การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์จากยูพีอีที่ได้จากเพตรีไซเคิลด้วยยูพีอีทางการค้า

นางสาวธิดารัตน์ ลิมปิติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-6399-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 25195657

PHYSICAL PROPERTY IMPROVEMENT OF UPE-RECYCLED PET BASED PRODUCT WITH COMMERCIAL UPE

Miss Thidarat Limpiti

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 2005

ISBN 974-17-6399-9

481935

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์จากยูพีอีที่ได้จากเพตรีไซเคิลด้วยยูพีอีทางการค้า
โดย	นางสาว ธิดารัตน์ ลิมปิติ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต)

ธิดารัตน์ ลิมปิติ : การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์จากยูพีอีที่ได้จากเพตรีไซเคิลด้วยยูพีอีทางการค้า. (PHYSICAL PROPERTY IMPROVEMENT OF UPE-RECYCLED PET BASED PRODUCT WITH COMMERCIAL UPE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช 101 หน้า. ISBN 974-17-6399-9.

ผลิตภัณฑ์เพตในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่เป็นขวดน้ำดื่ม ผ้า T/C (ผ้าพอลิเอสเทอร์ที่มีฝ้ายเป็นองค์ประกอบ) และผ้าพอลิเอสเทอร์ ถูกนำมาย่อยสลายร่วมกันโดยกระบวนการไกลโคลิซิสในโพรพิลีนไกลคอลมากเกินพอที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยมีซิงก์อะซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนอยู่ในช่วง 546-733 และมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 800-880 เซนติพอยส์ ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้สามารถทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และผสมกับสไตรีนมอนอเมอร์เกิดเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวหรือยูพีอี นำยูพีอีที่สังเคราะห์ได้มาปรับปรุงสมบัติด้วยการผสมยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ ตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำให้แข็งตัวด้วยเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์และโคบอลต์ออกโตเอต นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน จากการวิจัยพบว่าพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากไกลโคไลซ์โพรดักส์มีความแข็ง ความทนแรงกระแทกและความทนแรงดัดโค้งใกล้เคียงพอลิเอสเทอร์ทางการค้า และเมื่อผสมยูพีอีสังเคราะห์ด้วยยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าการผสมยูพีอีทางการค้าเข้าไปในยูพีอีสังเคราะห์จะไม่มีผลต่อความแข็งและความทนแรงกระแทก แต่จะทำให้ความทนแรงดัดโค้งสูงขึ้นเมื่อปริมาณของยูพีอีทางการค้าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเมื่อมีปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณยูพีอีทางการค้าที่สูงกว่านี้ความทนแรงดัดโค้งจะลดลงซึ่งเป็นผลเนื่องจากความเข้ากันไม่ได้ของยูพีอีทั้งสอง นอกจากนี้พบว่ายูพีอีที่สังเคราะห์ได้มีอุณหภูมิการสลายตัวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำกว่ายูพีอีทางการค้า

ภาควิชา...วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....ธิดารัตน์ ลิมปิติ.....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา...2548.....

4772326223 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD: WASTE PET BOTTLES / GLYCOLYSIS / UNSATURATED POLYESTER RESIN

THIDARAT LIMPITI : PHYSICAL PROPERTY IMPROVEMENT OF UPE-RECYCLED PET BASED PRODUCT WITH COMMERCIAL UPE. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D, 101 pp. ISBN 974-17-6399-9.

PET products in various forms, i.e. post-consumer soft-drink bottles, polyester fabrics, T/C fabrics and their mixtures were depolymerized by glycolysis reaction in 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 possessed a number-average molecular weight range of 546-733 and a viscosity range of 800-880 centipoise. The glycolyzed products were reacted with maleic anhydride and mixed with styrene monomer in order to obtain unsaturated polyester resins or UPEs. These UPEs were mixed with commercial UPE and cured using methyl ethyl ketone peroxide and cobalt octoate. Properties including hardness, impact strength, flexural strength and thermal properties were tested. The results showed that hardness, impact strength and flexural strength of the PET products based UPE were comparable to the commercial UPE. PET products based UPE were mixed with commercial UPE. It was found that hardness and impact strength of mixed resins were slightly altered as comparing to those of the commercial and the prepared resins. Nevertheless flexural strength was improved as the amount of the commercial UPE resin increased. The highest flexural strength was observed when the amount of the commercial resin was 60%. At the larger amount of the commercial UPE flexural strength decreased due to the immiscibility between the two resins. In addition, it was found that the degradation temperature and glass transition temperature of the prepared resin were lower than those of commercial resin.

Department...Materials Science..... Student's signature...Thidarat Limpiti...
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature.....
Academic year...2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านสถานที่เครื่องมือ และวัตถุดิบสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลหลายๆ ท่าน และหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังต่อไปนี้

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

2. รศ.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ รศ.ไพพรรณ สันติสุข รศ.อรอุษา สรวารี และ อ.ดร. มัณฑนา โอภาประกาสิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย

4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

5. บริษัท สยามเคมีคอล อินดัสตรี้ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการทำวิจัย

6. บริษัท เมทเล่อร์ โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง DSC

7.ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องปั่นแบบหมุนเหวี่ยง

8. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาการจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามมุ่งหวังอย่างสมบูรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ฎ

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	29
	3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
	3.4 ขอบเขตการทดลอง	30
	3.5 การเตรียมวัตถุดิบ	30
	3.6 การย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตด้วยกระบวนการไกลโคลิซิส	31
	3.7 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์	32
	3.8 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ	34
	3.9 การทดสอบสมบัติต่างๆ	34
	3.9.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี(FT-IR)	34
	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 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง(flexural testing)	39
	3.9.8 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)	41
	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 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	44
	4.1.2 การตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโพรดักส์ด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี	47
	4.1.3 การตรวจวัดความหนืดของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์	49
	4.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์	50
	4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของยูพีอีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	51
	4.2.2 การตรวจวัดความหนืดของยูพีอีด้วยเครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์	55
	4.2.3 การศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอี	57
	4.3 การขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซิน	63
	4.3.1 การทดสอบความแข็ง	64
	4.3.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก	67
	4.3.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง	70
	4.3.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา	73
	4.3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิทรี	75
	4.3.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส	76
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	77
	5.1 สรุปผลการทดลอง	77
	5.2 ข้อเสนอแนะ	78

หน้า

รายการอ้างอิง....79
ภาคผนวก....81
ภาคผนวก ก....82
ภาคผนวก ข....84
ภาคผนวก ค....89
ภาคผนวก ง....92
ภาคผนวก จ....95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....101

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างกรดที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ 3

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ 4

ตารางที่ 3.1 ผลิตภัณฑ์เพตที่นำมาย่อยสลาย 30

ตารางที่ 3.2 ยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนต่างๆ 33

ตารางที่ 3.3 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบด้วยเทคนิค GPC 35

ตารางที่ 4.1 ผลการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตในรูปแบบต่างๆ 43

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์ 47

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ 47

ตารางที่ 4.4 ความหนืดของไกลโคไลซ์โพรดักส์ 49

ตารางที่ 4.5 ผลการสังเคราะห์ยูพีอีจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ 50

ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของยูพีอี 53

ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของยูพีอีทางการค้า 54

ตารางที่ 4.8 ความหนืดของยูพีอี 55

ตารางที่ 4.9 ความหนืดของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอี
ทางการค้าต่างๆ 56

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอี 57

ตารางที่ 4.11 ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอี
ทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ 59

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเอสเทอร์ 75

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอสเทอร์ 76

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 เครื่องบดละเอียด....31
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การย่อยสลายเพต....31
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว....32
รูปที่ 3.4 เครื่อง FT-IR Spectrometer รุ่น Perkin Elmer System 2000 FT-IR....35
รูปที่ 3.5 เครื่อง GPC รุ่น Waters 150-CV ได้....36
รูปที่ 3.6 เครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์....37
รูปที่ 3.7 เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D....38
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH....39
รูปที่ 3.9 แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบของเครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้งแบบสามจุด....40
รูปที่ 3.10 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD500....40
รูปที่ 3.11 เครื่อง SEM รุ่น Joel JSM-5410LV....41

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 3.12 เครื่อง DSC รุ่น METTLER TOLEDO DSC822^{e} 42
รูปที่ 3.13 เครื่อง TGA รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851^{e}.....42
รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์เพตที่ผ่านการบด 43
รูปที่ 4.2 ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพต.....44
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์.....44
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพต
ก) ขวดเพต ข) ผ้า T/C+ขวดเพต ค) ผ้า T/C ง) ผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต
จ) ผ้าพอลิเอสเทอร์.....45
รูปที่ 4.5 ยูพีอีจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ 50
รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของยูพีอีที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์
ก) ขวดเพต ข) ผ้า T/C+ขวดเพต ค) ผ้า T/C ง) ผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต
จ) ผ้าพอลิเอสเทอร์.....51
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของยูพีอีทางการค้า.....54
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอีจากขวดเพต 57
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอีทางการค้า.....58
รูปที่ 4.10 ลักษณะของพอลิเอสเทอร์.....64
รูปที่ 4.11 ความแข็งของพอลิเอสเทอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเทอร์.....64
รูปที่ 4.12 ความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเทอร์ ก) จากขวดเพต ข) ผ้าT/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเทอร์.....67
รูปที่ 4.13 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอสเทอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเทอร์.....70
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของพอลิเอสเทอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเทอร์
ฉ) จากทางการค้า.....73