



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส

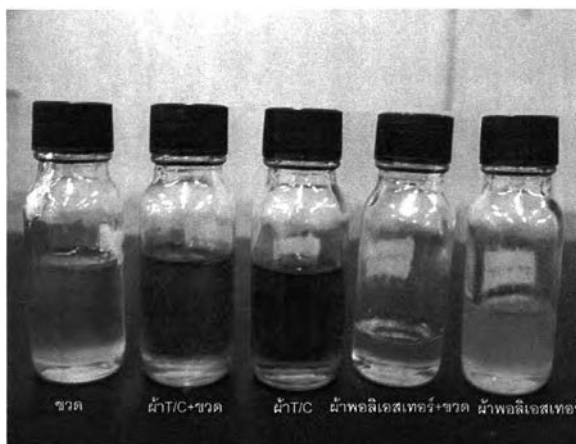
เมื่อนำผลิตภัณฑ์เพตในรูปแบบต่างๆ ที่ผ่านการบดละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มาทำการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้โพรพิลีนไกลคอลที่มากเกินไปในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพตต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 0.5:1.0 และใช้ซิงค์อะซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลาย คือ ไกลโคไลซ์ โพรดักส์ ที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส สีต่างๆ ตามชนิดของผลิตภัณฑ์เพตที่นำมาย่อยสลาย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่งสีดังกล่าวเป็นผลจากการที่ผลิตภัณฑ์เพตที่นำมาย่อยสลายมีการเติมสารเติมแต่ง (additives) ระหว่างกระบวนการผลิต



รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์เพตที่ผ่านการบดแล้ว

ตารางที่ 4.1 ผลการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตในรูปแบบต่างๆ

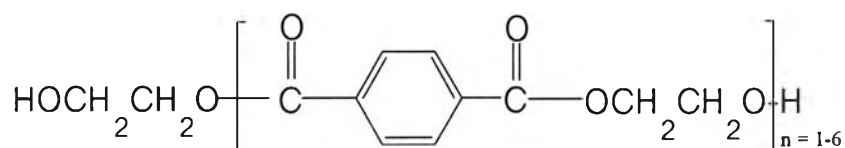
สูตร	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
ขวดเพต	ของเหลวใส สีเขียว
ผ้า T/C+ขวดเพต	ของเหลวใส สีน้ำตาลอ่อน
ผ้า T/C	ของเหลวใสสี น้ำตาลเข้ม
ผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต	ของเหลวใส สีเหลือง
ผ้าพอลิเอสเตอร์	ของเหลวใส สีเหลืองอมส้ม



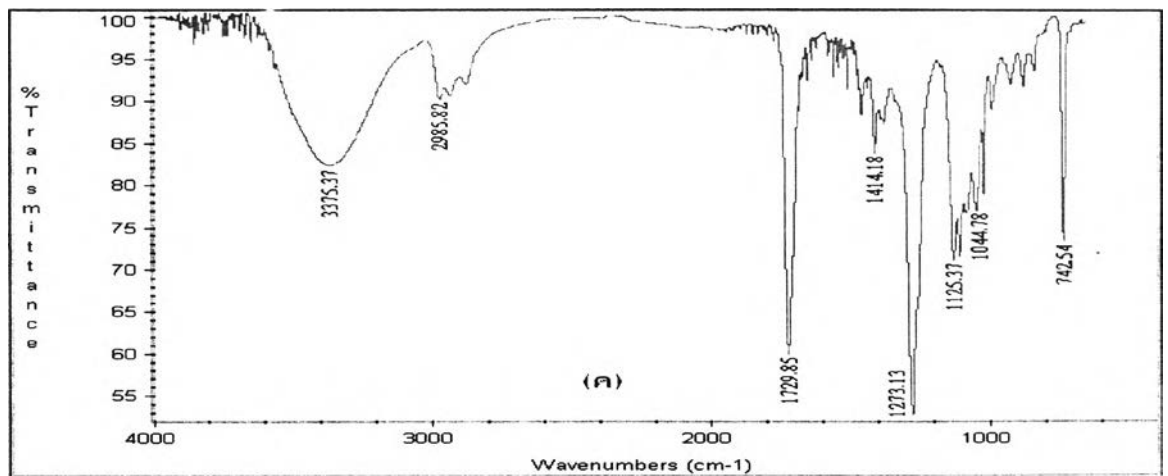
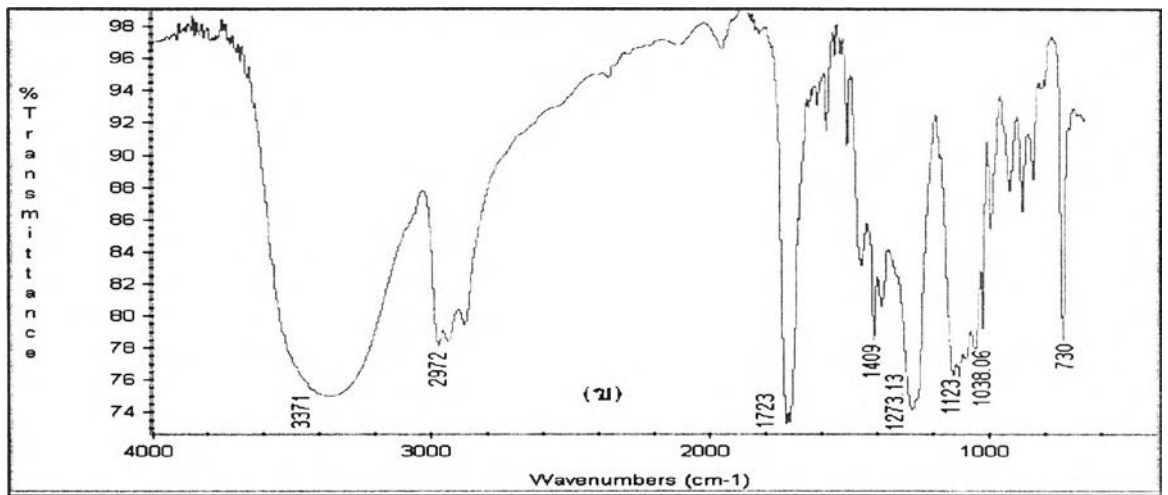
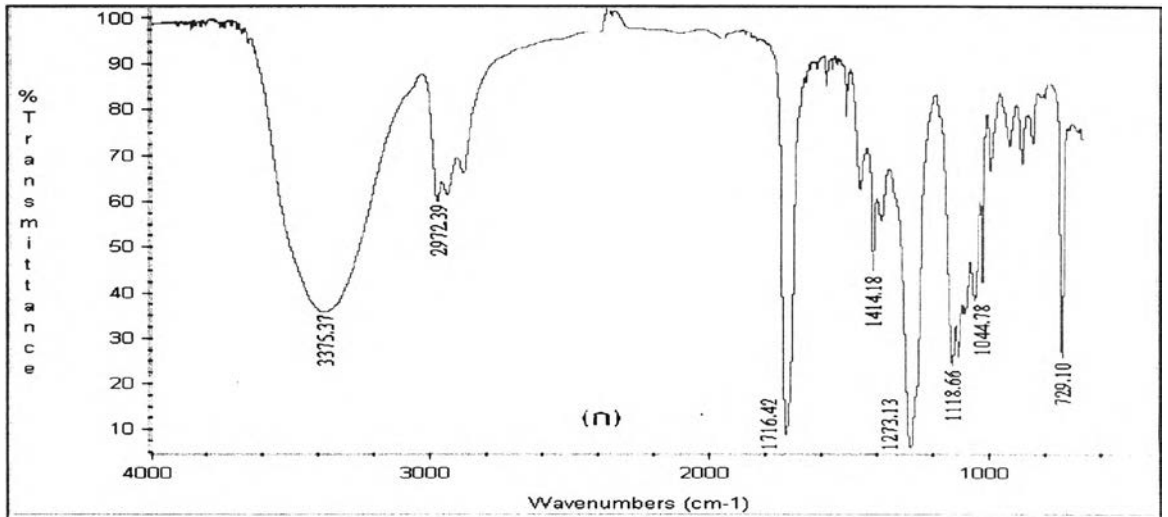
รูปที่ 4.2 ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพต

4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

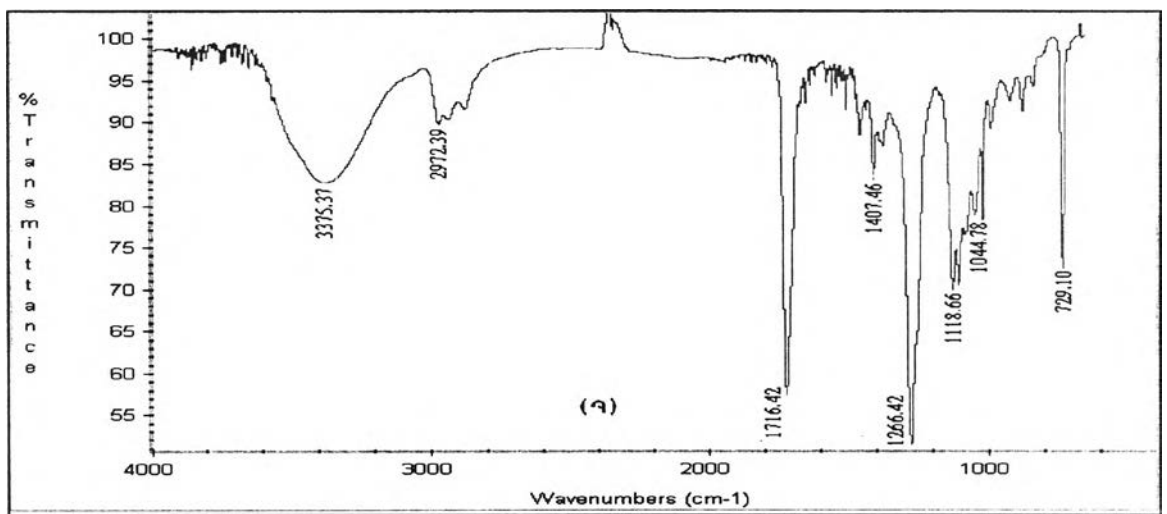
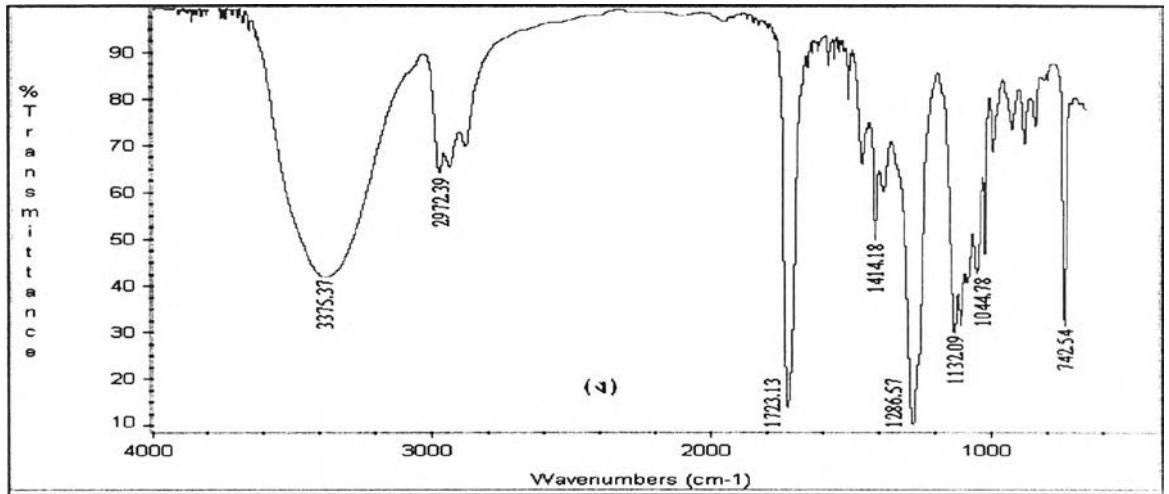
โครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ในทางทฤษฎีประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีหลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีแต่ละชนิดจะแสดงแถบดูดกลืนและพีคที่ความถี่แตกต่างกันตามโครงสร้างภายในโมเลกุล ซึ่งผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ในทางทฤษฎี



รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของไกลโคไลซิโพรดักส์จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์พेट ก) ขวดพेट
 ข) ผ้า T/C+ขวดพेट ค) ผ้า T/C ง) ผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดพेट จ) ผ้าพอลิเอสเตอร์



รูปที่ 4.4 (ต่อ) FT-IR สเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพต
 ก) ขวดเพต ข) ผ้า T/C+ขวดเพต ค) ผ้า T/C ง) ผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต
 จ) ผ้าพอลิเอสเตอร์

จากรูปที่ 4.4 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ตำแหน่ง (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3200-3600	หมู่ไฮดรอกซิล, -OH
2800-3000	-CH ₂
1600-1800	หมู่คาร์บอนิล, C=O
1200-1400	-C-O-C
1000-1100	-C-OH
700-800	aromatic ester

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า หมู่ฟังก์ชันที่พบในสเปกตรัมจะสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 (ก-จ) พบว่า ที่ตำแหน่ง 3375.37 cm⁻¹ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่พบสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันแบบไฮดรอกซิล ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะแสดงลักษณะของแถบดูดกลืนที่ต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลจากการที่โมเลกุลของเพตถูกตัดขาดเป็นสายโซ่สั้นๆ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ส่วนปลายของโมเลกุล สายโซ่โมเลกุลยิ่งสั้นปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลก็จะเพิ่มขึ้น

4.1.2 การตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี

ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และลักษณะโครมาโตแกรมที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิคนี้จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ก) จากขวดเพต

พีค	Mn	Mw	MP	Mz	PDI	%Area
1	990	1036	860	1094	1.0463	36.04
2	543	563	563	581	1.0356	63.96
เฉลี่ย	704	733	-	-	-	-

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต

พีค	Mn	Mw	MP	Mz	PDI	%Area
1	546	625	508	725	1.1444	100

ค) จากผ้า T/C

พีค	Mn	Mw	MP	Mz	PDI	%Area
1	1021	1062	872	1113	1.0401	30.94
2	560	581	577	601	1.0375	69.06
เฉลี่ย	703	730	-	-	-	-

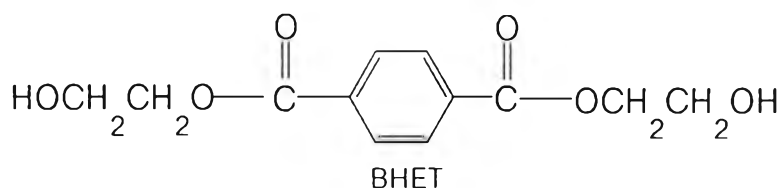
ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต

พีค	Mn	Mw	MP	Mz	PDI	%Area
1	1039	1085	895	1145	1.0451	34.70
2	567	588	587	607	1.0367	65.30
เฉลี่ย	732	762	-	-	-	-

จ) ผ้าพอลิเอสเตอร์

พีค	Mn	Mw	MP	Mz	PDI	%Area
1	1025	1079	881	1149	1.0527	38.36
2	554	574	575	593	1.0364	61.64
เฉลี่ย	733	766	-	-	-	-

จากตารางที่ 4.3 (ก-จ) แสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์เพตในรูปแบบต่างๆ ได้เปลี่ยนจากพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยมีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันทั้งหมด 2 ขนาด กล่าวคือ พีคแรกได้เป็นโอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนอยู่ในช่วง 990-1039 ส่วนพีคที่สองที่แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนอยู่ในช่วง 543-567 น่าจะเป็นไดเมอร์ของบิส-2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต[bis(2hydroxyethyl)terephthalate; BHET] ดังตัวอย่างโครงสร้างต่อไปนี้



เมื่อนำค่าน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตแต่ละชนิดไปหาค่าเฉลี่ยพบว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนมีค่าอยู่ในช่วง 546-733 และ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักมีค่าอยู่ในช่วง 625-766

4.1.3 การตรวจวัดความหนืดของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์

ผลการตรวจวัดความหนืดของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตาราง 4.4 ความหนืดของไกลโคไลซ์โพรดักส์

สูตร	ความหนืด (เซนติพอยส์)
ขวดเพต	800
ผ้า T/C + ขวดเพต	820
ผ้า T/C	840
ผ้าพอลิเอสเตอร์ + ขวดเพต	860
ผ้าพอลิเอสเตอร์	880

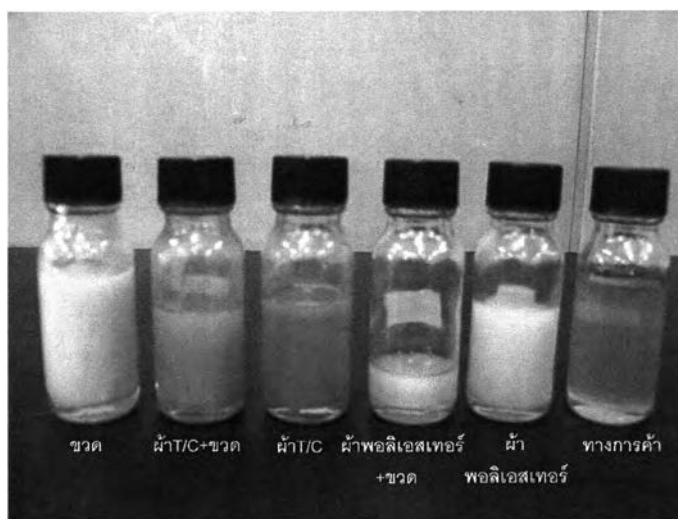
จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ไกลโคไลซ์โพรดักส์จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์เพตแต่ละชนิดมีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 800-880 เซนติพอยส์ ซึ่งผลของความหนืดที่ได้นี้สอดคล้องกับผลของน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 กล่าวคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลมีค่าใกล้เคียงกันจะส่งผลให้ความหนืดมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

4.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์

เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์พेटมาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว หรือ ยูพีอีที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้น ความหนืดสูง และมีสีต่างๆ ตามชนิดของผลิตภัณฑ์พेटที่นำมาย่อยสลาย เมื่อนำมาละลายในสไตรีนมอนอเมอร์จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดลดลง ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการสังเคราะห์ยูพีอีจากไกลโคไลซ์โพรดักส์

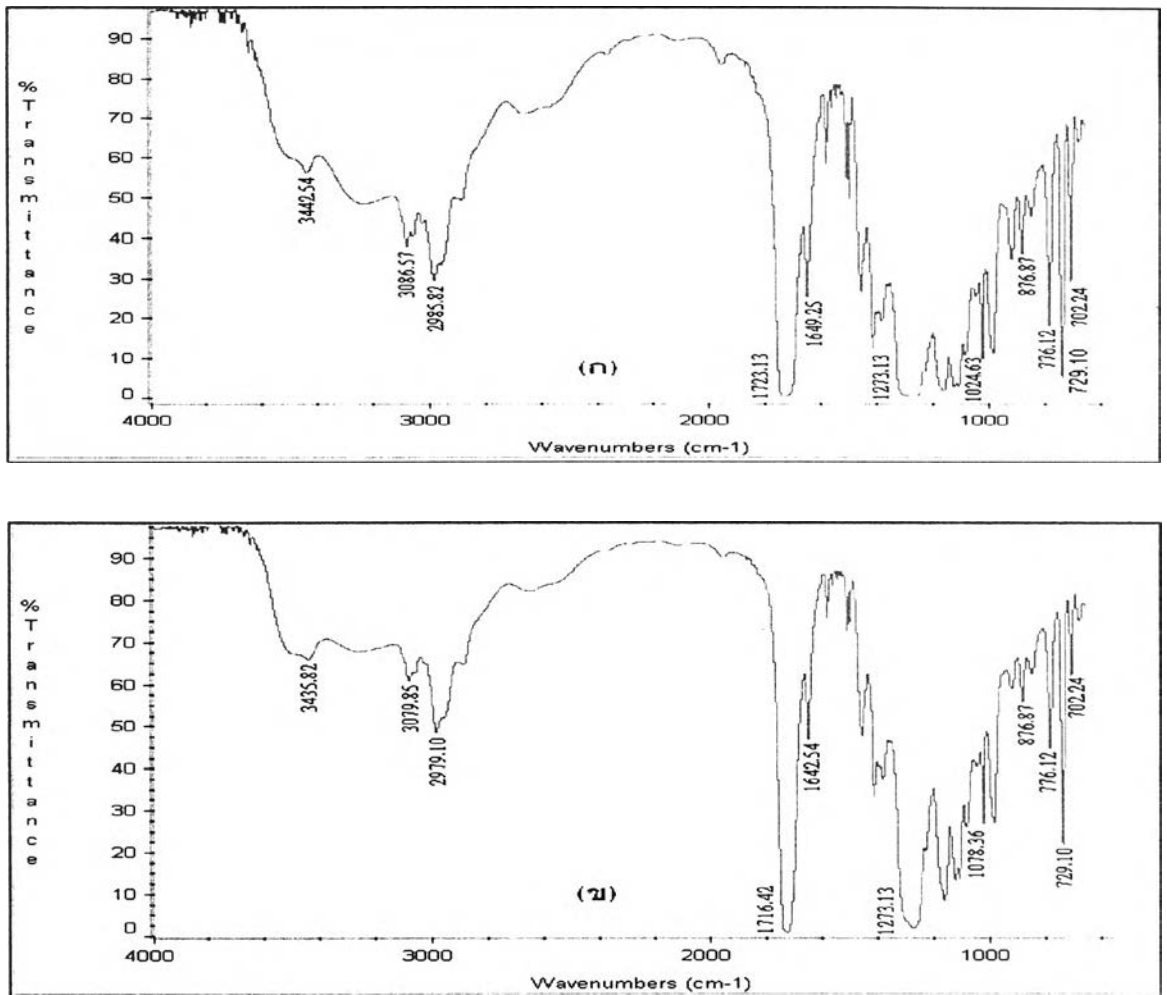
สูตร	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
ยูพีอีจากขวดพेट	ของเหลวข้น สีเขียว
ยูพีอีจากผ้า T/C+ขวดพेट	ของเหลวข้น สีน้ำตาลอ่อน
ยูพีอีจากผ้า T/C	ของเหลวข้น สีน้ำตาลเข้ม
ยูพีอีจากผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดพेट	ของเหลวข้น สีครีม
ยูพีอีจากผ้าพอลิเอสเทอร์	ของเหลวข้น สีเหลือง
ยูพีอีทางการค้า	ของเหลวใส สีชมพู



รูปที่ 4.5 ยูพีอีจากไกลโคไลซ์โพรดักส์

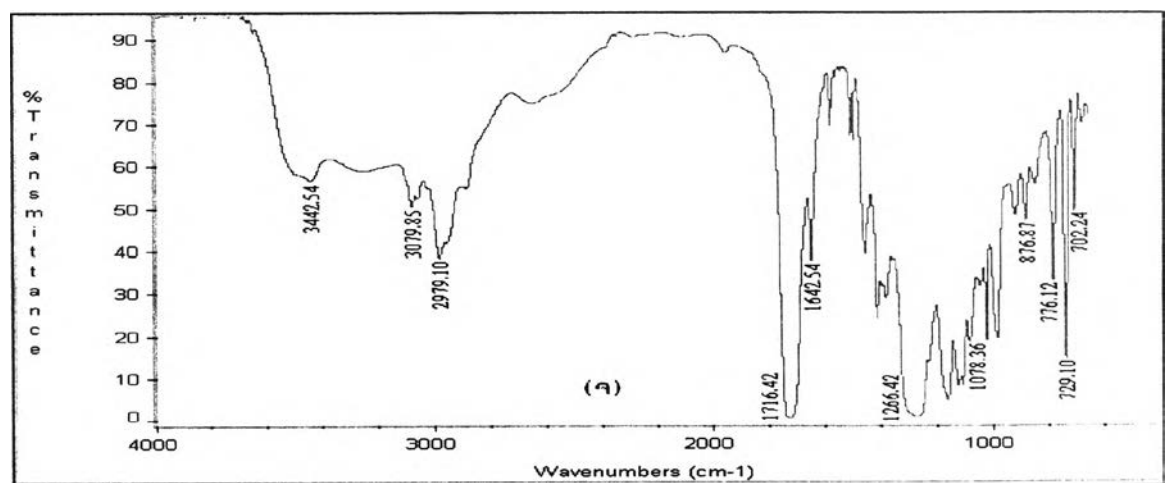
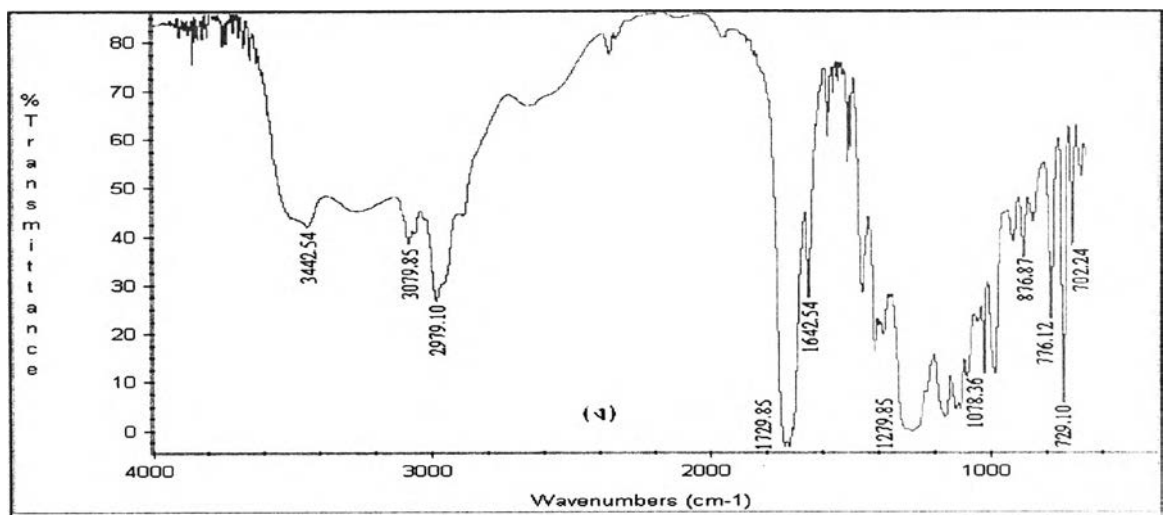
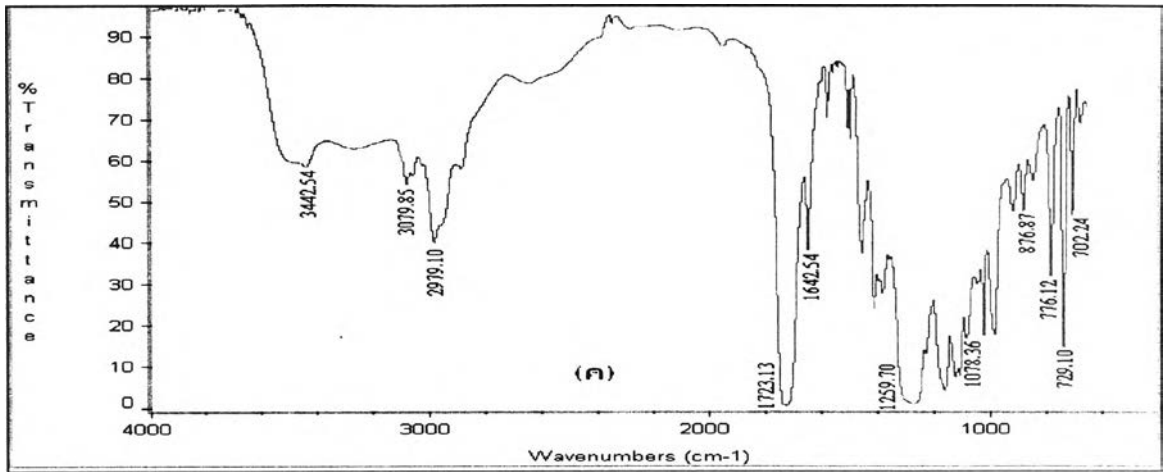
4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของยูพีอีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของยูพีอีที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซิโพรดักส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของยูพีอีที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซิโพรดักส์ ก) ขวดเพต

ข) ผ้า T/C+ขวดเพต ค) ผ้า T/C ง) ผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) ผ้าพอลิเอสเตอร์



รูปที่ 4.6 (ต่อ) FT-IR สเปกตรัมของยูฟิที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซิโพรดักส์ ก) ขวดเพต
 ข) ผ้า T/C+ขวดเพต ค) ผ้า T/C ง) ผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) ผ้าพอลิเอสเตอร์

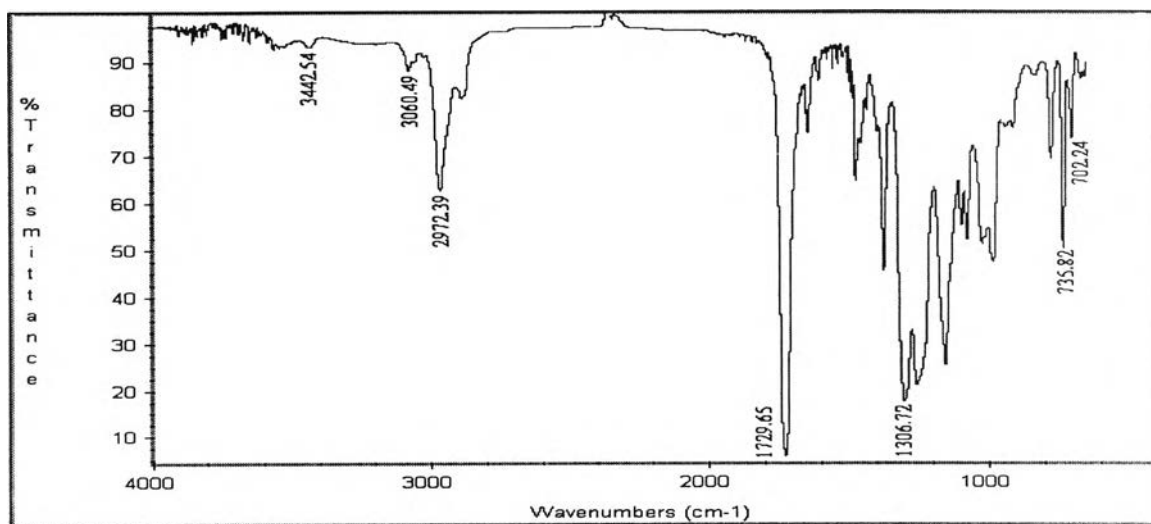
จากรูปที่ 4.6 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของยูพีอี แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของยูพีอี

ตำแหน่ง (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3400-3600	-OH (unreacted glycol)
2900-3000	Propylene glycol (characteristics)
1700-1800	C=O
1600-1700	C=C (free maleic double bond)
1200-1300	C-O
1000-1100	Reacted terephthalic acid
876.87	Para disubstituted aromatic ring
776.12	Aromatic ring ของ styrene polymer
702.24	Aromatic ring ของ styrene monomer

จากรูปที่ 4.6 (ก-จ) และตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งของการเกิดพีคสำคัญๆ นั้น จะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน จะแตกต่างกันตรงลักษณะของแถบดูดกลืน กล่าวได้ว่าเรซินที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ต่างชนิดกันจะมีองค์ประกอบใกล้เคียงกันแต่มีปริมาณต่างกัน โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 2900-3000 cm⁻¹ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงลักษณะเฉพาะของโพรพิลีนไกลคอล และ 3400-3600 cm⁻¹ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่พบหมู่ไฮดรอกซิล ณ ตำแหน่งนี้เรซินจะแสดงลักษณะของแถบดูดกลืนที่กว้าง ทั้งนี้อาจเป็นผลของโพรพิลีนไกลคอลบางส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไกลโคลิซิสกับผลิตภัณฑ์พेटในขั้นตอนการย่อยสลาย และอาจเป็นผลของหมู่ไฮดรอกซิลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไกลโคไลซ์โพรดักส์กับมาเลอิกแอนไฮไดรต์ในขั้นตอนการสังเคราะห์ยูพีอี

เมื่อนำยูพีอีทางการค้ามาตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของยูพีอีทางการค้า

จากรูปที่ 4.7 สามารถสรุปตำแหน่งของพีคสำคัญที่พบในสเปกตรัมของยูพีอีทางการค้าได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งของพีคสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของยูพีอีทางการค้า

ตำแหน่ง (ซม ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3400-3600	-OH (unreacted glycol)
1729.65	C=O
1306.72	C-O
735.82	Meta disubstituted aromatic ring (Iso phthalic residue)
702.24	Aromatic ring ของ styrene monomer

รูปที่ 4.6 (ก-จ)-4.7 และตารางที่ 4.6-4.7 แสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมของยูพีอีที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์มีลักษณะคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของยูพีอีทางการค้า เห็นได้จากตำแหน่งของพีคสำคัญจะปรากฏในตำแหน่งเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างยูพีอีทั้งสองชนิด คือ ชนิดของไกลคอลและกรดอิมิตัวที่ใช้ในการสังเคราะห์ ยูพีอีที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์จะมีโครงสร้างที่เป็น Para disubstituted aromatic ring ของเทรฟทาลิกแอซิด ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์เพตจึงตรวจพบพีคนี้ที่ตำแหน่ง 876.87 ซม⁻¹ ในขณะที่ยูพีอีทางการค้าใช้ Iso phthalic acid เป็นกรดอิมิตัวในการสังเคราะห์เรซิน จึงตรวจพบโครงสร้างที่เป็น Meta disubstituted aromatic ring ตรงตำแหน่ง 735.82 ซม⁻¹ นอกจากนี้เรซินสังเคราะห์ยัง

นอกจากนี้เรซินสังเคราะห์ยังมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ไม่ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ในปริมาณมากกว่าเรซินทางการค้า สังเกตได้จากพีคตรงตำแหน่ง 3400-3600 cm^{-1}

4.2.2 การตรวจวัดความหนืดของยูพีอีด้วยเครื่องบรูคฟิลด์วิสโคมิเตอร์

ผลการตรวจวัดความหนืดของยูพีอีที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซิโพรดักส์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความหนืดของยูพีอี

สูตร	ความหนืด (เซนติพอยส์)
ยูพีอีจากขวดเพต	1310
ยูพีอีจากผ้า T/C + ขวดเพต	1492
ยูพีอีจากผ้า T/C	1542
ยูพีอีจากผ้าพอลิเอสเตอร์ + ขวดเพต	1558
ยูพีอีจากผ้าพอลิเอสเตอร์	1717
ยูพีอีทางการค้า	345

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า ความหนืดของยูพีอีที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 1310-1717 เซนติพอยส์ ซึ่งต่างจากยูพีอีทางการค้าที่มีค่าความหนืดต่ำอย่างเห็นได้ชัด คือ 345 เซนติพอยส์ ทั้งนี้เป็นผลจากปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ที่มีอยู่ในยูพีอีเรซิน ซึ่งยูพีอีสังเคราะห์จะมีปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ 35 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเรซิน ส่วนยูพีอีทางการค้าจะมีปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเรซิน ส่งผลให้ยูพีอีทางการค้ามีค่าความหนืดลดลงเพราะสไตรีนมอนอเมอร์ทำหน้าที่เป็นตัวทำลายและช่วยลดความหนืดของเรซิน นอกจากนี้ยูพีอีทางการค้ามีความบริสุทธิ์สูงต่างจากยูพีอีสังเคราะห์ที่ได้จากการย่อยสลายเพตที่มักมีสิ่งเจือปนติดค้างอยู่ในเรซิน ส่งผลทำให้เรซินไม่สามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียวกับสไตรีนมอนอเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าความหนืดสูง

เมื่อนำยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน มาวัดความหนืด ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความหนืดของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ

สัดส่วนยูพีอี ทางการค้า (เปอร์เซ็นต์)	ความหนืด (เซนติพอยส์)				
	ยูพีอีจาก ขวดเพต	ยูพีอีผ้าจาก T/C+ขวด	ยูพีอีจาก ผ้า T/C	ยูพีอีจากผ้าพอลิ เอสเตอร์+ขวด	ยูพีอีจากผ้า พอลิเอสเตอร์
0	1310	1492	1542	1558	1717
10	1150	1287	1237	1500	1517
20	900	1051	1057	1150	1300
30	720	877	867	1050	1053
40	640	768	777	853	873
50	592	603	632	783	760
60	470	518	608	543	668
70	440	480	522	493	568
80	410	420	463	428	537
90	350	378	428	318	478
100	345	345	345	345	345

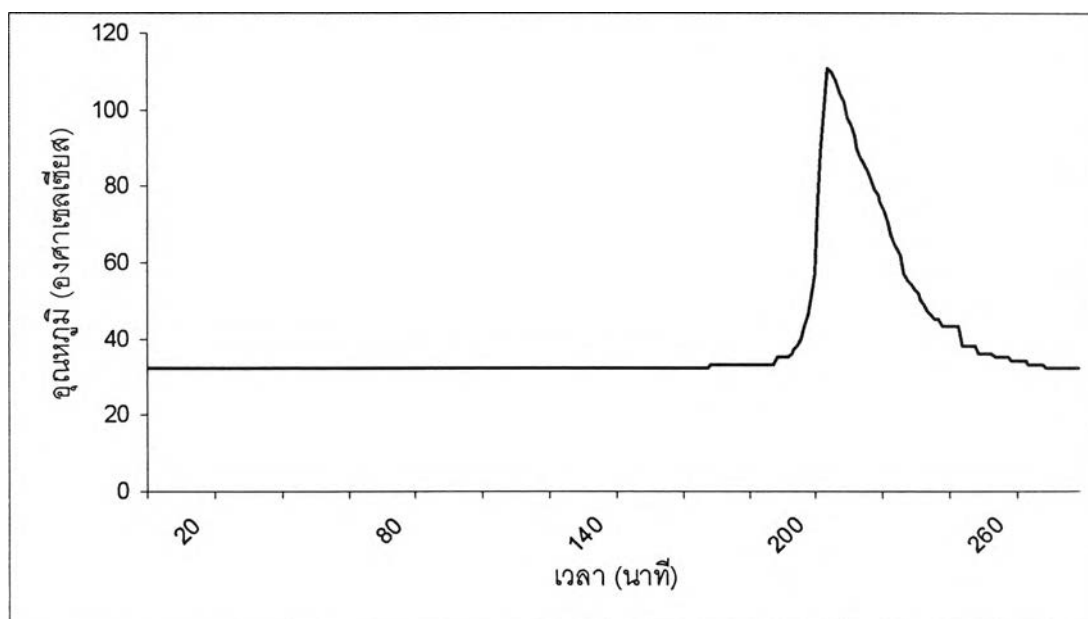
จากตารางที่ 4.9 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยูพีอีทางการค้าจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความหนืดลดลง

4.2.3 การศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอี

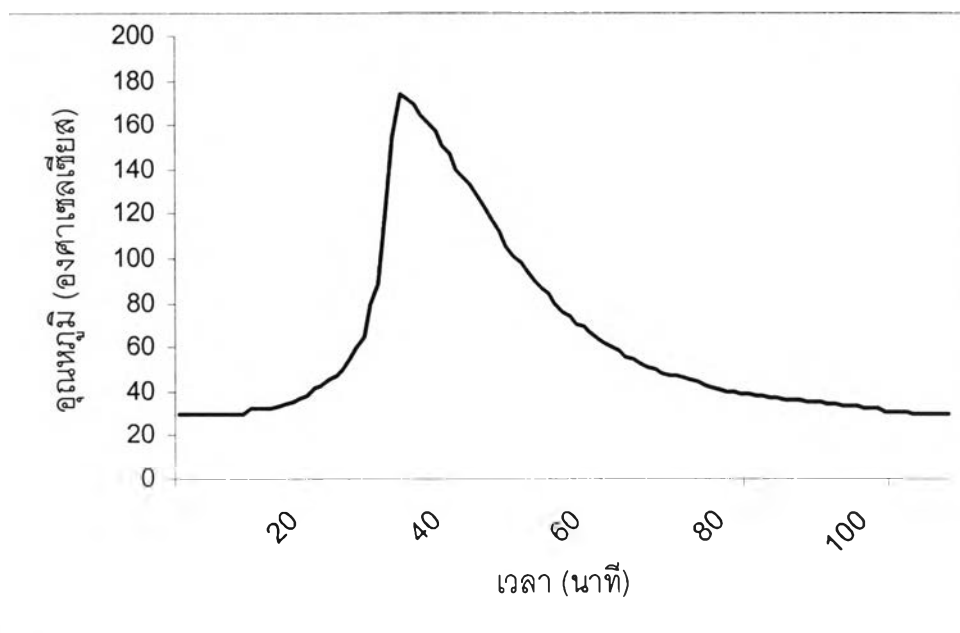
เมื่อผสมยูพีอีกับโคบอลต์ออกไซด์และเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ แล้วจับเวลา พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิจนกระทั่งเรซินแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.9

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอี

สูตร	การเกิดเจล		การแข็งตัว		ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง(นาที)
	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
ยูพีอีจากขวดเปิด	190	35.0	205	113.0	15
ยูพีอีจากผ้า T/C+ขวด	195	33.0	215	111.0	20
ยูพีอีจากผ้า T/C	334	34.5	351	106.5	17
ยูพีอีจากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวด	340	36.0	360	111.0	20
ยูพีอีผ้าพอลิเอสเตอร์	396	35.0	413	108.0	17
ยูพีอีทางการค้า	16	33.0	33	174.0	17



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอีจากขวดเปิด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของยูฟี่อู่ทางการค้า

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.8-4.9 แสดงให้เห็นว่า ยูฟี่อู่ทางการค้าใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลน้อยกว่ายูฟี่สังเคราะห์ ซึ่งเป็นผลจากของปริมาณไฮโดรควิโนนที่มีอยู่ในเรซิน ถ้ามีปริมาณไฮโดรควิโนนน้อยระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลก็จะน้อย เนื่องจากการเติมโคบอลต์ ออกโตเอตและเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดโดยไฮโดรควิโนน จนกระทั่งไฮโดรควิโนนหมดไป อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมาใหม่จึงเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่ไม่อิมตัวของสายโซ่พอลิเอสเทอร์และสไตรีนมอนอเมอร์เกิดการเชื่อมต่อกันจนเรซินมีสภาพกลายเป็นเจล ดังนั้นการที่ยูฟี่อู่ทางการค้ามีปริมาณไฮโดรควิโนนน้อยกว่ายูฟี่สังเคราะห์ทำให้ยูฟี่อู่ทางการค้าใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลน้อยกว่า นอกจากนี้สิ่งเจือปนที่ตกค้างอยู่ในยูฟี่สังเคราะห์ยังส่งผลทำให้ระยะเวลาในการเกิดเจลงานขึ้น

และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง โดยเริ่มพิจารณาตั้งแต่เรซินมีสภาพเป็นเจลจนกระทั่งเรซินแข็งตัว พบว่าทั้งยูฟี่อู่ทางการค้าและยูฟี่สังเคราะห์ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 15-20 นาที

เมื่อนำยูฟี่สังเคราะห์ผสมกับยูฟี่อู่ทางการค้าที่สัดส่วนยูฟี่อู่ทางการค้าต่างๆ กัน มาวัดระยะเวลาที่ใช้ในการแข่งตัว ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ระยะเวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วน ยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน

ก) ยูพีอีจากขวดเพต

สัดส่วนยูพีอี ทางการค้า (เปอร์เซ็นต์)	การเกิดเจล		การแข็งตัว	
	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	190	35.0	205	113.0
10	190	35.0	211	118.0
20	152	34.0	167	128.0
30	135	35.0	154	128.0
40	145	35.0	165	132.0
50	105	35.0	124	136.0
60	110	33.0	136	137.0
70	159	36.0	189	149.0
80	153	36.0	193	153.0
90	50	35.0	82	158.0
100	16	33.0	33	174.0

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ระยะเวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน

ข) ยูพีอีจากผ้า T/C+ขวดเพต

สัดส่วนยูพีอี ทางการค้า (เปอร์เซ็นต์)	การเกิดเจล		การแข็งตัว	
	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	195	33.0	215	111.0
10	117	33.0	143	119.0
20	193	32.0	218	125.0
30	157	32.0	172	137.0
40	160	33.5	177	140.0
50	145	33.0	165	140.0
60	152	34.0	170	141.0
70	136	33.0	158	145.0
80	118	32.0	143	152.0
90	98	33.0	126	152.0
100	16	33.0	33	174.0

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ระยะเวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่ สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน

ค) ยูพีอีจากผ้า T/C

สัดส่วนยูพีอี ทางการค้า (เปอร์เซ็นต์)	การเกิดเจล		การแข็งตัว	
	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	334	34.5	351	106.5
10	295	35.0	310	118.0
20	185	34.0	199	119.0
30	149	35.0	162	122.0
40	155	36.0	171	128.0
50	151	33.0	175	133.0
60	129	35.0	149	134.0
70	122	33.0	145	139.0
80	135	33.0	175	140.0
90	90	33.0	117	154.0
100	16	33.0	33	174.0

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ระยะเวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่ สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน

ง) ยูพีอีจากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต

สัดส่วนยูพีอี ทางการค้า (เปอร์เซ็นต์)	การเกิดเจล		การแข็งตัว	
	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	340	36.0	360	111.0
10	310	38.0	323	115.0
20	275	35.0	295	129.0
30	222	34.5	240	132.0
40	201	34.0	224	133.0
50	275	35.0	304	134.0
60	209	35.0	228	135.0
70	175	35.0	191	138.0
80	114	35.0	136	138.0
90	65	36.0	86	149.0
100	16	33.0	33	174.0

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน

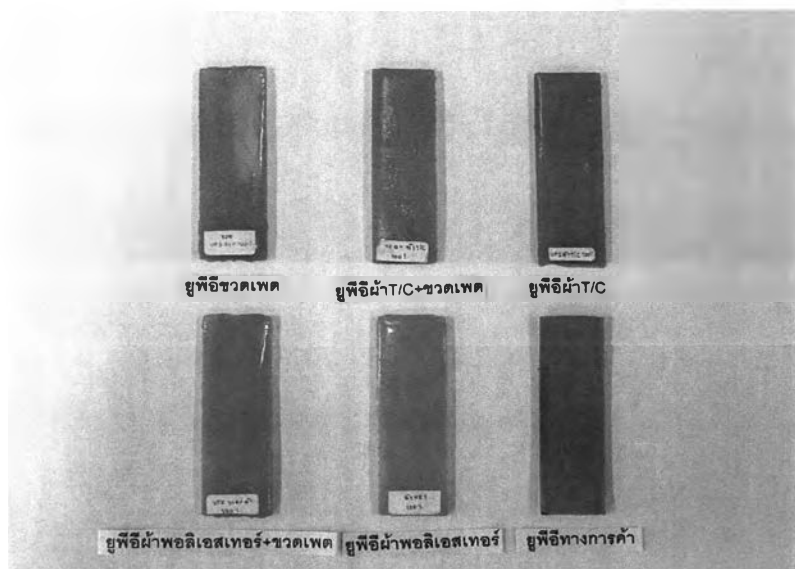
จ) ยูพีอีจากผ้าพอลิเอสเทอร์

สัดส่วนยูพีอี ทางการค้า (เปอร์เซ็นต์)	การเกิดเจล		การแข็งตัว	
	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	396	35.0	413	108.0
10	384	35.5	397	121.0
20	355	34.0	373	128.0
30	300	34.0	319	129.0
40	249	34.0	277	134.5
50	164	36.0	182	134.0
60	154	36.5	170	139.0
70	136	35.5	153	140.0
80	113	34.5	134	154.0
90	87	37.0	112	160.0
100	16	33.0	33	174.0

จากตารางที่ 4.11 (ก-จ) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนยูพีอีทางการค้าจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวลดลง

4.3 การขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซิน

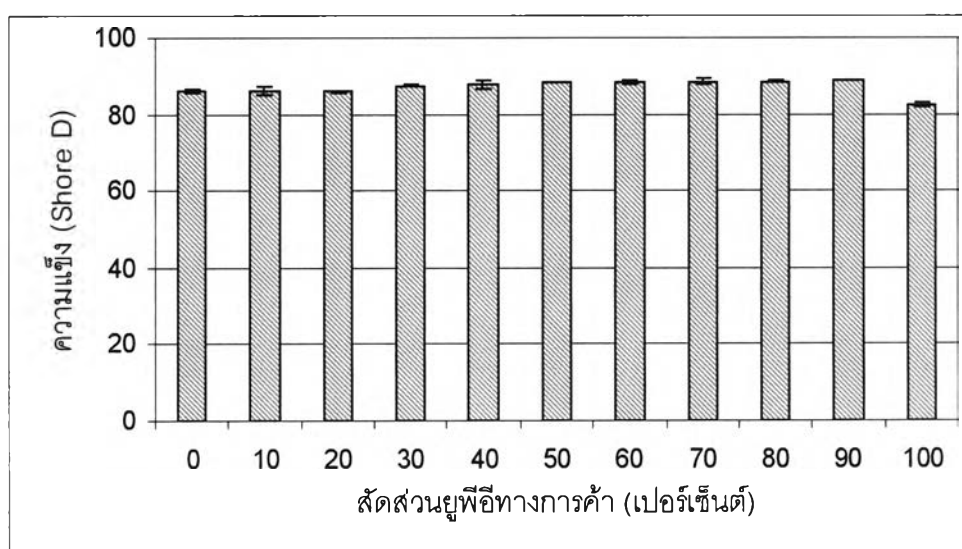
เมื่อนำยูพีอีทั้งที่ได้จากการสังเคราะห์และยูพีอีทางการค้ามาทำให้แข็งตัว โดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาและโคบอลต์ออกโตเอตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณอย่างละ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเรซิน จะได้พอลิเอสเทอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะของพอลิเอสเตอร์

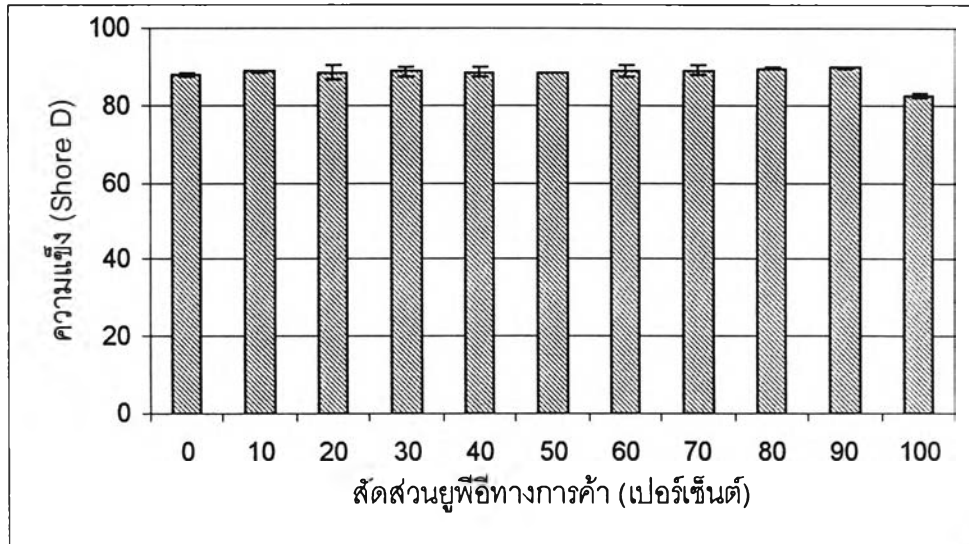
4.3.1 การทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของพอลิเอสเตอร์ที่ได้จากการผสมระหว่างยูพีอีสังเคราะห์และยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน ด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิด Shore D ดังแสดงในรูปที่ 4.11

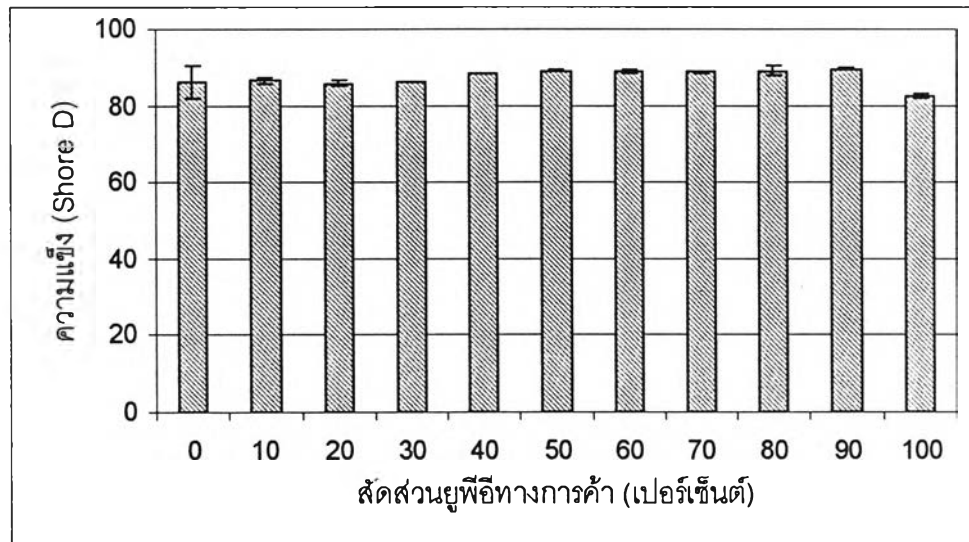


(ก)

รูปที่ 4.11 ความแข็งของพอลิเอสเตอร์ ก) จากซวคเพด ข) จากผ้า T/C+ซวคเพด ค) จากผ้า T/C
ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ซวคเพด จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์

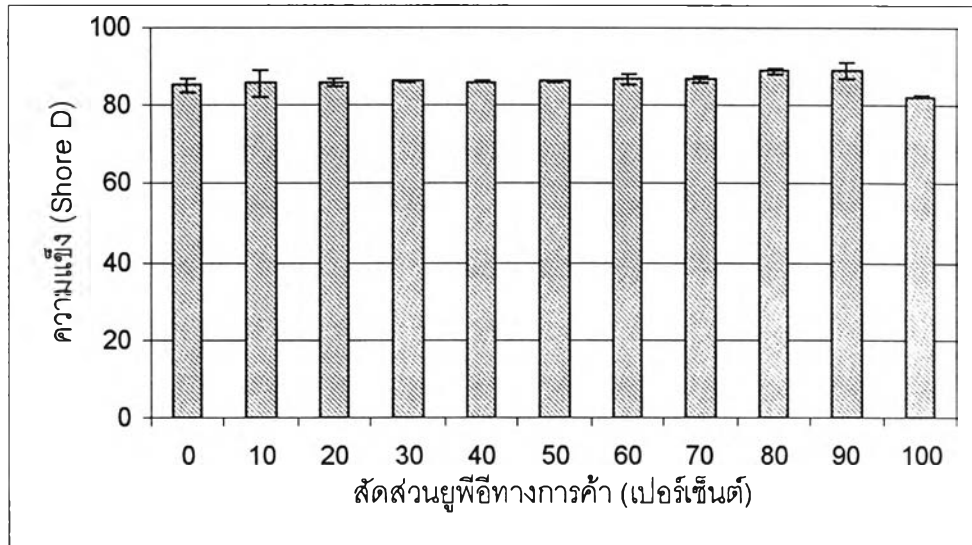


(ข)

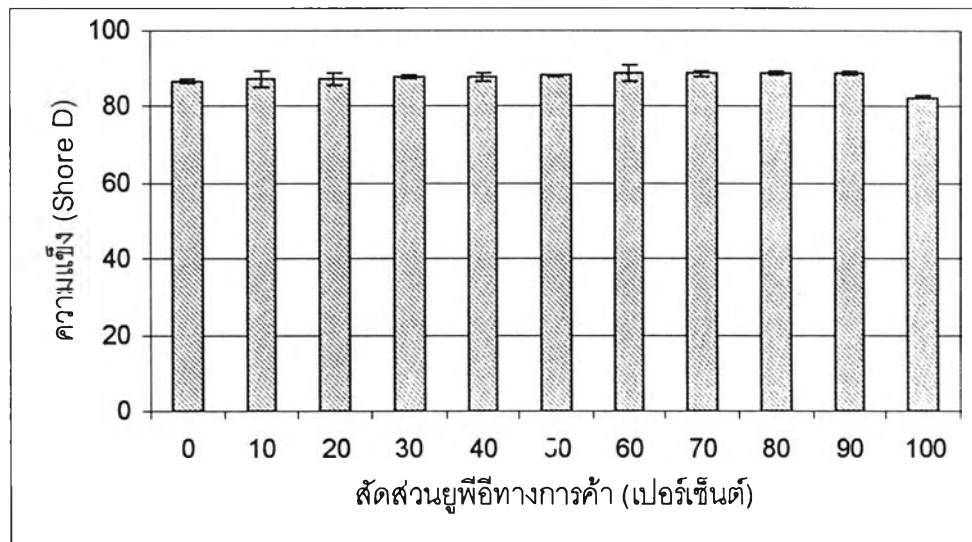


(ค)

รูปที่ 4.11 (ต่อ) ความแข็งของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์



(ง)



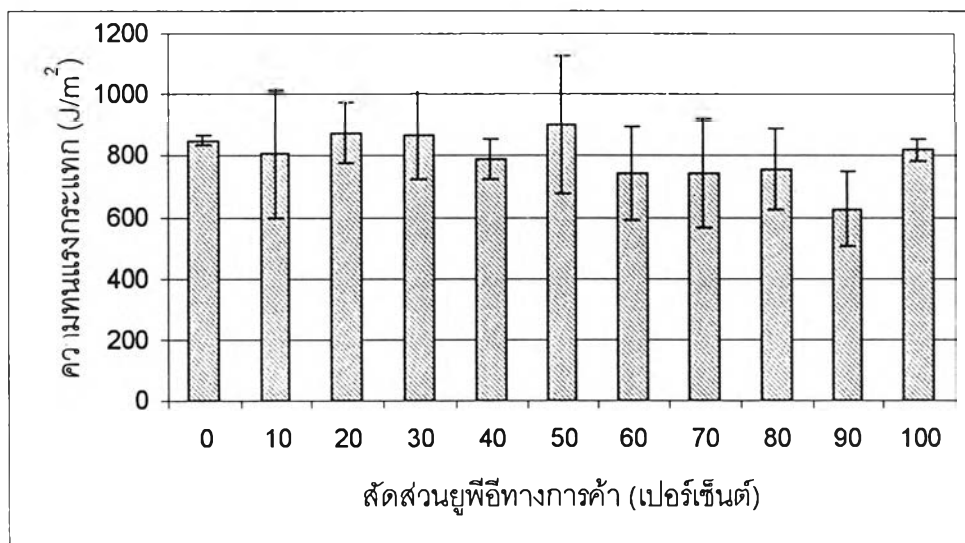
(จ)

รูปที่ 4.11 (ต่อ) ความแข็งของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
 ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์

จากรูปที่ 4.11 (ก-จ) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนยูพีอีทางการค้าแทบจะไม่มีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้ แต่ค่าความแข็งจะลดลงเล็กน้อยเมื่อสัดส่วนยูพีอีทางการค้าเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พอลิเอสเทอร์ทางการค้ามีโครงสร้างภายในประกอบด้วย Iso phthalic acid ทำให้โครงสร้างการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ซึ่งต่างจากพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างภายในประกอบด้วยเทเรฟทาลิกแอซิดที่มีการจัดเรียงตัวแบบพารา โครงสร้างแบบพาราทำให้โมเลกุลของพอลิเอสเทอร์สามารถจัดเรียงตัวได้แน่นและเป็นระเบียบ ส่งผลทำให้พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์มีค่าความแข็งสูงกว่าพอลิเอสเทอร์ทางการค้า

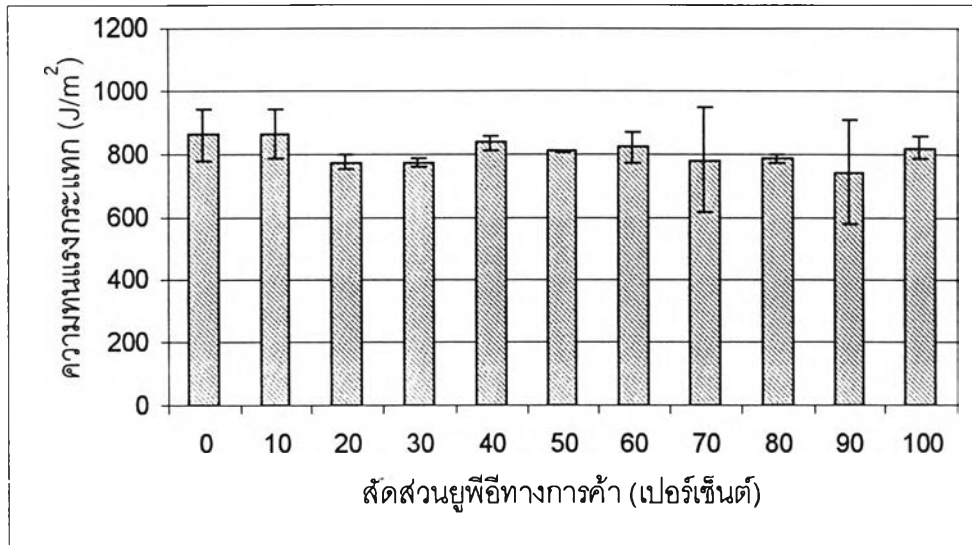
4.3.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเทอร์ที่ได้จากการผสมระหว่างยูพีอีสังเคราะห์และยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12

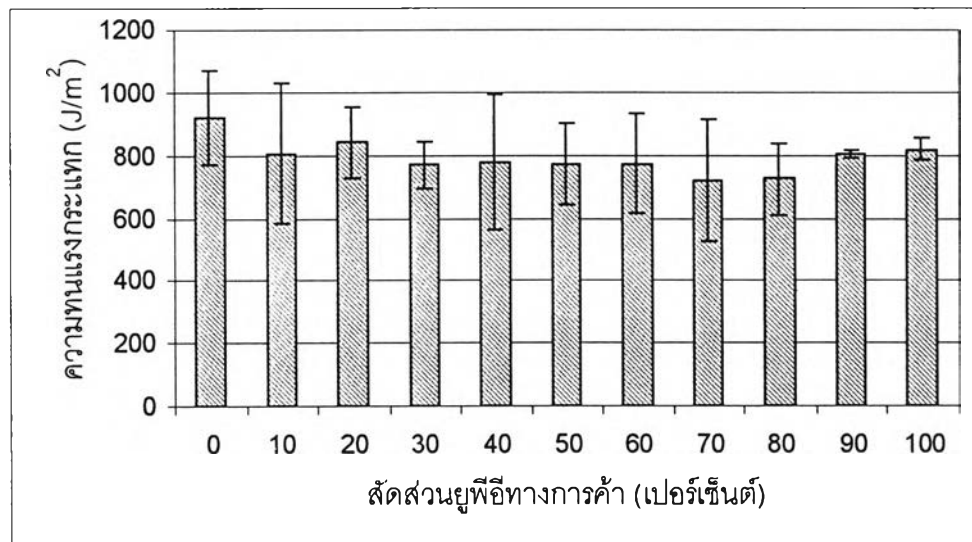


(ก)

รูปที่ 4.12 ความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเทอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเทอร์

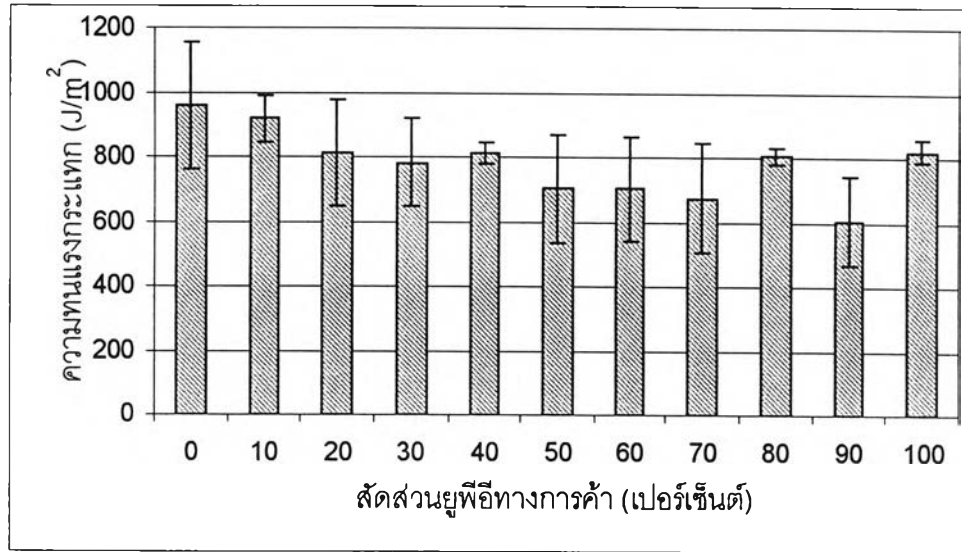


(ข)

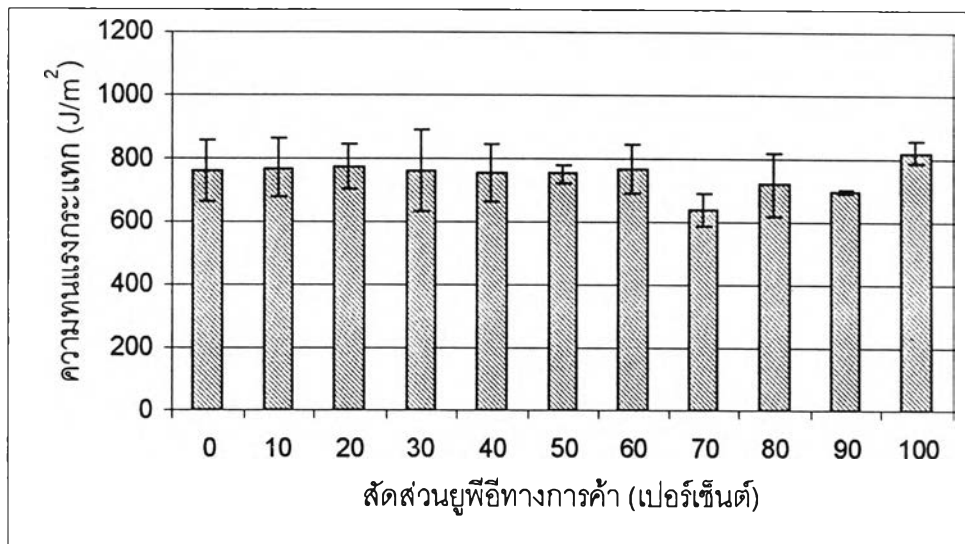


(ค)

รูปที่ 4.12 (ต่อ) ความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์



(ง)



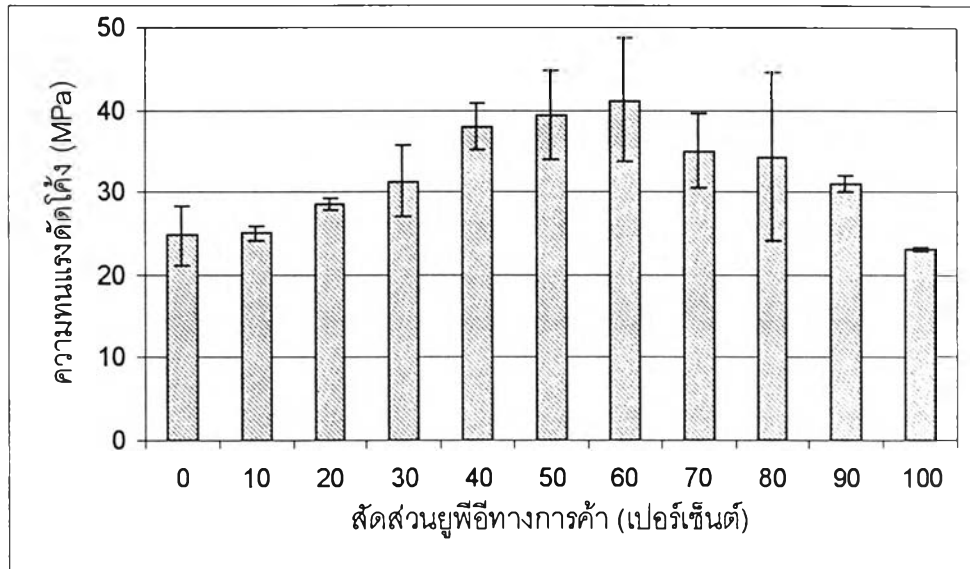
(จ)

รูปที่ 4.12 (ต่อ) ความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์

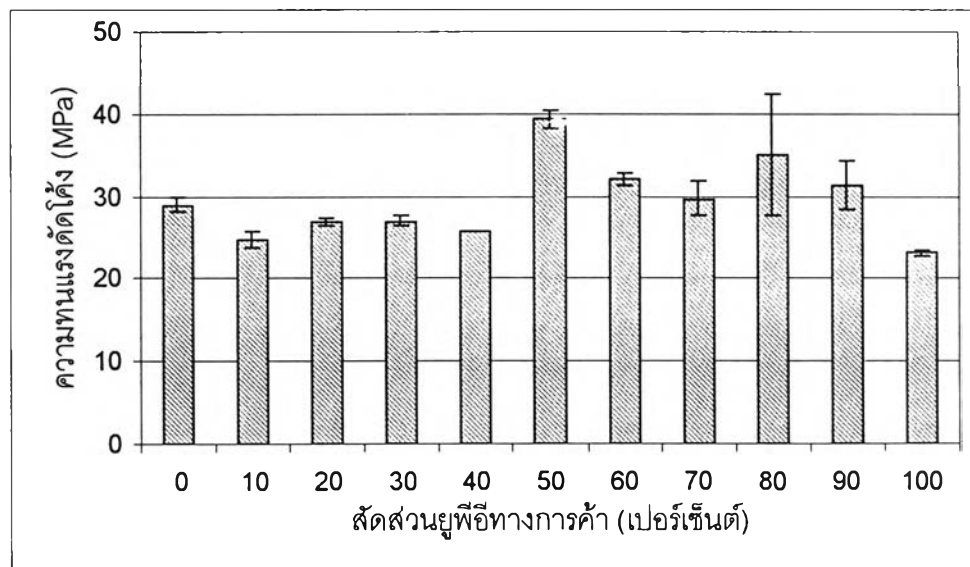
จากรูปที่ 4.12 (ก-จ) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนยูรีทียี่ทางการค้าจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความทนแรงกระแทกเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.3.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

ผลการทดสอบความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอสเตอร์ที่ได้จากการผสมระหว่างยูพีอีสังเคราะห์และยูพีอีทางการค้าที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13

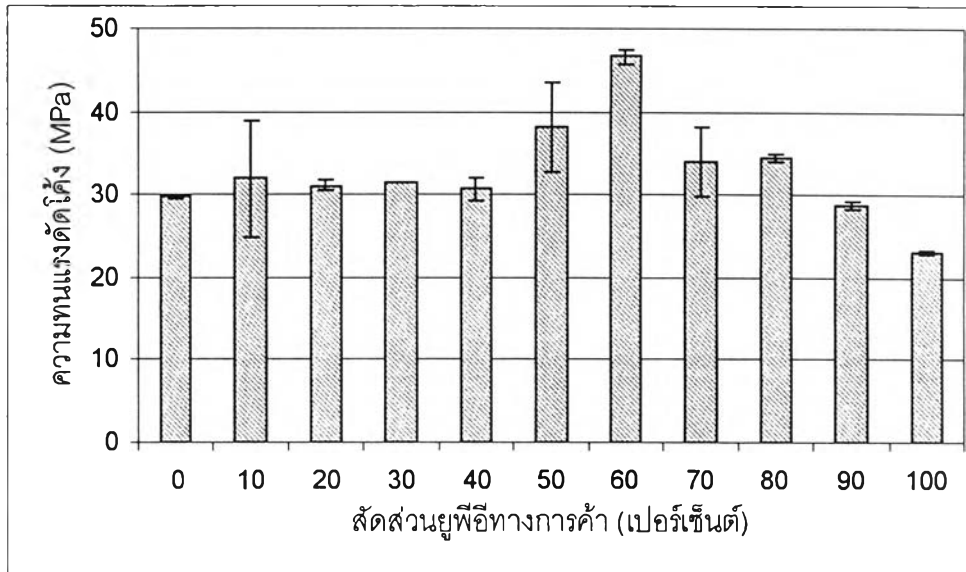


(ก)

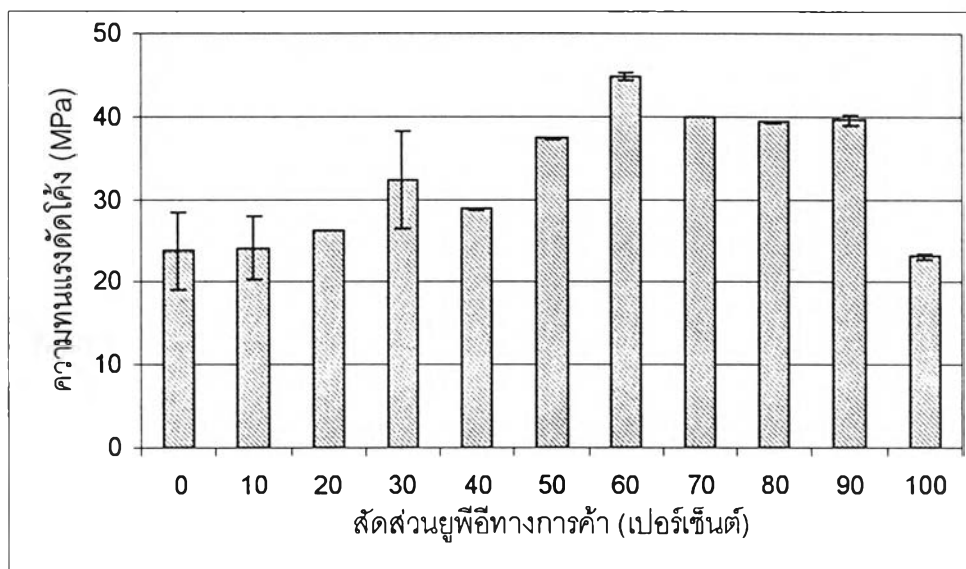


(ข)

รูปที่ 4.13 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์

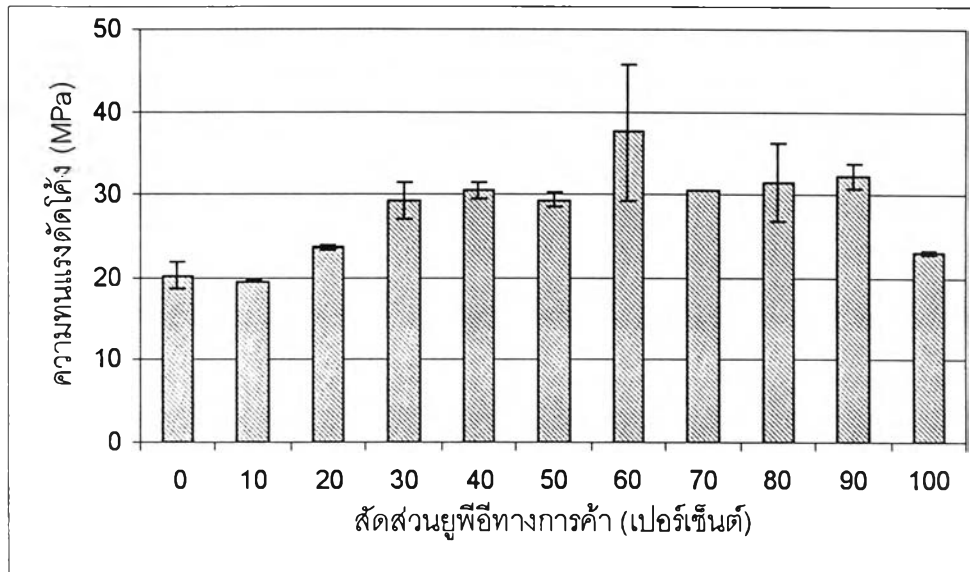


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.13 (ต่อ) ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอสเทอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเทอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเทอร์



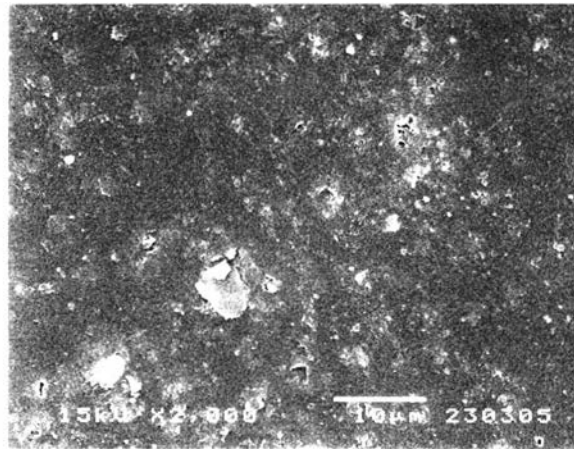
(จ)

รูปที่ 4.13 (ต่อ) ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์

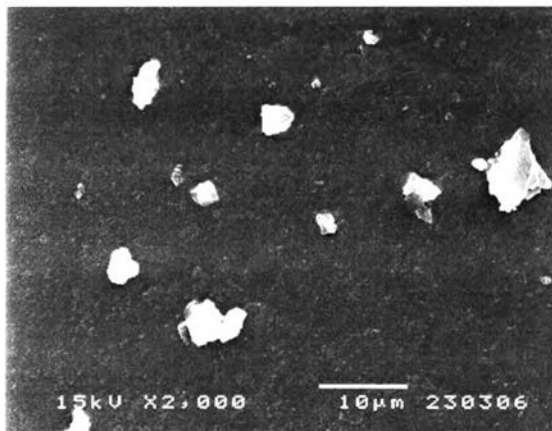
จากรูปที่ 4.13 (ก-จ) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนยูพีอีทางการค้าจะทำให้ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีค่าความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนยูพีอีทางการค้าเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสมบัติความทนแรงดัดโค้งเกิดจากความสามารถในการรับแรงกดอัดและแรงดึงในขณะเดียวกัน ทำให้การที่สายโซ่ของยูพีอีทางการค้ามีระยะห่างระหว่างตำแหน่งพันธะคู่ซึ่งเป็นจุดเชื่อมขวางยาวกว่าจะไปเพิ่มความสามารถในการยึดดึงของชิ้นงาน ในขณะที่ยูพีอีสังเคราะห์มีความหนาแน่นของจุดเชื่อมขวางมากกว่าจะไปช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดอัดได้ดี ดังนั้นการนำยูพีอีสังเคราะห์ผสมกับยูพีอีทางการค้าเข้าด้วยกันจะเป็นการเพิ่มความทนแรงดัดโค้ง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสัดส่วนยูพีอีทางการค้าเป็น 70 80 90 และ 100 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณเรซินทางการค้าเพิ่มมากขึ้นความเข้ากันได้ของสายโซ่โมเลกุลระหว่างยูพีอีสังเคราะห์และยูพีอีทางการค้าลดลง

4.3.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

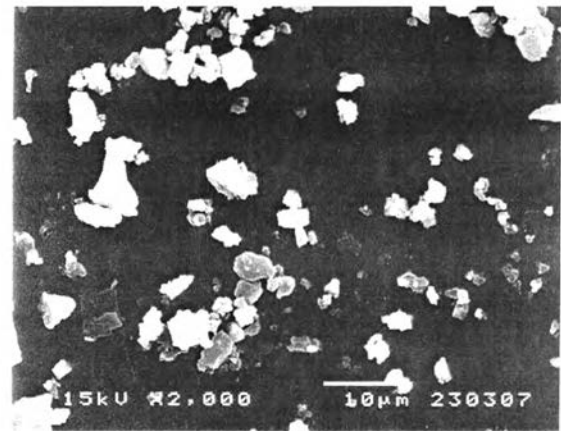
ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์และพอลิเอสเตอร์ทางการค้า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.14



(ก)

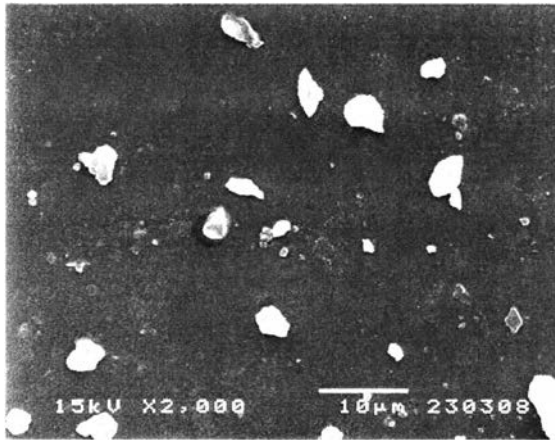


(ข)

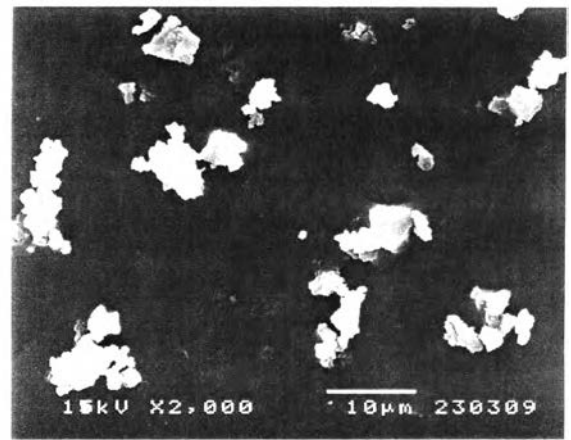


(ค)

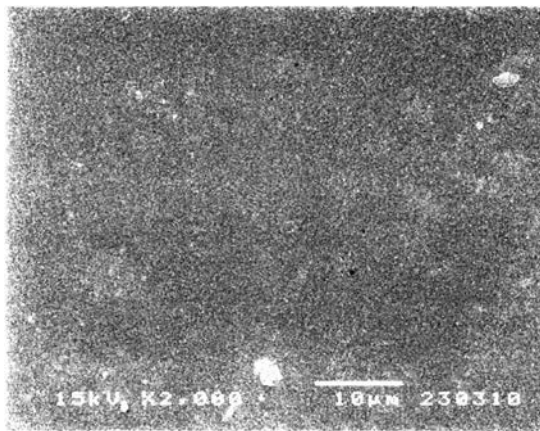
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์
ฉ) จากทางการค้า



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.14 (ต่อ) สัณฐานวิทยาของพอลิเอสเตอร์ ก) จากขวดเพต ข) จากผ้า T/C+ขวดเพต
 ค) จากผ้า T/C ง) จากผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต จ) จากผ้าพอลิเอสเตอร์
 ฉ) จากทางการค้า

จากรูปที่ 4.14 (ก-ฉ) แสดงให้เห็นว่า สัณฐานวิทยาของพอลิเอสเตอร์ที่สังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์เพตรีไซเคิลมีสิ่งเจือปนที่มีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ดขนาดไม่สม่ำเสมอกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิวของพอลิเอสเตอร์ ซึ่งแตกต่างจากสัณฐานวิทยาของพอลิเอสเตอร์ทางการค้าที่ปราศจากสิ่งเจือปนบนพื้นผิวของพอลิเอสเตอร์เนื่องจากเป็นผลของการที่พอลิเอสเตอร์ทางการค้าสังเคราะห์จากมอนอเมอร์บริสุทธิ์

เมื่อเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเอสเตอร์ที่สังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์เพตรีไซเคิลรูปแบบต่างๆ พบว่า สัณฐานวิทยาของพอลิเอสเตอร์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ขวดเพตจะมีสิ่งเจือปนน้อยกว่าพอลิเอสเตอร์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ผ้า T/C และผ้าพอลิเอสเตอร์ เนื่องจากขวดเพตถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการไกลโคลิซิสได้ง่ายกว่า

4.3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรีเพื่อหาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์และพอลิเอสเตอร์ทางการค้า แสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเอสเตอร์

สูตรพอลิเอสเตอร์	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน, T_g (องศาเซลเซียส)
ขวดเพต	70
ผ้า T/C+ขวดเพต	69
ผ้า T/C	68
ผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต	68
ผ้าพอลิเอสเตอร์	67
ทางการค้า	130

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า พอลิเอสเตอร์ทางการค้ามีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงกว่าพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์มาก เนื่องจากพอลิเอสเตอร์ทางการค้ามีจำนวนการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลสูงกว่าพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ ส่งผลให้มีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงกว่า นอกจากนี้พอลิเอสเตอร์ทางการค้ามีโครงสร้างหลักประกอบด้วย Neopentyl glycol ที่มีหมู่ข้างเคียงเป็นหมู่เมทิล 2 หมู่ เกาะบนสายโซ่หลัก ทำให้เกิด steric hindrance ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ยาก ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันจึงสูง

เมื่อพิจารณาพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ในแต่ละสูตร พบว่ามีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 67-70 องศาเซลเซียส

4.3.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิสเพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์และพอลิเอสเตอร์ทางการค้า แสดงไว้ในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอสเตอร์

สูตรพอลิเอสเตอร์	อุณหภูมิการสลายตัว, T_d (องศาเซลเซียส)
ขวดเพต	346
ผ้า T/C+ขวดเพต	342
ผ้า T/C	341
ผ้าพอลิเอสเตอร์+ขวดเพต	338
ผ้าพอลิเอสเตอร์	337
ทางการค้า	368

จากตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า พอลิเอสเตอร์ทางการค้ามีค่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ เนื่องจากเป็นผลของจำนวนการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล โดยพอลิเอสเตอร์ทางการค้ามีจำนวนการเชื่อมขวางสูงกว่าพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่า อุณหภูมิการสลายตัวจึงสูงกว่า