

การเตรียมนาโนคอมพอสิตจากไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากผลผลิต
ไกลโคไลซ์ของขวดพีตใช้แล้ว

นางสาวธนวรรณ ฤทธิชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF NANOCOMPOSITES FROM TITANIUM DIOXIDE AND POLY(ETHYLENE
TEREPHTHALATE) OBTAINED FROM GLYCOLYZED PRODUCTS OF WASTE PET BOTTLES

Miss Thanawan Ritthichai

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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมนาโนคอมพอสิตจากไทเทเนียมไดออกไซด์และ
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวด
เป็ต้าใช้แล้ว

โดย

นางสาวธนวรรณ ฤทธิชัย

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริฉันทน์ เขียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัทนา โอภาประภาสิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

ธนวรรณ ฤทธิชัย : การเตรียมนาโนคอมพอสิตจากไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตที่ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวดPETใช้แล้ว. (PREPARATION OF NANOCOMPOSITES FROM TITANIUM DIOXIDE AND POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) OBTAINED FROM GLYCOLYZED PRODUCTS OF WASTE PET BOTTLES). อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์, 139 หน้า

ขวดPETที่ใช้แล้วสามารถย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตไกลโคไลซ์สามส่วน ได้แก่ ส่วนที่ละลายในน้ำเย็นซึ่งประกอบด้วยมอนอเมอร์ของ บิส-2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต (BHET) ที่มีไดเมอร์ผสมอยู่เล็กน้อย ส่วนที่ละลายน้ำร้อน คือ มอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ของ BHET ผสมอยู่มากขึ้น และส่วนที่ไม่ละลายน้ำเป็นสารประกอบของไตรเมอร์และโอลิโกเมอร์เป็นส่วนใหญ่

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์แต่ละส่วนมาทำปฏิกิริยาอินซิทูพอลิเมอไรเซชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆกัน ณ ที่อุณหภูมิ 280-285 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์พบว่านาโนคอมพอสิตทุกสูตรแสดงการปรากฏของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสและผลึกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แต่ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์ ส่งผลให้ปริมาณผลึกของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลงและทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของนาโนคอมพอสิตมีค่าต่ำกว่าของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้น อันเนื่องมาจากสมบัติการทนความร้อนที่ดีของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น แต่มีความเปราะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมนาโนคอมพอสิตคือ การใช้ผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำและไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.0 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิติ.....

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

.....และเทคโนโลยีสิ่งทอ.....

ปีการศึกษา 2552.....

#5072289323: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
 KEYWORDS: POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)/ WASTE PET BOTTLES / TITANIUM
 DIOXIDE / NANOCOMPOSITES

THANAWAN RITTHICHAJ: PREPARATION OF NANOCOMPOSITES FROM
 TITANIUM DIOXIDE AND POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) OBTAINED
 FROM GLYCOLYZED PRODUCTS OF WASTE PET BOTTLES. THESIS ADVISOR:
 ASSOC. PROF. VIMOLVAN PIMPAN, Ph.D, 139 pp.

Post-consumer PET-bottles were depolymerized by glycolysis at 196°C resulting in glycolyzed products which were divided into 3 fractions. The fraction soluble in cold water consisted of bis-(2-hydroxyethyl)terephthalate (BHET) monomer and a few amount of its dimer. The fraction soluble in hot water has BHET monomer with higher amount of its dimer. The fraction not soluble in water composed of trimer and oligomer of BHET.

Each fraction of the glycolyzed products was then *in situ* polymerized with various amounts of titanium dioxide at 280-285°C. X-ray diffractograms indicated the presences of anatase titanium dioxide and poly(ethylene terephthalate) crystals. However, morphological analysis revealed the agglomeration of titanium dioxide particles which can affect the affected the chain orientation of the polymer. As a result, percent crystallinity of the nanocomposites decreased and caused their melting temperatures to be lower than that of poly(ethylene terephthalate). However, nanocomposites showed higher degradation temperature because of good thermal barrier of titanium dioxide. Mechanical testing showed that when titanium dioxide content increased, hardness increased but the samples were more brittle. The optimum condition used for preparation of nanocomposites was to use non water-soluble fraction of glycolyzed product and 5.0 percent of titanium dioxide.

Department: Materials Science Student's Signature.....

Field of Study: Applied Polymer Science and Advisor's Signature.....
Textile technology.....

Academic Year: 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุติบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธน์วี เจียมศิริเลิศ
รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาศิต และ
รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข ที่เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
3. บุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
7. นิสิตระดับปริญญาโทและเอกทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่คอยให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าอย่างเต็มที่

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในด้านกำลังใจและด้านทุนทรัพย์ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	3
2.1.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	3
2.1.1.1 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยตรง (Direct esterification).....	4
2.1.1.2 ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (Ester interchange).....	5
2.1.2 สมบัติและการนำไปใช้งาน.....	6
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	7
2.3 นาโนคอมพอสิต.....	10
2.4 การรีไซเคิล.....	13
2.4.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ.....	14
2.4.2 การรีไซเคิลทางเคมี.....	16
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 ขั้นตอนงานวิจัย.....	26
3.2 การเตรียมผลผลิตโกลโคไลซ์จากขวดเพ็ตใช้แล้ว.....	27
3.2.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	27
3.2.2 อุปกรณ์.....	27

3.2.3 วิธีการทดลอง.....	27
3.3 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตจาก ผลผลิตไกลโคไลต์.....	30
3.3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	30
3.3.2 อุปกรณ์.....	30
3.3.3 วิธีการทดลอง.....	30
3.4 การหาลักษณะเฉพาะและสมบัติทางความร้อนของผลผลิตไกลโคไลต์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต.....	31
3.4.1 การหาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุล.....	31
3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี.....	32
3.4.3 การหาอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเกิดผลึกและเปอร์เซ็นต์ผลึก.....	33
3.4.4 การหาอุณหภูมิการสลายตัว.....	34
3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	35
3.6 การศึกษาโครงสร้างผลึก.....	36
3.7 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต.....	37
3.7.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	37
3.7.2 อุปกรณ์.....	37
3.7.3 วิธีการทดลอง.....	37
3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและ นาโนคอมพอสิต.....	39
3.8.1 การทดสอบความทนแรงกระแทก.....	39
3.8.2 การทดสอบความแข็ง.....	40
3.9 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์.....	41
3.9.1 สารเคมี.....	41

บทที่

3.9.2	วิธีการทดลอง.....	41
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
4.1	องค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์จากขวดเปิดใช้แล้ว.....	42
4.1.1	ลักษณะของผลผลิตไกลโคไลซ์.....	42
4.1.2	ชนิด ปริมาณและโครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบผลผลิต ไกลโคไลซ์.....	43
4.1.3	น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์.....	45
4.1.4	อุณหภูมิหลอมเหลวขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์.....	47
4.2	ลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต ที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์.....	49
4.2.1	ลักษณะเฉพาะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต.....	50
4.2.2	ฐานฐานวิทยาของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีน- เทเรฟทาเลต และนาโนคอมพอสิต.....	52
4.2.2.1	การศึกษาฐานฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM- EDX.....	52
4.2.2.2	การศึกษาฐานฐานวิทยาด้วยเทคนิค TEM.....	55
4.2.3	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต.....	56
4.2.4	โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และนาโนคอมพอสิต.....	59
4.2.5	สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและ นาโนคอมพอสิต.....	60
4.2.5.1	อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกของ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และนาโนคอมพอสิต.....	60
4.2.5.2	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และนาโนคอมพอสิต.....	67
4.2.6	สมบัติเชิงกล.....	70

บทที่	
4.2.6.1 การทดสอบแรงกระแทก.....	70
4.2.6.2 ค่าความแข็ง	73
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	139

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง

ตารางที่ 4.1	ตำแหน่งของพิกสำคัญที่พบในสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ และขวดเพ็ด	44
ตารางที่ 4.2	น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์	46
ตารางที่ 4.3	อุณหภูมิหลอมเหลวของผลผลิตไกลโคไลซ์	48
ตารางที่ 4.4	ซีเอสยูตรพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต	50
ตารางที่ 4.5	ลักษณะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต	51
ตารางที่ 4.6	ปริมาณของธาตุในจุดที่ทำการทดสอบ EDX	55
ตารางที่ 4.7	อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึกและสมบัติทางความร้อนของ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต	60
ตารางที่ 4.8	ดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ต้อน้ำหนัก 2.16 kg	62
ตารางที่ 4.9	ดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อุณหภูมิ 245°C และ ต้อน้ำหนัก 1.0 kg	62
ตารางที่ 4.10	ดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อุณหภูมิ 240°C และ ต้อน้ำหนัก 1.0 kg	63
ตารางที่ 4.11	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต	67
ตารางที่ 4.12	ความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต	74

สารบัญภาพ

หน้า

รูป		
รูปที่ 2.1	แสดงโครงสร้างทางเคมีของเพ็ต	3
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง (direct esterification) ระหว่างเอทิลีนไกลคอล (EG) กับกรดเทเรฟทาเลอิก (TPA)	4
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ BHET	5
รูปที่ 2.4	ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลตกับเอทิลีนไกลคอล	6
รูปที่ 2.5	ไทเทเนียมไดออกไซด์ผลึกแบบรูไทล์และอะนาทาส	8
รูปที่ 2.6	วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตร	11
รูปที่ 2.7	ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของเพ็ต	17
รูปที่ 2.8	ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิส	18
รูปที่ 2.9	ปฏิกิริยาอัลคาไลน์ดีคอมโพสิชัน	19
รูปที่ 2.10	ปฏิกิริยาไกลโคลิซิส	20
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนในการรีไซเคิลขวดเพ็ตใช้แล้วเป็นแผ่นพลาสติก	26
รูปที่ 3.2	เครื่องบดละเอียด (pulverizer) รุ่น T 15	29
รูปที่ 3.3	อุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสของขวดเพ็ต	29
รูปที่ 3.4	อุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต	31
รูปที่ 3.5	เจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี ของ Waters รุ่น 600	32
รูปที่ 3.6	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700	33
รูปที่ 3.7	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงคาลอริมิเตอร์ของ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC	34
รูปที่ 3.8	เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851°	34
รูปที่ 3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-6480LV	35
รูปที่ 3.10	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน รุ่น JEOL JEM-2010	36
รูปที่ 3.11	เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ รุ่น D8 Discover	36
รูปที่ 3.12	เครื่องอัดเข้าแบบของ Lab Tech Engineering รุ่น LP-S-50	37
รูปที่ 3.13	เครื่องตัดชิ้นงาน	38

รูป	
รูปที่ 3.14 เครื่องบดชิ้นงาน.....	38
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกรุ่น GT-7045-MDH.....	40
รูปที่ 3.16 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 (Type Izod).....	40
รูปที่ 3.17 เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด shore D รุ่น GS-701N Teclock.....	41
รูปที่ 4.1 ขวดน้ำดื่มพีซีใช้แล้วที่ถูกบดด้วยเครื่องพัลเวอไรเซอร์.....	42
รูปที่ 4.2 ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคไลซิสของขวดพีซี.....	42
รูปที่ 4.3 ลักษณะขององค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ (ก) ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ข) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และ (ค) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ.....	43
รูปที่ 4.4 สเปกตราเปรียบเทียบกับระหว่าง (ก) ขวดพีซี และ (ข) ผลผลิตไกลโคไลซ์ ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ค) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และ (ง) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ.....	44
รูปที่ 4.5 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ (ก) ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ข) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และ (ค) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ.....	46
รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ (ก) ส่วนที่ละลายในน้ำเย็น (ข) ส่วนที่ละลายในน้ำร้อน และ (ค) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ.....	47
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM แสดงสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กำลังขยาย (ก) 5,000 เท่า (ข) 10,000 เท่า (ค) 50,000 เท่า และ (ง) 50,000 เท่า.....	52
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A ที่กำลังขยาย (ก) 5,000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า นาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ที่กำลังขยาย (ง) 5,000 (จ) 10,000 และ (ฉ) 50,000 เท่า.....	53
รูปที่ 4.9 ภาพ SEM-EDX แสดงสัณฐานวิทยา ของนาโนคอมพอสิต PET A 5.0 (ก) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) สเปกตรัมแสดงธาตุที่ปรากฏ ณ จุดที่ทำการทดสอบ.....	54
รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ที่ (ก) 200 นาโนเมตร และ (ข) 20 นาโนเมตร.....	55

รูป		
รูปที่ 4.11	สเปกตรวของ (ก) ผลผลิตไกลโคไลซ์ (ข) ขวดเพ็ด (ค) เม็ดเพ็ดทางการค้า (ง) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และ (จ) นาโนคอมพอลสิต PET A 5.0	56
รูปที่ 4.12	สเปกตรวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A (ข) PET B (ค) PET C (ง) PET AB และ (จ) PET ABC	57
รูปที่ 4.13	สเปกตรวของ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ข) PET A นาโนคอมพอลสิต (ค) PET A 0.5 (ง) PET A 1.0 (จ) PET A 3.0 และ (ฉ) PET A 5.0	58
รูปที่ 4.14	เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) PET B (ข) PET B 0.5 (ค) PET B 5.0 (ง) PET A 5.0 (จ) PET C 5.0 และ (ฉ) ไทเทเนียมไดออกไซด์	59
รูปที่ 4.15	DSC เทอร์โมแกรมของ (ก) ขวดเพ็ด (ข) เม็ดเพ็ดทางการค้า (ค) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และ (ง) นาโนคอมพอลสิต PET A 5.0	61
รูปที่ 4.16	DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A (ข) PET B (ค) PET C (ง) PET AB และ (จ) PET ABC	64
รูปที่ 4.17	DSC เทอร์โมแกรมของ (ก) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A (ข) นาโนคอมพอลสิต PET A 0.5 (ค) PET A 1.0 (ง) PET A 3.0 และ (จ) PET A 5.0	65
รูปที่ 4.18	DSC เทอร์โมแกรมของ (ก) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A (ข) นาโนคอมพอลสิต PET A 0.5 (ค) PET A 1.0 (ง) PET A 3.0 และ (จ) PET A 5.0	65
รูปที่ 4.19	TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A (ข) PET B (ค) PET C (ง) PET AB และ (จ) PET ABC	68
รูปที่ 4.20	TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A นาโนคอมพอลสิต (ข) PET A 0.5 (ค) PET A 1.0 (ง) PET A 3.0 และ (จ) PET A 5.0	69
รูปที่ 4.21	ชิ้นงานที่แตกหัก PET AB 5.0	70

รูป

- รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์
ที่ปรับปรุงพื้นผิว และด้วยกรดสเดียริก (ค) นาโนคอมพอสิต PET C 1.0 ST.....71
- รูปที่ 4.23 รูปถ่าย SEM แสดงสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิว
ที่กำลังขยาย (ก) 5,000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า และ
นาโนคอมพอสิต PET C 1.0 ST ที่กำลังขยาย (ง) 5,000 (จ) 10,000 และ
(ฉ) 50,000 เท่า.....72
- รูปที่ 4.24 ชิ้นงานที่แตกหักหลังจากการทดสอบแรงกระแทกของ (ก) พอลิเอทิลีน
เทเรฟทาเลต PET C (ข) นาโนคอมพอสิต PET C 1.0 และ (ค) PET C 1.0 ST.....73

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบัน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [poly(ethylene terephthalate)] หรือ เพ็ท (PET) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติ เช่น โลหะ และ แก้ว ในงานบรรจุภัณฑ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีความใส น้ำหนักเบา ป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊สต่างๆ ได้ดี ขึ้นรูปง่าย แข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อนในธรรมชาติ และไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ แต่อย่างไรก็ดี พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต มีความสามารถในการสลายตัวในธรรมชาติต่ำ จึงทำให้เกิดปัญหาการเพิ่มปริมาณของขยะพลาสติกชนิดนี้มากขึ้น และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีต่างๆ เช่น การนำไปฝัง หรือ เผา ซึ่งส่งผลให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น เช่น เกิดแก๊สเรือนกระจก หรือมีการปลดปล่อยสารเติมแต่งพลาสติกลงสู่ดินและแหล่งน้ำ ดังนั้น การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ หรือการรีไซเคิล (recycling) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการกำจัดขยะอีกทางหนึ่ง

การรีไซเคิล หรือการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่นับได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีบทบาทต่อการลดขยะพลาสติกอย่างมากในปัจจุบัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางกายภาพและการรีไซเคิลทางเคมี โดยการรีไซเคิลทางกายภาพเป็นนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นวัตถุดิบโดยนำไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดิม หรือผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณวัตถุดิบบริสุทธิ์ที่ใช้ในการผลิต ส่วนการรีไซเคิลทางเคมีนั้นเป็นการอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการทำให้พลาสติกกลายเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ และสามารถนำไปใช้ต่อได้ ดังเช่นในกรณีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถนำมาผ่านปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น ไกลโคลิซิส (glycolysis) เมทาโนลิซิส (methanolysis) ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) แอมโมโนลิซิส (aminolysis) เป็นต้น ซึ่งแต่ละปฏิกิริยาจะได้มอนอเมอร์และ/หรือสารโมเลกุลเล็กๆ ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือสารอื่นๆ ต่อไปได้

งานวิจัยที่ผ่านมา [1] ได้มีการใช้ปฏิกิริยาไกลโคลิซิสในการย่อยสลายขวดเพ็ทที่ใช้แล้วให้ได้เป็นผลผลิตไกลโคไลซ์ ซึ่งประกอบด้วยบิส-2-ไฮดรอกซี-เอทิลเทเรฟทาเลต [bis(2-hydroxy

ethyl terephthalate), BHET] และโพลิโกเมอร์ แล้วนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยไม่ต้องใช้ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดเทเรฟทาเลตกับเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ นับเป็นการประหยัดทรัพยากรและพลังงานในการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบเดิมอีกด้วย อย่างไรก็ตาม สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ยังคงต้องได้รับการปรับปรุง ซึ่งวิธีการหนึ่งที่มีแนวโน้มนำมาประยุกต์ได้คือ การผสมอนุภาคนาโนเมตรในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์เพื่อเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิต โดยอนุภาคนาโนเมตรที่นิยมใช้ได้แก่ เช่น ซิลิกา ไทเทเนียมไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมนาโนคอมพอสิต ได้แก่ การทำให้อนุภาคกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เทคนิคการผสมแบบโซล-เจล กระบวนการผสมแบบหลอม พอลิเมอร์โรเซชันแบบอินซิทู เป็นต้น

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเตรียมนาโนคอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตซึ่งสังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวดPETที่ใช้แล้ว โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ซึ่งนอกจากจะช่วยเสริมสมบัติเชิงกลแล้ว ยังช่วยเพิ่มสมบัติการทนความร้อนได้ โดยในการเตรียมใช้วิธีอินซิทูพอลิเมอร์โรเซชัน และปรับเปลี่ยนปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ทั้งนี้เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบทั้งสอง โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างทางเคมี สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

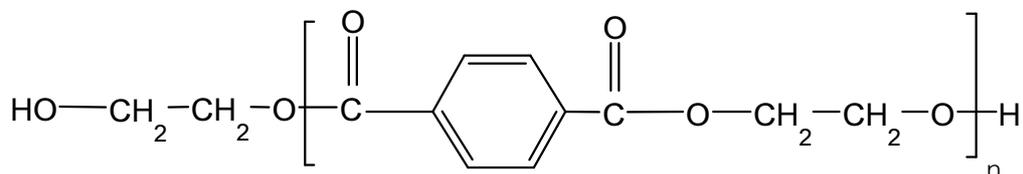
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [Poly(ethylene terephthalate)] จัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านบรรจุภัณฑ์ ด้วยสมบัติเด่น 5 ประการ ได้แก่

- 1) มีความทนทานต่อแรงกระแทกและการตกกระแทบสูง จึงไม่แตกง่ายเหมือนแก้ว
- 2) มีความใส เหมาะกับการทำบรรจุภัณฑ์
- 3) มีน้ำหนักเบา เพียงหนึ่งในสิบของขวดแก้ว ทำให้ประหยัด และ ลดภาระในการขนส่ง
- 4) สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันสูงได้
- 5) ปลอดภัยต่ออาหารที่สัมผัส และไม่ทำให้รสชาติอาหารเสียไป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

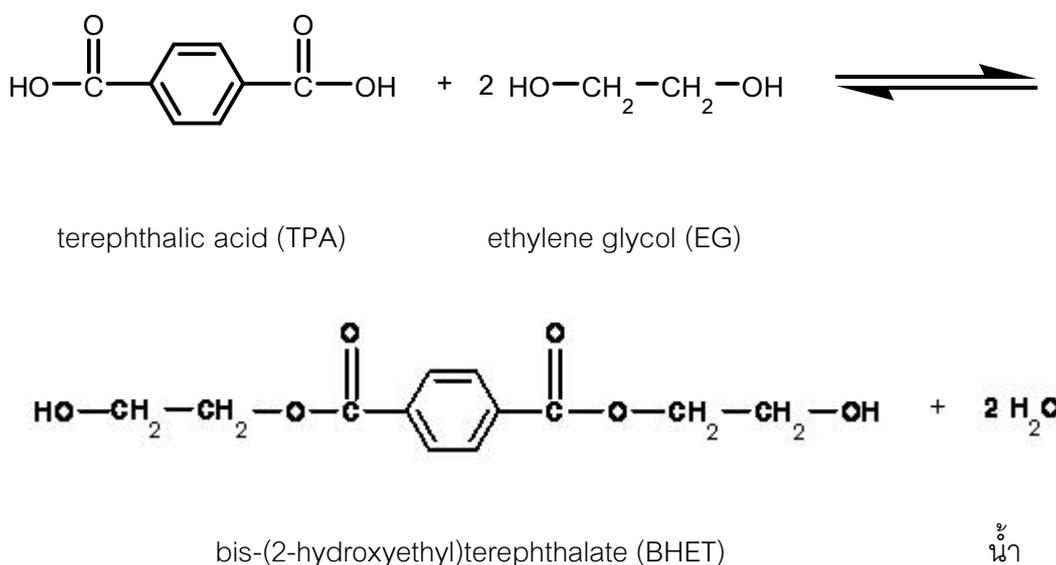
2.1.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) แบ่งโดยอาศัยชนิดของปฏิกิริยาได้เป็น 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยตรง (direct esterification) และ ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) [2]

2.1.1.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง (Direct esterification)

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

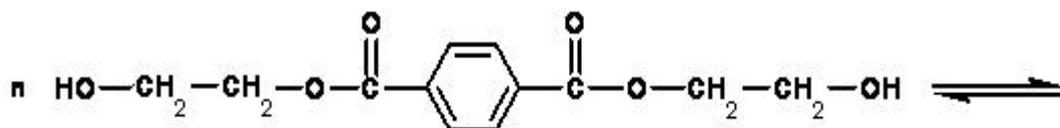
1. การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง (direct esterification) ระหว่างเอทิลีนไกลคอล (EG) กับกรดเทเรฟทาเลติก (TPA) โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คือ บิส-2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต [bis-(2-hydroxyethyl) terephthalate; BHET] และมีน้ำเป็นผลพลอยได้ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



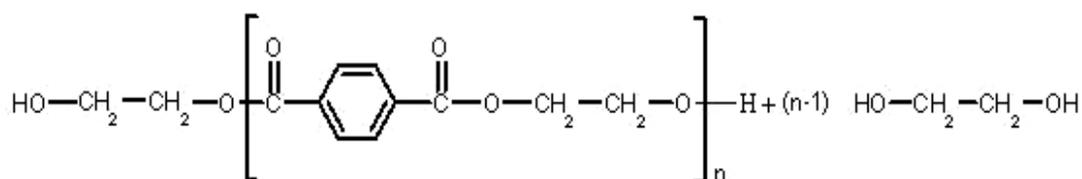
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรงระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับกรดเทเรฟทาเลติก

น้ำซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาต้องถูกกำจัดออกไป เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ และใช้เอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากที่สุด

2. การให้ความร้อนกับ BHET จากขั้นตอนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 270-285 องศาเซลเซียส ให้ความดันประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นนี้ คือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเอทิลีนไกลคอล ดังต่อไปนี้



bis-(2-hydroxyethyl)terephthalate (BHET)



poly(ethylene terephthalate) (PET)

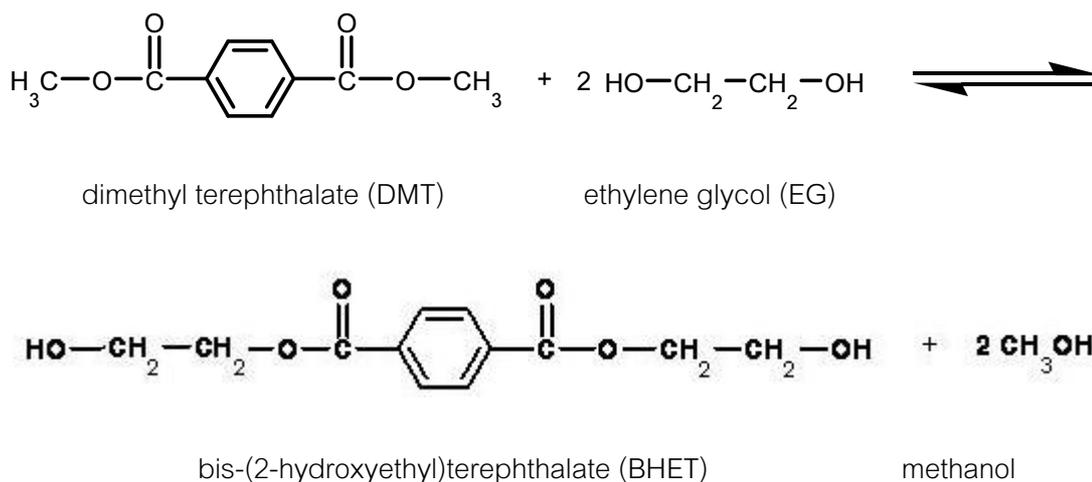
ethylene glycol (EG)

รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ BHET

2.1.1.2 ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (Ester interchange)

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) ระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate; DMT) กับเอทิลีนไกลคอล ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คือ บิส-2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต [bis-(2-hydroxyethyl) terephthalate; BHET] และมีเมทานอลเป็นผลพลอยได้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลตกับเอทิลีนไกลคอล

เมทานอลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาต้องถูกกำจัดออกไป เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ และใช้เอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากที่สุด

2. ปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 นี้ดำเนินไปเช่นเดียวกับที่แสดงในรูปที่ 2.3

แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ จึงต้องมีการกำจัดเอทิลีนไกลคอลออกจากระบบอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสม คือ ตัวเร่งแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ เช่น สารประกอบแอสซีเตตของแมกนีเซียมสังกะสี แคลเซียม โคบอลต์ หรือ แมงกานีส ร่วมกับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เช่น แอนติโมนีออกไซด์ สารประกอบดีบุก หรือ ไทเทเนียม เป็นต้น

2.1.2 สมบัติและการนำไปใช้งาน

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature; T_m) อยู่ที่ 250-265 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (glass transition temperature; T_g) อยู่ที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส มีความเป็นฉนวนได้ดีที่อุณหภูมิห้อง สมบัติการละลายของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหากมีความเป็นผลึกสูงสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ให้โปรตอนที่อุณหภูมิห้อง เช่น กรดแอสติกที่ถูกแทนที่ด้วยคลอรีนหรือฟลูออรีน ฟีนอล และกรดไฮโดรฟลูออริกที่

ปราศจากน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงสามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น แอโรแมติก คีโตน ไดบิวทิลฟทาเลต และไดบิวทิลซัลโฟน เป็นต้น ถ้ามีความเป็นอสัณฐาน สามารถละลายได้ในคลอโรฟอร์ม สามารถย่อยสลายได้ด้วยกรดดินประสิว และกรดกำมะถันเข้มข้น ว่องไวกับด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตยังมีความต้านทานแสงที่ดีอีกด้วย [3]

ในด้านการใช้งาน นิยมนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไปใช้งานในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่

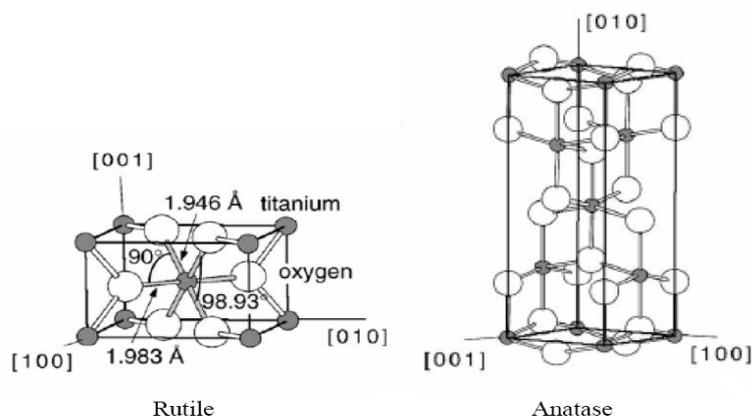
1. อุตสาหกรรมพลาสติก เช่น ของเด็กเล่น ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์
2. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ขวดใส่ยา และสารเคมี
3. อุตสาหกรรมฟิล์ม เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เทปบันทึกเสียง
4. อุตสาหกรรมเส้นใยสิ่งทอ เช่น ผ้าพอลิเอสเตอร์ ผ้าพอลิเอสเตอร์ผสมฝ้าย (T/C)

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) หรือ ไทเทเนีย (Titania) มีสูตรโมเลกุล คือ TiO_2 ลักษณะโดยทั่วไปมีสีขาว ทึบแสง ไม่มีกลิ่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ในธรรมชาติมักมีสารปนเปื้อน จึงต้องผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อให้บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารสีที่ปลอดภัย ไม่ใช่สารที่อยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็ง สารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ สารที่ทำให้ตัวอ่อนในครรภ์เกิดความผิดปกติ หรือสารที่มีพิษ จึงนำมาใช้งานได้หลายผลิตภัณฑ์ เช่น สีทาบ้าน อาหารและเครื่องสำอาง

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลึก 3 แบบด้วยกัน ได้แก่ บรูไคต์ อะนาเทสและรูไทล์ บรูไคต์เป็นผลึกแบบอโรโทรมบิก ซึ่งไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องจึงไม่นิยมนำมาใช้งาน ผลึกแบบอะนาเทสและรูไทล์เป็นผลึกแบบเตตระกอนอล ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยผลึกแบบอะนาเทสมีพลังงานระหว่างชั้นสูงกว่าผลึกแบบรูไทล์จึงมีความสามารถทางเคมีแสงสูงจัดเป็นสารกึ่งตัวนำและเป็นสารโฟโตคะตะลิสต์ (photocatalyst) ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต สามารถทำให้พอลิเมอร์หรือสารตกค้างเกิดการสลายตัวได้ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ผลึกแบบอะนาเทสสามารถเปลี่ยน

รูปแบบของผลึกเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ส่วนผลึกแบบรูไทล์มีลักษณะพิเศษหลายอย่าง เช่น สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจนถึงแสงขาวได้ มีดัชนีการหักเหแสงสูง [4]



รูปที่ 2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ผลึกแบบรูไทล์และอะนาทาส [3]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีบทบาทมากในปัจจุบัน ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร ซึ่งความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในการผลิตทำให้สามารถทำแรงแม่เหล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรได้ โดยประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคขนาดนาโนเมตร [4] ได้แก่

1. ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถฆ่าและช่วยในการย่อยสลายแบคทีเรีย ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้ สารพิษที่เกิดจากเซลล์แบคทีเรียจะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโซน 1.5 เท่า

2. ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น อนุภาคไฮดรอกซีที่เกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (volatile organic compounds หรือ

VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตราย หรือส่งผลต่อร่างกายมนุษย์ได้ นอกจากนี้ ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ ตัวอย่างเช่น กลิ่นบูหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภท ฟอรั่มัลดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ยูเรีย กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ โทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้อากาศสะอาดจากควัน เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัส รวมถึงแก๊สอันตราย

3. ความสามารถในการฟอกอากาศ โทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ควันบูหรี รวมถึงสารระเหยต่าง ๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่าง ๆ ที่เกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น แก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และแก๊สเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งทางตรงและทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงในบริเวณที่มีมลภาวะสูง โทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

4. สามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำ และคราบต่าง ๆ รวมทั้งทำให้เกิดสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทาด้วยโทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้ผนังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง โทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่าง ๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง ทำให้สามารถชะล้างออกจากผนังได้ง่ายเมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

5. ความสามารถในการทำน้ำสะอาด โทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัสในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วย

แสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้

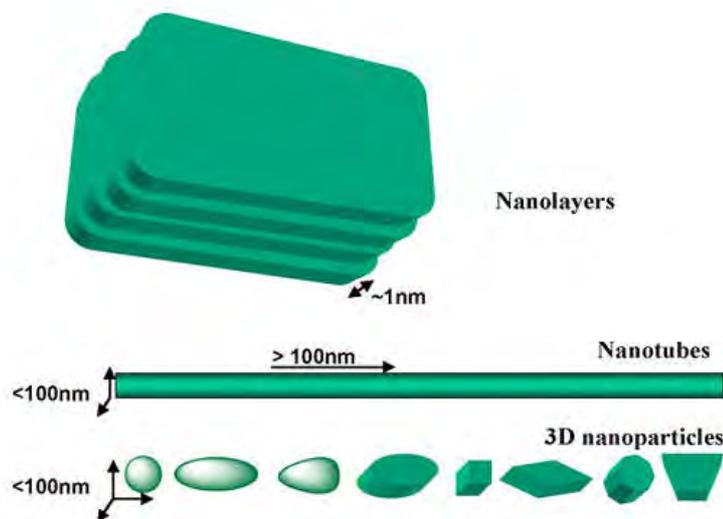
ในขณะเดียวกันมีการศึกษาพบว่าอนุภาคขนาดเล็กของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบอะนาเทสก่อให้เกิดโรคได้ เมื่อขนาดอนุภาคเล็กความเป็นพิษก็ยิ่งมากขึ้น โดยขนาด 70 นาโนเมตรสามารถแทรกผ่านถุงลมในปอดได้ ขนาด 50 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านเซลล์ได้ และขนาด 30 นาโนเมตร สามารถแทรกเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลางได้

2.3 นาโนคอมพอสิต

นาโนคอมพอสิต(nanocomposites) [5] คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีสารเสริมแรงเป็นสารที่มีขนาดระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มสมบัติอย่างน้อยในหนึ่งทิศทางของอนุภาคที่กระจายอยู่ในวัสดุ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยอาศัยรูปร่างของวัสดุนาโนนั้น ได้แก่ อนุภาคขนาดนาโน ท่อนาโน และนาโนเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

วัสดุนาโน สามารถช่วยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตแบบทั่วไป ทั้งในด้านความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานต่อสารเคมี และลดความสามารถในการติดไฟ เป็นต้น นาโนคอมพอสิตที่ได้รับความนิยมและพัฒนากันอย่างหลากหลายในปัจจุบัน คือ พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเป็นวัสดุที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยการเติมสารที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งสารดังกล่าวทำหน้าที่เสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ เพราะจะเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงให้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.6 วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตร [5]

ในต่างประเทศ นาโนเทคโนโลยีได้รับการพัฒนาและถ่ายทอดสู่อุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น จีน เกาหลี และอีกหลายประเทศในยุโรป ได้แก่ เยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลี เป็นต้น โดยเน้นการนำไปใช้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ ในปีค.ศ. 2004 บริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของโลกต่างประกาศว่าจะนำชิ้นส่วนที่ผลิตจากพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตมาใช้ในรถยนต์ เชื่อว่าในอนาคตสามารถผลิตรถยนต์ทั้งคันที่ทำจากนาโนคอมพอสิตได้ ซึ่งมีความปลอดภัยสูง โดยเฉพาะจากไฟไหม้ ระเบิด ความสูญเสีย โดยทนความร้อนสูงขึ้น และลดการลามไฟ

2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์ ได้แก่ ชิ้นส่วนที่ต้องทนน้ำและต้านการซึมผ่านของแก๊ส เช่น สายสวน และชิ้นส่วนลิ้นหัวใจเทียม

3. ผลิตภัณฑ์สำหรับอาหารและยา ได้แก่ फिल्मป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน และแก๊สต่างๆ และขวดน้ำอัดลม

สำหรับในประเทศไทย การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตมีแนวโน้มการประยุกต์ในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่

1. อุตสาหกรรมยานยนต์ ได้แก่ ชิ้นส่วนรถยนต์
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์ ได้แก่ สารคอมพอลิเมอร์ สายยางหรือท่อต่างๆ
3. ผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติในคอมพอลิเมอร์ ได้แก่ ปะเก็นล้อรถ ให้ความทนทาน
แก้ปัญหายางเสื่อมสภาพเร็ว
4. ผลิตภัณฑ์กีฬา ได้แก่ ลูกบอล ลูกเทนนิส
5. อุตสาหกรรมเกษตร ได้แก่ พลาสติกเกษตร พลาสติกห่อผัก ผลไม้ พลาสติกเลี้ยงต้นอ่อน
6. อุตสาหกรรมเสื้อผ้าและแฟชั่น ได้แก่ เส้นใยนาโนคอมพอลิเมอร์ ให้ความอบอุ่น ย้อม
สีติดได้ดี
7. พลังงานและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ตัวตรวจวัดแก๊สอันตราย บำบัดน้ำเสีย สารอิเล็กทรอนิกส์
ไลต์ในแบตเตอรี่ของแข็ง (solid battery) เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (lithium ion battery)
8. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร ได้แก่ พลาสติกกันแก๊สออกซิเจนซึมผ่าน ลดโอกาสอาหาร
เสื่อมสภาพ เป็นต้น

สำหรับอัตราส่วนในการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรลงไปในเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์นั้น มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาหลายงานด้วยกัน ได้แก่ Giraldi, A.L. และคณะ [6] ได้เตรียมนาโนเคลย์ของมอนต์มอริลโลไนต์กับเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิลโดยใช้เครื่องอัดรีดในอัตราส่วนร้อยละ 2.5 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยปรับเปลี่ยนความเร็วรอบหมุนของสกรูและตรวจสอบพื้นฐานวิทยาศาสตร์และสมบัติเชิงกลของนาโนเคลย์ พบว่าอัตราส่วนที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีที่สุดและชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงสุดคือ ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก

Cheng, W.H. และคณะ [7] ได้เตรียมนาโนคอมพอลิเมอร์ของมอนต์มอริลโลไนต์กับเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 1 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เพื่อศึกษาลักษณะของผลึก พื้นฐานวิทยาศาสตร์และสมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอลิเมอร์ พบว่าอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์และทำให้สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอลิเมอร์ที่ดีที่สุด

Atsushi, T. และ Miko, C. [8] เตรียมนาโนคอมพอสิตของไทเทเนียมไดออกไซด์กับ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตในอัตราส่วนร้อยละ 0.35 และ 2.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนร้อยละ 0.35 โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดปริมาณผลึกมากที่สุด

Han, K. และ Yu, M. [9] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งมีการปรับปรุงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้สารคู่ควบแล้วทำให้กระจายตัวในเอทิลีนไกลคอล จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับกรดเทเรฟทาติก พบว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีการรวมกลุ่มของอนุภาคเล็กน้อยแต่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านรังสีอัลตราไวโอเล็ตของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมากกว่าอนุภาคขนาดไมโครเมตร โดยความต้านทานแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดลด ลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ อนุภาคในระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกอีกด้วย

2.4 การรีไซเคิล

การรีไซเคิลพลาสติกตามความหมายของ ASTM D5033-90 [10] เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือผ่านการใช้งานมาแล้ว มาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. การรีไซเคิลระดับที่ 1 (primary recycling) เป็นการนำเศษขยะพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการผลิตมาผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เดิมหรือใกล้เคียง
2. การรีไซเคิลระดับที่ 2 (secondary recycling) เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบอื่นที่แตกต่างจากการใช้งานครั้งแรก ซึ่งมักพบว่าพลาสติกชนิดอื่นปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก
3. การรีไซเคิลระดับที่ 3 (tertiary recycling) เป็นการนำขยะพลาสติกมาใช้ผลิตสารเคมีพื้นฐานโดยทั่วไป โดยมุ่งเน้นขยะพลาสติกจากแหล่งชุมชนหรือขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยก ซึ่ง

กระบวนการที่ใช้จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นต้น

4. การรีไซเคิลระดับที่ 4 (quaternary recycling) เป็นการนำพลังงานที่ได้จากการเผาขยะพลาสติกมาใช้

การรีไซเคิลพลาสติกสามารถทำได้ทั้งแบบกายภาพและทางเคมี ซึ่งการรีไซเคิลทางกายภาพจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ แต่จำเป็นต้องแยกประเภทและทำความสะอาด ก่อนที่จะนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่ สำหรับการรีไซเคิลทางเคมีจัดเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเปลี่ยนน้ำหนักโมเลกุลสูงให้กลายเป็นสารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมีต่างๆ รวมทั้งพอลิเมอร์หลากหลายประเภทได้อีกด้วย การรีไซเคิลทางเคมีเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องคัดแยกพลาสติกเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีมีความจำเพาะเจาะจงในการเกิดปฏิกิริยากับพลาสติกแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลผลิตที่ได้สามารถนำไปกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกสารโมเลกุลเล็กชนิดต่างๆ ออกจากกัน

2.4.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ

การรีไซเคิลทางกายภาพ [10] เป็นการรีไซเคิลโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ กล่าวคือเป็นการนำขยะพลาสติก ทั้งที่เป็นขยะจากกระบวนการผลิตและจากการบริโภคมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้ง โดยการนำไปบดผสมกับวัตถุดิบบริสุทธิ์หรือไม่ก็ได้ แล้วนำไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดิมหรือผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่อีกครั้ง ซึ่งถือเป็นการรีไซเคิลระดับหนึ่ง และระดับที่สองตามที่จำแนกไว้ใน ASTM D5033-90 ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี การรีไซเคิลทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี วิธีแรกเรียกว่ากระบวนการรีเคลมเมชัน (reclamation process) นั้น ต้องการแยกขยะพลาสติกตามชนิดของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักแล้ว นำไปผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หรือเป็นเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตอื่นๆต่อไป อีกวิธีหนึ่งเป็นการนำขยะพลาสติกซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นขยะผสมไปผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาเลย เรียกวิธีการนี้ว่า กระบวนการจัดการขยะพลาสติกแบบคอมมิงเกิลด์ (Commingled Plastic Waste Processing) การรีไซเคิลทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนิยมใช้การรีไซเคิล

แบบรีไซเคิลมีมากขึ้นมากกว่า เนื่องจากการรีไซเคิลแบบรีไซเคิลมากขึ้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลากหลายมากกว่าและมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า ซึ่งข้อเสียของการรีไซเคิลแบบรีไซเคิลทางกายภาพทั้งสองวิธี คือ สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำรีไซเคิลทางกายภาพมักมีสมบัติด้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ เช่น ในด้านความแข็งแรง เนื่องจากพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์รีไซเคิลนั้นผ่านกระบวนการผลิตและกระบวนการรีไซเคิลมาแล้ว จึงอาจเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนและ/หรือการสลายตัวเชิงกลจากกระบวนการทั้งสองได้ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ลดลงด้วย ซึ่งสมบัติเหล่านี้สามารถปรับปรุงได้ด้วยการเติมสารเติมแต่งที่เหมาะสมลงไป เช่น สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing fillers) เป็นต้น

ในการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ด้วยกระบวนการทางกายภาพนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น

กิตติภูมิ กลัปดี และธีรศักดิ์ สรรพศิริ [11] นำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิล (มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยเทคนิคการบดผสมแบบใหม่เทคนิคนี้ได้ใช้วิธีการบดเม็ดพลาสติกให้มีขนาด 0.11-1.19 มิลลิเมตร แทนการผสมโดยการใส่เครื่องอัดรีด (extruder) มาเป็นการผสมโดยใช้เครื่องฟัลเวอไรเซอร์ (pulverizer) โดยอัตราการใช้ในการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิลที่ใช้ในการวิจัยคือ 10:90 20:80 30:70 40:60 50:50 โดยขึ้นทดสอบเตรียมด้วยการนำพลาสติกที่บดแล้วมาขึ้นรูปด้วยการฉีดและการอัดเข้าแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกผสมมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิล อีกทั้งยังพบว่าดัชนีการไหล มีค่าไหลเพิ่ม เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ HDPE โดยที่อัตราส่วน 20:80 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

Alessandro, P. และ Amabile, P. [12] นำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิลกับเส้นใยแก้วชนิดสั้นเพื่อใช้เป็นตัวเสริมแรงมาผสมกันโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) ด้วยอัตราส่วน 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ผสมกันที่ช่วงอุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาฉีดเข้าแม่แบบเพื่อเตรียมขึ้นทดสอบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า

สมบัติทางกายภาพ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานของการทนแรงดึง มีค่าสูงขึ้นและมีค่ามากขึ้นเมื่อเติมเส้นใยแก้วมากขึ้น

Palovan, S. และ Sergio, P. [13] นำเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.13-0.17 มิลลิเมตร และมีความยาวเฉลี่ย 5 มิลลิเมตร มาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิพรอพิลีนผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องอัดแบบ โดยใช้อัตราส่วนของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิลในการผสมเป็น 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาฉีดเข้าแม่แบบเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ พบว่าเมื่อผสมเส้นใยรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วนเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อเติมเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิล 7 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดึงยืดที่จุดขาดลดลง และดัชนีการไหลมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อเติมเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบรีไซเคิลมากขึ้น และเมื่อตรวจสอบการเกาะติดพบว่าการผสมกันจะไม่เกิดแรงเกาะระหว่างโมเลกุล

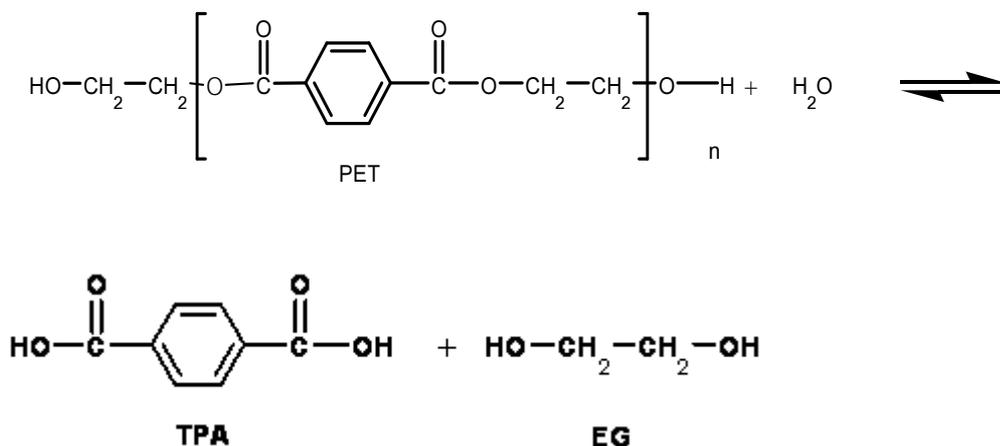
2.4.2 การรีไซเคิลทางเคมี

การรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีนั้นเป็นการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารชนิดอื่น เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่มีความบริสุทธิ์เหมือนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ใหม่ หรือ พอลิเมอร์ชนิดอื่นต่อไป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกันไปตามชนิดของสารย่อยสลาย [10] ดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสเป็นปฏิกิริยาที่ใช้น้ำเป็นสารย่อยสลาย โดยใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิด หรือให้เกิดปฏิกิริยาในภาวะที่ค่อนข้างรุนแรง (ใช้อุณหภูมิและความดันสูง) ซึ่งถ้าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเรียกว่า ปฏิกิริยาแอซิดไฮโดรลิซิส (acid hydrolysis) หรือใช้สารอัลคาไลน์ที่มีฤทธิ์เป็นเบสจะเรียกว่า ปฏิกิริยาอัลคาไลน์ไฮโดรลิซิส (alkali hydrolysis) ซึ่งผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ กรดเทเรฟทาเลกและเอทิลีนไกลคอลดังรูปที่ 2.7 โดยกรดเทเรฟทาเลกที่ได้สามารถทำให้บริสุทธิ์

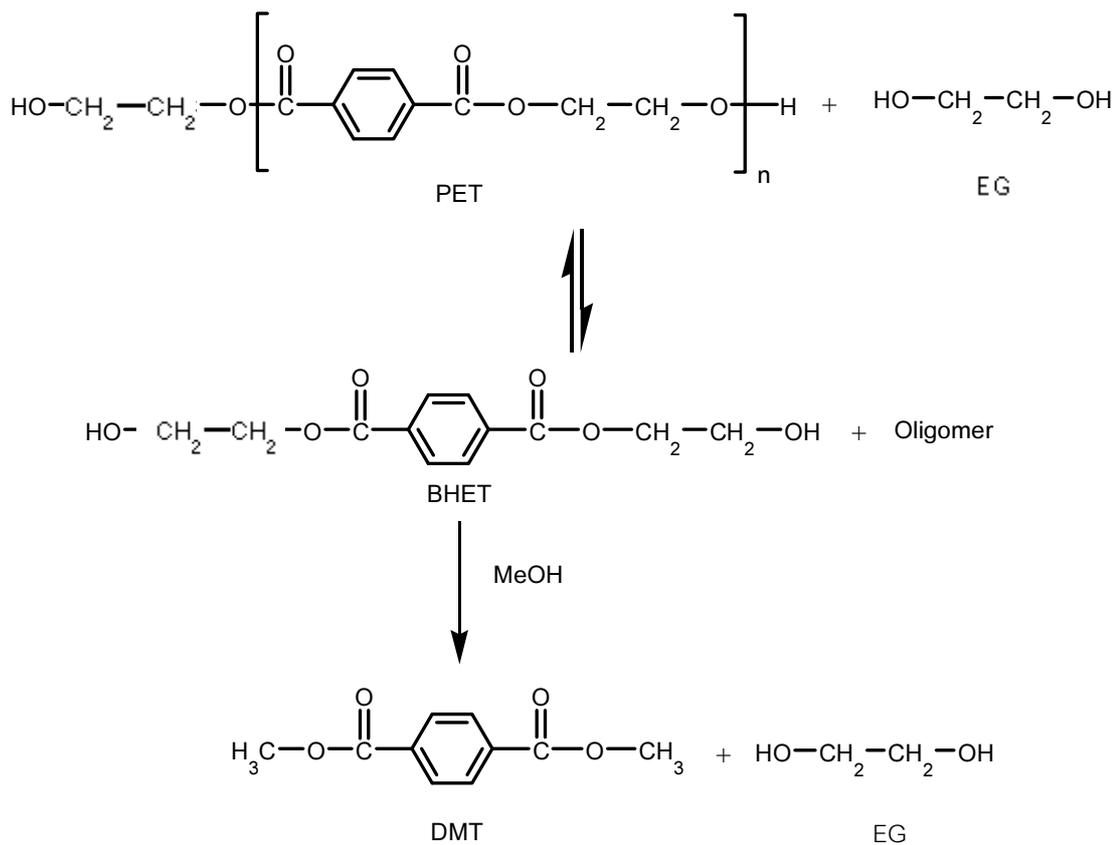
ด้วยการแตกผลึกจากตัวทำละลายและสามารถนำกลับมาใช้เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์ พอลิเมอร์ชนิดอื่นต่อไปได้ แต่ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสมีข้อเสียหลายประการ เช่น ปัญหาเกี่ยวกับการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ภาวะที่รุนแรงในการดำเนินปฏิกิริยา การแยกผลผลิตที่ได้จากเอทิลีนไกลคอล นอกจากนี้ การไฮโดรลิซิสพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่นานมาก



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

2. ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิส (alcoholysis)

การย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิส เป็นการนำแอลกอฮอล์บางชนิดมาใช้เป็นสารย่อยสลายภายใต้ความร้อนและความดัน ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ เมทานอลเป็นสารย่อยสลายจึงมักเรียกปฏิกิริยานี้ว่า เมทาโนลิซิส (methanolysis) ดังรูปที่ 2.8 และผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลตและเอทิลีนไกลคอล แต่เอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาสามารถละลายน้ำได้ดีจึงแยกออกได้ยาก ทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสีย

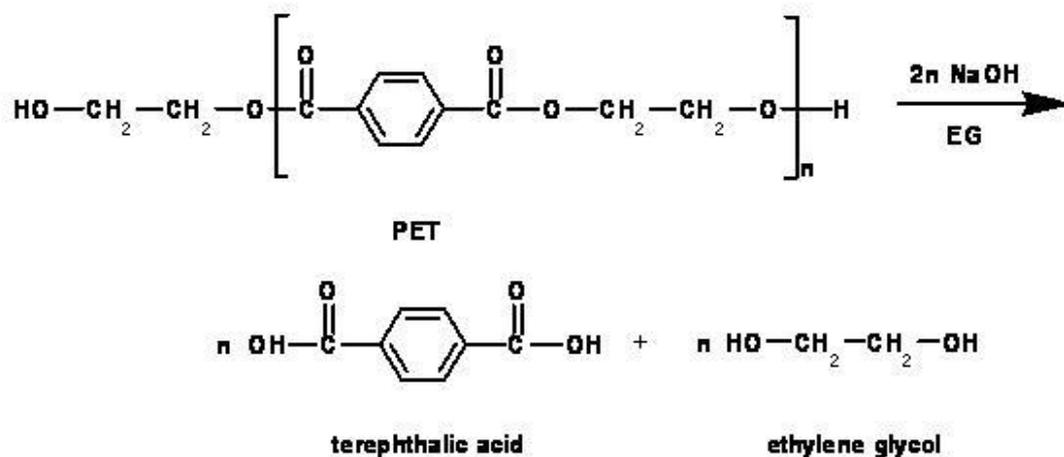


รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

3. ปฏิกิริยาอัลคาไลน์ดีคอมโพสิชัน (alkali decomposition)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูง ข้อดีของปฏิกิริยานี้ คือ สามารถแยกสารผลิตภัณฑ์ออกจากกันได้ง่าย และได้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสูงในระยะเวลาอันสั้น ผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ กรดเทเรฟทาติกและเอทิลีนไกลคอล ดังรูปที่

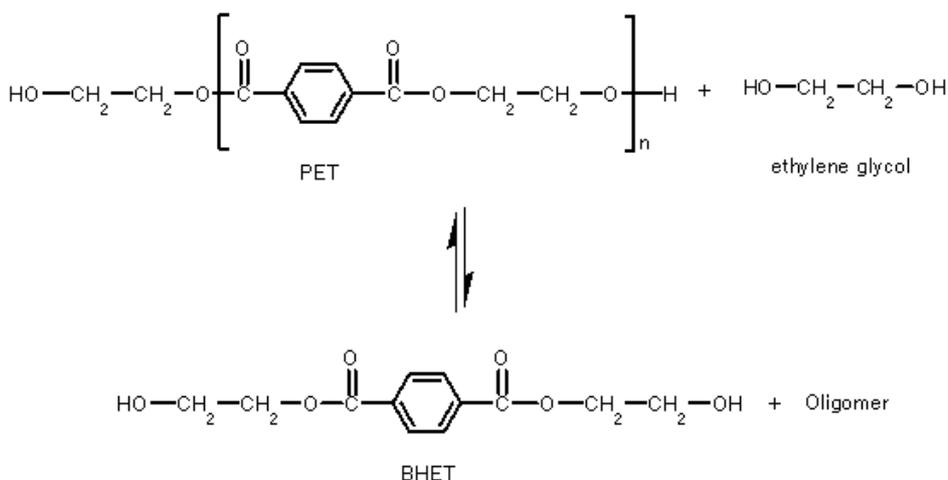
2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาอัลคาไลน์ดีคอมโพสิชันของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

4. ปฏิกิริยาไกลโคไลซิส (glycolysis)

สำหรับปฏิกิริยาไกลโคไลซิสเป็นการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตโดยใช้ไกลคอลที่มากเกินไปเป็นสารย่อยสลาย ตัวอย่างของไกลคอลที่ใช้ เช่น เอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล และไดเอทิลีนไกลคอล และใช้เกลือของโลหะ เช่น ซิงก์แอสซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้อุณหภูมิการย่อยสลายที่ 180-200 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คือ บิส-2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต [bis-(2-hydroxyethyl) terephthalate; BHET] และโพลิโเมอร์ (2-10 mers) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาไกลโคไลซิสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่สำคัญในการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ด้วยกระบวนการทางเคมีอย่างมากมาย เช่น

Shukla, S.R. และ Mathur, M.R. [14] ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ดีคอมโพสิชันของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 2 ชนิด คือ PET และ PBT (polybutylene terephthalate) กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ PET มากกว่า PBT

Ligorati, F. และคณะ [15] ได้ย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่มีขนาด 4-35 เมช ที่อุณหภูมิ 100-300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 ถึง 150 บรรยากาศ โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลที่ได้คือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลตและเอทิลีนไกลคอล

Campanelli, J.R. และคณะ [16] ได้ศึกษาอัตราการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต กับเอทิลีนไกลคอลโดยใช้น้ำที่มากเกินไปที่อุณหภูมิ 250 265 280 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา ขึ้นกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล และหมู่เอสเตอร์ในสายโซ่พอลิเมอร์

Xi, G. และคณะ [17] ได้ศึกษาการดีพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเพื่อให้ได้ BHET โดยใช้ปฏิกิริยาไกลโคไลซิสที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนน้ำหนักของเอทิลีนไกลคอลต่อพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ตั้งแต่ 0.5 ถึง 6 ใช้ซิงก์แอสซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตรา ส่วน

โดยน้ำหนักต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 0-1.5 เปอร์เซ็นต์ และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 1-5 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนไกลคอลต่อพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตที่ใช้มีค่าสูงขึ้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้ได้มอนอเมอร์ออกมาในปริมาณมากขึ้น

Ghaemy, M. และ Mossaddegh, K. [18] ได้ย่อยสลายพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตด้วย เอทิลีนไกลคอลที่อัตราส่วนต่างกัน และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด ได้แก่ ซิงก์แอสีเทต เลดแอสีเทต โคบอลต์แอสีเทต และ แมงกานีสแอสีเทต เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 1 จนถึง 10 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 198 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตต่อเอทิลีนไกลคอลมีค่าสูงขึ้น ปริมาณ BHET มีค่ามากขึ้นและคงที่ที่ อัตราส่วนโดยโมลประมาณ 1/8.5 นอกจากนี้พบว่า เมื่อใช้เวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณซิงก์แอสีเทต 1 เปอร์เซ็นต์ ได้ปริมาณ BHET มากที่สุดคือ 75 เปอร์เซ็นต์

Ikladios, N.E. และคณะ [19] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไกลโคไลซิสของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ด้วยโพรพิลีนไกลคอลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตต่อโพรพิลีนไกลคอล ต่างๆ กันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และใช้ซิงก์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำผลผลิต ไกลโคไลซ์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมทรี (Mass Spectrometry; MS) อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy; IR) และเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (Gel Permeation Chromatography; GPC) พบว่าผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้ประกอบด้วยไดเมอร์ และไตรเมอร์ของ BHET เป็นส่วนใหญ่ และไม่พบมอนอเมอร์ โดยอัตราส่วนระหว่างไดเมอร์กับไตรเมอร์ สูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโพรพิลีนไกลคอลเป็น 40-60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้เกิดการ ดีพอลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น

Chen, J.W. และ Chen, L.W. [20] ได้ย่อยสลายพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตด้วยเอทิลีนไกลคอล ที่ปริมาณมากเกินพอและใช้ซิงก์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลามากกว่า 8 ชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้จากการย่อยสลายส่วนใหญ่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ไดเมอร์ และไตรเมอร์

Baliga, S. และ Wong, W.T. [21] ได้ศึกษาการย่อยสลายขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้สารย่อยสลายคือเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโลหะแอสซีเทต 4 ชนิด ได้แก่ ซิงก์แอสซีเทต โคบอลต์แอสซีเทต แมงกานีสแอสซีเทต และเลดแอสซีเทต เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลที่ได้จากปฏิกิริยาสวนใหญ่ประกอบด้วย BHET (มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์) และ ไดเมอร์ จากการศึกษานี้พบโอลิโกเมอร์ขนาดใหญ่ของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต อยู่เลย นอกจากนี้พบว่าซิงก์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด

Kao, C.Y. และคณะ [22] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตด้วยวิธีไกลโคไลซิส ซึ่งใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารย่อยสลาย โดยศึกษาจากการทดสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry; DSC) และได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิด คือ โคบอลต์แอสซีเทต คูปริกแอสซีเทต แมงกานีสแอสซีเทต โซเดียมแอสซีเทต และซิงก์แอสซีเทต พบว่าซิงก์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด เพราะสามารถทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ขาดออกจากกัน และยังทำให้ได้โอลิโกเมอร์ที่มีขนาดเล็ก ช่วยให้อัตราการเกิดดีพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

สำหรับผลที่ได้จากการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตด้วยปฏิกิริยาเหล่านี้ สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Pimpan, V. และคณะ [23] นำขวดที่ทำจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า ขวดเพ็ต ทั้งขวดน้ำดื่มและน้ำอัดลมที่ผ่านการใช้งานแล้วมาย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้ไกลคอลที่มากเกินพอเป็นสารย่อยสลาย ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล (EG) โพรพิลีนไกลคอล (PG) ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) ในภาวะที่มีซิงก์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และนำไปผสมกับสไตรีนมอนอเมอร์ตามลำดับ เพื่อเตรียมเป็นพอลิเอสเตอร์เรซินไม่อิ่มตัว หรือ ยูพีอีเรซิน (unsaturated polyester (UPE) resin) ซึ่งสามารถทำให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องด้วยการเติมเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide, MEKPO) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่ม และโคบอลต์ออกโทเอต (cobalt octoate) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชนิดของไกลคอลที่ใช้ในการย่อยสลายขวดเพ็ตมีผลต่อคุณลักษณะและสมบัติยูพีอีเรซินที่ได้

Thavornsetawet, T. และคณะ [24] นำขบวนการที่ใช่แล้วมารีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาฝนเอทิลีนไกลคอลที่ปราศจากน้ำ ณ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิลคือ กรดเทเรฟ- แทลิกที่มีความบริสุทธิ์ 92 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำกรดเทเรฟแทลิกที่ได้มาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิชั่นโดยตรงกับ 2-เอทิล-1-เฮกซานอล ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ไดออกทิลเทเรฟแทเลตหรือดีไอพี (dioctyl terephthalate, DOP) ซึ่งเป็นของเหลวใส สีเหลืองอ่อน มีความถ่วงจำเพาะ 0.936 ดัชนีหักเห 1.472 และค่าของกรด 0.0044 มิลลิกรัมของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ซึ่งพบว่าดีไอพีที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้พลาสติกไซเบอร์สำหรับพีวีซีได้เช่นเดียวกับไดออกทิลฟแทเลตหรือดีไอพี (dioctyl terephthalate, DOP)

Saravari, O. และคณะ [25] ได้นำขบวนการที่ใช่แล้ว มาย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสโดยใช้โพพริลีนไกลคอล (PG) เป็นสารย่อยสลาย ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขบวนการต่อ PG เป็น 37.5:62.5 ในภาวะที่มีซิงก์แอสซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้นำมาปฏิกิริยากับน้ำมันถั่วเหลืองและโพลูอินไดไอโซไซยาเนต (toluene diisocyanate, TDI) เพื่อสังเคราะห์เป็นน้ำมันยูรีเทน (urethane oil) น้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นของเหลวความหนืดต่ำ มีสีเหลือง ซึ่งฟิล์มจากน้ำมันยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้มีความยืดหยุ่นและความทนทานต่อการขีดขีดที่ต่ำกว่าฟิล์มจากน้ำมันยูรีเทนทางการค้า

อีกแนวทางหนึ่งคือ การนำขบวนการที่ใช่แล้วมาย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารย่อยสลาย ในภาวะที่มีซิงก์แอสซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีส่วนประกอบของ BHET และโพลิโกลิเมอร์ ซึ่งสามารถนำกลับมาผลิตเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟแทเลตบริสุทธิ์ได้อีกครั้ง

Tomita, K. [26] ทำปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน BHET ด้วยการปั่นด้วยรอบ 60,120 รอบต่อนาที และ ใช้ซิงก์แอสซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในอัตราส่วน 0.0001 โมล/โมล BHET ทำในระบบเปิดและระบบบรรยากาศไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ 283 องศาเซลเซียส พบว่าการทำปฏิกิริยาในบรรยากาศไนโตรเจนด้วยรอบการหมุน 120 รอบ/นาที พอลิเมอร์ที่ได้จะมีความหนืดมากกว่าและ

มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าการหมุน 60 รอบ/นาที และการทำปฏิกิริยาในระบบเปิดและในบรรยากาศไนโตรเจนไม่ส่งต่อความหนืดของพอลิเมอร์ที่ได้

พิพัฒน์ จันทิวาเจริญ [1] ได้ย่อยสลายขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารย่อยสลาย และซิงก์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนน้ำหนักของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ต่อพอลิเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1 ต่อ 5 โดยมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั่วโมง พบว่าผลผลิตไกลโคไลซ์ประกอบด้วย มอนอเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์ และเตตระเมอร์ของ BHET และเมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์เฉพาะส่วน BHET และไดเมอร์ของ BHET ของทุกสูตรมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างผลผลิตไกลโคไลซ์ต่อซิงก์แอสซีเทตเท่ากับ 1 ต่อ 0.0002 เป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 280 ± 5 องศาเซลเซียส จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนพบว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์สูงกว่า มีอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการสลายตัว ความทนแรงดัดโค้งและความทนแรงกระแทกที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์ต่ำกว่า แต่ชิ้นงานที่ได้มีความเปราะและความแข็งแรงต่ำ

อย่างไรก็ตาม จากงานของพิพัฒน์ จันทิวาเจริญ จะเห็นได้ว่า สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ยังต้องได้รับการปรับปรุง ซึ่งวิธีการหนึ่งที่มีแนวโน้มนำมาประยุกต์ได้ คือ การผสมอนุภาคนาโนเมตรในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์เพื่อเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิต ตัวอย่างของอนุภาค เช่น ซิลิกา ไทเทเนียมไดออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์ โดยสิ่งที่สำคัญในการเตรียมนาโนคอมพอสิตคือ จะต้องทำให้สารเหล่านี้มีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอในเนื้อของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ รูปร่างของสารเสริมแรงยังมีผลต่อเสถียรภาพทางขนาดของชิ้นงาน ทิศทางของการเสริมแรงอีกด้วย ดังนั้น ในการเตรียมนาโนคอมพอสิตที่ต้องการความแข็งแรงทุกทิศทางควรเลือกอนุภาคที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนาเท่ากับหนึ่ง โดยอนุภาคน่าสนใจได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์

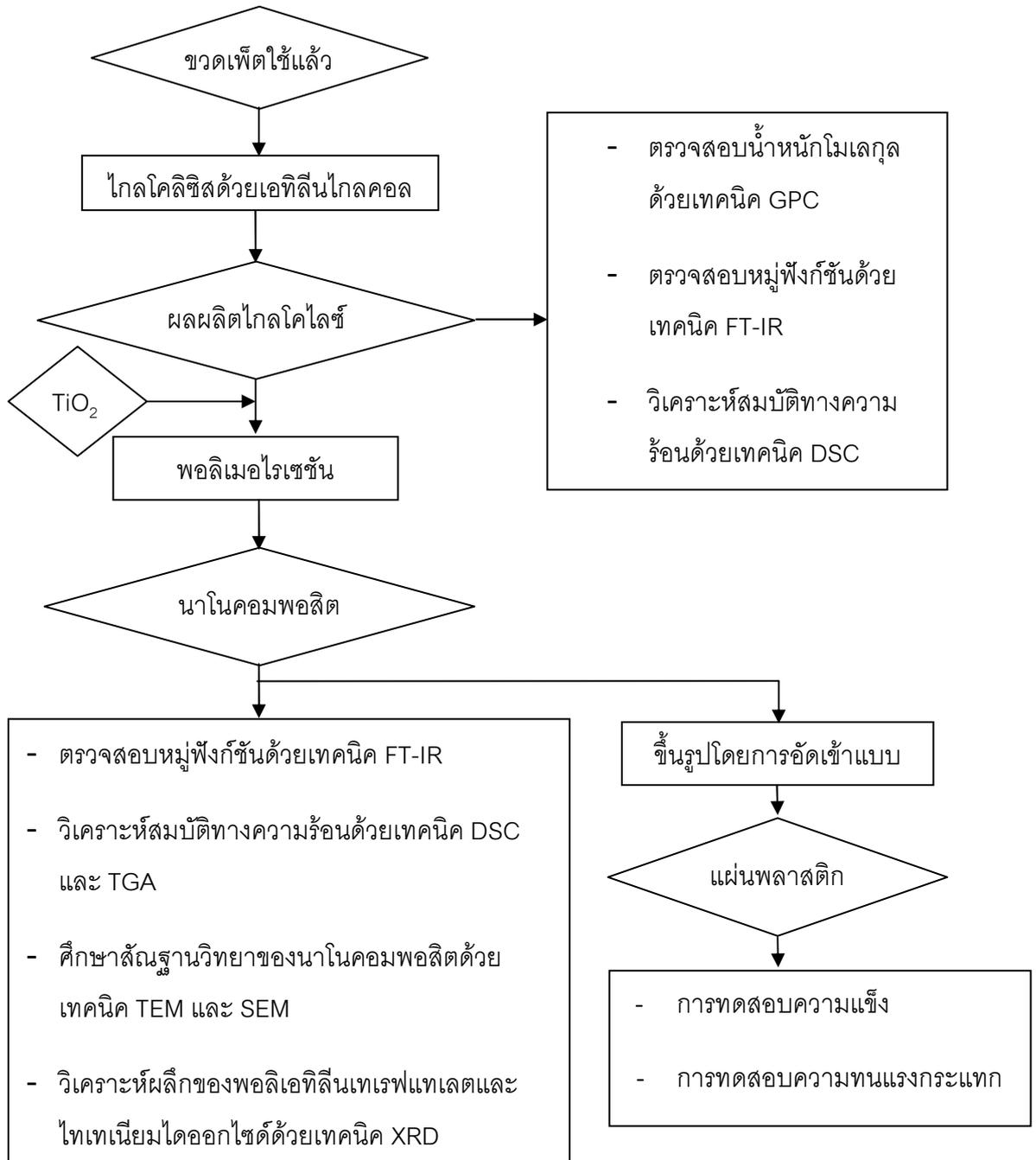
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการเตรียมนาโนคอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตซึ่งสังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวดพีซีที่ใช้แล้ว โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารตัวเติม

ชนิดเสริมแรง เพื่อเสริมสมบัติเชิงกลและเพิ่มสมบัติการทนความร้อนได้ โดยในการเตรียมนั้นใช้วิธี อินทิพูพอลิเมอร์โรเซชัน และปรับเปลี่ยนปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ทั้งนี้เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบทั้งสอง โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างทางเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนงานวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการรีไซเคิลขวดเพ็ดใช้แล้วเป็นแผ่นพลาสติก

3.2 การเตรียมผลผลิตไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว

3.2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. ขวดน้ำดื่มเพ็ตที่ใช้แล้วของบริษัท Nestlé
2. เอทิลีนไกลคอล เกรดสำหรับการทำปฏิบัติการของบริษัท Ajax Finechem จำกัด
3. ซิงก์แอซีเตต เกรดสำหรับการทำปฏิบัติการของบริษัท Ajax Finechem จำกัด

3.2.2 อุปกรณ์

1. เครื่องบดละเอียด (pulverizer) รุ่น T 15
2. เครื่องกวนชนิดปรับรอบได้พร้อมแท่งเหล็กกวนแบบห่วงโซ่
3. ฮีตติงแมนเทิล (heating mantle) ขนาด 500 มิลลิลิตร
4. ขวดก้นกลม 4 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
5. ข้อต่อรูปตัววาย
6. เทอร์โมมิเตอร์ (0-300 องศาเซลเซียส)
7. เครื่องควบแน่นแบบกลับไหลกลับ (reflux condenser)
8. ท่อนำแก๊สไนโตรเจนและข้อต่อกับท่อนำแก๊ส

3.2.3 วิธีการทดลอง [1]

1. ตัดและบดขวดน้ำดื่มให้เป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องบดละเอียด รุ่น T 15 ดังแสดงในรูปที่ 3.2
2. นำขวดน้ำดื่มที่บดละเอียดและเอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของขวดเพ็ตต่อเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 1 ต่อ 5 และซิงก์แอซีเตตปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักขวดเพ็ตใส่ในขวดก้นกลม 4 คอ ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องกวน เทอร์โมมิเตอร์ เครื่องควบแน่น และท่อนำแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3. ให้ความร้อนกับของผสมจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 196 ± 2 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 30 นาที โดยใช้ฮีตติงแมนเทิล พร้อมทั้งกวนของผสมตลอดเวลาด้วยอัตราเร็ว 600 รอบ/นาที ภายในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จากนั้นให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายดำเนินไปภายใต้ภาวะดังกล่าว เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงหยุดให้ความร้อน และปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

4. นำผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้นำมาละลายน้ำกลั่นเย็นอุณหภูมิห้องประมาณ 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำมากรอง นำส่วนที่ไม่ละลายน้ำมาละลายซ้ำในน้ำกลั่นเย็นและนำมากรอง ทำเช่นนี้สามครั้ง นำส่วนที่ละลายน้ำกลั่นเย็น แช่ในตู้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนที่ละลายน้ำตกตะกอน จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยกส่วนที่ตกตะกอนออก แล้วนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง

5. นำส่วนที่ไม่ละลายน้ำกลั่นเย็นมาละลายในน้ำกลั่นร้อนอุณหภูมิ 80° องศาเซลเซียส จากนั้นนำมากรอง นำส่วนที่ละลายในน้ำกลั่นร้อนแช่ตู้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนที่ละลายในน้ำกลั่นร้อนตกตะกอน จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยกส่วนที่ตกตะกอนออก แล้วนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบประมาณ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง

6. นำส่วนที่ไม่ละลายในน้ำกลั่นร้อนไปอบ เพื่อไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง

7. นำแต่ละส่วนที่แยกได้และอบไล่ความชื้นจนแห้งมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาสัดส่วนของแต่ละส่วน

หมายเหตุ : * เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ไม่ทำให้ส่วนผสมของขวดละลายออกมาเจือปนกับผลผลิตไกลโคไลซ์



รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียด (pulverizer) รุ่น T 15



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยาโกลโคลิซิสของชาวเพ็ด

3.3 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตจากผลผลิตไกลโคไลซ์

3.3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. ผลผลิตไกลโคไลซ์
2. ซิงก์แอซีเทต เกรดสำหรับการทำปฏิบัติการของบริษัท Ajax Finechem จำกัด
3. ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ของบริษัท Aerosil

3.3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องกวนชนิดปรับรอบได้พร้อมแท่งเหล็กกวนแบบห่วงโซ่
2. ฮีตติงแมนเทิล ขนาด 500 มิลลิลิตร
3. ขวดก้นกลม 4 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
4. เทอร์โมมิเตอร์ (0-360 องศาเซลเซียส)
5. เครื่องควบแน่นแบบกลั่นไหลกลับ
6. ท่อนำแก๊สไนโตรเจน
7. ชุดตักน้ำ
8. ปีมุดอากาศพร้อมชุดปรับ

3.3.3 วิธีการทดลอง [1]

1. นำผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากการย่อยสลายขูดพืชอัตราส่วน 1 โมลต่อ 0.0002 โมลของซิงก์แอซีเทต และไทเทเนียมไดออกไซด์ใส่ลงในขวดก้นกลม 4 คอ ซึ่งต่อกับเครื่องกวนเทอร์โมมิเตอร์ ชุดตักน้ำ เครื่องควบแน่น ท่อนำแก๊สไนโตรเจน และ ปีมุดอากาศ ดังแสดงในรูปที่

3.4

2. ให้ความร้อนแก่สารผสมเพื่อให้ผลผลิตไกลโคไลซ์หลอมเหลว โดยทำให้หลอมเหลวภายในเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มความร้อนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 280 ± 5 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกวนของผสมตลอดเวลาด้วยอัตราการกวน 120 รอบต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และให้อุณหภูมิของสารผสมคงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาภายใต้การลดความดันบรรยากาศต่ออีก 30 นาที

3. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากขวดและทิ้งไว้ให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

3.4 การหาลักษณะเฉพาะและสมบัติทางความร้อนของผลผลิตไกลโคไลซ์ พอลิเอทิลีน-เทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

3.4.1 การหาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุล

เป็นการหาน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ โดยเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี ของ Waters รุ่น Waters 600 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยวิธีการวัดค่าดัชนีหักเห (refractive index) ซึ่งตัววัด (detector) จะพลอตผลการวิเคราะห์ออกมาในรูปของกราฟที่เรียกว่าโครมาโทแกรม (chromatogram) และคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลพร้อมทั้งการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล เปรียบเทียบกับโครมาโทแกรมอ้างอิง (Reference chromatogram) ที่ได้จากพอลิสไตรีนมาตรฐาน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 745-395,980 โดยชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 15 มิลลิกรัม แล้วนำไปละลายในเตตระไฮโดรฟิวแรน (tetrahydrofuran; THF) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นจึงนำสารละลายตัวอย่างกรองเอาฝุ่นละอองออก โดยใช้กระดาษกรองที่มีความละเอียด 45 ไมครอน จากนั้นจึงนำสารตัวอย่างปริมาตร 50 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี และใช้

เตตระไฮโดรฟิวแรน เป็นเฟสเคลื่อนที่ ประมวลผลด้วยโปรแกรม Empower ใช้เวลาทดสอบ 40 นาที



รูปที่ 3.5 เจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟ ของ Waters รุ่น 600

3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี

นำผลผลิตไกลโคไลซ์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตไปวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ของ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยนำสารตัวอย่างมาบดกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ให้เป็นชั้นทดสอบ จากนั้นนำมาหาแถบการดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งสามารถบอกถึงโครงสร้างทางเคมีของสารได้ โดยตรวจสอบในช่วง $4000-400 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.6 พูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ของ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700

3.4.3 การหาอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเกิดผลึกและเปอร์เซ็นต์ผลึก

เป็นการหาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ผลึก (X) ของผลผลิตไกลโคไลซ์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ของ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยนำสารตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 3-10 มิลลิกรัม ใส่ในแพนอลูมิเนียมเปล่าเป็นสารอ้างอิง สำหรับผลผลิตไกลโคไลซ์ใช้ภาวะในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ 50 ถึง 180 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่วนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตใช้ภาวะในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ 50 ถึง 280 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยปริมาณผลึกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

$$\% X = (\Delta H_f / \Delta H_f^\circ) \times 100 \quad 3.1$$

โดย X คือ ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์

ΔH_f คือ เอนทาลปีของพอลิเมอร์

ΔH_f° คือ เอนทาลปีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีโครงสร้างผลึกอย่างสมบูรณ์

มีค่าเท่ากับ 119.8 J/g [8]



รูปที่ 3.7 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ ของ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC

3.4.4 การหาอุณหภูมิการสลายตัว

เป็นการหาอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851^o ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยนำสารตัวอย่างที่มีน้ำหนักประมาณ 3-10 มิลลิกรัม ใส่ในถาดอุณหภูมิ ใช้ภาวะในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ 50 ถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สออกซิเจน



รูปที่ 3.8 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851^o

3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา

เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิตโดยนำชิ้นงานนาโนคอมพอสิตมาเคลือบด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าแล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-6480LV และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy disperse X-ray analysis, EDX)



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-6480LV

การศึกษาสัณฐานวิทยาอีกวิธีหนึ่งคือ นำชิ้นงานนาโนคอมพอสิตมาตัดเป็นชิ้นบางแล้ววางบนกริดทองแดง แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) รุ่น JEOL JEM-2010 ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน รุ่น JEOL JEM-2010

3.6 การศึกษาโครงสร้างผลึก

เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดย บดละเอียดเป็นผง บรรจุลงในเพลทนำเข้าเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์รุ่น D8 Discover ดังแสดงใน รูปที่ 3.11 นำข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่ 2θ เท่ากับ 10 ถึง 70 องศาและผลการวิเคราะห์แสดงเป็นกราฟ



รูปที่ 3.11 เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ รุ่น D8 Discover

3.7 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

3.7.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
2. นาโนคอมพอสิตสูตรต่างๆ

3.7.2 อุปกรณ์

1. เครื่องอัดเข้าแบบ (Compression molding) ของ Lab tech engineering รุ่น LP-S-50

2. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ
3. เครื่องบากชิ้นงาน

3.7.3 วิธีการทดลอง

1. นำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตมาขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยใช้เครื่องอัดเข้าแบบ ของ Lab Tech Engineering รุ่น LP-S-50 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที (ช่วงเตรียมการให้ความร้อนเพื่อหลอมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 3 นาที ช่วงอัดความเพื่อดันเข้ารูป 2 นาที และช่วงลดอุณหภูมิลง 15 นาที)
2. ตัดแผ่นพลาสติกเป็นชิ้นงานต่างๆ ด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ บากชิ้นงานด้วยเครื่องบากชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 3.12 เครื่องอัดเข้าแบบของ Lab Tech Engineering รุ่น LP-S-50



รูปที่ 3.13 เครื่องตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 เครื่องบากชิ้นงาน

3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอม-พอสิต

3.8.1 การทดสอบความทนแรงกระแทก

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่อง Impact Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เลือกวิธีการทดสอบแบบ Izod test โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาดความกว้าง 10.0 มิลลิเมตร และความหนา 3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.16 วางชิ้นทดสอบในแนวตั้งฉากและยึดที่ปลายเพียงด้านเดียว โดยตำแหน่งของรอยบากจะถูกหันเข้าหาด้านที่ตุ้มน้ำหนักตกกระทบ เมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนักลงมาตามแรงโน้มถ่วงตุ้มน้ำหนักจะตกกระทบตรงกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ จากนั้นอ่านค่าพลังงานที่ได้และนำไปบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าความทนแรงกระแทกตามสมการที่ 3.2

$$\text{Impact Strength} = W / bd \quad 3.2$$

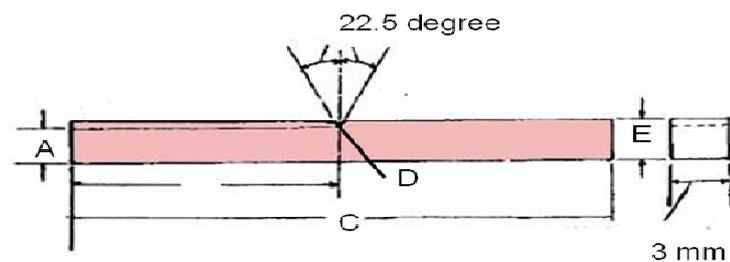
โดยที่ W คือ พลังงาน, จูล (J)
 B คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบตรงบริเวณรอยบาก, มิลลิเมตร (mm)
 d คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ, มิลลิเมตร (mm)

โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกรุ่น GT-7045-MDH



A: 10.16 ± 0.05 มม. B: ค่าสูงสุด 32.00, ค่าต่ำสุด 31.10

C: ค่าสูงสุด 63.50 มม. ค่าต่ำสุด 53.50 มม. D: 0.25 ± 0.05 มม. E: 12.70 ± 0.15 มม.

รูปที่ 3.16 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 (Type Izod)

3.8.2 การทดสอบความแข็ง

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด shore D รุ่น GS-701N Teclock มีลักษณะหัวกดบอล ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นเครื่องวัดความแข็งของแผ่นพลาสติกที่มีความหนามากกว่า 3 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบควรมีพื้นที่มากพอที่จะทำให้หัวกด (indenter) กดห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร และต้องวัดความแข็งอย่างน้อย 6 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งควรห่างกันอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร โดยกดเครื่องดูโรมิเตอร์ลงบนชิ้นทดสอบให้ด้านล่างของดูโรมิเตอร์แนบชิดกับผิวของชิ้นทดสอบมากที่สุด แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.17 เครื่องดูโรมิเตอร์ ชนิด shore D รุ่น GS-701N Teclock

3.9 การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

3.9.1 สารเคมี

1. กรดสเตียริก เกรดปฏิบัติการของบริษัท Fluka
2. แอซีโตน เกรดทางการค้าของบริษัท RCI Lab Scan
3. ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ของบริษัท Aerosil

3.9.2 วิธีการทดลอง [27]

1. ใช้กรดสเตียริก 0.01 โมล ละลายในแอซีโตน 120 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
2. ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.01 โมล ละลายในแอซีโตน 20 มิลลิลิตร
3. ค่อยๆ หยดสารละลายของไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในสารละลายและคนสารละลายอย่างรวดเร็วจนถึง 2 ชั่วโมง
4. ทิ้งไว้ให้แอซีโตนระเหยออกไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์จากขวดเพตีใช้แล้ว

4.1.1 ลักษณะของผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำขวดน้ำดื่มเพตีใช้แล้วมาตัดให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก แล้วนำไปบดให้ละเอียดโดยใช้เครื่องพัลเวอไรเซอร์ได้ผงสีฟ้าอ่อนที่มีความละเอียด ดังรูปที่ 4.1 จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสกับเอทิลีนไกลคอลได้ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีเขียวอมฟ้า ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสีดังกล่าวอาจเกิดจากสีของสารเติมแต่งที่ผสมอยู่ในขวดเพตี



รูปที่ 4.1 ขวดน้ำดื่มเพตีใช้แล้วที่ถูกบดด้วยเครื่องพัลเวอไรเซอร์



รูปที่ 4.2 ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสของขวดเพตี

4.1.2 ชนิด ปริมาณและโครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคไลซิสมายแยกด้วยน้ำกลั่นเพื่อหาองค์ประกอบและปริมาณของแต่ละองค์ประกอบ โดยใช้ น้ำกลั่นเย็น (อุณหภูมิห้อง) และ น้ำกลั่นร้อน (อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส) เป็นตัวทำละลายในการแยกองค์ประกอบต่างๆ พบว่าผลผลิตไกลโคไลซ์มีองค์ประกอบสามส่วน ดังรูปที่ 4.3 ได้แก่ ส่วนที่ละลายน้ำเย็นมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ส่วนที่ละลายน้ำร้อนมีลักษณะเป็นผลึกเรียวยาวสีขาว และส่วนที่ไม่ละลายน้ำมีลักษณะเป็นผงสีฟ้าซึ่งน่าจะมาจากสีของสารเติมแต่งที่ผสมลงในขวดเพ็ท เมื่อนำองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์มาคำนวณหาปริมาณและอัตราส่วน พบว่าในผลผลิตไกลโคไลซ์มีส่วนที่ละลายในน้ำเย็น 27.48 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ละลายน้ำร้อน 51.19 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ 10.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

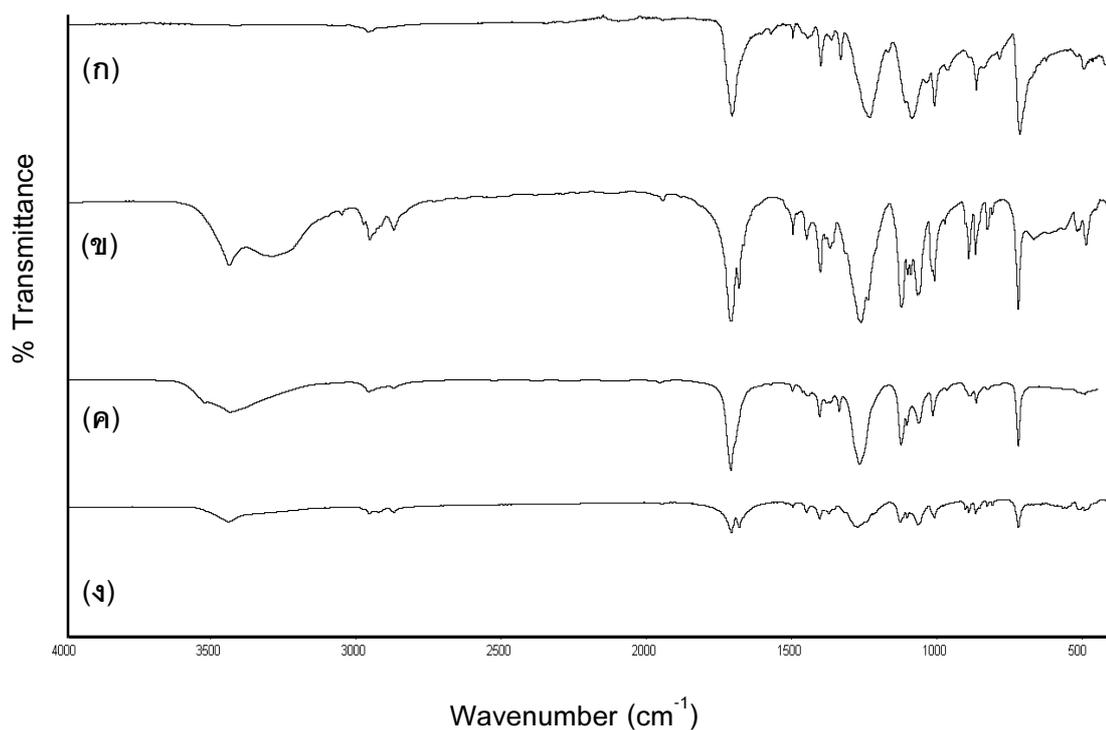


รูปที่ 4.3 ลักษณะขององค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ (ก) ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ข) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และ (ค) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ทั้งสามส่วนไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีได้สเปกตรัมดังรูปที่ 4.4 ซึ่งพบตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของพีกสำคัญที่พบในสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ และขวดเพ็ด

ตำแหน่งพีก (cm^{-1})	รูปแบบการสั่น
3200-3400 cm^{-1}	O-H ยืดของหมู่ไฮดรอกซิล
3000-3100 cm^{-1}	C-H ยืดของ C-H
2800-3000 cm^{-1}	C-H ยืดของ CH_2
1600-1800 cm^{-1}	C=O ยืดของหมู่เอสเตอร์
1600 -1700 cm^{-1}	-C=C ของ แอโรแมติก
1200-1400 cm^{-1}	C-O-C ยืด
1000-1100 cm^{-1}	C-O-H ยืด
700-800 cm^{-1}	แอโรแมติก



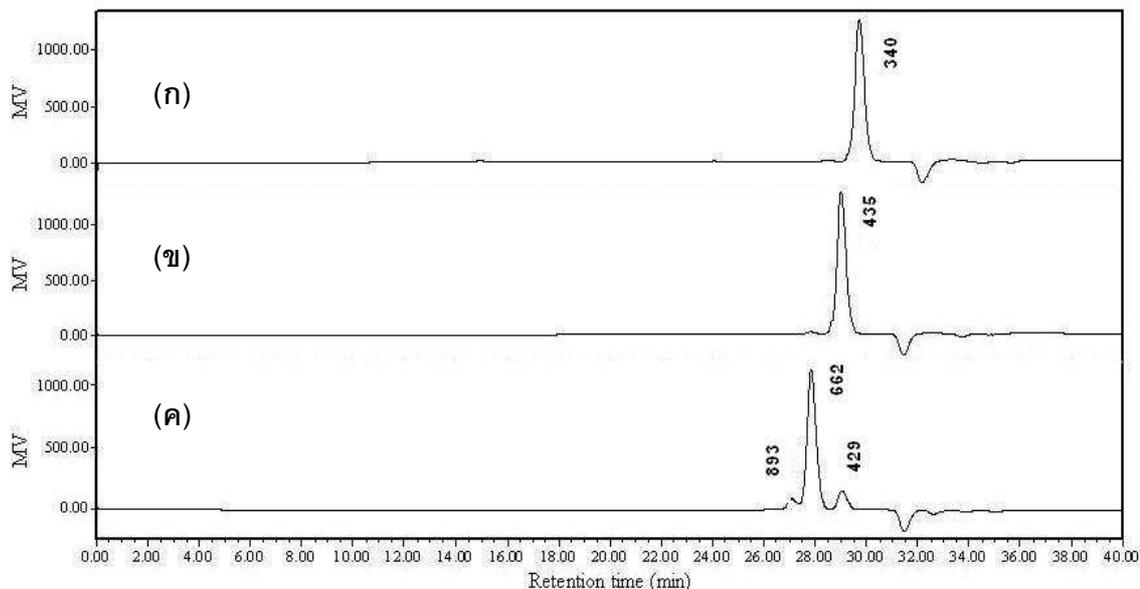
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่าง (ก) ขวดเพ็ด และ (ข) ผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ค) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และ (ง) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์กับสเปกตรัมของขวดเปิดพบว่าสเปกตรัมของสารทั้งสองกลุ่มมีความคล้ายคลึงกัน แต่พีกที่บริเวณช่วงตำแหน่ง 3200-3600 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล ในสเปกตรัมของขวดเปิดมีความเข้มข้นน้อยกว่าในสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ จึงสามารถกล่าวได้ว่าผลผลิตไกลโคไลซ์มีส่วนประกอบของโมเลกุลของพีคที่ถูกตัดออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายโมเลกุล

เมื่อพิจารณาพีกที่ปรากฏในสเปกตรัมของส่วนที่ละลายน้ำเย็น ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ พบว่ามีความแตกต่าง ณ ตำแหน่งพีกที่ 3200-3600 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลอย่างชัดเจน สเปกตรัมในส่วนที่ละลายน้ำเย็นดังรูปที่ 4.4 (ข) มีความเข้มของพีกที่ตำแหน่งนี้มาก แสดงว่าส่วนที่ละลายในน้ำเย็นน่าจะประกอบด้วย BHET ซึ่งมีหมู่ปลายทั้งสองข้างของโมเลกุลเป็นหมู่ไฮดรอกซิลเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้มีความเป็นขั้วสูงสามารถละลายน้ำได้ ส่วนที่ละลายน้ำร้อนแสดงความเข้มของพีก ณ ตำแหน่งดังกล่าวที่ลดลง จึงคาดว่าน่าจะเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นจึงมีส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่ยังมีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลเท่าเดิม ความเป็นขั้วลดลงจึงทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำลดลงด้วย โดยไม่สามารถละลายในน้ำเย็น แต่ละลายได้ในน้ำร้อน ส่วนรูปที่ 4.4 (ง) แสดงสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ มีความเข้มของพีกของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3200-3600 cm^{-1} ลดลง จึงเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่และมีองค์ประกอบของส่วนที่ไม่ละลายน้ำมากขึ้น ทำให้ความเป็นขั้วลดลงจนไม่สามารถละลายน้ำร้อนได้

4.1.3 น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ทั้งสามส่วนที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) ได้โครมาโทแกรมดังรูปที่ 4.5 และค่าน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบที่ได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตโพลิบิวทีเรต (ก) ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ข) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และ (ค) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตโพลิบิวทีเรต

สาร	พีกที่	\bar{M}_n (Daltons)	\bar{M}_w (Daltons)	M_p (Daltons)	PDI
ส่วนที่ละลายน้ำเย็น	1	341	342	340	1.002572
ส่วนที่ละลายน้ำร้อน	1	430	432	435	1.003371
ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ	1	887	890	893	1.003297
	2	654	657	662	1.004480
	3	424	426	429	1.003699

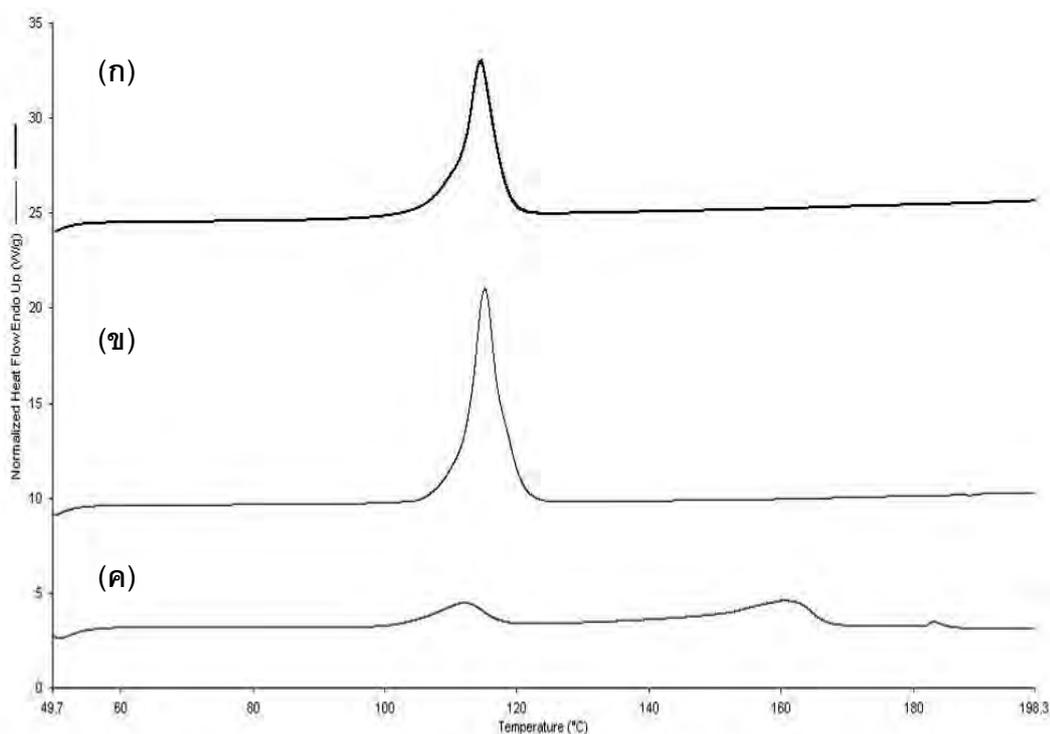
* M_p คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุล ณ ตำแหน่งยอดพีกในโครมาโทแกรม

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2 พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตโพลิบิวทีเรตแต่ละส่วนมีค่าแตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมีค่าอยู่ในช่วง 341-435 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของไดเมอร์และมอนอเมอร์ของ BHET ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 446 และ 254 ตามลำดับ [18] ดังนั้น กลุ่มนี้จึงอาจเป็นมอนอเมอร์ผสมอยู่กับไดเมอร์ของ BHET โดยส่วนที่ละลายน้ำเย็นมีไดเมอร์ของ BHET ในปริมาณที่น้อยกว่า ในขณะที่องค์ประกอบของส่วนที่ละลายน้ำร้อนมีไดเมอร์ของ BHET

ผสมอยู่ในปริมาณที่มากกว่า สำหรับกลุ่มที่สองแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมีค่าอยู่ในช่วง 654-662 อาจจะเป็นไตรเมอร์หรือเตตระเมอร์ของ BHET ที่ผสมกันอยู่ และกลุ่มที่สามแสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 887-893 อาจจะเป็นโอลิโกเมอร์ของ BHET ซึ่งมีหน่วยซ้ำประมาณ 4-5 หน่วยของ BHET ดังนั้น ส่วนที่ไม่ละลายน้ำจึงน่าจะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นไตรเมอร์ของ BHET และโอลิโกเมอร์

4.1.4 อุณหภูมิหลอมเหลวขององค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์

เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น น้ำร้อน และไม่ละลายน้ำมาหาอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ (ก) ส่วนที่ละลายในน้ำเย็น (ข) ส่วนที่ละลายในน้ำร้อน และ (ค) ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวของผลผลิตไกลโคไลซ์

องค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์	อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
ส่วนที่ละลายในน้ำเย็น	112
ส่วนที่ละลายในน้ำร้อน	115
ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ	112 และ 167

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างส่วนที่ละลายในน้ำกับส่วนที่ไม่ละลายน้ำ กล่าวคือ เมื่อนำผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7] ซึ่งพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ BHET มีค่าเท่ากับ 109 องศาเซลเซียส และมอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ผสมอยู่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวคือ 112-115 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า ส่วนที่ละลายน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิ 112 องศาเซลเซียสนั้น มีไดเมอร์ผสมอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วนที่ละลายในน้ำร้อนมีไดเมอร์ผสมอยู่มากขึ้น และส่วนที่ไม่ละลายน้ำมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวสองช่วงคือ 112 และ 167 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไตรเมอร์ และโพลิโกเมอร์ที่น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นไป [18] แต่มีไดเมอร์ของ BHET ผสมอยู่เล็กน้อย

จากน้ำหนักโมเลกุล อุณหภูมิหลอมเหลว และโครงสร้างทางเคมีของแต่ละองค์ประกอบทั้งหมดข้างต้นนั้น แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่แยกได้มีความแตกต่างกัน และยืนยันได้ว่าองค์ประกอบของส่วนที่ละลายน้ำเย็นคือ มอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ผสมอยู่เล็กน้อย ส่วนที่ละลายน้ำร้อนคือ มอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ของ BHET ผสมอยู่มากขึ้น และส่วนที่ไม่ละลายน้ำเป็นสารประกอบของไตรเมอร์และโพลิโกเมอร์เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีไดเมอร์ของ BHET ปนอยู่เล็กน้อย

4.2 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์

ในการสังเคราะห์เป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และนาโนคอมพอสิตจากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนต่างๆ ได้กำหนดชื่อสูตรของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละขั้นตอนและส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 4.4

โดย

A คือ ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ละลายในน้ำเย็น

B คือ ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ละลายในน้ำร้อน

C คือ ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ไม่ละลายในน้ำ

ตัวเลข แสดงถึง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้

ดังนั้น

PET A หมายถึง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น

PET B หมายถึง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำร้อน

PET ABC หมายถึง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ อัตราส่วน 1: 1: 1

PET A 0.5 หมายถึง นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

PET B 0.5 หมายถึง นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำร้อน โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

PET ABC 0.5 หมายถึง นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น ส่วนที่ละลายน้ำร้อน และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ อัตราส่วน 1: 1: 1 โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

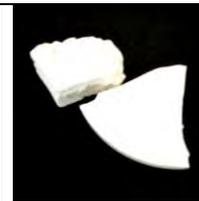
ตารางที่ 4.4 ชื่อสูตรพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

อัตราส่วนของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก % wt)	สูตร				
	PET A	PET B	PET C	PET AB	PET ABC
0	PET A	PET B	PET C	PET AB	PET ABC
0.5	PET A 0.5	PET B 0.5	PET C 0.5	PET AB 0.5	PET ABC 0.5
1.0	PET A 1.0	PET B 1.0	PET C 1.0	PET AB 1.0	PET ABC 1.0
3.0	PET A 3.0	PET B 3.0	PET C 3.0	PET AB 3.0	PET ABC 3.0
5.0	PET A 5.0	PET B 5.0	PET C 5.0	PET AB 5.0	PET ABC 5.0

4.2.1 ลักษณะเฉพาะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

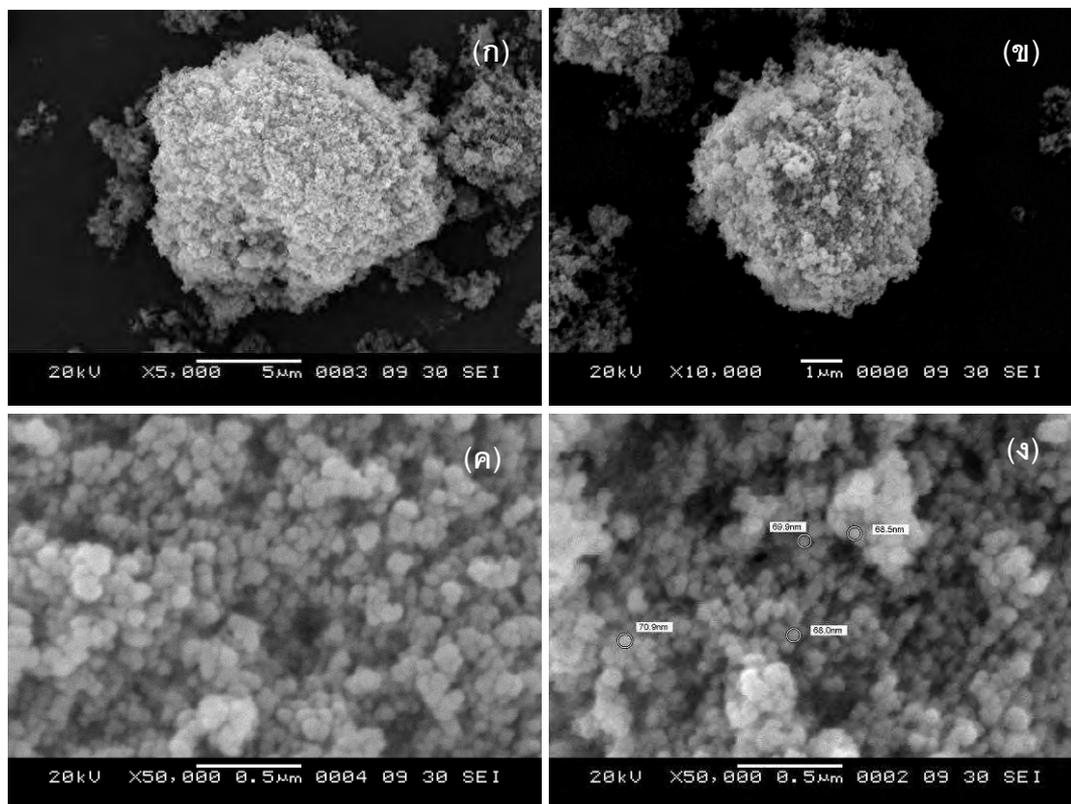
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นของแข็งดังตารางที่ 4.5 โดยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตสูตรที่เตรียมจากองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายในน้ำเย็นและ/หรือส่วนที่ละลายในน้ำร้อนซึ่งได้แก่ สูตร PET A PET B และ PET AB มีสีขาว ส่วนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตสูตรที่มีองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำซึ่งได้แก่ สูตร PET C และ PET ABC นั้นมีสีเขียวมัว ซึ่งน่าจะเกิดจากสีของสารเติมแต่งที่ผสมอยู่ในขวดพีอีซีซึ่งเจือปนอยู่ในองค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อเปรียบเทียบสีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากองค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์กลุ่มเดียวกันพบว่า ชิ้นงานที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากมีสีขาวมากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์น้อย โดยกลุ่มที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ กลุ่มของ PET C โดยชิ้นงานสูตร PET C 5.0 มีสีขาวมากกว่าชิ้นงาน PET C 3.0 PET C 1.0 PET C 0.5 และ PET C ตามลำดับ ซึ่งความขาวที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากสีของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารสีขาวทึบ จึงทำให้นาโนคอมพอสิตที่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปมีความขาวด้วย

ตารางที่ 4.5 ลักษณะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

อัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
0 %	0.5 %	1.0 %	3.0 %	5.0 %
				
PET A	PET A 0.5	PET A 1.0	PET A 3.0	PET A 5.0
				
PET B	PET B 0.5	PET B 1.0	PET B 3.0	PET B 5.0
				
PET C	PET C 0.5	PET C 1.0	PET C 3.0	PET C 5.0
				
PET AB	PET AB 0.5	PET AB 1.0	PET AB 3.0	PET AB 5.0
				
PET ABC	PET ABC 0.5	PET ABC 1.0	PET ABC 3.0	PET ABC 5.0

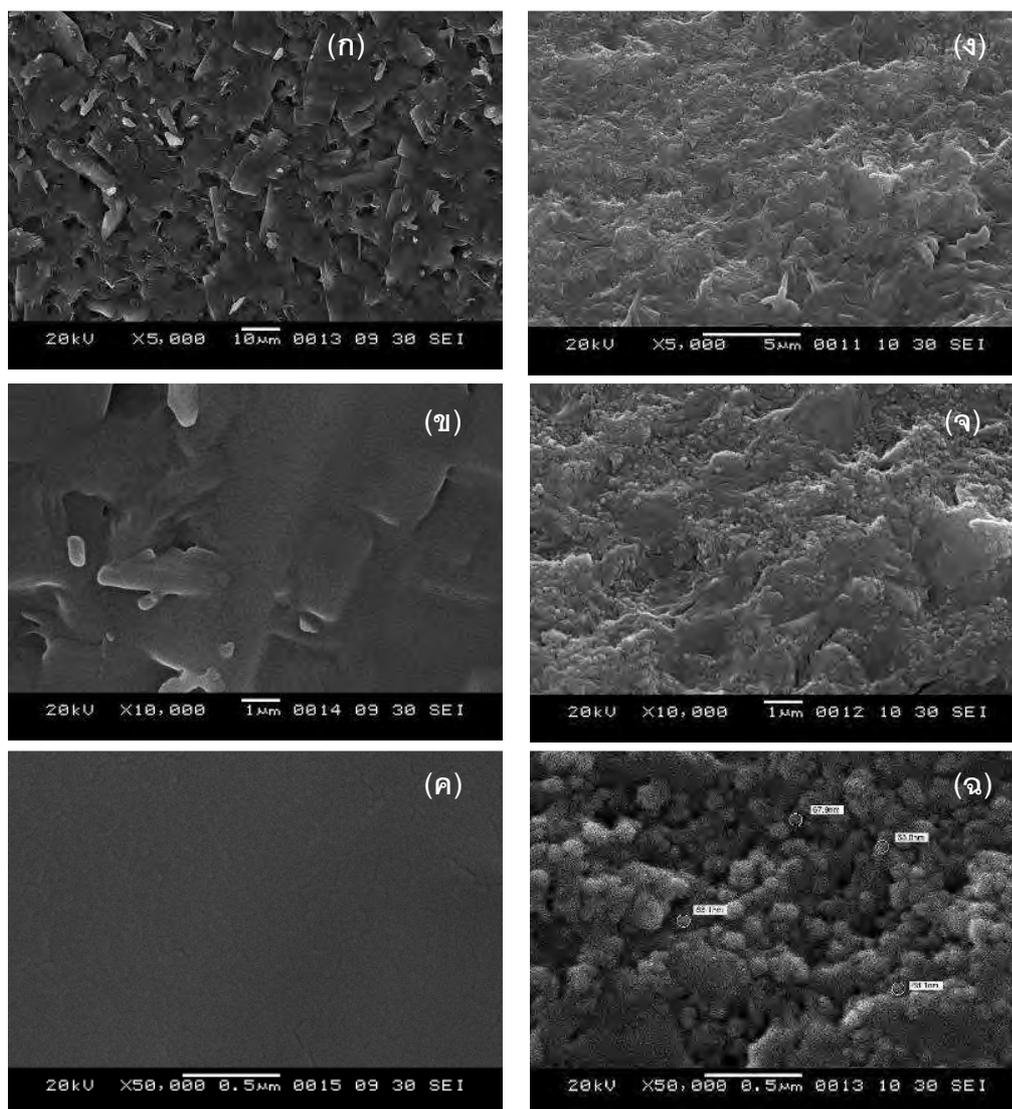
4.2.2 สัณฐานวิทยาของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และนาโนคอมพอสิต

4.2.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM- EDX



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM แสดงสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กำลังขยาย (ก) 5, 000 เท่า (ข) 10,000 เท่า (ค) 50,000 เท่า และ (ง) 50,000 เท่า

จากรูปที่ 4.7 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม และรูปร่างของกลุ่มคล้ายทรงกลมขนาดเล็กประมาณ 68-72 นาโนเมตร แต่ไม่สามารถแยกขนาดอนุภาคได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีอนุภาคขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีแนวโน้มของการเกาะกลุ่มกันเองสูง

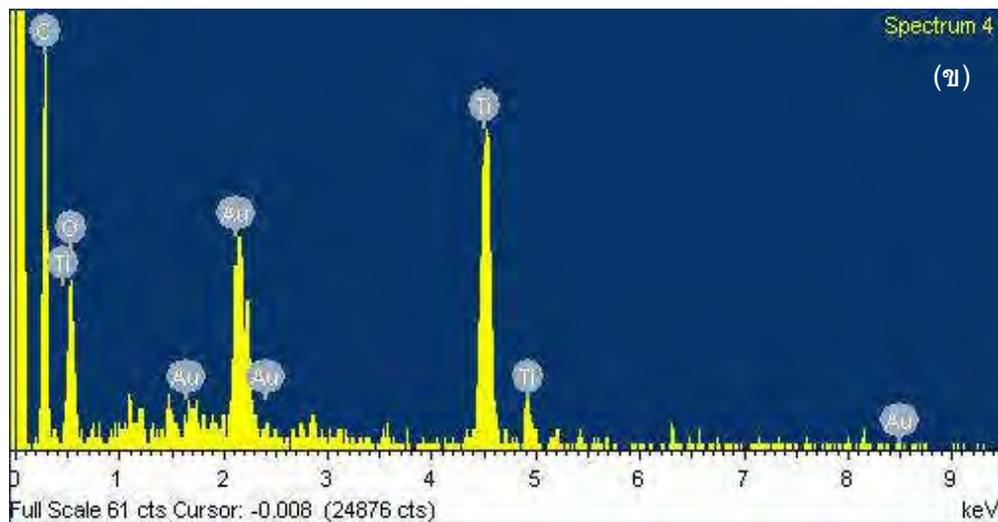
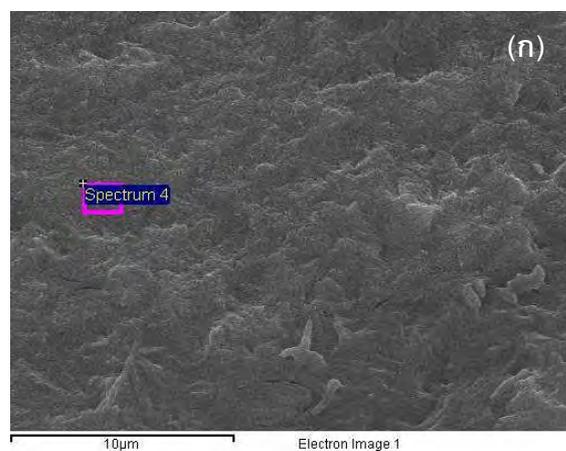


รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A ที่กำลังขยาย (ก) 5,000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า นาโนคอมพอลิิต PET A 5.0 ที่กำลังขยาย (ง) 5,000 (จ) 10,000 และ (ฉ) 50,000 เท่า

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของพื้นผิวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และนาโนคอมพอลิิต PET A 5.0 พบว่าพื้นผิวของ PET A มีความขรุขระน้อยกว่าพื้นผิวของ PET A 5.0 และบนพื้นผิวของ PET A 5.0 จากรูปที่ 4.8 (จ) และ (ฉ) ที่กำลังขยาย 10,000 และ 50,000 เท่า พบว่ามีอนุภาคคล้ายทรงกลมกระจายตัวอยู่ ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยสามารถยืนยันได้โดยใช้ SEM-EDX ดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.6 พบว่าธาตุที่พบ

ได้แก่ ไทเทเนียมและออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วนคาร์บอนและทองที่พบนั้นเป็นองค์ประกอบของกระดาษคาร์บอนและทองที่ใช้เคลือบในการทดสอบ

สำหรับสาเหตุที่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์รวมกลุ่มกัน เนื่องจากธรรมชาติทางเคมีบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีความเป็นขั้วเล็กน้อย จึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้เกาะกลุ่มกันเอง นอกจากนี้ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความแตกต่างของการมีขั้วทำให้แรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีค่าต่ำด้วย

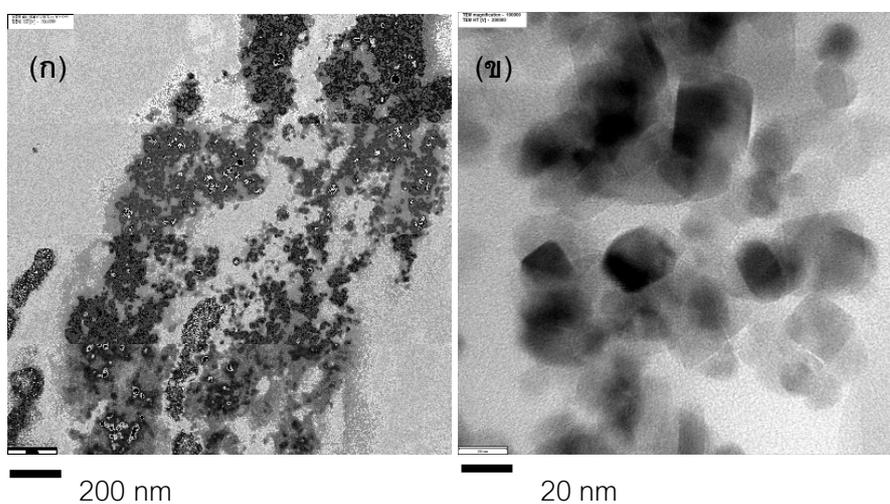


รูปที่ 4.9 ภาพ SEM-EDX แสดงสัณฐานวิทยา ของนาโนคอมพอลสิต PET A 5.0 (ก) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) สเปกตรัมแสดงธาตุที่ปรากฏ ณ จุดที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 ปริมาณของธาตุในจุดที่ทำการศึกษาทดสอบ EDX

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม
คาร์บอน	39.32	59.67
ออกซิเจน	29.11	33.16
ไทเทเนียม	14.73	5.61
ทอง	16.83	1.56

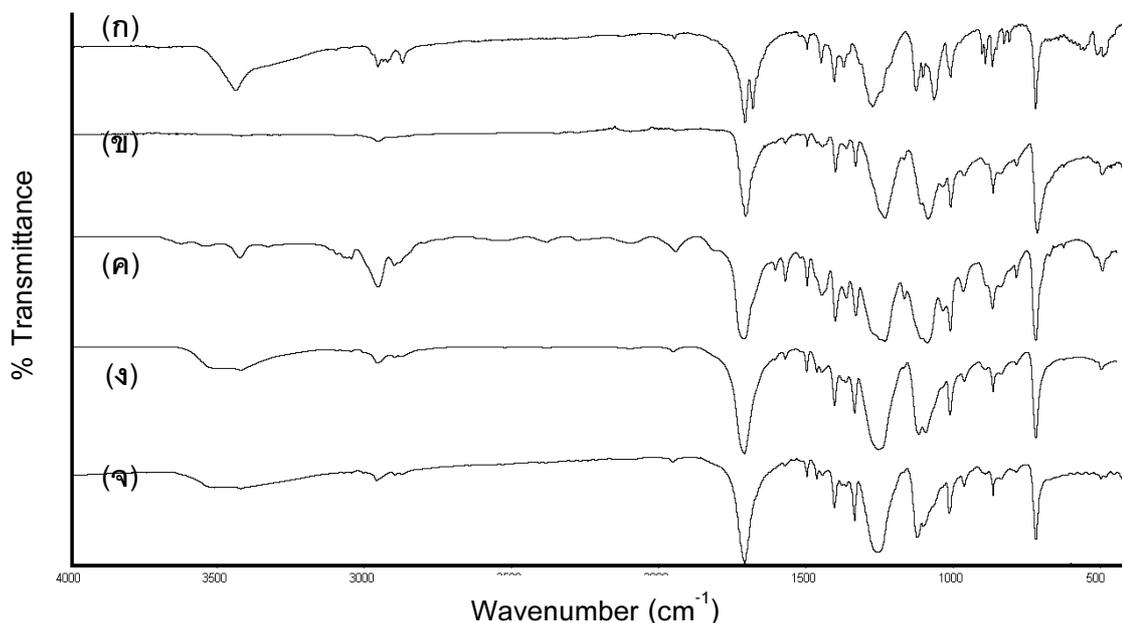
4.2.2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค TEM



รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ที่ (ก) 200 นาโนเมตร และ (ข) 20 นาโน เมตร

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ด้วยเทคนิค TEM แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 (ก) และ (ข) พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นทรงกลมและเกาะกลุ่มกันแบบสามมิติไม่ได้แยกออกเป็นอนุภาคเดี่ยว ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเอง

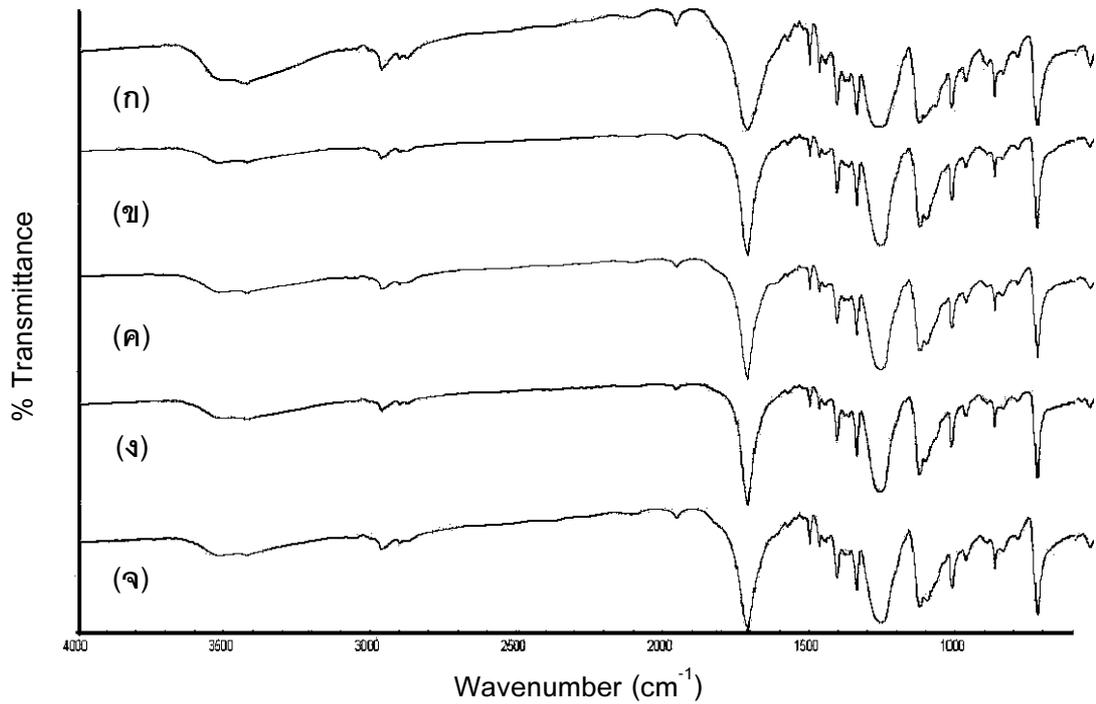
4.2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของ (ก) ผลผลิตไกลโคไลซ์ (ข) ขวดพีดี (ค) เม็ดพีดีทางการค้า
(ง) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และ (จ) นาโนคอมพอสิต PET A 5.0

จากรูปที่ 4.11 พบว่าสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ในรูปที่ 4.11 (ก) มีพีกที่ตำแหน่ง $3200-3600 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮดรอกซิลปรากฏอยู่มากเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และ นาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ในรูปที่ 4.11 (ง) และ (จ) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์และนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้นั้น มีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ปลายของผลผลิตไกลโคไลซ์ได้เกิดปฏิกิริยาควบแน่นกลายเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้โดยพีกช่วง $1200-1400 \text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงพันธะของ $-C-O-C-$ ที่มีความเข้มเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และ นาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ในรูปที่ 4.11 (ง) และ (จ) มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของขวดพีดี และเม็ดพีดีทางการค้า ในรูปที่ 4.11 (ข) และ 4.11 (ค) อีกด้วย

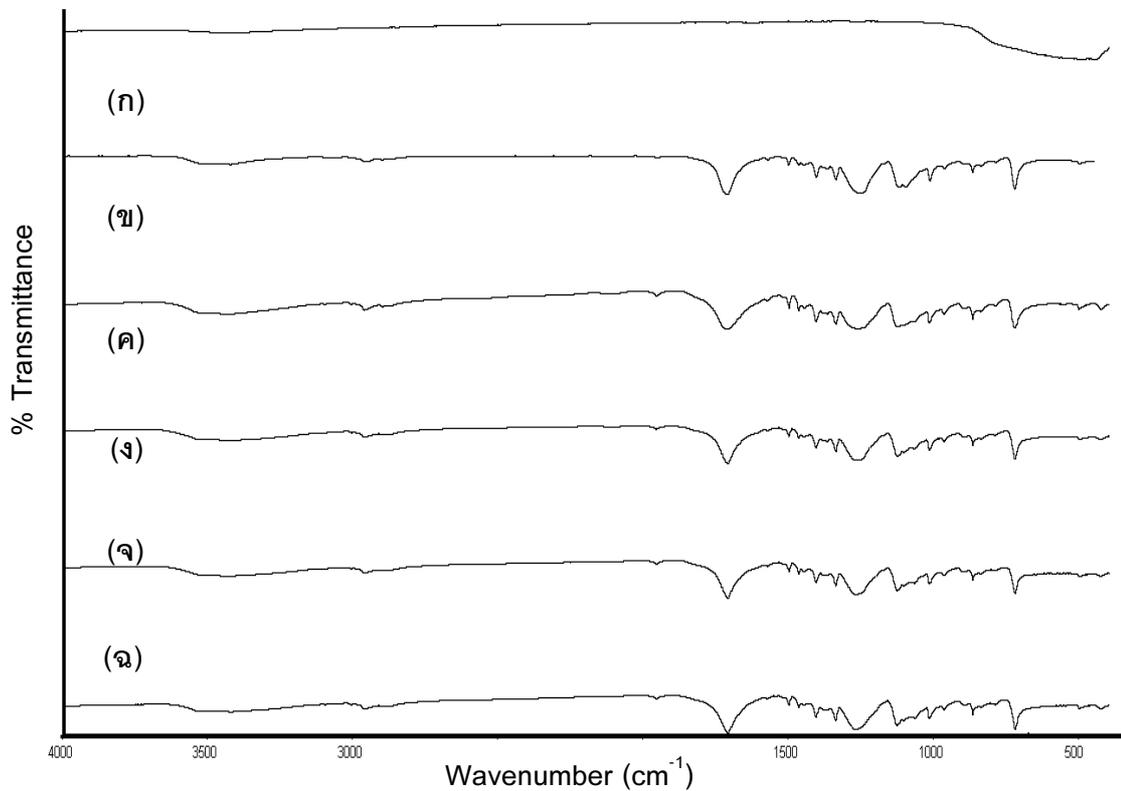
ก. ผลขององค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A (ข) PET B (ค) PET C
(ง) PET AB และ (จ) PET ABC

จากรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A ดังในรูปที่ 4.12 (ก) กับสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET C ดังในรูปที่ 4.12 (ค) พบว่า PET A มีพีกช่วง 3200-3600 cm^{-1} กว้างมากกว่า แสดงให้เห็นว่า PET A มีหมู่ปลายสายโซ่ซึ่งเป็นหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า จึงมีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นกว่า PET C ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหล ดังนั้นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า PET B และ PET C ตามลำดับ

ข. ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์



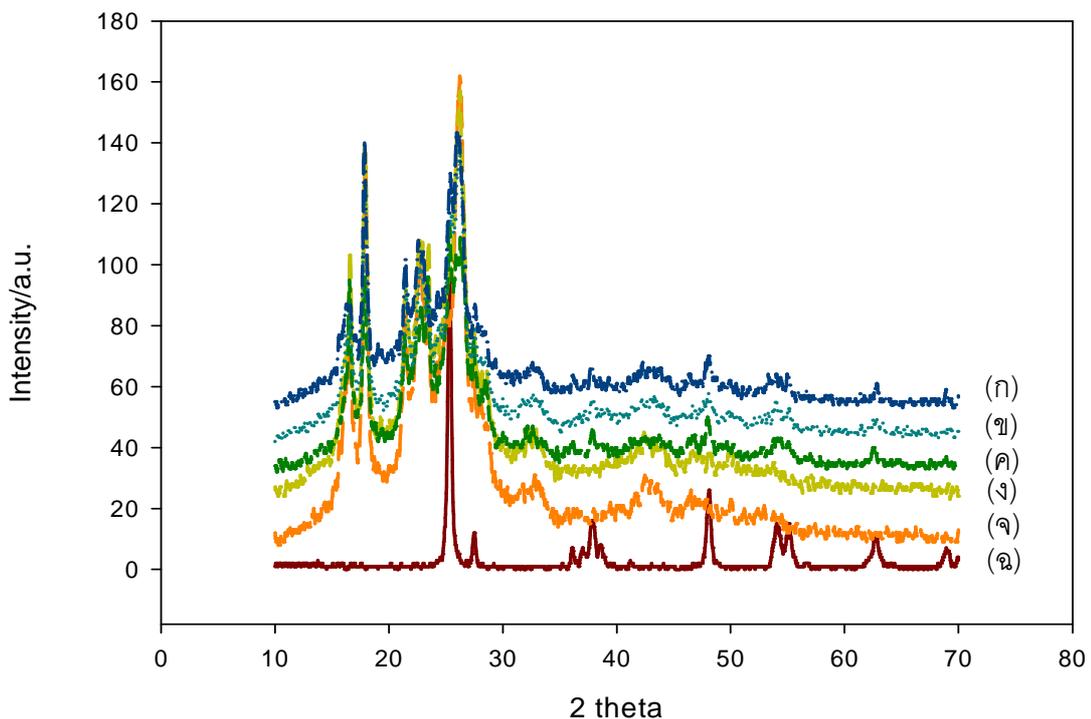
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ข) PET A

นาโนคอมพอสิต (ค) PET A 0.5 (ง) PET A 1.0 (จ) PET A 3.0 และ (ฉ) PET A 5.0

จากรูปที่ 4.13 พบว่าสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปที่ 4.13 (ก) มีพีคกว้างที่ช่วงตำแหน่ง 500-700 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของ -Ti-O เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A ในรูปที่ 4.13 (ข) กับสเปกตรัมของนาโนคอมพอสิต PET A 0.5 PET A 1.0 PET A 3.0 และ PET A 5.0 ในรูปที่ 4.13 (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ในนาโนคอมพอสิตมากขึ้น พบว่านาโนคอมพอสิตมีพีคในช่วงตำแหน่ง 500-700 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงไปในการเตรียมนาโนคอมพอสิตนั้นมีปริมาณน้อยจึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

4.2.4 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอม-พอลิเมอร์

เมื่อนำไทเทเนียมไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET B นาโนคอมพอลิเมอร์ PET B 0.5 PET B 5.0 PET A 5.0 PET C 5.0 มาตรวจสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิค XRD ได้ดิฟแฟร็กโทแกรมดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.14 เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) PET B (ข) PET B 0.5 (ค) PET B 5.0 (ง) PET A 5.0 (จ) PET C 5.0 และ (ฉ) ไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.14 (ฉ) พบว่าเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงพีกลักษณะเฉพาะของผลึกแบบอะนาเทสซึ่งมีค่า 2θ เท่ากับ 25.28° คือ ระนาบ (101) และมีระนาบอื่นซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะผลึกแบบอนาเทส [27,28] ได้แก่ ระนาบ (200) (211) (204) (220) (215) เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET B ดังรูปที่ 4.13 (ก) มีพีกที่เป็นลักษณะเฉพาะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 16.9° คือ ระนาบ (0 -1 1) [29] พีกที่ 2θ เท่ากับ 20.6° คือ ระนาบ (0 1 0) และพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 24.7° คือ ระนาบ (-1 0 3)

ซึ่งในนาโนคอมพอสิต PET B 0.5 PET B 5.0 PET A 5.0 และ PET C 5.0 ได้ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกันกับพีกที่เป็นลักษณะเฉพาะของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์และผลึกของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าองค์ประกอบของนาโนคอมพอสิตคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เมื่อพิจารณาเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET B นาโนคอมพอสิต PET B 0.5 และ PET B 5.0 ซึ่งเป็นเมทริกซ์ชนิดเดียวกันพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของมุม 2θ แต่ความเข้มและความกว้างของพีกแตกต่างกัน จึงคำนวณหาปริมาณผลึกโดยใช้เทคนิค DSC เพื่อศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อปริมาณของผลึกในนาโนคอมพอสิต

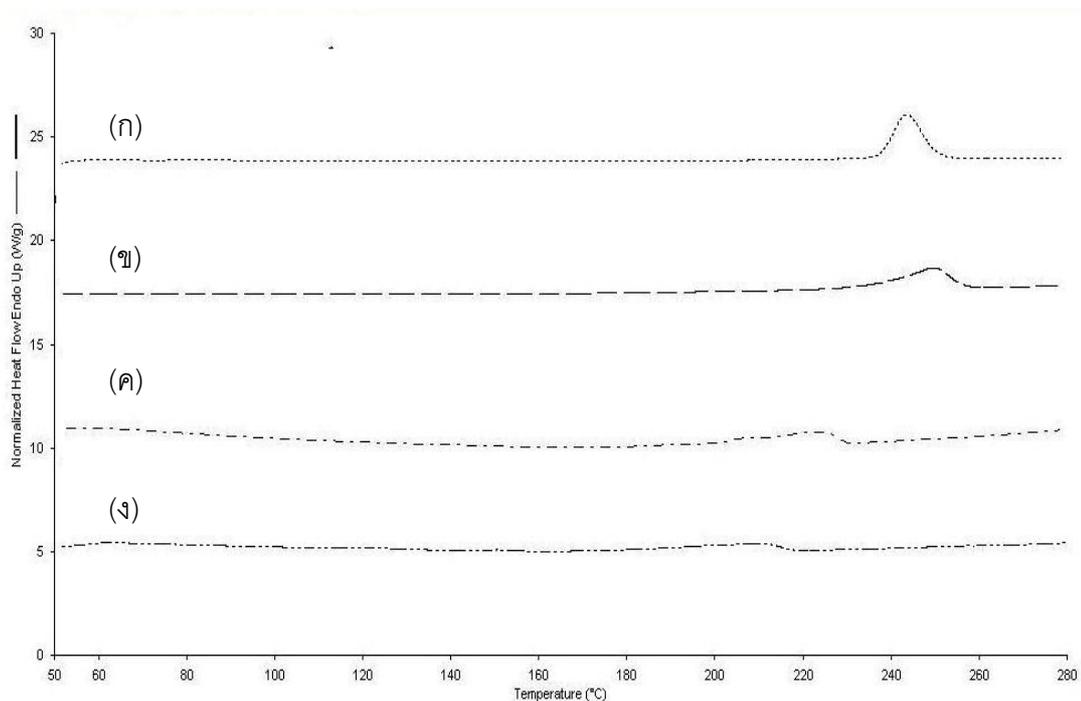
4.2.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

4.2.5.1 อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และนาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึกและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

สูตร	อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ΔH_f (J/g)	% Crystallinity*	อุณหภูมิเกิดผลึก (องศาเซลเซียส)	ΔH_c (J/g)
PET A	218.03	22.24	18.56	182.89	33.32
PET A 0.5	217.49	18.01	15.11	175.00	29.43
PET A 1.0	212.66	15.35	12.95	180.86	28.12
PET A 3.0	211.42	14.15	12.18	178.43	26.05
PET A 5.0	210.22	13.62	11.98	176.46	25.37
PET B	243.52	50.69	42.31	198.96	58.84
PET C	233.65	41.60	34.73	193.77	40.771
PET AB	217.34	27.34	22.84	168.04	29.364
PET ABC	224.70	32.53	27.16	185.12	36.176

* คำนวณหาปริมาณผลึกโดยใช้สมการที่ 3.1



รูปที่ 4.15 DSC เทอร์โมแกรมของ (ก) ขวดเพ็ต (ข) เม็ดเพ็ตทางการค้า (ค) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และ (ง) นาโนคอมพอสิต PET A 5.0

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.15 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A และ นาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ดังในรูปที่ 4.15 (ค) และ 4.15 (ง) พบว่ามีอุณหภูมิหลอมเหลว 218 และ 210 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวของขวดเพ็ต และเม็ดเพ็ตทางการค้า ดังในรูปที่ 4.15 (ก) และ 4.15 (ข) ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลว 244 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ PET A และนาโนคอมพอสิต PET A 5.0 มีค่าต่ำกว่าขวดเพ็ตและเม็ดเพ็ตทางการค้า คาดว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าขวดเพ็ตและเม็ดเพ็ตทางการค้า จึงนำไปทดสอบหาค่าดัชนีการไหล

เมื่อนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบหาค่าดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D 1238 ซึ่งกำหนดอุณหภูมิและตม้มน้ำหนักสำหรับการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไว้ 3 แบบดังนี้คือ $210^{\circ}\text{C}/2.16\text{kg}$ $250^{\circ}\text{C}/2.16\text{kg}$ และ $285^{\circ}\text{C}/2.16\text{kg}$ ตาม ลำดับ

จากการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิการไหลของเม็ดพีตทางการค้า ดังตารางที่ 4.8 จึงไม่สามารถนำค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกับค่าดัชนีการไหลของเม็ดพีตทางการค้าได้ แต่เนื่องจากค่าดัชนีการไหลที่ทดสอบได้นั้นมีค่าไม่เกิน 50 จึงปรับอุณหภูมิและต้อน้ำหนักเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมได้ โดยปรับอุณหภูมิให้เท่ากับที่ 245 องศาเซลเซียสและปรับลดต้อน้ำหนักเป็น 1 กิโลกรัม ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ต้อน้ำหนัก 2.16 kg

สาร	อุณหภูมิการทดสอบ / น้ำหนัก	ดัชนีการไหล
เม็ดพีตทางการค้า	250°C/2.16kg	24.8
PET A	235°C/2.16kg	20.8
PET B	235°C/2.16kg	2.8
	240°C/2.16kg	7.7
PET C	240°C/2.16kg	3.1

ตารางที่ 4.9 ดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อุณหภูมิ 245°C และต้อน้ำหนัก 1.0 kg

สาร	อุณหภูมิการทดสอบ / น้ำหนัก	ดัชนีการไหล
เม็ดพีตทางการค้า	245°C/1.0 kg	4.5
PET A	245°C/1.0 kg	-
PET B	245°C/1.0 kg	-
PET C	245°C/1.0 kg	6.9

จากตารางที่ 4.9 พบว่า ที่ 245°C/1.0 kg สามารถทำการทดสอบได้เฉพาะเม็ดพีตทางการค้า และ PET C เท่านั้น โดย PET C มีค่าดัชนีการไหลมากกว่าเม็ดพีตทางการค้า แสดงว่า PET C มีสายโซ่ของโมเลกุลสั้น มีน้ำหนักโมเลกุลและมีความหนืดน้อยกว่าเม็ดพีตทางการค้า

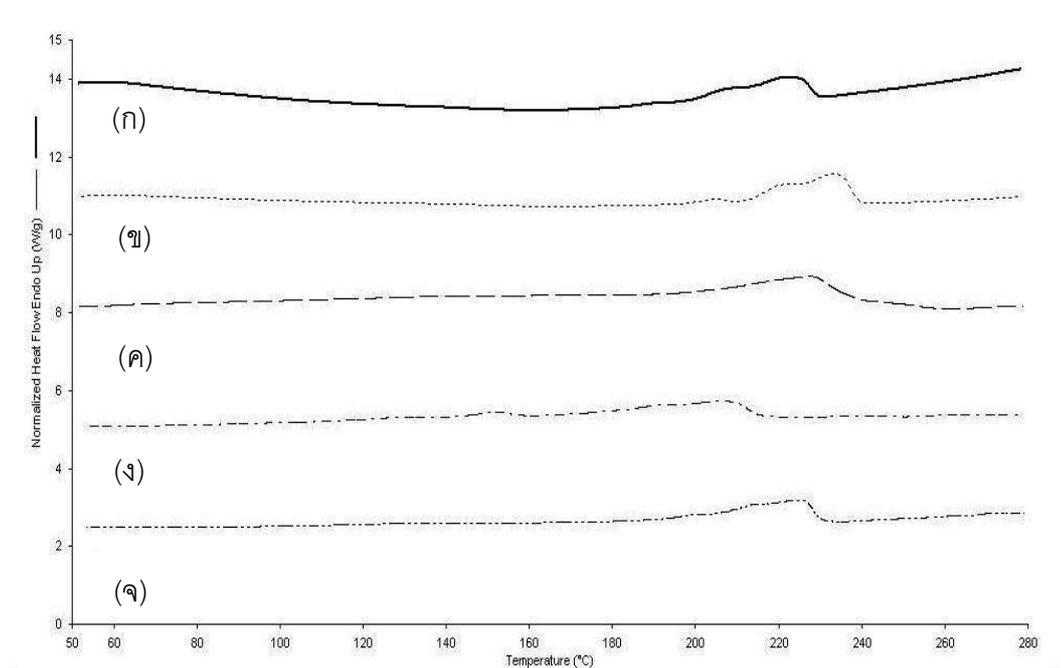
ดังนั้นจึงทำการทดสอบเพิ่มเติมในกลุ่มของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้ โดยปรับอุณหภูมิให้เท่ากันที่ 240 องศาเซลเซียสและปรับลดตุน้ำหนักเป็น 1 กิโลกรัม ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่อุณหภูมิ 240°C และตุน้ำหนัก 1.0 kg

สาร	อุณหภูมิการทดสอบ / น้ำหนัก	ดัชนีการไหล
PET A	240°C/1.0 kg	4.2
PET B	240°C/1.0 kg	2.3
PET C	240°C/1.0 kg	1.1

จากตารางที่ 4.10 พบว่า ที่ 240°C/1.0 kg PET A มีค่าดัชนีการไหลมากกว่า PET B และ PET C นั่นคือ PET A มีสายโซ่ของโมเลกุลสั้น มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดน้อยกว่า PET B และ PET C ตามลำดับ จึงทำให้สามารถไหลได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ GPC โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์โกลโคไลซ์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์เพ็ตดังตารางที่ 4.2 โดยผลิตภัณฑ์โกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็นมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าส่วนที่ละลายน้ำร้อน และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ ตามลำดับ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า PET B และ PET C ตามลำดับ

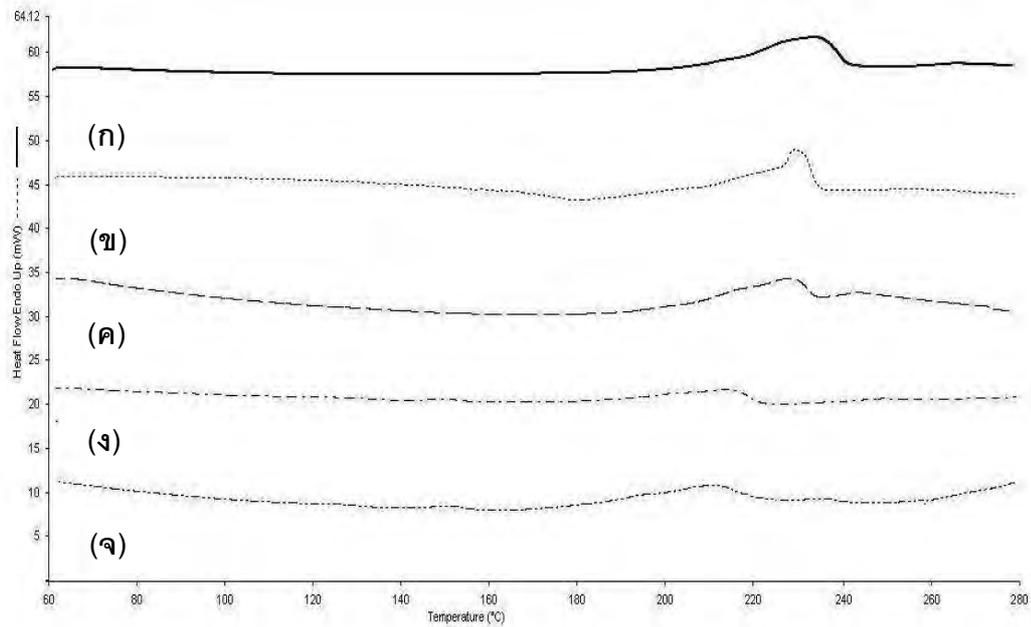
ก. ผลขององค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์



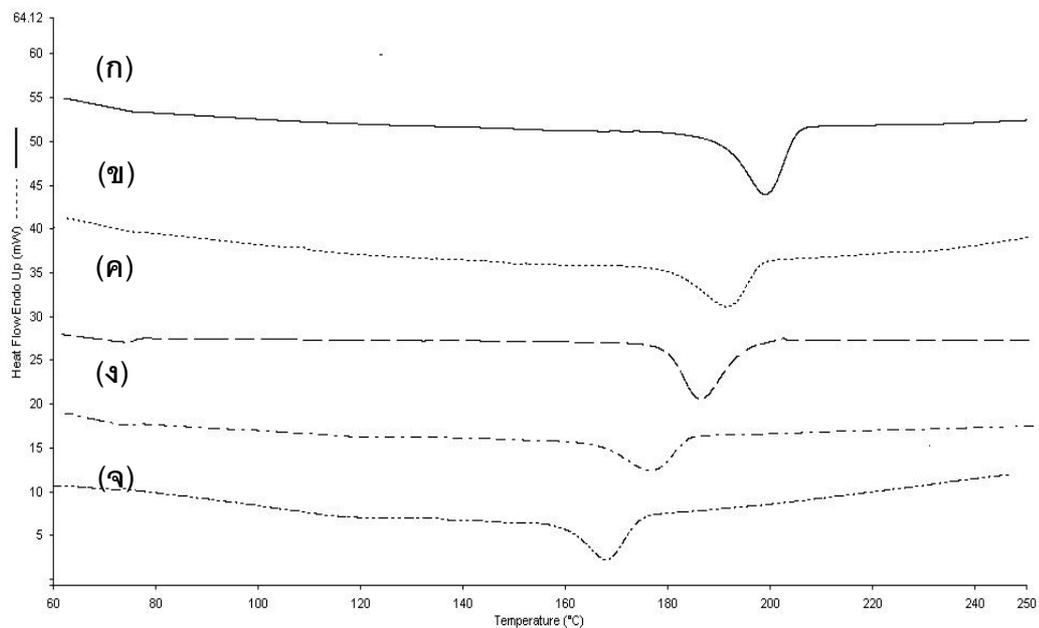
รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A (ข) PET B (ค) PET C (ง) PET AB และ (จ) PET ABC

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A PET B PET C PET AB และ PET ABC มีค่าเท่ากับ 218 243 233 219 และ 224 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET C ดังรูปที่ 4.16 (ค) ซึ่งสังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไตรเมอร์และโอลิโกเมอร์ซึ่งเป็นส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงทำให้มีอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหลดังแสดงในตารางที่ 4.8

ข. ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของ (ก) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A (ข) นาโนคอมพอสิต PET A 0.5 (ค) PET A 1.0 (ง) PET A 3.0 และ (จ) PET A 5.0



รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของ (ก) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A (ข) นาโนคอมพอสิต PET A 0.5 (ค) PET A 1.0 (ง) PET A 3.0 และ (จ) PET A 5.0

จากตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A นานาโนคอมพอสิต PET A 0.5 PET A 1.0 PET A 3.0 และ PET A 5.0 มีค่าเท่ากับ 218.03 217 212 211 และ 210 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปนานาโนคอมพอสิตทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวและค่าพลังงานการหลอมผลึกลดลง เมื่อคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยใช้สมการที่ 3.1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงไปนานาโนคอมพอสิตปริมาณผลึกลดลงตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กมาก และไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว ทำให้การกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ดี เกิดการรวมกลุ่มกันซึ่งจะเห็นได้จากภาพ SEM ในตารางที่ 4.7 (ฉ) และภาพ TEM ในรูปที่ 4.10 อนุภาคที่เกิดการรวมกลุ่มกันนี้อาจไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ทำให้ปริมาณผลึกลดลง

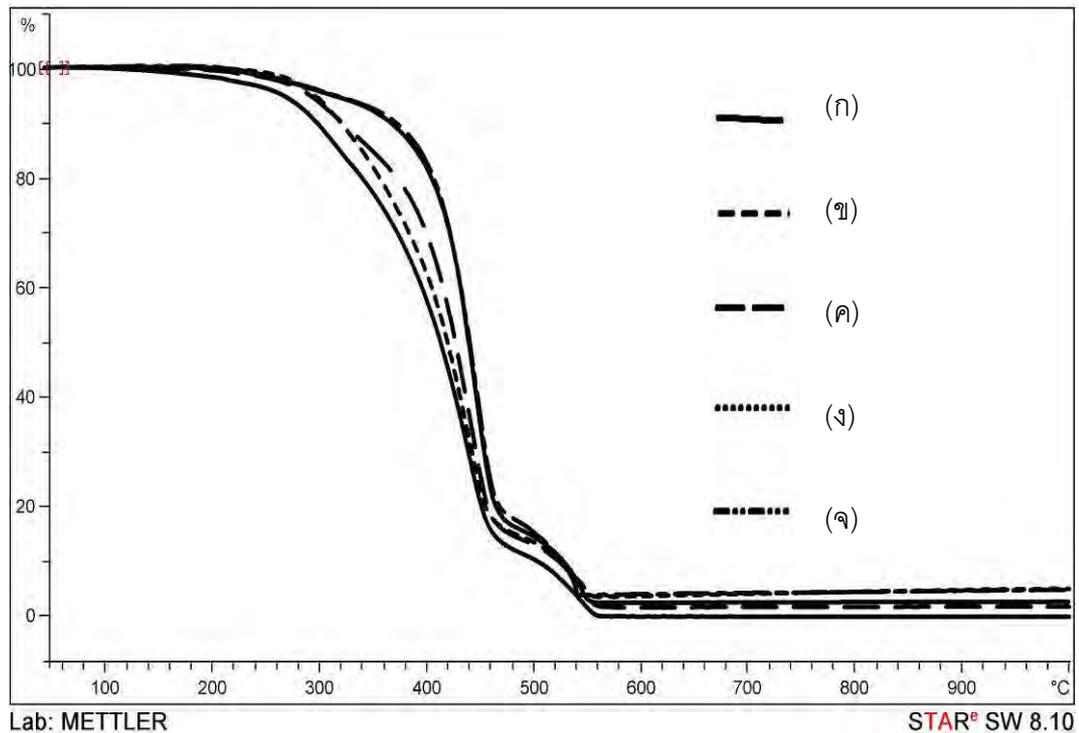
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงอุณหภูมิเกิดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ขณะลดอุณหภูมิลง พบว่าเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิเกิดผลึกและค่าพลังงานในการเกิดผลึกลดลง ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้การจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบจึงเกิดเป็นผลึกได้น้อย การคายพลังงานจึงน้อยและพฤติกรรมขัดขวางการเกิดผลึกส่งผลให้เกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำลง จึงสรุปได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ได้ประพฤติตัวเป็นสารก่อผลึกในระบบนี้

4.2.5.2 คุณภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.11 คุณภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

สาร	คุณภูมิการสลายตัว (onset) (องศาเซลเซียส)
ขวดพีต	394
เม็ดพีตทางการค้า	404
PET A	348
PET A 0.5	382
PET A 1.0	386
PET A 3.0	389
PET A 5.0	390
PET B	357
PET C	403
PET AB	359
PET ABC	403

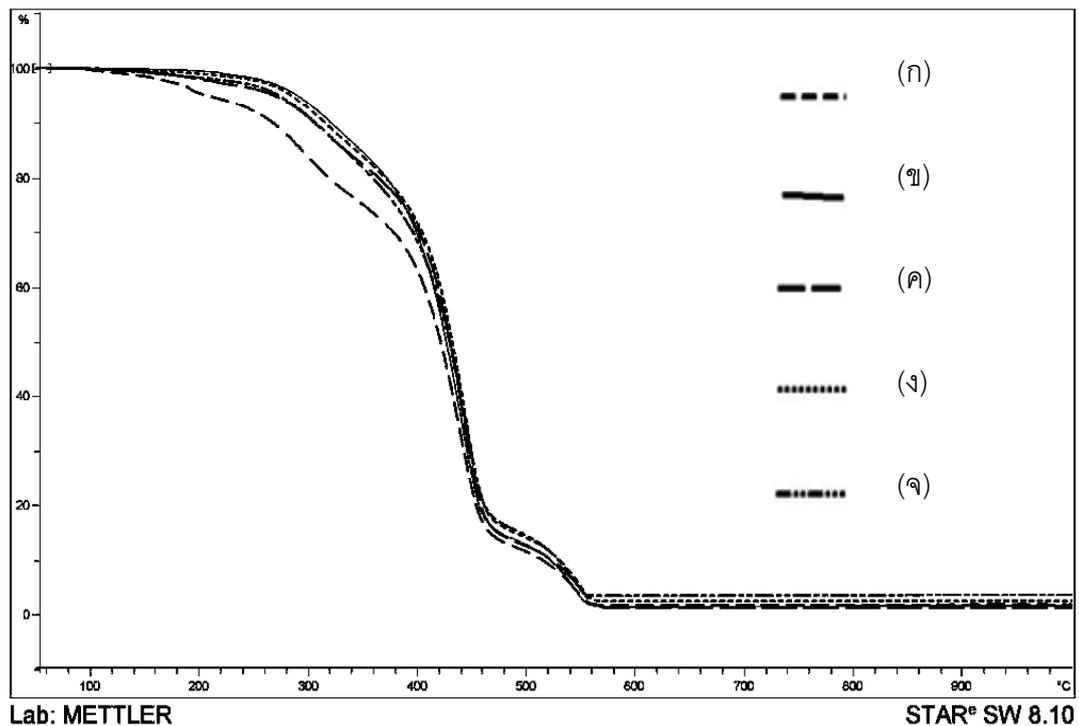
ก. ผลขององค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์



รูปที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A (ข) PET B (ค) PET C (ง) PET AB และ (จ) PET ABC

จากตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A PET B PET C PET AB และ PET ABC มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวเท่ากับ 348 357 403 359 และ 403 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่ง PET C มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด เพราะเตรียมจากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำที่มีไตรเมอร์ของ BHET และโอลิโกเมอร์ผสมอันอยู่ จึงจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลสายยาวกว่า PET A ซึ่งเตรียมจากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีมอนอเมอร์ผสมไดเมอร์เพียงเล็กน้อย และ PET B ซึ่งเตรียมจากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีไดเมอร์ผสมมอนอเมอร์เพียงเล็กน้อย จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า เมื่อพิจารณา PET ABC และ PET AB ในรูปที่ 4.19 (จ) และ 4.19 (ง) ที่พบว่า PET ABC มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่า PET AB เนื่องจาก PET ABC มีองค์ประกอบผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า

ข. ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.20 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ก) PET A นาโนคอมพอสิต

(ข) PET A 0.5 (ค) PET A 1.0 (ง) PET A 3.0 และ (จ) PET A 5.0

จากตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A นาโนคอมพอสิต PET A 0.5 PET A 1.0 PET A 3.0 และ PET A 5.0 มีอุณหภูมิการสลายตัว เท่ากับ 348 382 386 389 และ 390 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ PET A กับนาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ซึ่งเตรียมได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายในน้ำกลั่นเย็นเหมือนกัน พบว่านาโนคอมพอสิต PET A 5.0 ซึ่งมีการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่า เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคในระดับนาโนเมตรที่มีสมบัติการทนความร้อนสูง จึงทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า เมื่อพิจารณา PET A 0.5 PET A 1.0 PET A 3.0 และ PET A 5.0 พบว่าเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตนั้นเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติการทนความร้อนของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้นาโนคอมพอสิตมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้น

4.2.6 สมบัติเชิงกล

4.2.6.1 การทดสอบแรงกระแทก

เมื่อนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอลิตีไปขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงานด้วยเครื่องอัดแบบเพื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าขึ้นงานเปราะ แตกหัก ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่น และขึ้นงานตามแบบมาตรฐานของการทดสอบความดัดโค้ง และการทดสอบความทนแรงกระแทกได้ ดังรูปที่ 4.21

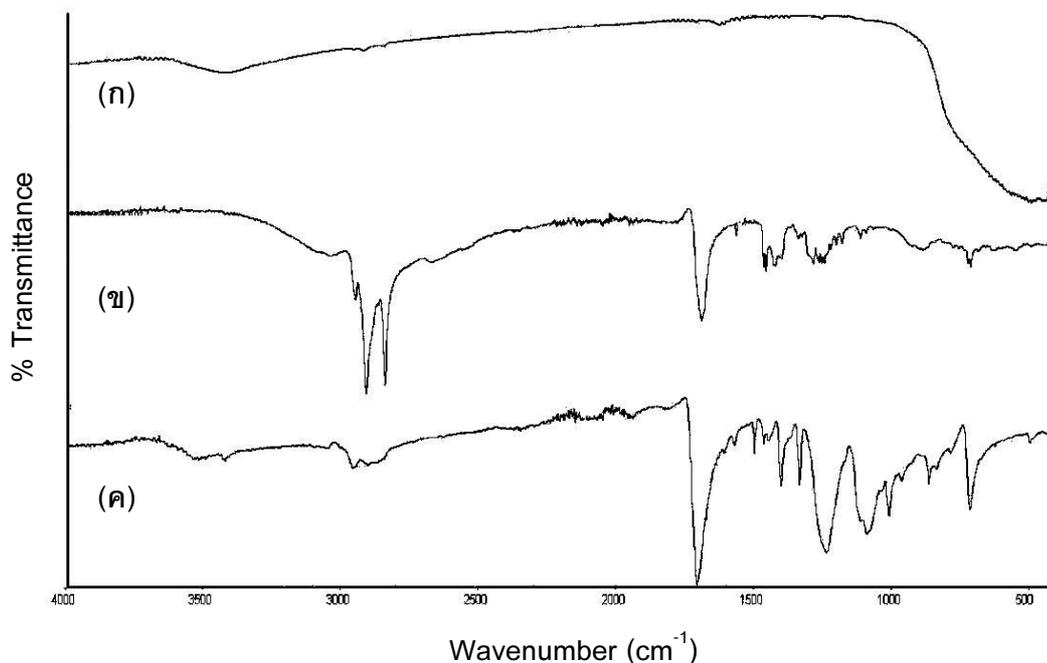


รูปที่ 4.21 ขึ้นงานที่แตกหัก PET AB 5.0

สาเหตุของการแตกเปราะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอลิตีที่เตรียมได้นั้น น่าจะเกิดจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปในการเตรียมนาโนคอมพอลิตีนั้นเกิดการเกาะตัวกันเป็นก้อนทำให้พื้นที่ผิวลดลง และกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ยังไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ความเป็นผลึกลดลงดังที่ได้อธิบายไว้ในเรื่องอุณหภูมิหลอมเหลว ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากขึ้นงานในรูปที่ 4.21 พบว่าขึ้นงานเปราะ แตกหัก ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นและขึ้นงานตามแบบมาตรฐานของการทดสอบความดัดโค้ง และการทดสอบความทนแรงกระแทกได้ คาดว่าเป็นผลจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคเล็กและมีพื้นที่ผิวมากเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง ดังรูป SEM ในรูปที่ 4.8 (จ) และ รูป TEM ที่ 4.10 จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ปริมาณผลึกลดลง ทำให้ความแข็งแรงต่ำจึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้กรดสเตียริก [27]

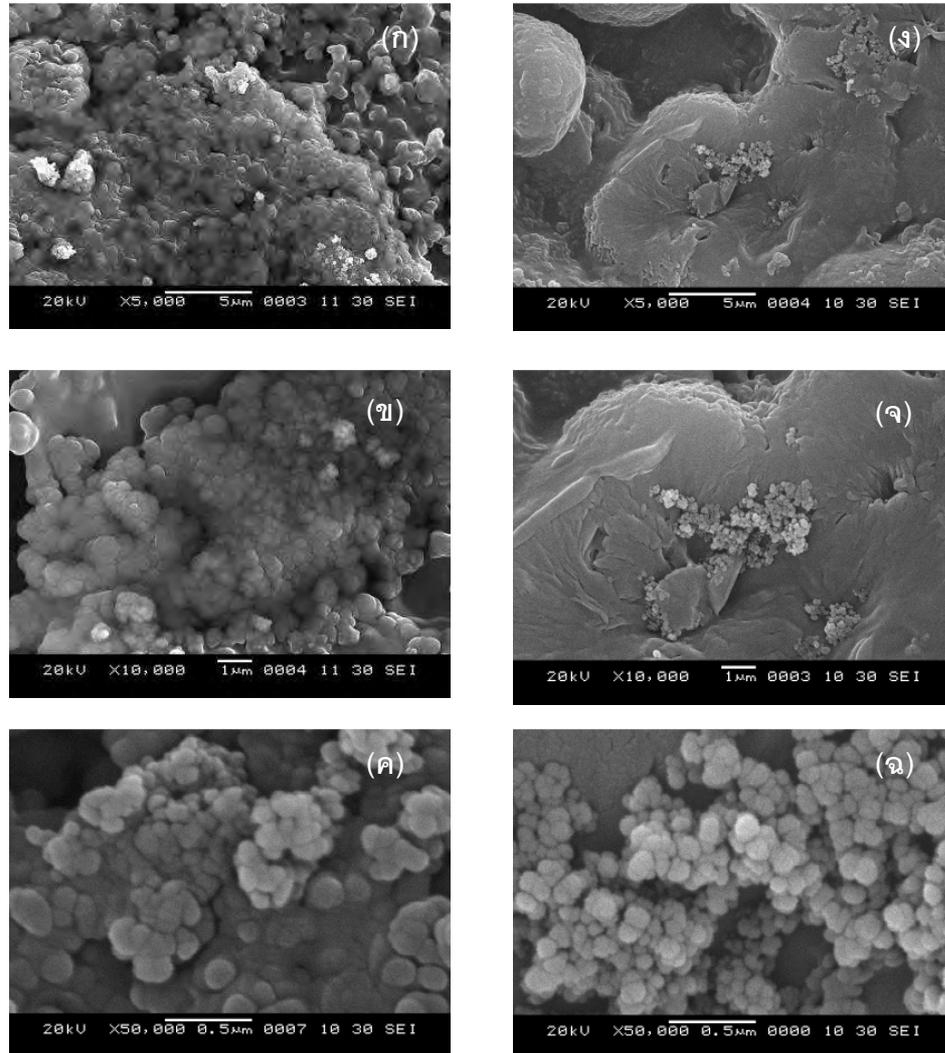
เมื่อปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว จึงนำไปเตรียมนาโนคอมพอสิต PET C 1.0 ST และนำไปตรวจสอบด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์พบว่าพีกที่เป็นลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ปรากฏขึ้นบนสเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกดังรูปที่ 4.21 (ข) เมื่อเทียบกับสเปกตรัมของไทเทเนียมดังรูปที่ 4.21 (ก) พบว่าพีกที่ตำแหน่ง $3200-3500 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลมีความเข้มลดลง แสดงว่ากรดสเตียริกได้เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ไว้ ซึ่งยืนยันได้จากภาพ SEM ในรูปที่ 4.22 (ค) และพีกที่ประมาณ 1450 และ 1550 cm^{-1} เป็นพีกของการยืดและหดของคาร์บอนซิลเลตไอออน [29] ซึ่งปรากฏตรงกันบนสเปกตรัมของนาโนคอมพอสิต PET C 1.0 ST ดังรูปที่ 4.21 (ค)



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวและด้วยกรดสเตียริก (ค) นาโนคอมพอสิต PET C 1.0 ST

อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปรับปรุงพื้นผิวมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปร่างของกลุ่มคล้ายทรงกลมขนาดเล็กประมาณ $160-170$ นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปที่ 4.7 (ข) ซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ $68-72$ นาโนเมตร ซึ่งคาดว่ากรดสเตียริกได้เคลือบอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบรูปร่างนาโนคอมพอสิตในรูปที่ 4.8 (จ) กับ PET C 1.0 ST ในรูปที่ 4.23 (จ)

พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีการเกาะกลุ่มกันลดลง เนื่องจากปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ทำให้ความมีขั้วลดลง ยืนยันได้จากสเปกตรัมในรูปที่ 4.22



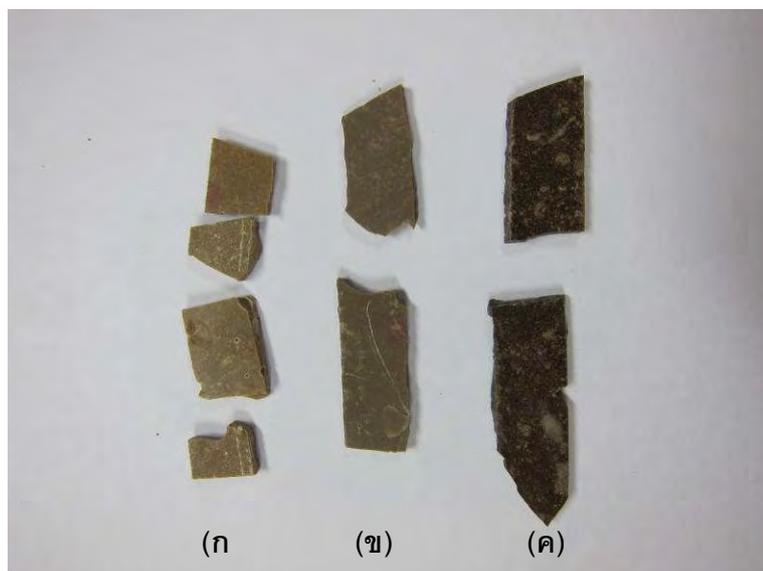
รูปที่ 4.23 รูปถ่าย SEM แสดงลักษณะวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวที่กำลัง

ขยาย (ก) 5,000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า และนาโนคอมพอสิต PET C 1.0

ST ที่กำลังขยาย (ง) 5,000 (จ) 10,000 และ (ฉ) 50,000 เท่า

จากการนำชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตไปทดสอบแรงกระแทก พบว่ามีค่าเป็นศูนย์ทุกชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานมีความเปราะ ไม่มีความแข็งแรงมากพอ อีกประการหนึ่งคือ เครื่องมือทดสอบมีจุดตศนิยมที่แสดงค่าเพียงสองตำแหน่งซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับ

ชิ้นงานทดสอบ หากใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดชิ้นอาจได้ค่าการทดสอบแล้วสามารถนำมาคำนวณได้



รูปที่ 4.24 ชิ้นงานที่แตกหักหลังจากการทดสอบแรงกระแทกของ (ก) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

PET C (ข) นาโนคอมพอสิต PET C 1.0 และ (ค) PET C 1.0 ST

จากรูปที่ 4.24 ลักษณะชิ้นงานที่แตกหักพบว่า นาโนคอมพอสิตมีความแข็งแรงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เพราะเมื่อได้รับแรงกระแทกแล้วจะแตกตามแนวรอยบากเท่านั้น ส่วนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนั้นเมื่อได้รับแรงกระแทกแล้วจะเกิดการแตกหลายชิ้นส่วน

4.2.6.2 ค่าความแข็ง

เมื่อนำชิ้นงานมาศึกษาความแข็ง (hardness) ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ Shore D แสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

สาร	Hardness Shore D
PET A	37
PET A 0.5	38
PET A 1.0	40
PET A 3.0	44
PET A 5.0	50
PET B	38
PET C	42
PET C 1.0	45
PET C 1.0 ST	47
PET AB	38
PET ABC	39

จากตารางที่ 4.12 พบว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้มีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 37-42 อาจกล่าวได้ว่าองค์ประกอบของผลผลิตโกลโคไลซ์ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

สำหรับนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีความแข็งแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 39-50 เมื่อเทียบกับค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เตรียมได้คือ 37 โดยเมื่อปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของนาโนคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้น สำหรับนาโนคอมพอสิต PET C 1.0 ST ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อเทียบกับนาโนคอมพอสิต PET C 1.0 มีความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีกว่า เป็นผลมาจากการปรับปรุงพื้นผิว ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลลดลงการจับตัวกันจึงลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลผลิตไทลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไทลโคไลซิสมีองค์ประกอบสามส่วน ได้แก่ ส่วนที่ละลายน้ำเย็นคือ มอนอเมอร์ของ BHET ที่มีไดเมอร์ผสมอยู่เล็กน้อย ส่วนที่ละลายน้ำร้อนคือ มอนอเมอร์ที่มีไดเมอร์ของ BHET ผสมอยู่มากขึ้น และส่วนที่ไม่ละลายน้ำเป็นสารประกอบของ ไตรเมอร์และโอลิโกเมอร์เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีไดเมอร์ ของ BHET ปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากเทคนิค GPC FT-IR และ DSC

5.1.2 สามารถเตรียมนาโนคอมพอสิตของไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไทลโคไลซ์ของขวดพีตซ์แล้วโดยวิธีปฏิกิริยาอินซิทูพอลิเมอไรเซชันได้ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM และ TEM พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมลงในนาโนคอมพอสิตเกิดการเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากธรรมชาติเคมีทางพื้นผิวทำให้มีแนวโน้มเกิดการเกาะกลุ่มกันเองซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการปรับปรุงผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกรดสเตียริก

5.1.3 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต พบว่าเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิหลอมเหลวลดลง เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดการเกาะกลุ่ม เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลทำให้ปริมาณผลึกลดลง แต่ยังมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงเนื่องจากสมบัติการทนความร้อนที่ดีของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่านาโนคอมพอสิตทุกสูตรแสดงการปรากฏของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสและผลึกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เมื่อคำนวณค่าพลังงานความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าปริมาณผลึกของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลงและอุณหภูมิหลอมเหลวของนาโนคอมพอสิตมีค่าต่ำกว่าของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตซึ่งสามารถยืนยันได้ จึงสามารถกล่าวได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลทำให้มีปริมาณผลึกต่ำ

5.1.4 เมื่อนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิตที่ได้ไปขึ้นรูปและศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น นาโนคอมพอสิตมีความแข็งแรงมากขึ้นแต่ก็ทำให้เกิดความเปราะเพิ่มขึ้น

5.1.5 อัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมนาโนคอมพอสิต คือ นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำและใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปรับปรุงการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้วิธีการเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์

5.2.2 ปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปโดยอาจใช้กระบวนการอื่นหรือสารเติมแต่งเพื่อช่วยลดความเปราะ

รายการอ้างอิง

- [1] พัทธมน์ จันทิวาเจริญ. การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวดPETใช้แล้ว, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [2] Scheirs, J., and Timothy, E. Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [3] ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2549.
- [4] เวฬุรีย์ ทองคำ. สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อฆ่าเชื้อโรค. [ออนไลน์]. 2550.
แหล่งที่มา: <http://dcool.igetweb.com/?mo=3&art=332708> [2553, มีนาคม 5]
- [5] Kumar, A.P., Depan, D., Tomer, S.N., and Singh, R.P. Nanoscale particles for polymer degradation and stabilization-Trends and future perspectives. Progress in Polymer Science 34 (2009): 479-515.
- [6] Giraldi, A.L., Bizarria, M.T., and Silva, A.A. Effect of extrusion conditions on the properties of recycled poly(ethylene terephthalate)/nanoclay nanocomposites prepared by a twin screw extruder. Journal of Applied Polymer Science 108 (2008): 2252-2259.
- [7] Cheng, W.H., Kao, C.Y., and Wan, B.Z. Investigation of catalytic glycolysis of poly(ethylene terephthalate) by differential scanning calorimetry. Thermochemica Acta 292 (1997): 95-104.
- [8] Atsushi, T., and Miko, C. The suppression of strain induced crystallization in PET through submicron TiO₂ particle incorporation. Polymer 45 (2004): 6645-6654.

- [9] Han, K., and Yu, M. Study of the preparation and properties of UV-blocking fabrics of a PET/TiO₂ nanocomposite prepared by in-situ polycondensation. Journal of Applied Polymer Science 100 (2006): 1588-1593.
- [10] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการรีไซเคิลพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [11] กิตติภูมิ กลับดี และ ชีรศักดิ์ สรรพศิริ. การปรับปรุงวิธีการผลิตพลาสติกผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [12] Alessandro, P., and Amabile, P. Recycled poly(ethylene terephthalate) and its short glass fibers composites: effects of hydrothermal aging on the thermo-mechanical behavior. Polymer 45 (2004): 7995-8004.
- [13] Palova, S., and Sergio, P. Mechanical properties of propylene reinforced with recycled-PET fibers. Journal of Materials Processing Technology 143 (2003): 517-520.
- [14] Shukla, S.R., and Mathur, M.R. Action of alkali on polybutylene terephthalate and polyethylene terephthalate polyesters. Journal of Applied Polymer Science 75 (2000): 1097-1102.
- [15] Ligorati, F., Aglietti, G., and Nova, V.E. U.S. Patent 3,776,945, 1973.
- [16] Campanelli, J.R., Kamal, M.R., and Cooper, G. Kinetics of glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) melts. Journal of Applied Polymer Science 54 (1994): 1731-1740.
- [17] Xi, G., Lu, M.X., and Sun, C. Study on depolymerization of waste polyethylene terephthalate into monomer of bis(2-hydroxyethyl terephthalate). Polymer Degradation and Stability 87(2005): 117-120.

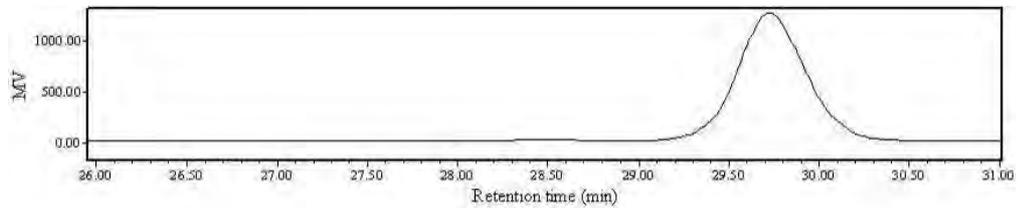
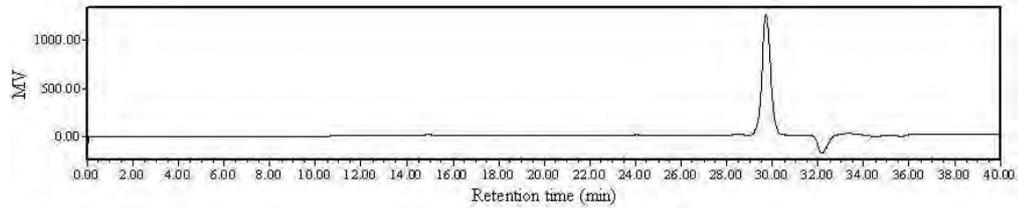
- [18] Ghaemy, M., and Mossaddegh, K. Depolymerisation of poly(ethylene terephthalate) fiber wastes using ethylene glycol. Polymer Degradation and Stability 90 (2005): 570-576.
- [19] Ikadious, N.E. Recycling of poly(ethylene terephthalate): Identification of glycolysis products. Journal of Elastomers and Plastics 32 (2000): 140-151.
- [20] Chen, J.W., and Chen, L.W. The glycolysis of poly(ethylene terephthalate). Journal of Applied Polymer Science 73 (1999): 35-40.
- [21] Baliga, S., and Wong, W.T. Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) recycled from post-consumer soft-drink bottles. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry 27 (1989): 2071-2082.
- [22] Kao, C.Y., Cheng, W.H., and Wan, B.Z. Investigation of catalytic glycolysis of poly(ethylene terephthalate) by differential scanning calorimetry. Thermochimica Acta 292 (1997): 95-104.
- [23] Pimpan, V., Sirisook, R., and Chuayjuljit, S. Synthesis of unsaturated polyester resin from post-consumer PET bottles: Effect of type of glycol on characteristics of unsaturated polyester resin. Journal of Applied Polymer Science 88 (2003): 788-792.
- [24] Thavornsetawat, T., Chuayjuljit, S., and Pimpan, V. Synthesis of plasticizer for PVC from terephthalic acid based on chemical recycling of post-consumer PET bottles. Journal of Scientific Research, Chulalongkorn University 27 (2002): 1-8.
- [25] Saravari, O., Vessabutr, R., and Pimpan, V. Synthesis of urethane oil from waste poly(ethylene terephthalate) bottles. Journal of Applied Polymer Science 05 (2007): 1802-1807.
- [26] Tomita, K. Studies on the formation of poly(ethylene terephthalate): 1. Propagation of bis(2-hydroxyethyl) terephthalate. Polymer 14 (1973): 50-54.

- [27] Wu, X.W., and Yang, D.S. Preparation and characterization of steared-Capped Titanium Dioxide Nanoparticles. Journal of Colloid and Interface Science 222 (2000): 37-40.
- [28] Murthy, N.S., Zero, K., and Minor, H. Resolution Enhancement of Polymer X-ray Diffraction Scans Using Maximum Entropy Methods: Poly(ethylene terephthalate). Macromolecules 27 (1994): 1484-1488.
- [29] Joan, F., Joaquim, M., and Eduard, C., Poly(ethylene terephthalate) mixtures formed by milling. Materials Research Bulletin 34 (1999): 157-165.

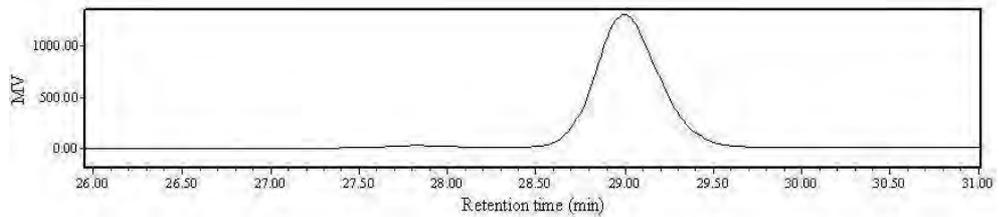
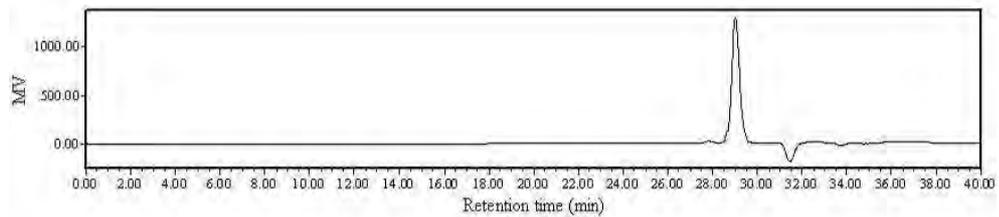
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

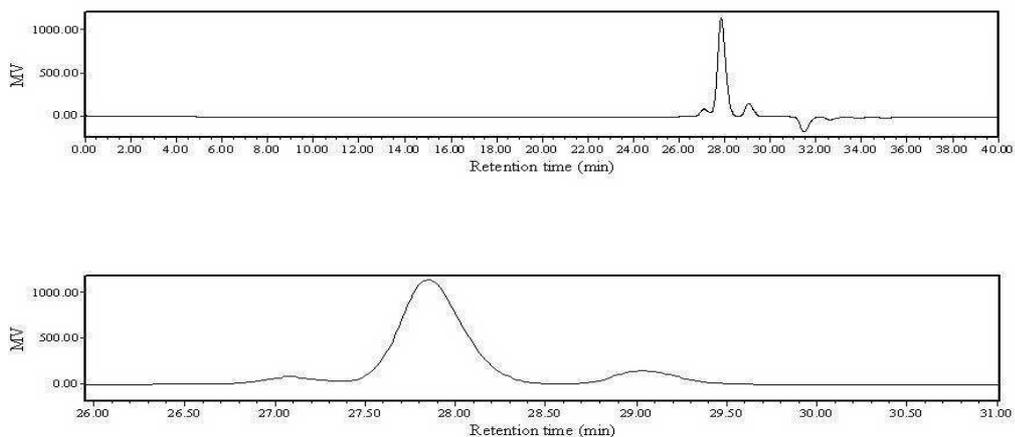
ก.1 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์



ก.1-1 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น



ก.1-2 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำร้อน



ก.1-3 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตโกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

ก.2 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบของผลผลิตโกลโคไลซ์

ใช้ขวดเพ็ต 75 กรัม ได้ผลผลิตโกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น 27.27 กรัม

ใช้ขวดเพ็ต 75 กรัม ได้ผลผลิตโกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำร้อน 39.09 กรัม

ใช้ขวดเพ็ต 75 กรัม ได้ผลผลิตโกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ 8.00 กรัม

$$\text{เปอร์เซ็นต์ Yield ของ BHET monomer (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของ BHET มอนอเมอร์ที่โกลโคไลซ์ได้}}{\text{น้ำหนักของ BHET ที่คิดได้ตามทฤษฎี}} \times 100$$

BHET ตามทฤษฎี

ใช้ PET 75 กรัม คิดเป็น PET 75/192 = 0.39 โมล

เนื่องจากจำนวนโมลของ PET เท่ากับจำนวนโมลของ BHET

ดังนั้น BHET ตามทฤษฎี คือ $0.39 \times 254 = 99.22$ กรัม

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ Yield ของ BHET monomer (\%)} &= (27.27 / 99.22) \times 100 \\ &= 27.48 \end{aligned}$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์/ Yield ของ BHET monomer เท่ากับ 27.48

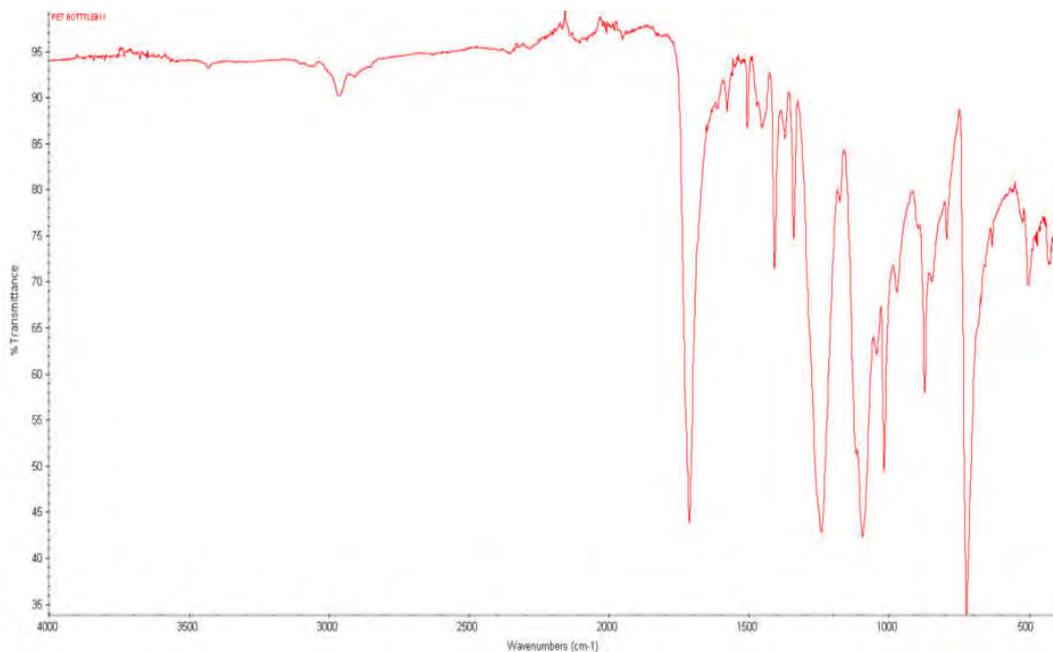
ก.3 การคำนวณปริมาณโพลิเอสเตอร์

$$\text{ปริมาณโพลิเอสเตอร์(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของ BHET มอนอเมอร์ที่ไกลโคไลซ์ได้}}{\text{น้ำหนักทั้งหมดของมอนอเมอร์และโพลิเอสเตอร์รวมกัน}} \times 100$$

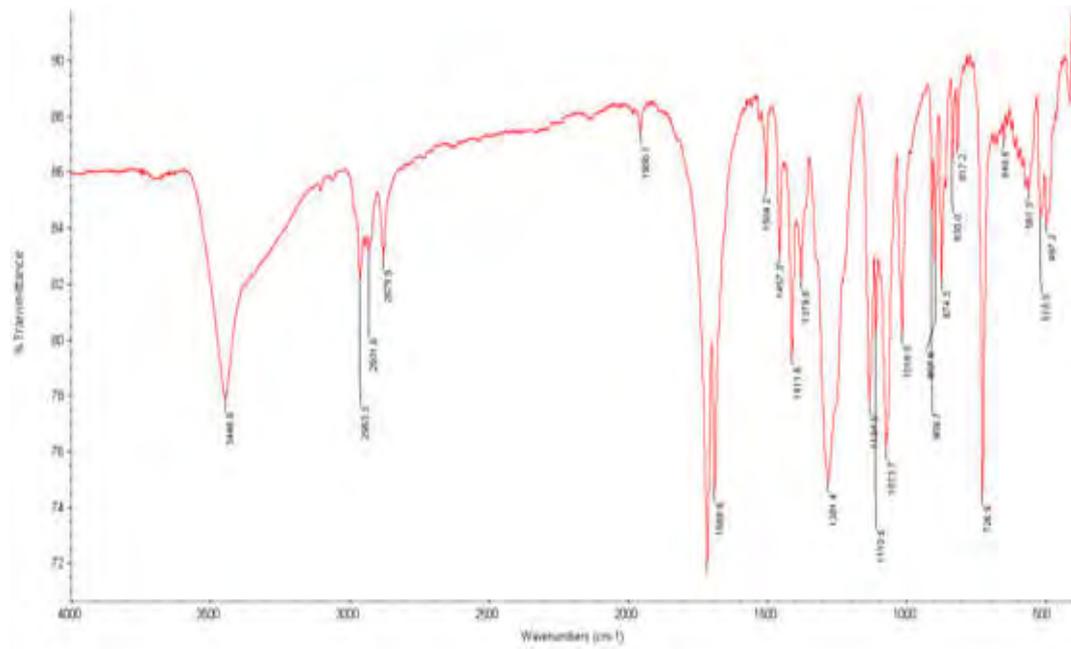
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโพลิเอสเตอร์ (\%)} &= (39.09 / 76.36) \times 100 \\ &= 51.19 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณโพลิเอสเตอร์ เท่ากับ 51.19

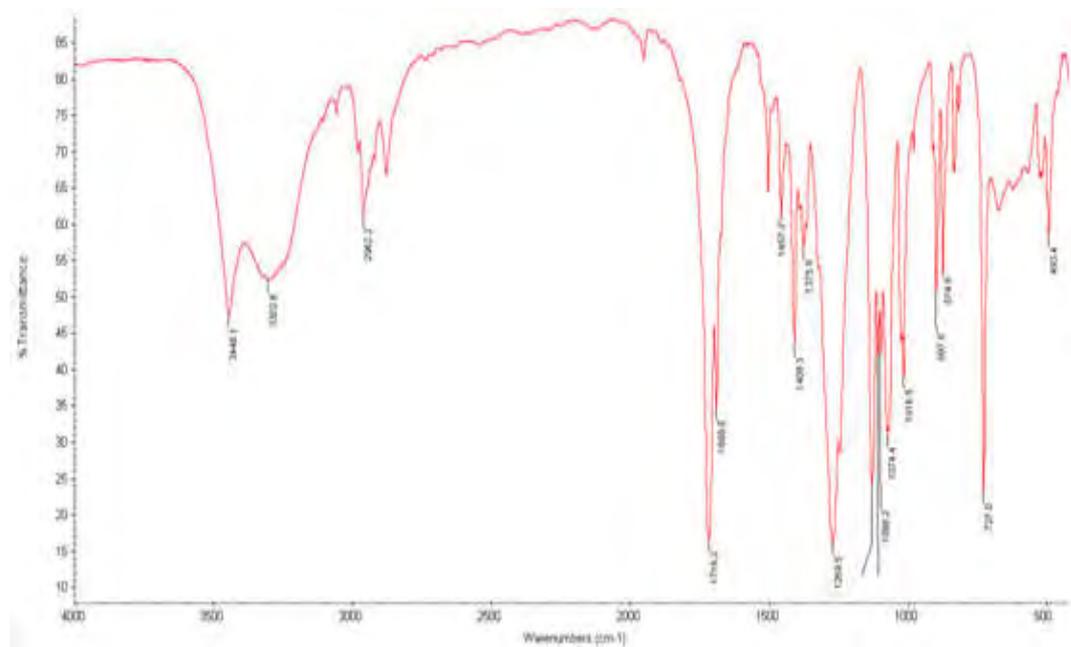
ก.4 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์



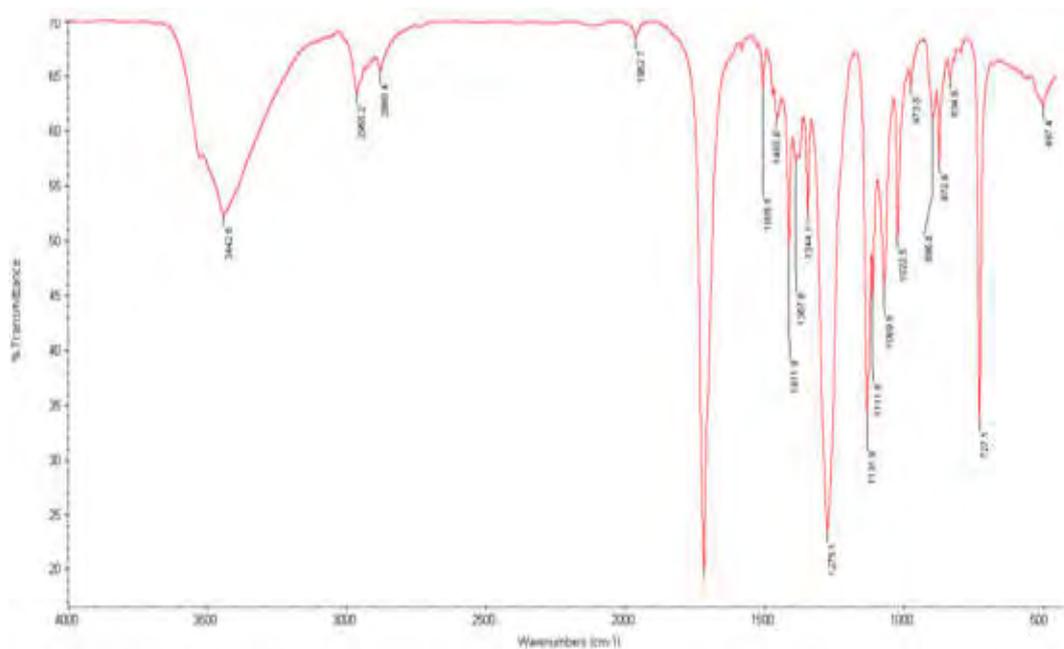
ก.4-1 FT-IR สเปกตรัมของขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว



ก.4-2 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตโพลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำเย็น

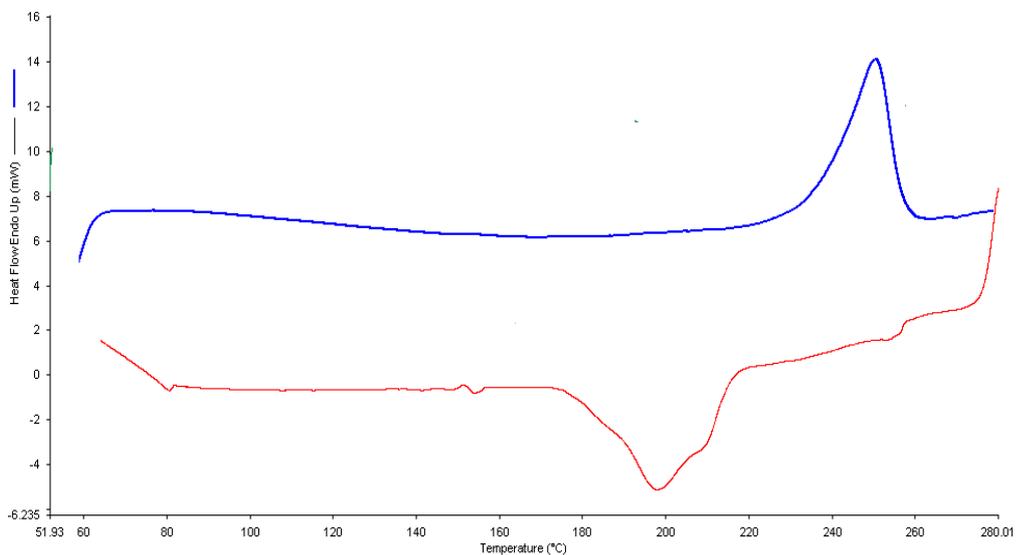


ก.4-3 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตโพลโคไลซ์ส่วนที่ละลายน้ำร้อน

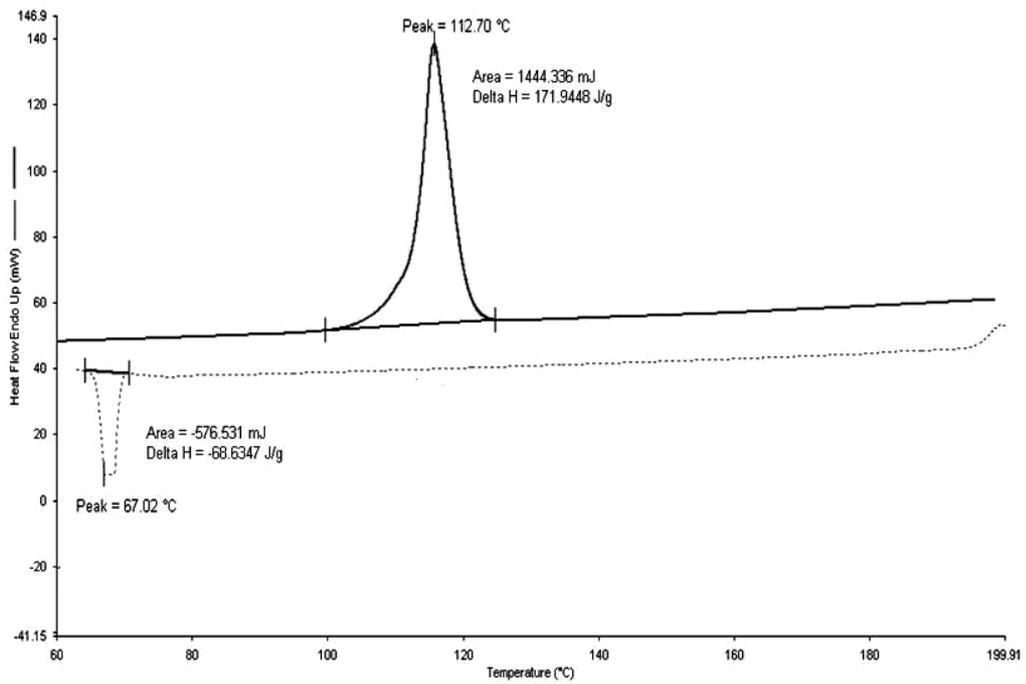


ก.4-4 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

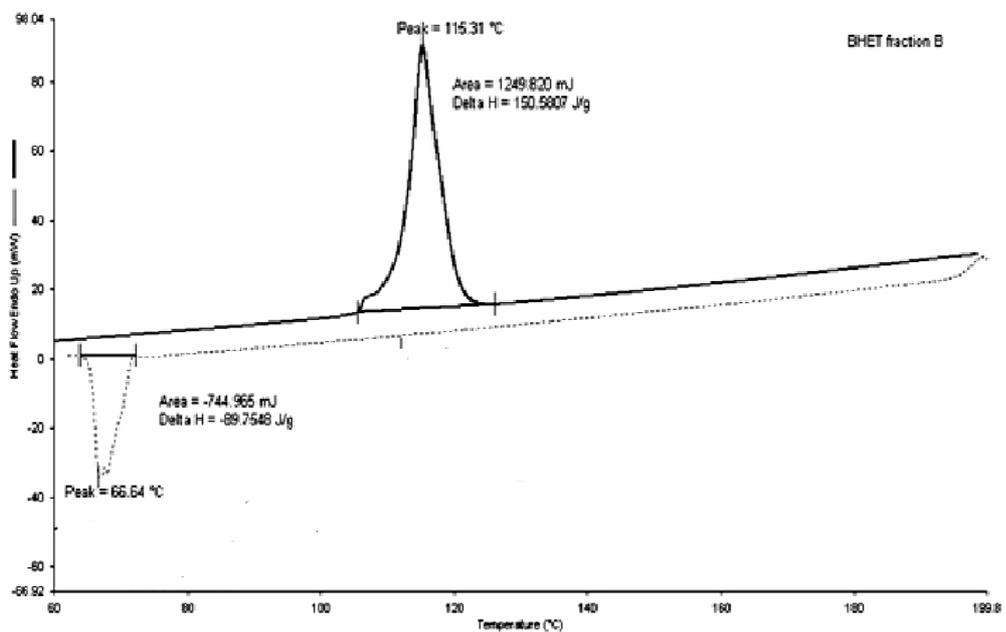
ก.5 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์



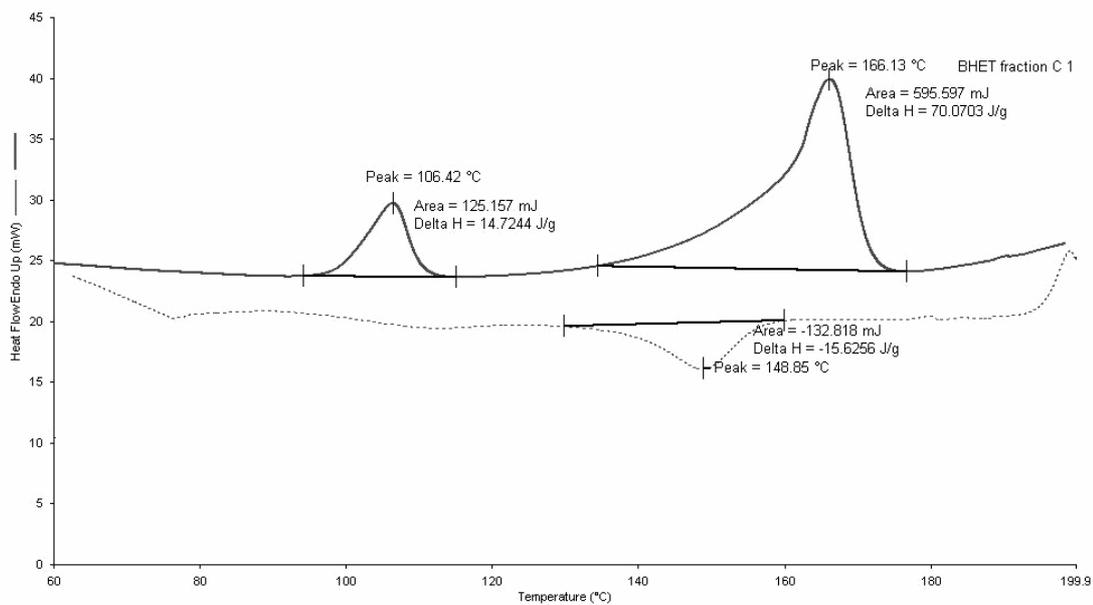
ก.5-1 DSC เทอร์โมแกรมของขวดเพ็ดที่ใช้แล้ว



ก.5-2 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซิสส่วนที่ละลายน้ำเย็น



ก.5-3 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซิสส่วนที่ละลายน้ำร้อน



ก.5-4 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

ภาคผนวก ข

ข.1 คำนวณการเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

ตัวอย่างการคำนวณ

นาโนคอมพอสิต PET 0.5

จากผลผลิตไกลโคไลซ์น้ำหนัก 120 กรัม

สามารถเตรียม PET ได้ 98.15 กรัม

PET 99.5 กรัม ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม

PET 98.15 กรัม ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ $(0.5 \times 98.15) / 99.5$
 $= 0.493216$ กรัม

ดังนั้น จากผลผลิตไกลโคไลซ์น้ำหนัก 120 กรัม สามารถเตรียม PET ได้ 98.15 กรัม

โดยใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.493216 กรัม

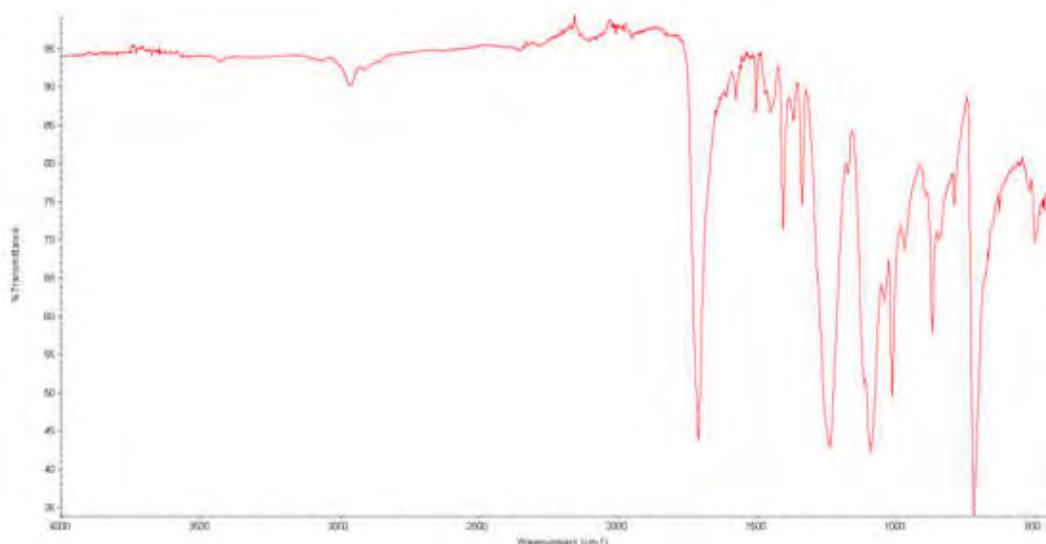
ข.2 MFI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

ครั้งที่	PET commercial		PET A		
	250°C/2.16kg	245°C/ 1.00 kg	230° C/2.16 kg	235° C/2.16 kg	240°C/ 1.00 kg
1	25.4	4.623	4.714	16.46	4.426
2	24.112	4.489	5.238	16.645	4.538
3	23.678	4.531	5.864	20.327	4.115
4	21.664	4.847	8.045	20.774	4.259
5	20.104	4.956	10.129	24.159	4.278
6	28.182	4.268	9.893	22.2174	4.651
7	26.76	4.555	4.868	25.118	4.005
8	-	4.567	4.864	-	4.089
เฉลี่ย	24.27	4.504	7.0	20.83	4.195
SD	2.808	0.213	2.307	3.373	0.228

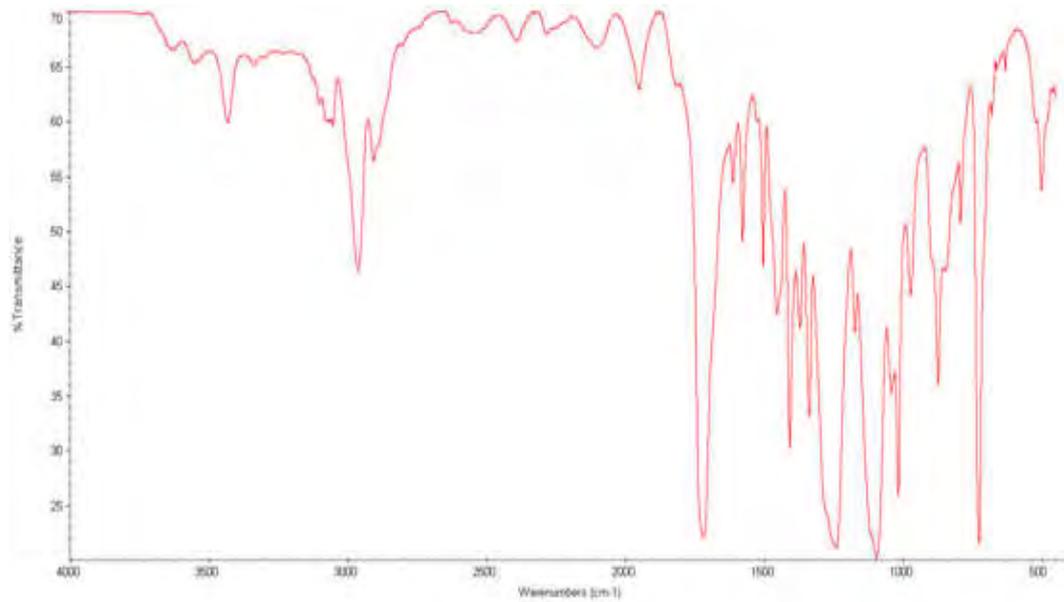
ข.2 MFI ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ต่อ)

ครั้งที่	PET B			PET C		
	235°C/ 2.16 kg	240°C/ 2.16 kg	240°C/ 1.00 kg	240°C /2.16 kg	240°C/ 1.00 kg	245°C/ 1.00 kg
1	1.982	8.564	2.256	2.832	0.956	4.614
2	1.899	7.689	2.564	3.160	1.084	4.594
3	1.802	8.125	2.732	2.860	1.095	4.345
4	1.879	7.953	2.157	3.380	1.156	4.584
5	1.756	6.655	2.159	3.364	1.212	4.771
6	2.500	8.764	2.427	3.008	1.547	4.628
7	2.373	8.148	2.201	3.072	1.163	4.386
8	2.556	6.594	2.158	3.344	1.088	4.081
9	2.670	6.954	2.298	-	-	4.235
10	2.747	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	2.8	7.72	2.301	3.12	1.1	4.5
SD	0.389	0.806	0.205	0.282	0.173	0.225

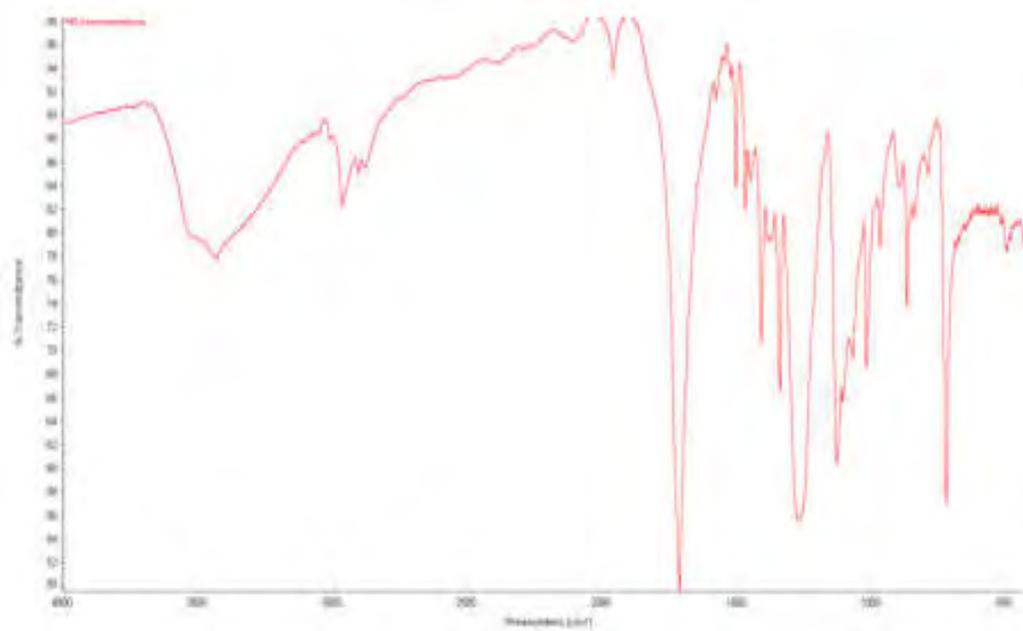
ข.3 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์



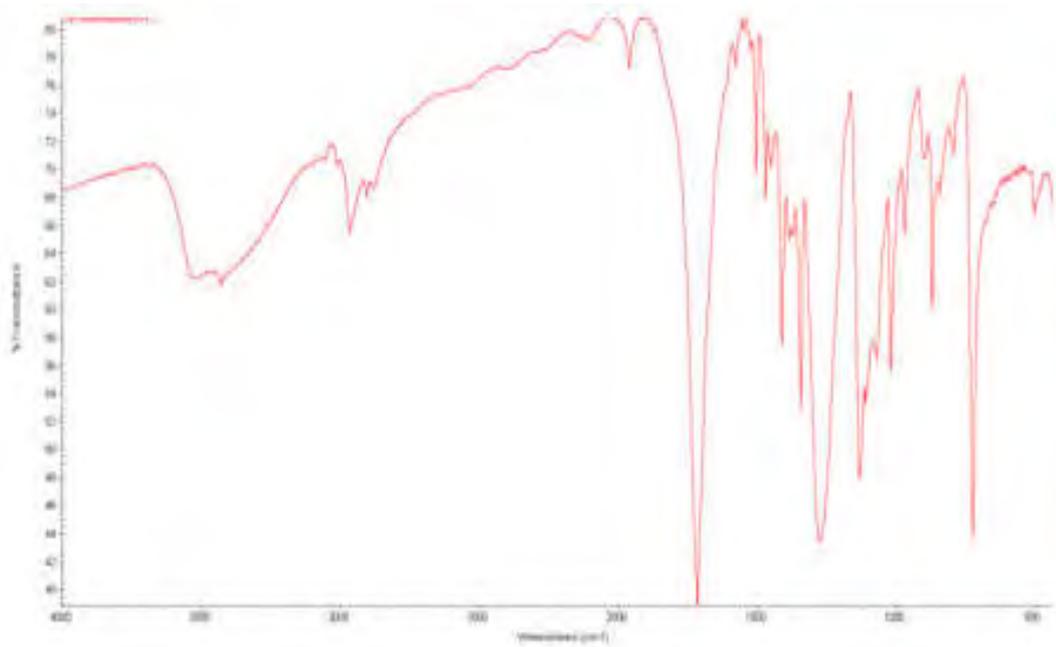
ข.3-1 FT-IR สเปกตรัมของขวดเปิดที่ใช้แล้ว



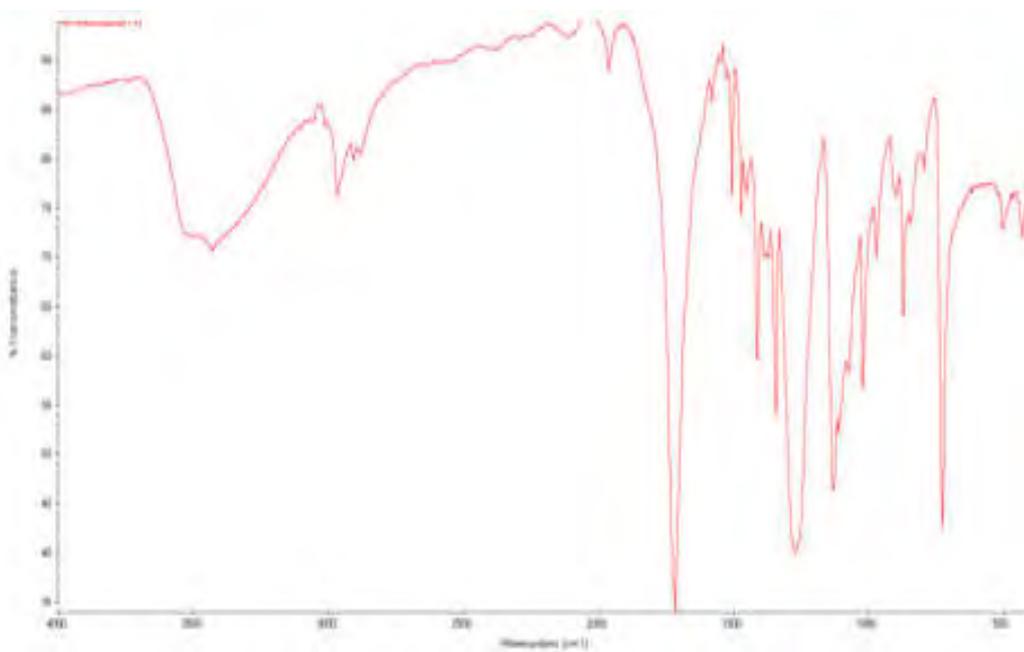
ข.3-2 FT-IR สเปกตรัมของเม็ดเปิดทางการค้า



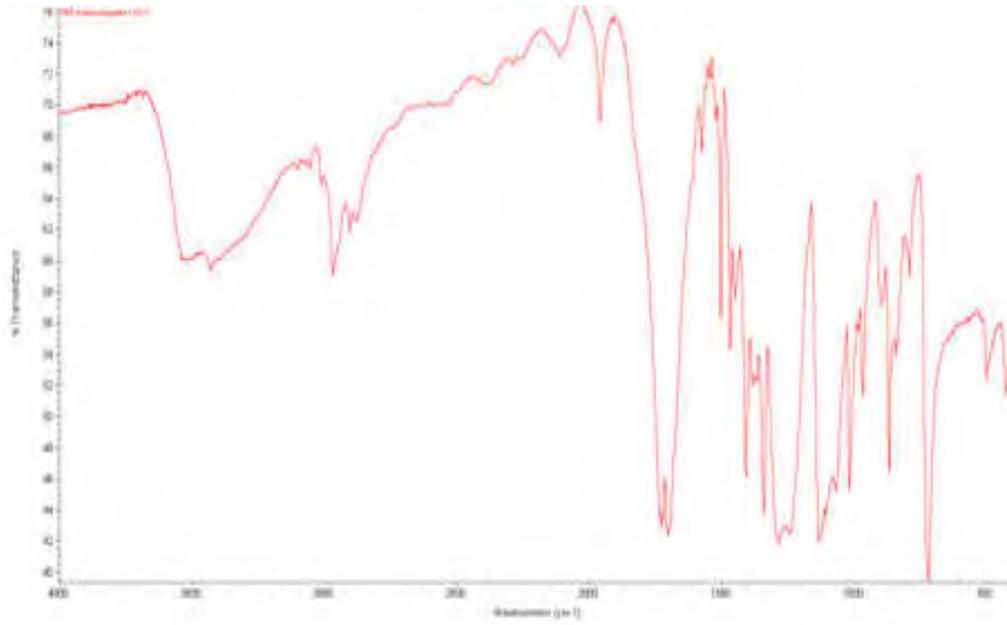
ข.3-3 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A



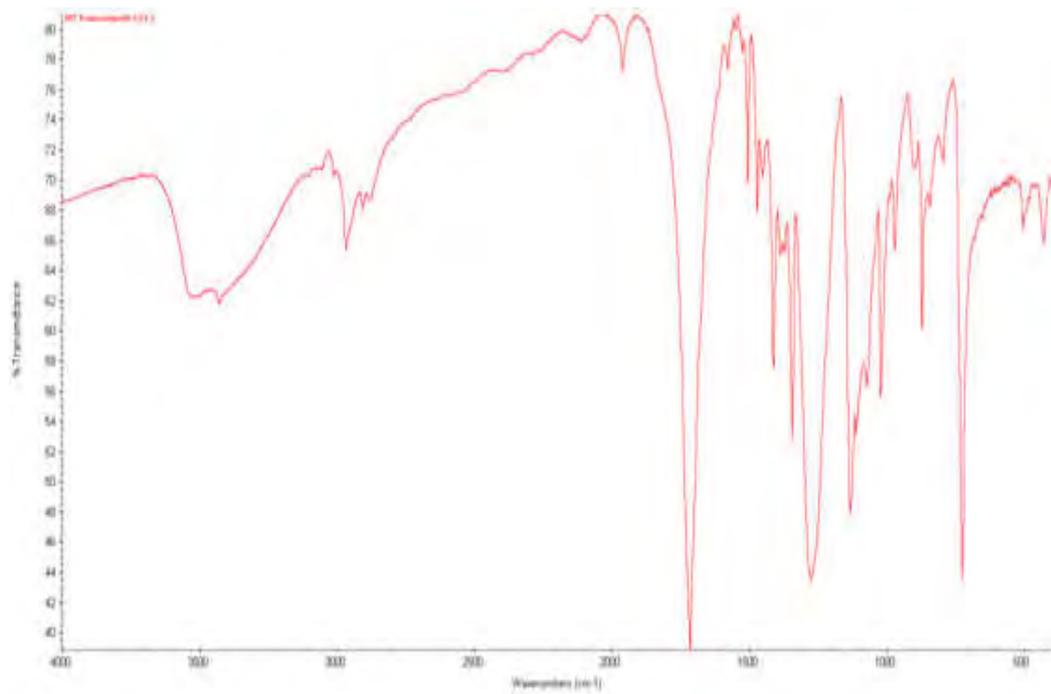
ข.3-4 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET A 0.5



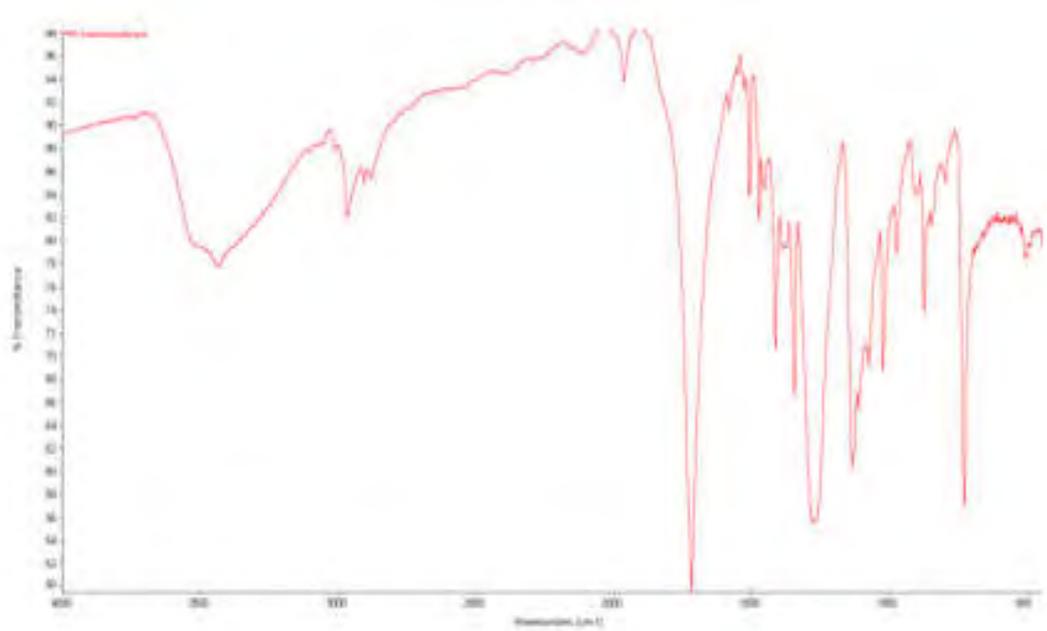
ข.3-5 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET A 1.0



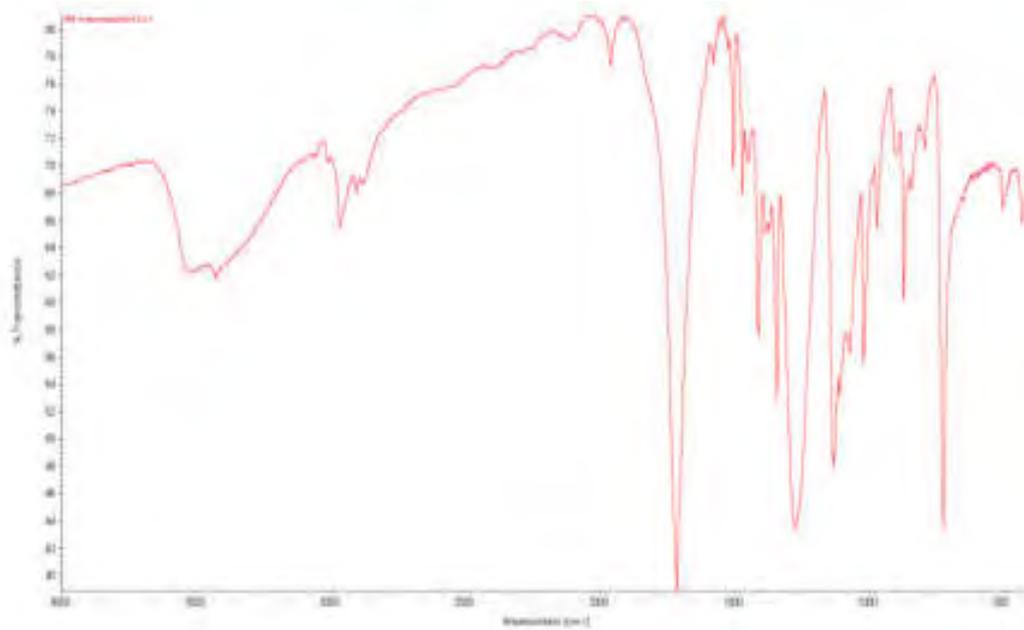
ข.3-6 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET A 3.0



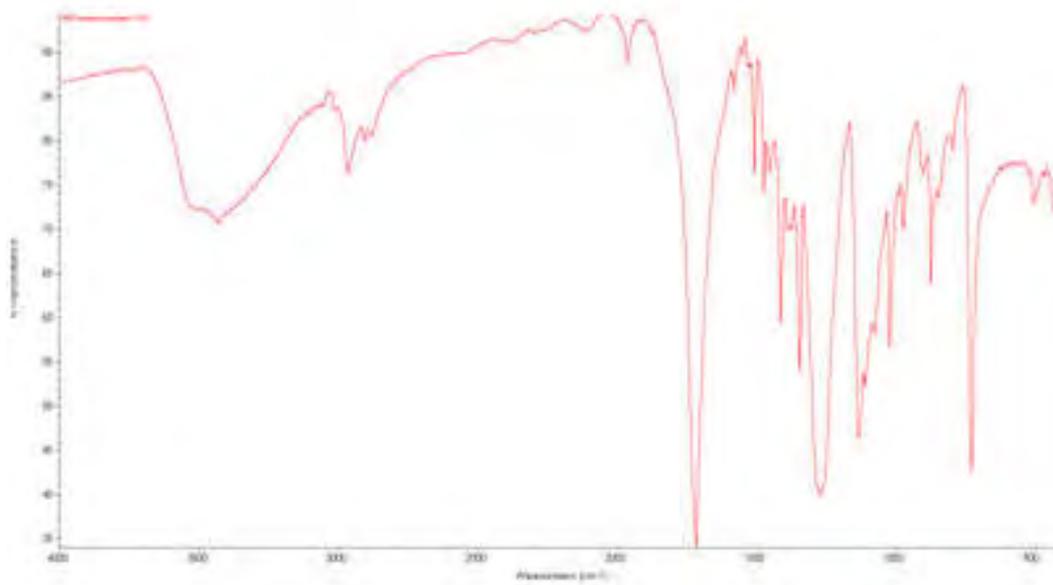
ข.3-7 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET A 5.0



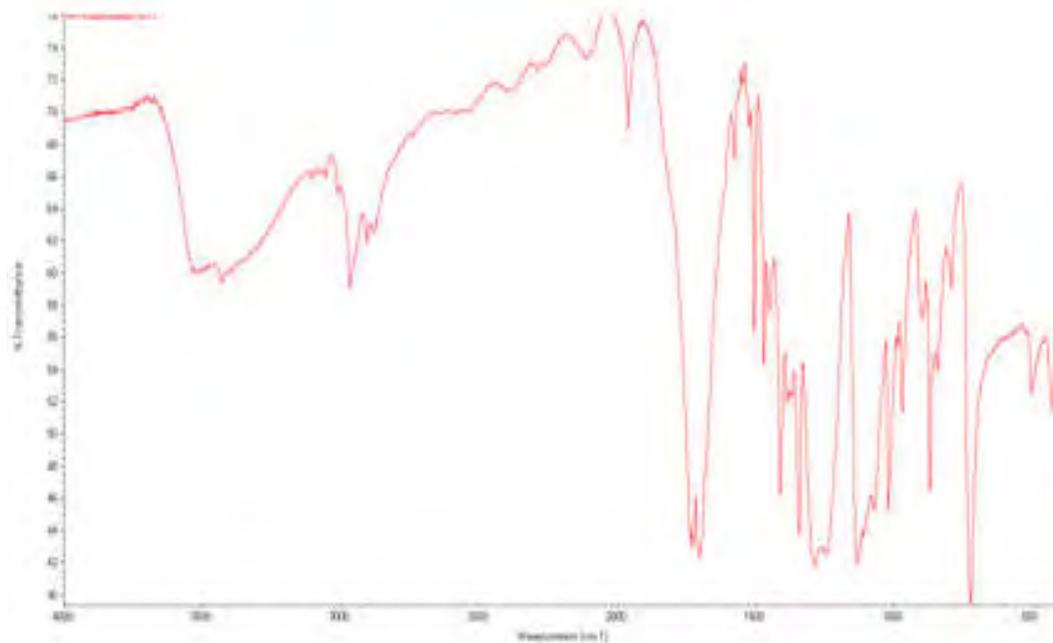
ข.3-8 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET B



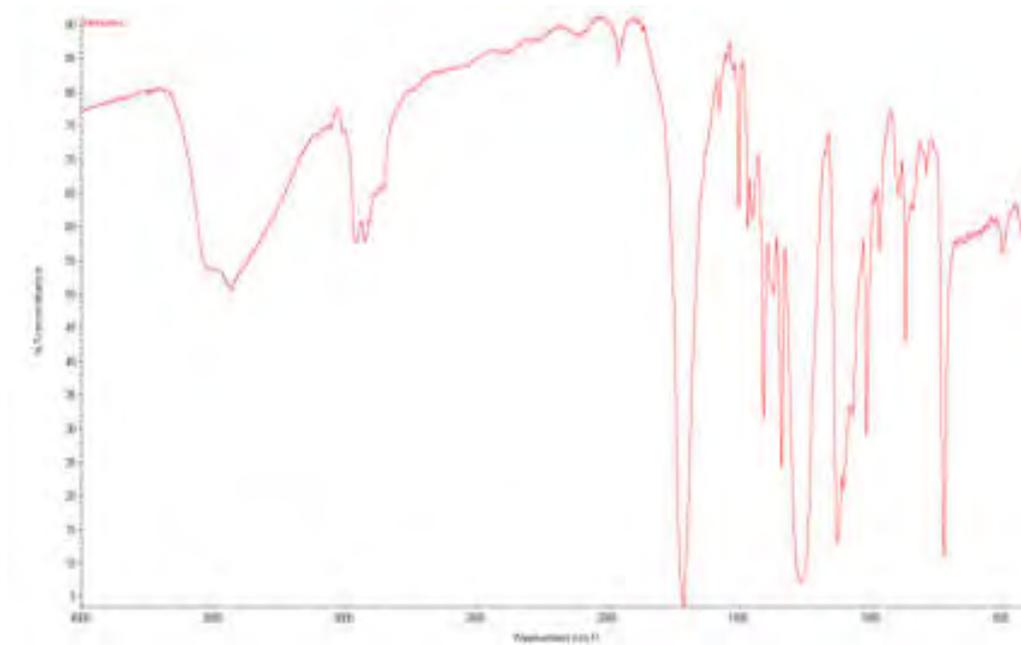
ข.3-9 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET B 0.5



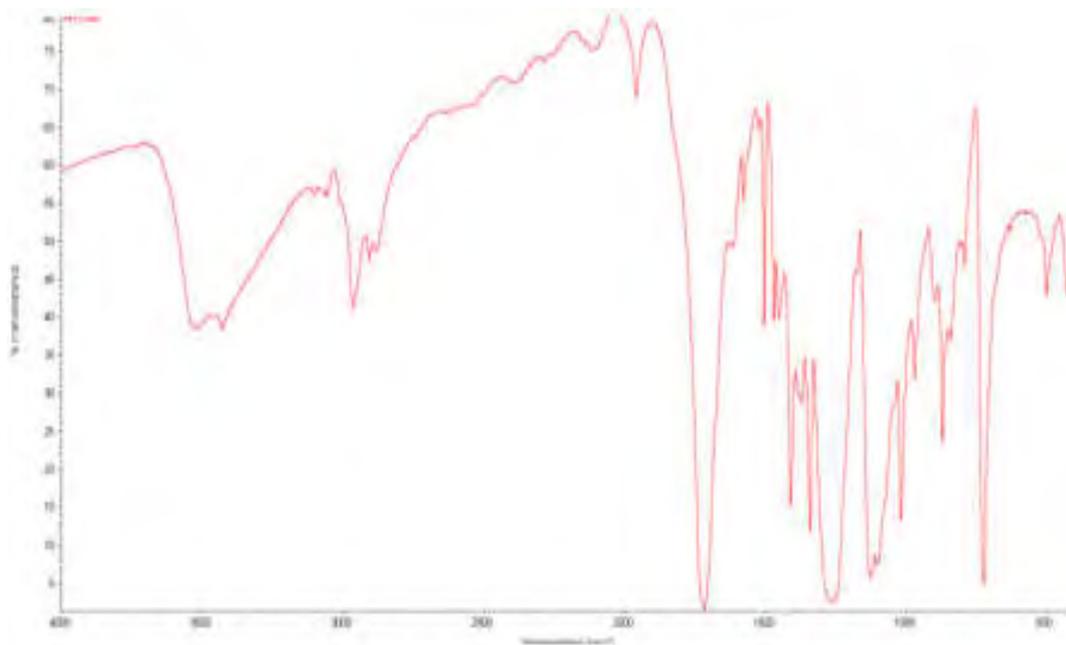
ข.3-10 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET B 1.0



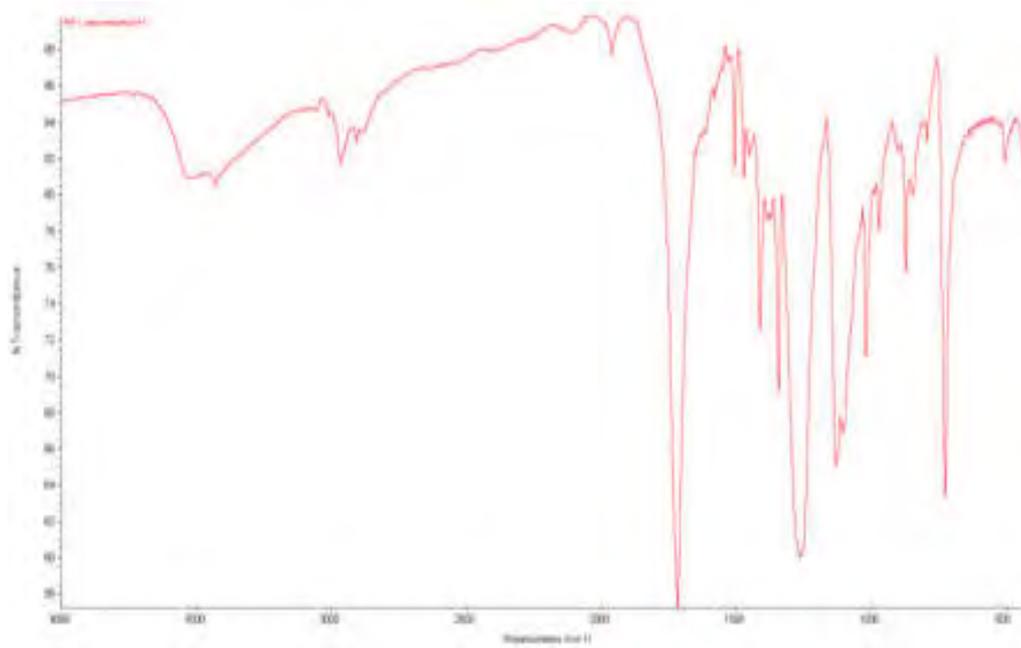
ข.3-11 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET B 3.0



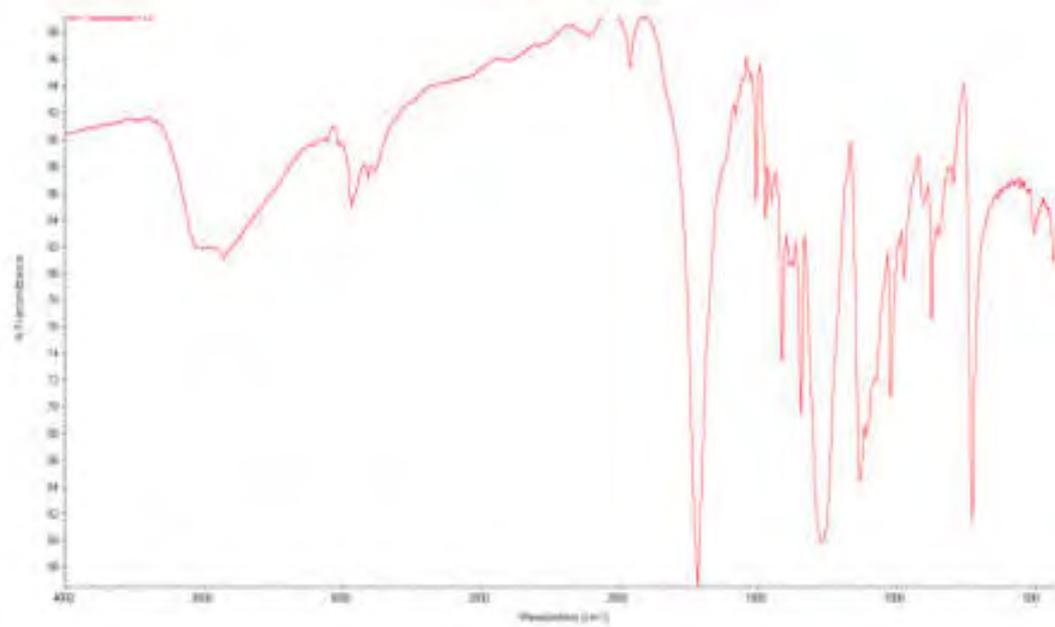
ข.3-12 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET B 5.0



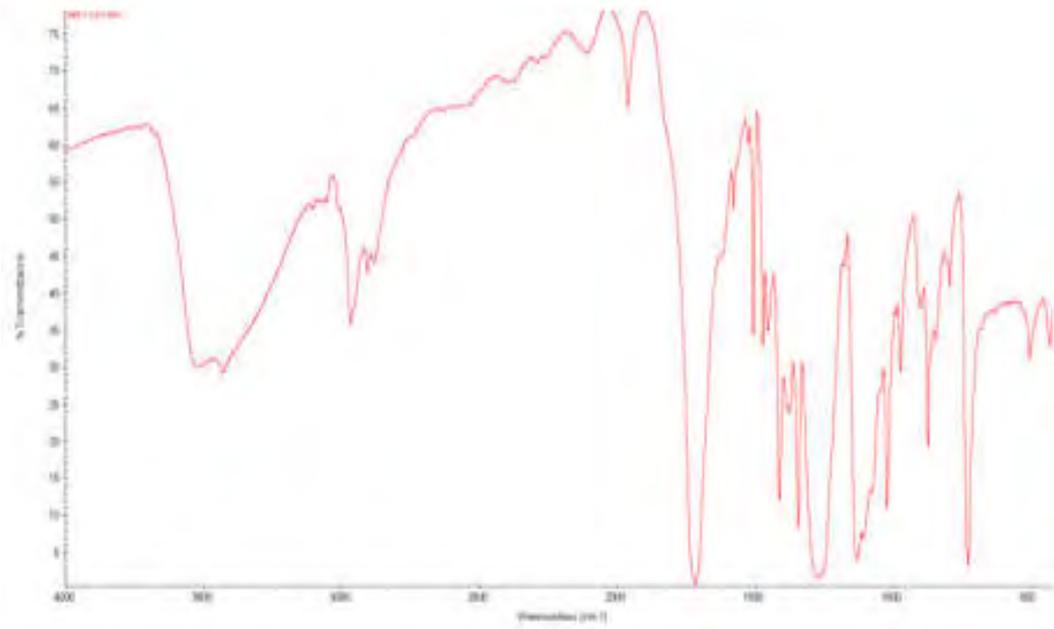
ข.3-13 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET C



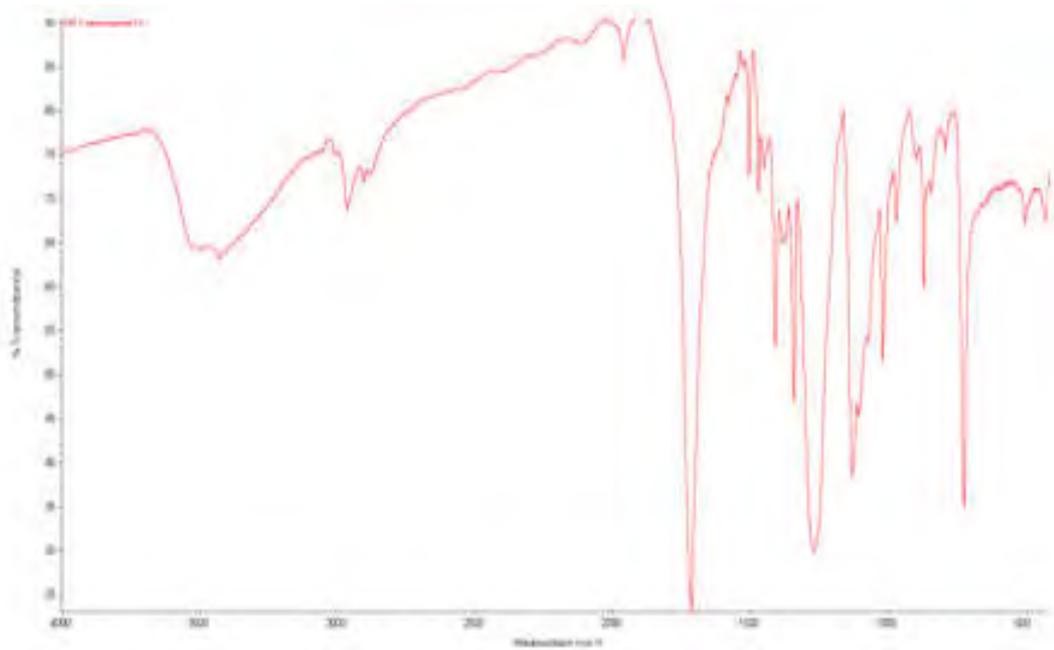
ข.3-14 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมพอลิเมอร์ PET C 0.5



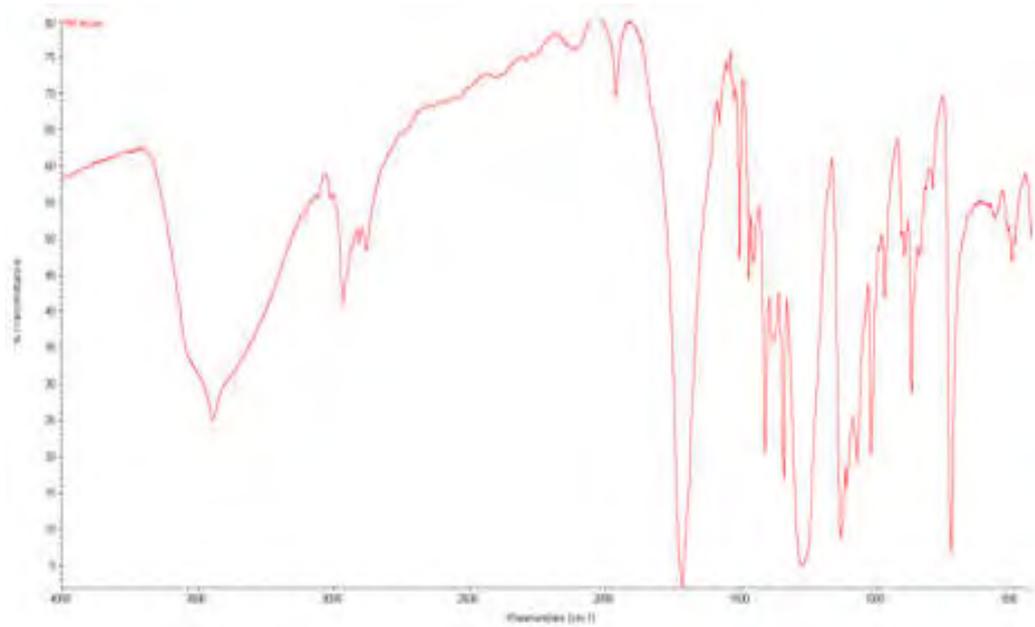
ข.3-15 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมพอลิเมอร์ PET C 1.0



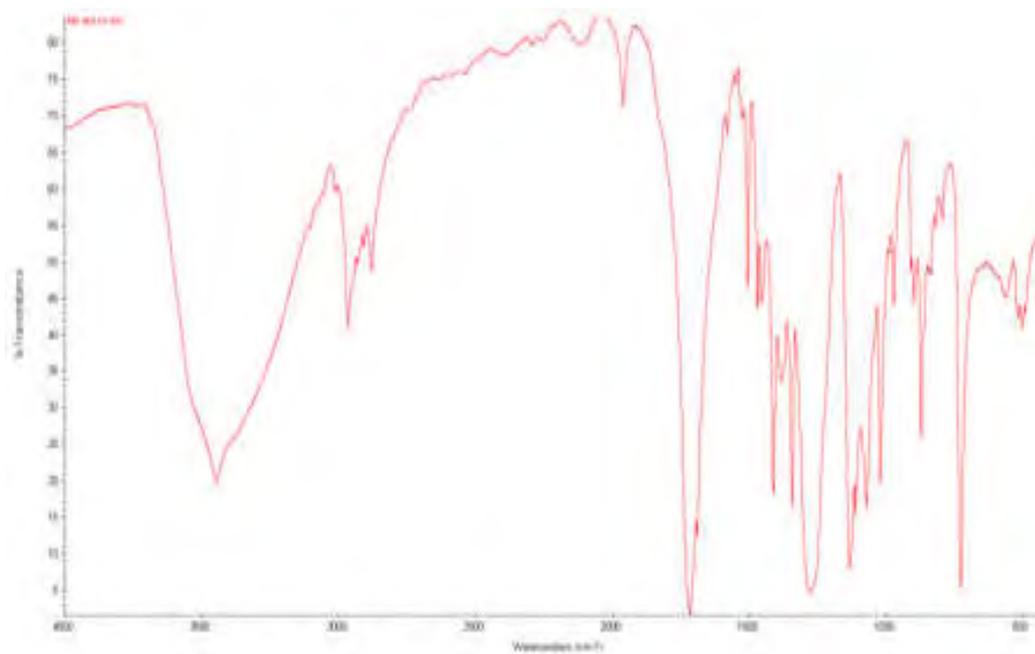
ข.3-16 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมพอลิเมอร์ PET C 3.0



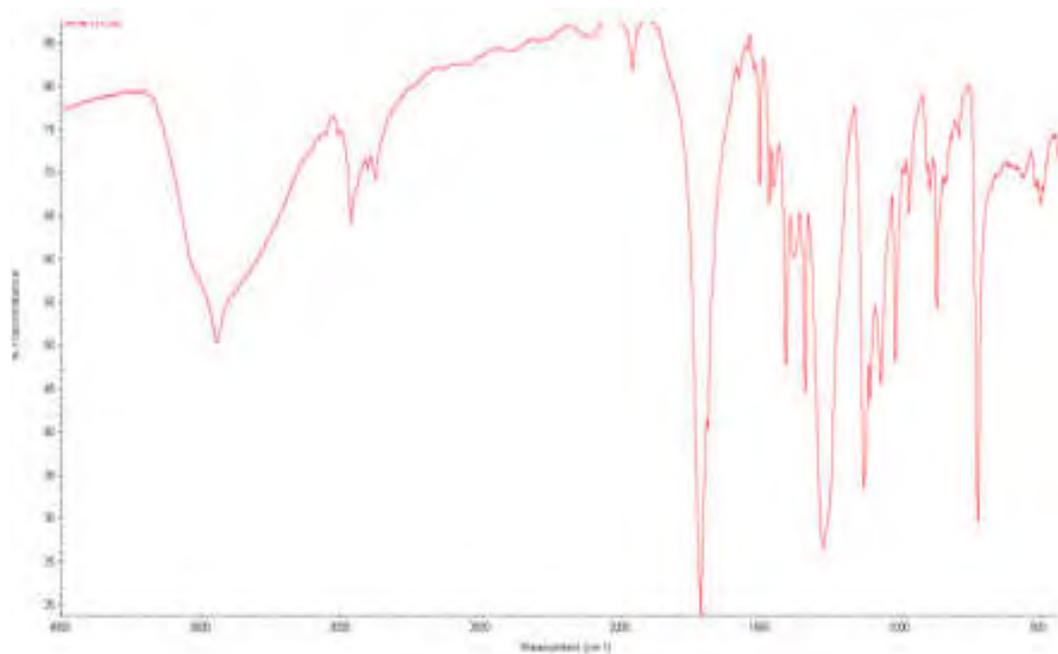
ข.3-17 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมพอลิเมอร์ PET C 5.0



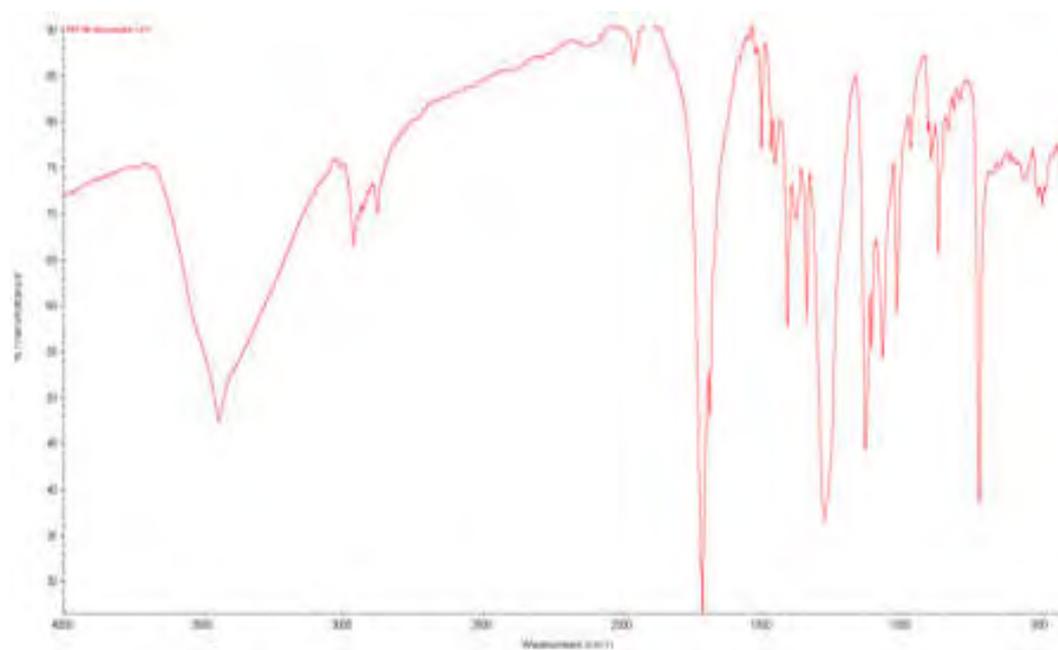
ข.3-18 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET AB



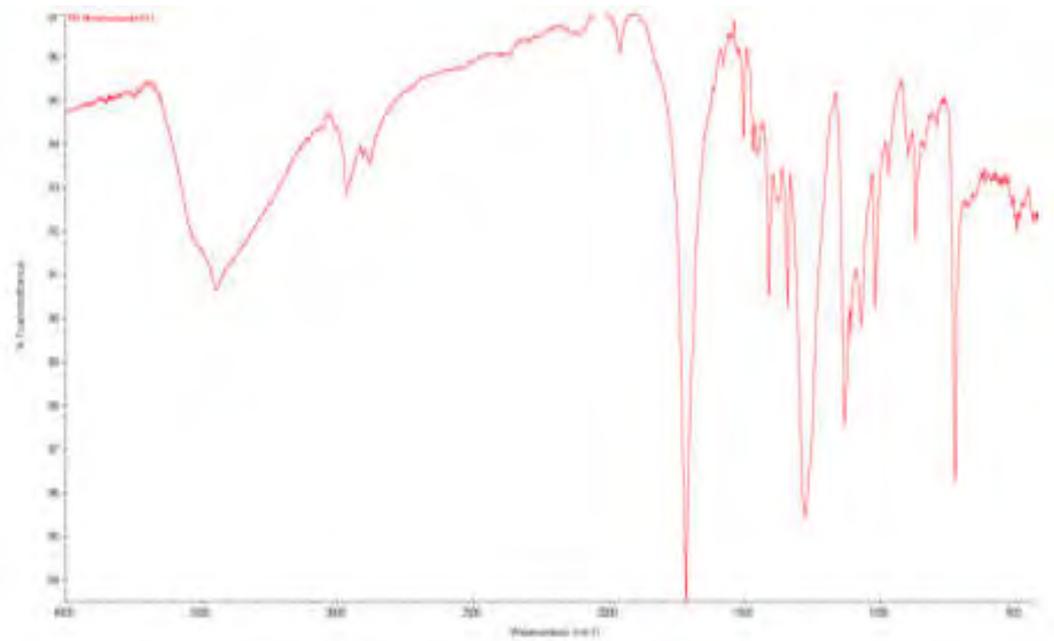
ข.3-19 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET AB 0.5



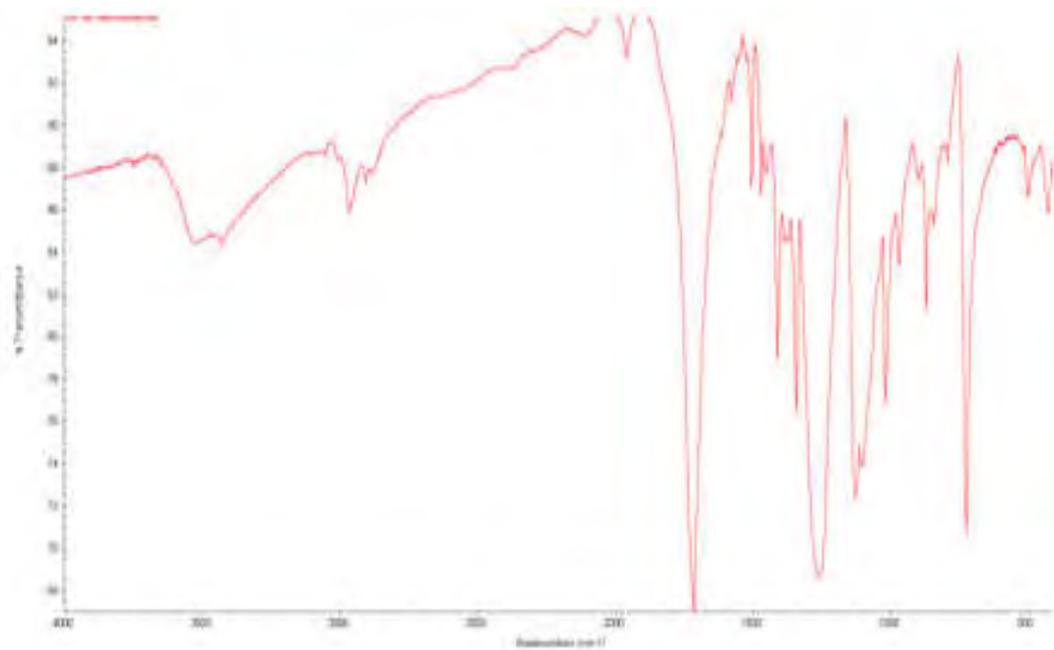
ข.3-20 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET AB 1.0



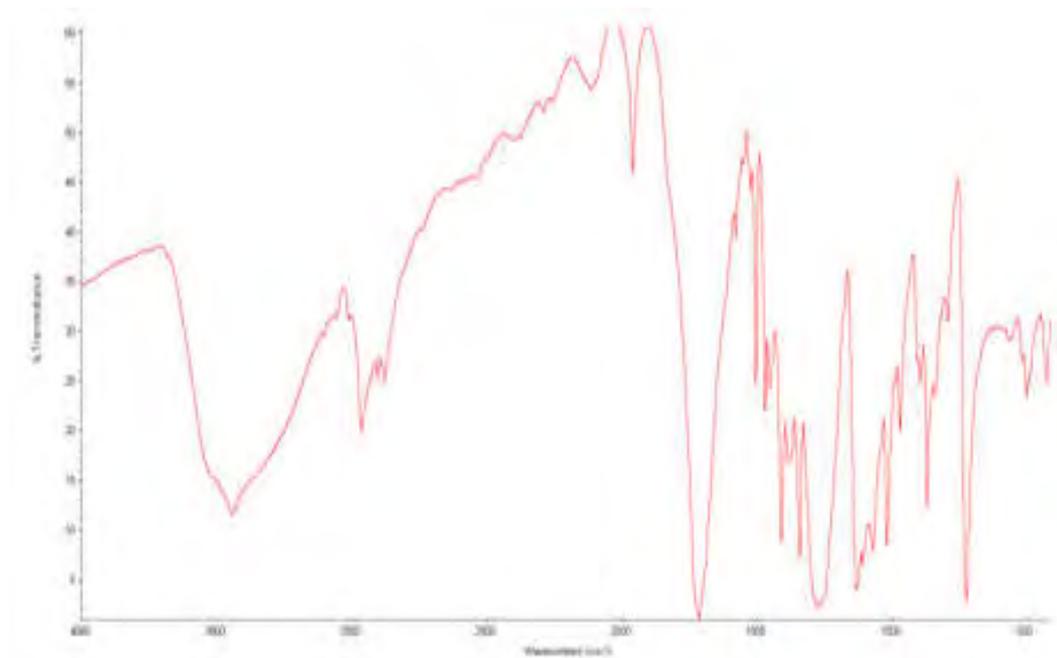
ข.3-21 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET AB 3.0



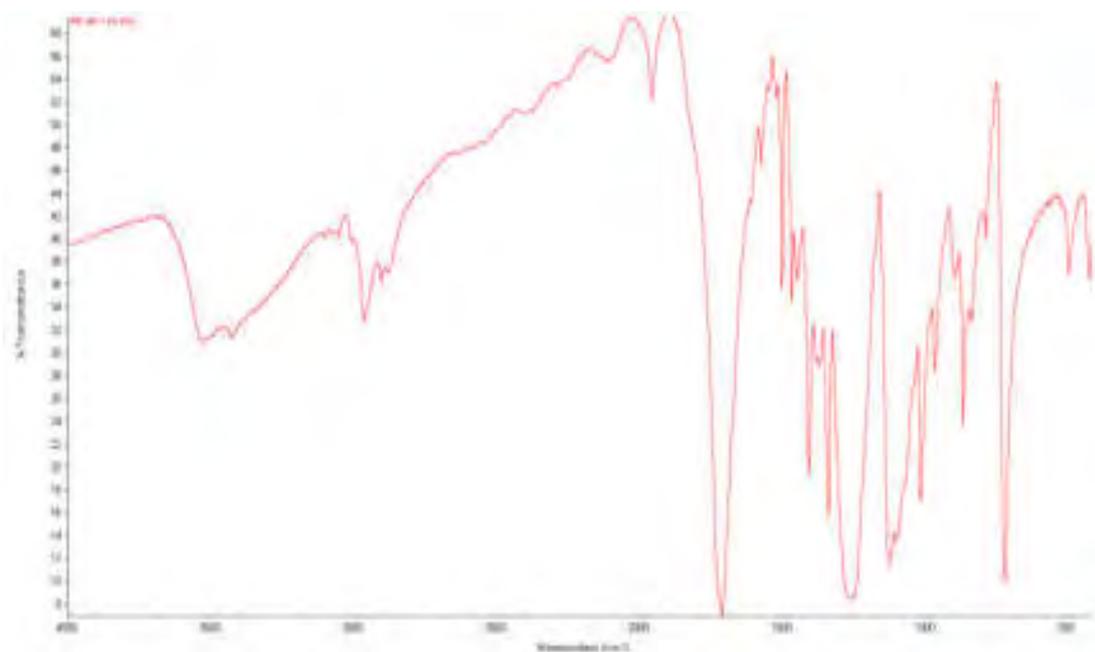
ข.3-22 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET AB 5.0



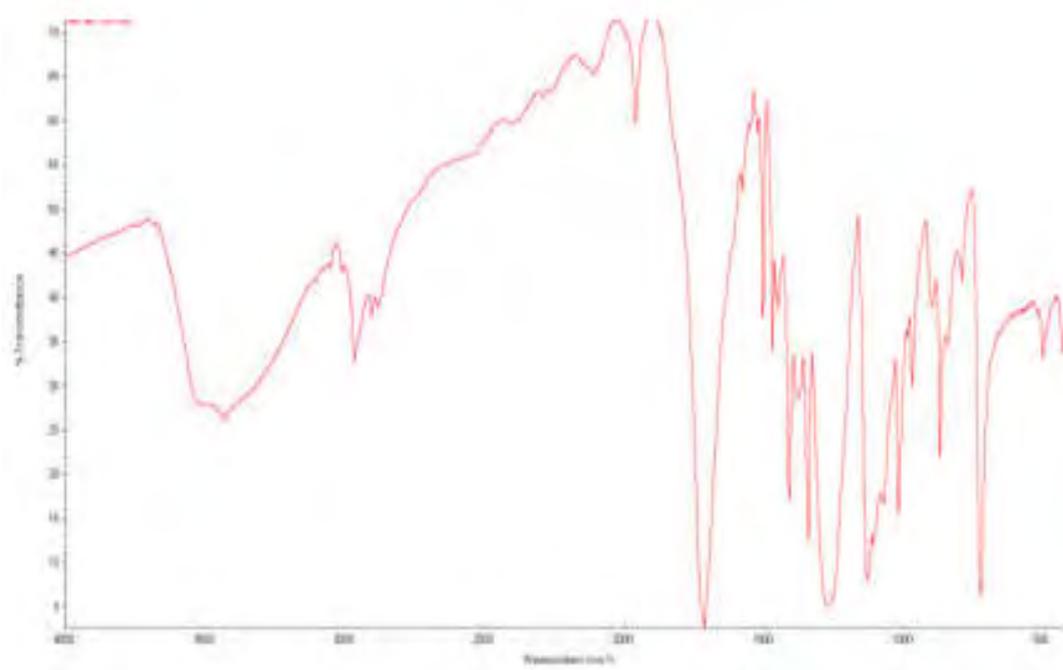
ข.3-23 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET ABC



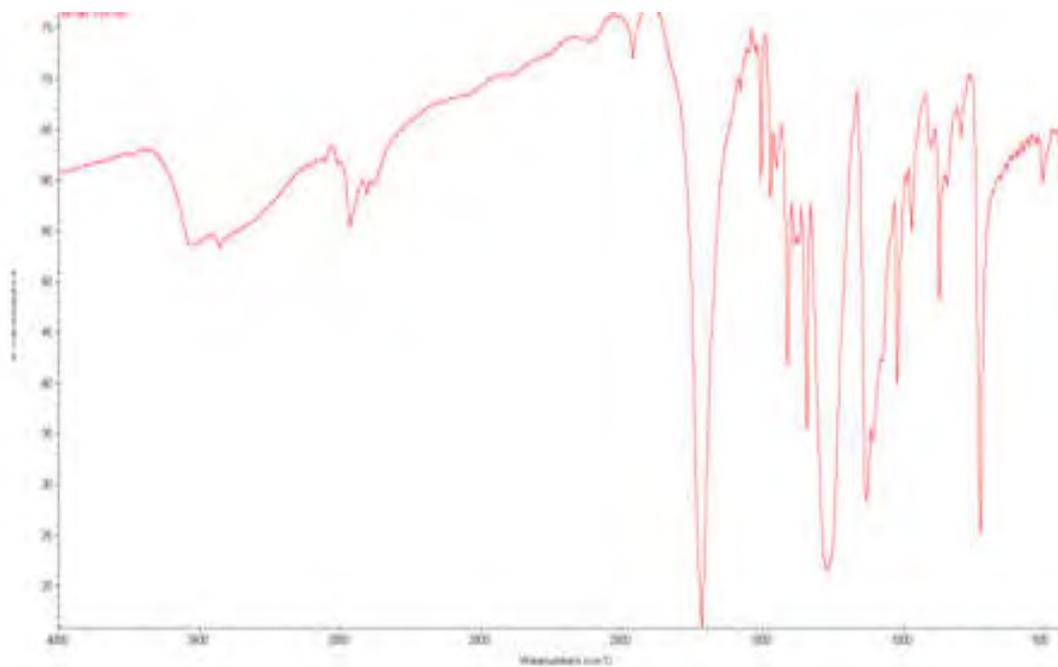
ข.3-24 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 0.5



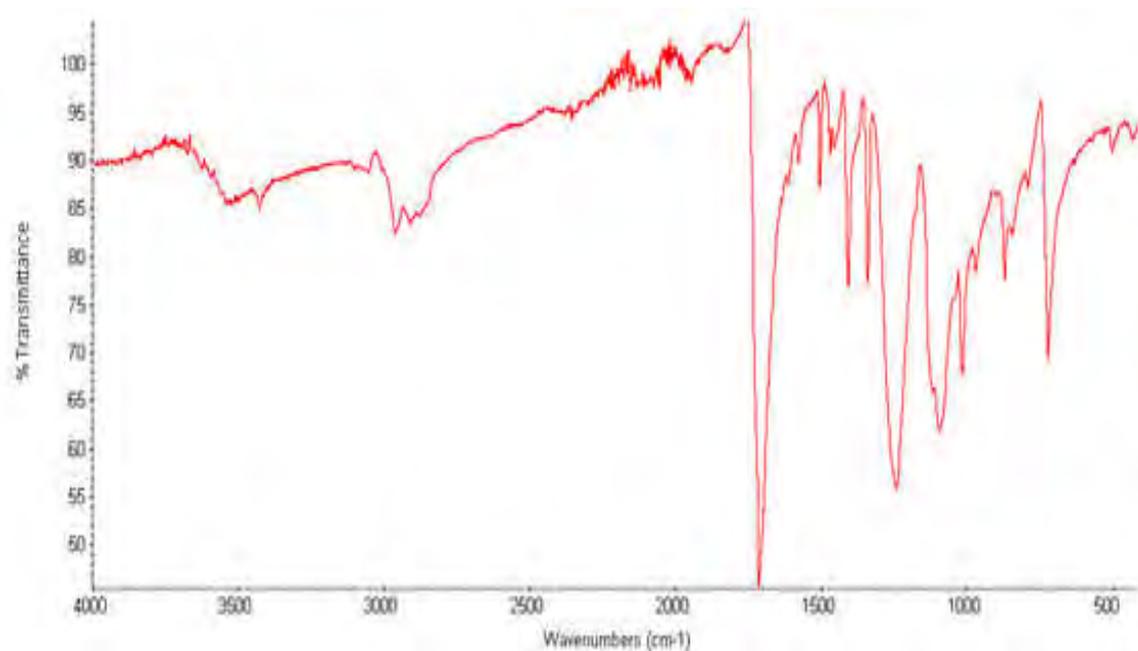
ข.3-25 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 1.0



ข.3-26 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 3.0

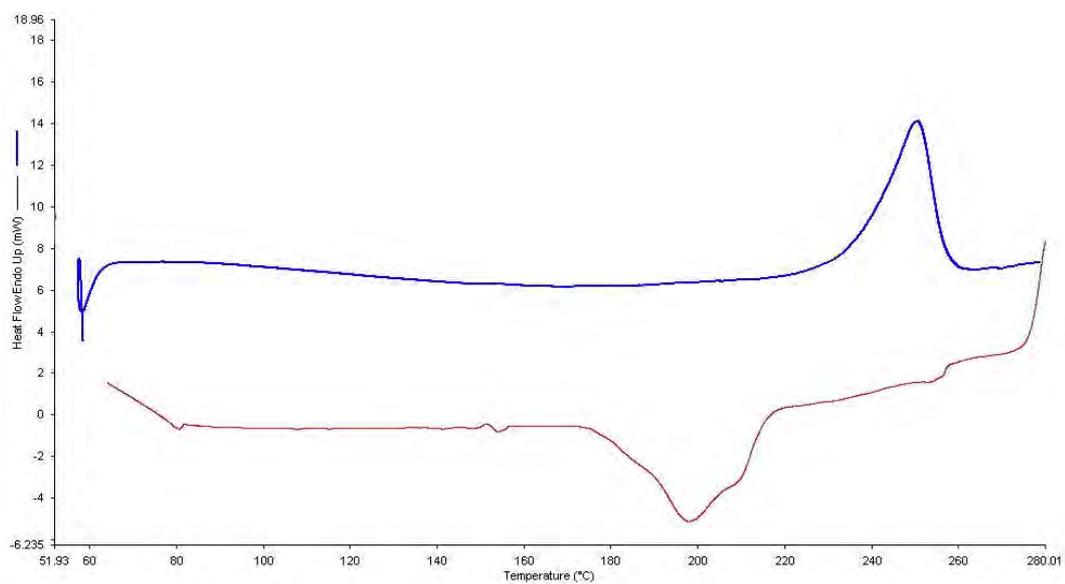


ข.3-27 FT-IR สเปกตรัมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 5.0

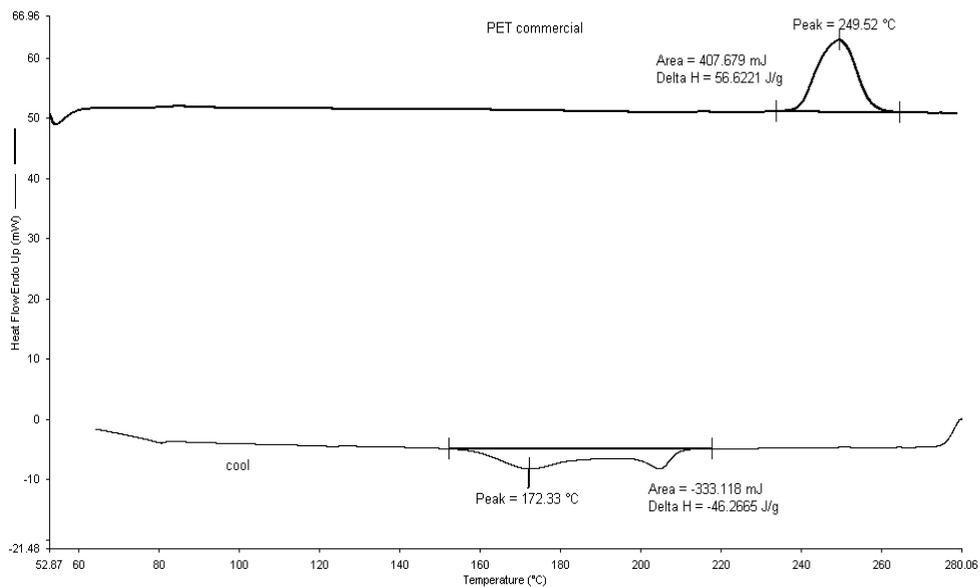


ข.3-28 FT-IR สเปกตรัมของ PET C 1.0% ST

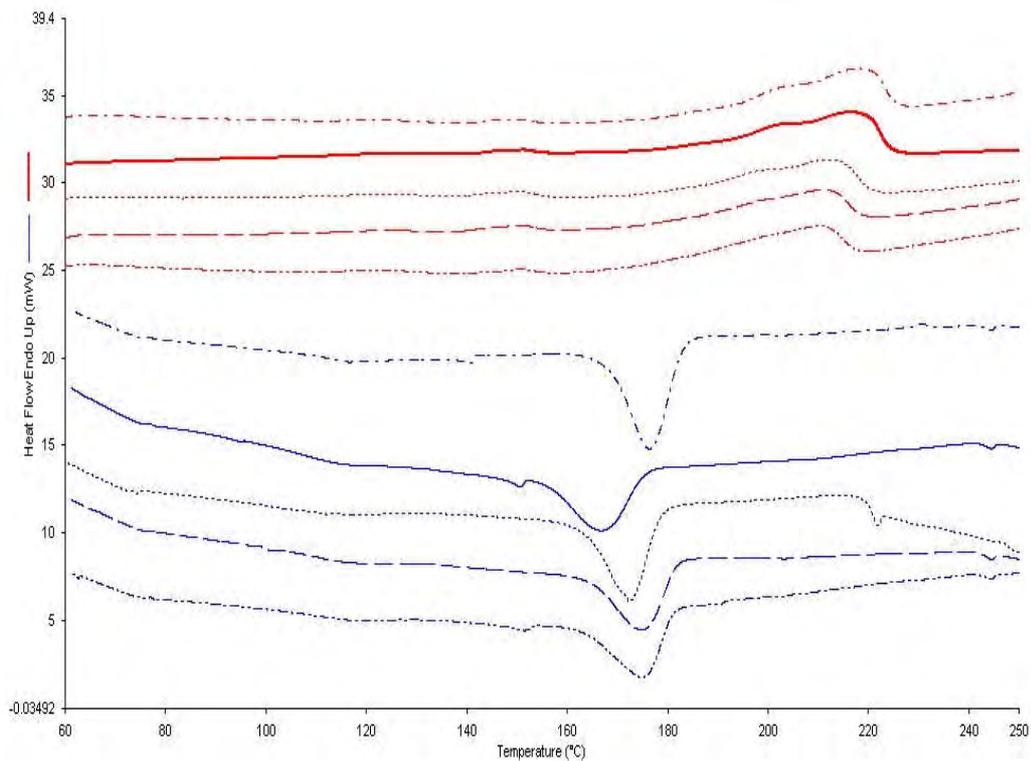
ข.4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์



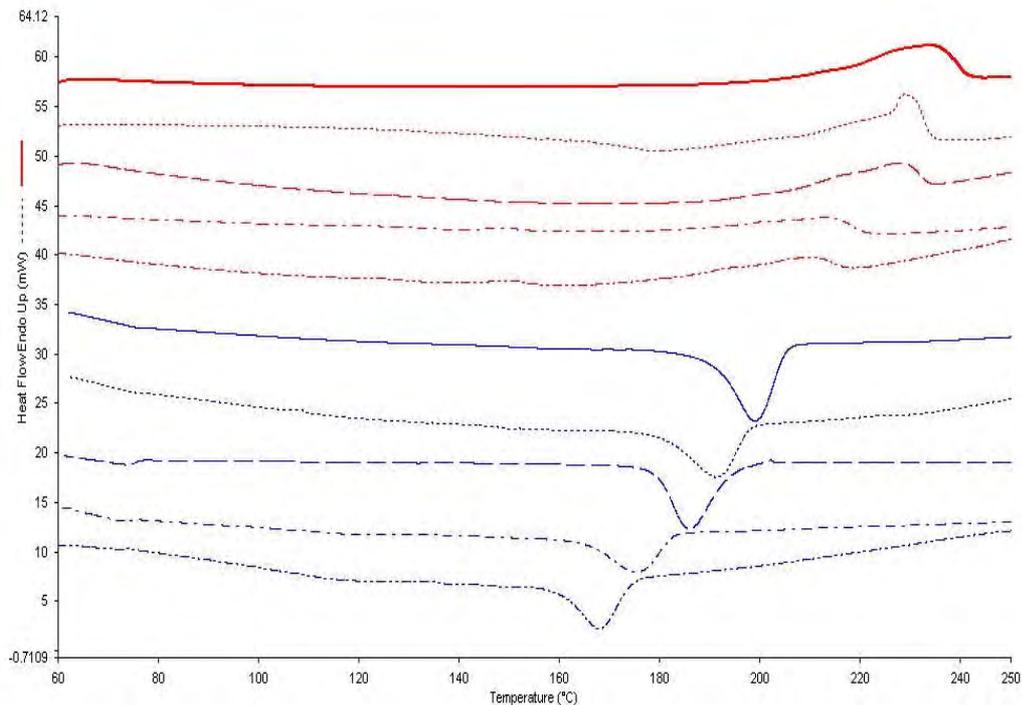
ข.4-1 DSC เทอร์โมแกรมของขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว



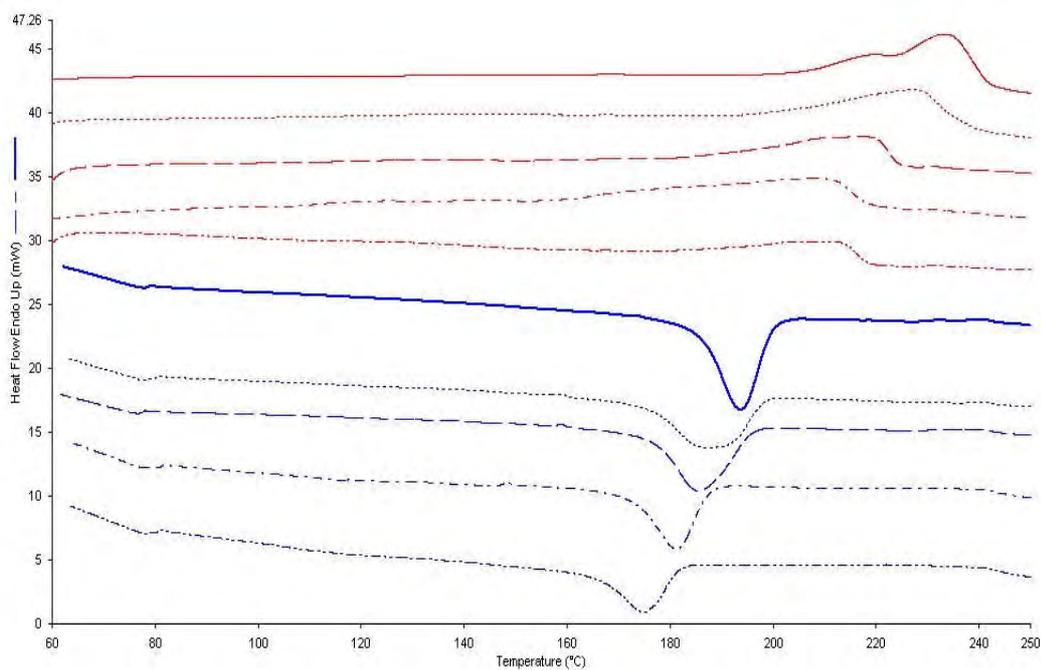
ข.4-2 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดพีดีทีทางการค้า



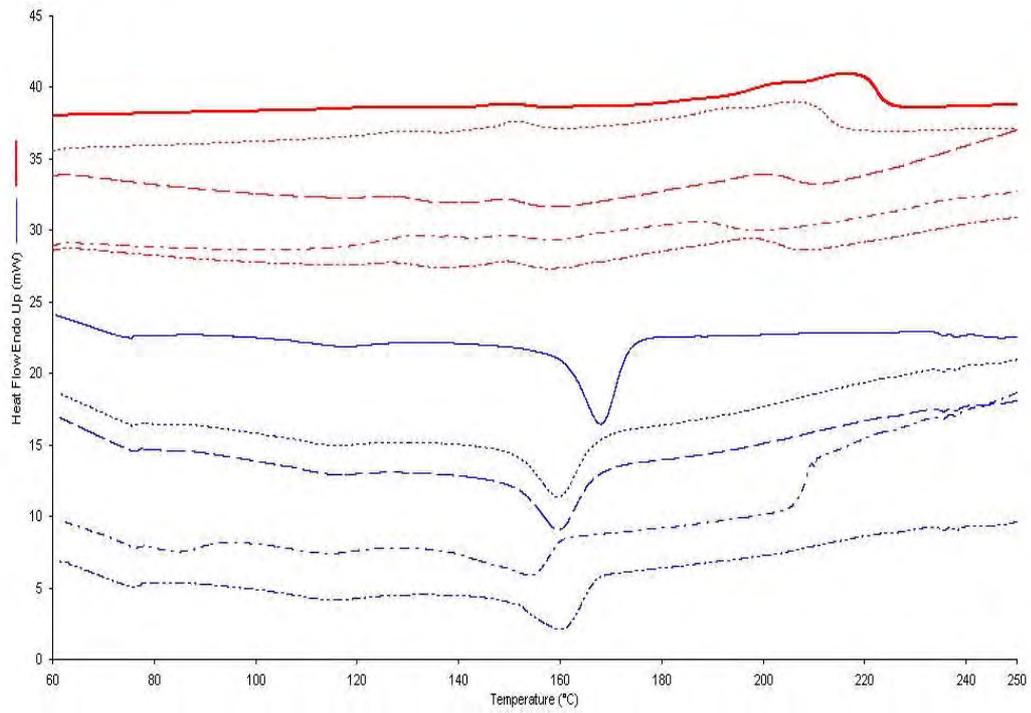
ข.4-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A



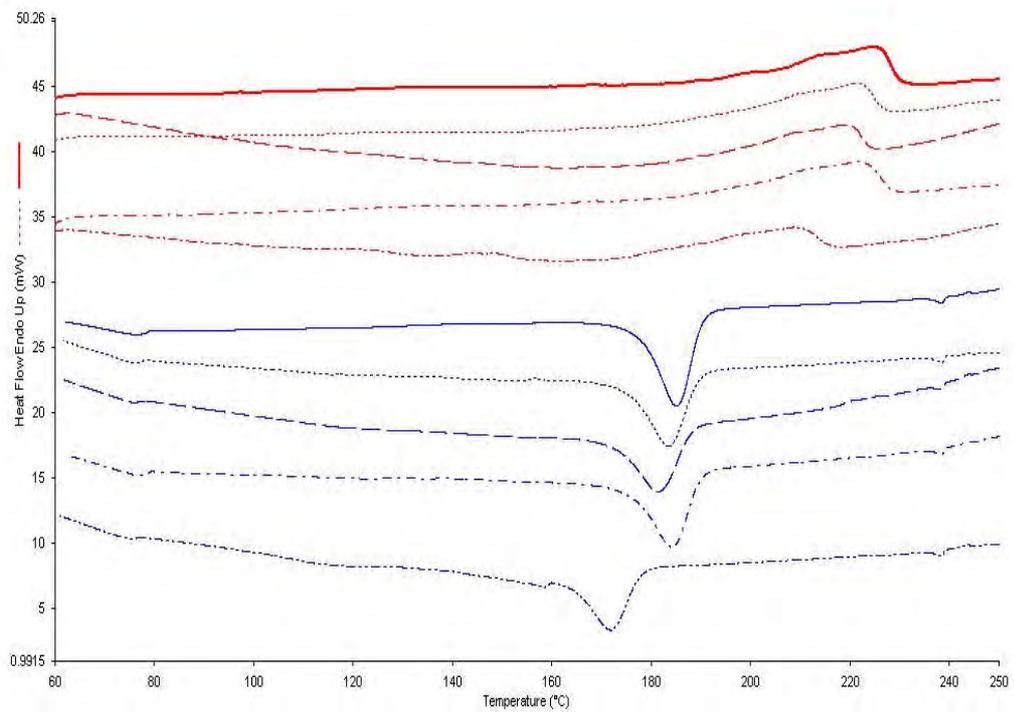
ข.4-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET B



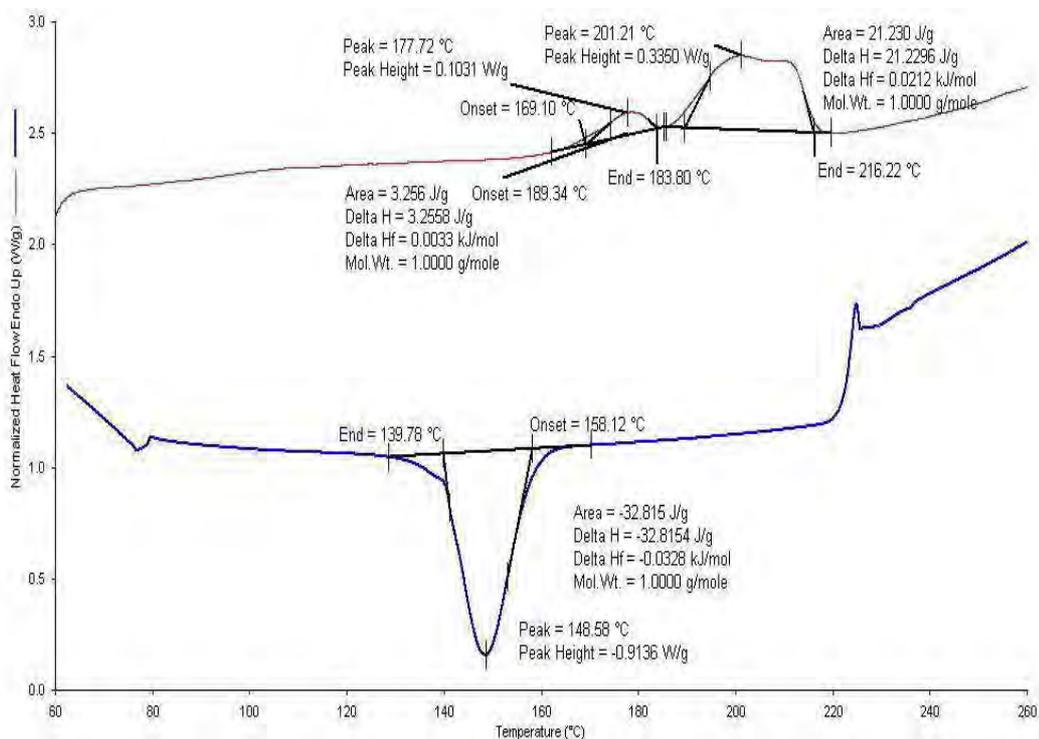
ข.4-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET C



ข.4-6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET AB



ข.4-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET ABC



ข.4-8 DSC เทอร์โมแกรมของ PET C 1.0% ST

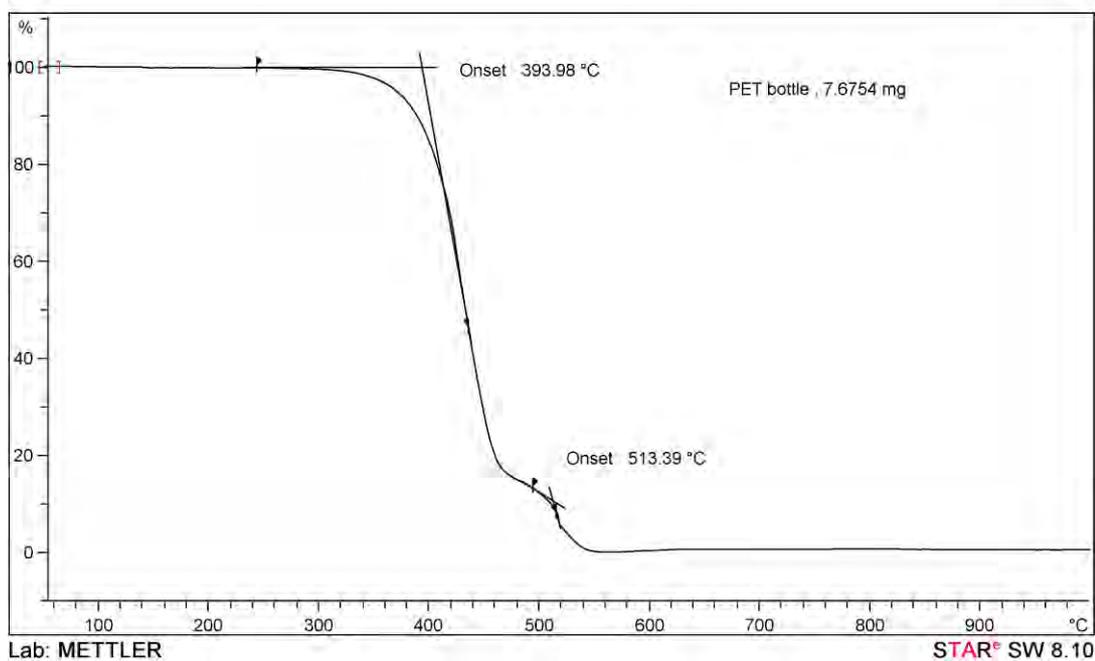
ข.4-9 อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

สูตร	อุณหภูมิหลอมเหลว			อุณหภูมิเกิดผลึก			
	พีก (องศา เซลเซียส)	ΔH_f	% χ	พีกอนเซต (องศา เซลเซียส)	พีก (องศา เซลเซียส)	ΔH_c	$t_{1/2}$ (นาที)
PET A	218.03	22.24	18.56	185.71	182.89	33.32	0.141
PET A 0.5	217.49	18.01	15.11	181.64	175.00	29.43	0.332
PET A 1.0	212.66	15.35	12.95	180.86	180.86	28.12	0.291
PET A 3.0	211.42	14.15	12.18	183.04	178.43	26.05	0.231
PET A 5.0	210.22	13.62	11.98	182.83	176.46	25.37	0.319
PET B	243.52	50.69	42.31	205.06	198.96	58.84	0.305
PET B 0.5	233.62	41.65	34.94	198.74	196.07	56.057	0.284

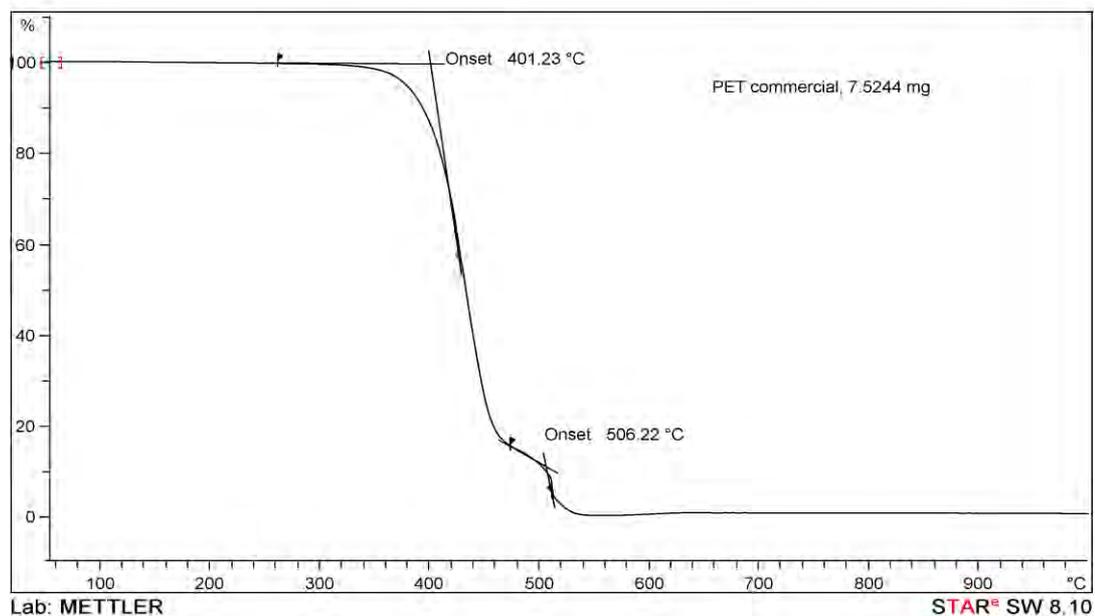
ข.4-9 อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต
(ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิหลอมเหลว			อุณหภูมิเกิดผลึก			
	พีค (องศา เซลเซียส)	ΔH_f	% χ	พีคอนเซ็ต (องศา เซลเซียส)	พีค (องศา เซลเซียส)	ΔH_c	$t_{1/2}$ (นาที)
PET B 1.0	227.34	20.62	17.38	191.87	182.41	43.868	0.323
PET B 3.0	213.35	14.75	12.69	182.64	175.38	31.720	0.363
PET B 5.0	209.43	12.74	11.19	174.21	168.02	27.184	0.310
PET C	233.65	41.60	34.73	199.96	193.77	40.771	0.310
PET C 0.5	227.98	41.04	34.43	198.03	187.64	35.988	0.520
PET C 1.0	226.50	34.20	28.84	195.81	185.58	36.895	0.512
PET C 3.0	213.35	24.08	20.72	187.31	181.26	29.422	0.303
PET C 5.0	218.03	14.75	12.96	181.43	176.73	27.678	0.235
PET ABC	224.70	32.53	27.15	190.12	185.12	36.18	0.294
PET ABC 0.5	221.69	23.04	19.23	190.01	184.19	32.34	0.310
PET ABC 1.0	221.03	21.75	18.15	187.35	181.62	31.60	0.285
PET ABC 3.0	218.88	20.62	17.75	189.42	183.55	28.224	0.294
PET ABC 5.0	208.81	15.76	13.80	177.58	171.89	21.250	0.285

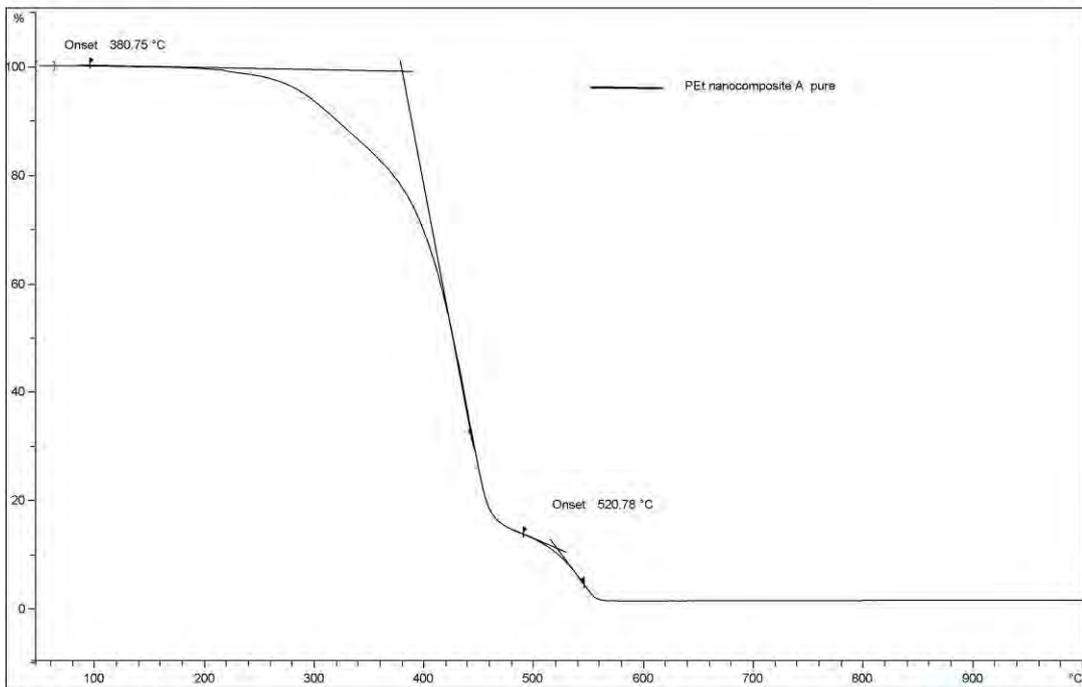
ข.5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์



ข.5.1 TGA เทอร์โมแกรมของขวดพีอีทีที่ใช้แล้ว



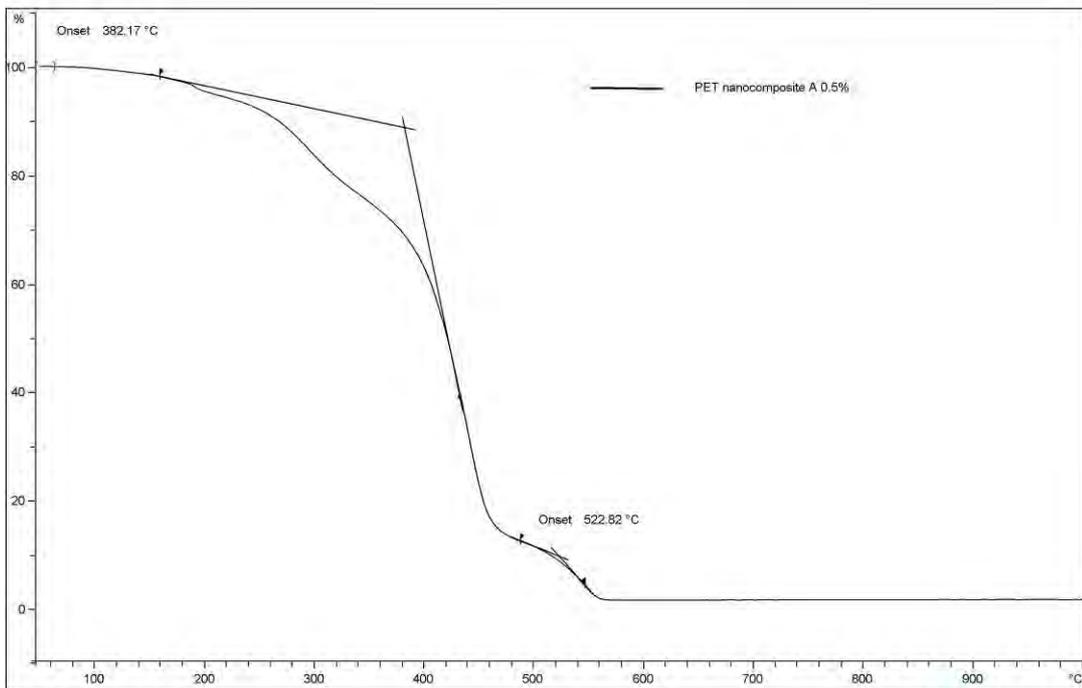
ข.5-2 TGA เทอร์โมแกรมของเม็ดพีอีทีทางการค้า



Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

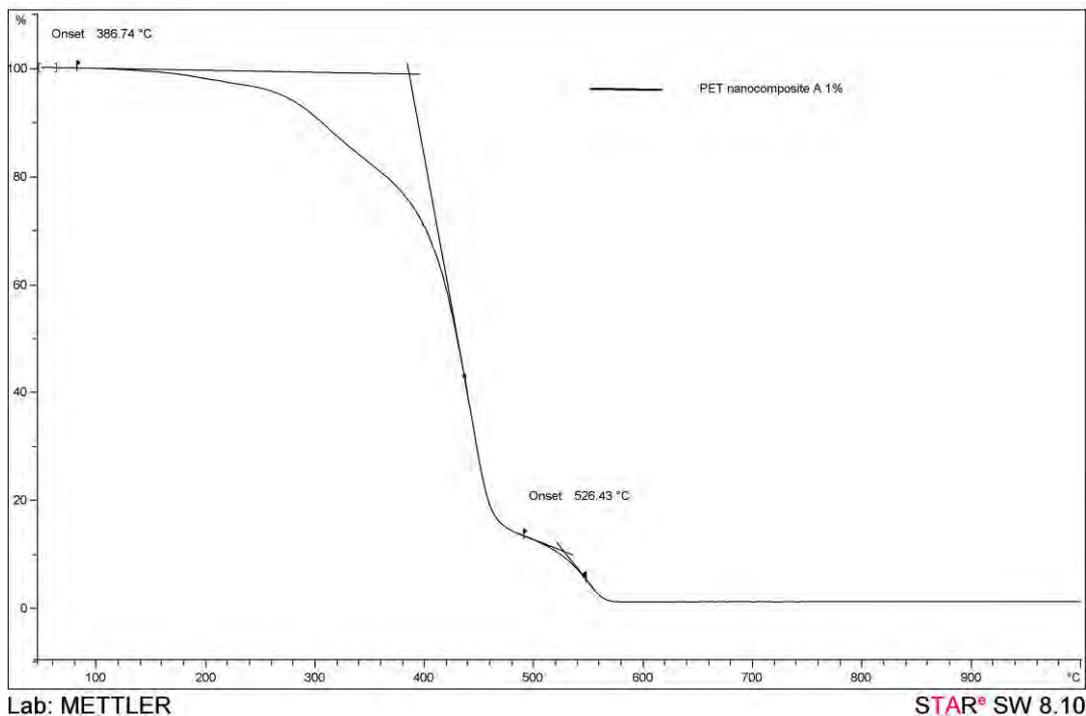
ข.5-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET A



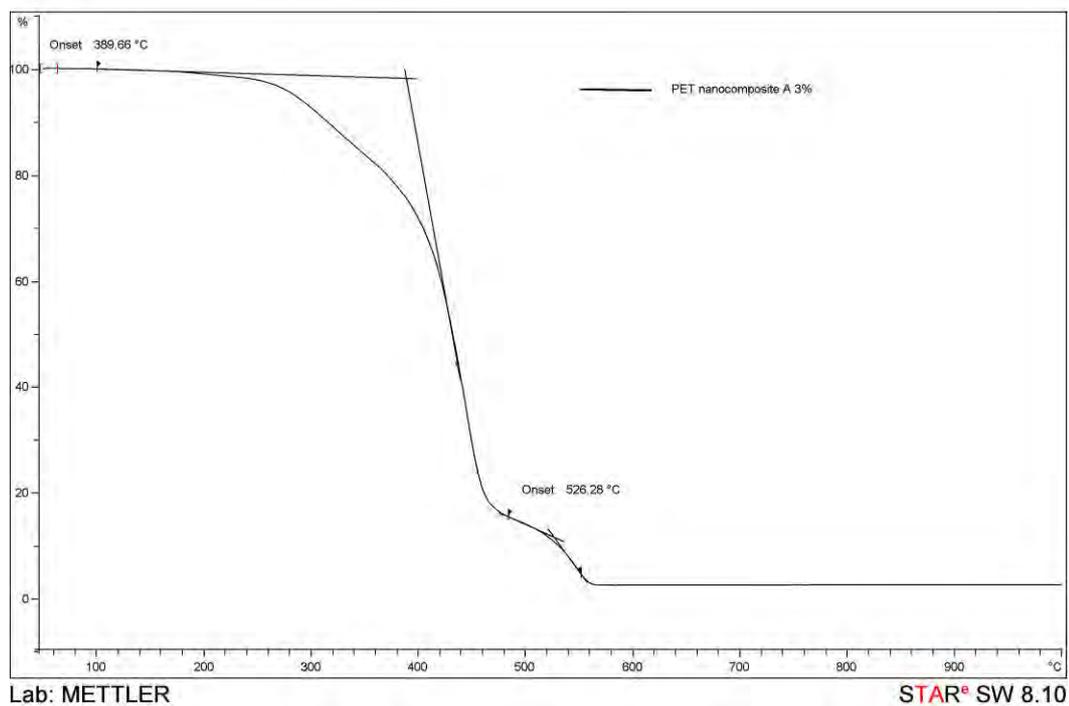
Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

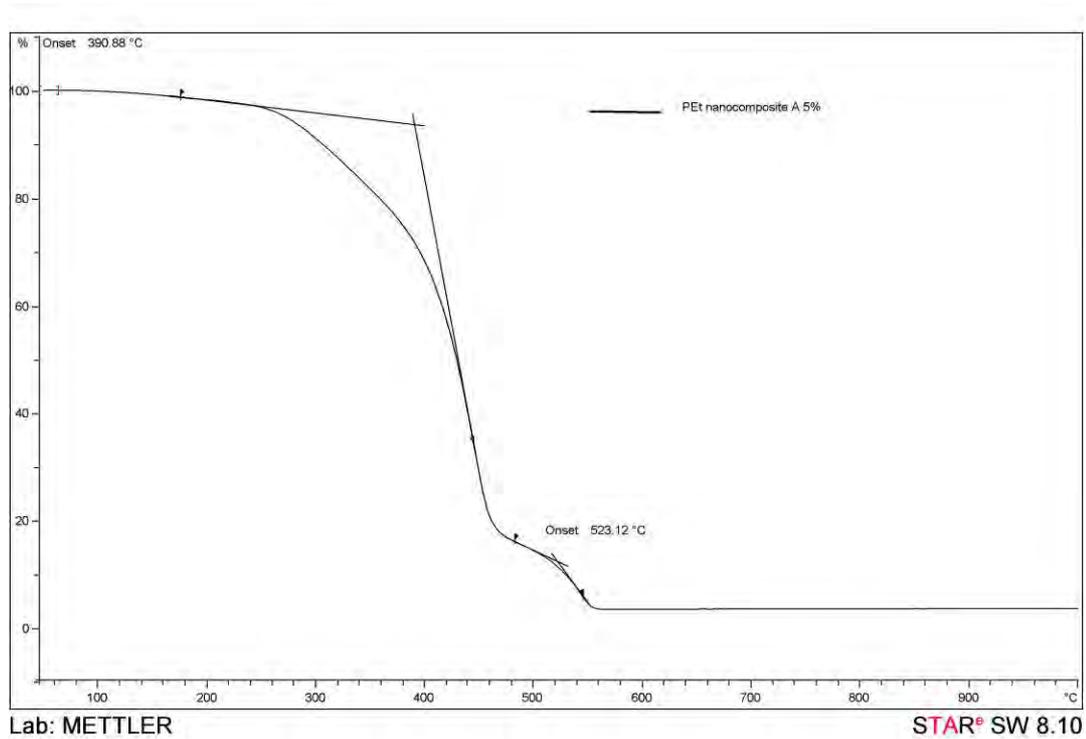
ข.5-4 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET A 0.5



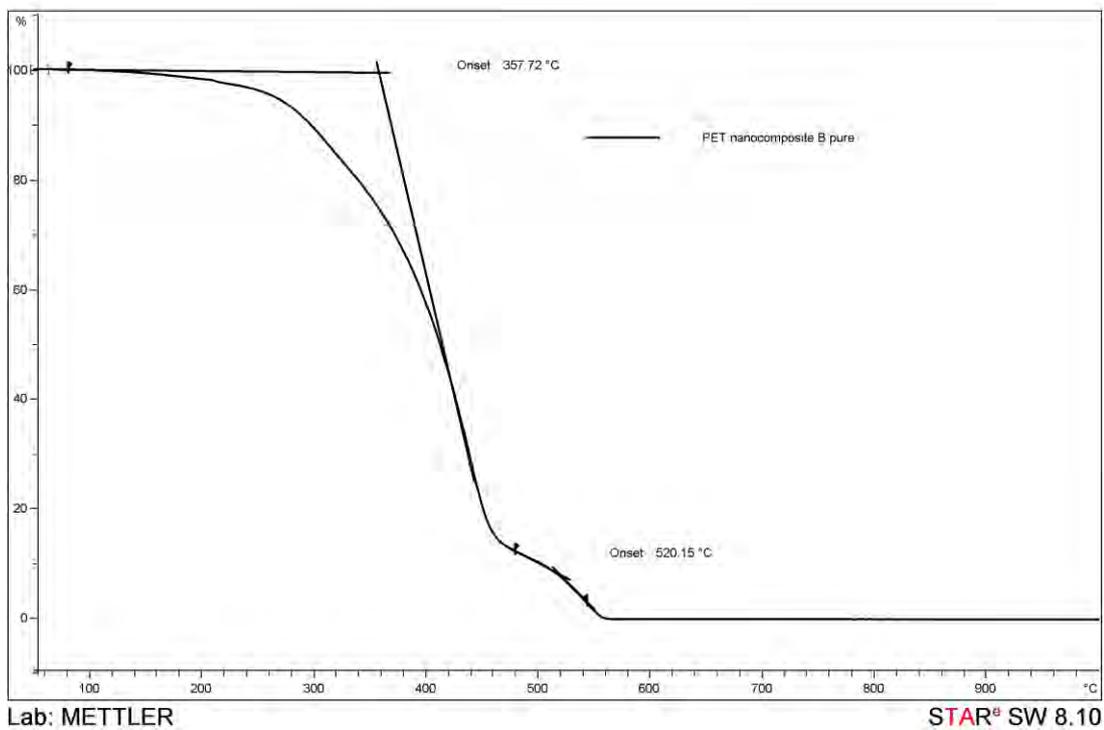
ข.5-5 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET A 1.0



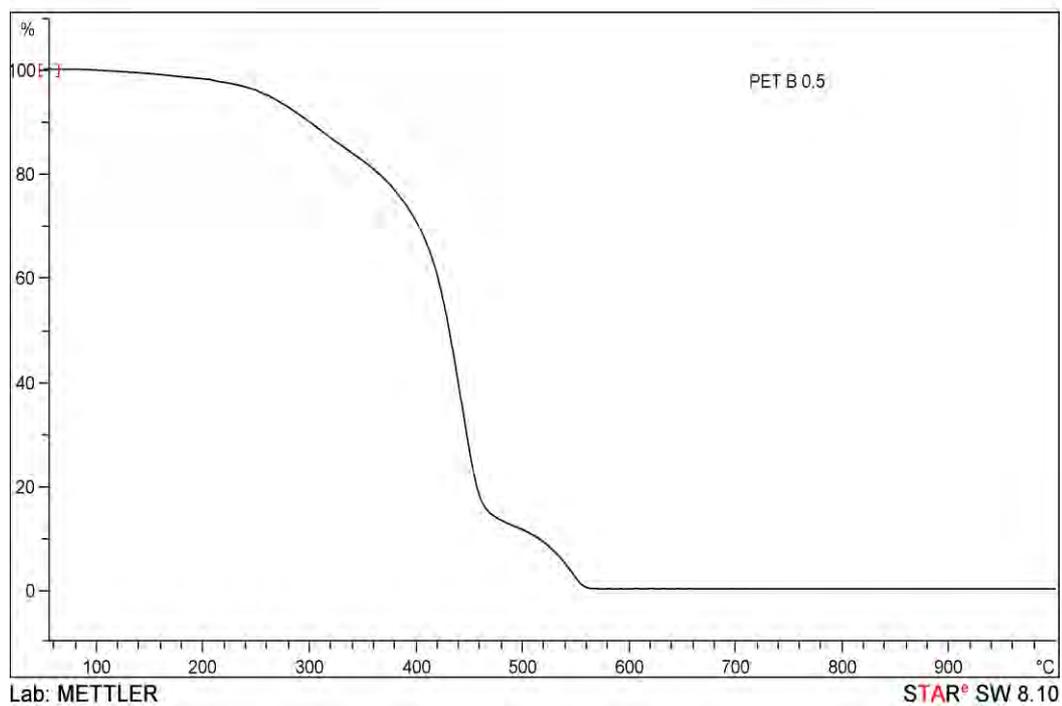
ข.5-6 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET A 3.0



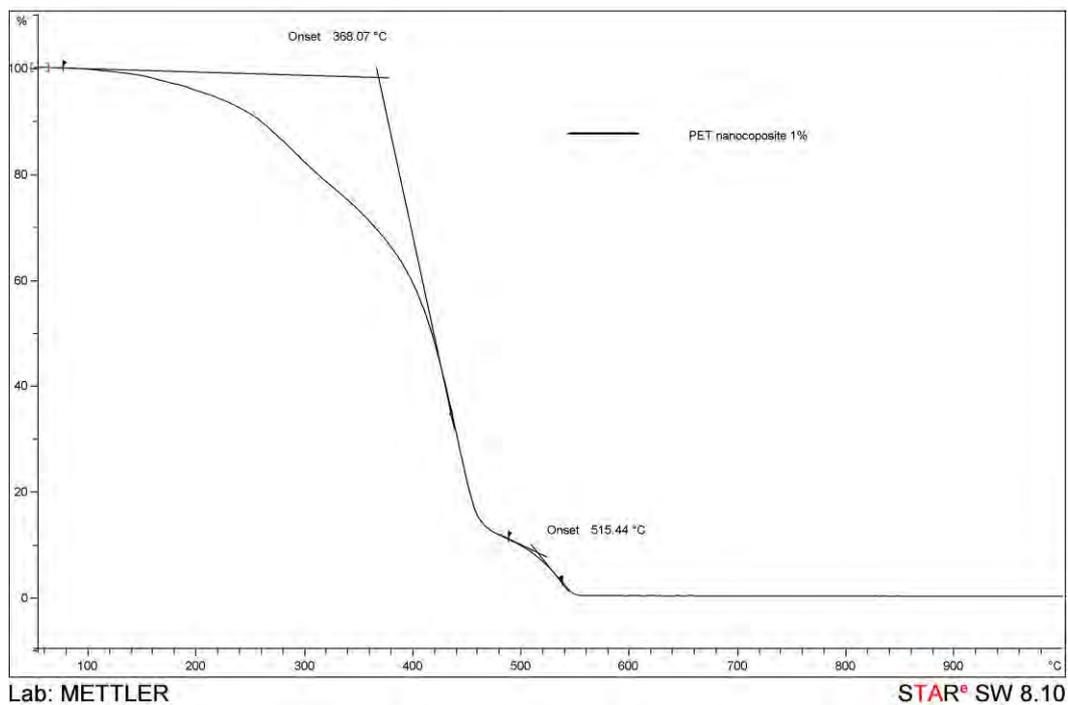
ข.5-7 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET A 5.0



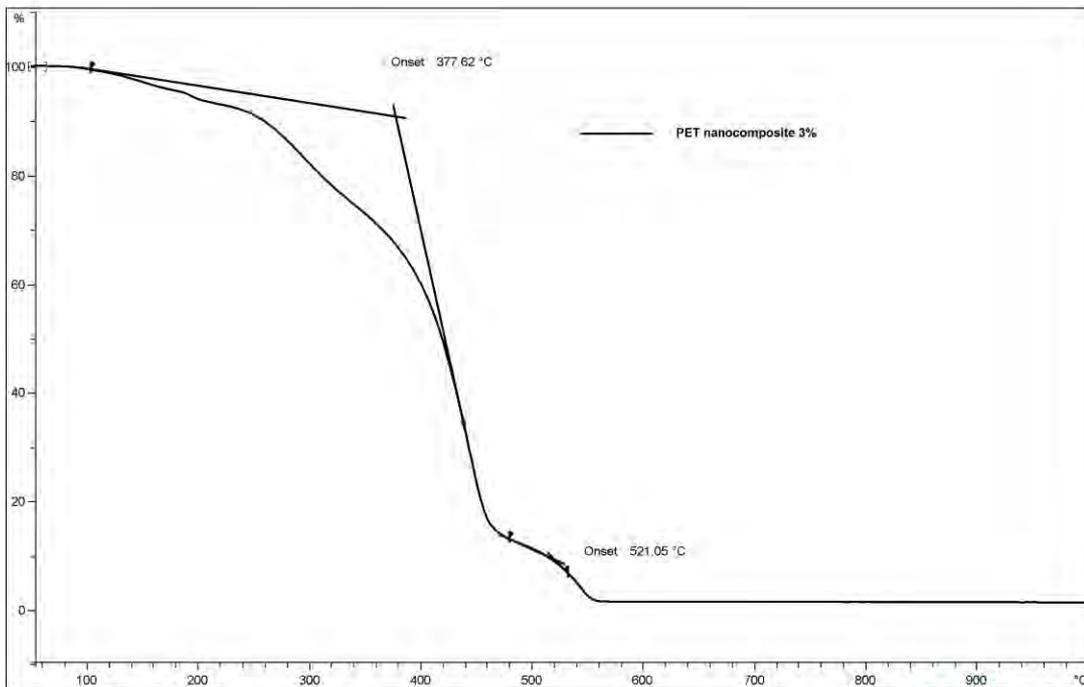
ข.5-8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET B



ข.5-9 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET B 0.5



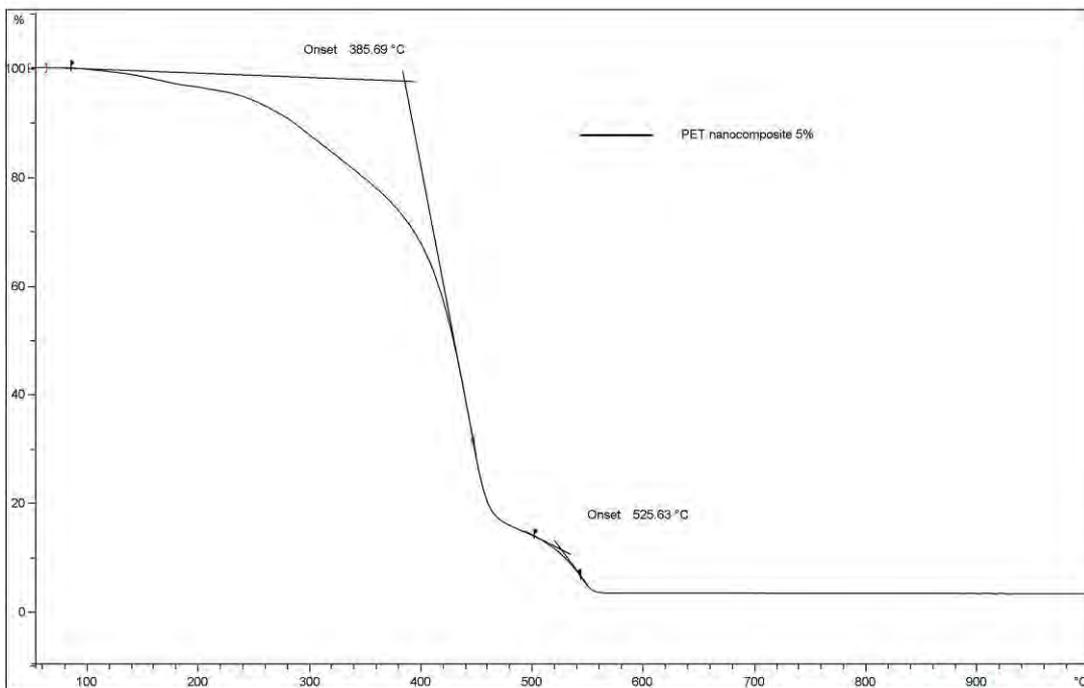
ข.5-10 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET B 1.0



Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

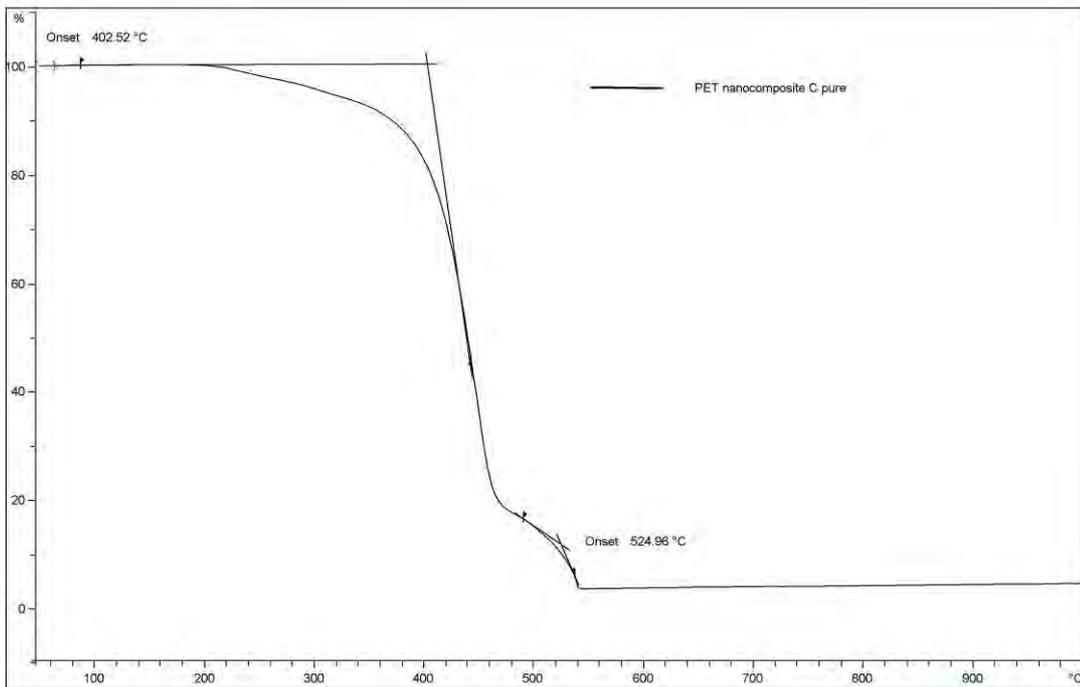
ข.5-11 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET B 3.0



Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

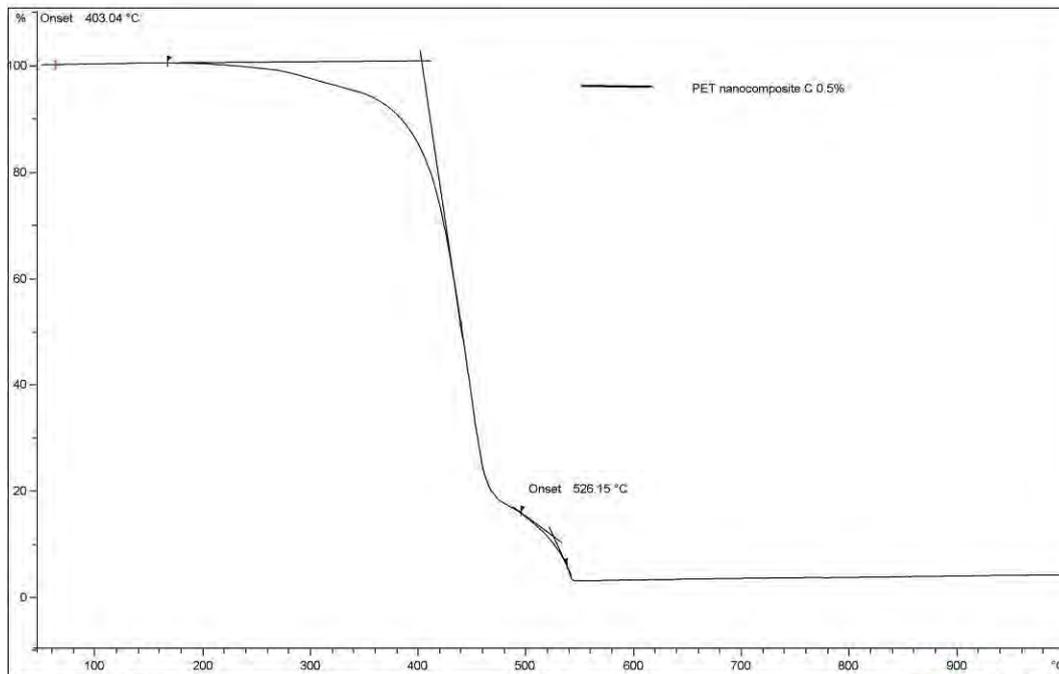
ข.5-12 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET B 5.0



Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

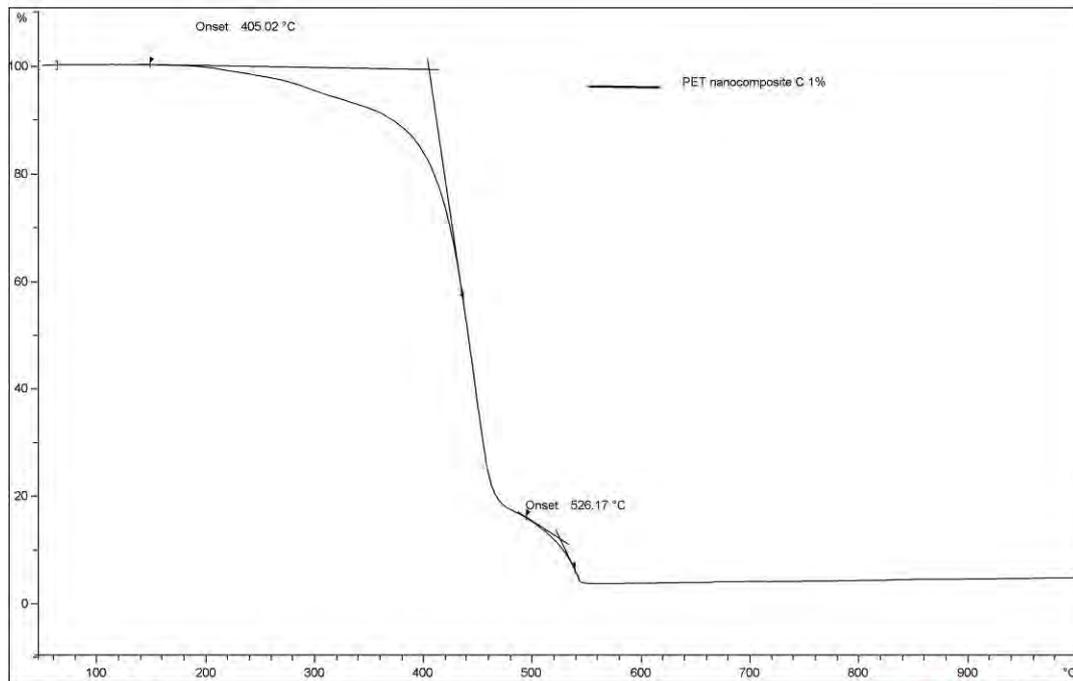
ข.5-13 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET C



Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

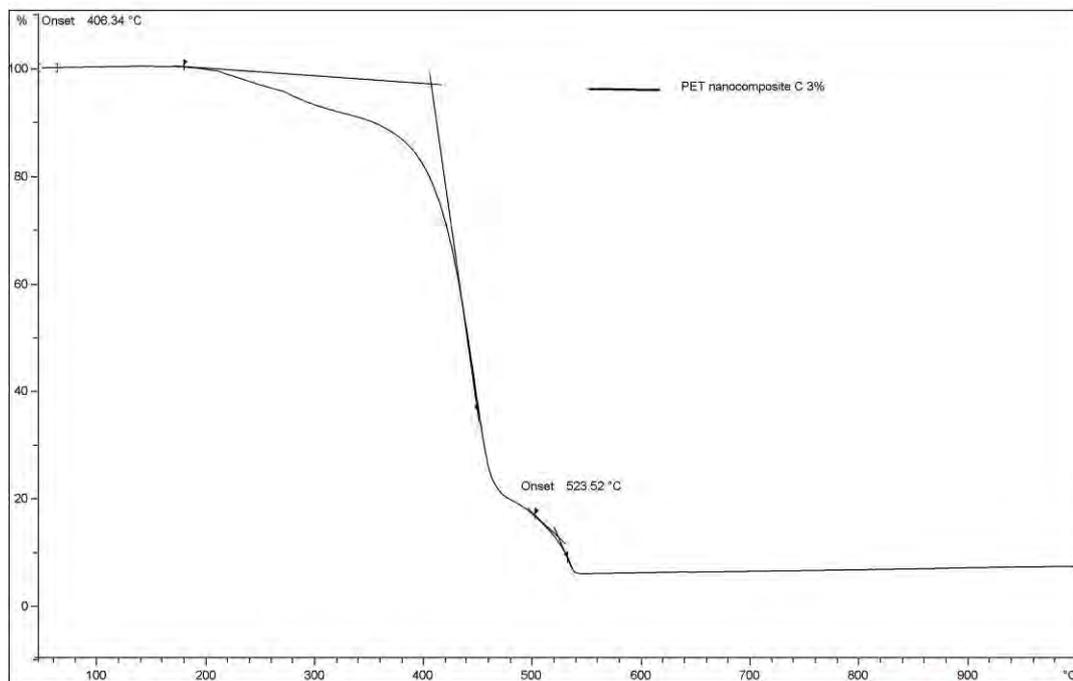
ข.5-14 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET C 0.5



Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

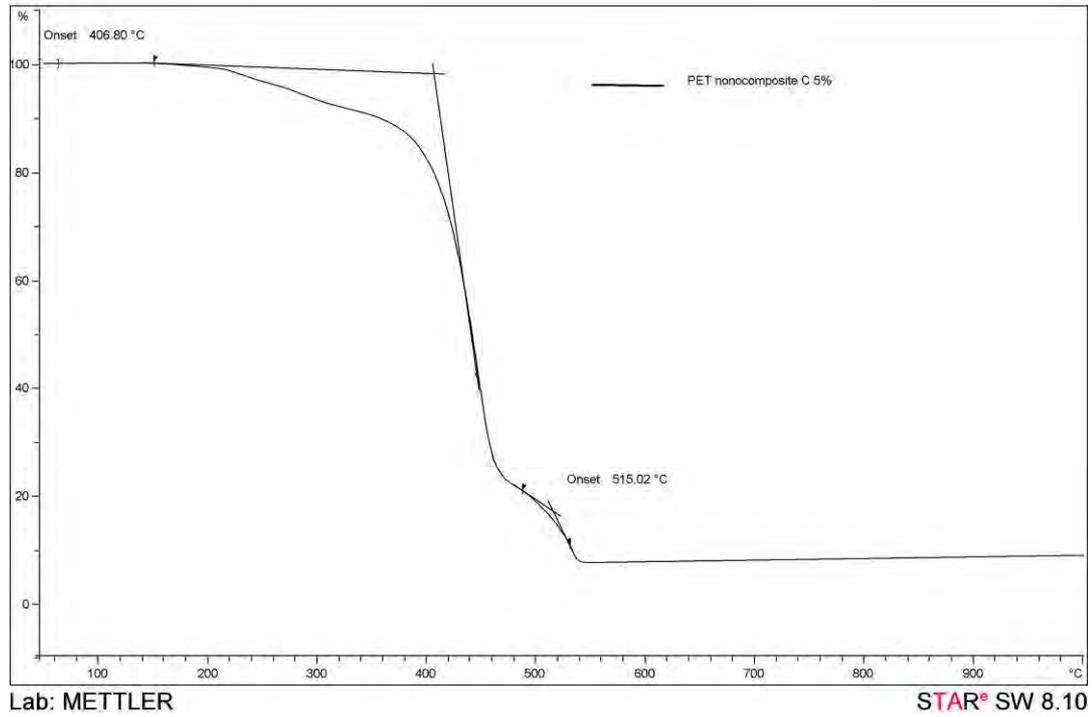
ข.5-15 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET C 1.0



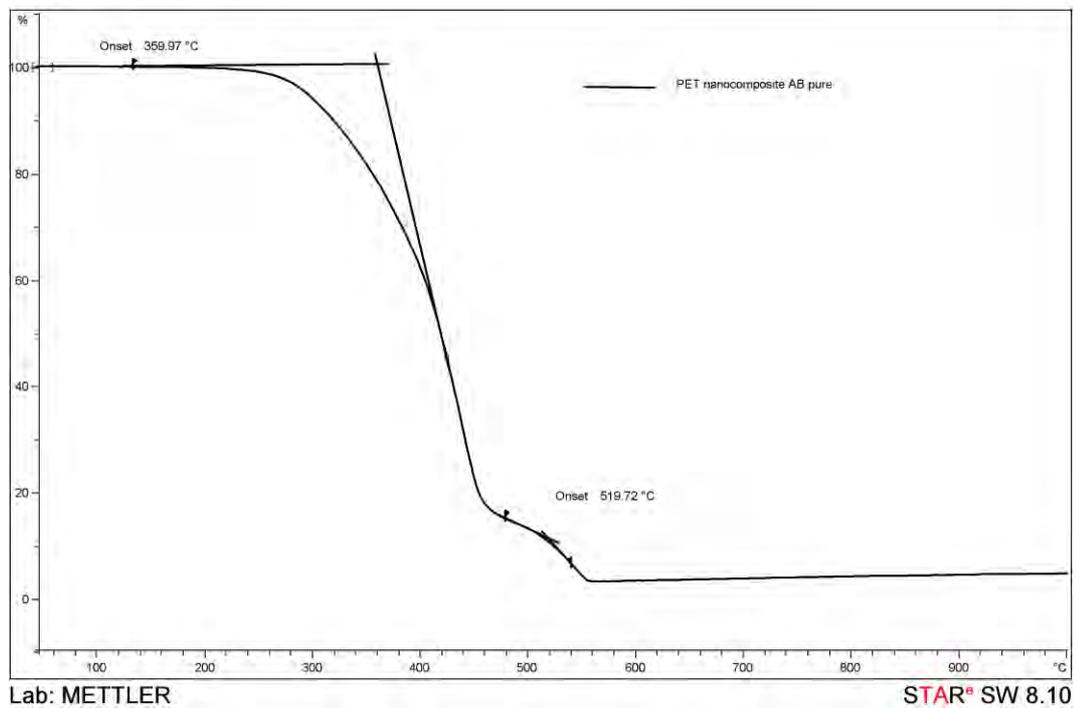
Lab: METTLER

STAR® SW 8.10

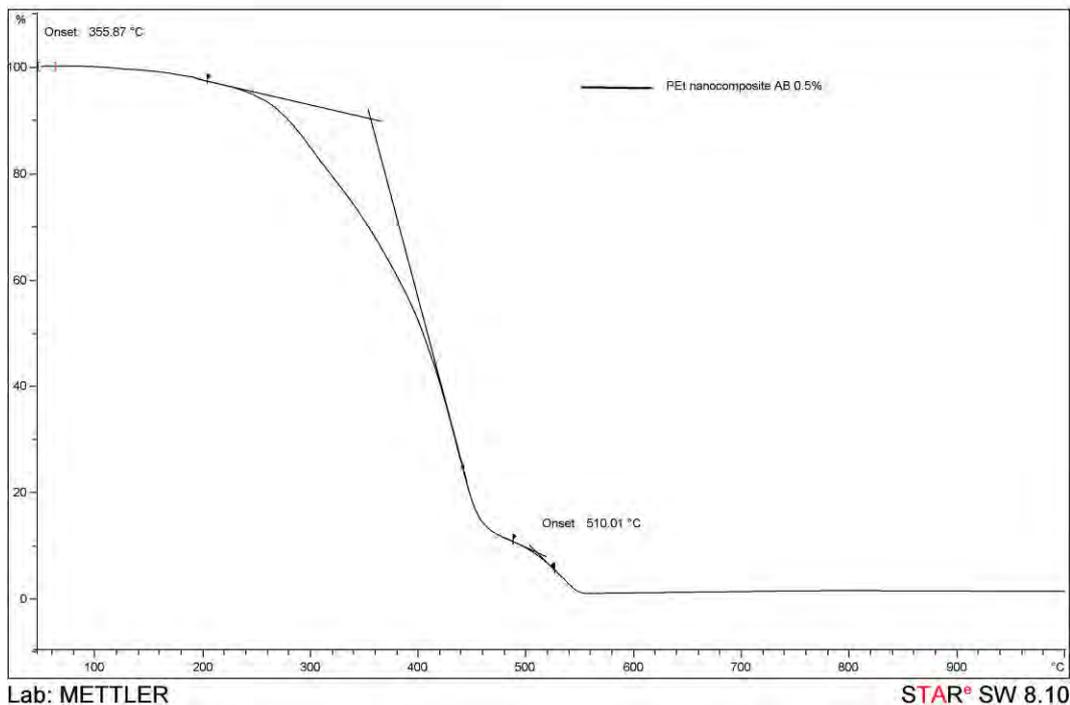
ข.5-16 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET C 3.0



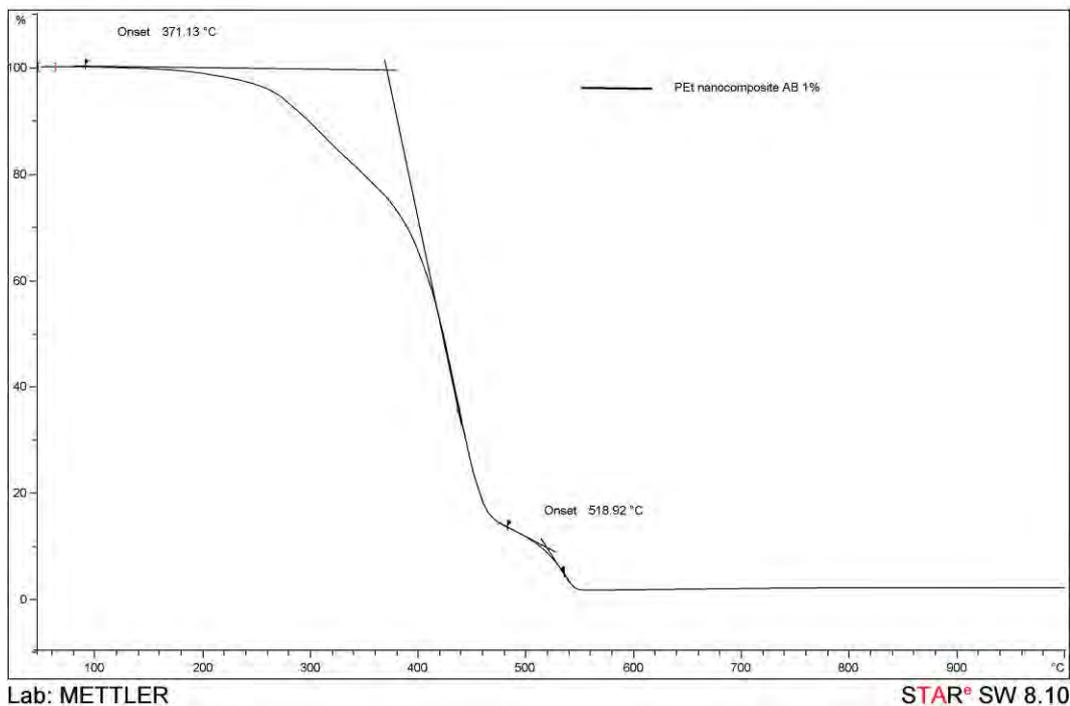
ข.5-17 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET C 5.0



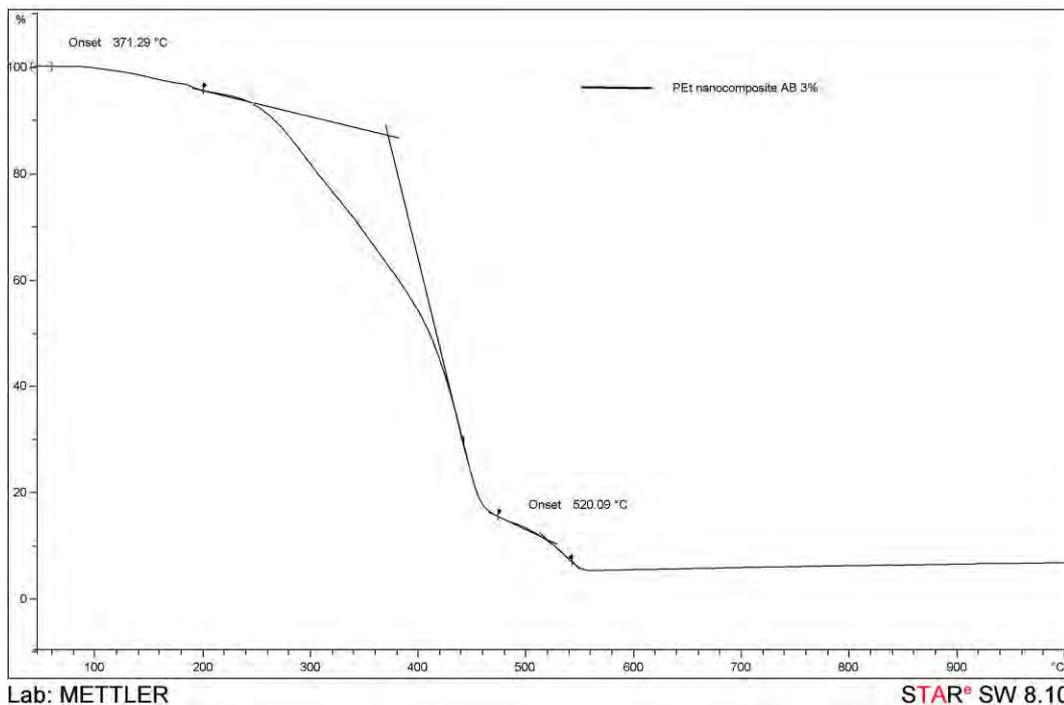
ข.5-18 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET AB



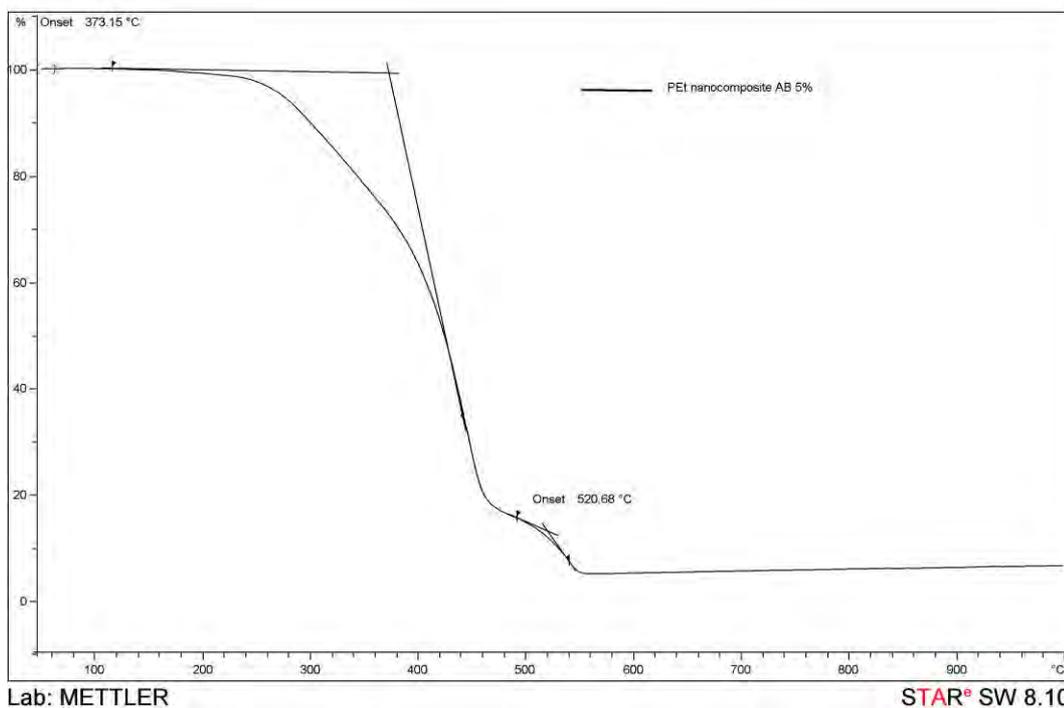
ข.5-19 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET AB 0.5



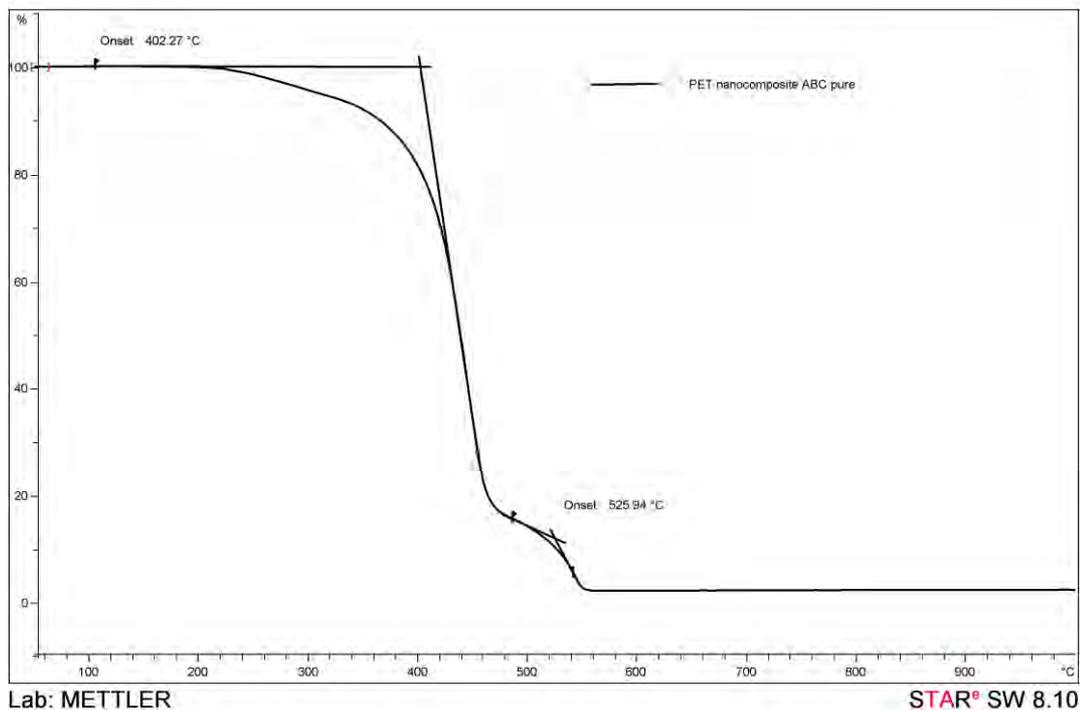
ข.5-20 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET AB 1.0



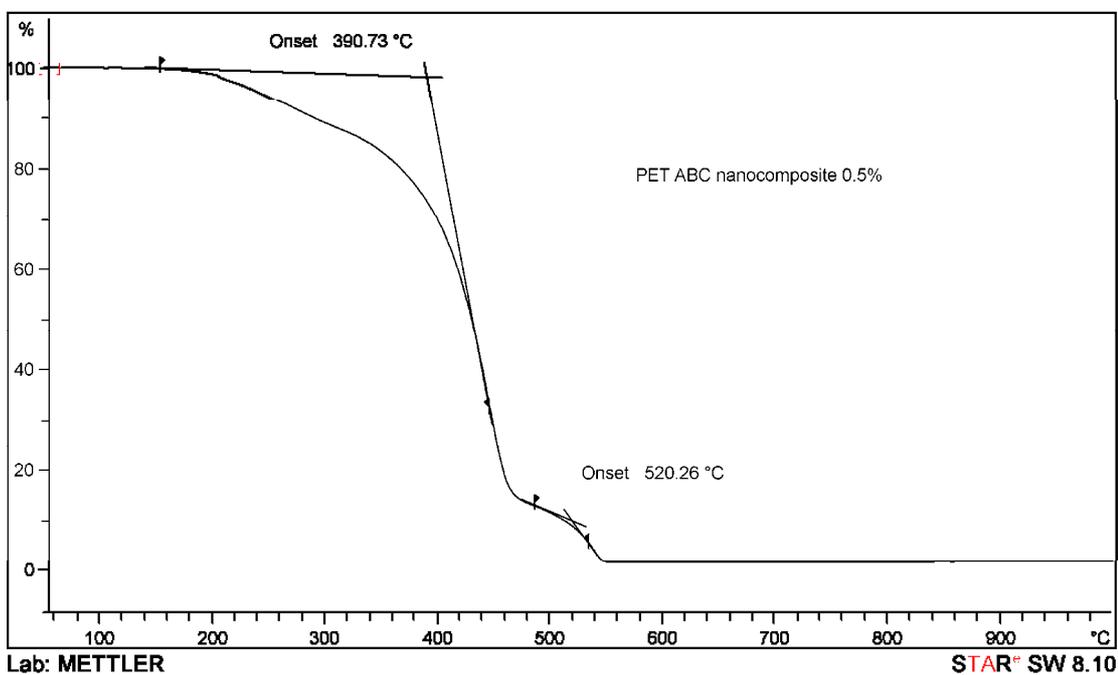
ข.5-21 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET AB 3.0



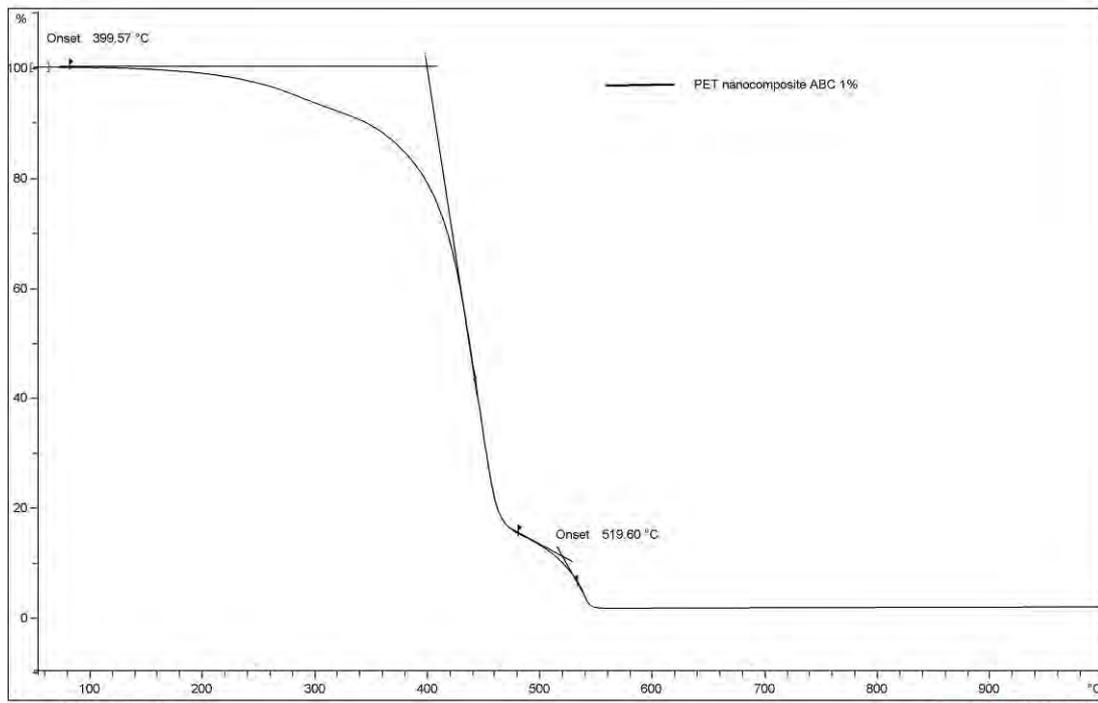
ข.5-22 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET AB 5.0



ข.5-23 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET ABC



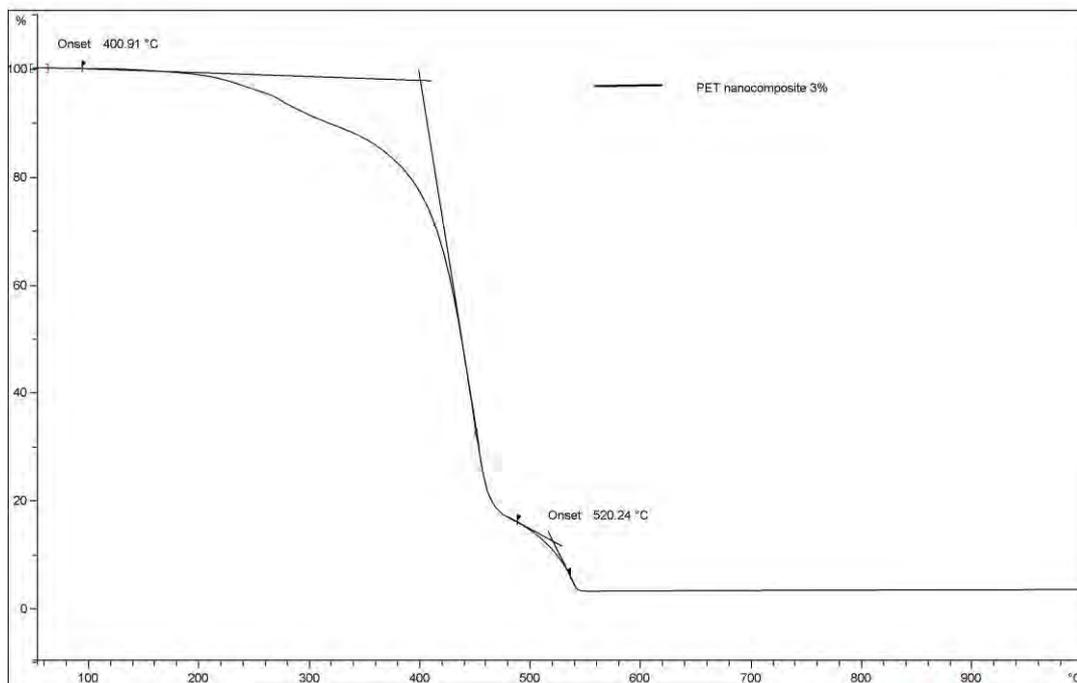
ข.5-24 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 0.5



Lab: METTLER

STAR[®] SW 8.10

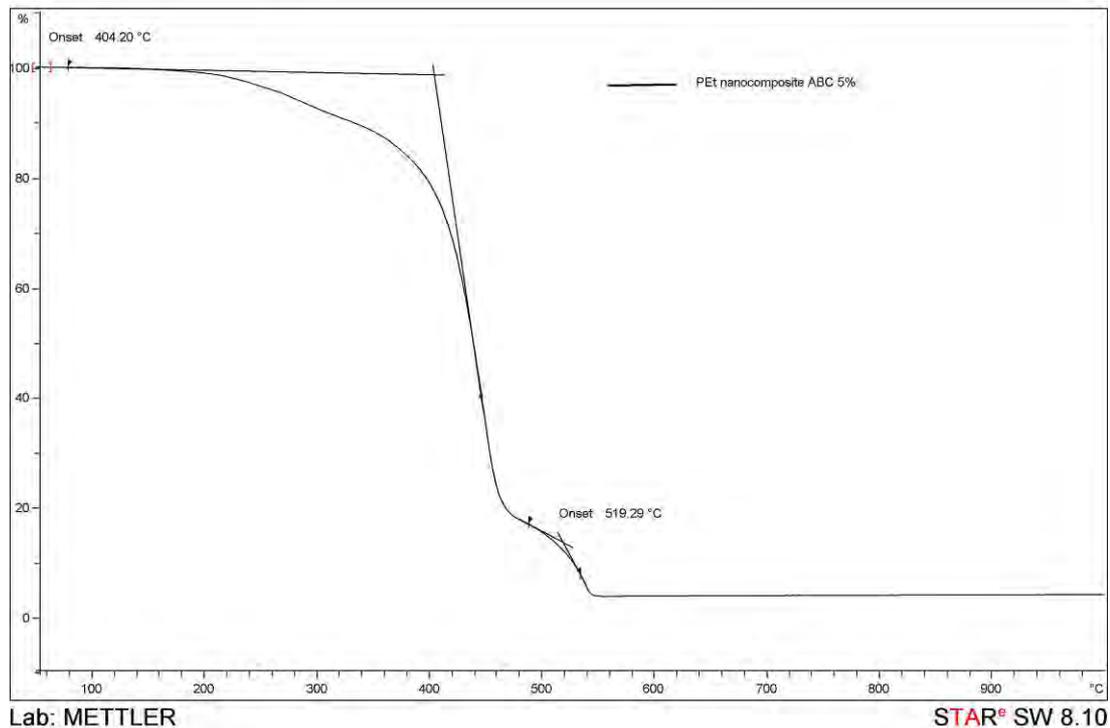
ข.5-25 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 1.0



Lab: METTLER

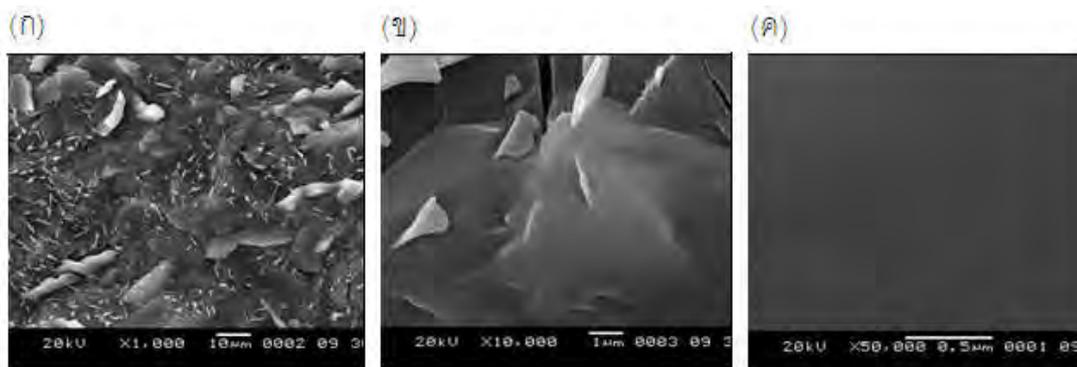
STAR[®] SW 8.10

ข.5-26 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 3.0

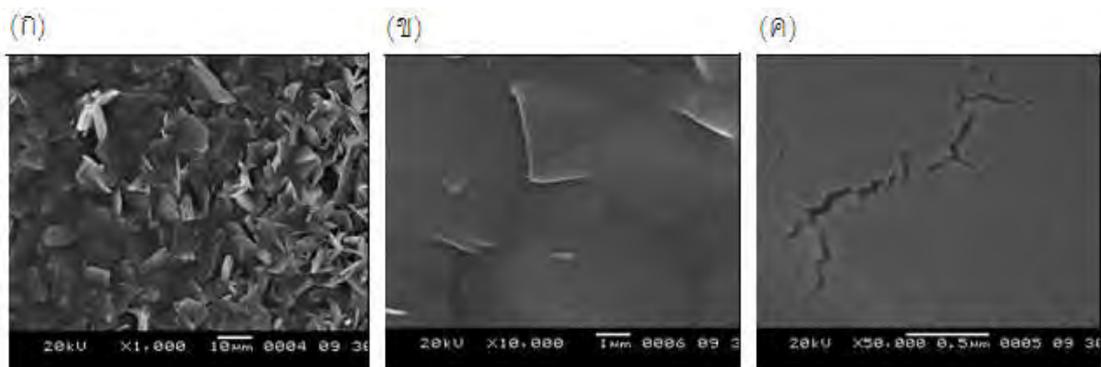


ข.5-27 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมโพสิต PET ABC 5.0

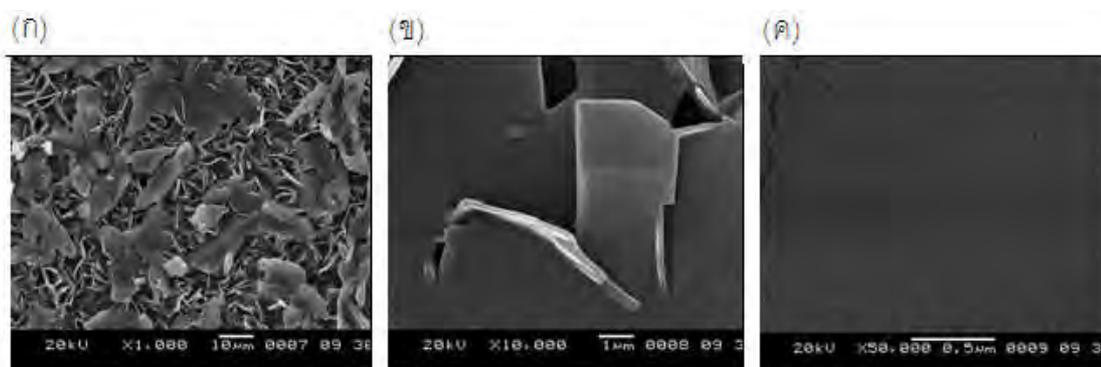
ข.6 ภาพ SEM ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้จาก
ผลผลิตไกลโคไลซ์



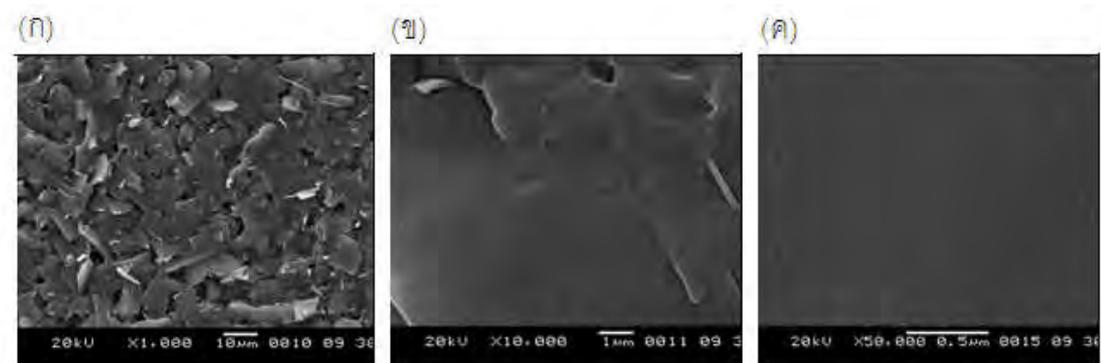
ข.6-1 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET A ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000
และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



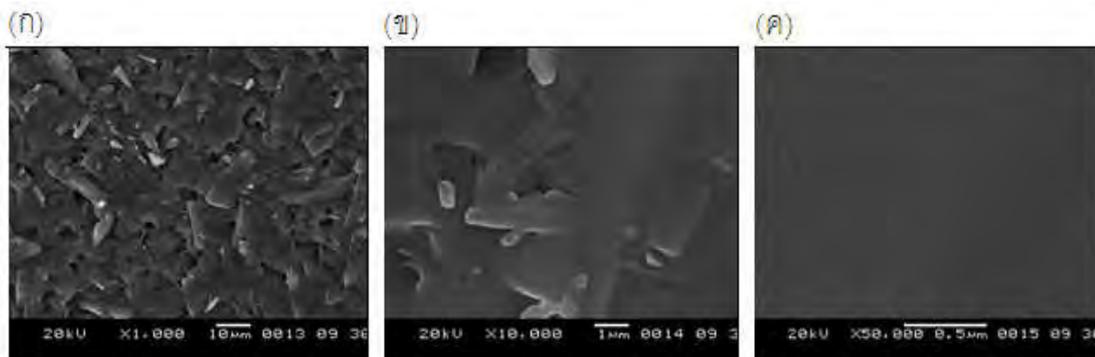
ข.6-2 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET A 0.5 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



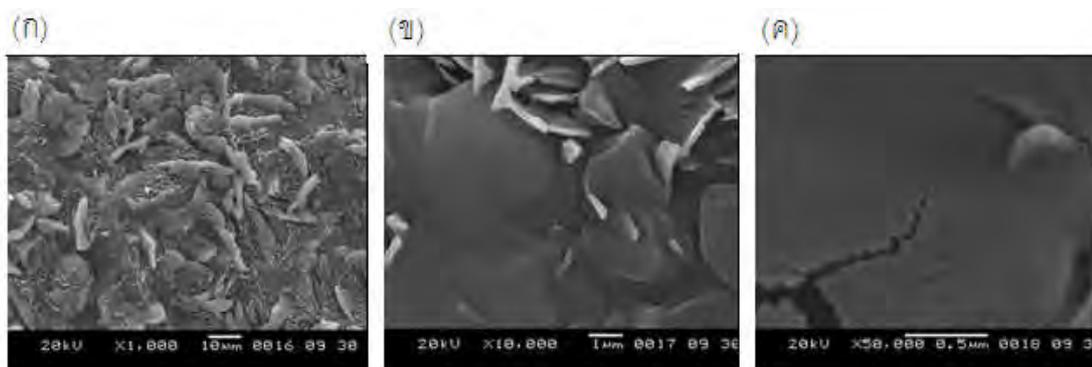
ข.6-3 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET A 1.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



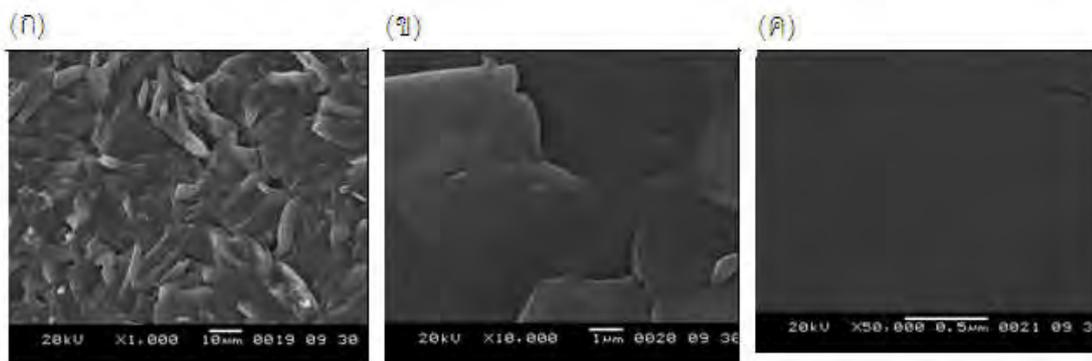
ข.6-4 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET A 3.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



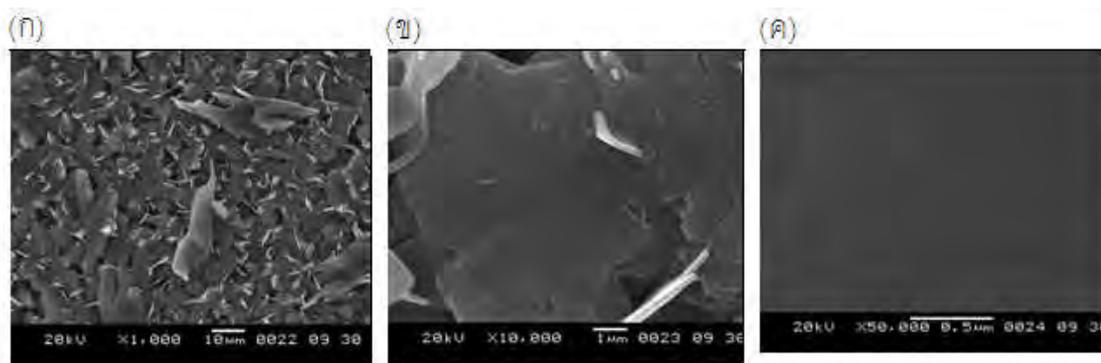
ข.6-5 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET A 5.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



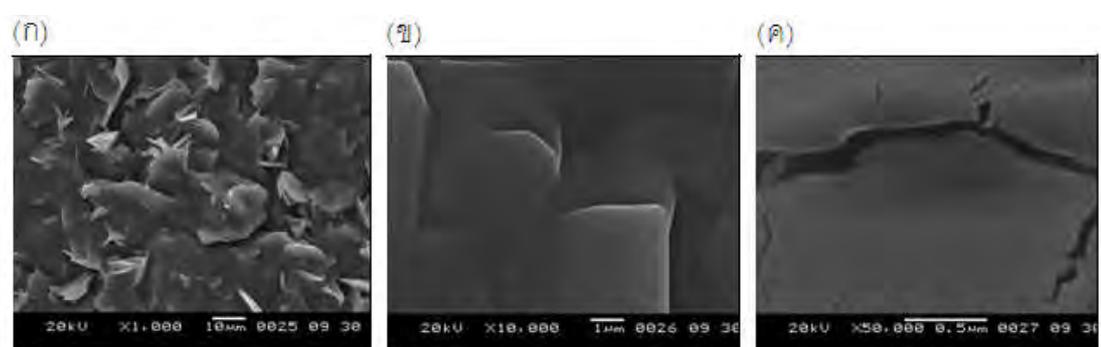
ข.6-6 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET B ที่กำลังขยาย 1000 (ก) 10,000 (ข) และ 50,000 (ค) เท่า ตามลำดับ



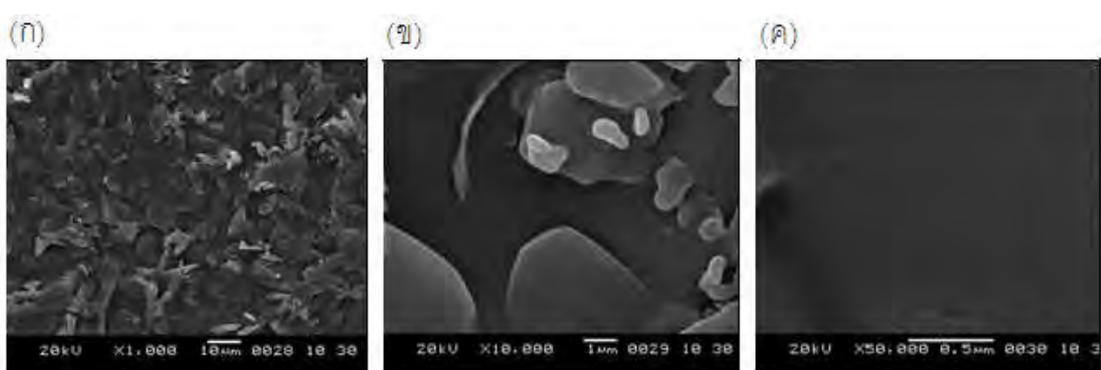
ข.6-7 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET B 0.5 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



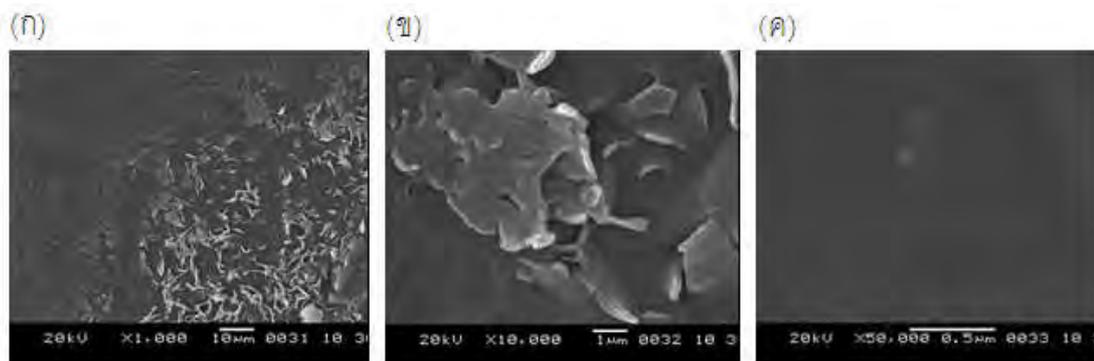
ข.6-8 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET B 1.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



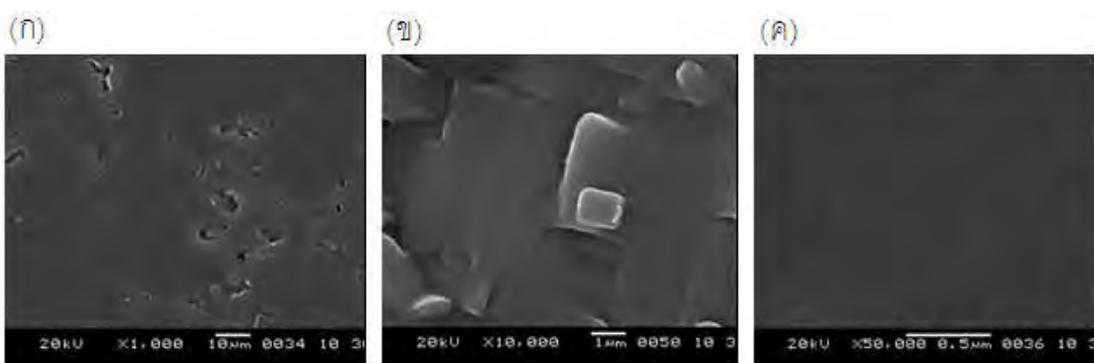
ข.6-9 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET B 3.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



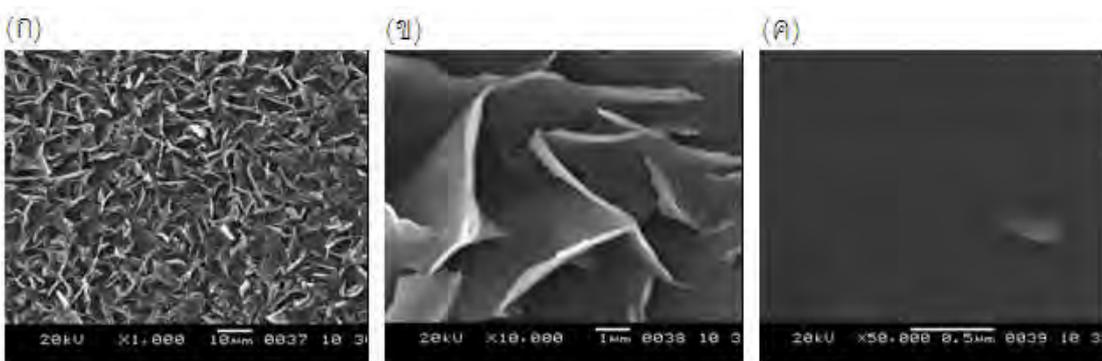
ข.6-10 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET B 5.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



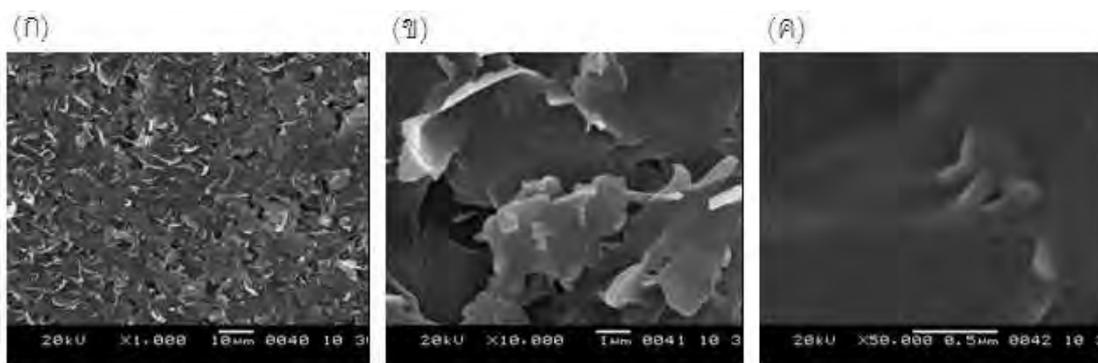
ข.6-11 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET C ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



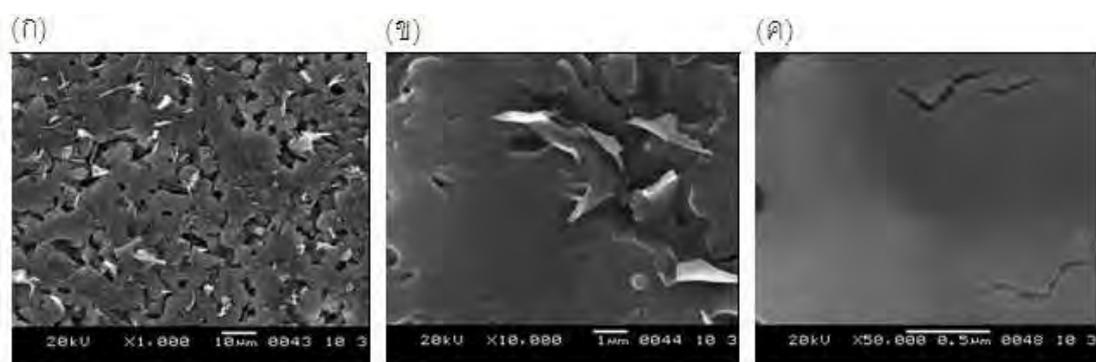
ข.6-12 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET C 0.5 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



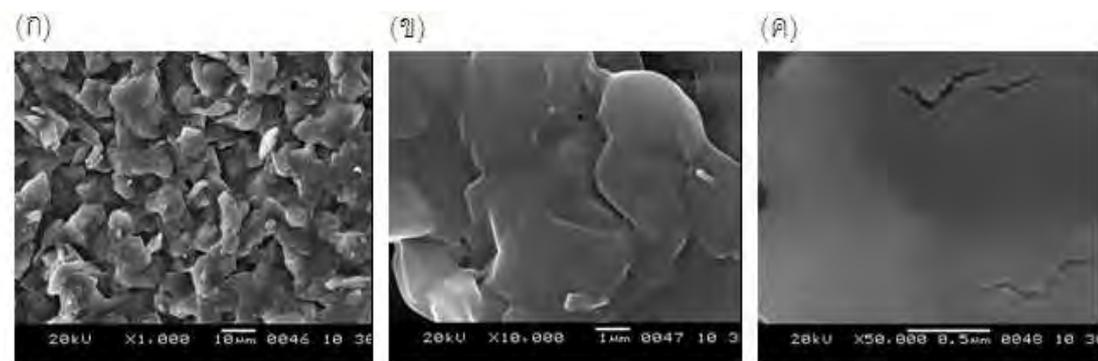
ข.6-13 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET C 1.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



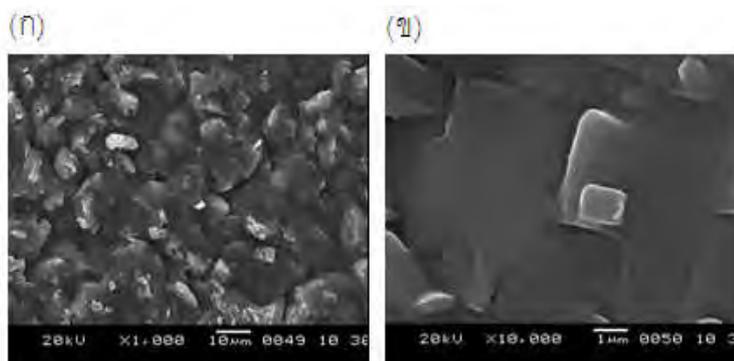
ข.6-14 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET C 3.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



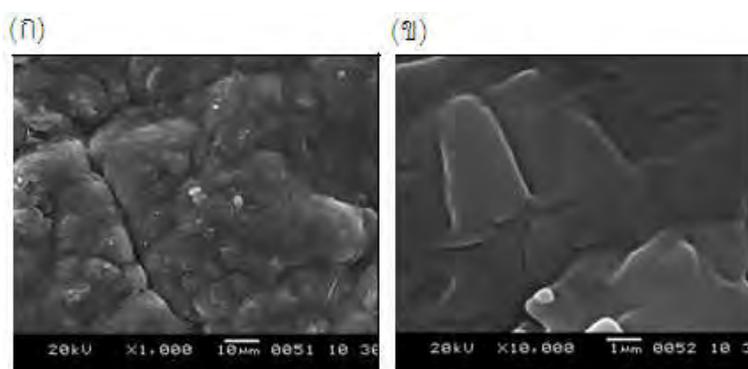
ข.6-15 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET C 5.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



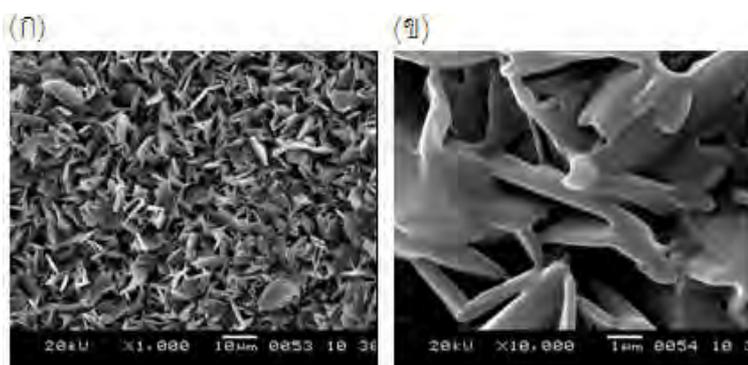
ข.6-16 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET AB ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ(ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



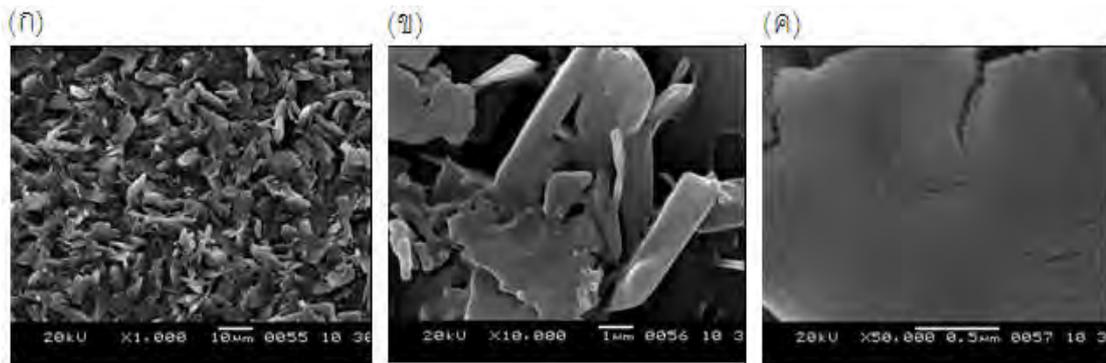
ข.6-17 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET AB 0.5 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 10,000 เท่า ตามลำดับ



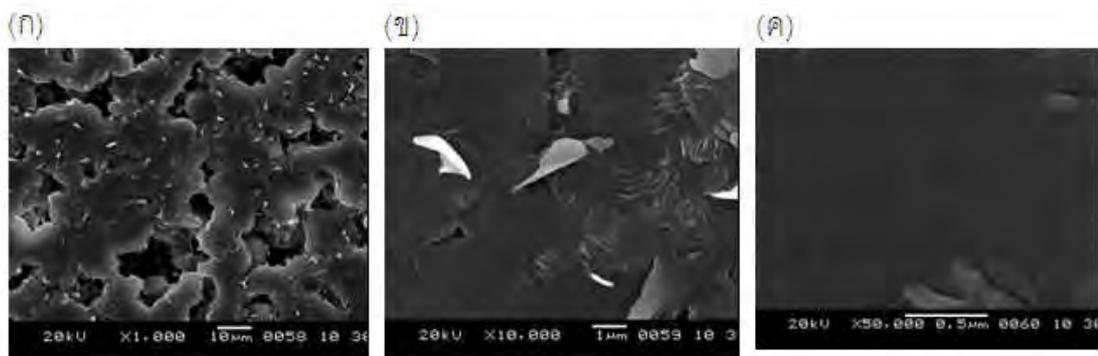
ข.6-18 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET AB 1.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 10,000 เท่า ตามลำดับ



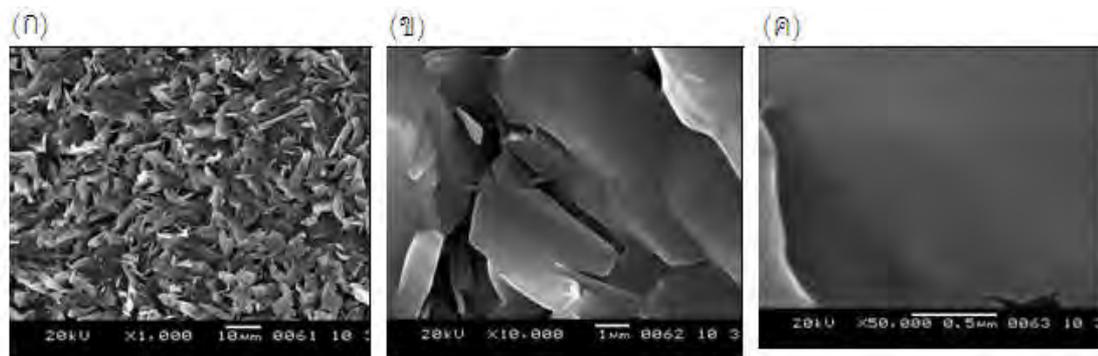
ข.6-19 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET AB 3.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 และ (ข) 10,000 เท่า ตามลำดับ



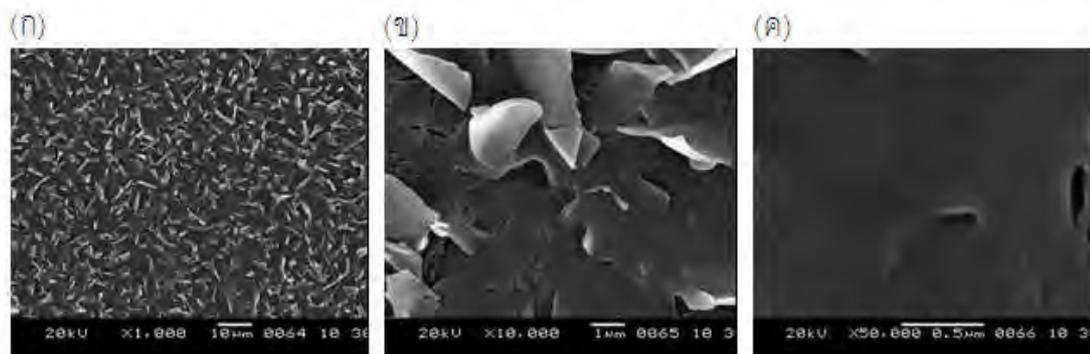
ข.6-20 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET AB 5.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



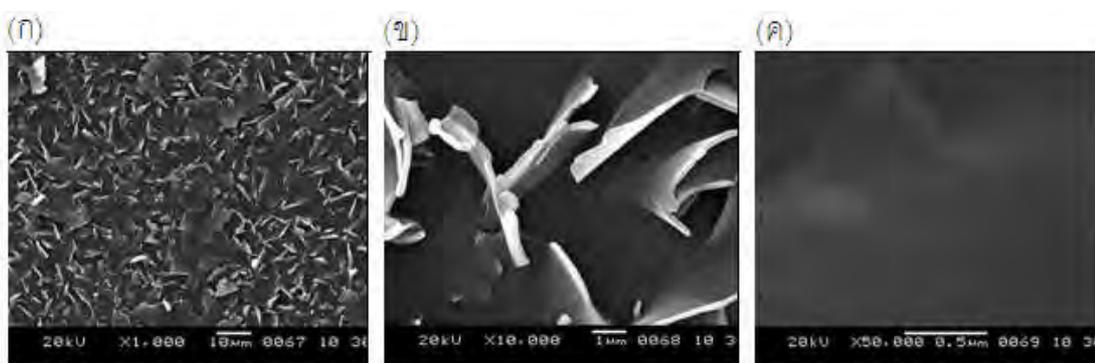
ข.6-21 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET ABC ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



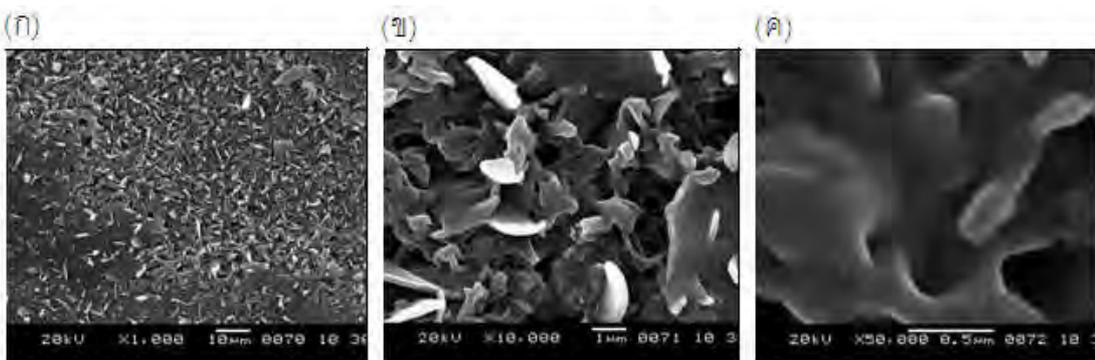
ข.6-22 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET ABC 0.5 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับเท่า ตามลำดับ



ข.6-23 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET ABC 1.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ

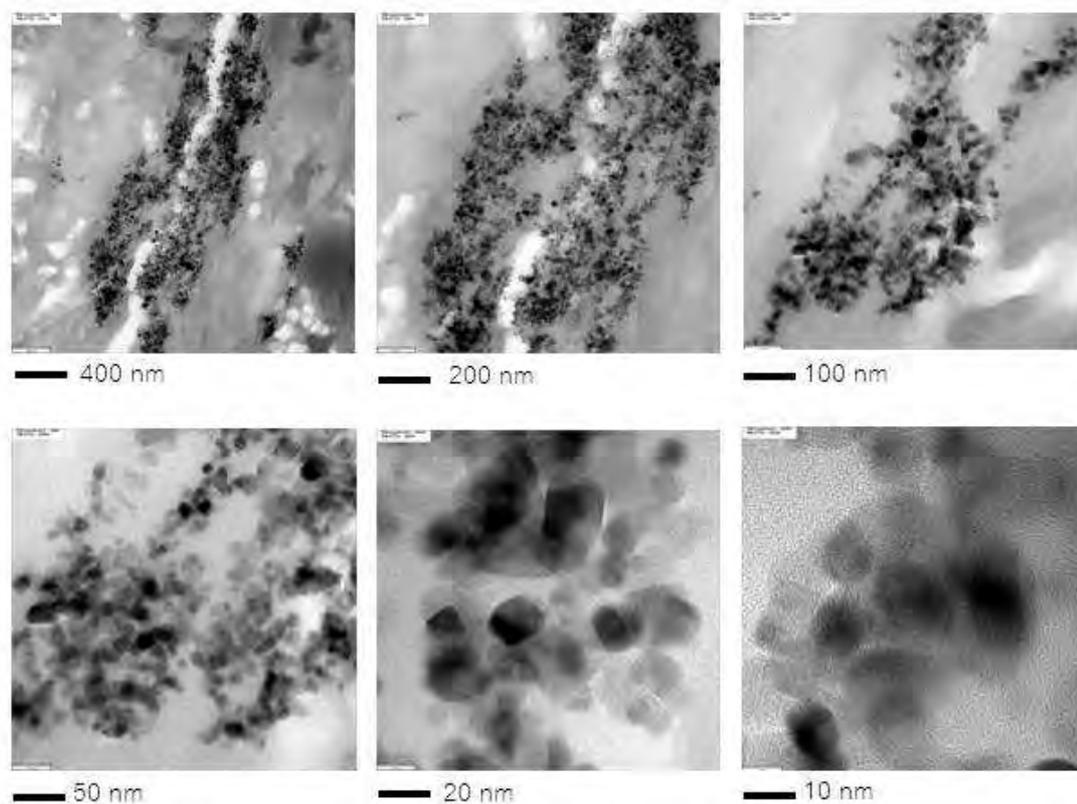


ข.6-24 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET ABC 3.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ



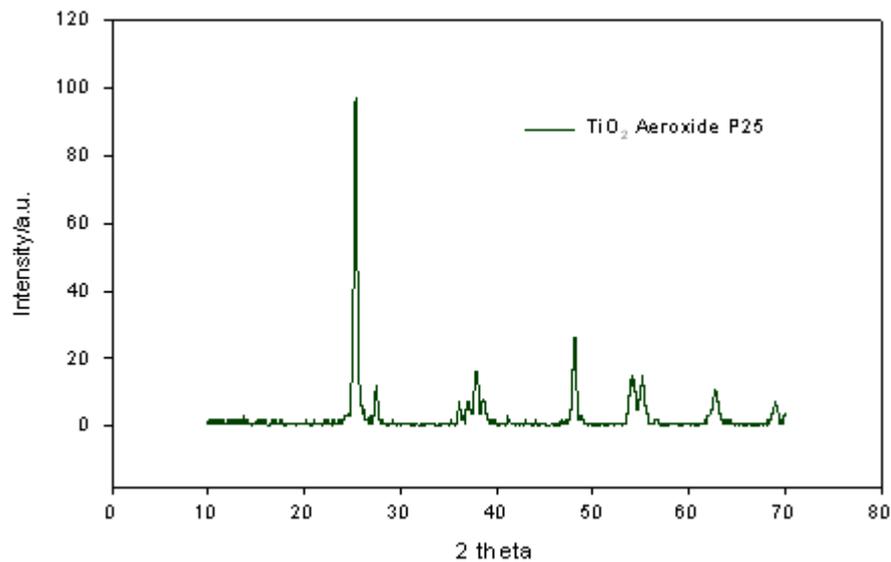
ข.6-25 ภาพ SEM ของนาโนคอมโพสิต PET ABC 5.0 ที่กำลังขยาย (ก) 1000 (ข) 10,000 และ (ค) 50,000 เท่า ตามลำดับ

ข.7 ภาพ TEM ของนาโนคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์

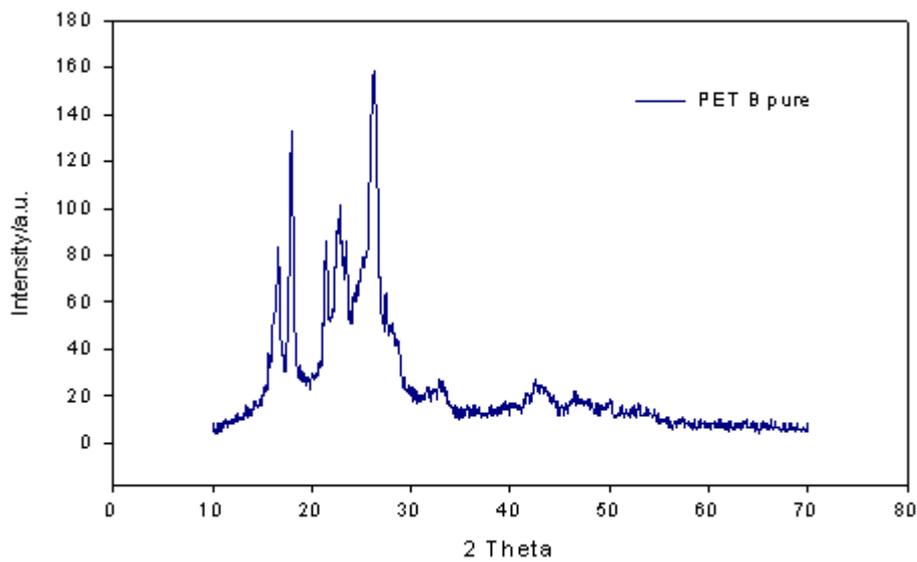


ข.7-1 ภาพ TEM ของนาโนคอมโพสิต PET A 5.0 ที่ (ก) 400 นาโนเมตร (ข) 200 นาโนเมตร (ค) 100 นาโนเมตร (ง) 50 นาโนเมตร (จ) 20 นาโนเมตร และ (ฉ) 10 นาโนเมตร ตามลำดับ

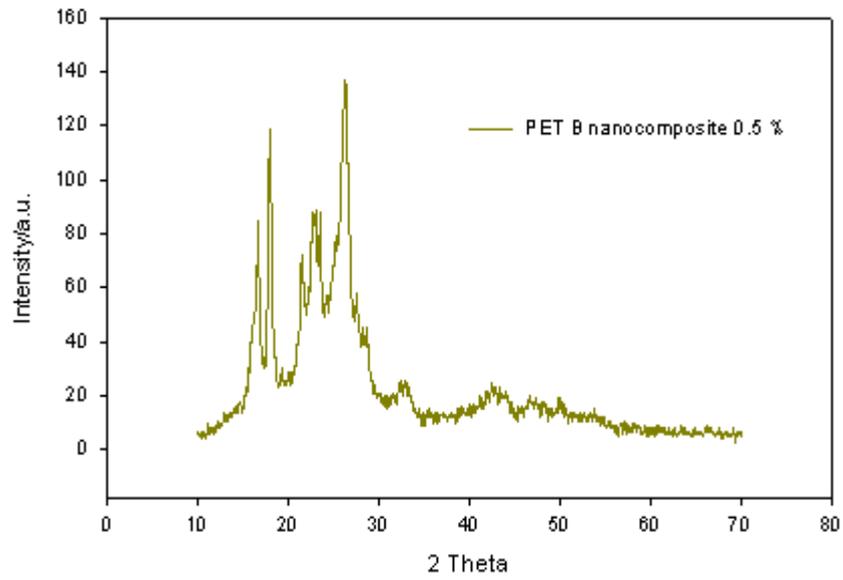
ข.8 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของนาโนคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์



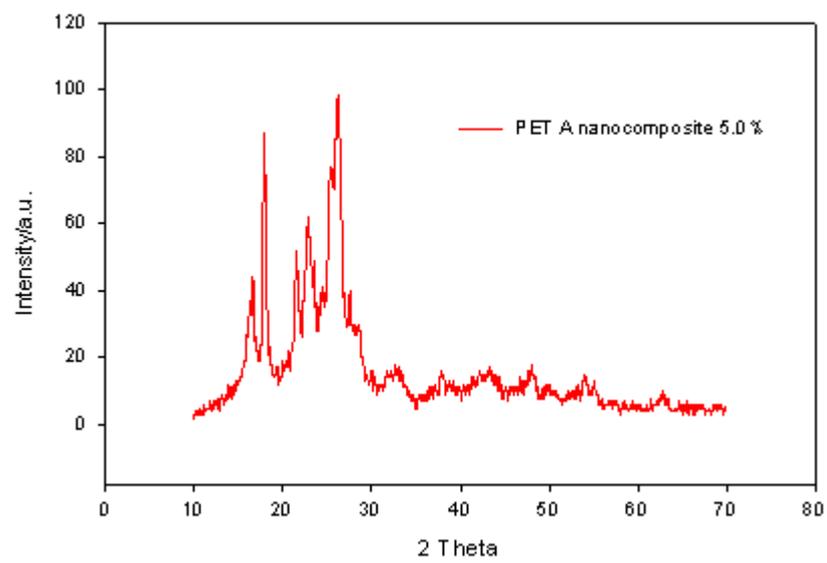
ข.8-1 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของไทเทเนียมไดออกไซด์



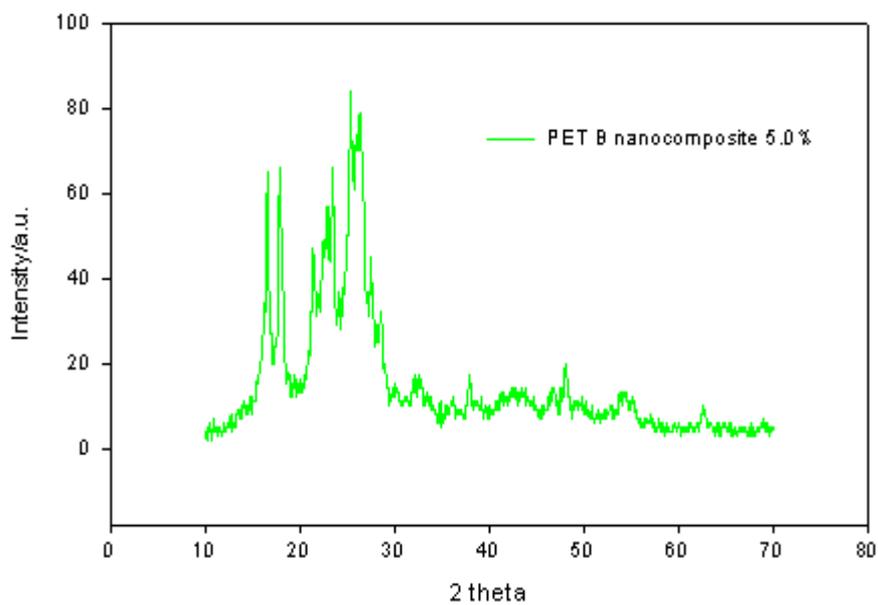
ข.8-2 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET B



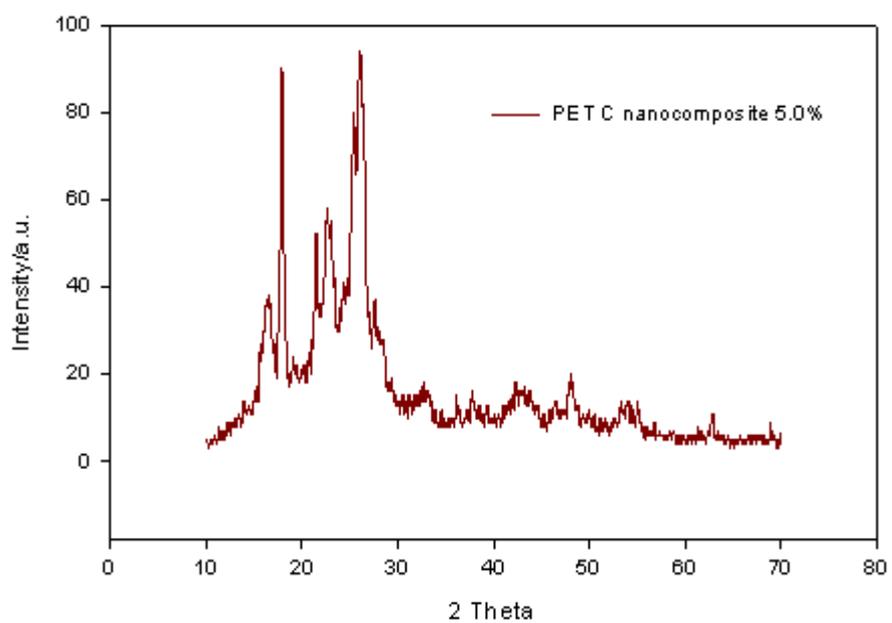
ข.8-3 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของนาโนคอมโพสิต PET B 0.5



ข.8-4 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของนาโนคอมโพสิต PET A 5.0



ข.8-5 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของนาโนคอมโพสิต PET B 5.0



ข.8-6 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของนาโนคอมโพสิต PET C 5.0

ภาคผนวก ค

ค.1 ความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

สาร	Hardness Shore D						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	SD
PET A	37	40	37	37	38	38.4	1.192
PET A 0.5	38	38	39	39	39	38.6	0.490
PET A 1.0	39	40	42	41	42	40.8	1.166
PET A 3.0	42	42	42	43	43	42.4	0.490
PET A 5.0	45	45	44	45	45	44.8	0.4
PET B	37	38	39	38	38	38	0.632
PET B 0.5	40	40	38	38	37	39	1.211
PET B 1.0	42	40	41	40	41	40.8	0.748
PET B 3.0	44	45	45	47	44	45	1.095
PET B 5.0	50	52	53	55	53	52.6	1.625
PET C	43	43	41	42	41	42	0.894
PET C 0.5	46	43	44	46	45	44.8	1.166
PET C 1.0	48	45	46	43	44	45	1.722
PET C 3.0	48	48	47	48	48	47.8	0.4
PET C 5.0	50	50	52	52	50	50.8	0.980
PET C 1.0 ST	46	45	46	49	48	47	1.472
PET AB	38	37	39	38	38	38	0.632
PET AB 0.5	40	42	40	40	41	40.6	0.8
PET AB 1.0	42	42	42	42	42	42	0
PET AB 3.0	45	45	46	45	46	45.4	0.490

ค.1 ความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต (ต่อ)

สาร	Hardness Shore D						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	SD
PET AB 5.0	46	47	48	47	48	47.2	0.748
PET ABC	40	40	37	39	39	39	1.095
PET ABC 0.5	42	42	43	42	43	42.2	0.497
PET ABC 1.0	46	46	46	44	45	45.4	0.8
PET ABC 3.0	47	48	48	48	48	47.8	0.4
PET ABC 5.0	50	49	52	50	50	50.2	0.980

ค.2 ค่าการทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและนาโนคอมพอสิต

ใช้เครื่อง Impact tester หัวค้อนเบอร์ 3 พลังงาน 5.50 จูล

ชิ้นงานที่	PET C			PET C 1.0			PET C 1.0 ST		
	หนา (มิลลิ เมตร)	กว้าง (มิลลิ เมตร)	พลังงาน (J/m ²)	หนา (มิลลิ เมตร)	กว้าง (มิลลิ เมตร)	พลังงาน (J/m ²)	หนา (มิลลิ เมตร)	กว้าง (มิลลิ เมตร)	พลังงาน (J/m ²)
1	3.00	8.12	0	3.00	8.13	0	3.00	8.10	0
2	2.98	8.10	0	3.00	8.12	0	3.00	8.08	0
3	2.98	8.12	0	2.98	8.12	0	2.90	8.12	0
4	2.98	8.12	0	2.96	8.12	0	2.98	8.16	0
5	2.90	8.12	0	2.96	8.13	0	3.00	8.10	0
6	3.00	8.12	0	3.00	8.13	0	2.96	8.08	0
7	3.00	8.13	0	3.00	8.12	0	3.00	8.00	0
เฉลี่ย*	2.98	8.12	0	2.99	8.13	0	2.97	8.09	0

* SD =0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธนวรรณ ฤทธิชัย เกิดเมื่อวันที่ 4 เมษายน พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2552