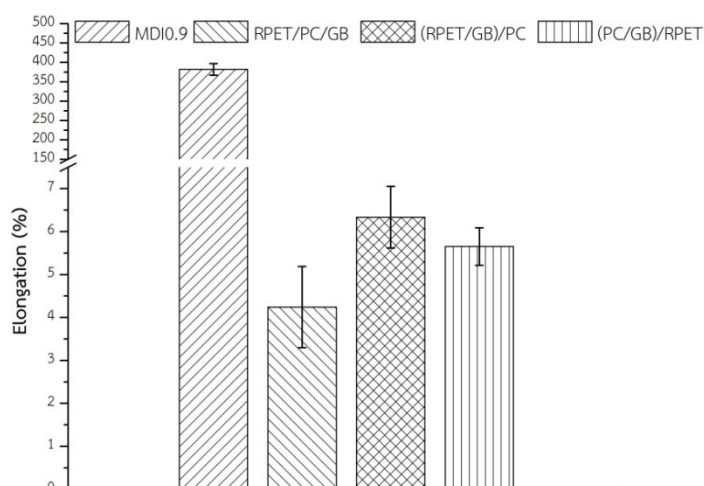
เด่นอยู่แล้ว จึงทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองส่งเสริมซึ่งกันและกันเช่นเดียวกับ (PC/GB)/RPET ขณะที่ (RPET/GB)/PC พบว่าในเฟสของ PC มีปริมาณ glass bead น้อยจึงมีความแข็งแรง (Rigid) น้อย เมื่อนำไปผสมกับ MDI และ RPET ที่มีความแข็งแรง (Rigid) สูง ทำให้มีค่า Young's modulus น้อยที่สุด



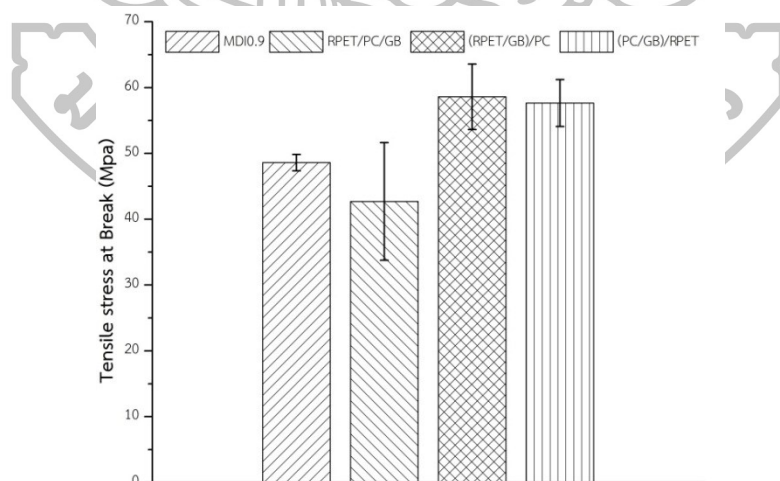
ภาพที่ 4.22 แสดงค่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Young's Modulus) ของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่า %Elongation at break และ Tensile stress at break ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมแตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าค่าทั้งสองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังภาพที่ 4.23 และ 4.24 โดย (RPET/GB)/PC และ (PC/GB)/RPET เป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีค่า %Elongation at break และ Tensile stress at break ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีค่าสูงกว่า RPET/PC/GB จากผลข้างต้นสามารถบ่งบอกได้ว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสม 2 ขั้นตอน ซึ่งเป็นการทำให้ glass bead เกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ 1 ชนิดก่อน ผ่านการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ Epoxide บนผิวของ glass bead ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลกกับหมู่ hydroxyl end group (-OH) และ carboxyl end group (-COOH) ของพอลิเอสเทอร์ ทำให้มีการยึดเหนี่ยวกันที่แข็งแรงและมีประสิทธิภาพมากกว่าการหลอมผสมแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งการยึดเหนี่ยวที่ติระหว่ง glass bead กับพอลิเมอร์นั้นช่วยลดการเกิดจุดรวมเค้น (stress concentration) บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสเมื่อได้รับแรง แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าการนำ glass bead ไปผสมกับ RPET หรือ PC อันไหนมีความแข็งแรงของพันธะมากกว่ากันเนื่องจากผลการทดลองให้ค่าที่ไม่แตกต่างกัน ขณะที่กรณีของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการผสมแบบขั้นตอนเดียวนั้นพบว่ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสไม่ดี เนื่องจากเป็นระบบการผสมที่เกิดปฏิกิริยาแบบสุ่ม สอดคล้อง

กับงานวิจัยของ Ji-Zhao Liang[40] ที่ได้สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิต Polypropylene (PP) ที่เติม Hollow glass bead (HGB) พบว่าเมื่อมีการเติม HGB ที่มีการปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนลงใน PP ส่งผลให้ค่า Tensile stress at break สูงขึ้นกว่า PP บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของสารตัวเติมและแรงยึดเหนี่ยวเชิงเคมีที่เกิดขึ้นระหว่าง HGB กับ PP เป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งการเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ดีนี้ทำให้ลดการเกิดเป็นจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) บริเวณรอบๆ HGB ทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตรับแรงได้มากขึ้น



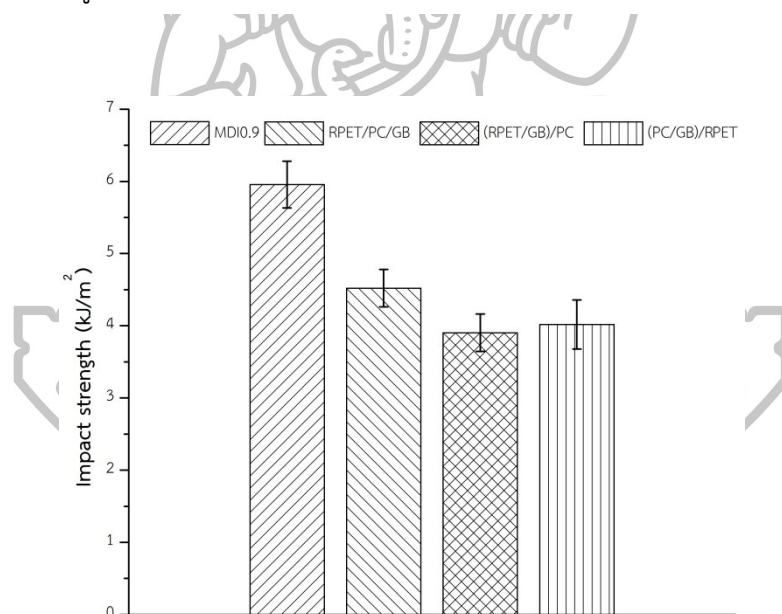
ภาพที่ 4.23 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.24 แสดงค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile stress at break) ของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน

4.2.3.2 การทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing)

จากภาพที่ 4.25 พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสม RPET, PC, glass bead ทั้ง 3 รูปแบบให้ค่า Impact strength ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังมีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่การเติมเพียง MDI ปริมาณ 0.9 wt% แสดงให้เห็นว่าการเติม glass bead นั้นไม่สามารถปรับปรุงความสามารถในการรับแรงกระแทกแก่พอลิเมอร์คอมพอสิตได้ถึงแม้ว่า glass bead จะมีการเปียกผิวที่ดีกับพอลิเมอร์จากการใช้ glass bead ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารคู่คววไซเลนแล้วก็ตาม และเมื่อสังเกตจากภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมแตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบหลังได้รับแรงกระแทกดังภาพที่ 4.28 พบการแตกของ glass bead โดยสังเกตเห็นเศษแก้วกระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์จำนวนมากซึ่งสอดคล้องกับค่า Impact strength ที่มีค่าลดลง สิ่งที่เกิดขึ้นคาดว่ามีสาเหตุมาจาก 1) บริเวณรอยต่อระหว่าง glass bead กับพอลิเมอร์เป็นจุดรวมแรงเค้น (Stress Concentration) 2) ลักษณะของ glass bead ที่เป็นทรงกลมกลวงผนังบางภายในบรรจุก๊าซเฉื่อย (Hollow glass microsphere) ทำให้มีความสามารถในการดูดซับแรงจากการกระแทก (Shock Load) ต่ำ glass bead จึงเกิดการแตกได้ง่าย

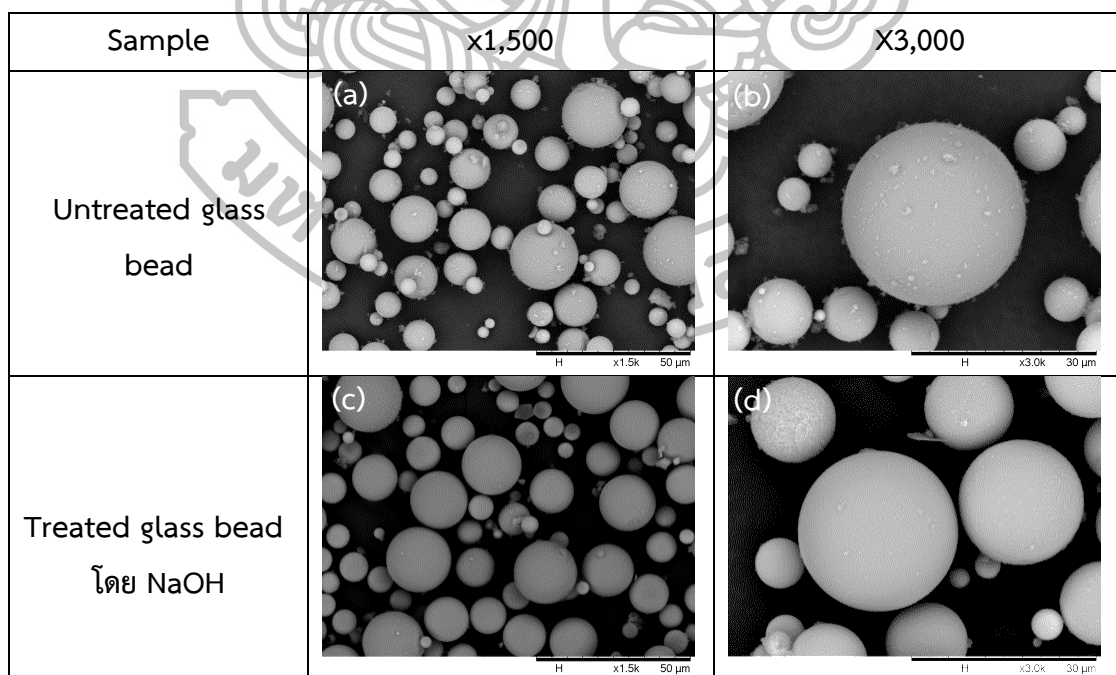


ภาพที่ 4.25 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของ RPET/PC ที่เติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมแตกต่างกัน

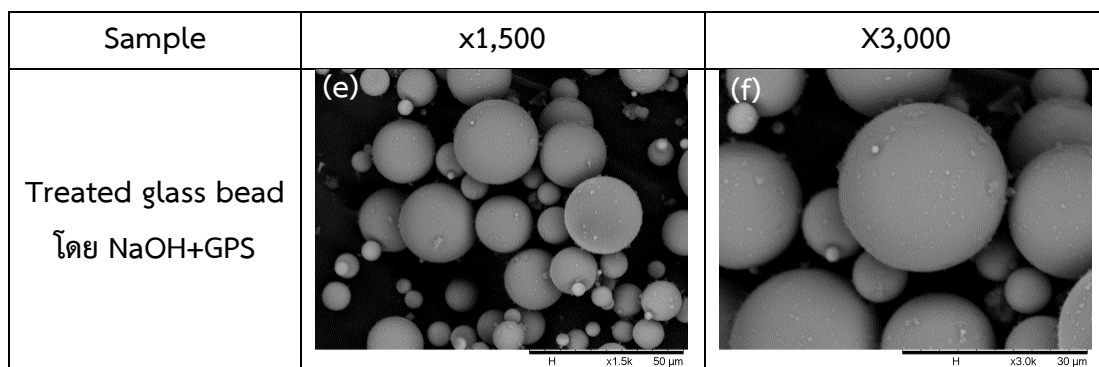
4.2.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ glass bead และพอลิเมอร์คอมพอลิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมแตกต่างกัน

4.2.4.1 สัณฐานวิทยาของ glass bead ก่อนและหลังทำการปรับสภาพผิว

glass bead ที่เหมาะสมแก่การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ต้องมีการยึดเกาะกันที่ดีระหว่าง glass bead และพอลิเมอร์ ดังนั้นการปรับสภาพผิวของ glass bead จึงเป็นสิ่งจำเป็นโดยเทคนิค SEM ได้ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงลักษณะผิวของ glass bead ที่เปลี่ยนแปลงไปตามกรรมวิธีปรับสภาพผิวแต่ละขั้นตอน โดยภาพที่ 4.26(a-b) แสดงภาพ glass bead ที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพผิวพบว่าขนาดของ glass bead มีขนาดไม่เท่ากัน โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 13-20 μm ซึ่งมีสิ่งเจือปนเกาะบริเวณพื้นผิว และเมื่อทำการปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย NaOH 0.5 โมลาร์ พบว่าสารละลาย NaOH สามารถกำจัดสิ่งเจือปนบริเวณพื้นผิวของ glass bead อีกทั้งยังเป็นการกัดเซาะผิวของ glass bead ให้มีความขรุขระเล็กน้อย และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (interfacial interlocking) ดังแสดงในภาพที่ 4.26(c-d) หลังจากนั้นเมื่อนำ glass bead ที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย NaOH เรียบร้อยแล้ว มาพ่นสารคู่ควบไซเลน 3-Glycidyloxypropyl trimethoxy silane (GPS) ที่ผสมอยู่ใน ethanol พบว่าที่ผิวของ glass bead มีสารคู่ควบไซเลนเคลือบเป็นชั้นบางๆ ดังรูปภาพที่ 4.26(e-f) ซึ่งสารคู่ควบไซเลนที่เคลือบอยู่นี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ในช่วงการหลอมผสมต่อไป



ภาพที่ 4.26 แสดงพื้นผิวของ glass bead ก่อนและหลังทำการปรับสภาพผิว ที่กำลังขยาย 1,500 และ 3,000 เท่า

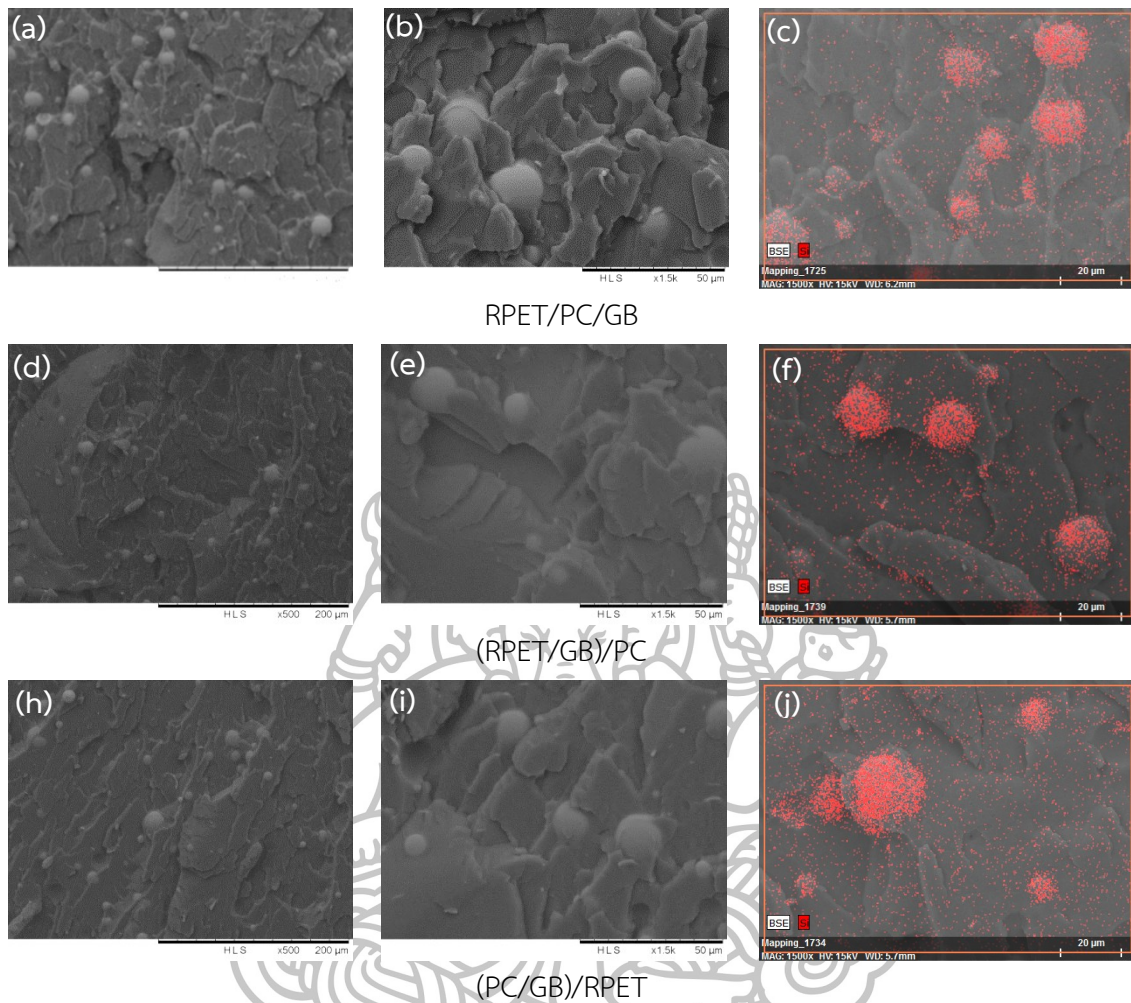


ภาพที่ 4.26 แสดงพื้นผิวของ glass bead ก่อนและหลังทำการปรับสภาพผิว ที่กำลังขยาย 1,500 และ 3,000 เท่า(ต่อ)

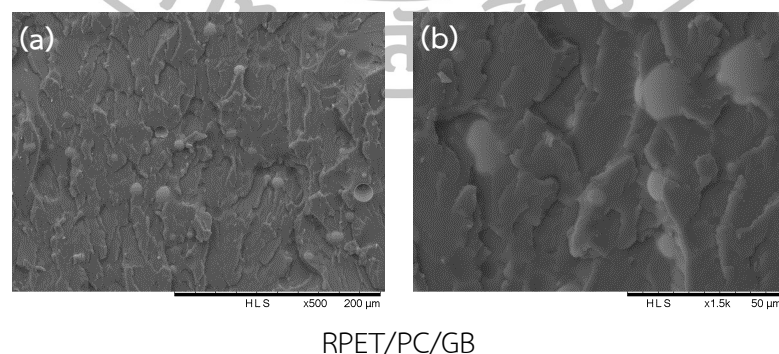
4.2.4.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead แตกต่างกัน

ภาพสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จากเทคนิค SEM นั้นสามารถอธิบายความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับ glass bead (interfacial adhesion) รวมไปถึงตำแหน่งและการกระจายตัวของ glass bead ในพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังมีการใช้โหมด EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) ช่วยในการยืนยันตำแหน่งของ glass bead จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในพอลิเมอร์คอมพอสิต

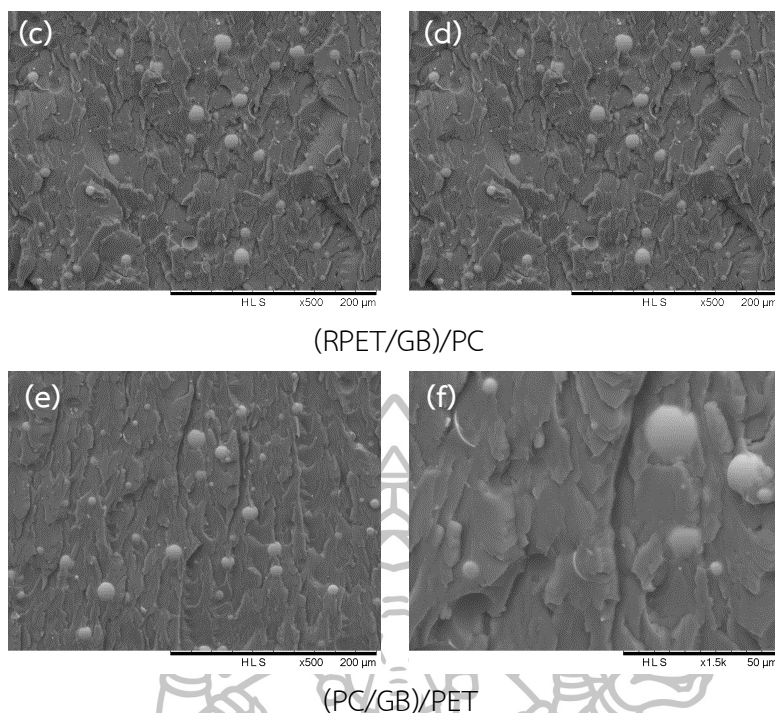
จากภาพที่ 4.27 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหลังจากถูกทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมต่างกันที่กำลังขยาย 500 และ 1,500 เท่า พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตทั้ง 3 รูปแบบเกิดการแตกหักแบบเปราะ (Brittle) เนื่องจากรอยแตกมีลักษณะขรุขระ glass bead กระจายตัวและฝังอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยผิวของ glass bead สามารถเปียกผิวได้ดีกับพอลิเมอร์ จึงสามารถสนับสนุนได้ว่าการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันที่ดีในการหลอมผสม โดย glass bead ที่ผ่านการปรับสภาพผิวทางเคมีจะมีหมู่ Epoxide สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ hydroxyl end group (-OH) และ carboxyl end group (-COOH) ของ RPET กับ PC สิ่งที่น่าสนใจคือไม่พบการแตกของ glass bead เมื่อได้รับแรงดึงในทุกรูปแบบลำดับการผสม แสดงให้เห็นว่า glass bead เป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งตึง (stiffness) จึงส่งเสริมให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปได้มากขึ้น จากนั้นนำภาพที่กำลังขยาย x1,500 เท่า มาทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วย EDX โดยธาตุที่สนใจคือซิลิกอน(Si) จากภาพ 4.27(c,f,j) เห็นได้ว่าบริเวณที่จุดสีแดงสะสมอยู่มากแสดงถึงตำแหน่งที่มี glass bead (SiO_2) ขณะที่บริเวณที่เห็นเป็นจุดสีแดงเล็กๆ กระจายทั่วบริเวณที่ทำการศึกษาคือ Si ที่อยู่ในสารคู่ควบไซเลนซึ่งทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวระหว่าง glass bead กับ พอลิเมอร์



ภาพที่ 4.27 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบแรงดึง (tensile test) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ต่างกัน ที่กำลังขยาย 500 และ 1,500 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 4.28 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ต่างกัน ที่กำลังขยาย 500 และ 1,500 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 4.28 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ต่างกัน ที่กำลังขยาย 500 และ 1,500 เท่า ตามลำดับ(ต่อ)

จากภาพที่ 4.30 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกจากชิ้นงานหลังถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact testing) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสม RPET, PC และ glass bead ต่างกัน พบการแตกของ glass bead ในพอลิเมอร์คอมพอสิตเมื่อได้รับแรงกระแทก (Shock Load) จากการเห็นเศษของ glass bead กระจายทั่วเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า Impact strength ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีค่าลดต่ำกว่า RPET/PC ที่มีการเติม MDI ปริมาณ 0.9 wt% แสดงให้เห็นว่า glass bead แบบ Hollow glass microsphere นั้นไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการรับแรงกระแทก ถึงแม้ว่า glass bead จะผ่านการปรับปรุงสภาพผิวจนมีความสามารถในการเปียกผิวที่ดีระหว่าง glass bead กับพอลิเมอร์แล้วก็ตาม สังเกตได้จากไม่พบการหลุดของ glass bead

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ศึกษาชนิดและปริมาณของ chain extender ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของ RPET/PC

ในงานวิจัยสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) จากขวดน้ำพลาสติกตราศิลปินที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยการเติม PC และ chain extender โดยจากการศึกษาชนิดและปริมาณการเติม chain extender พบว่าการใช้ MDI ปริมาณ 0.9 wt% เป็นชนิดและปริมาณที่เหมาะสมแก่การปรับปรุงสมบัติโดยรวมของ RPET/PC โดยยืนยันปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการหลอมผสมได้จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโครงสร้างผ่านเทคนิค FTIR ค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เจือจาง (IV) ที่สูงกว่า RPET และค่าความหนืดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (MFI) ที่น้อยกว่า RPET ชี้ให้เห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความเข้ากันได้มากขึ้นจากค่า T_g ของพอลิเมอร์ทั้งสองเคลื่อนที่เข้าหากัน ซึ่งคาดว่ามีการเกิด RPET/PC copolymer จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง isocyanate group ใน MDI กับหมู่ hydroxyl end group (-OH) และ carboxyl end group (-COOH) ของ RPET กับ PC สนับสนุนได้จากภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักหลังจากการทดสอบเชิงกลที่ไม่สามารถเห็นการแยกเฟสระหว่าง RPET กับ PC ได้อย่างชัดเจน สมบัติเชิงกลดีขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่ง %Elongation at break และค่า Impact strength ขณะที่การใช้ PMDA ทุกปริมาณการเติมคาดว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการหลอมผสมมีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) จึงส่งผลให้ค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เจือจาง (IV) มีค่าต่ำ และค่าความหนืดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (MFI) ที่มีค่าสูงกว่า RPET เนื่องจาก anhydride group ใน PMDA ทำปฏิกิริยากับหมู่ hydroxyl end group (-OH) ของ RPET กับ PC เพียงอย่างเดียว เมื่อดูจากภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักหลังจากการทดสอบเชิงกลก็พบว่าเห็นการแยกเฟสกันระหว่าง RPET กับ PC อย่างชัดเจน ส่วนสมบัติเชิงกลนั้นมีเพียงค่า Young's Modulus ที่มีค่าสูงขึ้น คาดว่ามาจากโครงสร้างที่มีกิ่งหลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ได้ยาก

5.1.2 ศึกษาผลของลำดับการหลอมผสม RPET, PC และ glass bead ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบผสม

การเติม glass bead แบบ Hollow glass microsphere ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย สารละลาย NaOH และสารคู่ควบไซเลนลงในระหว่างการผลิตหลอมผสมกับ RPET, PC และ MDI ปริมาณ 0.9 wt% เพื่อเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีรูปแบบลำดับการผสมต่างกัน 3 รูปแบบ ประกอบด้วย RPET/PC/GB, (RPET/GB)/PC และ (PC/GB)/RPET พบว่าค่า Young's Modulus ของพอลิเมอร์คอมพอสิตขึ้นอยู่กับความแข็งแรง (Rigid) ของ PC ที่ทำหน้าที่เป็นเฟสรอง และปริมาณ ของ glass bead ที่กระจายตัวในแต่ละเฟส เนื่องจากเฟสของ RPET มีความแข็งแรง (Rigid) เป็น ลักษณะเด่นอยู่แล้ว ดังนั้นหากเฟส PC มีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งมีการเติม MDI เพื่อช่วยในการ เชื่อมต่อสายโซ่โมเลกุลระหว่าง RPET หรือ ระหว่าง RPET กับ PC เพื่อให้สมบัติของพอลิเมอร์ทั้ง สองส่งเสริมซึ่งกันและกัน โดย (PC/GB)/RPET เป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีค่า Young's Modulus สูงที่สุด เนื่องจาก glass bead เกิดการเคลื่อนย้ายออกจาก PC ไปสู่ RPET ได้ยาก ทำให้เฟสของ PC ใน (PC/GB)/RPET มีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตรูปแบบอื่น สนับสนุนได้จากผล T_g ของ PC ใน (PC/GB)/RPET ที่มีค่าสูงเนื่องจากการ glass bead ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ โมเลกุล และพบว่ารูปแบบลำดับการผสม RPET, PC, glass bead ทั้ง 3 รูปแบบให้ค่า Impact strength ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังมีค่าน้อยกว่า RPET/PC ที่การเติมเพียง MDI ปริมาณ 0.9 wt% แสดงให้เห็นว่าการเติม glass bead นั้นไม่สามารถปรับปรุงความสามารถในการ รับแรงกระแทกได้ ถึงแม้ว่า glass bead จะมีการเปียกผิวที่ดีกับพอลิเมอร์จากภาพสัณฐานวิทยา บริเวณรอยแตกหักหลังจากการถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทำงานที่ต้องสัมผัสกับ PMDA และ MDI ควรสวมใส่เครื่องมือป้องกันการสัมผัส ดวงตาและการสูดดม เนื่องจากมีฤทธิ์ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อ และเป็นสารก่อมะเร็ง ควร ทำการศึกษาข้อมูล MSDS ของสารเคมีก่อนนำไปใช้งานอย่างเคร่งครัด

5.2.2 การทำงานที่เกี่ยวข้องกับ glass bead ควรสวมใส่เครื่องมือป้องกันการสูดดม เนื่องจากเป็นอนุภาคขนาดเล็ก สามารถส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจได้

5.2.3 การเตรียมตัวทำละลาย Phenol/TCE ต้องทำในตู้ดูดควัน สวมแว่นตา เนื่องจากเป็น สารเคมีอันตราย มีพิษ และเป็นสารกัดกร่อน มีความเสี่ยงต่อการทำลายดวงตา

5.2.4 ควรมีการศึกษาปริมาณการเติม PMDA หรือปรับปรุงสภาวะในการผสม เพื่อใช้ในการ ป้องกันการเกิดน้ำเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยา

รายการอ้างอิง

- [1] วิวรรณ ธรรมมงคล.(2557). **พลาสติกรีไซเคิล**. เข้าถึงเมื่อ 5 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก <http://kanchanapisek.or.th/kp11/articles/article-2.th.html>.
- [2] N.Torres, J.J.Robin, and B.Boutevin. (2000). "Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding." **European Polymer Journal**. 36: 2075-2080.
- [3] N.Torres, J.J.Robin, and B.Boutevin. (2001). "Chemical Modification of Virgin and Recycled Poly(ethylene terephthalate) by Adding of Chain Extenders during Processing." **Applied Polymer Science**. 79: 1816-1824
- [4] C.Mendes, L. (2013). "Solid State Polymerization : Its Action on Thermal and Rheological Properties of PET/PC Reactive Blends." **Polimeros**. 23: 298-304.
- [5] J.Scheirs. (2003). Additives for the Modification of Poly(Ethylene Terephthalate) to Produce Engineering-Grade Polymers, in *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters*, J.Scheirs and T.E.Long, Editors. : Australia. p. 496-540.
- [6] F.Fraisse, et al. (2005). "Recycling of poly(ethylene terephthalate)/polycarbonate blends." **Polymer Degradation and Stability**. 90: 250-255.
- [7] Tang, et al. (2007). "Morphology and Properties of Poly(ethylene terephthalate)/Polycarbonate Alloy Toughened with Different Kinds of Elastomers." **Polymer Bulletin**. 58: 479-488.
- [8] Peng, et al. (2008). "Structures and properties of ternary blends of recycled poly(ethylene terephthalate)/bisphenol-A polycarbonate/(E/nBA/GMA)." **Applied Polymer Science**. 109,(1): 483-491.
- [9] F.Pilati, E.Marianuccil, and C.Berti. (1985). "Study of the Reactions Occurring during Melt Mixing of Poly(Ethylene Terephthalate) and Polycarbonate " **Applied Polymer Science**. 30: 1267-1275
- [10] สมศักดิ์ ธรรมมงคลชัย. (2547). “สารเติมแรงและสารเสริมแรง.” ใน **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**, 63-80. กรุงเทพฯ: ปู้คเน็ท.

- [11] Bicerano, J. (2557). **Compatibilizers**. เข้าถึงเมื่อ 5 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก <http://www.plas2006.com/uploadfile/topicfile/20063112235119.doc>.
- [12] Koning, C., et al. (1998). "Strategies for compatibilization of polymer blends" **Progress in Polymer Science**. 23,(4): 707-757.
- [13] ชวนชม อ่วมเนตร. (2009). "การพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งตัดแปรเพื่อผลิตวัสดุคลุมโรงเรือนสำหรับเพาะปลูกพืช."
- [14] (2557). **ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้**. เข้าถึงเมื่อ 6 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html.
- [15] Wikipedia. (2557). **Polyethylene terephthalate**. เข้าถึงเมื่อ 6 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate.
- [16] ภูมิพัฒน์ รัตนตรัยเจริญ. (2557). **พลาสติก 7 ประเภท**. เข้าถึงเมื่อ 6 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก [http://www.stou.ac.th/study/sumrit/1-56\(500\)/page4-1-56\(500\).html](http://www.stou.ac.th/study/sumrit/1-56(500)/page4-1-56(500).html).
- [17] Familyegg. (2557). **โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate)**. เข้าถึงเมื่อ 7 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก <http://familyegg08.blogspot.com/2011/09/polycarbonate.html>.
- [18] (2557). **สารเติมแต่งในพลาสติก**. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก <http://www.plasticmart.co.th/images/1176038014/Additive.pdf>.
- [19] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2557). **เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต**. เข้าถึงเมื่อ 15 มิถุนายน เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต>.
- [20] Mbarek, S. and M. Jaziri. (2006). "Recycling Poly(ethylene terephthalate) Wastes : Properties of Poly(ethylene terephthalate)/Polycarbonate Blend and the effect of a Transesterification Catalyst." **Plastics Engineers**.
- [21] Tang, X., et al. (2007). "Reactive Extrusion of Recycled Poly(ethylene terephthalate) with Polycarbonate by Addition of Chain Extender." **Applied Polymer Science**.104: 2602-2607.
- [22] Guo, et al. (2007). "Properties and morphology of recycled poly(ethylene terephthalate)/bisphenol a polycarbonate/poly(styrene-b-(ethylene-co-butylene)-b-styrene) blends by low-temperature solid-state extrusion." **Polymers for advanced technologies**. 18: 549-555.
- [23] Davera, F., R. Guptab, and E. Kosiorec. (2008). "Rheological characterisation of recycled poly(ethylene terephthalate) modified by reactive extrusion." **Materials processing technology**. 204: 397-402.

- [24] Yuchun, et al. (1996). "Effect of interfacial adhesion on crystallization and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate)/glass bead composite." **Polymer science**. 14: 172-182.
- [25] Mutua, F.N., et al. (2012). "Surface Modification of Hollow Glass Microspheres." **Materials Sciences and Applications**. 3: 856-860.
- [26] Oromiehie, A. and I.G. Meldrum. (1999). "Characterization of Polyethylene Terephthalate and Functionalized Polypropylene Blends by Different Methods." **Iranian Polymer** 8,(3): 193-204.
- [27] Vijayakumar, S. and P.R. Rajakumar. (2012). "Infrared spectral analysis of waste pet samples." **International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy**. 4: 58-65.
- [28] Al-omairi, L.M. (2010). "Crystallization, Mechanical, Rheological and Degradation Behavior of Polytrimethylene terephthalate, Polybutylene terephthalate and Polycarbonate blend." Ph.D., School of civil, Environmental chemical and Engineering, RMIT University, Australia
- [29] Ghorbel, E., et al. (2014). "Characterization of Thermo-Mechanical and Fracture Behaviors of Thermoplastic Polymers." **Materials** 7: 375-398.
- [30] Yong L., et al. (2009). "Phase structure and properties of poly(ethylene terephthalate)/high-density polyethylene based on recycled materials." **Journal of Applied Polymer Science**. 113,(3): 1710-1719.
- [31] Wenchang Y., et al. (2013). "Infrared spectroscopic evidence of a direct addition reaction between palygorskite and pyromellitic dianhydride." **Applied Surface Science**. 265: 585-590.
- [32] Nagle, et al. (2007). "Infrared Microspectroscopic study of the thermo-oxidative degradation of hydroxy-terminated polybutadiene/isophorone diisocyanate polyurethane." **Degradation and Stability**. 92,(8): 1446-1454.
- [33] Lei Y., et al. (2008). "Phase Structure and Properties Poly(ethylene terephthalate) /High-Density Polyethylene Based on Recycled Materials." **Journal of Applied Polymer Science**. 113,(3): 1710-1719.

- [34] Awaja F. and Daver F. (2004). "Recycled Poly(ethylene terephthalate) Chain Extension by a Reactive Extrusion Process." **Polymer engineering and science**. 44,(8)
- [35] Mendes L.C., Pereira P.S.C., and Ramos V.D. "Effectiveness of the Transesterification Catalyst on the Thermal, Dynamic-Mechanical and Rheological Properties of PET/PC Reactive Melting Blends." **Macromolecular Symposia**. 299-300,(1): 183-189.
- [36] (2558). **3M™ Glass Bubbles iM30K**. เข้าถึงเมื่อ 1 สิงหาคม เข้าถึงได้จาก http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Energy-Advanced/Materials/Product/3M-Glass-Bubbles-iM30K?N=5002440+3294540335&rt=rud.
- [37] Dong W., et al. (2013). "Effect of Chain-Extenders on the Properties and Hydrolytic Degradation Behavior of the Poly(lactide)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends." **International Journal of Molecular Sciences**. 14,(10): 20189-20203.
- [38] Yung K.C., et al. (2009). "Preparation and properties of hollow glass microsphere-filled epoxy-matrix composites." **Composites Science and Technology**. 69,(2): 260-264.
- [39] Huang R., et al. (2013). "High Density Polyethylene Composites Reinforced with Hybrid Inorganic Fillers: Morphology, Mechanical and Thermal Expansion Performance." **Materials**. 6: 4122-4138.
- [40] Liang J.-Z. (2007). "Tensile Properties of Hollow Glass Bead-Filled Polypropylene Composites." **Applied Polymer Science**. 104: 1697-1701.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม

ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม

ก-1 ผลการทดสอบความหนืด

ตารางผนวก ก.1 แสดงข้อมูลของเวลาที่ตัวทำละลายและสารละลายพอลิเมอร์แต่ละเจือจางเคลื่อนที่ใน viscometer

Sample	น้ำหนัก	สารละลาย(ml)		ปริมาตรรวม(ml)	เวลาที่สารละลายเคลื่อนที่(min)		
		PET	phenol/TCE		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
sovent		-	10	-	21.17	21.13	21.15
PET	0.125	10	-	10	30.31	30.21	30.25
PET/PC	0.125	10	-	10	28.12	28.16	28.15
PMDA 0.5	0.125	10	-	10	26.54	26.51	26.46
PMDA 0.7	0.125	10	-	10	27.01	27.05	26.57
PMDA 0.9	0.125	10	-	10	27.10	27.12	27.09
MDI 0.5	0.125	10	-	10	28.36	28.30	28.38
MDI 0.7	0.125	10	-	10	29.21	29.12	28.54
MDI 0.9	0.125	10	-	10	30.57	30.50	30.38

ตารางผนวก ก.2 แสดงเวลาที่ตัวทำละลายและสารละลายพอลิเมอร์แต่ละเจือจางเคลื่อนที่ใน viscometer เพื่อคำนวณหาค่า intrinsic viscosity

Sample	ความเข้มข้นของ สารละลาย (C)	เวลาที่สารละลายเคลื่อนที่(s)			เฉลี่ย	η_{rel}	$\ln \eta_{rel}$	η
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
solvent	0	1277	1273	1275	1275	1		
PET	0.5	1831	1821	1825	1825.67	1.43	0.36	0.75
PET/PC	0.5	1692	1696	1695	1694.33	1.33	0.28	0.59
MDI 0.5	0.5	1716	1710	1718	1714.67	1.34	0.30	0.62
MDI 0.7	0.5	1761	1752	1734	1749	1.37	0.32	0.66
MDI 0.9	0.5	1857	1850	1838	1848.33	1.45	0.37	0.78
PMDA 0.5	0.5	1614	1611	1606	1610.33	1.26	0.23	0.48
PMDA 0.7	0.5	1621	1625	1617	1621	1.27	0.24	0.50
PMDA 0.9	0.5	1630	1632	1629	1630.33	1.28	0.25	0.51

ตารางผนวก ก.3 แสดงเวลาและน้ำหนักของเส้น extrudate สภาวะการทดสอบ 260°C/2.16 kg

สูตร	ชั้นที่	กรัม	วินาที	MFI กรัม/10 นาที	MFIเฉลี่ย กรัม/10 นาที
PET	1	1.0913	4.47	146.48	146.49±0.17
	2	1.1877	4.87	146.33	
	3	1.1024	4.51	146.66	
PC	1	0.2892	15.59	11.13	10.8±0.57
	2	0.2875	15.5	11.13	
	3	0.2733	16.18	10.13	
PET/PC	1	0.8282	7.75	64.12	64.28±0.24
	2	0.8919	8.34	64.17	
	3	0.863	8.02	64.56	
PMDA0.5	2	1.76	7.22	146.46	146.09±0.83
	3	1.76	7.28	145.14	
	4	1.23	5.04	146.68	
PMDA0.7	1	1.42	6.82	125.30	124.71±1.39
	2	1.39	6.75	123.13	
	3	1.12	5.35	125.72	
PMDA 0.9	1	1.39	12.25	68.28	68.78±0.64
	2	1.43	12.48	68.55	
	3	0.96	8.25	69.50	
MDI0.5	1	0.86	8.28	62.48	62.08±0.84
	2	1.13	10.78	62.65	
	3	1.05	10.35	61.12	

ตารางผนวก ก.3 แสดงเวลาและน้ำหนักของเส้น extrudate และ ค่า MFI ของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ
สภาวะการทดสอบ 260°C/2.16 kg(ต่อ)

สูตร	ชั้นที่	กรัม	วินาที	MFI กรัม/10 นาที	MFIเฉลี่ย กรัม/10 นาที
MDIO.7	1	0.87	11.32	46.07	46.99±0.83
	2	0.80	10.16	47.20	
	3	0.85	10.65	47.70	
MDIO.9	1	0.47	14.25	19.83	19.79±0.07
	2	0.50	15.06	19.83	
	3	0.45	13.66	19.72	

ก-2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางผนวก ก.4 ผลการทดสอบแรงดึงและของ RPET, PC , RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender

Sample	Tensile testing		Impact testing
	Young's Modulus(MPa)	Elongation at break (%)	Notched impact strength(kJ/m ²)
PET	958.4±5.63	11.35±1.35	4.64±0.32
PC	803.21±10.56	152.43±8.36	73.4±2.28
PET/PC	1053.38±4.91	11.51±1.48	5.34±0.57
PMDA0.5	1046.34±3.47	6.73±0.68	2.86±0.62
PMDA0.7	1084.7±5.76	5.28±0.97	2.75±0.55
PMDA0.9	1044.78±11.13	10.35±1.08	3.78±0.65

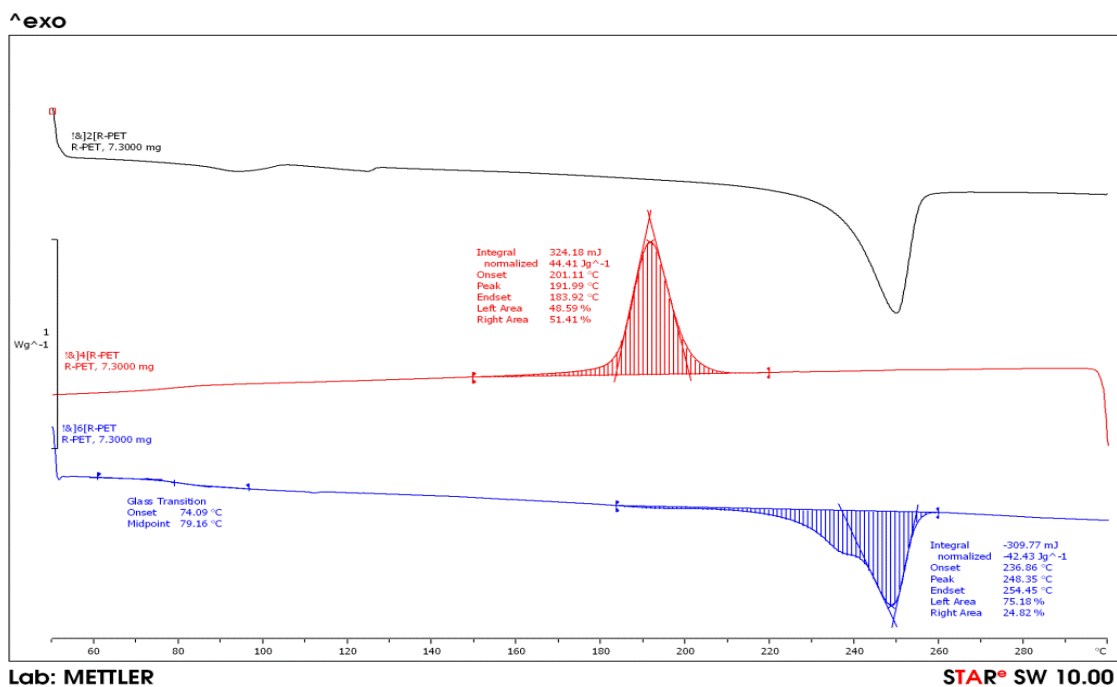
ตารางผนวก ก.4 ผลการทดสอบแรงดึงและของ RPET, PC , RPET/PC ที่ไม่มีและมีการเติม chain extender(ต่อ)

Sample	Tensile testing		Impact testing
	Young's Modulus(MPa)	Elongation at break (%)	Notched impact strength (kJ/m ²)
MDI0.5	959.24±26.33	11.37±0.34	5.05±0.24
MDI0.7	911.52±16.94	162.86±14.78	6.19±0.27
MDI0.9	942.29±39.64	381.95±15.19	5.96±0.33

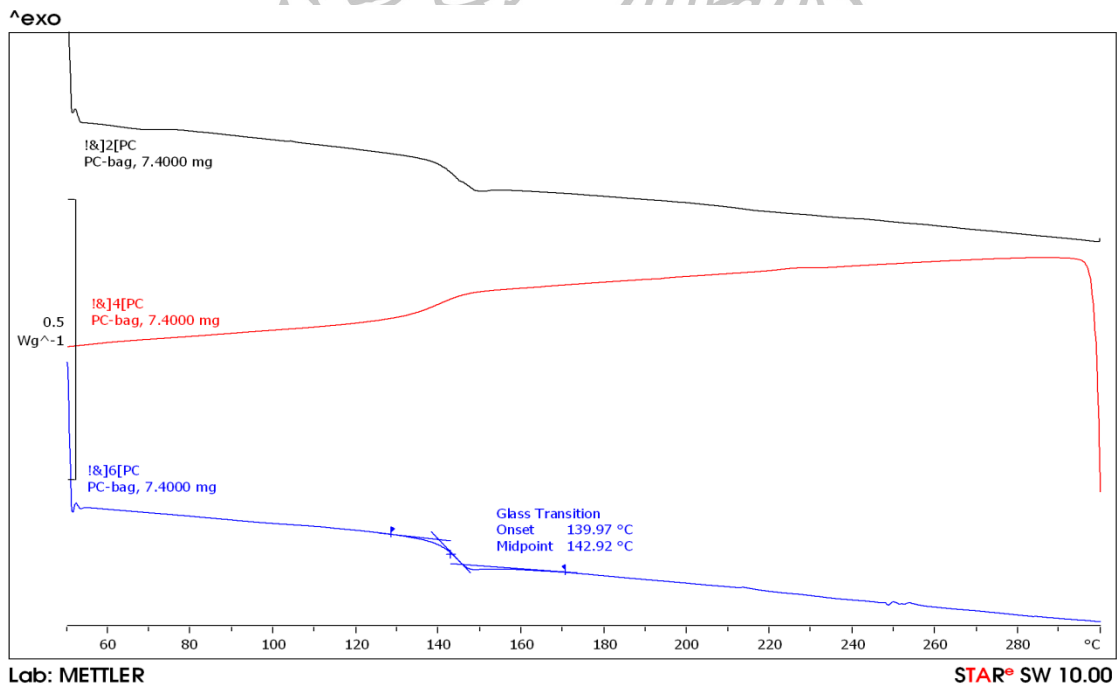
ตารางผนวก ก.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีลำดับการผสมผสม RPET, PC , glass bead แตกต่างกัน

Sample	Tensile testing			Impact testing
	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile stress at break (MPa)	Notched impact strength (kJ/m ²)
MDI0.9	942.29±39.64	381.95±1.24	48.59±15.19	5.96±0.33
RPET/PC/GB	1143.84±24.85	4.24±0.95	42.69±8.94	4.45±0.26
(RPET/GB)/PC	1120.74±4.98	6.34±0.72	58.6±4.98	4.21±0.35
(PC/GB)/RPET	1178.96±6.33	5.65±0.44	57.64±3.56	4.31±0.15

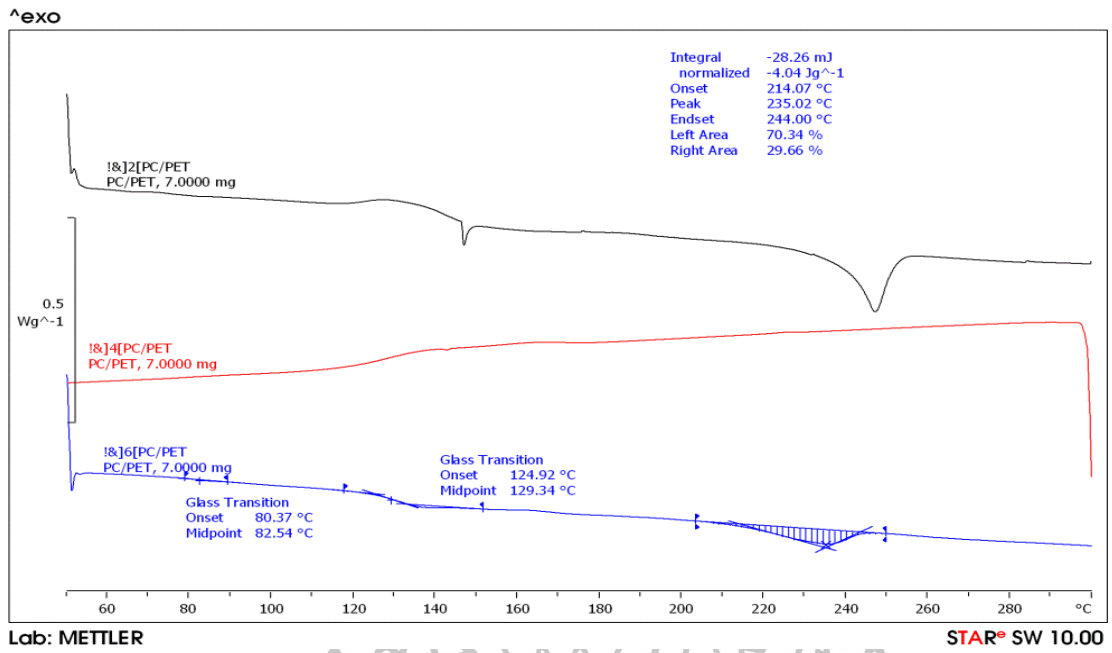
ก-3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



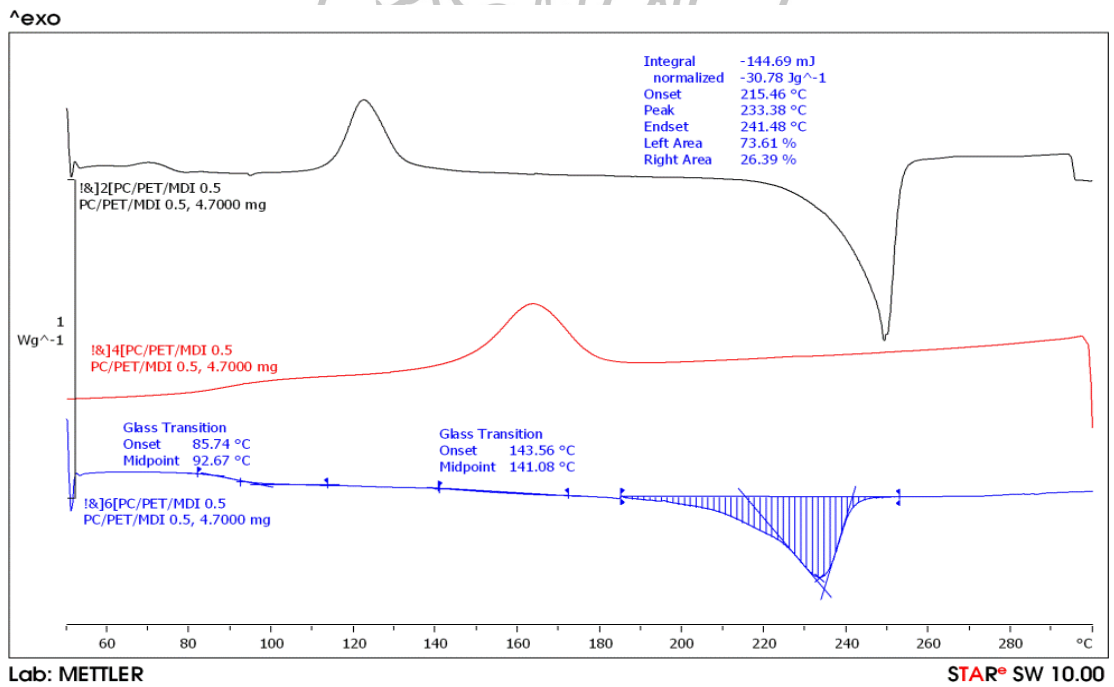
ภาพผนวก ก.1 DSC thermogram ของ RPET



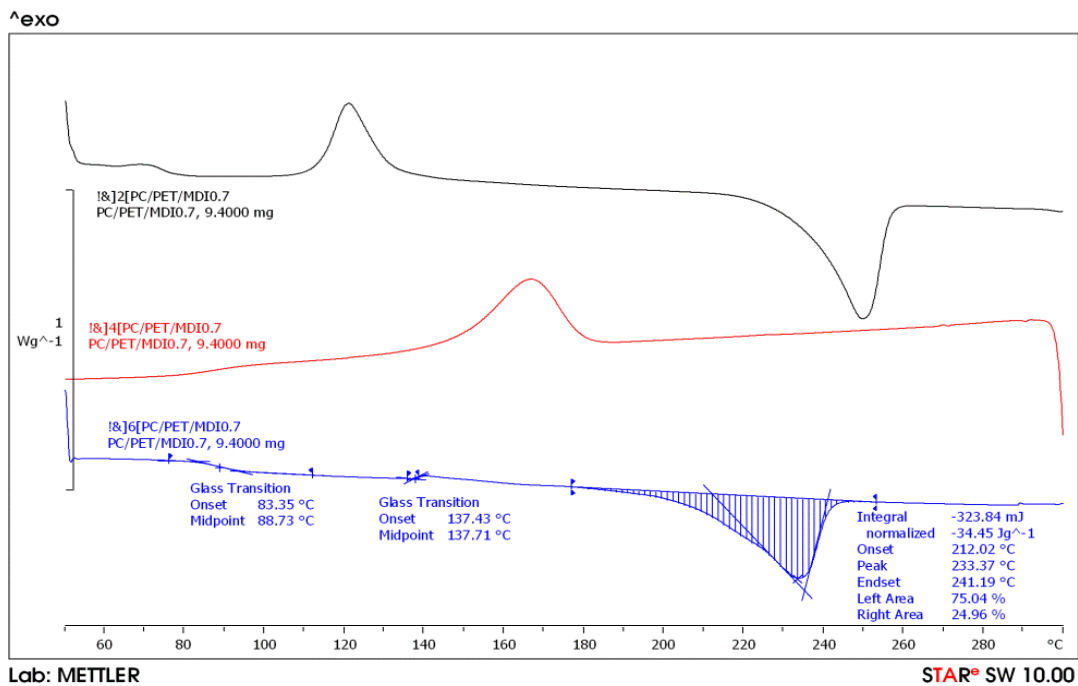
ภาพผนวก ก.2 DSC thermogram ของ PC



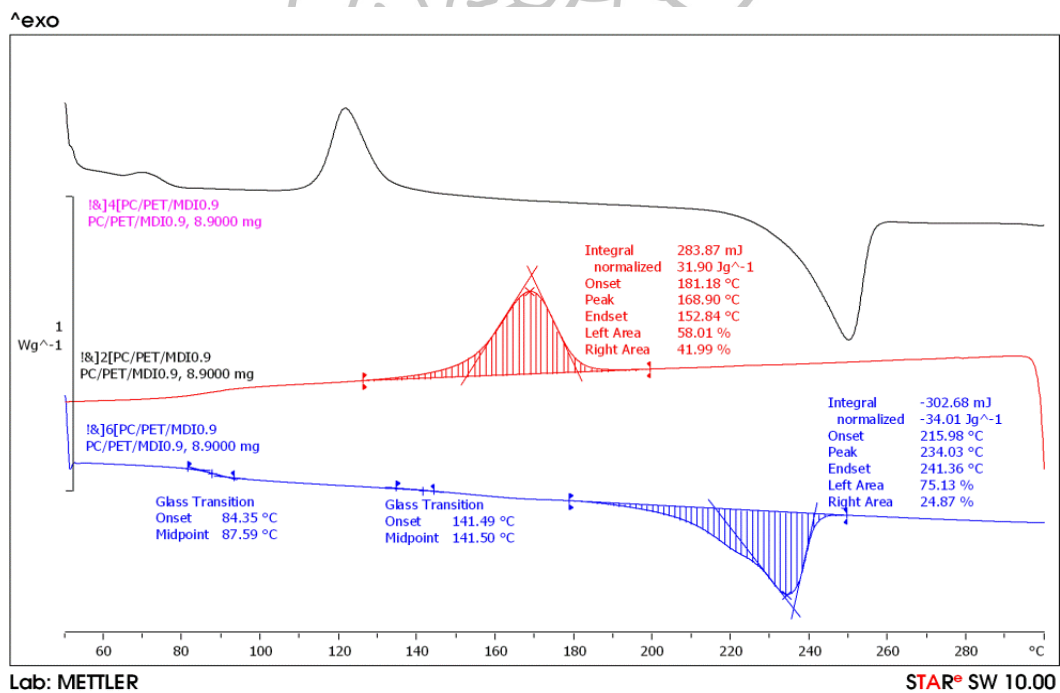
ภาพผนวก ก.3 DSC thermogram ของ RPET/PC



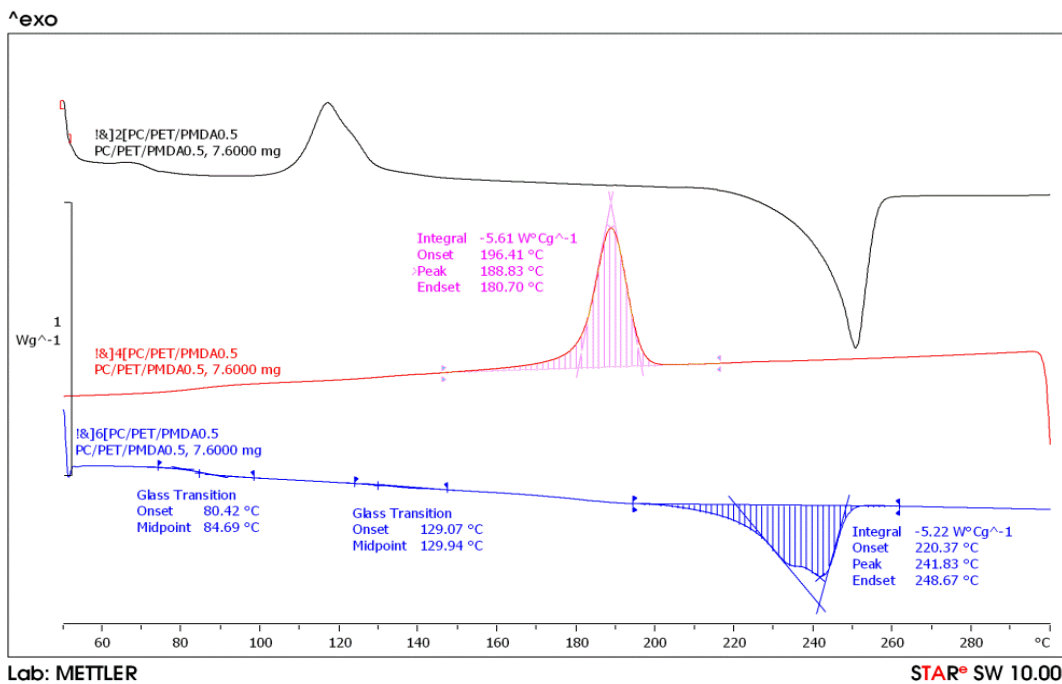
ภาพผนวก ก.4 DSC thermogram ของ MDI0.5



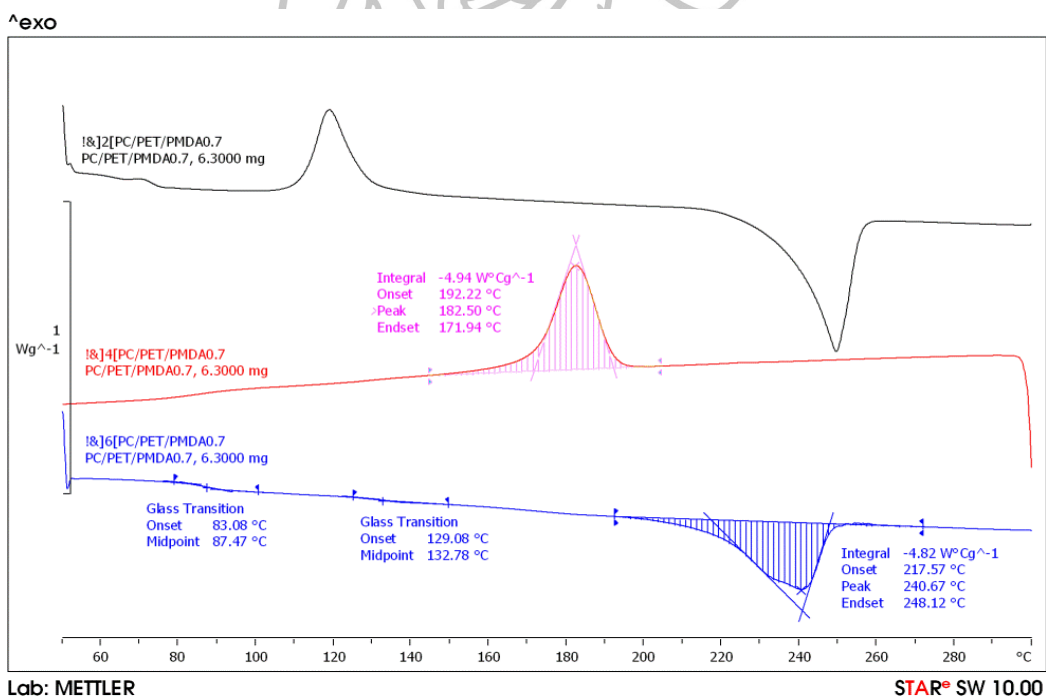
ภาพผนวก ก.5 DSC thermogram ของ MDIO.7



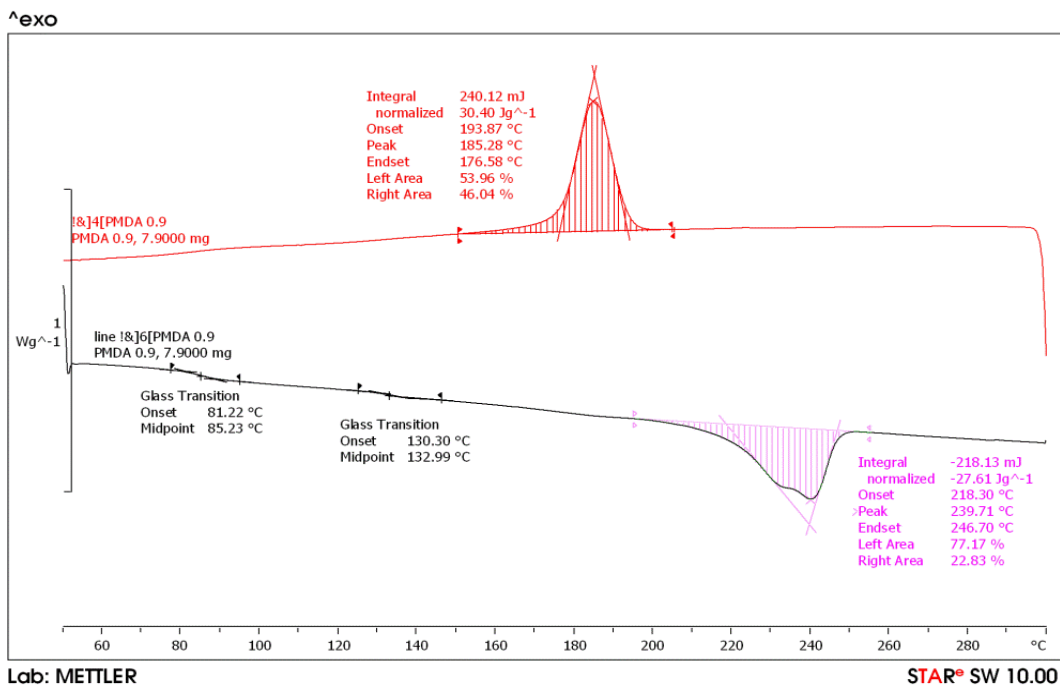
ภาพผนวก ก.6 DSC thermogram ของ MDIO.9



ภาพผนวก ก.7 DSC thermogram ของ PMDA0.5

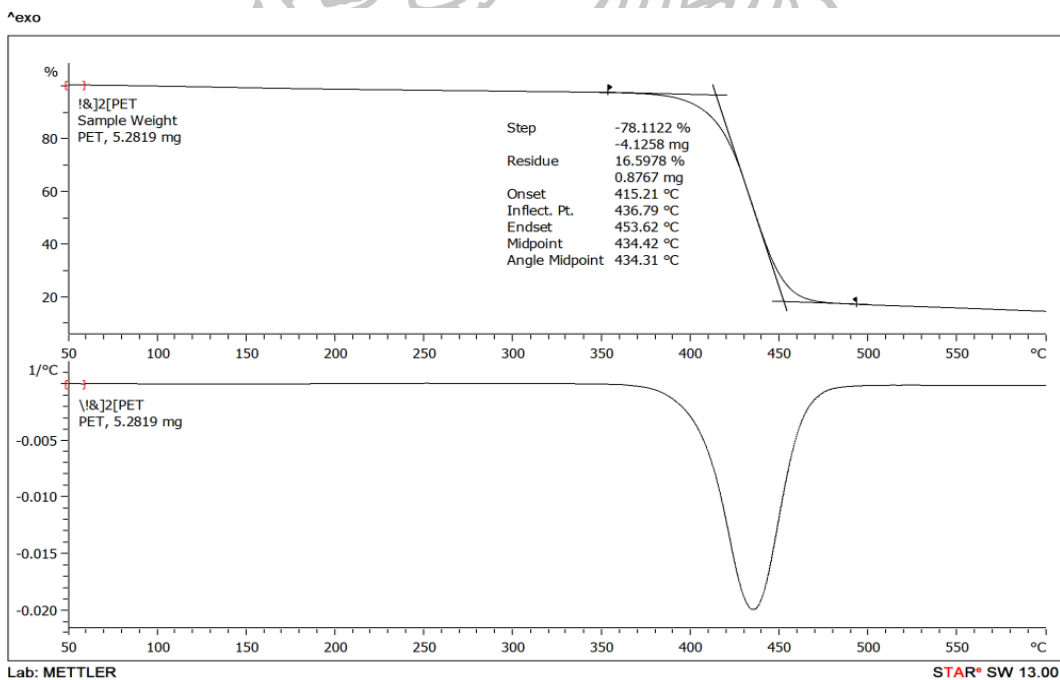


ภาพผนวก ก.8 DSC thermogram ของ PMDA0.7

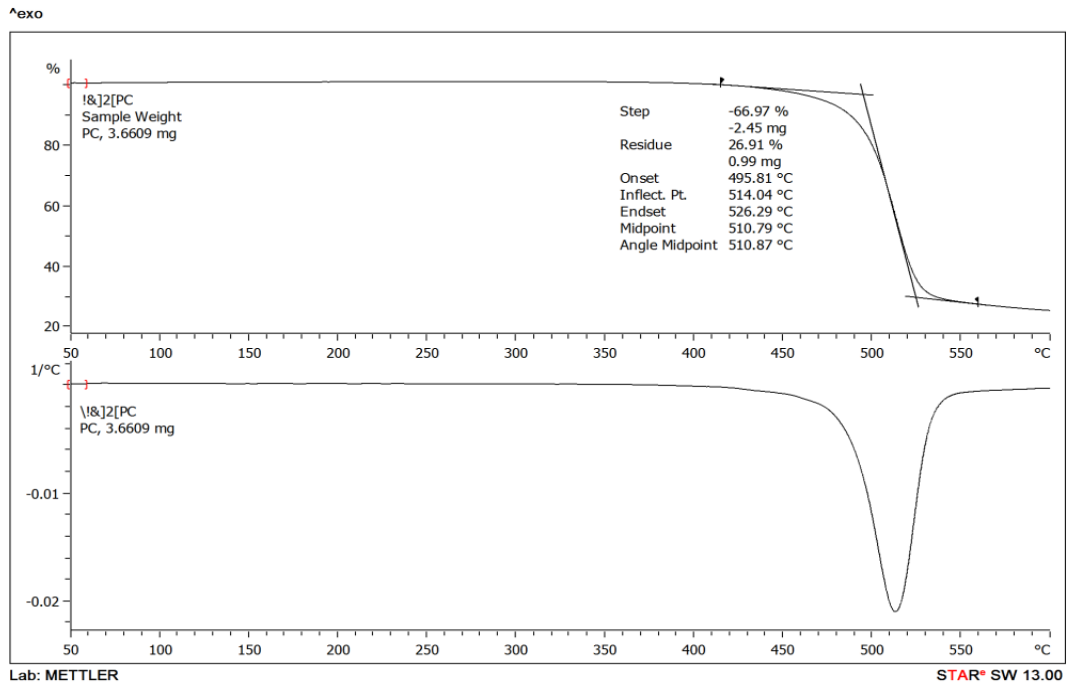


ภาพผนวก ก.9 DSC thermogram ของ PMDA0.9

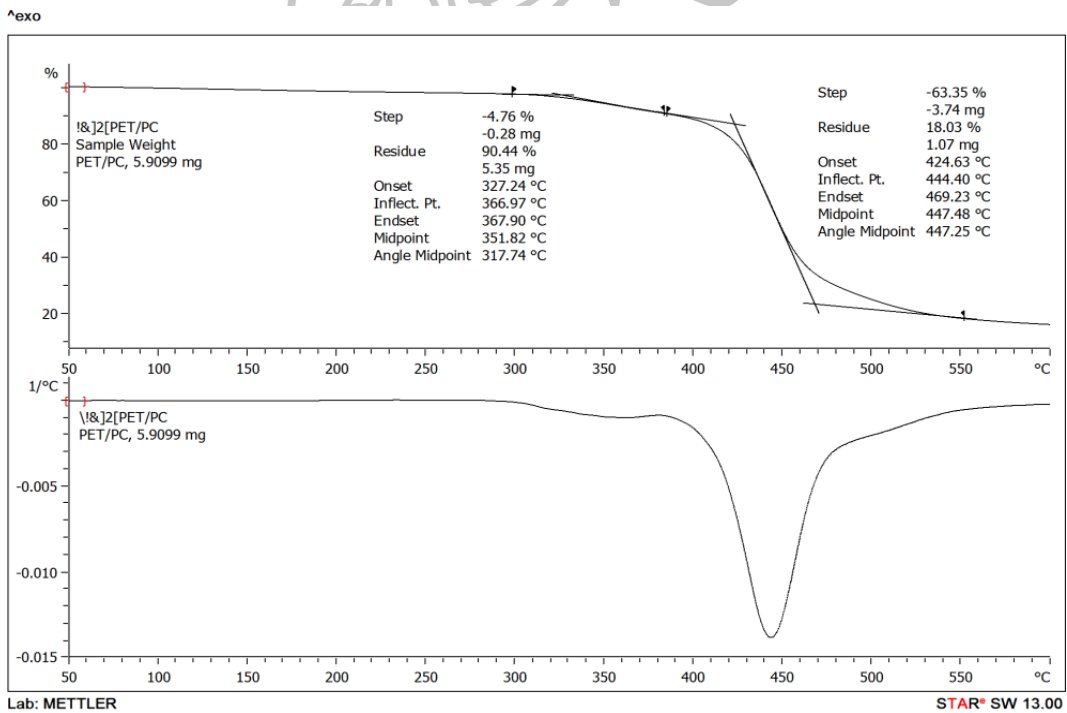
ก-4 ผลการทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนเทคนิค TGA



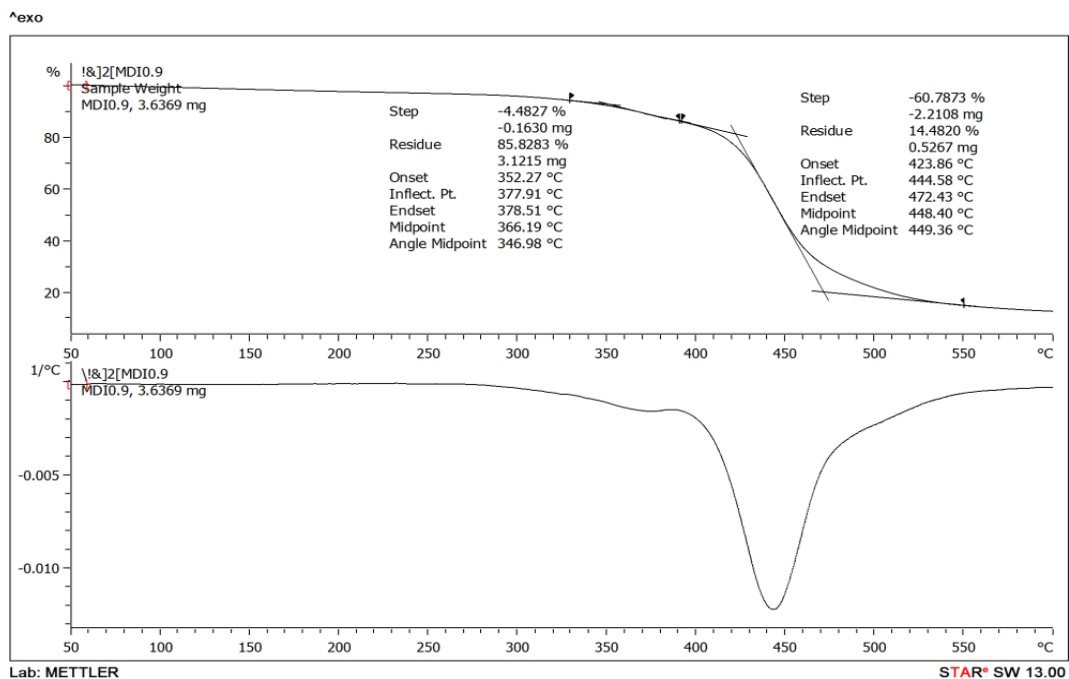
ภาพผนวก ก.10 TGA thermogram ของ RPET



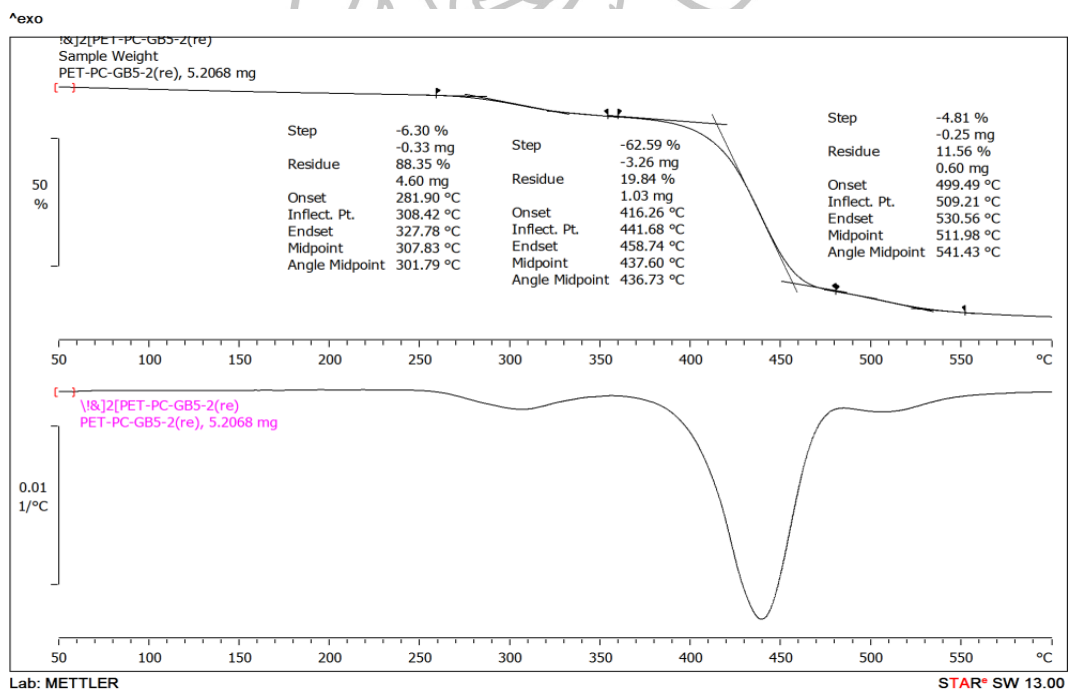
ภาพผนวก ก.11 TGA thermogram ของ PC



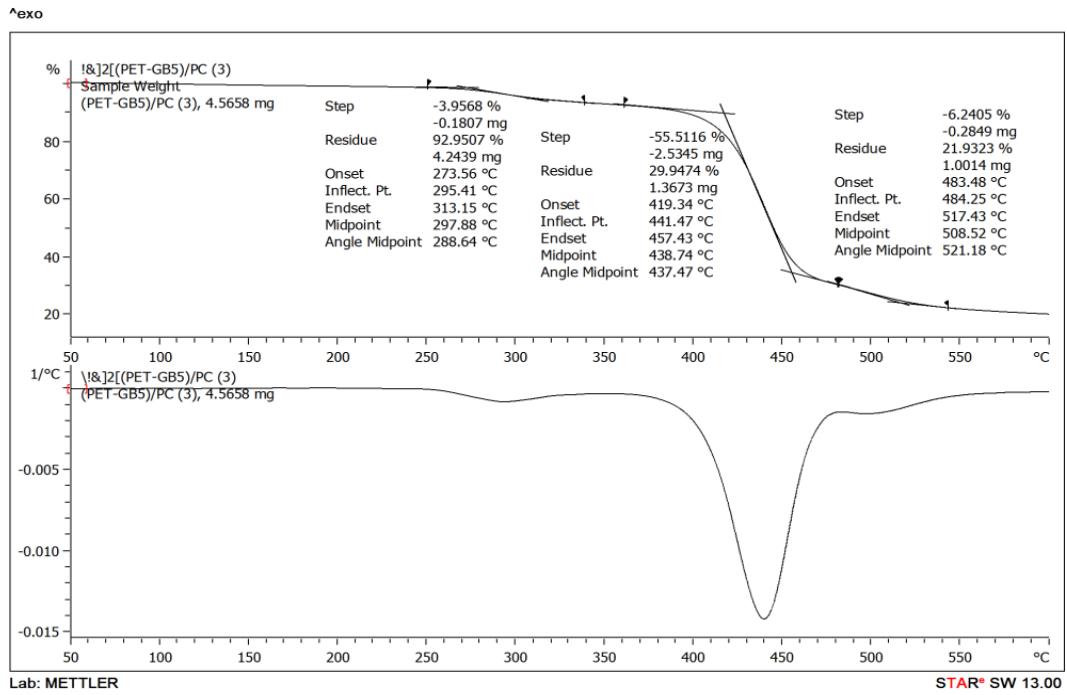
ภาพผนวก ก.12 TGA thermogram ของ RPET/PC



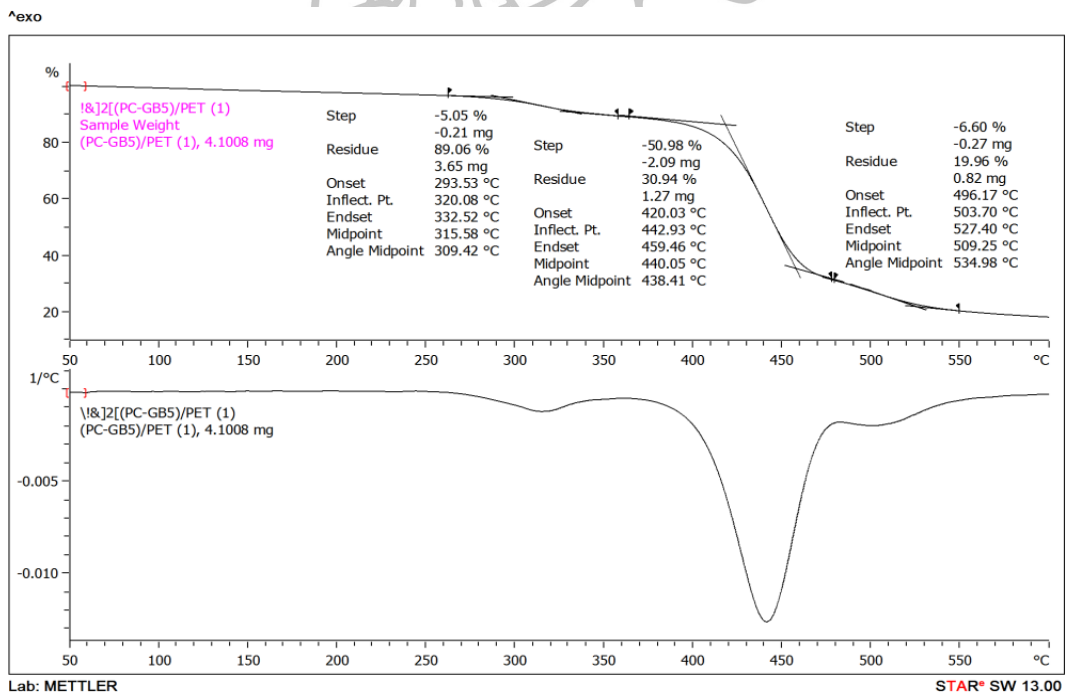
ภาพผนวก ก.13 TGA thermogram ของ MDI 0.9



ภาพผนวก ก.14 TGA thermogram ของ RPET/PC/GB

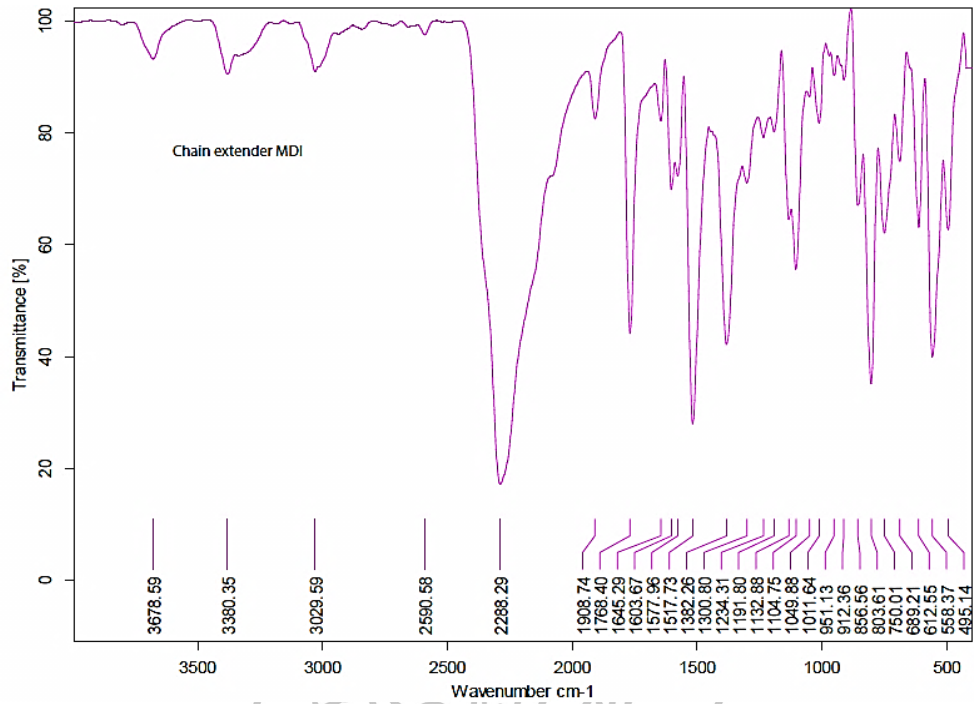


ภาพผนวก ก.15 TGA thermogram ของ (RPET/GB)/PC

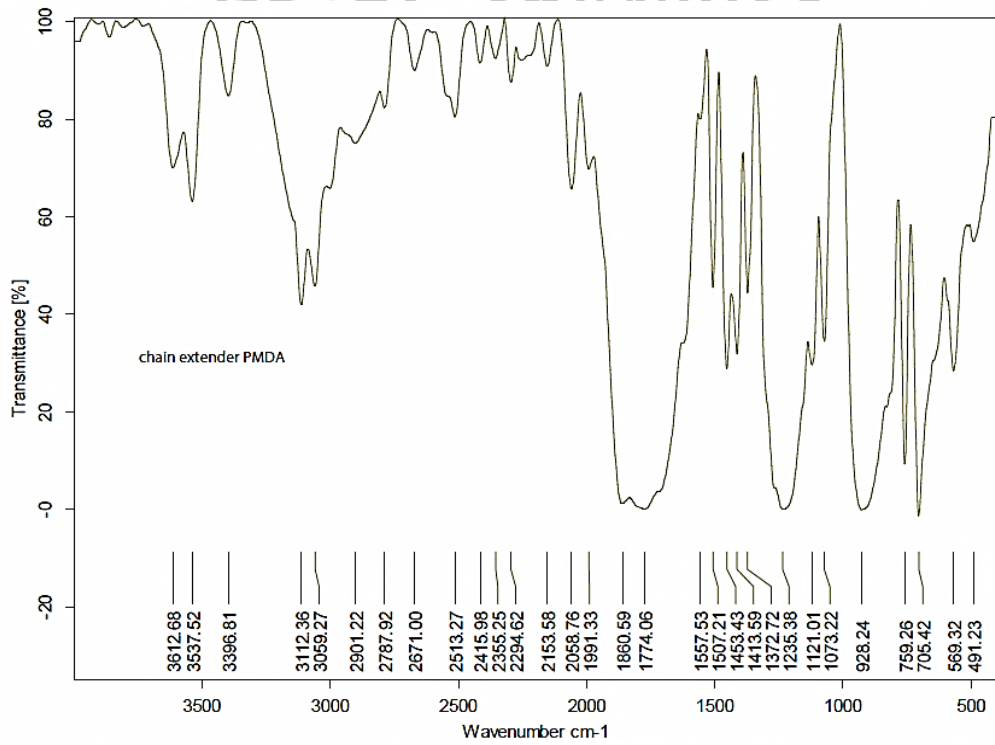


ภาพผนวก ก.16 TGA thermogram ของ TGA (PC/GB)/RPET

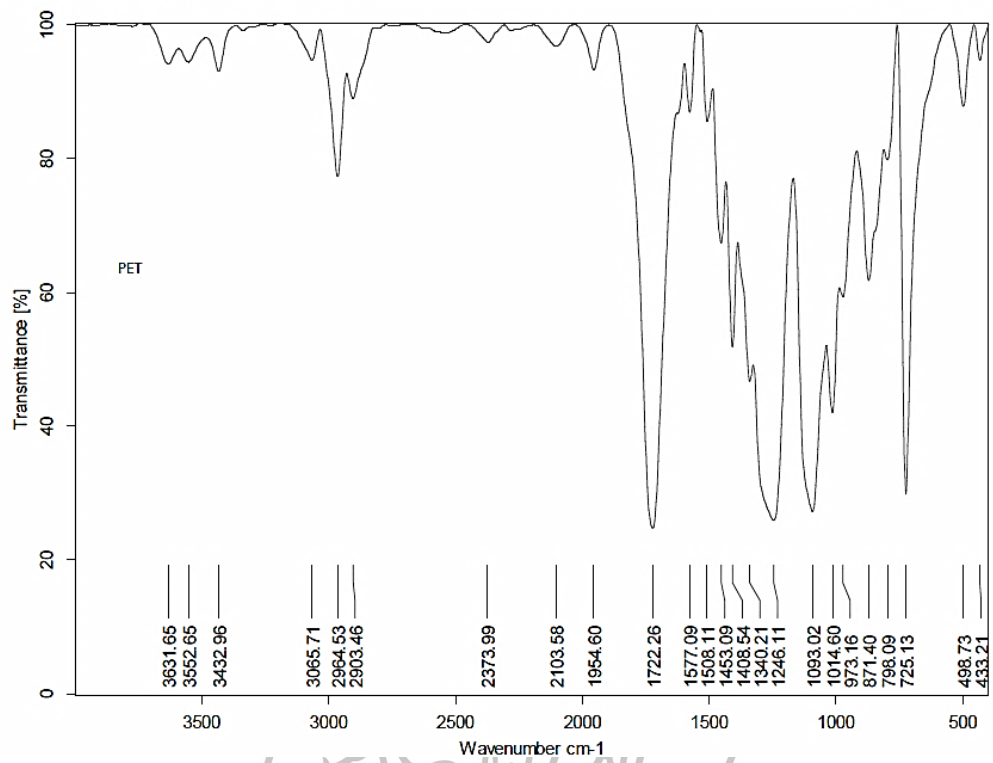
ก-5 ผลการทดสอบศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญด้วยเทคนิค FTIR



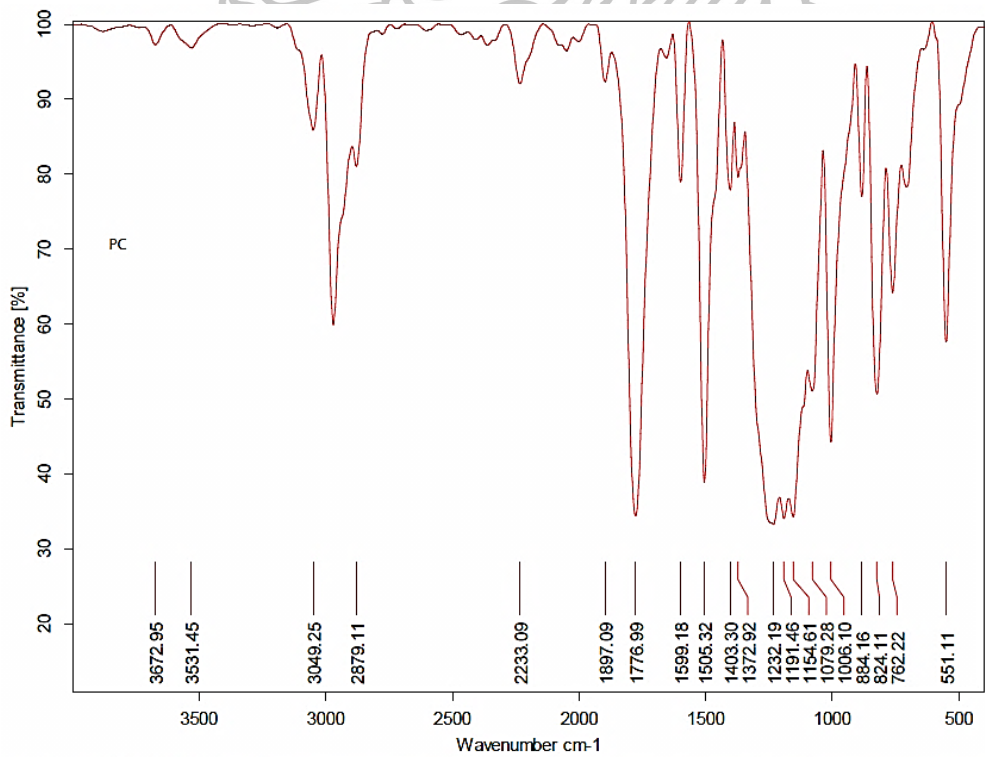
ภาพผนวก ก.17 FTIR spectrum ของ MDI (chain extender)



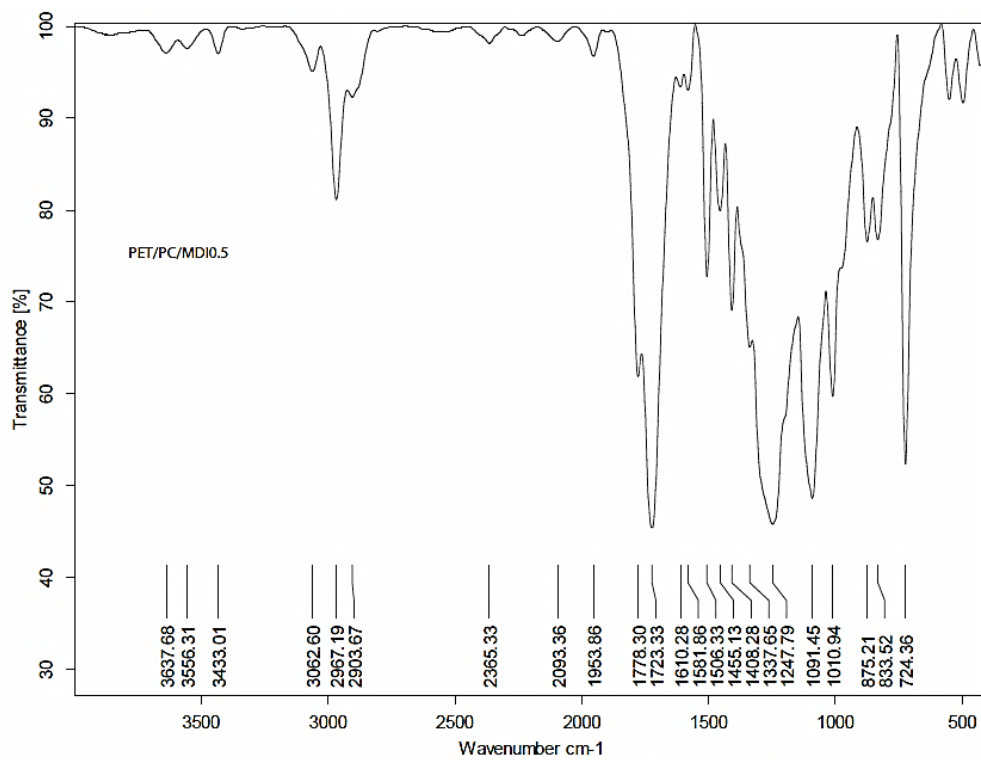
ภาพผนวก ก.18 FTIR spectrum ของ PMDA (Chain extender)



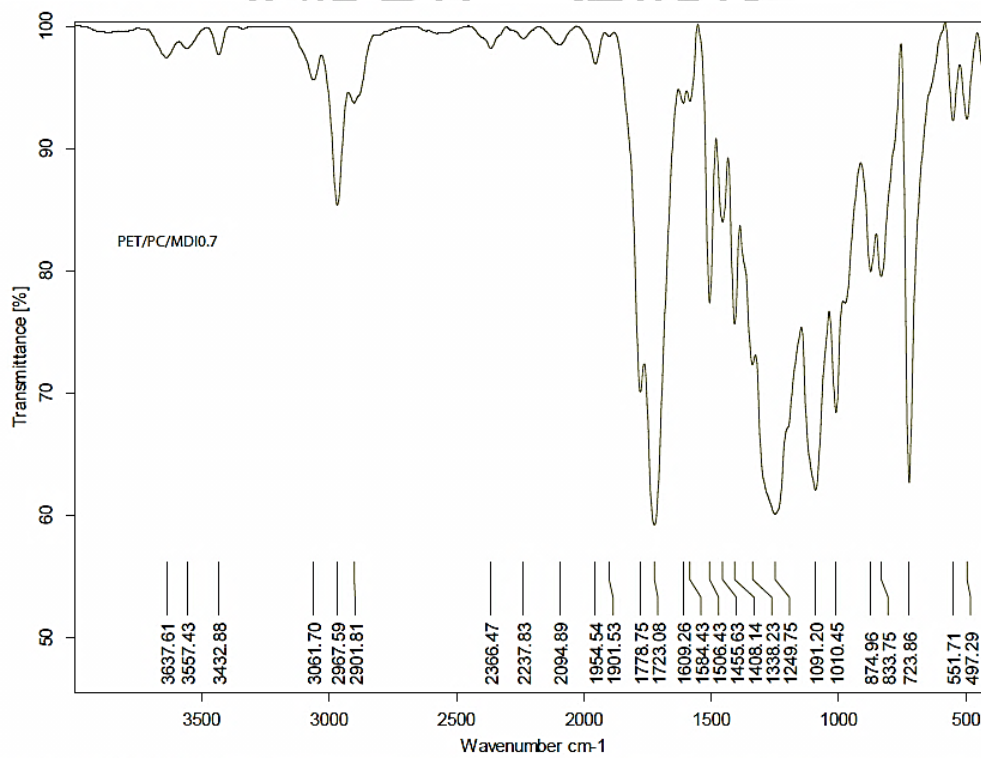
ภาพผนวก ก.19 FTIR spectrum ของ RPET



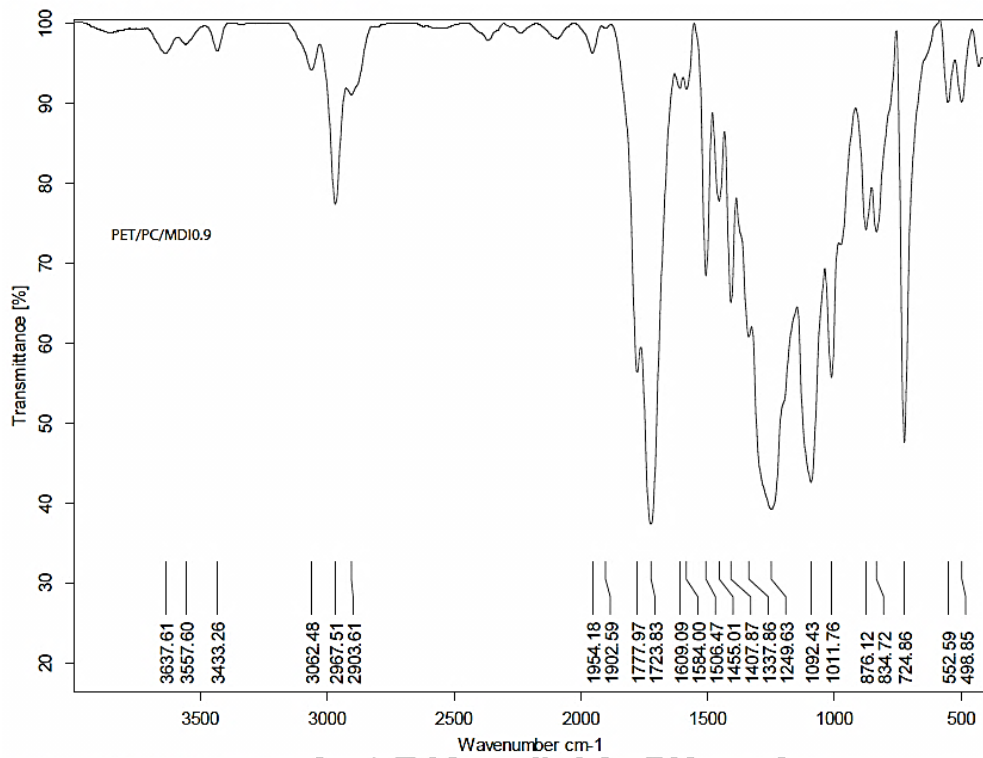
ภาพผนวก ก.20 FTIR spectrum ของ PC



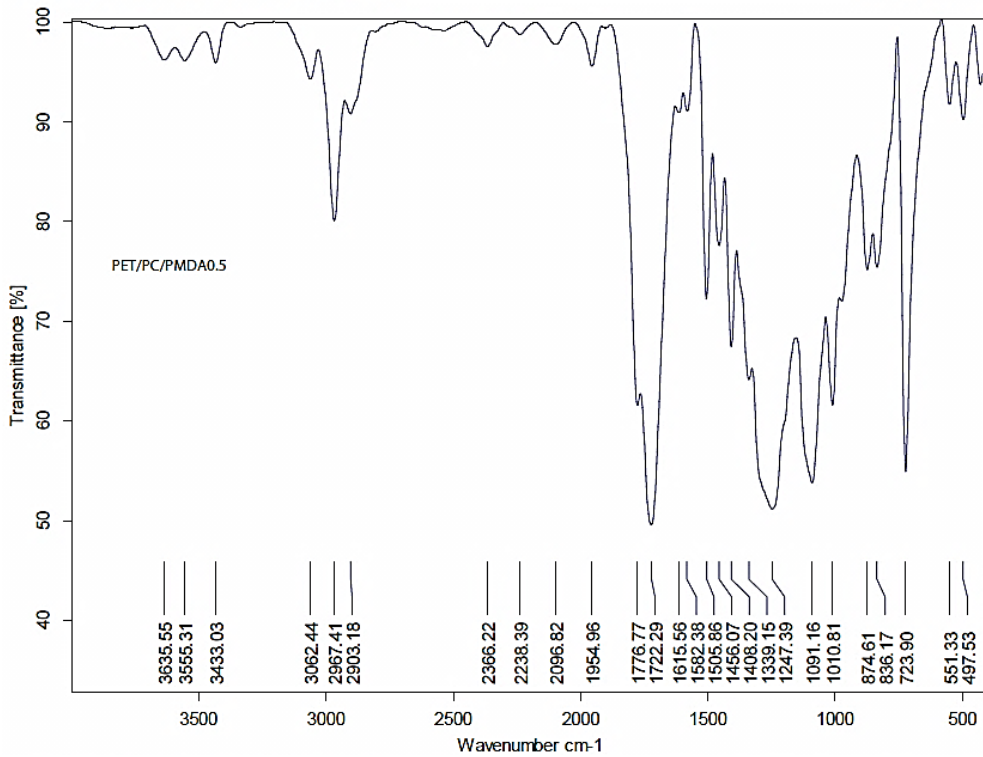
ภาพผนวก ก.21 FTIR spectrum ของ MDI0.5



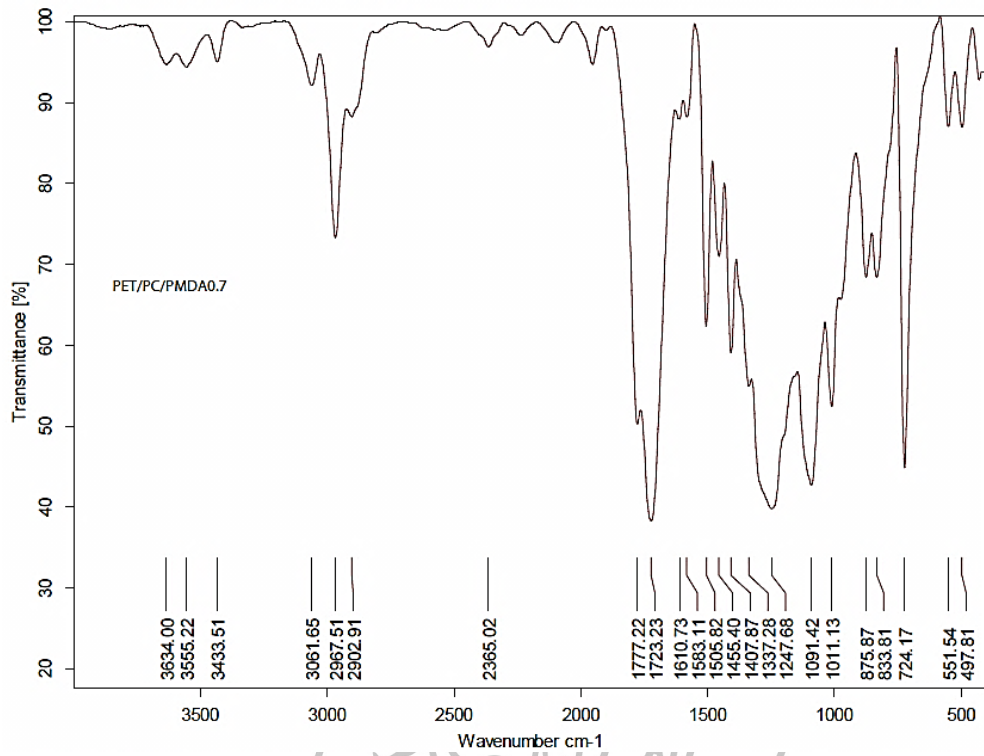
ภาพผนวก ก.22 FTIR spectrum ของ FTIR spectrum ของ MDI0.7



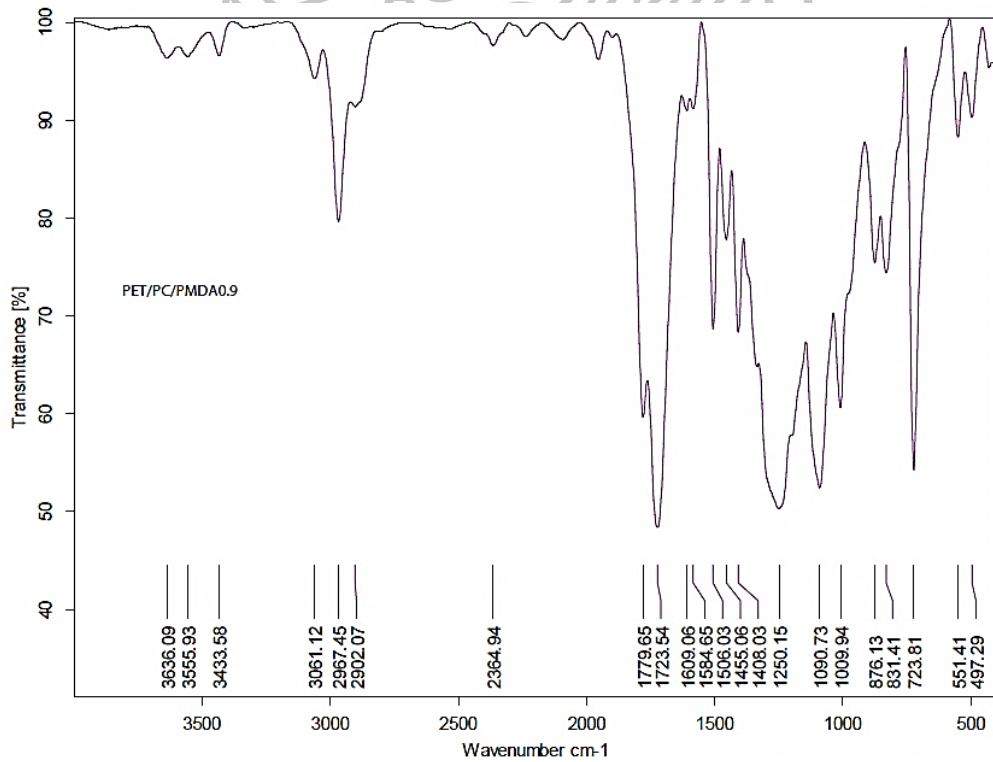
ภาพผนวก ก.23 FTIR spectrum ของ MDI 0.9



ภาพผนวก ก.24 FTIR spectrum ของ PMDA0.5



ภาพผนวก ก.25 FTIR spectrum ของ PMDA0.7



ภาพผนวก ก.26 FTIR spectrum ของ PMDA0.9



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ข-1 การคำนวณค่า intrinsic viscosity ของสารละลายพอลิเมอร์

$$\eta = 0.25(\eta_r - 1 + 3 \ln \eta_r)/C \quad (1)$$

โดยที่ Relative viscosity (η_r) คือ $t_{\text{solution}}/t_{\text{solvent}}$

t_{solution} คือ เวลาที่สารละลายเคลื่อนที่, s

t_{solvent} คือ เวลาที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่, s

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง, g/dL

ตัวอย่าง การคำนวณค่า intrinsic viscosity ของ RPET จากข้อมูลในตารางผนวก ก.2

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ประกอบด้วย C = 0.5 g/dL, $t_{\text{solution}}=1825.67$ s, $t_{\text{solvent}}=1275$ s

จาก $\eta_r = t_{\text{solution}}/t_{\text{solvent}} = 1825.67/1275 = 1.43$

$$\ln \eta = \ln 1.43 = 0.36$$

ดังนั้น

$$\eta = 0.25(\eta_r - 1 + 3 \ln \eta_r)/C$$

$$\eta = 0.25(1.43 - 1 + \ln 1.43)/0.5$$

$$\eta = 0.75 \text{ dL/g}$$

ข-2 การคำนวณความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว

ตัวอย่าง การคำนวณค่า MFI ของ RPET จากข้อมูลในตารางผนวก ก.3

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่า MFI ของ Extrudate เส้นที่ 1 ประกอบด้วย น้ำหนักของเส้น extrudate ที่ไหลออกมาภายใน 5 วินาที

$$\begin{aligned} \text{MFI(g/10 min)} &= \frac{1.0913 \text{ g}}{4.47 \text{ s}} \times \frac{600 \text{ s}}{10 \text{ min}} \\ &= 146.48 \text{ g/ 10 min} \end{aligned}$$

ข-3 การคำนวณค่า Impact strength

ตารางผนวก ข.1 แสดงขนาดของชิ้นงาน

ชั้นที่	ปาก mm (กว้าง)					หนา mm (สูง)				
	1	2	3	avg (mm)	avg (m)	1	2	3	avg (mm)	avg (m)
1	10.1	10.1	10.12	10.11	0.01011	3.14	3.14	3.14	3.1400	0.00314

ตารางผนวก ข.2 แสดงขนาดชิ้นงานเฉลี่ยและข้อมูลที่ได้จาก Impact tester

ชั้นที่	กว้าง (m)	หนา (m)	$x(j)_{app}$	$x(j)_{air}$	$x(j)_{TRUE}$	Area (m ²)	Impact strength (kJ/m ²)
1	0.01010	0.00314	0.155	0.007	0.148	3.17349E-05	4.663

$$\text{ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) = Energy/ Area} \quad (2)$$

โดยที่

E คือ พลังงานดูดซับ, kJ

A คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณร่องบาก, m²

ตัวอย่าง การคำนวณค่า Impact strength ของ RPET

$$x(j)_{TRUE} = x(j)_{app} - x(j)_{air} = 0.155 - 0.007 = 0.148 \text{ J} = \text{Energy}$$

$$= 0.148 \times 10^{-3} \text{ kJ}$$

$$A = \text{กว้าง} \times \text{หนา} = 0.01010 \times 0.00314 = 3.173 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Impact strength} = x(j)_{TRUE} / \text{Area}$$

$$= 0.148 \times 10^{-3} \text{ kJ} / 3.173 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$= 4.663 \text{ kJ/m}^2$$



ภาคผนวก ค
การนำเสนอผลงานวิจัย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

Effect of Chain Extenders on Mechanical Properties of Recycled Poly(Ethylene Terephthalate)/Polycarbonate Blend

Kanyakarn Lappokachai and Nattakarn Hongsrphan

Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

Abstract

Recycled poly(ethylene terephthalate) or RPET is well known to exhibit brittle behavior and poor notched impact strength from thermal and hydrolysis degradation which occurs during reprocessing through melt blending. This research attempted to improve mechanical properties of recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET) by blending with polycarbonate of 20 wt% and using chain extenders to prevent molecular weight reduction of RPET and to increase interfacial adhesion. Pyromellitic dianhydride (PMDA) and methylene diphenyl diisocyanate (MDI) with the concentration of 0.5, 0.7 and 0.9 wt% were used as chain extenders. Influence of types and concentrations of chain extender on the blends was studied by intrinsic viscosity (IV) and melt flow index (MFI). It was found that using MDI as chain extenders in all concentrations could increase IVs more effectively than using PMDA, and dramatically reduction of MFI implied that polymer networks between RPET and PC phases was present. The shifting of glass transition temperatures of both PET and PC phases toward each other from DSC thermogram indicates the increasing in miscibility in the partial-miscible blends. Mechanical properties were studied using tensile and notched Izod impact tests, which the results showed that the addition of MDI into the RPET/PC blends improved mechanical properties to be more ductile similarly to neat PC but their Young's modulus was reduced slightly.

Keywords— Recycled poly (ethylene terephthalate), chain extender, PMDA, MDI

1. INTRODUCTION

Nowadays, plastic products are one of the most used materials everywhere in the world because plastics have various advantages such as inexpensive, lightweight, strong, durable, corrosion-resistant materials, and electrical insulation properties. Demand for consumer plastic products has been growing rapidly affects the amount of plastic waste and increases environmental problems. This is mainly due to petroleum-based plastics is non-degradable. Conventional methods of plastic waste management are incineration and landfill by these methods cause air pollution and create bad aesthetics in environment. Therefore, plastic recycling is an important method currently available to reduce these impacts on environment. Among the many plastic waste, post-consumer bottles from poly (ethylene terephthalate) or people commonly known PET is the most appropriate for plastic recycling due to cost effectiveness and availability.

Nevertheless, recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET) is well known to exhibit

brittle behavior and poor notched impact strength from thermal and hydrolysis degradation which occurs during reprocessing through melt blending and results on decreasing of molecular weight and mechanical properties. Many researchers found that recycled Poly(ethylene terephthalate) (RPET) exhibit lower mechanical properties than the virgin PET associated with the thermal and hydrolytic degradation that occurs through melt processing lead to reduction of molecular weight and the intrinsic viscosity[1] Blending technology of RPET with other polymers is a simple method and can improve mechanical properties[2-4]. Moreover, addition of chain extender is a necessary way to not only increase molecular weight of RPET but also improve the compatibility between polymer blends by it has two or more reactive site in molecule, which can react with terminal group of polymer chain, bonding chemical structure[5].

The objective of this work was to improve mechanical properties of recycled poly (ethylene terephthalate) (RPET) by blending polycarbonate (PC) of 20 wt% and using chain extenders to prevent molecular weight reduction

of RPET and increase interfacial adhesion. Two types of commercial available chain extenders, namely pyromellitic dianhydride (PMDA) and methylene diphenyl diisocyanate (MDI), were used. The concentration of chain extenders were varied in the range of 0.5, 0.7, and 0.9 wt%. Influence of chain extenders on molecular weights of RPET/PC blends was studied by means of intrinsic viscosity (IV) and melt flow index (MFI). Miscibility of RPET/PC blends with and without chain extender samples was characterized by differential scanning calorimetry (DSC). And, mechanical properties of the blends were studied by tensile and notched Izod impact tests.

2. Experimental

2.1 Materials and sample Preparation

Recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET) was obtained as flakes grinding from post-consumer drinking water bottles. Polycarbonate (PC) (WONDERLITE® PC-122) was purchased from Chimei-asahi Corporation (Taiwan) (MFI 22 g/10 min at 300 °C/ 1.2 kg). 1,1,2,2-tetrachloroethane (TCE), phenol, methylene diphenyl diisocyanate (MDI) and pyromellitic dianhydride (PMDA) were purchased from Sigma Aldrich Chemical. All chemicals were used without further purification.

Before blending, PC pellets and RPET flakes were pre-dried at 120°C for 6 hours in an air-circulating oven to remove moisture (*moisture content* < 0.02%) that would cause molecular weight reduction through a hydrolysis reaction. Melt blending was performed in a co-rotating twin-screw extruder (SHJ-25, Yongteng, China) using a screw speed of 60 rpm and a temperature profile in the range of 220-250 °C. The extrudates were pelletized, dried and injected into specimens for mechanical testing by an injection-molding machine with barrel temperature at 260 °C and mold temperature at 80 °C.

Each polymer blend sample has the same weight ratio of PET and PC (80/20 w/w%) which various concentrations of chain extender (0, 0.5, 0.7 and 0.9 wt %) were used. Neat RPET samples were also prepared under the same processing temperature for using as the reference. The concentration and types of chain extender are shown in Table 1.

Table 1 shows abbreviations and blend compositions.

Abbreviation	RPET/PC (wt%)	Chain extender (wt%)	
		MDI	PMDA
RPET	100/0	-	-
PC	0/100	-	-
RPET/PC	80/20	-	-
PMDA0.5	80/20	-	0.5
PMDA0.7	80/20	-	0.7
PMDA0.9	80/20	-	0.9
MDI0.5	80/20	0.5	-
MDI0.7	80/20	0.7	-
MDI0.9	80/20	0.9	-

2.2 Characterization

The intrinsic viscosity (IV), $[\eta]$ was determined by an Ubbelohde dilution viscometer using a mixture of phenol/1,1,2,2-tetrachloroethane (60:40 w/w) at 30°C according to ASTM D 4603. The intrinsic viscosity (IV) was calculated from the relative viscosity in a single measurement by Billmeyer relationship:[6]

$$\eta = 0.25(\eta_r - 1 + 3 \ln \eta_r)/c \quad (1)$$

where :

η_r = relative viscosity = t/t_0

t = average solution flow time, s

t_0 = average solvent flow time, s

c = polymer solution concentration, g/dL

Melt flow index (MFI) was determined according to ASTM D 1238. The test were performed at 260 °C using a load of 2.16 kg.

Thermal analysis was performed by a differential scanning calorimeter (Mettler Toledo). Samples of 4-10 mg were tested in a heat-cool-heat mode under nitrogen atmosphere, the first was heating from 50°C to 300°C at 10°C/min in order to eliminate the heat history of the sample, the second step was cooling at 10°C/min to 50°C. Finally, the samples were heated similarly to the first step.

Tensile testing was performed by a universal testing machine (Instron 5969, Instron Engineering Corporation, USA). All the samples were dumbbell-shaped tensile bars according to the ASTM D638 (type I). Young's modulus, %elongation at break and tensile stress at yield

were measured using a 50 kN load cell at a crosshead speed of 10 mm/min. Five samples were tested and the average values were reported.

Notched Izod impact tester (Zwick, B5102.202, Germany) was used to determine impact strength from impact bars in rectangular shapes according to ASTM D256. The test was carried out with impact energy of 4 J. Fifteen samples were tested and the average values were reported.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Intrinsic viscosity and melt flow index

One of the most important characteristics of PET is referred to as Intrinsic Viscosity (IV). Intrinsic viscosity (IV) is used to give information about the molecular weight of PET, which decreasing of intrinsic viscosity (IV) correlates to decreasing molecular weight of polymer itself. In order to investigate influence of chain extenders (PMDA or MDI) on the change in molecular weight of RPET after blending with PC and adding chain extenders, the intrinsic viscosities (IVs) of the blends were studied and compared with neat RPET under the same thermal history. All samples were completely dissolved in the mixing solvent of phenol/TCE. Table 2 presents IVs of neat RPET, PET/PC blends with and without chain extenders. It was found that melt blending PC into RPET decreased IV significantly compared with neat RPET. It is well known that transesterification occurs between PC (i.e. carbonate groups) and PET (i.e. ester groups) during the melt processing. Montaudo *et al*[7] proposed that the uncatalyzed exchange reaction of high molar mass PC with PET sample containing carboxyl end groups was likely to occur by an outer-inner mechanism or by attack of outer functional groups (i.e. carboxylic end groups) on inner groups (i.e. carbonate groups). This mechanism did not produce two copolymer chains, because only the polymer chain bearing active chain ends (outer groups) could attack the inner group of the other polymer, yielding a copolymer molecule plus a shorter linear homopolymer chain. Also, Zhang *et al*[8] reported that the average lengths of PET and PC sequences became shorter and shorter when the transesterification continued. Thus, melt blending between PET and PC in the ratio of 80/20 wt% at 250°C accelerated molecular cleavage of PET via the transesterification

causing the IV to be reduced, although increasing the compatibility between them as evident in DSC results later.

Table 2 shows the intrinsic viscosities (IVs) and melt flow index (MFI) of RPET and RPET/PC blends with and without chain extenders.

Sample	Intrinsic viscosity (IV), $[\eta]$ (dL/g)	Melt flow index (MFI)
RPET	0.75	146.49
RPET/PC	0.59	64.28
PMDA0.5	0.48	146.09
PMDA0.7	0.50	124.71
PMDA0.9	0.51	68.78
MDI0.5	0.62	62.08
MDI0.7	0.66	46.99
MDI0.9	0.78	19.79

Under the influence of chain extenders, it was found that adding MDI into the RPET/PC blends increased IVs of the blends with respect to MDI content, but still lower than neat RPET. In contrast, IV values of RPET/PC blends in all PMDA concentrations in this study were decreased. Tang *et al*[41] reported that the isocyanate functional groups (-NCO) of MDI could react with hydroxyl groups (-OH) of RPET and carboxyl groups (-COOH) of RPET and PC, which adding MDI increased molecular weight molecular weights of PET via chain-extending reaction. The chain extension reaction increased the molecular weight of the blend to be higher than the same blend ratio without MDI. Extra MDI content could result in crosslinking because of the extraordinary activity of isocyanate group, which the copolymer network between PET and PC phases would affect ductility of the blend which would be seen later in impact property.

For PMDA, the results contradicted from other reports[10,11]. It was expected that adding PMDA would increase IVs of the blends from the chain extension reaction. PMDA has tetra-functional groups (fn = 4) that could add up to four polymeric molecules leading to chain extension and branching structure by involving initial ring opening on the dianhydride on reaction with the polyester hydroxy end groups resulting in chain extension and concomitant formation of pendant carboxylic acid group. Forsythe *et al*[11] proposed that addition of

PMDA at low concentration (i.e. 0.5 %wt) to PET molecules resulted predominantly in chain extension reactions between the anhydride groups from PMDA and the alcohol end groups from RPET. However, the thermal cleavage of the PET ester bond resulted in PET chains with carboxyl and vinyl ester end groups, which an increase in the carboxyl end-group concentration would increase the rate of hydrolysis of the polymer. Moreover, transesterification between PET and PC would result in copolymer with higher steric hindrance from incorporating aromatic ring into the RPET structure. These competitive reactions prevented PMDA to form coupling or crosslinking structure that could increase molecular weight of PET significantly as obtained in the system of MDI.

Melt flow index of the blends was also studied in order to determine melt viscosity of the blends after melt blending with and without chain extenders. It was seen that MFI value was decreased when blending RPET with PC, from 146.49 g/10 min to 64.28 g/10 min. The MFI value of neat PC was 10.80 g/10 min under the same testing condition. The increase in melt viscosity of the RPET/PC blend was due to high viscosity of PC in the blend, even though decreasing in IV of the blend implied that molecular weight of RPET molecules was decreasing. Similarly, using MDI as chain extender increased melt viscosity of the blends dramatically, which was closer to the neat PC's MFI for using MDI of 0.9 wt%. This implied that there were copolymer networks that resulted from branching or crosslinking reactions between RPET, PC, or PET-co-PC molecules under the influence of MDI. Using PMDA as chain extender also decreased MFI value of the blends, but its effect was evident significantly only using in the concentration of 0.9 wt%. The increase in MFI implied that the compatibility between PET and PC phases were improved although the increase of molecular weight of PET did not be enhanced.

3.2 Thermal analysis of blends

In order to understand the miscibility between PET and PC in the presence of chain extenders, DSC of the blend was studied and the T_g from DSC thermogram was determined. Table 3 shows T_g values of neat RPET, neat PC, and RPET/PC blends with and without chain extenders. T_g values of neat RPET and neat PC were detected at 79.16 °C and 142.92 °C,

respectively. For RPET/PC blend, two T_g were presented which the $T_{g,PET}$ was present at higher temperature from 79.16 °C to 82.16 °C, while $T_{g,PC}$ was shifted to lower temperature from 142.92 °C to 130.28 °C. The shifting of both $T_{g,PET}$ and $T_{g,PC}$ toward each other indicates these two components were partial-miscible blend, which would occur via trans-esterification reaction between PET ester and PC carbonate groups.

When chain extenders were incorporated into RPET/PC blends during melt blending, it was found that the shifting of $T_{g,PET}$ and $T_{g,PC}$ values was more pronounced. It was observed that changing in T_g occurred in the PET phases more than in the PC phases. However, the change in shifting of T_g did not correlate with the change in concentration of chain extenders.

Table 3. Glass transition temperatures (T_g) of neat RPET, neat PC, and RPET/PC blends with and without chain extenders.

Sample	T_g (°C)	
	PET phase	PC phase
RPET	79.16	-
PC	-	142.92
RPET/PC	82.16	130.28
PMDA0.5	85.48	133.44
PMDA0.7	87.15	132.41
PMDA0.9	86.32	133.46
MDI0.5	85.55	141.08
MDI0.7	88.18	136.77
MDI0.9	87.10	130.95

3.3 Mechanical properties of the blends

3.3.1 Tensile test

Tensile test was performed to examine tensile properties of neat RPET, neat PC, and RPET/PC blends with and without chain extenders using crosshead speed of 10 mm/min. Fig.1 presents stress-strain curves of neat RPET, RPET/PC blends with PMDA (0.5, 0.7 and 0.9 wt%) and RPET/PC blends with MDI (0.5 wt%) which they all exhibited relatively brittle failure, while Fig.2 shows stress-strain curves of neat PC, RPET/PC blends with MDI (0.7 and 0.9 wt%) that exhibited ductile behaviour.

From Fig.3 and Fig.4, addition of PC alone in RPET increased Young's modulus of RPET from 958.40 MPa to 1053.38 MPa, while % elongation at break did not change obviously. When PMDA of 0.5 and 0.7 wt% was added into RPET/PC blends, it was found that modulus increased slightly but % elongation at break was reduced. For adding PMDA of 0.9 wt%, Young's modulus of the blend was in the same range of other concentration, but its elongation at break was much higher. The trend was in accordance to the change in MFI indicating the chain tension reaction gave the branching network between PET and PC phases.

Using MDI as chain extender, it was found that Young's modulus of the blends decreased slightly but % elongation at break increased dramatically from 11.35 % for the RPET to 162.86 % and 381.95% for the blend with 0.7 wt% and 0.9 wt% MDI, respectively. Transesterification between PET and PC along with the chain extension introducing by MDI produced copolymers and polymer network that had good interfacial adhesion between phases resulting on the new polymeric system.

Tensile stress at yield of RPET/PC blends with and without chain extenders are presented in Fig.5. Tensile stress at yield is related to ability of interfacial adhesion between PET matrix and PC disperse phases. Although miscibility of the blends adding chain extenders was improved as evident in the shifting of T_g s, the physical interlocking from branching and crosslinking inhibited molecular mobility to slip from each other and thus stress transfer between PET matrix and PC or copolymers phases were much improved.

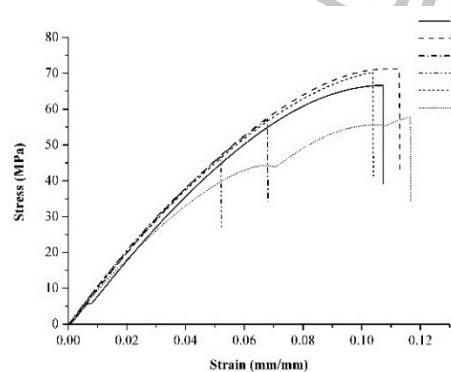


Fig.1. Stress-strain curve show brittle behaviour of RPET and RPET/PC blends adding PMDA of 0.5, 0.7, and 0.9 wt%, and RPET/PC blend adding MDI 0.5 wt%.

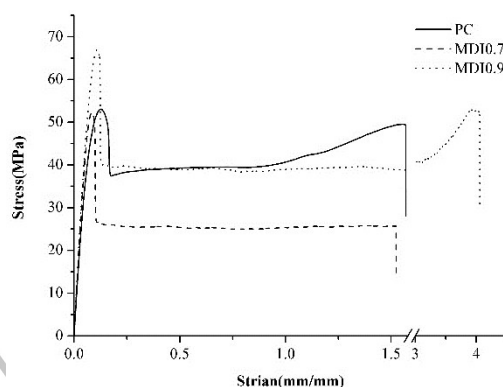


Fig.2. Stress-strain curve show ductile behaviour of neat PC and RPET/PC blend adding MDI of 0.7 and 0.9 wt%.

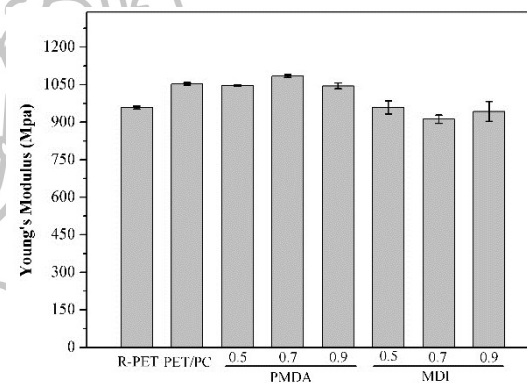


Fig.3. Young's Modulus of RPET, RPET/PC blends as a function of types and chain extender content.

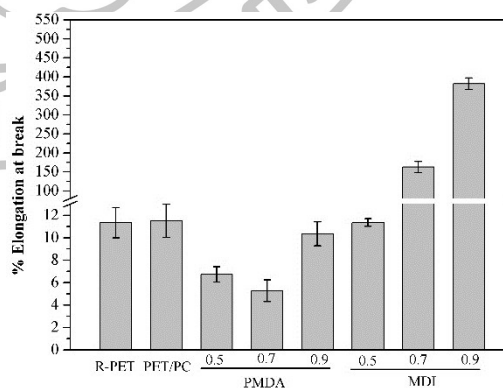


Fig.4. % Elongation at break of RPET, RPET/PC blends as a function of the type and chain extender content.

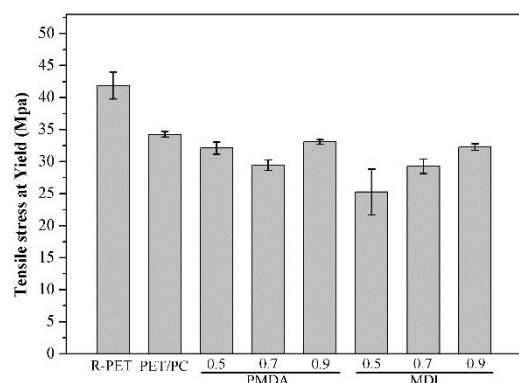


Fig.5. Tensile stress at yield of RPET, RPET/PC blends as a function of types and chain extenders content

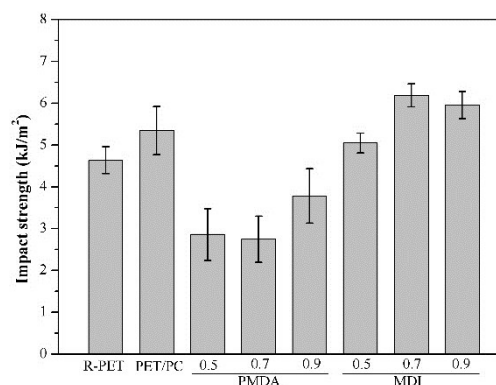


Fig.6. Impact strength of RPET and RPET/PC blends as a function of types and chain extender content.

3.3.2. Impact test

Impact strength is an important property that gives an indication of overall material toughness. The effect of types and chain extenders on impact strength of RPET and RPET/PC with and without chain extenders are shown in Fig.6. Adding ductile PC into RPET increased impact strength from 4.64 kJ/m² to 5.34 kJ/m², which the improvement benefited from partial-miscibility between them from transesterification. For adding PMDA as chain extenders, the impact strength of the blends was lower than the blends without chain extenders. This indicates that the thermal degradation of RPET matrix was dominant despite of miscibility between phases was improved. In contrast, adding MDI of 0.7 and 0.9 wt% increased impact strength of the blends from 4.64 kJ/m² (RPET) to 6.19 and 5.96 kJ/m², respectively. This demonstrates that MDI was more effective than PMDA, in term of acting as chain extender to enhance compatibility and interfacial adhesion between RPET matrix and PC dispersed phases. This introduced stress transfer between the PET matrix and the PC dispersed phases which the PC dispersed phases could dissipate impact energy more effectively. This correlates with the increasing of intrinsic viscosity and MFI as discussion previously.

Conclusions

From the experiment results, it was found that properties of RPET could be improved by blending PC of 20 wt% and using chain extenders to improve miscibility between phases. Adding MDI increased intrinsic viscosity (IV) of the blends to be higher than the blend without any chain extender. This related to *increasing of the molecular weight of RPET by chain extension reaction (coupling between MDI and RPET)*. Reduction of MFI dramatically of the blends adding MDI suggested that the coupling between MDI and RPET and copolymer networks were formed. PMDA did not improve IVs of the blends although improved miscibility of the blends as evident in MFI and DSC results. DSC results indicates that the RPET/PC blends with and without chain extenders were partial miscible. Adding chain extenders caused the shifting of T_g of both RPET and PC phases toward each other indicating better miscibility between phases. Mechanical properties results show that adding MDI in the RPET/PC blends changed polymer blend to become ductile compared to brittle behavior of RPET sample. Their % elongation at break and notched Izod impact strength were increased evidently, while Young's modulus slightly decreased. The most appropriate type and amount of chain extender that produce RPET/PC 80:20 wt% blend to have the best mechanical properties was using MDI of 0.9 wt%.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and

12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Krabi, Thailand, June 11-14, 2015

Industrial Technology, Silpakorn University for financial support and instrument in the research. The National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand is also highly appreciated for helping to fabricate injection molding samples.

References

- [1] Torres, N., J.J. Robin, and B. Boutevin. Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding. *J European Polymer Journal*, 2000. 36: 2075-2080.
- [2] Lei, Y., et al. Phase structure and properties of poly(ethylene terephthalate)/high-density poly ethylene based on recycled materials. *J Journal of Applied Polymer Science*, 2009. 113: 1710-1719.
- [3] De Souza, A.M.C. and C.B. Caldeira. An investigation on recycled PET/PP and recycled PET/PP-EP compatibilized blends: Rheological, morphological, and mechanical properties. *J Journal of Applied Polymer Science*. 132
- [4] Pesetskii, S.S., et al. PET/PC blends: Effect of chain extender and impact strength modifier on their structure and properties. *J Journal of Applied Polymer Science*. 119: 225-234.
- [5] Raffa, P., et al. Chain extension and branching of poly(ethylene terephthalate) (PET) with di- and multifunctional epoxy or isocyanate additives: An experimental and modelling study. *J Reactive and Functional Polymers*. 72: 50-60.
- [6] Sanches, N.B., M.L. Dias, and E.B.A.V. Pacheco. Comparative techniques for molecular weight evaluation of poly (ethylene terephthalate) (PET). *J Polymer Testing*, 2005. 24: 688-693.
- [7] Montaudo, G. Mechanism of Exchange in PBT/PC and PET/PC Blends. Composition of the Copolymer Formed in the Melt Mixing Process. *J Macromolecules*, 1998. 31: 650-661.
- [8] Zhang, Z., Y. Xie, and D. Ma. Relationship between miscibility and chemical structures in reactive blending of poly(bisphenol A carbonate) and poly(ethylene terephthalate). *J European Polymer Journal*, 2001. 37: 1961-1966.
- [9] Tang, X., et al. Reactive extrusion of recycled poly(ethylene terephthalate) with polycarbonate by addition of chain extender. *J Journal of Applied Polymer Science*, 2007. 104: 2602-2607.
- [10] Awaja, F., F. Daver, and E. Kosior. Recycled poly(ethylene terephthalate) chain extension by a reactive extrusion process. *J Polymer Engineering & Science*, 2004. 44: 1579-1587.
- [11] Forsythe, J.S., et al. Rheological properties of high melt strength poly(ethylene terephthalate) formed by reactive extrusion. *J Journal of Applied Polymer Science*, 2006. 100: 3646-3652.



ภาคผนวก ง
การพัฒนาตนเอง

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำภาคการศึกษา..... ปี ใน.....ปีการศึกษา..... 2556.....

ชื่อ นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว) กฤษภรณ์ ลาดโลกวิชัย รหัสประจำตัวนักศึกษา 56402208
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่ 1..... สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

<p>รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ</p>	
<p>การประชุมวิชาการ..... <u>มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ 2556 (Thailand Research Expo 2013)</u>.....</p>	
<p>ระดับ <input checked="" type="checkbox"/> ชาติ <input type="checkbox"/> นานาชาติ</p>	<p>สถานที่..... <u>โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และ หอประชุมคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลพลาซ่า วิลล์</u></p>
<p>วันที่..... <u>25 สิงหาคม 2556</u>.....</p>	
<p>หัวข้อการบรรยาย..... <u>การสลับสีเม็ดแก้ว และ พอลิเมอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในงานระดับพอลิเมอร์</u></p>	
<p>ชื่อสถาบัน..... <u>สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าพระยา</u></p>	
<p>โดย..... <u>นายจิรวิทย์ เต็มใจแก้ว, นายสุวัฒน์ วงศ์วิวัฒน์ไชย, ศาสตราจารย์ ดร.นายแพทย์สุภชัย จิตต์วิวัฒน์</u></p>	
<p>ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้)..... <u>รู้แนวทางการยกระดับอุตสาหกรรม</u> <u>ทั้งด้านผลิตภัณฑ์, กระบวนการผลิต, การผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ และ การดำเนินงานในห่วงโซ่อุปทาน</u> <u>ทั้งในแง่การผลิตตามความต้องการในการแข่งขัน จุดแข็ง คือ วิจัยทางวิจัย และ จุดเด่น ของประเทศไทย</u></p>	
<p>วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก</p>	
<p>..... <u>นายสุวัฒน์ วงศ์วิวัฒน์ไชย</u></p>	
<p>หน่วยงาน..... <u>เลขาธิการ คณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน</u></p>	
<p>ติดต่อ..... <u>udom@bair.gsu.th</u></p>	
<p>ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก</p>	
<p>1)..... <u>อวิสรวิชัย</u></p>	
<p>หน่วยงาน..... <u>สำนักงานพัฒนาธุรกิจและการตลาด</u></p>	
<p>ติดต่อ..... <u>apirarakorn@gmail.com</u></p>	
<p>2)..... <u>นาย ก้าวี่ ศิลาชัยภูมิ</u></p>	
<p>หน่วยงาน..... <u>นักศึกษาชั้นปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรม โขชา สสท.</u></p>	
<p>ติดต่อ..... <u>struc_engineer_ap@windowslive.com</u></p>	

3) คางคก ศรีเทพ

หน่วยงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มสว
 ติดต่อ โทรออก 0 876. 20. 41

งานวิจัยที่สนใจ
ไม้เจิ่วจิศงกรรมสั วรรณะสูง ; ศึกษาการพจนนา ไม้เนื้ออ่อน ไม้ที่มีสมบัติแข็งแรง
เท่าไม้เนื้อแข็ง ทนทานต่อความชื้นของสภาพ และ สามารถแห้งได้เร็วในระยะเวลาสั้นๆ
สามารถนำมาใช้ เป็นวัสดุก่อสร้าง ที่อยู่อาศัย


แนวคิดในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย,
ทนน้ำ เคารบ ไม้เนื้ออ่อน ไม้ที่เปราะบางนำมาทำไม้อัด โดยใช้กาว epoxy เป็นตัว binder
เพื่อให้สมบัติแข็งแรงทนทานเท่าไม้เนื้อแข็ง เพื่อประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง ไม้เนื้ออ่อน

ลงชื่อ กัญจนต์ ฉากโศภน
 (นางสาวกัญจนต์ ฉากโศภน)
 วันที่ 27 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2566

ทรูบรกรรมสั วรรณะสูง ลงชื่อ <u>ดร. ชัยวุฒิ ชัยยศดี</u> (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวุฒิ ชัยยศดี) อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ วันที่ <u>11</u> เดือน <u>พ.ย.</u> พ.ศ. <u>2566</u>	ทวีม ลงชื่อ <u>อนิชา อภิรักษ์</u> (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิชา อภิรักษ์) หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ วันที่ <u>12</u> เดือน <u>พ.ย.</u> พ.ศ. <u>2566</u>
---	---

หมายเหตุ

1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดย นักศึกษาต้องทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาควิชาฯ) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้ง กับนักวิชาการและนักศึกษาที่มีการศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ตามเกณฑ์การสำเร็จ การศึกษาตามหลักสูตร
2. นักศึกษาแบบรูปถ่ายแสดงการทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแนบเอกสาร ลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย



มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ 2556

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

Office of the National Research Council of Thailand (NRCT)

เครือข่ายในระบบวิจัย และ วช. ร่วมเสนอ “วิจัยเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิต เศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน” ในงาน “มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ 2556” (Thailand Research Expo 2013) วันศุกร์ที่ 23 - อังคารที่ 27 สิงหาคม 2556 ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์

คุณ กัลยาณต์ ลากโภาคชัย

โปรแกรมการประชุมที่ท่านลงทะเบียนไว้ มีดังนี้ ↓

วันที่	รอบเช้า (9.00 - 12.00 น.)	รอบบ่าย (13.30 - 16.30 น.)	Twilight Program (18.00 - 20.00 น.)
23 สิงหาคม 2556			
24 สิงหาคม 2556			
25 สิงหาคม 2556	(34) การส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์ต่อการยกระดับของภาคอุตสาหกรรม		
26 สิงหาคม 2556			
27 สิงหาคม 2556			

ภาคเช้า
ลงทะเบียน / รับเอกสาร 7.30-9.00 น.

ภาคบ่าย
ลงทะเบียน / รับเอกสาร 12.30-13.30 น.

Twilight Program
ลงทะเบียน / รับเอกสาร 17.00-18.00 น.

- การเข้าร่วมประชุม - มาเข้าร่วมงานวันแรก แสดงบัตรเข้าร่วมประชุมที่จุดรับเอกสารส่วนกลาง ชั้น 22 เพื่อรับเอกสารส่วนกลาง
แสดงบัตร ณ ห้องประชุมที่ลงทะเบียนไว้
 - มาเข้าร่วมงานวันถัดไป แสดงบัตรเข้าร่วมประชุม ณ ห้องประชุมที่ลงทะเบียนไว้ทุกครั้งที่เข้าร่วมการประชุม
- ต้องประชุมของแต่ละเรื่องได้ที่ Seminar Board บริเวณหน้างาน หรือที่ www.researchexpo.nrct.go.th ก่อนเดินทางมาเข้าร่วมประชุม
- การเข้าร่วมประชุมและนิทรรศการ ไม่เสียค่าลงทะเบียนใดๆทั้งสิ้น โดยท่านจะได้รับเอกสารประกอบการประชุมและอื่นๆ (ถ้ามี) พร้อมอาหารว่าง ณ จุดลงทะเบียนที่ห้องประชุม
- ท่านที่นำรถส่วนตัวมา โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ มีบริการจอดรถฟรี จำนวน 3 ชั่วโมง ภายหลังจากหักค่ามัดจำใช้จ่ายค่าน้ำมันของโรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์


การได้สิทธิ์และรอสิทธิ์การประชุม

- ท่านที่ได้สิทธิ์ในการเข้าร่วมประชุมในวันหรือคืนลงทะเบียนไว้ก่อนลงทะเบียน/รับเอกสาร ในวันอาทิตย์ก่อนลงทะเบียนล่วงหน้า หากต้องประชุมค้างคืนจะมีผู้สนใจเป็นจำนวนมากและท่านลงทะเบียนล่วงหน้า (ช่วงเวลา 9.00 น./13.30 น./18.00 น.) วช. จะใช้สิทธิ์การเข้าร่วมประชุม ผู้รอสิทธิ์ โดยท่านอาจเสียสิทธิ์การเข้าร่วมประชุมเรื่องดังกล่าว
- ท่านต้องลงทะเบียนในวันหรือคืนที่มีผู้สนใจจำนวนมากและต้องรอสิทธิ์ สามารถตรวจสอบสิทธิ์ในการเข้าร่วมประชุมได้ที่จุดประชาสัมพันธ์ บริเวณจุดลงทะเบียนส่วนกลาง (ในกรณีผู้รอสิทธิ์)

เงื่อนไขการใช้บัตร

- คุณนำบัตรเข้าร่วมการประชุมที่สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ส่งได้แก่ท่านนี้ แสดงที่หน้างานทุกครั้งที่ใช้ร่วมการประชุม และนิทรรศการ
- การลงทะเบียนเข้าร่วมงานใช้ระบบคอมพิวเตอร์ กรุณาแสดงบัตรที่ได้ลงทะเบียนที่หน้างานเพื่อลงทะเบียน เพื่อสมทบบัตร ได้ครบถ้วน ระบบคอมพิวเตอร์จะบันทึกข้อมูลการเข้าร่วมประชุมของท่านโดยอัตโนมัติ
- บัตรดังกล่าวเป็นการแสดงสิทธิ์ในการเข้าร่วมการประชุม และถูกผูกเรื่องตามที่ท่านได้แจ้งความประสงค์ไว้
- บัตรนี้เป็นทรัพย์สินของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รองลงมามีสิทธิ์ในการยกเลิก หรือเปลี่ยนแปลง โดยไม่แจ้งให้ทราบล่วงหน้า
- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) จะไม่ออกบัตรใหม่ในกรณีที่บัตรสูญหาย


บัตรเข้าร่วมงาน



Thailand Research Expo 2013

NRCTSSM งานวิจัยแห่งชาติ 2556

คุณ กัลยาณต์ ลากโภาคชัย



1739900288612

เครือข่ายในระบบวิจัย และ วช. ร่วมเสนอ “วิจัยเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิต เศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน”

บัตรสำหรับเข้าร่วมการประชุมและเข้าเยี่ยมชมนิทรรศการ

บัตรนี้เป็นทรัพย์สินของ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) การใช้งานบัตรจะผูกพันกับชื่อท่านและวันลงทะเบียน

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำภาคการศึกษา.....2.....ปีการศึกษา.....2557.....

ชื่อ-นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว) ปิยะภรณ์ ลากโศภนชัย รหัสประจำตัวนักศึกษา 56402204
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโท/เอก ชั้นปีที่ 2 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการ 12 th Eco-Energy and Materials science and Engineering Symposium	
ระดับ <input type="checkbox"/> ชาติ <input checked="" type="checkbox"/> นานาชาติ	สถานที่ <u>Peace Laguna resort & Spa, Ao Nang, Krabi, Thailand</u>
วันที่ <u>11-14 มิถุนายน 2557</u>	
หัวข้อการบรรยาย <u>Poly(vinyl alcohol)/multiwalled carbon nanotubes composite nano fiber</u>	
โดย <u>Jessada Wongon</u>	
ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้) <u>ความรู้เกี่ยวกับเทคนิค electrospinning technique โดยใช้น้ำ MWCNT ที่สังเคราะห์ได้จาก PVA 11% MWCNT มีน้ำหนักแห้ง 2-10wt% และ MWCNT มีน้ำหนักแห้ง 2-10wt% โดยใช้ surfactant (NaDDBS) ผสมกับ ultrasonic energy MWCNT ที่สังเคราะห์ได้ละลายใน PVA solution</u>	
วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก <u>Asst. Prof. Dr. Sorapong Pavasupree</u> หน่วยงาน <u>Rajamangala University of Technology Thanyaburi</u> ติดต่อ <u>Email: sorapongp@yahoo.com</u>	
ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก 1) <u>Dr. Sumenman Niamlang</u> หน่วยงาน <u>Rajamangala University of Technology Thanyaburi, RMUTT, Thailand</u> ติดต่อ <u>Email: tanggggo@hotmail.com</u> , เบอร์ : <u>095-7153790</u> 2) <u>Supawat Kamtip</u> หน่วยงาน <u>Rajamangala University of Technology Thanyaburi, RMUTT, Thailand</u> ติดต่อ <u>Email: krischonme.b@en.rmutt.ac.th</u>	

3) Dr. Kiyooki Ishimoto หน่วยงาน Department of Materials and Metallurgical Engineering, RMUTT, Thailand ติดต่อ 02-549 3480	
งานวิจัยที่สนใจ Mechanical Enhancement of Poly(Butylene Succinate) with Commercial Synthetic Fibers แนวคิดในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ไม่ได้มีการเติม compatibilizer ลงไปเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ ระหว่าง PBS และ shot fiber ทั้ง 2 ชนิด จึงคิดว่าหากได้มีการเติม compatibilizer ลงไป จะสามารถทำให้ PBS และ shot fiber มี interfacial adhesion ที่เพิ่มมากขึ้น ก่อทำให้ คุณสมบัติเชิงกล ของวัสดุ มีความมากขึ้นไปด้วย	
ลงชื่อ วัลลภกานต์ ลามไถทรวิน (นางสาวกัลยกรณัฐ ลามไถทรวิน) วันที่ 22 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2558	
เป็นผลงานของใคร ลงชื่อ อธิศ เพ็ชรสิงห์ (ผศ.ดร. กัญชากานันท์ นงส์ศรีพันธ์) อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ วันที่ 22 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2558	เป็นผลงานของนักศึกษา ลงชื่อ อธิศ เพ็ชรสิงห์ (ผศ.ดร. กัญชากานันท์ นงส์ศรีพันธ์) หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ วันที่ 22 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2558

หมายเหตุ

1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดย นักศึกษาต้องทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาควิชาฯ) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้ง กับนักวิชาการและนักศึกษาที่มีการศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ตามเกณฑ์การสำเร็จ การศึกษาตามหลักสูตร
2. นักศึกษาแนบรูปถ่ายแสดงการทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแนบเอกสาร ลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย

12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium,
Krabi, Thailand, June 11-14, 2015





EMSES 2015

THE 12TH ECO-ENERGY AND MATERIALS SCIENCE
AND ENGINEERING SYMPOSIUM

Presents this certificate of recognition
to

Kanyakarn Lappokachai and Nattakarn Hongsriphan

for paper presentation entitled

**"Effect of Chain Extenders on Mechanical Properties of
Recycled Poly(Ethylene Terephthalate)/Polycarbonate Blend"**

June 11-14, 2015
Krabi, Thailand

Organized by
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand
Kyoto Institute of Technology, Japan
Kyoto University, Japan

Sommai Pivsa-art

Asst. Prof. Sommai Pivsa-Art, Ph.D.
Vice President, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Organizing Chair of EMSES 2015

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำภาคการศึกษา.....1.....ปีการศึกษา.....2558.....

ชื่อ-นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว) ไฉยมณีย์ ลากโกลชัย รหัสประจำตัวนักศึกษา 5402208
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการ <u>Eco Innovation and Solution 2015</u> ระดับ <input checked="" type="checkbox"/> ชาติ <input type="checkbox"/> นานาชาติ สถานที่ <u>ศูนย์นิทรรศการและประชุมไบเทค บางนา</u> วันที่ <u>2 ตุลาคม 2558</u> หัวข้อการบรรยาย <u>สู่งานวิจัยที่เป็นผลงาน</u> โดย <u>นายธีรพล ประสพโชค</u> ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้) <u>การนำผลงานวิจัยไปในการผลิต</u> <u>ความอ่อน สมถะ ทวี ทวี รุ่งเรือง โฉมงาม โสมานกุล พงษ์พานิชย์ และ</u> <u>ฉัตรสุดประภคิน อรรถพรพิชญะ ปัทมาพรวิบูลย์ ของ จ. ลีลาชัย ที่ทำโดยเกิดความคิด</u> <u>แล้วนำมาผ่าน กระบวนการฝึกแบบโปรแกรมแล้ว ได้ทำวิจัยในบริเวณสูง</u>	
วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก <u>นาย สัม ลีลาชัย วุฒิสถา</u> หน่วยงาน <u>บริษัท กิตติพิล จำกัด ผู้ผลิตสารกันการกัดกร่อน เพื่อสิ่งแวดล้อม</u> ติดต่อ <u>company@therm-eng.com</u>	
ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก 1) <u>ศส. วีระชัย สัมพรชัยเจริญ</u> หน่วยงาน <u>สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</u> ติดต่อ <u>info@ttfintj.com</u> 2) <u>กิตติพิล ศรีสมรณ</u> หน่วยงาน <u>Technic and Engineering บริษัท อัสเทรียนไทยคอนกรีตตั้ง 1992 จำกัด</u> ติดต่อ <u>kittipol@etc1992.com</u>	

3) นพ. วานิตา อานามะ

 หน่วยงาน..... ฝ่ายวิจัยและพัฒน์ การนิคมแห่งประทศ ไทย
 ติดต่อ..... tpd.in.th @ gmail.com

งานวิจัยที่สนใจ
 RDF ผลิตภัณฑ์สื่อบิว

 แนวคิดในการพัฒนาต่อจากงานวิจัย
 Refuse Derived Fuel (RDF) ที่นำมาจากพลาสติกที่ไม่ใช่แล้วมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง ที่ส่งผลให้ลดปริมาณ
 และลดต้นทุนการกำจัดขยะ ในเขตชุมชน และ เมืองใหญ่ โดยใช้เทคโนโลยี การรีไซเคิล ใน บริเวณเขตคิด
 ผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหลือใช้ตามกระบวนการทางวิศวกรรม วัตถุประสงค์ สามารถพัฒนาใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ อาทิ
 นำไปทำเชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำ ของระบบผลิตพลังงาน หรือนำไปใช้ร่วมกับเตาเผาขยะเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า
 ร่วมกันเพื่อลดปริมาณขยะในสิ่งแวดล้อมนำไปในแนวทางการวิจัย เพื่อลดมลพิษและ อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม
 สู่ตลาดได้แก่พระ:

ลงชื่อ..... ศาสตราจารย์ วานิตา อานามะ
 (นางสาว วานิตา อานามะ)
 วันที่..... 15..... เดือน..... มิถุนายน..... พ.ศ. 2558

เป็นรองศาสตราจารย์
 ลงชื่อ..... อธิศ นนทชัย
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิศ นนทชัย)
 อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 วันที่..... 15..... เดือน..... กรกฎาคม..... พ.ศ. 2558

เป็นรองศาสตราจารย์
 ลงชื่อ..... อธิศ นนทชัย
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิศ นนทชัย)
 หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
 วันที่..... 15..... เดือน..... กรกฎาคม..... พ.ศ. 2558

- หมายเหตุ
1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดย นักศึกษาต้องทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาควิชา) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้ง กับนักวิชาการและนักศึกษาที่มีการศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ตามเกณฑ์การสำเร็จ การศึกษาตามหลักสูตร
 2. นักศึกษาแนบรูปถ่ายแสดงการทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแนบเอกสาร ลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย

Eco Innovation and Solution 2015



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นางสาวกัลยกานต์ ลาภโกศาชัย
ที่อยู่	92 หมู่ 3 ตำบล ห้วยจรเข้ม อำเภอก เมือง จัหวัง นครปฐม 73000
เบอร์โทรศัพท์	088-8651025
E-mail	Kanyakarn.kung@gmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2556	ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประสบการณ์ฝึกงาน	บริษัท ไบเออร์ไทย จำกัด
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	พ.ศ. 2556 – 2558 ได้รับทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

การนำเสนอผลงานวิจัย

1. Kanyakarn Lappokachai and Nattakarn Hongsrphan. "Effect of Chain Extenders on Mechanical Properties of Recycled Poly(Ethylene Terephthalate) / Polycarbonate Blend." 12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Krabi, Thailand, June 11-14, 2015.