ผลของกรดอิ่มตัวต่อสมบัติทางกายภาพของยูพีอีเรซินที่เตรียมจากผลิตภัณฑ์เพตรีไซเคิล

นางสาวกมลรัตน์ พ่วงแสนสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SATURATED ACIDS ON PHYSICAL PROPERTIES OF UPE RESINS PREPARED FROM RECYCLE PET-PRODUCTS

Miss Kamonrat Puangsansuk

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

492256

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของกรดอิ่มตัวต่อสมบัติทางกายภาพของยูพีอีเรซินที่เตรียมจากผลิตภัณฑ์เพตรีไซเคิล
โดย	นางสาวกมลรัตน์ พ่วงแสนสุข
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)

กมลรัตน์ พ่วงแสนสุข : ผลของกรดอิ่มตัวต่อสมบัติทางกายภาพของยูพีอีเรซินที่เตรียมจากผลิตภัณฑ์เพตรีไซเคิล. (EFFECTS OF SATURATED ACIDS ON PHYSICAL PROPERTIES OF UPE RESINS PREPARED FROM RECYCLE PET-PRODUCTS) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ.ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต, 92 หน้า

ผลิตภัณฑ์เพตในรูปแบบของขวดน้ำดื่มและผ้าพอลิเอสเทอร์100% ถูกนำมาย่อยสลายโดยกระบวนการไกลโคลิซิสในโพรพิลีนไกลคอลมากเกินพอที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยมีซิงก์อะซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายขวดและผ้ามีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันคือ 328 และ 337 กรัม/โมล ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ในทางทฤษฎีไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้สามารถทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และกรดอิ่มตัวได้แก่กรดซัคซินิคและกรดอะดิพิคในสัดส่วนต่างๆ เกิดเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวหรือยูพีอีเรซิน จากนั้นนำมาผสมกับสไตรีนมอนอเมอร์แล้วขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบโดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์และโคบอลต์ออกโตเอตเป็นตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมขวางตามลำดับ นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของยูพีอีเรซินที่เตรียมได้ใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของกรดอิ่มตัวที่ใช้พบว่าระยะเวลาการเกิดเจลและการแข็งตัวเพิ่มขึ้นและความแข็งของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์ลดลงเนื่องจากปริมาณของพันธะคู่ที่สามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ลดน้อยลง ในขณะที่ระยะห่างระหว่างพันธะคู่ที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยกระจายแรงที่ได้รับทำให้ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กรดอิ่มตัวเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีอุณหภูมิการสลายตัวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันใกล้เคียงกัน

ภาควิชาวัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4872207323 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD: RECYCLING / PET / UNSATURATED POLYESTER RESIN

KAMONRAT PUANGSANSUK: EFFECTS OF SATURATED ACIDS ON PHYSICAL PROPERTIES OF UPE RESINS PREPARED FROM RECYCLE PET-PRODUCTS. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., THESIS COADVISOR: MANTANA OPAPRAKASIT, Ph.D., 92 pp.

PET-products from post-consumer soft-drink bottles and 100% polyester fabrics were depolymerized by glycolysis reaction with the excess of propylene glycol at 190^{0}C in the presence of zinc acetate as a catalyst. It was found that the glycolyzed products from bottles and fabrics possessed comparable molecular weight of 328 and 337 g·mol^{-1}, respectively. This was closed to the molecular weight of the theoretical glycolyzed product. The glycolyzed products were reacted with maleic anhydride and saturated acids that are succinic acid and adipic acid. The obtained unsaturated polyester or UPEs were then mixed with styrene monomer. Polyester resins products were casted into specimens by crosslinking reaction using methyl ethyl ketone peroxide and cobalt octoate as an initiator and a catalyst, respectively. Physical properties including hardness, impact strength, flexural properties and thermal properties of the cured products were tested. The results showed that the duration after gel time until cure time was the same for all resins. When the amount of saturated acids increased, the gel time and the cure time increased and the hardness decreased due to the decreasing amount of crosslinking sites. While the extended distance between crosslinking sites on molecular chains facilitated load distribution, resulting in the significant improvement of impact strength. The flexural strength was also improved when the small amount of saturated acid was used. It was found that the onset degradation temperature of the prepared resins were similar for all resins, as well as the glass transition temperature.

Department...Materials Science.....Student's signature.....
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature.....
Academic year...2006.....Coadvisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านสถานที่เครื่องมือ และวัตถุดิบสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลหลายๆ ท่าน และหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังต่อไปนี้

1. รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. อ.ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหา และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. รศ.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ รศ.ไพพรรณ สันติสุข และ รศ.อรอุษา สรวารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย

5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

6. บริษัท สยามเคมีคอล อินดัสตรี้ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการทำวิจัย

7. บริษัท เมทเล่อร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง DSC

8. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องปั่นแบบหมุนเหวี่ยง

9. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาการจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามมุ่งหวังอย่างสมบูรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ 1

2 วารสารปริทัศน์ 3

2.1 พอลิเอสเทอร์ (Polyester) 3

2.1.1 ปฏิกิริยาทางเคมีในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ 4

2.1.2 การแบ่งประเภทของพอลิเอสเทอร์ 5

2.2 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) 5

2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ 7

2.2.2 การสังเคราะห์เพต 8

2.2.3 สมบัติของเพต 10

2.2.4 การนำไปใช้งาน 10

2.3 พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester, UPE) 11

2.3.1 วัตถุดิบในการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซิน 12

2.3.2 การแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน 16

2.3.3 กระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์ 18

2.3.4 สมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซิน 20

2.3.5 การนำไปใช้งาน 20

2.4 การรีไซเคิลเพต (PET Recycling) 21

2.4.1 การรีไซเคิลเพตด้วยกระบวนการทางเคมี 22

2.4.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากเพตที่ใช้แล้ว 25

บทที่		หน้า
3	วิธีการทดลอง	29
	3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
	3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	30
	3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
	3.4 ขอบเขตการทดลอง	31
	3.5 การเตรียมวัตถุดิบ	31
	3.6 การย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตด้วยกระบวนการไกลโคลิซิส	32
	3.7 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์	33
	3.8 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ	34
	3.9 การทดสอบสมบัติต่างๆ	35
	3.9.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี(FT-IR)	35
	3.9.2 การตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี(GPC)	35
	3.9.3 การตรวจวัดความหนืดด้วยเครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์	36
	3.9.4 ศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอี	37
	3.9.5 การทดสอบความแข็ง(hardness)	37
	3.9.6 การทดสอบความทนแรงกระแทก(impact strength)	38
	3.9.7 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง(flexural testing)	39
	3.9.8 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)	40
	3.9.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิงคาลอริมิทรี(DSC)	41
	3.9.10 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค เทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส(TGA)	42

บทที่ หน้า

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง....43

4.1 การย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตด้วยกระบวนการไกลโคลิซิส....43

4.1.1 โครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์....44

4.1.2 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโพรดักส์....47

4.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์....47

4.2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเทอร์เรซิน....48

4.2.2 ความหนืดของพอลิเอสเทอร์เรซิน....51

4.2.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน....52

4.3 การขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซิน....55

4.3.1 ความแข็ง....56

4.3.2 ความทนแรงกระแทก....57

4.3.3 สมบัติด้านแรงแรงดัดโค้ง....58

4.3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา....60

4.3.5 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิงคาลอริมิทรี....61

4.3.6 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริก แอนนาไลซิส....63

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....65

5.1 สรุปผลการทดลอง....65

5.2 ข้อเสนอแนะ....65

รายการอ้างอิง....66

ภาคผนวก....68

ภาคผนวก ก....69

ภาคผนวก ข....70

ภาคผนวก ค....76

ภาคผนวก ง....82

ภาคผนวก จ....87

ภาคผนวก ฉ....89

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....92

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างกรดที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ 3

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ 4

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 29

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 34

ตารางที่ 3.3 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบด้วยเทคนิค GPC 36

ตารางที่ 4.1 ผลการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตในรูปแบบต่างๆ 43

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์ 46

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักซ์ 47

ตารางที่ 4.4 ผลการสังเคราะห์ยูพีอีจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ 48

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของยูพีอี 51

ตารางที่ 4.6 ความหนืดของพอลิเอสเทอร์เรซิน 51

ตารางที่ 4.7 ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน 53

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอสเทอร์ 63

สารบัญรูป

รูปประกอบ หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพต....6
รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์เรซิน....11
รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเทอร์เรซินภายหลังการแข็งตัว....12
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดไม่อิ่มตัว....13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของกรดอิ่มตัว....13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์....14
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารยับยั้งปฏิกิริยา....15
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา....15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา....16
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาขณะเรซินแข็งตัว....17
รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์....19
รูปที่ 2.12 โมเลกุลของสไตรีนมอนอเมอร์ที่แทรกระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์เรซิน ชนิดไม่อิ่มตัว....26
รูปที่ 2.13 โครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเทอร์ภายหลังการแข็งตัว....27
รูปที่ 3.1 แผนผังขอบเขตการทดลอง....31
รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียด....31
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การย่อยสลายเพต....32
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว....33
รูปที่ 3.5 เครื่อง FT-IR Spectrometer รุ่น Perkin Elmer System 2000 FT-IR....35
รูปที่ 3.6 เครื่อง GPC รุ่น Waters 600 controller....36
รูปที่ 3.7 เครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์....37
รูปที่ 3.8 เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D....38
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH....39
รูปที่ 3.10 แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบของเครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้งแบบสามจุด....40
รูปที่ 3.11 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD500....40
รูปที่ 3.12 เครื่อง SEM ยี่ห้อ Joel รุ่น JSM-6480LV....41

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 3.13 เครื่อง DSC รุ่น METTLER TOLEDO DSC822^{e} 41
รูปที่ 3.14 เครื่อง TGA รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851^{e} 42
รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์เพตที่ผ่านการบด 43
รูปที่ 4.2 ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพต.....44
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ในทางทฤษฎี 44
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของ (ก) ขวดเพต (ข) ผ้าพอลิเอสเทอร์ (ค) ไกลโคไลซ์โพรดักส์จากการย่อยสลายขวดเพตและ (ง) ไกลโคไลซ์โพรดักส์จากการย่อยสลายผ้าพอลิเอสเทอร์.....45
รูปที่ 4.5 พอลิเอสเทอร์เรซินจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ (ก) จากขวดเพต (ข) จากผ้าพอลิเอสเทอร์...48
รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์เรซินที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ (ก) ขวดเพต/MA (ข) ขวดเพต/SA 0.125 (ค)ขวดเพต/AA 0.125 (ง) ผ้าพอลิเอสเทอร์/MA(จ) ผ้าพอลิเอสเทอร์/SA 0.125 49
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและอุณหภูมิของพอลิเอสเทอร์เรซิน.....53
รูปที่ 4.8 ระยะเวลาที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาของพอลิเอสเทอร์เรซิน.....54
รูปที่ 4.9 ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์.....54
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรควิโนนและระยะเวลาเริ่มต้นปฏิกิริยา.....55
รูปที่ 4.11 ลักษณะของพอลิเอสเทอร์.....56
รูปที่ 4.12 ความแข็งของพอลิเอสเทอร์ 56
รูปที่ 4.13 ความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเทอร์ 57
รูปที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์.....58
รูปที่ 4.15 มอดูลัสดัดโค้งของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์.....59
รูปที่ 4.16 ระยะดัดโค้งที่จุดแตกหักของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์.....59
รูปที่ 4.17 ตัวอย่างสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์ (ก)ขวดเพต/MA (ข)ขวดเพต/SA 0.125 (ค)ขวดเพต/AA 0.125 (ง)ผ้าพอลิเอสเทอร์/MA(จ)ผ้าพอลิเอสเทอร์/SA 0.125.....60
รูปที่ 4.18 ตัวอย่าง DSC เทอร์โมแกรมของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์.....62
รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอสเทอร์เรซินที่เชื่อมขวางอย่างสมบูรณ์.....62
รูปที่ 4.20 ตัวอย่าง TGA เทอร์โมแกรมของผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์.....64