การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว

นายพิพัฒน์ จันทิวาเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) FROM GLYCOLYZED PRODUCTS BASED ON WASTE PET BOTTLES

Mr. Pipat Chantiwacharoen

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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

492151

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว
โดย	นายพิพัฒน์ จันทิวาเจริญ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.วันเพ็ญ เตชะบุญเกียรติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.วันเพ็ญ เตชะบุญเกียรติ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต)

พิพัฒน์ จันทิวาเจริญ : การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจากผลผลิตไกลโคไลซ์ของขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว. (SYNTHESIS OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) FROM GLYCOLYZED PRODUCTS BASED ON WASTE PET BOTTLES) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์, อ. ที่ปรึกษาร่วม: อ.ดร.วันเพ็ญ เตชะบุญเกียรติ, 83 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการนำขวดเพ็ตที่ใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคลิซิส โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารย่อยสลาย และซิงก์แอซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขวดเพ็ตต่อเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 1 ต่อ 5 โดยมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิสตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC DSC FT-IR และค่าไฮดรอกซิล บ่งชี้ว่า ผลผลิตไกลโคไลซ์ประกอบด้วย มอนอเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์ และเตตระเมอร์ของ BHET โดยอัตราส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส เมื่อนำผลผลิตไกลโคไลซ์เฉพาะส่วน BHET และไดเมอร์ของ BHET ของทุกสูตรมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างผลผลิตไกลโคไลซ์ต่อซิงก์แอซีเทตเท่ากับ 1 ต่อ 0.0002 เป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 280±5 องศาเซลเซียส ได้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ซึ่งสามารถยืนยันโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR โดยปรากฏพีก ที่แสดงลักษณะเฉพาะของหมู่เอสเทอร์ที่ช่วง 1600-1800 ซม$^{-1}$ และ 1200-1400 ซม$^{-1}$ จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน พบว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์สูงกว่า มีอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการสลายตัว ความทนแรงดัดโค้งและความทนแรงกระแทกที่สูงกว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์ที่มีปริมาณไดเมอร์ต่ำกว่า

ภาควิชาวัสดุศาสตร์
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต พิพัฒน์ จันทิวาเจริญ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4872392723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD: WASTE PET BOTTLES / PET / RECYCLE / GLYCOLYSIS

PIPAT CHANTIWACHAROEN: SYNTHESIS OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) FROM GLYCOLYZED PRODUCTS BASED ON WASTE PET BOTTLES. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. VIMOLVAN PIMPAN, Ph.D., THESIS COADVISOR: WANPEN TACHABOONYAKIAT, Ph.D., 83 pp.

Present study was aimed to depolymerize waste PET bottles by glycolysis using ethylene glycol as a degrading agent and zinc acetate as a catalyst. Weight ratio of waste PET bottles to ethylene glycol was at 1:5 and the reaction time was varied from 1 to 5 hours. From GPC, DSC, FT-IR, and hydroxyl value analyses, the results indicated that all glycolyzed product consisted of BHET, dimer, trimer and tetramer of BHET. Their compositions depended on the glycolysis time. When BHET and dimer portions of the glycolyzed products were polymerized using the mole ratio of glycolyzed products to zinc acetate of 1:0.0002 for 2 and 3 hours at 280±5 ^{o}C. poly(ethylene terephthalate)s were obtained. Their chemical structures confirmed by FT-IR exhibited the presence of ester characteristics at wavenumber ranges of 1600-1800 cm^{-1} and 1200-1400 cm^{-1}. From mechanical and thermal properties studies, it was found that poly(ethylene terephthalate) synthesized from glycolyzed product containing higher amount of dimmer had higher melting temperature, decomposition temperature, flexural strength and impact strength than those synthesized from glycolyzed products containing lower amount of dimer.

Department Materials Science Student's signature PIPAT CHANTIWACHAROEN
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature Vimolvan Pimpan
Academic year 2006 Co-advisor's signature Wanpen Tachaboonyakiat

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัตถุดิบ และสถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหา และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. อาจารย์ ดร.วันเพ็ญ เตชะบุญเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหา และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

5. อาจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

6. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อน ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ..... 1

2 วารสารปริทรรศน์..... 3

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 3

2.1.1 วิธีการเตรียมวัตถุดิบ..... 4

2.1.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 5

2.1.3 สมบัติและการนำไปใช้งาน..... 6

2.2 การรีไซเคิล..... 7

2.2.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ..... 8

2.2.2 การรีไซเคิลทางเคมี..... 9

3 การทดลอง..... 17

3.1 ขั้นตอนการทดลอง..... 17

3.2 การเตรียมผลผลิตไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว..... 18

3.2.1 วัตถุดิบและสารเคมี..... 18

3.2.2 อุปกรณ์..... 18

3.2.3 วิธีการทดลอง..... 18

3.3 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจากผลผลิตไกลโคไลซ์..... 20

3.3.1 สารเคมี..... 20

3.3.2 อุปกรณ์..... 20

หน้า

3.3.3 วิธีการทดลอง..... 21
3.4 การหาลักษณะเฉพาะและสมบัติทางความร้อนของผลผลิตไกลโคไลซ์และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้..... 22
3.4.1 การหาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี(GPC)..... 22
3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)..... 22
3.4.3 การหาอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี (DSC)..... 23
3.4.4 การหาค่าไฮดรอกซิล (hydroxyl value)..... 24
3.4.5 การหาอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิส (TGA)..... 25
3.5 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 25
3.5.1 สารเคมี..... 25
3.5.2 อุปกรณ์..... 25
3.5.3 วิธีการทดลอง..... 25
3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 27
3.6.1 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง..... 27
3.6.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก..... 29
3.6.3 การทดสอบความแข็ง..... 30

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล..... 31
4.1 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของผลผลิตไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว..... 31
4.1.1 ลักษณะของผลผลิตไกลโคไลซ์..... 31
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของผลผลิตไกลโคไลซ์..... 32
4.1.3 น้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์..... 35
4.1.4 องค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์..... 37
4.1.4.1 ปริมาณขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 38
4.1.4.2 น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 39

หน้า

4.1.4.3 ค่าไฮดอรกซิลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 41
4.1.4.4 อุณหภูมิหลอมเหลวขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 42
4.1.4.5 โครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 43
4.1.5 อุณหภูมิหลอมเหลวของผลผลิตไกลโคไลซ์..... 45
4.2 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากผลผลิตไกลโคไลซ์..... 46
4.2.1 ลักษณะของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 46
4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 48
4.2.2.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส..... 49
4.2.2.2 ผลของส่วนประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 50
4.2.2.3 ผลของเวลาในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 51
4.2.3 อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 51
4.2.3.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส..... 52
4.2.3.2 ผลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 53
4.2.3.3 ผลของเวลาในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 54
4.2.4 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 55
4.2.4.1 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส..... 55
4.2.4.2 ผลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 55
4.2.4.3 ผลของเวลาในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 56
4.3 ลักษณะและสมบัติของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 57
4.3.1 ลักษณะของแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 57
4.3.2 ความทนแรงดัดโค้ง..... 58
4.3.3 ความทนแรงกระแทก..... 59
4.3.4 ความแข็ง..... 60

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 51
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 61
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 62

หน้า

รายการอ้างอิง..... 63

ภาคผนวก..... 66

ภาคผนวก ก..... 67

ภาคผนวก ข..... 79

ภาคผนวก ค..... 82

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 83

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของพีกสำคัญที่พบในสเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์และขวดเพ็ต.. 32

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของผลผลิตไกลโคไลซ์ 36

ตารางที่ 4.3 ปริมาณขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์..... 38

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยา
ไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง..... 40

ตารางที่ 4.5 ค่าไฮดรอกซิลขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยา
ไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง..... 41

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิหลอมเหลวขององค์ประกอบในผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยา
ไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง..... 42

ตารางที่ 4.7 สูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 46

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 55

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเพ็ต..... 3

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองในการรีไซเคิลขวดน้ำดื่มเพ็ตเป็นแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 17

รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียด (pulverizer) รุ่น T15..... 19

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การย่อยสลายขวดเพ็ต..... 20

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 21

รูปที่ 3.5 เจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟ ของ Waters รุ่น Waters 600..... 22

รูปที่ 3.6 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ของ Perkin Elmer รุ่น 1760X..... 23

รูปที่ 3.7 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ ของ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC.... 24

รูปที่ 3.8 เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851^e..... 25

รูปที่ 3.9 เครื่องอัดเข้าแบบ (Compression molding) ของ Lab tech engineering รุ่น LP-S-50..... 26

รูปที่ 3.10 เครื่องตัดชิ้นงาน..... 26

รูปที่ 3.11 เครื่องบากชิ้นงาน..... 27

รูปที่ 3.12 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD500..... 28

รูปที่ 3.13 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D790..... 28

รูปที่ 3.14 แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบของเครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้งแบบสามจุด..... 28

รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH..... 29

รูปที่ 3.16 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 (type Izod)..... 30

รูปที่ 3.17 เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore C รุ่น GS-701N Teclock..... 30

รูปที่ 4.1 ขวดเพ็ตที่ผ่านการบดแล้ว..... 31

รูปที่ 4.2 ผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสของขวดเพ็ต โดยใช้เวลา 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง..... 31

รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่าง ขวดเพ็ต (ก) และผลผลิตไกลโคไลซ์ (ข)..... 32

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสโดยใช้เวลา 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง..... 33

รูปที่ 4.5 GPC โครมาโทแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสโดยใช้เวลา 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง..... 35

รูปที่ 4.6 ลักษณะองค์ประกอบของผลผลิตไกลโคไลซ์ ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค)..... 37

รูปที่ 4.7 GPC โครมาโทแกรมของส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค) ของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง..... 39

รูปที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของส่วนที่ละลายในน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายในน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค) ของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง..... 42

รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของ ส่วนที่ละลายน้ำเย็น (ก) ส่วนที่ละลายในน้ำร้อน (ข) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (ค) ของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง..... 43

รูปที่ 4.10 DSC เทอร์โมแกรมของผลผลิตไกลโคไลซ์ส่วนที่ละลายในน้ำซึ่งได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ) ชั่วโมง..... 45

รูปที่ 4.11 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตไกลโคไลซ์สูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) 5 (จ) 6 (ฉ) 7 (ช) และ 8 (ซ)..... 47

รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของผลผลิตไกลโคไลซ์ ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาไกลโคลิซิส 4 ชั่วโมง (ก) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 7 (ข) และขวดน้ำเพ็ต (ค)..... 48

รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ)..... 49

รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 5 (ก) 6 (ข) และ 7 (ค)..... 50

รูปที่ 4.15 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 4 (ก) และ 8 (ข)..... 51

รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของขวดเพ็ต (ก) เทียบกับเพ็ตที่สังเคราะห์สูตรที่ 2 (ข)..... 51

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) และ 5 (จ)..... 52

รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 5 (ก) 6 (ข) และ 7 (ค)..... 53

รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์จากสูตรที่ 8 (ก) และ 4 (ข)..... 54

รูปที่ 4.20 แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรที่ 1 (ก) 2 (ข) 3 (ค) 4 (ง) 5 (จ) 6 (ฉ) 7 (ช) และ 8 (ซ)..... 57

รูปที่ 4.21 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรต่างๆ... 58

รูปที่ 4.22 ความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรต่างๆ. 59

รูปที่ 4.23 ความแข็งของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่สังเคราะห์ได้จากสูตรต่างๆ..... 60