

การเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดพีทีใช้แล้ว  
ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

นางสาวศรีจรี อุดมถาวรสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2552  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF UNSATURATED POLYESTER RESINS FROM MICROWAVE-ASSISTED  
GLYCOLYZED PRODUCTS OF POST-CONSUMER PET BOTTLES

Miss Srijaree Udomtawornsawat

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

การเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากผลิตภัณฑ์ที่ได้  
จากการไกลโคไลซ์ขวด PET ใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

โดย

นางสาวศรียวี อุดมถาวรสวัสดิ์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ุ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ชัยกุลจิตร)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

ศรียจรี อุดมถาวรสวัสดิ์ : การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตที่ใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ. (PREPARATION OF UNSATURATED POLYESTER RESINS FROM MICROWAVE-ASSISTED GLYCOLYZED PRODUCTS OF POST-CONSUMER PET BOTTLES) อ.ที่ปรึกษา  
 วิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, 84 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ตภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยนำขวดเพ็ตมาย่อยสลายด้วยไกลคอลชนิดต่างๆ ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล และไดเอทิลีนไกลคอล ที่อัตราส่วนระหว่างเพ็ตต่อไกลคอลต่างๆ กัน ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยมีซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการวิเคราะห์ไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่พบว่าที่เวลา 30 นาทีจะให้ร้อยละผลได้ของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์สูงที่สุด ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการไกลโคไลซ์ด้วยการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมมาก จากการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางความร้อนพบว่าเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์นี้ส่วนใหญ่เป็นมอนอเมอร์และมีโอลิโกเมอร์ปะปนอยู่บ้าง จากนั้นนำไกลโคไลซ์โปรดักส์มาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันภายใต้พลังงานไมโครเวฟกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาดังกล่าวภายใต้พลังงานไมโครเวฟสั้นกว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาภายใต้ความร้อนแบบดั้งเดิมมาก จากนั้นเติมสไตรีนมอนอเมอร์ลงในเรซินที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง และใช้เมทิลเอทิลคีโตนเพอร์ออกไซด์และโคบอลต์ออกโทเฮต เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาและสารเร่งตามลำดับ ผลการตรวจสอบเวลาบ่มของเรซินพบว่าเมื่ออัตราส่วนของไกลคอลเพิ่มขึ้น เวลาบ่มของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสั้นลง อีกทั้งยังส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานพอลิเอสเทอร์ ได้แก่ เสถียรภาพทางความร้อน ความแข็ง ความทนแรงกระแทก และความทนแรงดัดโค้งมีค่ามากขึ้น และให้สมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของไกลคอลที่ใช้ นอกจากนี้ยังพบว่าพบว่ามีสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตที่ใช้แล้วภายใต้พลังงานความร้อนแบบดั้งเดิม

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2552

# #5172464923 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : PET / GLYCOLYSIS / UNSATURATED POLYESTER / MICROWAVE / RECYCLING

SRIJAREE UDOMTAWORNSAWAT : PREPARATION OF UNSATURATED  
POLYESTER RESINS FROM MICROWAVE-ASSISTED GLYCOLYZED  
PRODUCTS OF POST-CONSUMER PET BOTTLES. THESIS ADVISOR :  
ASSOC.PROF.PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 84 pp.

In this research, unsaturated polyester resins were prepared from microwave-assisted glycolized products of polyethylene terephthalate or PET. Post-consumer PET bottles were depolymerized with three different glycols, namely ethylene glycol, propylene glycol and diethylene glycol at PET:glycol molar ratio 1:4, 1:6 and 1:8 under microwave energy using zinc acetate as a catalyst. The highest yield of the glycolized products was obtained at the irradiation time of 30 minutes which was much shorter than the conventional process. It was revealed by chemical and thermal characteristics that the glycolized products contain not only monomer but also some oligomers. The glycolized products were esterified with maleic anhydride under microwave energy. The optimum reaction time was also significantly shortened comparing with that of the reactions performed under conventional heat. Styrene monomer was subsequently added as a crosslinking agent while methyl ethyl ketone peroxide and cobalt octoate were also used as an initiator and an accelerator respectively. The cure time of the prepared resins decreased as the ratio of glycol increased. The thermal stability, hardness, impact strength and flexural strength of the cured specimens were investigated. It was found that these physical properties improved as the ratio of glycol increased although they may vary upon the type of glycol used. Furthermore, the physical properties of the prepared specimens were higher than that prepared from glycolized products obtained under conventional heat.

Department: Materials Science Student's Signature \_\_\_\_\_

Field of Study: Applied Polymer Science & Textile Technology Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year: 2009 \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนาม ดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูงที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการศึกษาและทุนวิจัย

4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

7. บริษัท สยามเคมีคอล อินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการทำวิจัย

8. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง เพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาการจนสามารถทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	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 การสังเคราะห์เพ็ต.....	8
2.2.3 สมบัติของเพ็ต.....	10
2.2.4 การใช้งาน.....	10
2.3 พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester, UPE).....	10
2.3.1 วัตถุดิบในการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	12
2.3.2 การแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	15
2.3.3 สมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	17
2.3.4 การใช้งาน.....	17
2.4 การรีไซเคิล.....	18
2.4.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ.....	18
2.4.2 การรีไซเคิลทางเคมี.....	19
2.4.3 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากเพ็ตที่ใช้แล้ว.....	22

บทที่	
3. วิธีการทดลอง.....	26
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	27
3.4 ขั้นตอนในการวิจัย.....	27
3.5 การย่อยสลายพืชด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ.....	27
3.6 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	32
3.7 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบและการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	33
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1 การย่อยสลายพืชด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส.....	37
4.1.1 ร้อยละผลได้ (percentage yield) ของพืชที่ถูกไกลโคไลซ์.....	37
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของพืชที่ถูกไกลโคไลซ์.....	42
4.1.3 สมบัติทางความร้อนของไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	48
4.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	51
4.2.1 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	51
4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	51
4.2.3 เวลาบ่ม (cure time).....	57
4.3 สมบัติของชิ้นงานพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	58
4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน.....	58
4.3.2 ความแข็ง.....	59
4.3.3 ความทนแรงกระแทก.....	60
4.3.4 ความทนแรงดัดโค้ง.....	61
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64



บทที่	
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	69
ภาคผนวก ค.....	74
ภาคผนวก ง.....	79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างพอลิเบสิกแอซิดที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์.....	3
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์.....	4
ตารางที่ 3.1	ปริมาณไกลคอลที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ.....	28
ตารางที่ 3.2	เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายเพ็ด.....	29
ตารางที่ 4.1	ตำแหน่งของสเปกตรัมที่พบในโครงสร้างของของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์.....	47
ตารางที่ 4.2	คุณนหภูมิการสลายตัวของไกลโคไลซ์โปรดักส์จากขวดเพ็ด.....	48
ตารางที่ 4.3	คุณนหภูมิหลอมเหลวของไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ด.....	50
ตารางที่ 4.4	ตำแหน่งของสเปกตรัมที่พบในโครงสร้างพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	56
ตารางที่ 4.5	เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเทอร์.....	58

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพ็ด.....	6
รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	11
รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเทอร์เรซินภายหลังการแข็งตัว.....	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดไม่อิ่มตัว.....	12
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของกรดอิ่มตัว.....	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์.....	14
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารยับยั้งปฏิกิริยา.....	14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา.....	15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
รูปที่ 2.10 โมเลกุลของสไตรีนมอนอเมอร์ที่แทรกระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์เรซิน ชนิดไม่อิ่มตัว.....	23
รูปที่ 2.11 โครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเทอร์ภายหลังการแข็งตัว.....	23
รูปที่ 3.1 เครื่องบดละเอียด.....	28
รูปที่ 3.2 ตู้อบไมโครเวฟที่ดัดแปลงเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	29
รูปที่ 3.3 พูเรียทรานส์ฟอร์มสเปกโทรมิเตอร์.....	30
รูปที่ 3.4 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์.....	31
รูปที่ 3.5 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงคาลอริมิเตอร์.....	31
รูปที่ 3.6 เครื่องโรเทชันแนลรีโอมิเตอร์.....	33
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก.....	34
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ติดตั้งชุดทดสอบแบบ three-point bending.....	36
รูปที่ 3.9 เครื่องดูโรมิเตอร์ชนิด Shore D.....	36

รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อไกลคอลเท่ากับ 1:4.....	39
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อไกลคอลเท่ากับ 1:6.....	40
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อไกลคอลเท่ากับ 1:8.....	41
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อเอทิลีนไกลคอลต่างๆ กัน.....	42
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอลต่างๆ กัน.....	42
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อไดเอทิลีนไกลคอลต่างๆ กัน.....	43
รูปที่ 4.7	FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อเอทิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:4.....	44
รูปที่ 4.8	FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อเอทิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:6.....	45
รูปที่ 4.9	FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อเอทิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:8.....	45
รูปที่ 4.10	FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อโพรพิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:4.....	46
รูปที่ 4.11	FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อโพรพิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:6.....	46

รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อโพรพิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:8.....	47
รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อไดเอทิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:4.....	47
รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อไดเอทิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:6.....	48
รูปที่ 4.15 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อไดเอทิลีน ไกลคอลเท่ากับ 1:8.....	48
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	50
รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ด Fraction A เปรียบเทียบ กับขวดเพ็ดใช้แล้ว.....	51
รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ด Fraction B เปรียบเทียบ กับขวดเพ็ดใช้แล้ว.....	51
รูปที่ 4.19 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ ของขวดเพ็ดที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4.....	53
รูปที่ 4.20 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ ของขวดเพ็ดที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6.....	53
รูปที่ 4.21 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ ของขวดเพ็ดที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:8.....	54
รูปที่ 4.22 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ ของขวดเพ็ดที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4.....	54

รูปที่ 4.23 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์ ของขวดพีทที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6.....	55
รูปที่ 4.24 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์ ของขวดพีทที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:8.....	55
รูปที่ 4.25 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์ ของขวดพีทที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทต่อไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4.....	56
รูปที่ 4.26 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์ ของขวดพีทที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทต่อไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6.....	56
รูปที่ 4.27 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์ ของขวดพีทที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทต่อไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:8.....	57
รูปที่ 4.28 เวลาบ่มของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัว.....	58
รูปที่ 4.29 อุณหภูมิสลายตัวของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินเตรียมจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์.....	59
รูปที่ 4.30 ความแข็งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์.....	60
รูปที่ 4.31 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมจากไกลโคไลซ์ โพรด์กส์.....	61
รูปที่ 4.32 ความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์.....	62

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 มุมเหตุจูงใจและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก โดยมีการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย ได้แก่ ภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ของเล่นเด็ก ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ทั้งนี้ เนื่องจากพลาสติกมีข้อดีหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศธรรมชาติได้ดีกว่าโลหะ มีความทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าแก้วและเซรามิก น้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่หลากหลาย เป็นต้น พลาสติกที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักสังเคราะห์มาจากวัตถุดิบประเภทปิโตรเลียม โดยมีหลากหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานแตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตยังสามารถเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามความต้องการ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้พลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate)) หรือ เพ็ท (PET) เป็นพลาสติกในเชิงพาณิชย์ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณการใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง (disposable packaging) ทำให้อัตราการกำจัดเพ็ทหลังการใช้งานไม่สมดุลกับอัตราการผลิตเนื่องจากเพ็ทสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยาก ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการสะสมของขยะเพ็ทอย่างหลีกเลี่ยงมิได้ การแก้ไขปัญหาที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งก็คือการแปรใช้ใหม่หรือการรีไซเคิล (recycling) ซึ่งหมายถึง การนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลเพ็ทสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการรีไซเคิลทางกายภาพและการรีไซเคิลทางเคมี สำหรับการรีไซเคิลทางกายภาพนั้นเพ็ทจะถูกหลอมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดในเรื่องคุณภาพเนื่องจากการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงหรือมีอายุการใช้งานที่ยาวนานได้ ส่วนการรีไซเคิลทางเคมีนั้นเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการย่อยสลายสายโซ่พอลิเมอร์ของเพ็ทให้กลายเป็นสารโมเลกุลเล็กชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นสารเคมีหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้ ในการรีไซเคิลทางเคมีนั้นทำได้หลายวิธี เช่น ไกลคอลิซิส (glycolysis) เมทาโนลิซิส (methanolysis) และไฮโดรลิซิส (hydrolysis) แต่วิธีที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพ็ท คือ ไกลคอลิซิส เนื่องจากเป็น

วิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถย่อยสลายได้โดยไม่ต้องใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ไม่มีสารที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนในระบบและให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นได้ เช่น นำไปสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin, UPE resin) ซึ่งเป็นเรซินที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งงานผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส งานด้านการเคลือบผิว และงานด้านการหล่อแบบ หรือนำไปทำแอลคิเดเรซินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสี เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการรีไซเคิลนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะได้แล้ว ยังจะช่วยลดปริมาณการใช้สารปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่นับวันมีแต่จะหมดไปอีกด้วย การย่อยสลายได้ด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส นั้น แม้จะเป็นวิธีที่ได้สารใหม่ซึ่งมีประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อได้อย่างหลากหลาย แต่เวลาและพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างยาวนาน กล่าวคือ โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลาราว 4 - 8 ชั่วโมง [8] ทำให้ต้นทุนด้านพลังงานยังค่อนข้างสูง เป็นข้อจำกัดสำคัญของการนำกระบวนการดังกล่าวไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือในเชิงพาณิชย์ ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำพลังงานไมโครเวฟมาทดแทนการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งคาดว่าจะนอกจากจะประหยัดพลังงานแล้วยังช่วยย่นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลงไปได้อีกมาก

## 1.2 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการย่อยสลายพอลิเอสเตอร์เรซินที่ได้จากขวดน้ำดื่มใช้แล้วด้วยการไกลโคไลซิสด้วยไกลคอลภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยศึกษาผลของชนิดและปริมาณของไกลคอลที่ใช้ในการไกลโคไลซิสต่อร้อยละผลได้ของพอลิเอสเตอร์เรซินที่ถูกลดปริมาณ เปรียบเทียบกับการย่อยสลายภายใต้การให้พลังงานความร้อนแบบเดิม จากนั้นศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำผลิตภัณฑ์จากการไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟนี้ไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ เสถียรภาพทางความร้อน ความแข็ง ความทนแรงกระแทก และความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่ผ่านการบ่ม เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมจากปฏิกิริยาที่ใช้การให้พลังงานความร้อนแบบเดิม



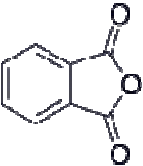
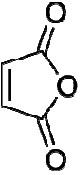
## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 พอลิเอสเทอร์ (Polyesters) [1]

พอลิเอสเทอร์ คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์ (-COO-) อยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุลที่เป็นสายโซ่หลัก สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างพอลิเบสิกแอซิด (polybasic acids) ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (COOH) อย่างน้อย 2 หมู่ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 กับพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) อย่างน้อย 2 หมู่ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 เช่น ปฏิกิริยาของไกลคอลกับไดคาร์บอกซิลิกแอซิด พอลิเอสเทอร์ที่ได้อาจเป็นได้ทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพอลิเบสิกแอซิดที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ [1]

ชื่อ	สูตรโครงสร้าง	หมู่ฟังก์ชัน
Adipic	$\text{HO}_2\text{C}(\text{CH}_2)_4\text{CO}_2\text{H}$	2
Sebasic	$\text{HO}_2\text{C}(\text{CH}_2)_8\text{CO}_2\text{H}$	2
Phthalic anhydride		2
Isophthalic	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CO}_2\text{H})_2$ meta	2
Terephthalic	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CO}_2\text{H})_2$ para	2
Benzenetricarboxylic	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{CO}_2\text{H})_3$	3
Maleic anhydride		2

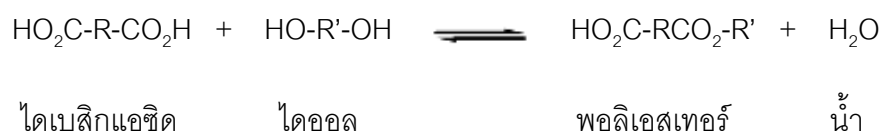
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ [1]

ชื่อ	สูตรโครงสร้าง	หมู่ฟังก์ชัน
Ethylene glycol	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	2
Diethylene glycol	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	2
1,2-Propylene glycol	HOCH <sub>2</sub> CHMeOH	2
Trimethylene glycol	HO CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	2
1,4-Butanediol	HO CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	2
Neopentyl glycol	HO CH <sub>2</sub> CMeCH <sub>2</sub> OH	2
Glycerol	HO CH <sub>2</sub> CH(OH)CH <sub>2</sub> OH	3

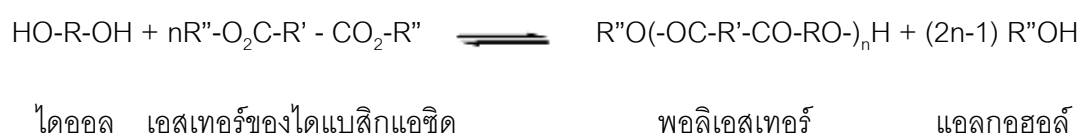
### 2.1.1 ปฏิกริยาทางเคมีในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์

ปฏิกริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ มีดังนี้

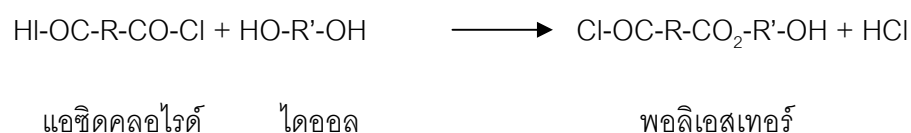
#### 1) ปฏิกริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน (esterification) ดังสมการ



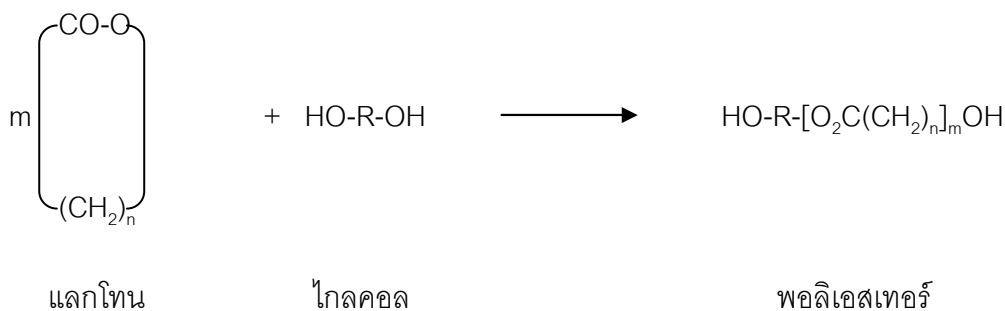
#### 2) ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนเอสเตอร์ (ester interchange) ดังสมการ



#### 3) ปฏิกริยาระหว่างแอซิดคลอไรด์และไกลคอล ดังสมการ



## 4) ปฏิกิริยาการเปิดแล็กโทน ดังสมการ



ปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 เป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ โดยปฏิกิริยาที่ 1 นิยมใช้ในการเตรียมพอลิเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งใช้งานที่เกี่ยวกับการผลิตพอลิยูรีเทน ส่วนปฏิกิริยาที่ 2 นิยมใช้ในการเตรียมพอลิเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงโดยเฉพาะเพ็ด ส่วนปฏิกิริยาที่ 3 เกิดได้เร็วมาก แต่ในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้วถือว่าสิ้นเปลืองเพราะต้องมีการเปลี่ยนกรดให้เป็นเป็นแอสิดคลอไรด์ จึงเป็นวิธีที่ไม่นิยม สำหรับปฏิกิริยาที่ 4 เป็นปฏิกิริยาที่ไม่นิยมใช้มากนักเนื่องจากผลิตพอลิเอสเทอร์ได้น้อยชนิด [1]

## 2.1.2 การแบ่งประเภทของพอลิเอสเทอร์

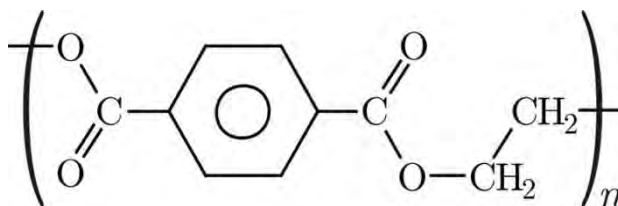
สามารถแบ่งพอลิเอสเทอร์ได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) พอลิเอสเทอร์แบบเส้นชนิดอิมิตัว คือ พอลิเมอร์ที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
- 2) พอลิเอสเทอร์แบบเส้นชนิดไม่อิมิตัว คือ พอลิเอสเทอร์ที่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างสามารถเกิดการเชื่อมขวางจนมีโครงสร้างแบบร่างแหได้ เช่น พอลิเอสเทอร์เซซินชนิดไม่อิมิตัว
- 3) พอลิเอสเทอร์แบบร่างแหหรือแบบเชื่อมขวาง เช่น แอลคิเดเรซิน

## 2.2 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) [2]

เพ็ด คือ พอลิเอสเทอร์แบบเส้นชนิดอิมิตัวที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก มีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การสังเคราะห์เพ็ดในครั้งแรกอยู่ในรูปเส้นใยที่เรียกว่า “เส้นใยพอลิเอสเทอร์” โดย วินฟิลด์และดิกสัน แห่งบริษัท The Calico Printers Association Ltd. ประเทศอังกฤษ ทั้งสองยังพบอีกว่าการนำไดเบสิกแอสิด (dibasic acid) ที่เป็นแอมโฟเทอริกมาใช้แทนแอลิเฟติก ทำให้พอลิเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น เช่น มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น การละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปลดลง จึงเหมาะสำหรับงานด้านเส้นใยและฟิล์ม สิทธิบัตรในการประดิษฐ์นี้ได้ขายให้กับบริษัท Dupont ประเทศสหรัฐอเมริกา และบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ประเทศอังกฤษ ซึ่งบริษัททั้งสองได้พัฒนาพอลิเมอร์นี้ จนกระทั่งสามารถผลิตเส้น

โดยสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตออกวางตลาดในปี ค.ศ. 1953 ภายใต้ชื่อเรียกทางการค้าว่า Dacron® และ Terylene® [2]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพ็ต [2]

การพัฒนาเพ็ตเพื่อใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1970 ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเริ่มจากการที่บริษัทผู้ผลิตน้ำอัดลมต้องการผลิตขวดน้ำอัดลม ที่มีทั้งความเหนียว ความใส และความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี เพื่อทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้ว และอะลูมิเนียมที่ต้องใช้พลังงานในการผลิตมากและมีอัตราการแตกเสียหายสูง ซึ่งบรรจุภัณฑ์จากเพ็ตได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็ว และมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีสมบัติเด่น ดังนี้

- 1) มีความทนต่อแรงกระแทกและการตกกระทบดี
- 2) มีความใส
- 3) น้ำหนักเบาเพียงหนึ่งในสิบของขวดแก้ว ทำให้ประหยัดค่าขนส่งและลดภาวะการเคลื่อนย้าย
- 4) สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีแม้ที่ความดันสูง
- 5) ปลอดภัยต่ออาหารและไม่ทำให้รสชาติอาหารเสียไป

จากสมบัติของเพ็ตที่เหนือกว่าพลาสติกชนิดอื่นๆ ในแ่งดังกล่าว ทำให้มีการนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อย่างกว้างขวาง เช่น ผลิตขวดน้ำมันพืช ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำแร่ บรรจุภัณฑ์อาหาร ยา และสารเคมี เป็นต้น จะเห็นได้ชัดว่าอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มที่ดีขึ้นมากเมื่อตลาดถูกพัฒนาขึ้น แต่เนื่องจากการใช้งานของเพ็ตเป็นแบบใช้แล้วทิ้ง จึงส่งผลให้ขยะเพ็ตมีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณการใช้งาน ดังนั้น การนำเพ็ตมาแปรใช้ใหม่หรือการรีไซเคิล จึงกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกและใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า

### 2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

#### 1) เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG)

เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเพิ่มน้ำให้กับเอทิลีนออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บรรยากาศ ดังสมการ



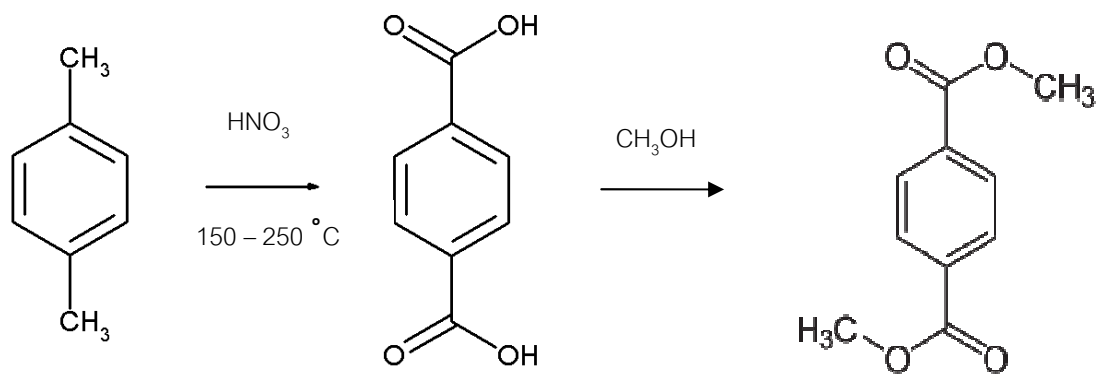
เอทิลีนออกไซด์

เอทิลีนไกลคอล

เอทิลีนไกลคอล เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีจุดเดือดประมาณ 197 องศาเซลเซียส

#### 2) ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate, DMT)

เตรียมได้จากการนำพาราไซลีนมาออกซิไดซ์ด้วยกรดไนตริกภายใต้ความดัน ที่อุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส หรืออาจจะออกซิไดซ์ด้วยอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ ประมาณ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้โลหะไบร์ไมด์เป็นตัวเร่ง ได้กรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid, TPA) นำกรดเทเรฟทาลิกไปทำปฏิกิริยากับเมทานอล จะได้ไดเมทิลเทเรฟทาเลต ดังสมการ



พาราไซลีน

กรดเทเรฟทาลิก

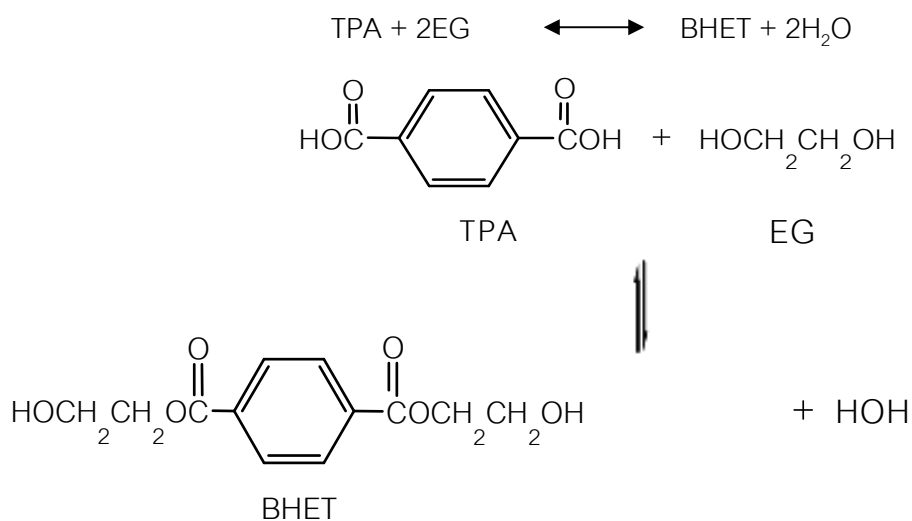
ไดเมทิลเทเรฟทาเลต

ไดเมทิลเทเรฟทาเลตเป็นของแข็งสีขาว มีจุดเดือด 142 องศาเซลเซียส

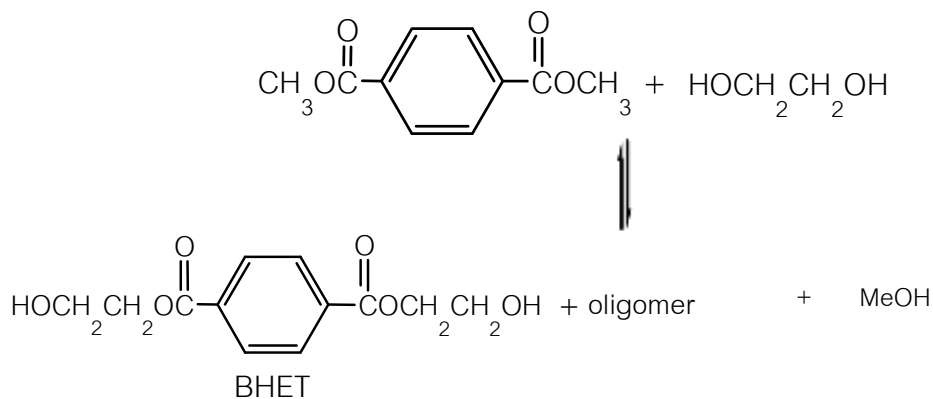
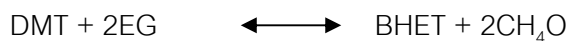
### 2.2.2 การสังเคราะห์พีเอต

พีเอตสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง (direct esterification) ระหว่างกรดและเอทิลีนไกลคอล หรือจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) ระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลตและเอทิลีนไกลคอล ซึ่งในทางอุตสาหกรรมนิยมสังเคราะห์จากปฏิกิริยาหลังมากกว่า เนื่องจากไดเมทิลเทเรฟทาเลตทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายโดยการกลั่นแบบลดความดันหรือการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ดีในเอทิลีนไกลคอล ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เกิดได้ดีในระยะเริ่มแรกของปฏิกิริยา ในทางตรงข้ามกรดเทเรฟทาเลตทำให้บริสุทธิ์ได้ยากและมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายทั่วไปต่ำ ในขั้นตอนการสังเคราะห์พีเอตจะแบ่งปฏิกิริยาออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับกรดเทเรฟทาเลตโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยานี้คือ บิส-2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต [bis(2-hydroxyethyl)terephthalate, BHET] และมีน้ำเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยา ดังสมการต่อไปนี้

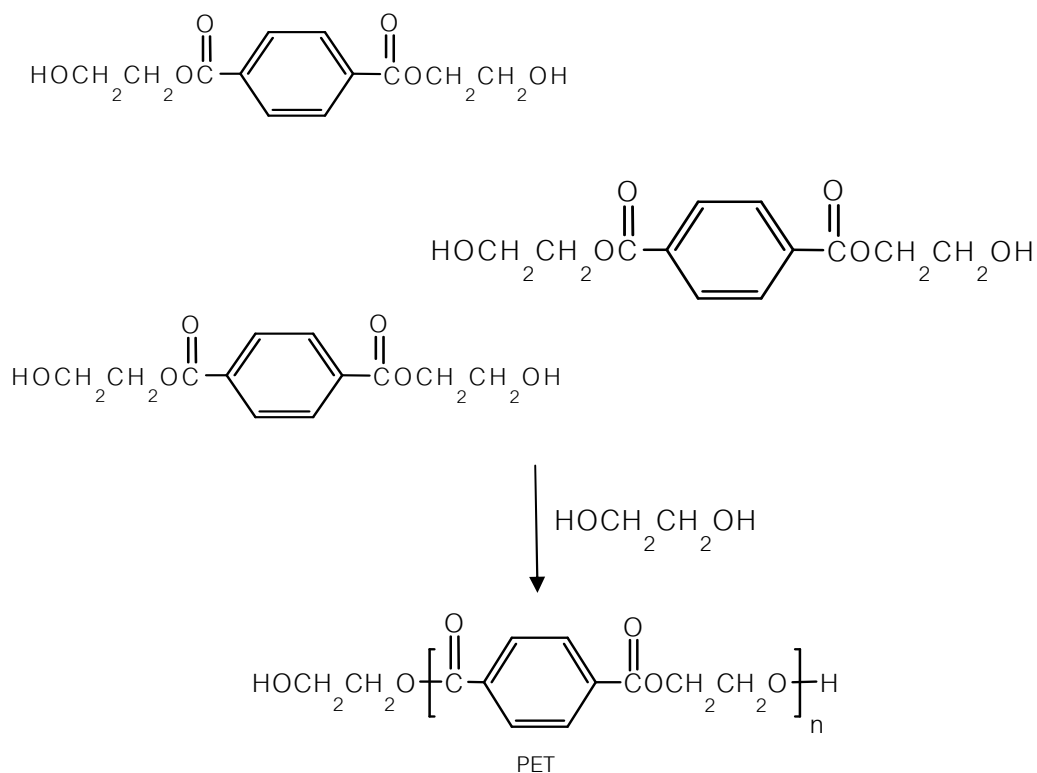


หรือเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลตกับเอทิลีนไกลคอล ซึ่งได้เมทานอลเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยา ดังสมการต่อไปนี้



น้ำหรือเมทานอลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาต้องถูกกำจัดออกไปเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ และใช้เอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากที่สุด กระบวนการในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย (solution polymerization)

ขั้นที่ 2 ให้ความร้อนกับของผสมซึ่งได้จากขั้นแรกที่อุณหภูมิ 270-285 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท ผลผลิตจากปฏิกิริยา คือ พลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และเอทิลีนไกลคอลเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ดังสมการต่อไปนี้



เนื่องจากปฏิกิริยานี้สามารถย้อนกลับได้จึงต้องกำจัดเอทิลีนไกลคอลออกจากกระบวนการอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้พอลิเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อนำไปใช้งานต่อไป กระบวนการในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบหลอมเหลว (melt polymerization) [4]

### 2.2.3 สมบัติของพีดี

- 1) เป็นพอลิเมอร์แข็งเกร็ง ไม่มีสี
- 2) มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงทำให้มีความเป็นผลึกสูง มีจุดหลอมเหลว ( $T_m$ ) ประมาณ 265 องศาเซลเซียส
- 3) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ฌ อุณหภูมิห้อง
- 4) ละลายได้เฉพาะในตัวทำละลายที่สามารถให้โปรตอนได้ เช่น สามารถละลายได้ ฌ อุณหภูมิห้องในคลอริเนเท็ด ฟลูออริเนเท็ด แอซิติกแอซิด ฟีนอล และกรดไฮโดรฟลูออริก ส่วน ฌ อุณหภูมิสูงจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น แอเนนิโซล ไดเมทิลซัลโฟน และแอมม็อกไซด์โทนไดบิวทิลฟทาเลต เป็นต้น
- 5) มีสมบัติทนต่อการกรดอินทรีย์ที่เจือจาง
- 6) สลายตัวได้ด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก ส่วนเบสแก่พวกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพลง

### 2.2.4 การใช้งาน

พีดีมีการใช้งานในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่

- 1) อุตสาหกรรมพลาสติก เช่น ของเด็กเล่น ชิ้นส่วนเครื่องไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์
- 2) อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ขวดใส่ยาและสารเคมี
- 3) อุตสาหกรรมฟิล์ม เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เทปบันทึกเสียง
- 4) อุตสาหกรรมเส้นใยสิ่งทอ เช่น ผ้าพีดี ผ้า T/C

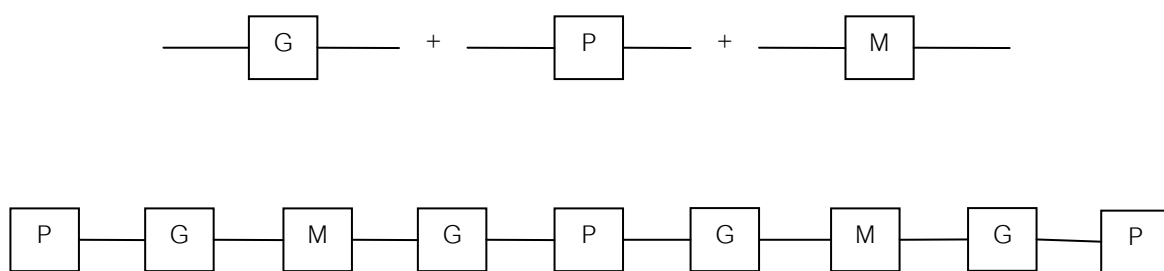
## 2.3 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin, UPE Resin)

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว จัดเป็นพอลิเอสเทอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล สังเคราะห์จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่างไกลคอลและไดเบสิกแอซิด (สารผสมของกรดอินทรีย์ที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว) ซึ่งขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะได้น้ำเป็นผลพลอยได้และเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลง จะต้องนำผลที่ได้ไปละลายในตัวทำละลายที่ไม่อิ่มตัว เช่น สไตรีนมอนอเมอร์ เพื่อให้อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว โดยมีสารยับยั้งปฏิกิริยาช่วยให้เสถียร

เรซินชนิดนี้มักจะเรียกกันโดยทั่วไปว่า พอลิเอสเทอร์เรซิน หรือยูพีอีเรซิน อาจใช้รูปภาพประกอบแทนสัญลักษณ์ทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.2

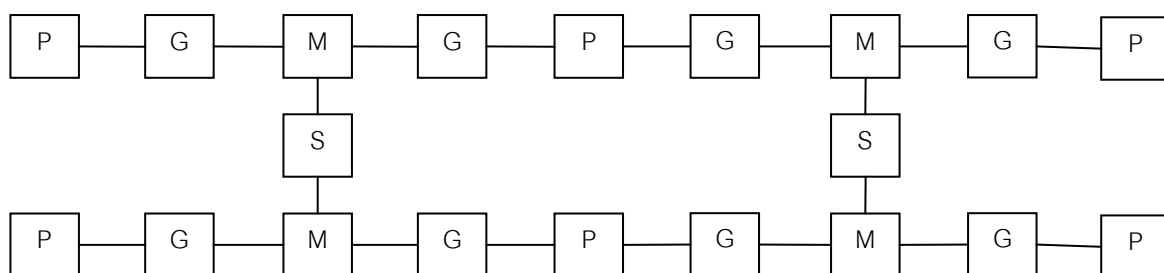


- G แทน ไกลคอล
- P แทน กรดอิมัลชันประเภทไดเบสิก
- M แทน กรดไม่อิมัลชันประเภทไดเบสิก
- S แทน มอนอเมอร์



รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอสเตอร์เรซิน [5]

ส่วนของกรดไม่อิมัลชันจะเป็นส่วนประกอบสำคัญพื้นฐานในโมเลกุลของพอลิเอสเตอร์ที่จะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์เมื่อมีสารริเริ่มปฏิกิริยา (initiator หรือ hardener) และตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator หรือ promoter) เกิดเป็นพลาสติกแข็งขึ้น ซึ่งพลาสติกแข็งนี้ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่รวมตัวกันเป็นร่างแหสามมิติ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเตอร์เรซินภายหลังการแข็งตัว [5]

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตพอลิเอสเตอร์เรซินต่างชนิดกันจะทำให้ได้เรซินหรือพลาสติกที่มีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ต่างกัน [5]

### 2.3.1 วัตถุดิบในการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซิน

#### 2.3.1.1 ไกลคอล (glycol)

ไกลคอล หมายถึง สารประกอบแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, -OH) สองหมู่ในโมเลกุล ไกลคอลแต่ละชนิดที่ใช้จะมีผลต่อสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินต่างกัน เช่น ความเหนียว ความยืดหยุ่น ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น ไกลคอลที่นิยมใช้ ได้แก่

1) โพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol, PG, HO CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) เป็นสารที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและสามารถเข้ากับสไตรีนมอนอเมอร์ที่นำมาเป็นตัวเชื่อมขวางได้ดี

2) ไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol, HOCH<sub>2</sub> CH<sub>2</sub>OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) ปรับให้มีความยืดหยุ่นและดูดซับน้ำได้ดี

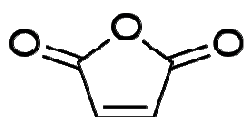
3) ไกลคอลอื่นๆ เช่น เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) ไดโพรพิลีนไกลคอล (dipropylene glycol, HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) เป็นต้น

#### 2.3.1.2 กรดไม่อิ่มตัว (unsaturated acid)

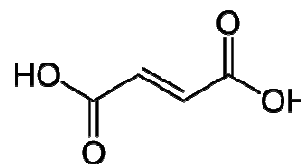
กรดไม่อิ่มตัวเป็นตัวควบคุมการทำปฏิกิริยาของพอลิเอสเทอร์เรซิน ซึ่งจะมีผลต่อความแข็ง อัตราเร็วของการแข็งตัวของเรซิน (เวลาบ่ม) ความร้อนขณะพอลิเอสเทอร์แข็งตัว ความทนต่อสารเคมี และสมบัติทางกายภาพอื่นๆ หากมีส่วนผสมของกรดไม่อิ่มตัวต่ำจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลน้อย ชิ้นงานจะมีความยืดหยุ่นมาก มอดุลัสต่ำ ว่องไวต่อความร้อนและสารละลายมากขึ้น การแข็งตัวเกิดได้ช้า ซึ่งกรดไม่อิ่มตัวที่นิยมใช้ ดังแสดงรูปที่ 2.4 ได้แก่

1) มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) เป็นสารที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาดี และเมื่อเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะให้น้ำออกมาน้อย

2) ฟูมาริกแอซิด (fumaric acid) ทำให้พอลิเมอร์มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อน



มาเลอิกแอนไฮไดรด์



กรดฟูมาริก

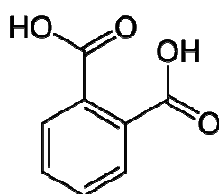
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดไม่อิ่มตัว [5]

### 2.3.1.3 กรดอิ่มตัว (saturated acid)

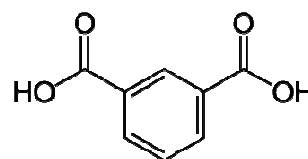
กรดอิ่มตัวที่นิยมใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ได้แก่

1) ฟทาสิกแอซิด (phthalic acid) ซึ่งอยู่ในรูปของฟทาสิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) เนื่องจากหาง่ายกว่าในรูปของกรด ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความยืดหยุ่น ช่วยในการละลายพอลิเอสเทอร์ในสไตรีนมอนอเมอร์ดีขึ้น เพิ่มความใส และความทนทานต่อสารเคมี

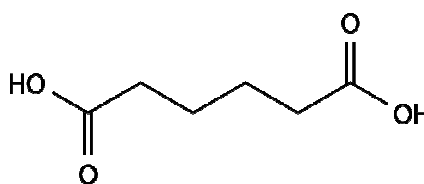
2) กรดอิ่มตัวอื่นๆ เช่น กรดไอโซฟทาสิก (isophthalic acid) กรดอะดิพิก (adipic acid) เป็นต้น



กรดฟทาสิก



กรดไอโซฟทาสิก



กรดอะดิพิก

รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของกรดอิ่มตัว [5]

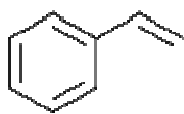
### 2.3.1.4 มอนอเมอร์ (monomer)

มอนอเมอร์ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายพอลิเอสเทอร์ที่มีความหนืดสูงในช่วงก่อนการแข็งตัว และเมื่อได้รับความร้อนหรือภายหลังการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปแล้วมอนอเมอร์จะถูกใช้เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ ทำให้โครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวางกันเองระหว่างสายโซ่ แต่ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และได้ระดับของการเชื่อมขวางต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีระดับของการเชื่อมขวางสูงและรวดเร็วขึ้น จึงนิยมเติมสารที่มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาไป มอนอเมอร์ที่นิยมใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ได้แก่

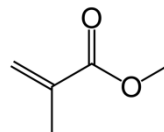
1) สไตรีนมอนอเมอร์ (styrene monomer) เป็นสารที่นิยมใช้มาก เนื่องจากราคาถูก ใช้งานง่าย ความหนืดต่ำ และเป็นตัวทำละลายที่ดีของพอลิเอสเทอร์เรซิน

2) เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate) มีสมบัติในการทนสภาพแวดล้อมได้ดี สีคงทน แต่เนื่องจากสมบัติในการแข็งตัวไม่ดีพอ ดังนั้นนิยมใช้มอนอเมอร์ตัวนี้ผสมกับสไตรีนมอนอเมอร์

3) มอนอเมอร์อื่นๆ เช่น ไวนิลโทลูอีน (vinyl toluene) ไดคลอโรสไตรีน (dichlorostyrene) เป็นต้น



สไตรีนมอนอเมอร์



เมทิลเมทาคริเลต

รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ [5]

### 2.3.1.5 สารยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor)

สารละลายของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง ซึ่งเมื่อได้รับความร้อน แสง หรือตัวแปรอื่นๆ สามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) และทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นเจล (gel) ดังนั้นต้องใช้สารยับยั้งปฏิกิริยาเพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัว และจะช่วยยืดอายุของพอลิเอสเทอร์เรซินให้สามารถเก็บไว้ได้นาน ช่วยปรับเวลาการแข็งตัวและลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะพอลิเอสเทอร์แข็งตัวอีกด้วย ซึ่งสารยับยั้งปฏิกิริยาที่นิยมใช้จะเป็นสารจำพวกควิโนน (quinone) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.7



ไฮโดรควิโนน



เบนโซควิโนน

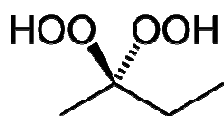
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารยับยั้งปฏิกิริยา [5]

### 2.3.1.6 สารริเริ่มปฏิกิริยา (initiator)

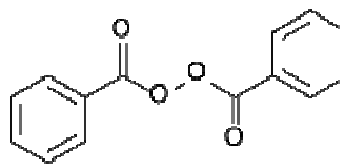
สารริเริ่มปฏิกิริยาทำหน้าที่ตรงข้ามกับตัวยับยั้งปฏิกิริยา คือ เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาทำให้พอลิเอสเทอร์แข็งตัว ส่วนใหญ่เป็นสารพวกเพอร์ออกไซด์ ซึ่งสารริเริ่มปฏิกิริยาที่นิยมใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ได้แก่

1) เมทิลเอทิลคีโตนเพอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide, MEKPO)

2) เบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide)



เมทิลเอทิลคีโตนเพอร์ออกไซด์



เบนโซอิลเพอร์ออกไซด์

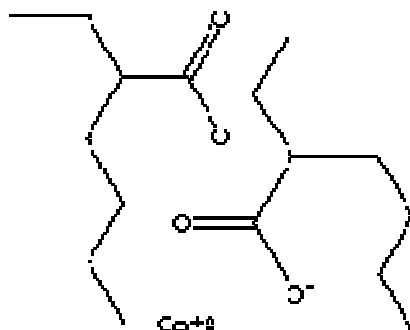
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของสารริเริ่มปฏิกิริยา [5]

### 2.3.1.7 สารเร่ง (accelerator)

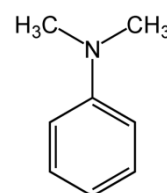
สารเร่งเป็นสารที่ช่วยเร่งให้สารริเริ่มปฏิกิริยาทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกเกลือของโลหะหรือสารจำพวกเอมีน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ได้แก่

1) สารจำพวกเกลือของโลหะ เช่น โคบอลต์ออกโทเอต (Co-octoate) โคบอลต์แนฟทีเนต (Co-naphthalene) จะใช้กับสารริเริ่มปฏิกิริยาจำพวกเมทิลเอทิลคีโตนเพอร์ออกไซด์ ในกรณีที่ต้องการให้แข็งตัวเร็ว

2) สารจำพวกเอมีน เช่น ไดเอทิลแอนิลีน (diethyl aniline) ไดเมทิลแอนิลีน (dimethyl aniline) จะใช้กับพวกเบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ ในกรณีที่ต้องการให้แข็งตัวเร็ว



โคบอลต์ออกโทเอต



ไดเมทิลแอนิลีน

รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา [5]

### 2.3.2 การแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน

การทำให้พอลิเอสเทอร์เรซินซึ่งอยู่ในสภาพเหลวเปลี่ยนสภาพเป็นพลาสติกแข็งมีวิธีการทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1) ใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง

- 2) ใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาและความร้อน
- 3) ใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือยูวี
- 4) ใช้รังสีอิเล็กตรอน (electron beam)
- 5) อื่นๆ เช่น ความร้อน กัมมันตรังสี

วิธีง่าย สะดวก และนิยมใช้กันมาก คือ การใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะที่พอลิเอสเทอร์เกิดการแข็งตัว คือ ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของสไตรีนมอนอเมอร์และพันธะที่ไม่อิ่มตัวของพอลิเอสเทอร์ โดยเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและสารริเริ่มปฏิกิริยาลงในพอลิเอสเทอร์เรซินจะเกิดอนุมูลอิสระขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยาและสารริเริ่มปฏิกิริยา อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในตอนแรกจะถูกกำจัดโดยตัวยับยั้งจนกระทั่งตัวยับยั้งปฏิกิริยาหมดไป อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมาใหม่จึงเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่ไม่อิ่มตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอสเทอร์และกับส่วนที่ไม่อิ่มตัวของสไตรีนมอนอเมอร์ แล้วจึงเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่พอลิเอสเทอร์และสไตรีน เกิดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นมากจนมีสภาพกลายเป็นเจล ซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่ไหล เรียกว่า เวลาเจล (gelation time) เมื่อเกิดปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ อย่างรวดเร็ว สายโซ่โมเลกุลจะเชื่อมขวางกันเป็นร่างแหในทุกทิศทาง สภาพที่เป็นเจลก็แข็งขึ้นเรื่อยๆ พร้อมกับเกิดความร้อนขึ้นอย่างมากจนกลายเป็นสารที่แข็ง หรือพลาสติกแข็ง เรียกว่า การแข็งตัว หรือ การบ่ม (cure) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยา จากนั้นอุณหภูมิจะเริ่มลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาภายหลังการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาจะสมบูรณ์เพียงร้อยละ 95 ถ้าจะทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ ต้องอบต่ออีกกระยะหนึ่ง ไม่เช่นนั้นจะมีกลิ่นเหม็นของสไตรีนมอนอเมอร์หลงเหลืออยู่ ปริมาณเรซิน 100 กรัม อาจทำให้เกิดความร้อนสูงถึง 100 - 200 องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและสารริเริ่มปฏิกิริยา

องค์ประกอบที่มีผลต่อการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน ได้แก่

- 1) อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงเรซินจะแข็งตัวเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ
- 2) ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้ามีปริมาณมากก็จะแข็งตัวเร็วกว่าปริมาณน้อย
- 3) ปริมาณเรซิน ถ้ามีปริมาณมากก็จะแข็งตัวเร็วกว่าปริมาณน้อย
- 4) ความชื้นหรือน้ำ ถ้าความชื้นสูงการแข็งตัวของเรซินจะช้า
- 5) ปริมาณออกซิเจน เนื่องจากออกซิเจนเป็นสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นถ้าปริมาณออกซิเจนสูง เช่น การกวนมากๆ ทำให้ออกซิเจนเข้าสู่เรซินได้มาก ทำให้การแข็งตัวของเรซินช้าลง

### 2.3.3 สมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซิน

- 1) มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- 2) มีความทนทานต่อการกัดกร่อน
- 3) มีความต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี ยกเว้นพวกคลอรีเนตเต็ดไฮโดรคาร์บอน เช่น คลอโรฟอร์ม พวกลีโพลเอสเตอร์ เช่น เอทิลอะซิเตตคีโตน อาจเกิดการกัดกร่อนได้
- 4) ง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยการหล่อ
- 5) มีความแข็งแต่เปราะ
- 6) ทนความร้อนได้สูง
- 7) มีความทนทานต่อแรงกระแทกดี
- 8) มีความทนทานต่อการขีดถู
- 9) น้ำหนักเบา

### 2.3.4 การใช้งาน

พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังต่อไปนี้

- 1) ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องมีใยแก้ว ได้แก่
  - การหล่อใส หล่อทึบ หล่อปิดแผงวงจรไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า
  - การทำหินอ่อนเทียม
  - การทำเรซินคอนกรีต เช่น การทำพื้นโรงงาน
  - การทำกระดุม
  - การเคลือบไม้
  - การเคลือบรูป
  - การทำสีไปวอร์ด
  - อื่นๆ
- 2) ผลิตภัณฑ์ที่มีใยแก้วประกอบ คือ เอฟอาร์พี (fiberglass reinforced plastics) ซึ่งแบ่งตามลักษณะของการใช้งานเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้
  - กลุ่มผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น กระเบื้องลอนมุงหลังคา แผ่นเรียบสำหรับผนัง
  - กลุ่มผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้าน เช่น อ่างอาบน้ำ ห้องน้ำสำเร็จรูป ถังบำบัดน้ำเสีย
  - กลุ่มเรือ เช่น เรือต่าง ๆ
  - กลุ่มยานพาหนะ เช่น อุปกรณ์ในเครื่องบิน อุปกรณ์เกี่ยวกับรถ
  - กลุ่มใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ท่อส่งเคมี ครอบนอกเครื่องจักร หอระบายความร้อนสำหรับหล่อเย็น

## 2.4 การรีไซเคิลพลาสติก (Plastic Recycling)

การแปรใช้ใหม่หรือรีไซเคิลพลาสติกตามความหมายของ ASTM D5033-90 เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภทดังนี้ [6,7]

1) การรีไซเคิลระดับที่ 1 (primary recycling) เป็นการนำเศษพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการผลิตมาผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เดิมหรือใกล้เคียง

2) การรีไซเคิลระดับที่ 2 (secondary recycling) เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้ว มาผ่านกระบวนการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบอื่นที่แตกต่างจากการใช้งานครั้งแรก ซึ่งมักพบว่าพลาสติกชนิดอื่นปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก

3) การรีไซเคิลระดับที่ 3 (tertiary recycling) เป็นการนำขยะพลาสติกมาใช้ผลิตสารเคมีพื้นฐานทั่วไป โดยมุ่งเน้นขยะพลาสติกจากแหล่งชุมชนหรือขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยก ซึ่งกระบวนการที่ใช้จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นต้น

4) การรีไซเคิลระดับที่ 4 (quaternary recycling) เป็นการนำพลังงานที่ได้จากการเผาขยะพลาสติกมาใช้

### 2.4.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ

การรีไซเคิลทางกายภาพ เป็นการรีไซเคิลโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ กล่าวคือ เป็นการนำขยะพลาสติก ทั้งที่เป็นขยะจากกระบวนการผลิตและจากการบริโภคมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้ง โดยการนำไปบดผสมกับวัตถุดิบบริสุทธิ์หรือไม่ก็ได้ แล้วนำไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดิมหรือเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่อีกครั้ง ซึ่งถือเป็นการรีไซเคิลระดับที่หนึ่งและระดับที่สองตามที่จำแนกไว้ใน ASTM D5033-90 ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี การรีไซเคิลทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี วิธีแรกเรียกว่ากระบวนการรีเคลมเมชัน (reclamation process) นั้น ต้องการแยกขยะพลาสติกตามชนิดของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบแล้วนำไปผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หรือเป็นเม็ดพลาสติกรีไซเคิล เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตอื่นๆ ต่อไป อีกวิธีหนึ่งเป็นการนำขยะพลาสติกซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นขยะผสมไปผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาเลย



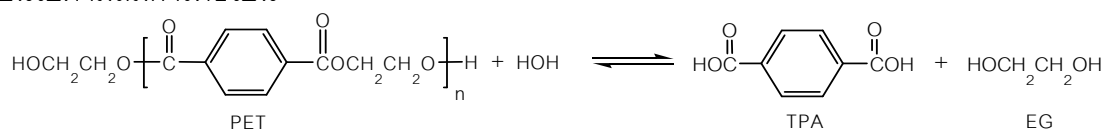
เรียกรวมกันว่า กระบวนการจัดการขยะพลาสติกแบบคอมมิงเกิลด์ (commingled plastic waste processing)

#### 2.4.2 การรีไซเคิลทางเคมี

การรีไซเคิลที่เกิดด้วยกระบวนการทางเคมีนั้นเป็นการรีไซเคิลระดับที่ 3 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ในขั้นแรกต้องย่อยสลายพีทด้วยกระบวนการทางเคมีก่อน จากนั้น จึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารชนิดอื่นต่อไป ซึ่งการย่อยสลายพีทสามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารย่อยสลายนี้นี้

##### 1) ปฏิกริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis)

ปฏิกริยาไฮโดรลิซิสจะใช้น้ำเป็นสารย่อยสลายโดยใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกริยาบางชนิด หรือทำให้เกิดปฏิกริยาในภาวะที่ค่อนข้างรุนแรง (ใช้อุณหภูมิและความดันสูง)ซึ่งถ้าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยาจะเรียกว่า ปฏิกริยาแอซิดไฮโดรลิซิส (acid hydrolysis) หรือถ้าใช้สารอัลคาไลน์ที่มีฤทธิ์เป็นเบสเรียกว่า ปฏิกริยาอัลคาไลน์ไฮโดรลิซิส (alkaline hydrolysis) ซึ่งผลที่ได้จากปฏิกริยาคือ กรดเทเรฟทาเลอิกและเอทิลีนไกลคอล โดยกรดเทเรฟทาเลอิกที่ได้สามารถทำให้บริสุทธิ์โดยการตกผลึกจากตัวทำละลายและสามารถนำกลับไปใช้หมุนเวียนในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นต่อไปได้ แต่กระบวนการไฮโดรลิซิสมีข้อเสียหลายประการ เช่น ปัญหาเกี่ยวกับการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกริยา การใช้ภาวะที่รุนแรงในการดำเนินปฏิกริยา การแยกผลผลิตที่ได้จากเอทิลีนไกลคอล นอกจากนี้การไฮโดรลิซิสพีทต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกริยาที่นานมาก ซึ่งปฏิกริยาการย่อยสลายเป็นไปตามสมการต่อไปนี้



Campanelli และคณะ [8] ได้ศึกษาอัตราการหลอมเหลวของพีทกับเอทิลีนไกลคอล โดยใช้น้ำมากเกินพอที่อุณหภูมิ 250 256 280 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการเกิดปฏิกริยาขึ้นกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล และหมู่เอสเทอร์ในสายโซ่พอลิเมอร์

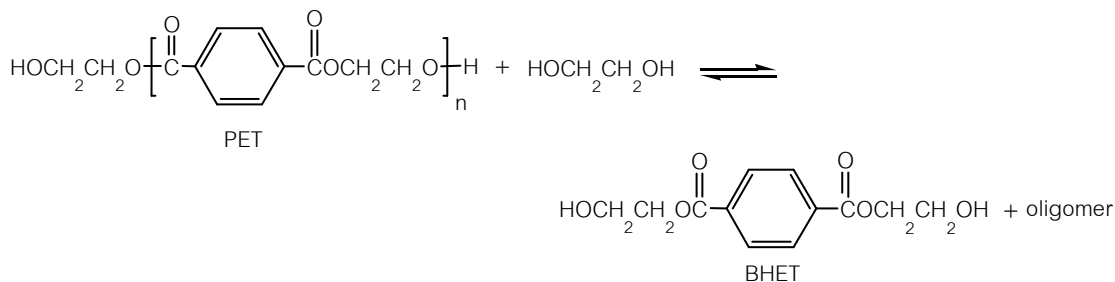
##### 2) ปฏิกริยาแอลกอฮอล์ลิซิส (alcoholysis)

การย่อยสลายพีทด้วยปฏิกริยาแอลกอฮอล์ลิซิส เป็นการนำแอลกอฮอล์บางชนิดมาใช้เป็นสารย่อยสลายภายใต้ความร้อนและความดัน ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้เมทานอลเป็นสารย่อยสลายจึงมักเรียกรวมกันว่า เมทาโนลิซิส (methanolysis) และผลที่ได้จากปฏิกริยา คือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลต และเอทิลีนไกลคอล แต่เอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการสามารถ



#### 4) ไกลโคลิซิส (glycolysis)

การย่อยสลายขวดเพ็ตด้วยปฏิกิริยาไกลโคลิซิส เป็นการนำไกลคอล เช่น เอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล เป็นต้น มาใช้เป็นสารย่อยสลายที่อุณหภูมิประมาณ 180 – 200 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ BHET และโอลิโกเมอร์ (2 – 10 mers) ดังสมการต่อไปนี้



Vaidya และ Nadkarni [11] ได้ย่อยสลายเพ็ตด้วยกระบวนการไกลโคลิซิสโดยใช้เอทิลีนไกลคอลที่อัตราส่วนต่างๆ กัน และใช้ซิงค์แอสีเทตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งผลที่ได้จากการย่อยสลายส่วนใหญ่ประกอบด้วย มอนอเมอร์ และไดเมอร์ โดยประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่ใช้เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินไป จะได้ BHET เป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกัน

Baliga และ Wong [12] ได้ทดลองย่อยสลายขวดเพ็ตโดยกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยเอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินไปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด คือ ซิงค์แอสีเทต เลดแอสีเทต โคบอลต์แอสีเทต และแมงกานีสแอสีเทต เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการย่อยสลาย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย BHET (มากกว่าร้อยละ 75) และไดเมอร์ จากการตรวจสอบไม่พบโอลิโกเมอร์ขนาดใหญ่ของเพ็ตอยู่เลย นอกจากนี้ยังพบว่าซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงสุดเพราะให้ BHET ออกมามากที่สุด และพบว่าสีที่มีอยู่ในขวดเครื่องดื่มบางชนิดไม่มีผลต่อปฏิกิริยาไกลโคลิซิส

Pardal และ Tersac [13] ศึกษากลไกของกระบวนการไกลโคลิซิสจากไกลคอล 3 ชนิด คือ ไดเอทิลีนไกลคอล ไดโพรพิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ titanium (IV) n-butoxide (TBT) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ TBT ต่อเพ็ตเท่ากับ 0.5 ต่อ 100 พบว่า ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของไกลคอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 220 องศาเซลเซียส เรียงตามลำดับดังนี้ ไดเอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล และไดโพรพิลีนไกลคอล

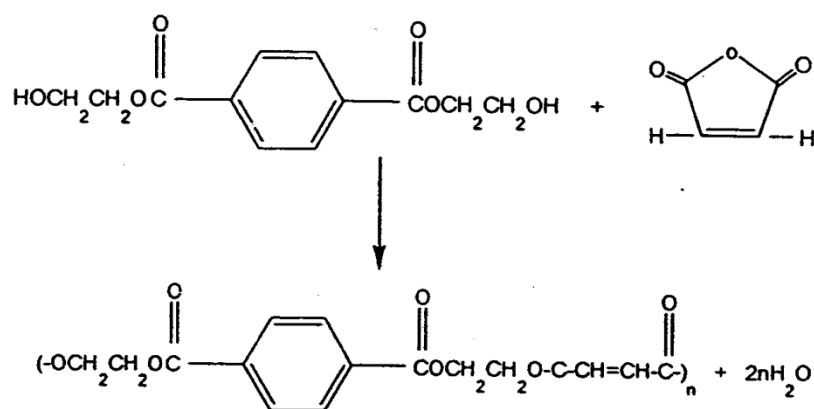
ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของไกลคอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 190 องศาเซลเซียส เรียงตามลำดับดังนี้ ไดเอทิลีนไกลคอล ไดโพรพิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายเพ็ตด้วยปฏิกิริยาเหล่านี้ สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ได้อีก [14] ตัวอย่างเช่น

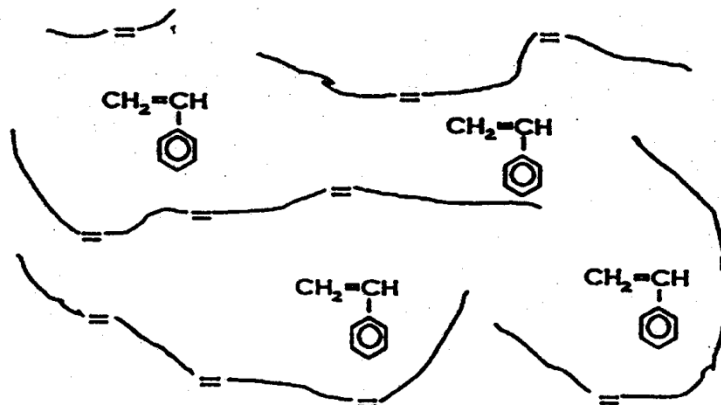
- พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งได้มาจากการนำ BHET ไปทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ แล้วนำไปละลายในสไตรีนมอนอเมอร์
- ยูรีเทนออยล์ สำหรับใช้ในงานเคลือบผิว ซึ่งได้จากการนำ BHET ที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับน้ำมันถั่วเหลืองและโพลีอินไดไฮโซไซยานาต
- พลาสติกไซเซออร์สำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งได้จากการนำกรดเทเรฟทาสิกไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เพื่อเตรียมเป็นไดออกทิลเทเรฟทาเลต (dioctyl terephthalate, DOTP) ซึ่งสามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์สำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้เช่นเดียวกับพลาสติกไซเซออร์ทางการค้าซึ่งก็คือไดออกทิลฟทาเลต (dioctyl phthalate, DOP)

#### 2.4.3 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากเพ็ตที่ใช้แล้ว

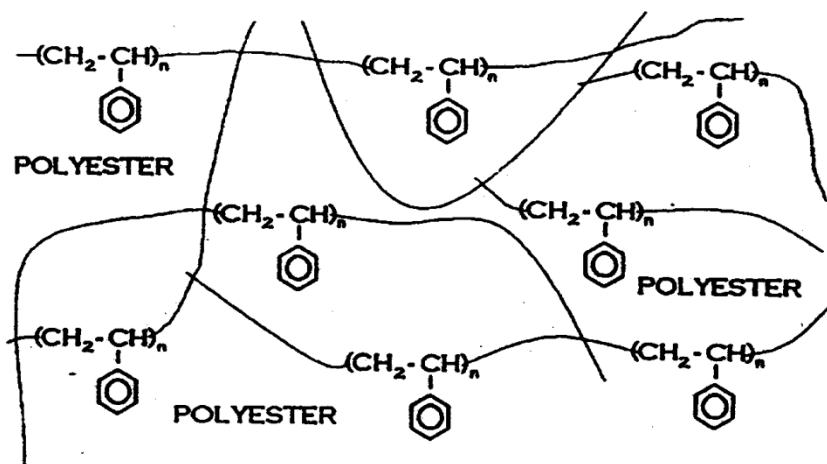
เมื่อย่อยสลายเพ็ตที่ใช้แล้ว (depolymerization) ด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายหรือไกลโคไลซิโพรดักส์มาทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัว ได้แก่ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ หรือ ฟูมาริกแอซิด ด้วยอัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิล เท่ากับ 1:1 ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



พอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถละลายได้ในสไตรีนมอนอเมอร์ โดยที่สไตรีนมอนอเมอร์จะแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และถ้าเติมสารพวกเพอร์ออกไซด์ลงไป ก็จะช่วยเร่งให้เกิดการแข็งตัวได้เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 โมเลกุลของสไตรีนมอนอเมอร์ที่แทรกระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัว [5]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเทอร์ภายหลังการแข็งตัว [5]

Vaidya และ Nadkarni [15] ได้นำเส้นใยพีตมาทย่อยสลายโดยการไกลโคไลซิสด้วยโพรพิลีนไกลคอลที่ปริมาณต่างๆ แล้วนำไกลโคไลซ์โพรดักส์มาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัว โดยเติมสไตรีนมอนอเมอร์เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล จากนั้นทำให้แข็งตัวโดยการใช้นิเมทิลเอทิลคีโตนเพอร์-

ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และโคบอลต์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรซินที่ได้ถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber reinforced plastics, FRP)

Fujita และคณะ [16] ได้นำเศษพอลิเอสเตอร์ต่างๆ ทั้งที่เป็นเส้นใย พิล์ม และพลาสติกมา ย่อยสลายด้วยวิธีทางเคมีร่วมกันเพื่อให้ได้ BHET ที่มีคุณภาพสูง เพื่อนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเตอร์ใหม่ โดยใช้เอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิ 215 – 250 องศาเซลเซียส และถ้าหากนำเศษพอลิเอสเตอร์ทั้งหมดใส่เข้าไปพร้อมๆ กันจะเกิดปัญหาตามมาเนื่องจากการแข็งตัวของสารไม่สามารถทำการกวาดต่อไปได้ เกิดความไม่สม่ำเสมอภายในระบบ ดังนั้น ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายและปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พอลิเอสเตอร์ที่สังเคราะห์ได้ยังมีสมบัติทางกายภาพลดลง

Potiyaraj และคณะ [17] ได้สังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว จากการย่อยสลายผ้าพอลิเอสเตอร์และผ้าพอลิเอสเตอร์ผสมผ้าด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยโพรพิลีนไกลคอลโดยใช้ซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ไปทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ใช้สไตรีนมอนอเมอร์เป็นสารเชื่อมขวาง เมทิลเอทิลคีโตน-เพอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาและโคบอลต์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเรซินจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของผ้าพอลิเอสเตอร์มีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าเรซินจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวดเพ็ตและเรซินทางการค้าเล็กน้อย และเรซินที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมงมีสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนดีที่สุด

Puangsansuk และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของกรดอิมิตัวต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายขยะเพ็ต โดยย่อยสลายขยะเพ็ตด้วยโพรพิลีนไกลคอลที่มากเกินไป 190 องศาเซลเซียส ใช้ซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มาทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และกรดอิมิตัว ได้แก่ กรดแอดิพิค และกรดซัคซินิก พบว่า เมื่อปริมาณกรดอิมิตัวเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงที่ขึ้นงานลดลงเนื่องจากจำนวนเชื่อมขวางลดลง แต่จะช่วยปรับปรุงความทนแรงดัดโค้งและความทนแรงกระแทกให้ดีขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการย่อยสลายเพ็ตด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส นั้น แม้จะเป็นวิธีที่ได้สารใหม่ซึ่งมีประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อได้อย่างหลากหลาย แต่เวลาและพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างยาวนาน กล่าวคือ โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลาราว 4 – 8 ชั่วโมง ทำให้ต้นทุนด้านพลังงานยังค่อนข้างสูง

เป็นข้อจำกัดสำคัญของการกระบวนการดังกล่าวไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือในเชิงพาณิชย์ ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำไมโครเวฟมาทดแทนการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งคาดว่าจะนอกจากจะประหยัดพลังงานแล้วยังช่วยย่นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลงไปได้อีกมาก

การนำไมโครเวฟมาใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในปฏิกิริยาเคมีนั้นกำลังได้รับความสนใจกันโดยทั่วไป เนื่องจากช่วยย่นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลงไปได้มากและประหยัดพลังงาน ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง  $2.450 \times 10^9$  เฮิร์ตซ์ มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สูงกว่า ไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในการให้ความร้อนสำหรับการประกอบอาหารในครัวเรือนโดยทั่วไป ในเตาไมโครเวฟที่ใช้กันในบ้าน มีแม่กนิตรอนทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่วัตถุจากทุกทิศทุกทางโดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่วัตถุ เมื่อคลื่นไปกระทบวัตถุทำให้โมเลกุลของวัตถุเกิดการสั่นและเสียดสีกัน ทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนในวัตถุอย่างรวดเร็ว [10]

Pingale และ Shukla [19] ได้ย่อยสลายขดเพ็ดด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสโดยปริมาณของเพ็ดและเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วน 1:4 ถึง 1:10 โดยโมล เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้พลังงานไมโครเวฟและใช้ซิงค์แอสีเทต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนต และแบเรียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.3 ถึง 1 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณ BHET เพิ่มสูงสุด ที่ 35 ถึง 40 นาที ที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ขวดเพ็ตใช้แล้ว
- 3.1.2 เอทิลีนไกลคอล ( $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) : Fluka
- 3.1.3 โพรพิลีนไกลคอล ( $\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{OH}$ ) : Fluka
- 3.1.4 ไดเอทิลีนไกลคอล ( $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) : Fluka
- 3.1.5 ซิงค์แอซีเตต ( $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) : Fluka
- 3.1.6 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ( $\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3$ ) : Fluka
- 3.1.7 ไฮโดรควิโนน ( $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$ ) : Fluka
- 3.1.8 สไตรีนมอนอเมอร์ ( $\text{C}_8\text{H}_8$ ) : Fluka
- 3.1.9 โคบอลต์ออกไซด์ : บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด
- 3.1.10 เมทิลเอทิลคีโตนเพอร์ออกไซด์ : บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องบดละเอียด (pulverizer) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Pulverisette 15 (Idar-Oberstein, Germany)
- 3.2.2 ขวดแก้วก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร และเครื่องแก้วอื่นๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 3.2.3 ตู้อบไมโครเวฟ ยี่ห้อ LG รุ่น MS2127CW (ประเทศไทย) ซึ่งดัดแปลงเป็นพิเศษสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยา
- 3.2.4 มอเตอร์ปั่นกวนชนิดปรับรอบได้พร้อมใบพัด
- 3.2.5 เครื่องควบแน่น (condenser) พร้อมข้อต่อ
- 3.2.6 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.2.8 ตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น behchickung-loading modell 100-800 (ประเทศไทย)
- 3.2.9 เครื่องปั่นแบบหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ยี่ห้อ Kubota รุ่น Compact Tabletop Centrifuge 2420 (Tokyo, Japan)



### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 พูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NICOLET 6700 FT-IR (Madison, WI)

3.3.2 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851 (Greifensee, Switzerland)

3.3.3 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DSC822 (Greifensee, Switzerland)

3.3.4 โรเทชันแนลรีโอมิเตอร์ (rotational rheometer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Bohlin Gemini HR Nano (Worcestershire, UK)

3.3.5 ดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D (Freeport, NY)

3.3.6 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact tester) ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7045-MDH (Taiwan, ROC)

3.3.7 เครื่องทดสอบแรงกด (universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น L500 (Fareham, UK)

### 3.4 ขั้นตอนในการวิจัย

งานวิจัยนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

3.4.1 การย่อยสลายเปิดด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ไกลคอลชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเปิดและไกลคอลต่างๆ กัน รวมทั้งการวิเคราะห์ไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่ได้

3.4.2 การสังเคราะห์ไกลโคไลซ์โปรดักส์ให้เป็นเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ แล้วขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมได้ให้เป็นขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการหล่อ ก่อนนำไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

### 3.5 การย่อยสลายเปิดด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

3.5.1 นำขวดเปิดใช้แล้วมาแยกฝาและฉลากออก แล้วล้างด้วยน้ำให้สะอาด อบให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด (pulverizer) ที่มีตะแกรงร่อนเพื่อคัดขนาดของอนุภาคให้เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 เครื่องบดละเอียด

- 3.5.2 นำขวดพีตที่ใช้แล้วที่ผ่านการบดละเอียด บรรจุลงในขวดก้นกลม
- 3.5.3 เติมไกลคอลลงในขวดก้นกลม ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
- 3.5.4 เติมซิงค์แอสีเทรต์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของพีตที่ใช้ ลงในขวดก้นกลม

ตารางที่ 3.1 ปริมาณไกลคอลลที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ

ไกลคอลล	อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อไกลคอลล		
เอทิลีนไกลคอลล	1:4	1:6	1:8
โพรพิลีนไกลคอลล	1:4	1:6	1:8
ไดเอทิลีนไกลคอลล	1:4	1:6	1:8

3.5.5 ดำเนินปฏิบัติการย่อยสลายที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ โดยใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ดัดแปลงเพื่อใช้ในการทดลองนี้โดยเฉพาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในขณะที่ทำปฏิบัติการจนสารทดลองเวลาพร้อมทั้งรีฟลักซ์ตลอดการทดลอง



รูปที่ 3.2 ตู้อบไมโครเวฟที่ดัดแปลงเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.2 เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายเพ็ด

ไกลคอลล	อัตราส่วนโดยโมลของ เพ็ดต่อไกลคอลล	เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายเพ็ด (นาที)					
		15	20	25	30	35	40
เอทิลีน ไกลคอลล	1:4	15	20	25	30	35	40
	1:6	15	20	25	30	35	40
	1:8	15	20	25	30	35	40
โพรพิลีน ไกลคอลล	1:4	15	20	25	30	35	40
	1:6	15	20	25	30	35	40
	1:8	15	20	25	30	35	40
ไดเอทิลีน ไกลคอลล	1:4	15	20	25	30	35	40
	1:6	15	20	25	30	35	40
	1:8	15	20	25	30	35	40

3.5.6 เมื่อครบระยะเวลาดำเนินการปฏิกิริยา ปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเรียกว่า ไกลโคไลซ์โพรดักส์ (glycolyzed product)

3.5.7 นำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ในแต่ละสูตรไปตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นแบบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 13,000 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ส่วนหนึ่งไปตรวจสอบสมบัติดังนี้

3.5.7.1 หาร้อยละผลได้ของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์โดยนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ไปตกตะกอนด้วยน้ำกลั่น จากนั้นคำนวณหาร้อยละผลได้ของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์จากสูตร

$$\text{ร้อยละผลได้ของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์} = \frac{\text{น้ำหนักของไกลโคไลซ์โพรดักส์}}{\text{น้ำหนักของเพ็ดที่ใช้}} \times 100$$

3.5.7.2 วิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) โดยนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR สเปกโทรมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อหาแถบดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งสามารถบอกถึงโครงสร้างทางเคมีของสารได้



รูปที่ 3.3 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโทรมิเตอร์

3.5.7.3 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (TGA) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว ( $T_d$ ) ของสารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างที่มีน้ำหนักประมาณ 3 – 10 มิลลิกรัม ใส่ในถาดอะลูมินา ใช้ภาวะในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ 50 ถึง 1000 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.4 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์

3.5.7.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมตรี (DSC) ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อหาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน ( $T_g$ ) หรืออุณหภูมิหลอม ( $T_m$ ) ของสารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างที่มีน้ำหนักประมาณ 3 – 10 มิลลิกรัม ใส่ในถาดอะลูมิเนียม ซึ่งน้ำหนักสารที่แน่นอนแล้วปิดผนึก ซึ่งใช้อากาศเป็นสารอ้างอิง ใช้ภาวะในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.5 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์

### 3.6 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซีพอร์ทิกส์

3.6.1 นำไกลโคไลซีพอร์ทิกส์ผสมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของไกลคอลลต่อมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เท่ากับ 1:1 ในขวดแก้วกันกลม ซึ่งต่ออยู่กับมอเตอร์ปั่นกวน เครื่องควบแน่น เทอร์โมมิเตอร์ ภายในตู้อบไมโครเวฟ

3.6.2 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันจะดำเนินไปภายใต้พลังงานไมโครเวฟ 600 วัตต์ ภายในเวลา 15 นาที กวนสารตลอดเวลา พร้อมทั้งรีฟลักซ์และแยกน้ำที่ ได้จากปฏิกริยาออกตลอดการทดลอง

3.6.3 เมื่อครบระยะเวลาในการดำเนินปฏิกริยา เติมไฮโดรควิโนน ร้อยละ 0.045 โดยน้ำหนักของเรซิน

3.6.4 ปล่องยให้เรซินเย็นตัวลงมาจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำไปละลายในสไตรีนมอนอเมอร์ ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของเรซิน กวนสารให้เข้ากัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยาเรียกว่า พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวหรือยูพีอี

3.6.5 วิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ด้วยเครื่อง FT-IR สเปกโทรมิเตอร์ เพื่อหาแถบดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งสามารถบอกถึงโครงสร้างทางเคมีของสารได้

3.6.6 ทดสอบหาเวลาบ่ม (cure time) ด้วยเครื่องโรเทชันแนลรีโอมิเตอร์ (rotational rheometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้พาราเลลเพลทเซลล์ขนาด 50 มิลลิเมตร ขนาด gap 0.5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.6 เครื่องโรเทชันแนลรีโอมิเตอร์

### 3.7 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบและการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

3.7.1 นำยูพีอีที่ได้ผสมกับโคบอลต์ออกโทเอตและเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วน 100 : 0.5 : 0.5 โดยผสมยูพีอีให้เข้ากับโคบอลต์ออกโทเอตก่อน ใช้แท่งแก้ววนเบาๆ ให้เข้ากัน แล้วเติมเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์กวนของผสมทั้งหมดให้เข้ากันอีกครั้ง ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ

3.7.2 เมื่อของผสมเข้ากันดีแล้ว เทลงในแม่แบบซิลิโคนที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ

3.7.3 อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.7.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาลิซิส (TGA) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว ( $T_d$ ) ของสารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างที่มีน้ำหนักประมาณ 3 – 10 มิลลิกรัม ใส่ในถาดอะลูมินา ใช้ภาวะในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ 50 ถึง 1000 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

3.7.5 ทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 [23] ด้วยเครื่อง Impact Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เลือกรูปวิธีการทดสอบแบบ Izod test โดยชิ้นทดสอบมีขนาดความกว้างประมาณ 10 มิลลิเมตร และความหนาประมาณ 3.2 มิลลิเมตร วางชิ้นทดสอบในแนวตั้งฉากและยึดที่ปลายเพียงด้านเดียว โดยตำแหน่งของรอยบากจะถูกหันเข้าหาด้านที่ตุ้มน้ำหนักตกกระทบ เมื่อปล่อยให้ปลายของตุ้มน้ำหนักตกลงมาตามแรงโน้มถ่วง ตุ้มน้ำหนักจะตกกระทบตรงกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ อ่านค่าพลังงานที่ได้และบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความทนแรงกระแทกจากสูตร ดังต่อไปนี้

$$\text{ความทนแรงกระแทก} = \frac{W}{bd}$$

โดย  $W$  คือ พลังงาน มีหน่วยเป็น จูล (J)

$b$  คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบตรงบริเวณรอยบาก  
มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

$d$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก



3.7.6 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing) ตามมาตรฐาน ASTM D790 [24] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแบบ three-point bending ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร และความหนา 3.2 มิลลิเมตร นำชิ้นทดสอบไปวางบนคานรองรับของเครื่อง Universal Testing Machine ให้แรงกดแก่ชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างคานทั้งสองซึ่งรองรับอยู่ด้านล่างด้วยอัตราเร็วเฉพาะค่าหนึ่ง ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงเค้นดึง (tensile stress) และแรงเค้นกด (compressive stress)

ค่าแรงที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักจะนำมาใช้คำนวณหาค่าความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความทนแรงดัดโค้ง} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

เมื่อ $P$	คือ	แรงที่ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
$L$	คือ	ความยาว (span length) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
$b$	คือ	ความกว้างของชิ้นทดสอบโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
$d$	คือ	ความหนาของชิ้นทดสอบโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงกดที่ติดตั้งชุดทดสอบแบบ three-point bending

3.7.7 ทดสอบความแข็ง (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นเครื่องวัดความแข็งของแผ่นพลาสติกที่มีความหนามากกว่า 3 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบควรมีพื้นที่มากพอที่จะทำให้หัวกด (indenter) กดห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร และต้องวัดความแข็งอย่างน้อย 6 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งควรห่างกันอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.9 เครื่องคูโรมิเตอร์ชนิด Shore D

## บทที่ 4

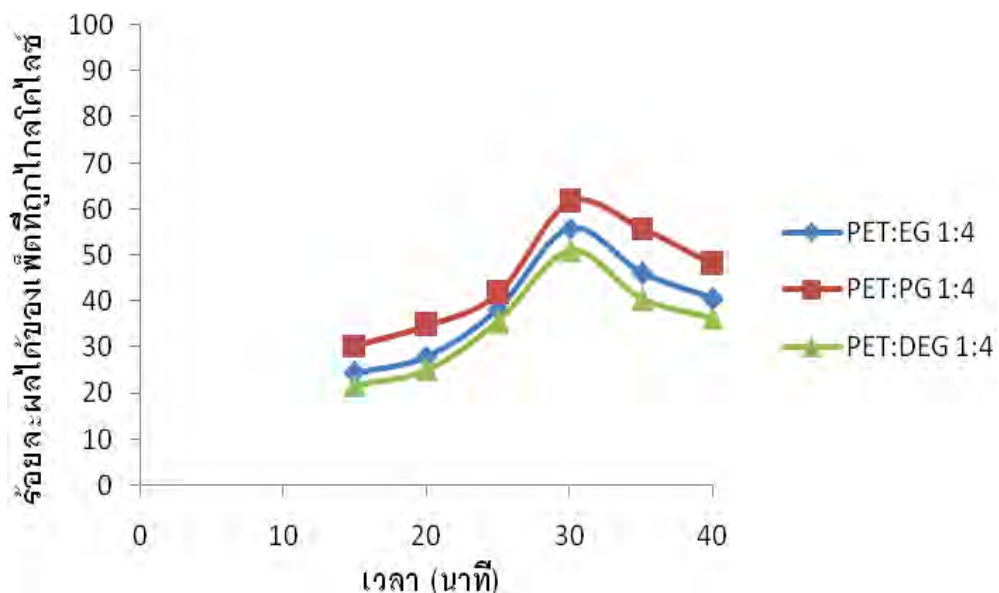
### ผลการทดลองวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การย่อยสลายพีตด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส

เมื่อนำขวดพีตใช้แล้วที่ผ่านการบดละเอียด มารย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้ไกลคอลสามชนิด ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล และไดเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อไกลคอลเท่ากับ 1:4 1:6 และ 1:8 โดยใช้ซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลาย คือ ไกลโคไลซ์โพรดักส์ ที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส

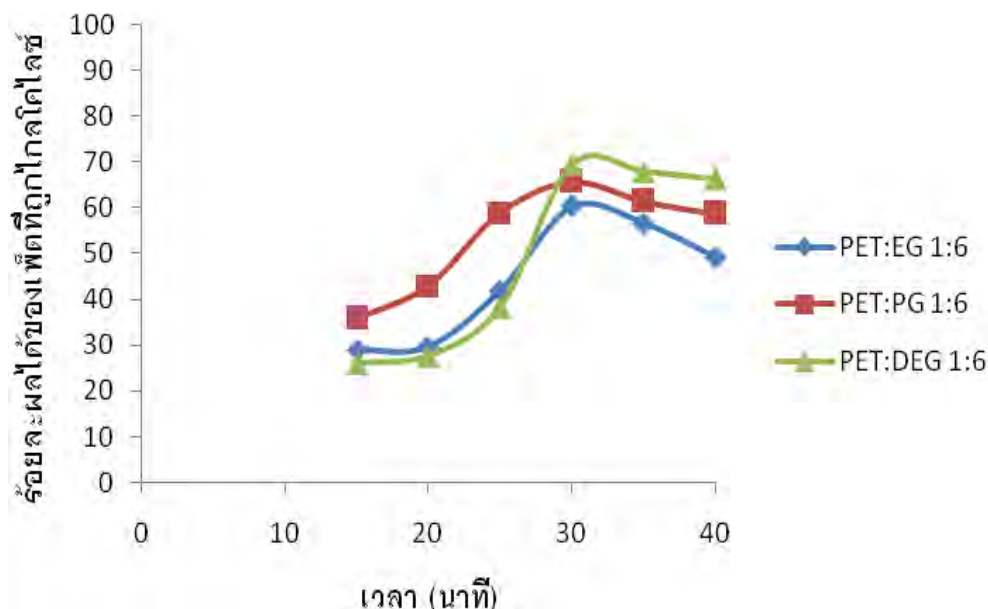
##### 4.1.1 ร้อยละผลได้ (percentage yield) ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของชนิดไกลคอลต่อปฏิกิริยาไกลโคไลซิสพีตโดยดำเนินปฏิกิริยาการย่อยสลายที่เวลาต่างๆ ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ 600 วัตต์ ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 – 4.3



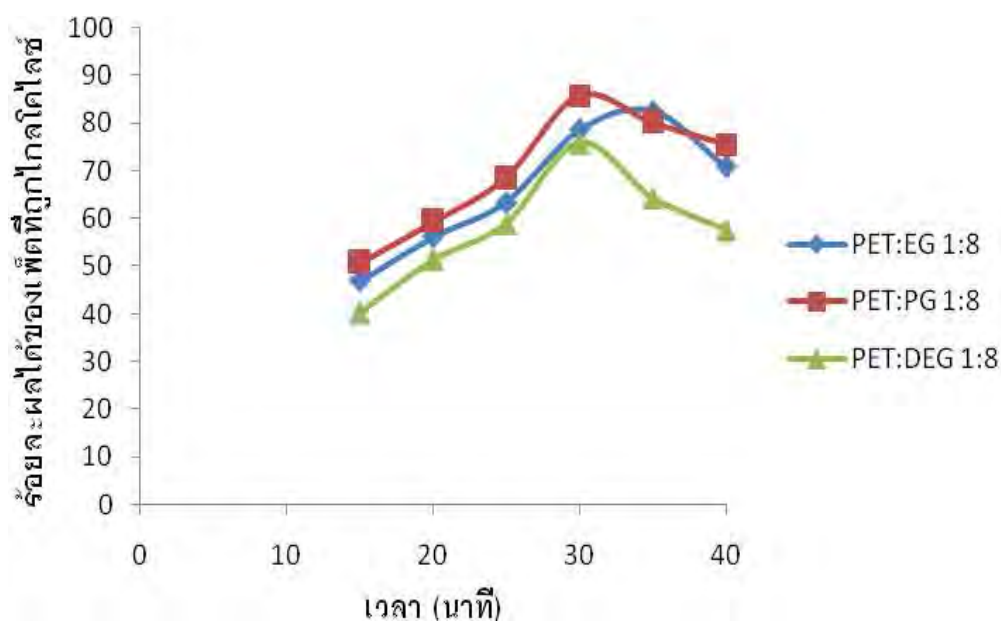
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาเมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อไกลคอลเท่ากับ 1:4

จากรูปที่ 4.1 พบว่าร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อไกลคอลลเท่ากับ 1:4 ไกลคอลลทั้งสามชนิดจะให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุดที่เวลา 30 นาที โพรพิลีนไกลคอลลให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุด คือ ร้อยละ 61.52 รองลงมาคือเอทิลีนไกลคอลล ร้อยละ 55.77 และไดเอทิลีนไกลคอลล ร้อยละ 50.94 ตามลำดับ



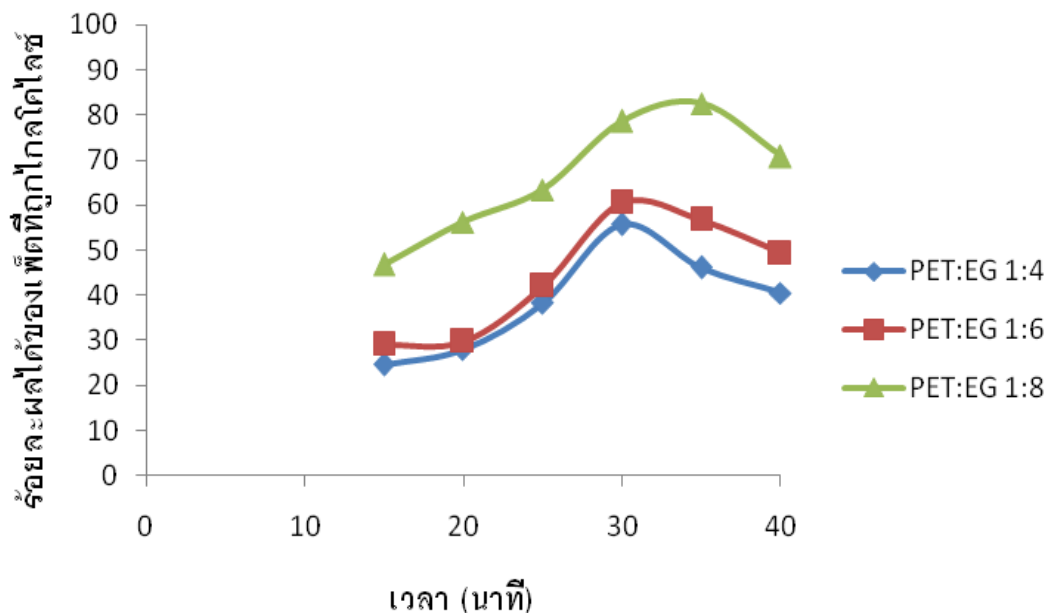
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาเมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อไกลคอลลเท่ากับ 1:6

จากรูปที่ 4.2 พบว่าร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อไกลคอลลเท่ากับ 1:6 ไกลคอลลทั้งสามชนิดจะให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุดที่เวลา 30 นาที ไดเอทิลีนไกลคอลลให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุด คือ ร้อยละ 69.56 รองลงมาคือโพรพิลีนไกลคอลล ร้อยละ 65.73 และเอทิลีนไกลคอลล ร้อยละ 60.39 ตามลำดับ

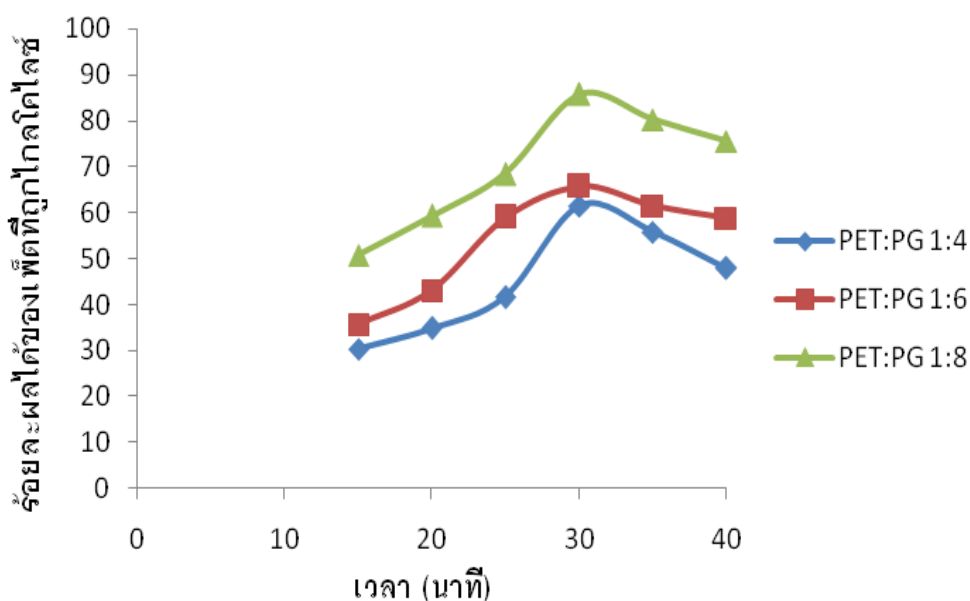


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีทีอีที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาเมื่ออัตราส่วนระหว่างพีทีอีต่อไกลคอลเท่ากับ 1:8

จากรูปที่ 4.3 พบว่าร้อยละผลได้ของพีทีอีที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีทีอีต่อไกลคอลเท่ากับ 1:8 โพรพิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอลจะให้ร้อยละผลได้ของพีทีอีที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุดที่เวลา 30 นาที คือ ร้อยละ 85.82 และ 75.83 ตามลำดับ ไดเอทิลีนไกลคอลเอทิลีนไกลคอล ให้ร้อยละผลได้ของพีทีอีที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุดที่เวลา 35 นาที คือ ร้อยละ 82.54



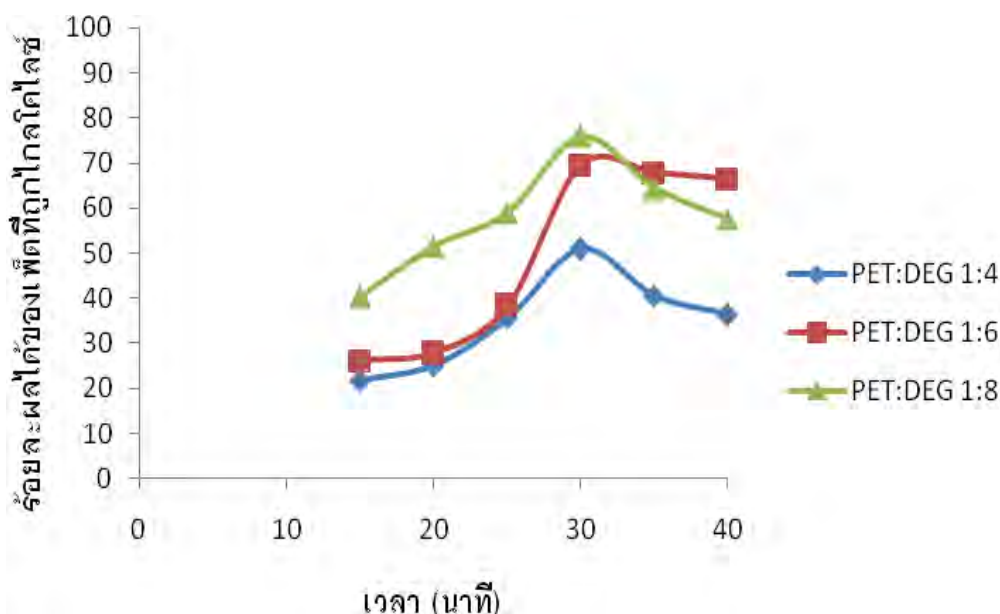
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีดีทีถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาเมื่ออัตราส่วนระหว่างพีดีต่อเอทิลีนไกลคอลต่างๆ กัน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีดีทีถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาเมื่ออัตราส่วนระหว่างพีดีต่อโพรพิลีนไกลคอลต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของพีดีทีถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีดีต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:4 1:6 และ 1:8 ทุกอัตราส่วนจะให้ร้อยละผลได้ของพีดีทีถูกไกลโคไลซ์มาก

ที่สุดที่เวลา 30 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:8 ให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุด คือ ร้อยละ 85.82 รองลงมาคือที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:6 และ 1:4 ซึ่งมีร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์เท่ากับ 65.73 และ 61.52 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาเมื่ออัตราส่วนระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอลต่างๆ กัน

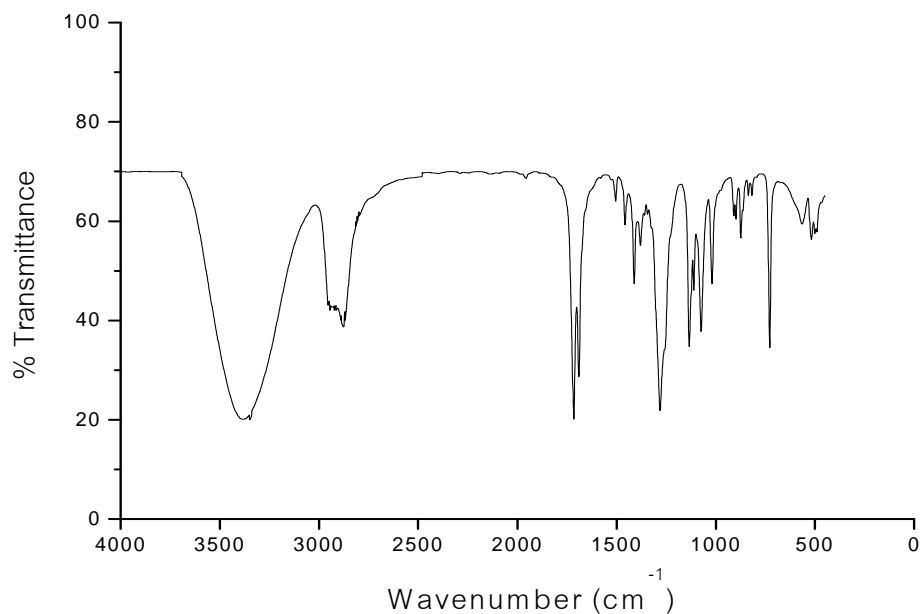
จากรูปที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:4, 1:6 และ 1:8 ทุกอัตราส่วนจะให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุดที่เวลา 30 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:8 ให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุด คือ ร้อยละ 85.82 รองลงมาคือที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:6 และ 1:4 ซึ่งมีร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์เท่ากับ 69.56 และ 50.94 ตามลำดับ

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของไกลคอลต่อปฏิกิริยาไกลโคไลซิสพีตโดยดำเนินปฏิกิริยาการย่อยสลายที่เวลาต่างๆ ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ 600 วัตต์ ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 – 4.6 ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:4 1:6 และ 1:8 ทุกอัตราส่วนจะให้ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์มากที่สุดที่เวลา 30-35 นาที หลังจากนั้นร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์จะลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีพอลิเมอไรเซชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อโพรพิลีนไกลคอล

ทีลินไกลคอล 1:8 ให้อายุขัยผลได้ของพีตที่ถูกละลายโคไลซ์มากที่สุด รองลงมาคือที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อไกลคอล 1:6 และ 1:4 จะเห็นได้ว่าการทำปฏิกิริยาด้วยไมโครเวฟทำให้ลดระยะเวลาในการย่อยสลายขบวนการให้ความร้อนปกติ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4-8 ชั่วโมง [8] เนื่องจากวัสดุจะดูดซับพลังงานไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นโดยตรงที่วัสดุส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินได้เร็วขึ้น [15]

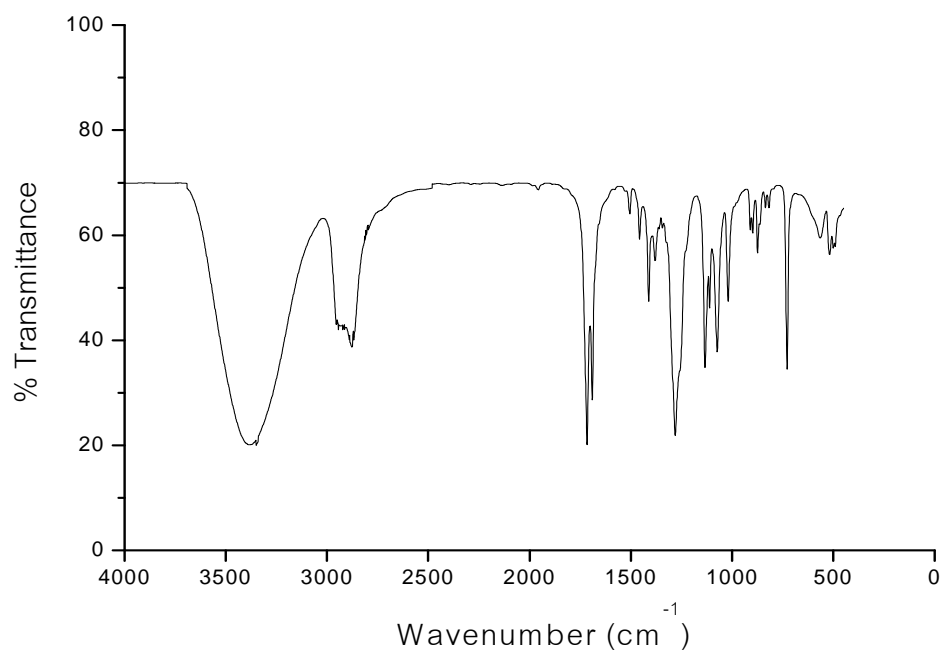
#### 4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของพีตที่ถูกละลายโคไลซ์

ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของของพีตที่ถูกละลายโคไลซ์ไกลคอล 3 ชนิดโดยเลือกไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่มีอายุขัยผลได้สูงที่สุดมาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.7- 4.15 โดยตารางที่ 4.1 แสดงค่าเลขคลื่น (Wave number) กับหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง

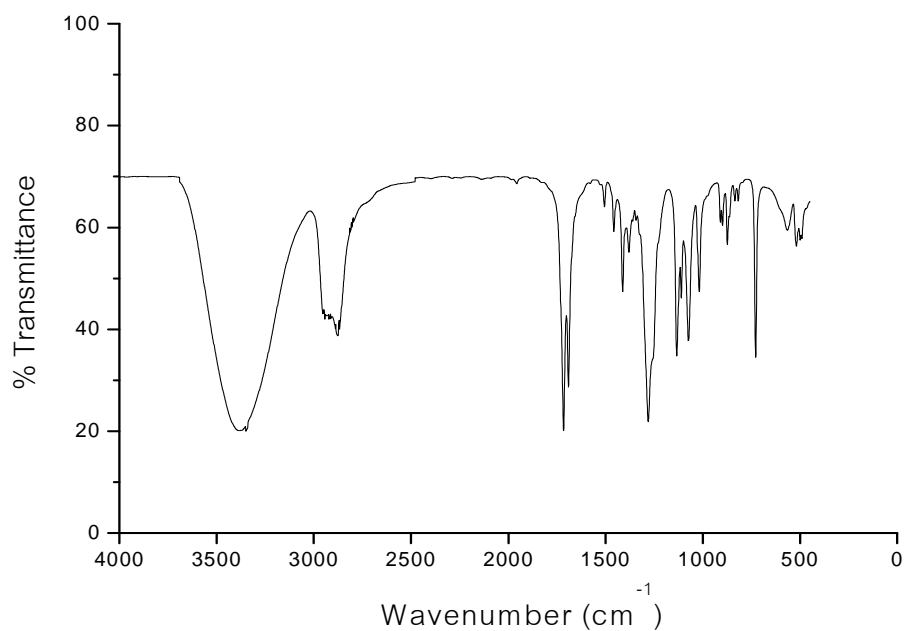


รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกละลายโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อเอทีลินไกลคอลเท่ากับ 1:4

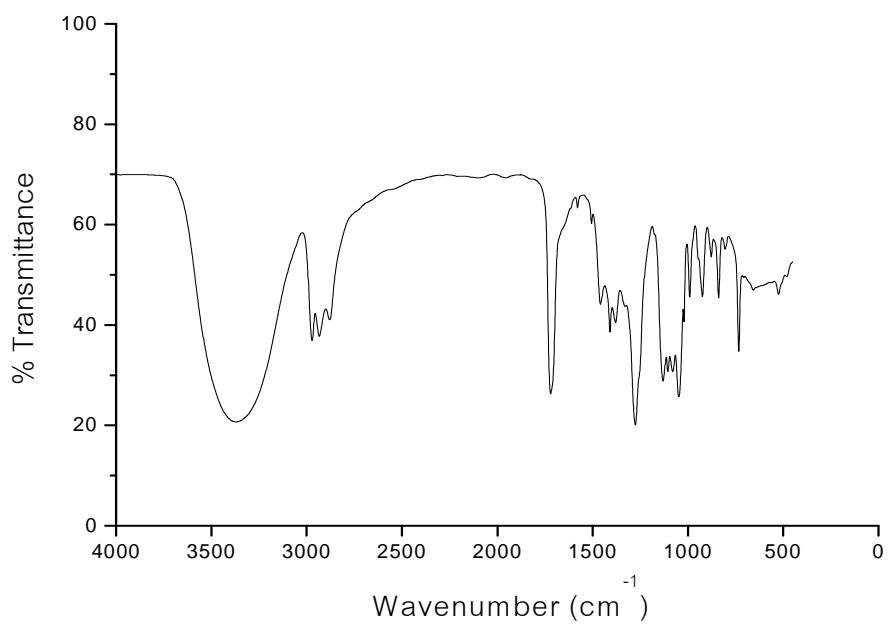




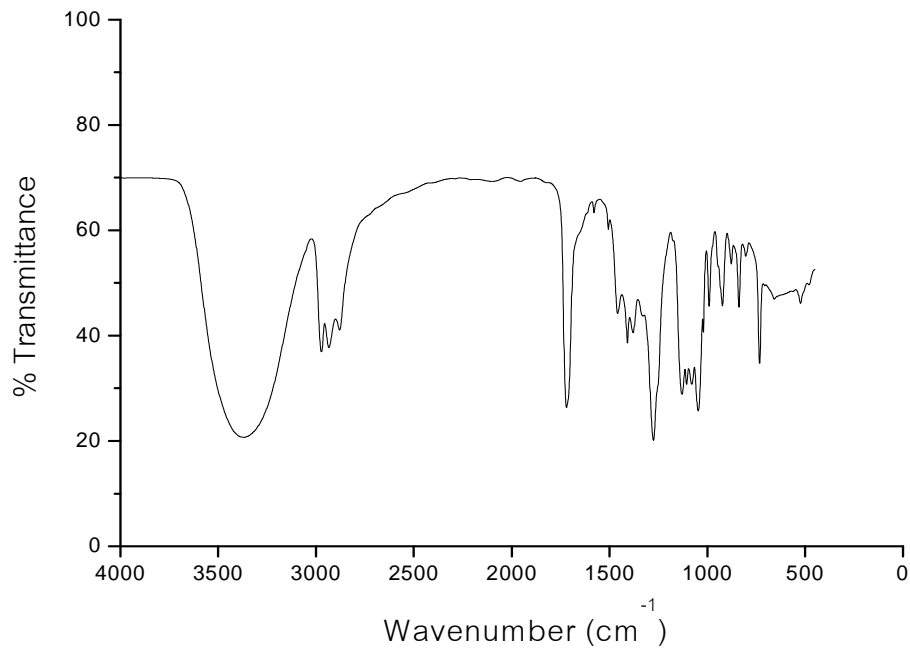
รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกละลายในไซโทลที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6



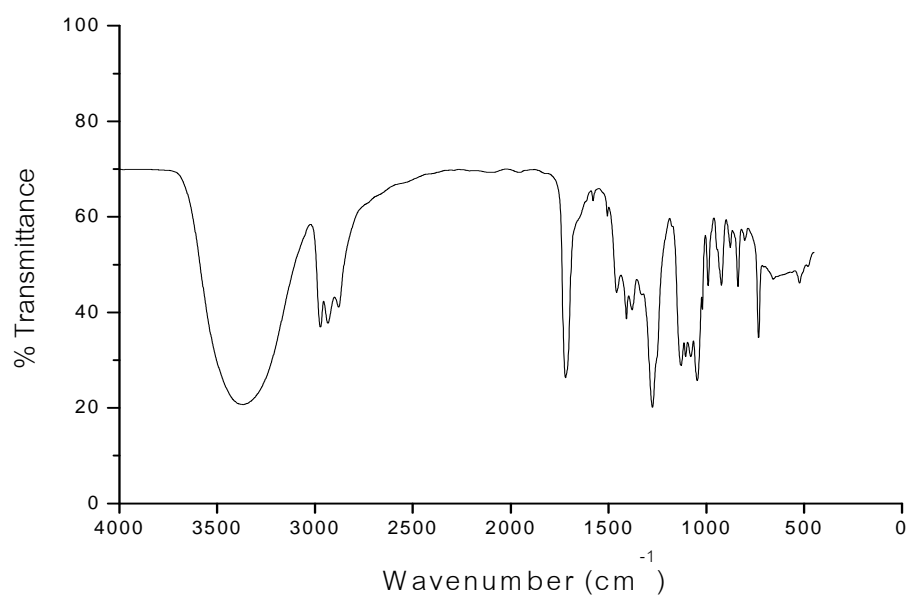
รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกละลายในไซโทลที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:8



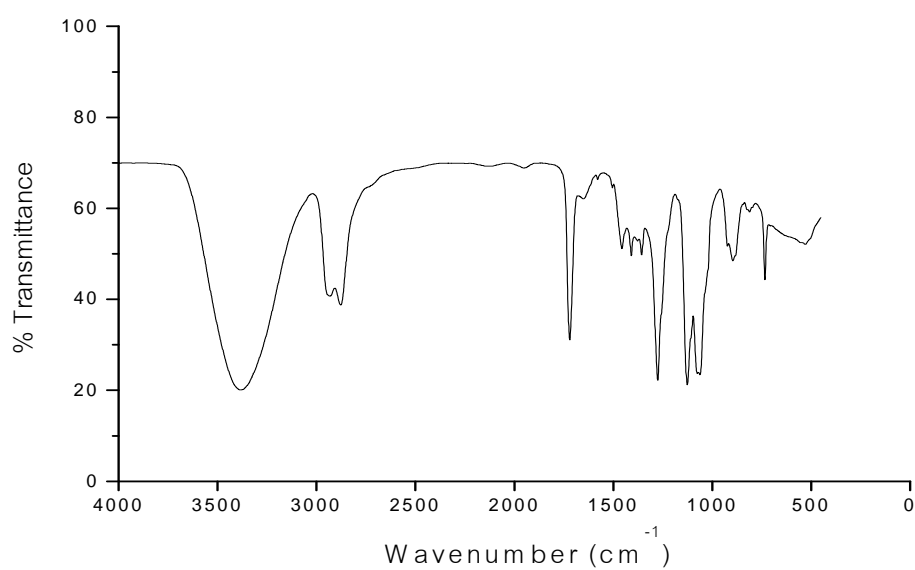
รูปที่ 4.10 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4



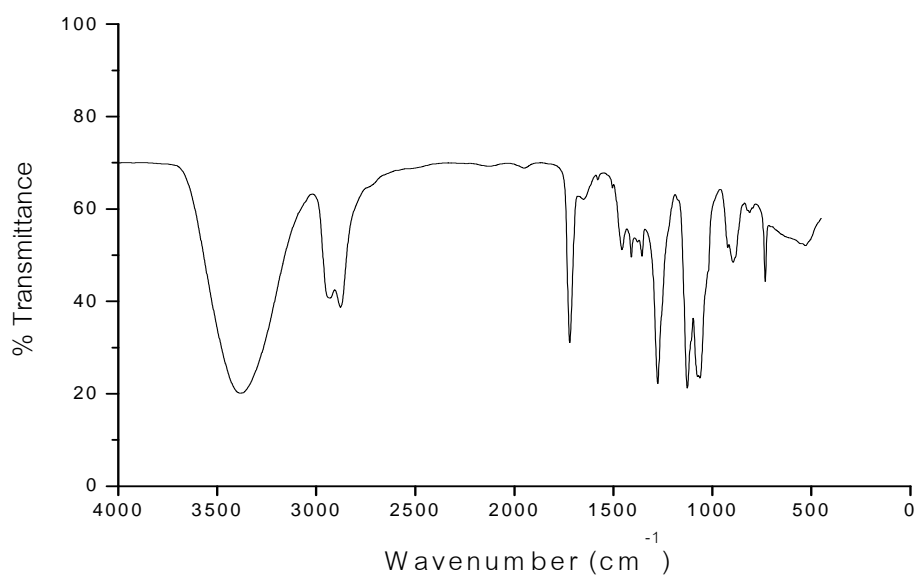
รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6



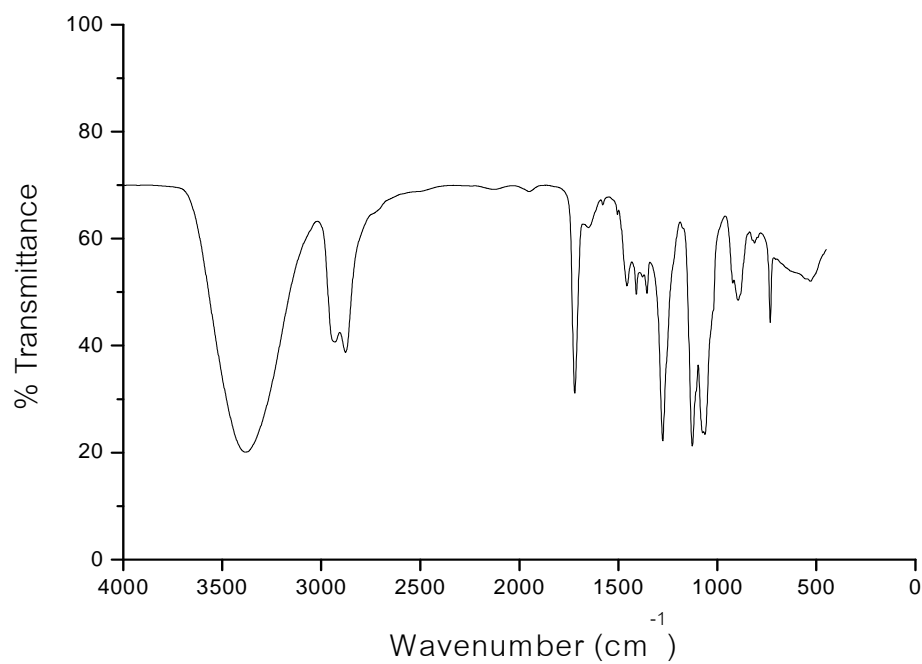
รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ตต่อโพรพิลีน  
ไกลคอลเท่ากับ 1:8



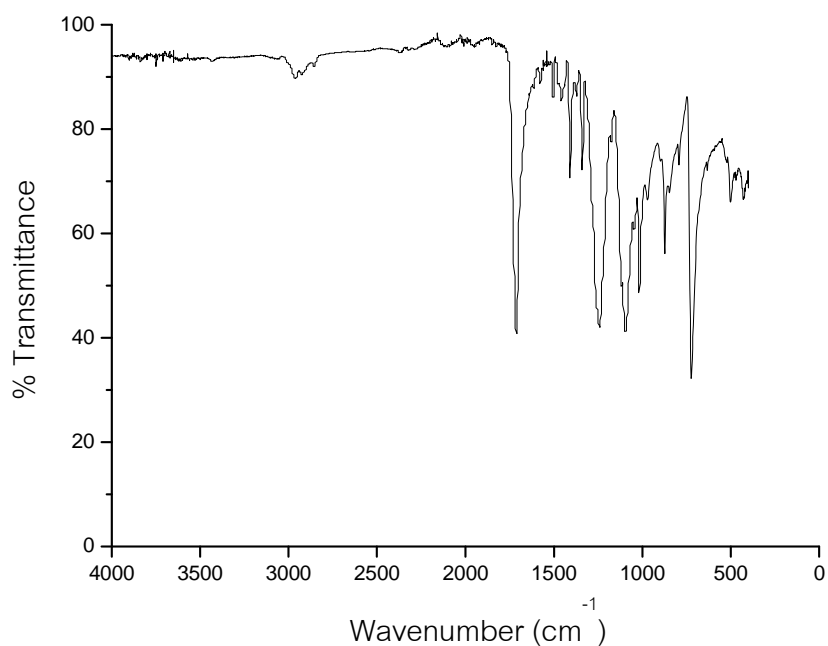
รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ตต่อไดเอทิลีน  
ไกลคอลเท่ากับ 1:4



รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6



รูปที่ 4.15 FT-IR สเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของพีตต่อไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:8



รูปที่ 4.16 FT-IR สเปกตรัมของขวดเพ็ด

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของสเปกตรัมที่พบในโครงสร้างของขวดเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์

ตำแหน่ง (cm <sup>-1</sup> )	หมู่ฟังก์ชัน
3200-3600	หมู่ไฮดรอกซิล, -OH
2800-3000	-CH <sub>2</sub>
1600-1800	หมู่คาร์บอนิล, C=O
1200-1400	-C-O-C-
1000-1100	-C-OH
700-800	อะโรมาติก เอสเทอร์

จากรูปที่ 4.7- รูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.1 พบว่าสเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ในแต่ ละสูตรปรากฏพีคที่ใกล้เคียงกัน คือ พีคของ -OH ที่เลข 3200-3600 cm<sup>-1</sup>, พีคของ -CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub> ที่ เลขคลื่น 2800-3000 cm<sup>-1</sup>, พีคของ C=O ที่เลขคลื่น 1600-1800 cm<sup>-1</sup>, พีคของ -C-O-C- ที่เลข คลื่น 1200-1400 cm<sup>-1</sup>, พีคของ -C-OH ที่เลขคลื่น 1000-1100 cm<sup>-1</sup> และ พีคของอะโรมาติก

เอสเทอร์ ที่เลขคลื่น  $700-800\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชันที่พบในสเปกตรัมสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของ เพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์ โดยพบว่าที่ตำแหน่งประมาณ  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่พบ สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันแบบไฮดรอกซิล ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายผลิตภัณฑ์ จากขวดเพ็ตด้วยไกลคอลแต่ละชนิดจะแสดงแถบดูดกลืนที่ต่างกัน เนื่องจากโมเลกุลของเพ็ตถูกตัด ขาดเป็นสายโซ่สั้นๆ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ส่วนปลายของโมเลกุล สายโซ่โมเลกุลยิ่งสั้นปริมาณของ หมู่ไฮดรอกซิลก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์กับ สเปกตรัมของขวดเพ็ตในรูปที่ 4.16 พบว่าพีคของสเปกตรัมของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์จะปรากฏพีค ของหมู่ ไฮดรอกซิล เนื่องจากเพ็ตได้ถูกย่อยสลายด้วยไกลคอล

#### 4.1.3 สมบัติทางความร้อนของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ผลการศึกษาอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว ( $T_d$  onset) ของไกลโคไลซ์โพรดักส์โดยใช้ไกลคอล 3 ชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.2

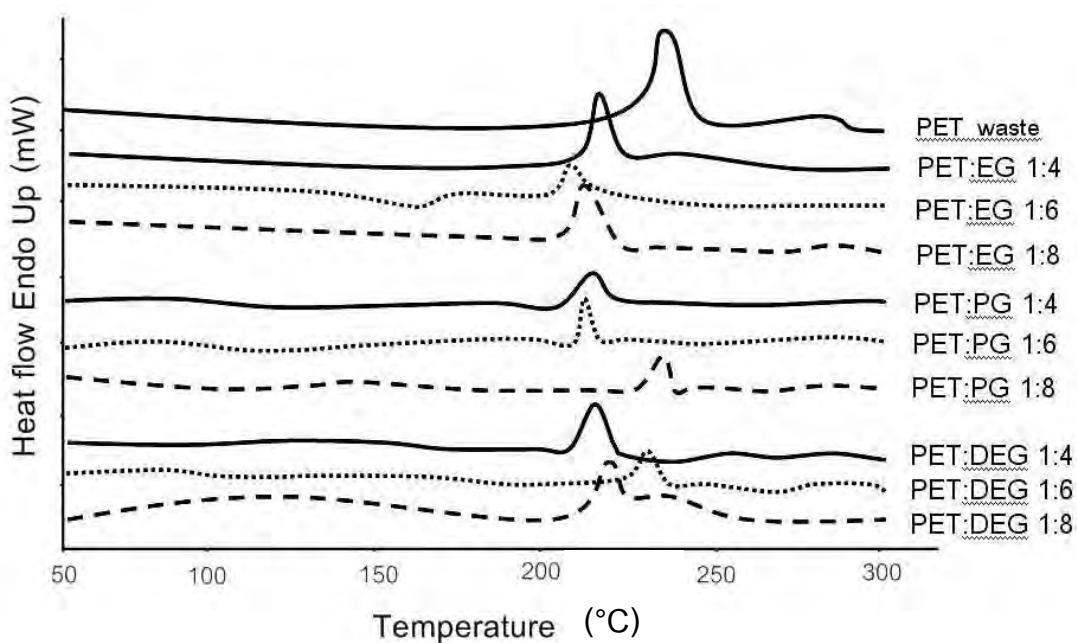
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของไกลโคไลซ์โพรดักส์จากขวดเพ็ต

ไกลโคไลซ์โพรดักส์	$T_d$ (onset) ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_d$ (endset) ( $^{\circ}\text{C}$ )
PET : EG 1:4	289.28	352.81
PET : EG 1:6	307.14	369.47
PET : EG 1:8	271.63	335.48
PET : PG 1:4	363.94	427.38
PET : PG 1:6	342.07	391.74
PET : PG 1:8	298.27	365.29
PET : DEG 1:4	255.78	327.83
PET : DEG 1:6	232.45	285.17
PET : DEG 1:8	228.53	274.51

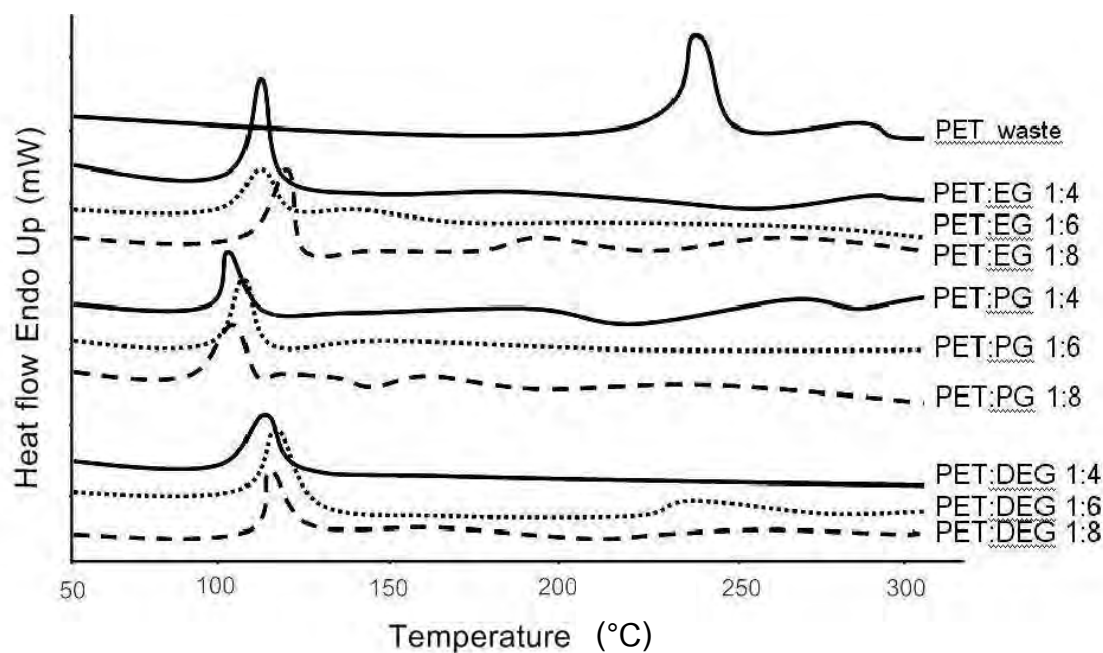
จากกราฟที่ พบว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่อัตราส่วนต่างๆ เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 229-364 องศาเซลเซียส ซึ่งไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ย่อยสลายด้วยโพรพิลีนไกลคอลมีอุณหภูมิ สลายตัวสูงสุด รองลงมาคือ เอทิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอลตามลำดับ เนื่องจากเอทิลีน ไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอลมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการตัดสายโซ่ได้

ดีกว่าจึงส่งผลให้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ย่อยสลายด้วยเอทิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอลมีคุณสมบัติการสลายตัวต่ำกว่าไกลคอลที่ย่อยสลายด้วยโพรพิลีนไกลคอล และเมื่อปริมาณไกลคอลเพิ่มขึ้นคุณสมบัติสลายตัวจะลดลงเนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณไกลคอลสูงขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของไกลโคไลซ์โพรดักส์มีค่าลดลง

เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ไปตกตะกอนจะได้ผลิตภัณฑ์สองส่วนคือส่วนที่ไม่ผ่านกระดาษกรอง (Fraction A) และส่วนที่ผ่านกระดาษกรอง จากนั้นนำส่วนที่ผ่านกระดาษกรองไปตกตะกอนต่อได้และกรองอีกครั้ง (Fraction B) นำผลิตภัณฑ์ทั้งสองส่วนไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC เพื่อหา  $T_m$  ของผลิตภัณฑ์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 DSC เทอร์โมแกรมของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ต Fraction A  
เปรียบเทียบกับขวดเพ็ตใช้แล้ว



รูปที่ 4.18 DSC เทอร์โมแกรมของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ต Fraction B  
เปรียบเทียบกับขวดเพ็ตใช้แล้ว

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวของไกลโคไลซ์จากขวดเพ็ต

ไกลโคไลซ์โปรดักส์	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	
	Fraction A	Fraction B
PET : EG 1:4	218	124
PET : EG 1:6	211	126
PET : EG 1:8	214	135
PET : PG 1:4	219	112
PET : PG 1:6	215	115
PET : PG 1:8	243	113
PET : DEG 1:4	217	129
PET : DEG 1:6	237	134
PET : DEG 1:8	225	131



จากรูปที่ 4.17-4.18 และตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) ของขดเพ็ตที่ใช้แล้วเท่ากับ 234 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์จากขดเพ็ต Fraction B มีอุณหภูมิหลอมเหลว อยู่ระหว่าง 112-135 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ BHET ทางการค้า [16] และผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์จากขดเพ็ต Fraction A มีอุณหภูมิหลอมเหลว อยู่ระหว่าง 211-243 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขดเพ็ตที่ใช้แล้ว แสดงว่า Fraction A เป็นเพ็ตที่ถูกย่อยสลายบางส่วน แต่ยังคงมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า Fraction B กล่าวคืออาจเป็นไดเมอร์ ไตรเมอร์ หรือ โอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ามอนอเมอร์

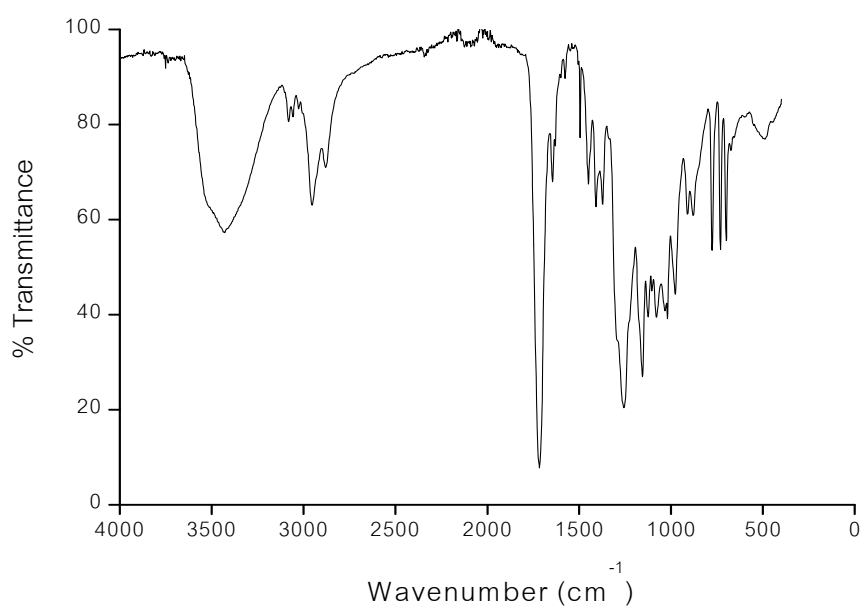
## 4.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์

### 4.2.1 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

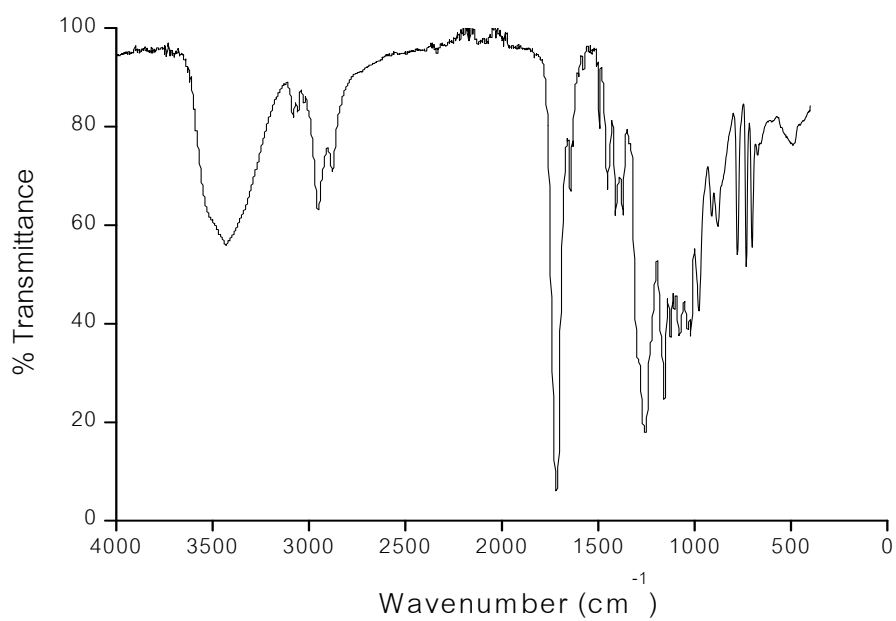
จากการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินโดยนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ผสมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และทำปฏิกิริยาภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 600 วัตต์ โดยใช้เวลาดั้งแต่ 10-20 นาที พบว่าที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่ำกว่า 15 นาที พอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้จะแยกชั้นกับสไตรีนมอนอเมอร์ และส่วนที่เวลาการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 15 นาที ผลิตภัณฑ์จะใหม่ ดังนั้นพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินภายใต้พลังงานไมโครเวฟ คือ 15 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ด้วยความร้อนแบบเดิมซึ่งใช้เวลาถึง 24 ชั่วโมง [17] จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการสังเคราะห์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงโดยทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงอย่างมาก

### 4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

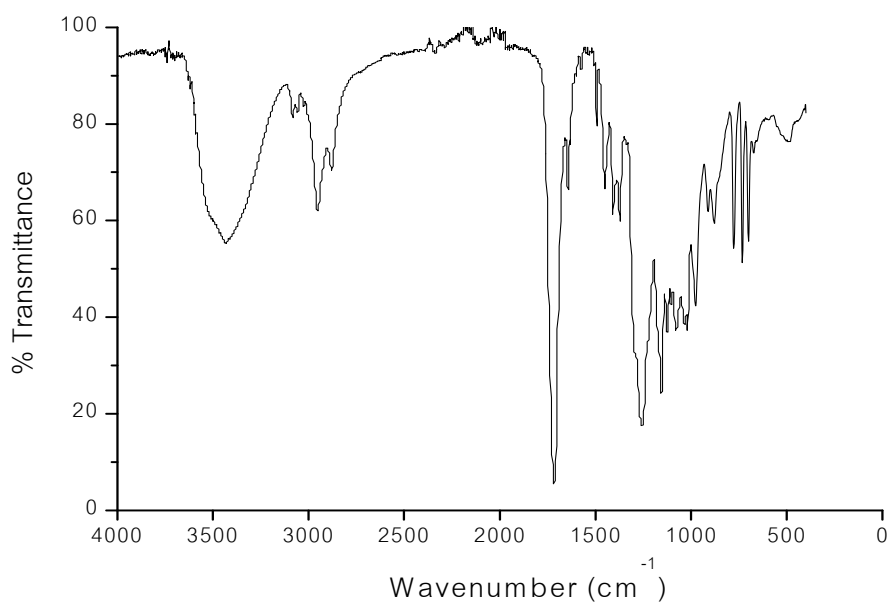
ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิคฟูเรียรทราน-ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีแสดงในรูปที่ 4.19-4.27 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีกที่ปรากฏและหมู่ฟังก์ชันไว้ในตารางที่ 4.4



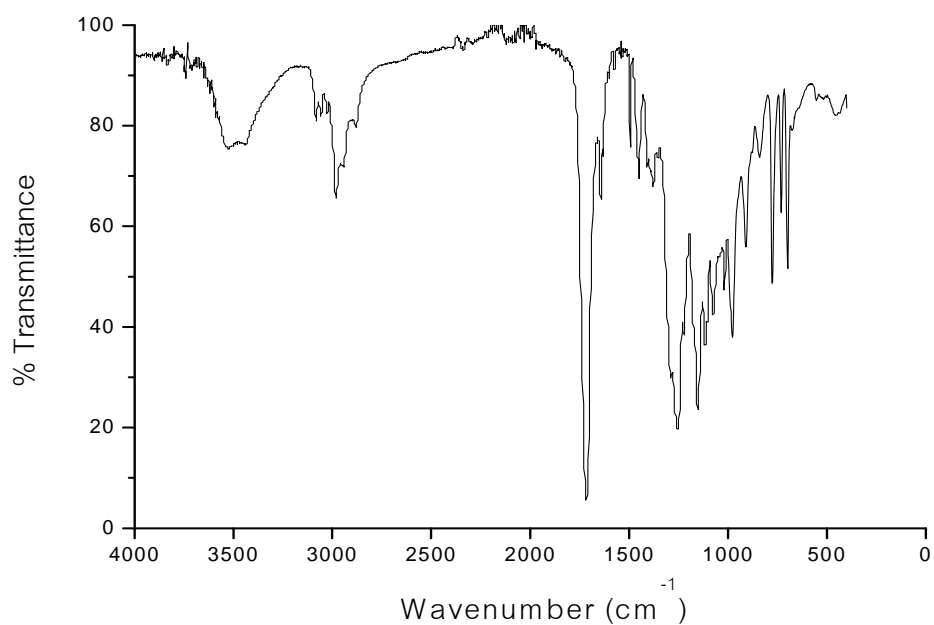
รูปที่ 4.19 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
พีทีที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทีต่อเอทีลินไกลคอลเท่ากับ 1:4



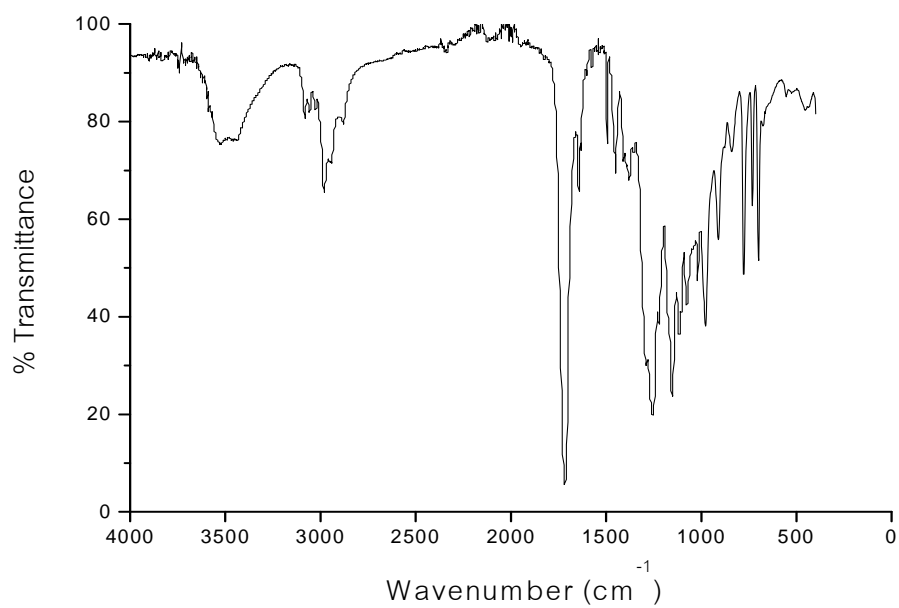
รูปที่ 4.20 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
พีทีที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทีต่อเอทีลินไกลคอลเท่ากับ 1:6



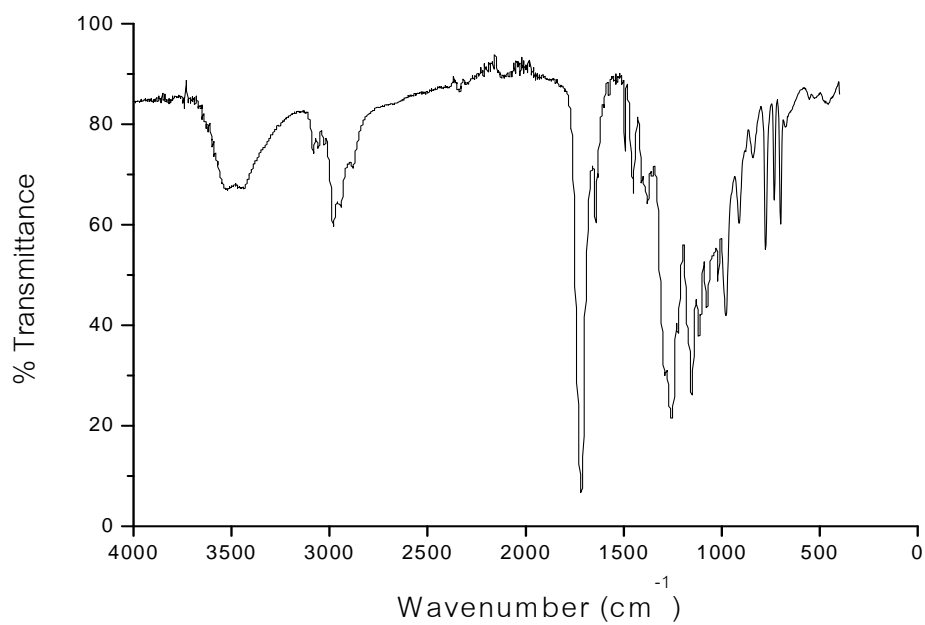
รูปที่ 4.21 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
พีทีที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทีต่อเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:8



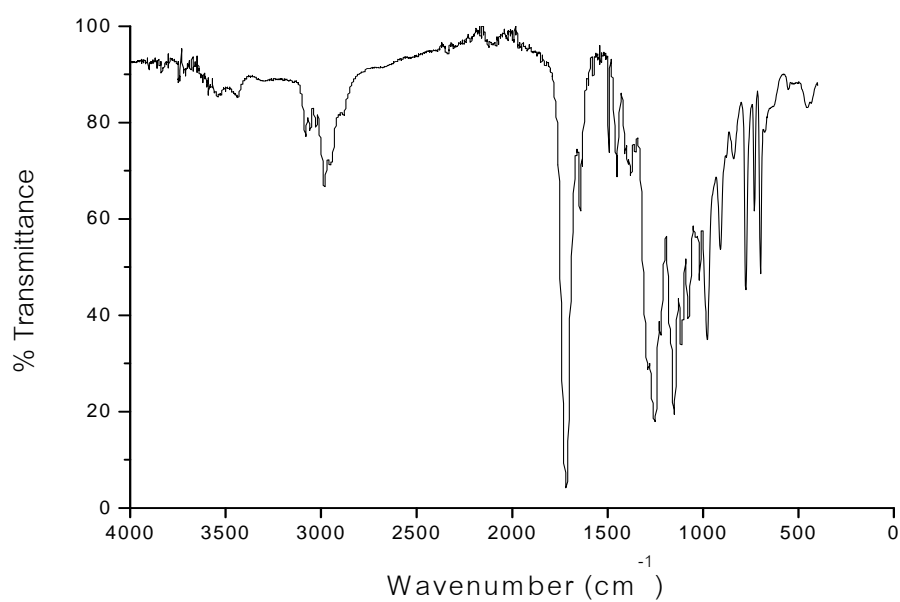
รูปที่ 4.22 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
พีทีที่อัตราส่วนโดยโมลของพีทีต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4



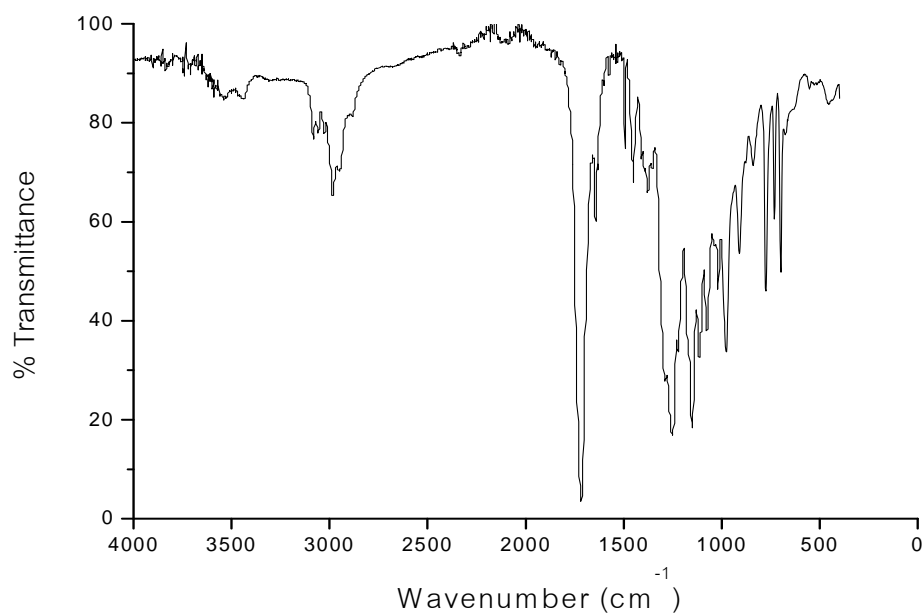
รูปที่ 4.23 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
พีทีอีอัตราส่วนโดยโมลของพีดีเอพีอินไกลคอลเท่ากับ 1:6



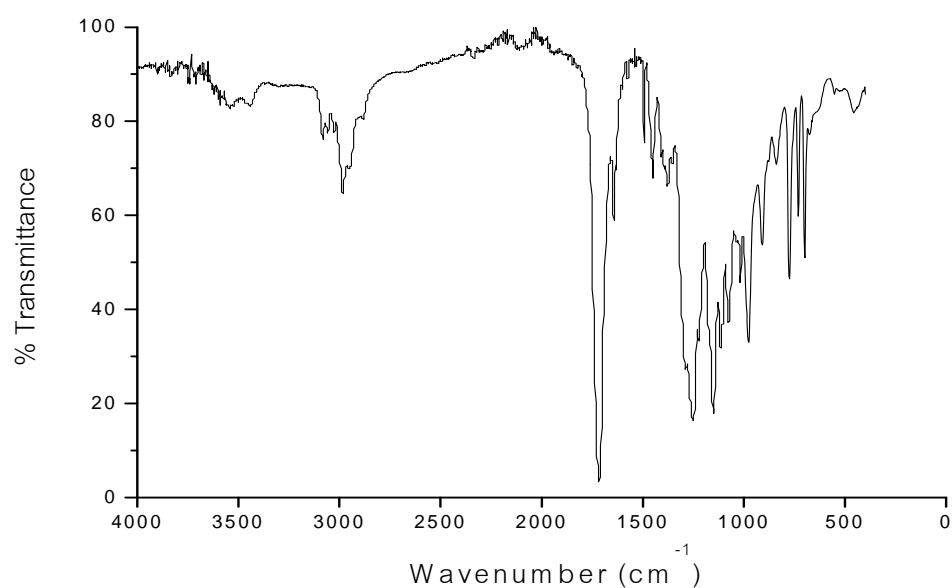
รูปที่ 4.24 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
พีทีอีอัตราส่วนโดยโมลของพีดีเอพีอินไกลคอลเท่ากับ 1:8



รูปที่ 4.25 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
PET ที่อัตราส่วนโดยโมลของ PET ต่อ ไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4



รูปที่ 4.26 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวด  
PET ที่อัตราส่วนโดยโมลของ PET ต่อ ไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6



รูปที่ 4.27 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวด  
เพ็ตที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ตต่อไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:8

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งของสเปกตรัมที่พบในโครงสร้างพอลิเอสเทอร์เรซิน

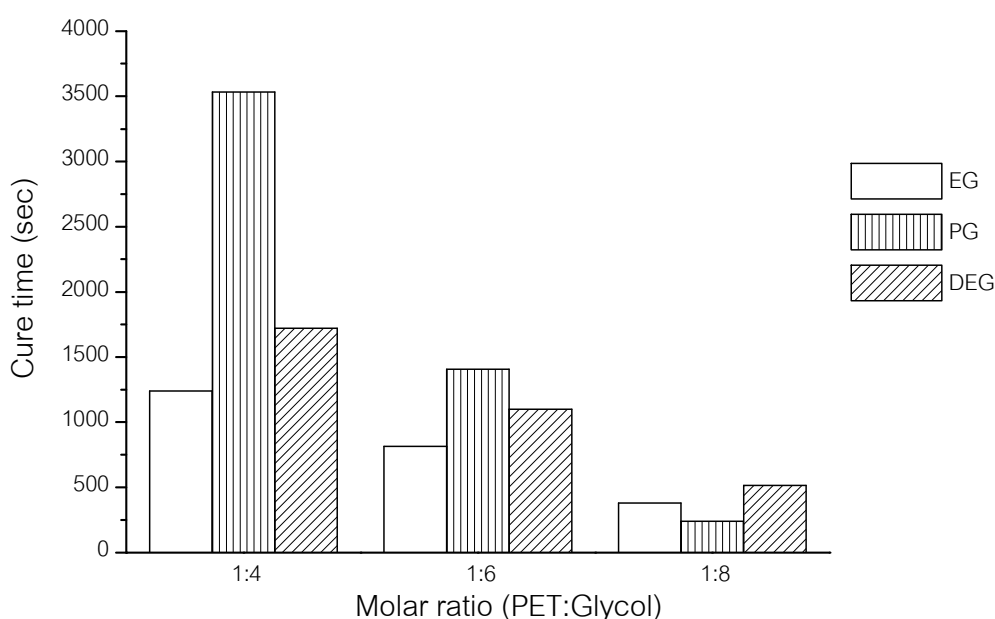
ตำแหน่งพีกที่ปรากฏ (ซม <sup>-1</sup> )	หมู่ฟังก์ชัน
3200-3600	หมู่ไฮดรอกซิล, -OH
2800-3000	-CH <sub>2</sub>
1600-1800	หมู่คาร์บอนิล, C=O
1200-1400	-C-O-C-
1000-1100	-C-OH
690-980	พันธะไม่อิ่มตัว, -CH=CH-
700-800	อะโรมาติก เอสเทอร์

จากรูปที่ 4.19-4.27 และตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า หมู่ฟังก์ชันที่พบในสเปกตรัมสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19-4.27 พบว่า สเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในแต่ละสูตรปรากฏพีกที่ใกล้เคียงกัน คือ พีกของ -OH ที่เลข 3200-3600 cm<sup>-1</sup>, พีกของ -CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub> ที่เลขคลื่น 2800-3000 cm<sup>-1</sup>, พีกของ C=O ที่เลขคลื่น 1600-1800 cm<sup>-1</sup>, พีกของ -C-O-C- ที่เลขคลื่น 1200-1400 cm<sup>-1</sup>, พีกของ -C-OH ที่เลขคลื่น 1000-1100 cm<sup>-1</sup>, พีกของ -CH=CH- ที่เลขคลื่น 690-980 cm<sup>-1</sup> และ พีกของอะโรมาติกเอสเทอร์ ที่เลขคลื่น 700-800 cm<sup>-1</sup> และเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของพอลิเอสเทอร์กับเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์

ในรูปที่ 4.7-4.15 พบว่าพอลิเอสเทอร์จะมีพีคของหมู่ไฮดรอกซิลน้อยกว่าพีคที่ถูกไกลโคไลซ์ เนื่องจากไกลโคไลซ์โปรดักส์ของพีตได้ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์จึงส่งผลให้พอลิเอสเทอร์ปรากฏพีคของหมู่ไฮดรอกซิลน้อยลง

#### 4.2.3 เวลาบ่ม (cure time)

ผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว หรือเวลาบ่มด้วยเครื่องโรเทชันแนลรีโอมิเตอร์ (rotational rheometer) แสดงไว้ในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 เวลาบ่มของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

จากรูปที่ 4.28 เมื่อปริมาณไกลคอลเพิ่มขึ้นพบว่าเวลาบ่มของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจะลดลงเนื่องจากในขั้นตอนการไกลโคไลซิสเมื่อปริมาณไกลคอลมากสามารถตัดสายโซ่โมเลกุลได้ดีส่งผลให้มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าสูตรที่มีปริมาณไกลคอลน้อย จึงทำให้ไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่ได้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดี นอกจากนั้นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โปรดักส์ของพีตโดยใช้โพรพิลีนไกลคอลจะใช้เวลาในการแข็งตัวนานกว่าพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โปรดักส์ของพีตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่ย่อยสลายด้วยโพรพิลีนไกลคอลมีสายโซ่โมเลกุลยาวกว่าไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่ย่อยสลายด้วยเอทิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอล ดังนั้นไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่ย่อยสลายด้วยโพรพิลีนไกลคอลมีหมู่ฟังก์ชันที่จะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

น้อยกว่าส่งผลให้ใช้เวลาบ่มนานกว่าพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากไกลโคไลซ์โพรด์กซ์ของพีตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลลและไดเอทิลีนไกลคอลล

#### 4.3 สมบัติของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซิน

##### 4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน

ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์ที่ผ่านการบ่ม แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์

พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	$T_{d (onset)}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{d (endset)}$ ( $^{\circ}C$ )
PET : EG 1:4	352.67	421.30
PET : EG 1:6	361.45	452.27
PET : EG 1:8	373.11	464.91
PET : PG 1:4	326.68	399.10
PET : PG 1:6	342.94	423.18
PET : PG 1:8	354.73	451.36
PET : DEG 1:4	357.63	426.87
PET : DEG 1:6	361.78	447.29
PET : DEG 1:8	376.42	471.06

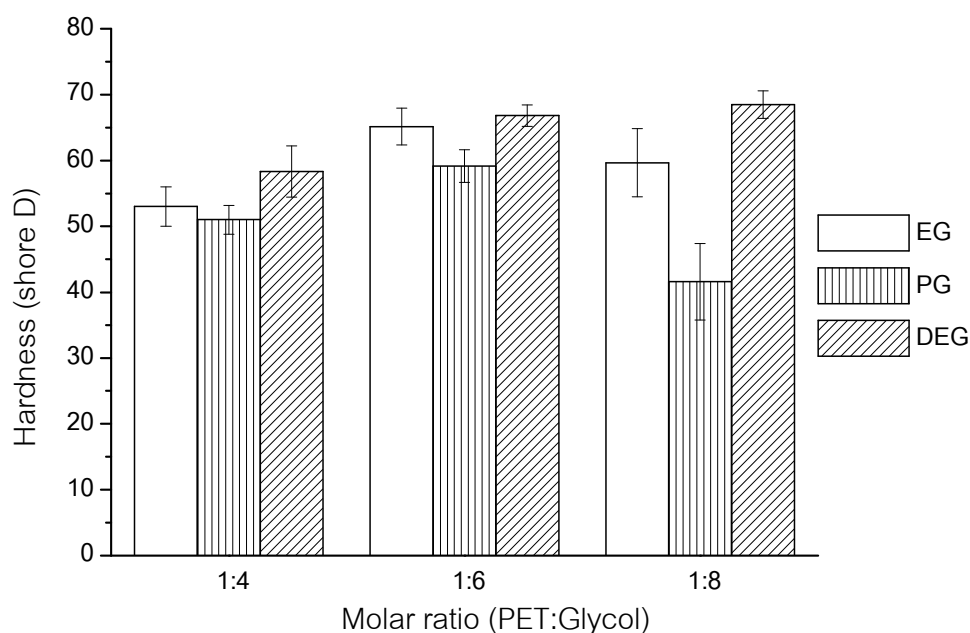
จากรูปที่ 4.29 พบว่าชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรด์กซ์ของพีตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลลมีอุณหภูมิสลายตัวประมาณ 353 – 373 องศาเซลเซียส ชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรด์กซ์ของพีตโดยใช้โพรพิลีนไกลคอลลมีอุณหภูมิสลายตัวประมาณ 327 – 355 องศาเซลเซียส และชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรด์กซ์ของพีตโดยใช้ไดเอทิลีนไกลคอลลมีอุณหภูมิสลายตัวประมาณ 358 – 376 องศาเซลเซียส สังเกตได้ว่าอุณหภูมิสลายตัวมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณไกลคอลลเพิ่มมากขึ้น และพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรด์กซ์ของ



พีตโดยใช้โพรพิลีนไกลคอลมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำสุด เนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลต่ำกว่าพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของพีตโดยใช้เอทิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอล

#### 4.3.2 ความแข็ง

ผลการทดสอบความความแข็งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์จากขวดพีตด้วยไกลคอล 3 ชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิด Shore D แสดงไว้ในรูปที่ 4.30



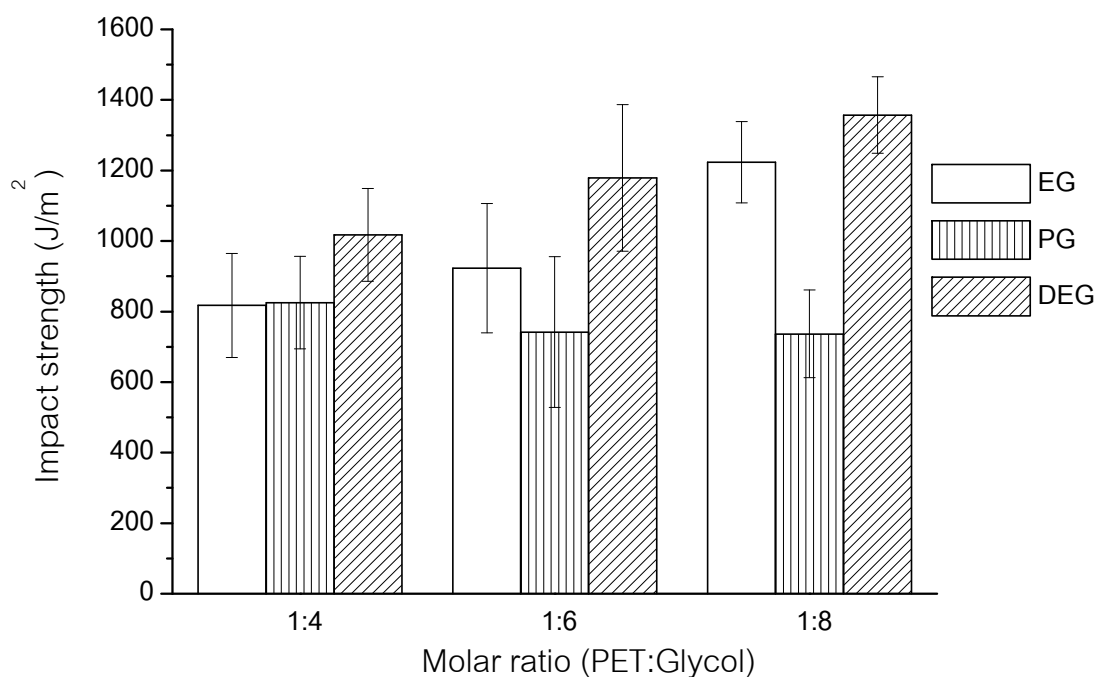
รูปที่ 4.30 ความแข็งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่า ความแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 51-66 เมื่อเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ด้วยระบบการให้ความร้อนปกติซึ่งมีค่าประมาณ 70 [17] จะเห็นว่าพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟจะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย และเมื่อเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินทางการค้าซึ่งมีค่าประมาณ 88 [18] พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าความแข็งน้อยกว่าเนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลน้อยกว่า และเมื่ออัตราส่วนของเอทิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น

ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเอสเตอร์สามารถเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงสูงขึ้น

#### 4.3.3 ความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรตักส์จากขวดเปิดด้วยเครื่อง Impact Testing Machine แสดงไว้ในรูปที่ 4.31



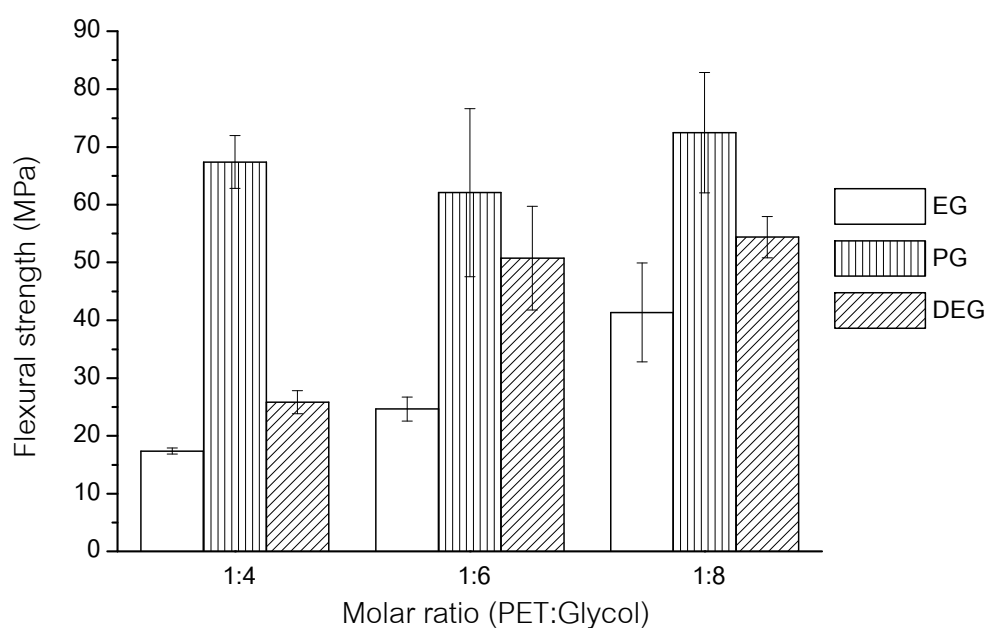
รูปที่ 4.31 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรตักส์

จากรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 736-1357 J/m<sup>2</sup> เมื่อเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ด้วยระบบการให้ความร้อนปกติซึ่งมีค่าประมาณ 580 J/m<sup>2</sup> [14] และเมื่อเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินทางการค้าซึ่งมีค่าประมาณ 710 J/m<sup>2</sup> [18] พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าเนื่องจากไกลโคไลซ์โพรตักส์ที่สังเคราะห์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟจะได้สารโมเลกุลเล็กและเมื่อนำมาสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์จะทำให้ได้พอลิเอสเตอร์เรซินที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอจึงทำให้พอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า และเมื่ออัตราส่วนของเอทิลีนไกลคอลและไดเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความ

ทนแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเอสเตอร์มีการเชื่อมขวางมากขึ้นส่งผลให้มีค่าความแข็งสูงขึ้น

#### 4.3.4 ความทนแรงดัดโค้ง

ผลการทดสอบความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรติกส์จากขวดเปิดด้วยเครื่อง เครื่อง Universal Testing Machine แสดงไว้ในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรติกส์

จากรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวมีค่าตั้งแต่ 17-72 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ด้วยระบบการให้ความร้อนปกติซึ่งมีค่าประมาณ 47 MPa [14] เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินทางการค้ามีค่าประมาณ 70 MPa [18] จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของพอลิเอสเตอร์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรติกส์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟมีค่ามากกว่าพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ด้วยระบบการให้ความร้อนปกติและมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเอสเตอร์เรซินทางการค้า เนื่องจากการย่อยสลายภายใต้พลังงานไมโครเวฟจะทำให้ได้สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่าการย่อยสลายด้วยระบบความร้อนปกติ ดังนั้นเมื่อนำไกลโคไลซ์โพรติกส์มาสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินจึงทำให้มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอส่งผลให้มีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ด้วยระบบความร้อนปกติ และ

เมื่ออัตราส่วนของไกลคอลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติความทนแรงดัดโค้งเกิดจากความสามารถในการรับแรงกดอัดและแรงดึงในขณะเดียวกัน พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่มีอัตราไกลคอลสูงมีความหนาแน่นของจุดเชื่อมขวางมากกว่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดอัดได้ดี

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การย่อยสลายขวดPETที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงกว่าการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสโดยให้ความร้อนแบบเดิม กล่าวคือร้อยละผลได้ของPETที่ถูกละลายภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 600 วัตต์ จะสูงที่สุดเมื่อเวลาประมาณ 30 – 35 และเมื่ออัตราส่วนของไกลคอลในการทำปฏิกิริยามากขึ้นร้อยละผลได้ของPETที่ถูกละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5.1.2 จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและทดสอบสมบัติทางความร้อนของไกลโคไลซ์โพรดักส์ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์PETภายใต้พลังงานไมโครเวฟ ส่วนใหญ่เป็นมอนอเมอร์ แต่อาจมีไดเมอร์ ไตรเมอร์ หรือโอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงปะปนอยู่บ้าง และจากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของไกลโคไลซ์โพรดักส์ พบว่าเมื่อปริมาณไกลคอลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวจะลดลงเนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณไกลคอลสูงขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง ไกลโคไลซ์โพรดักส์จึงมีส่วนประกอบเป็นสารโมเลกุลเล็กมากขึ้น

5.1.3 จากการศึกษ้อัตราการแข็งตัวหรือเวลาบ่มของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว พบว่าอัตราการแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเร็วขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไกลคอลในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสมากขึ้น

5.1.4 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมภายใต้พลังงานไมโครเวฟ พบว่ามีสมบัติเชิงกลดีกว่าชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมโดยให้ความร้อนแบบเดิม และยังพบอีกว่าเมื่ออัตราส่วนของไกลคอลในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสมากขึ้น ส่งผลให้มีความแข็ง ความทนแรงกระแทก และความทนแรงดัดโค้งดีขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 กำลังวัตต์ของไมโครเวฟมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นอาจมีการปรับเปลี่ยนกำลังวัตต์และเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิต

5.2.2 สมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เรซิน ดังนั้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวอาจมีการปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เพื่อให้ได้เรซินที่มีสมบัติตามต้องการ

5.2.3 ปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์มีผลต่อปริมาณการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล และเวลาบ่มของเรซิน ดังนั้นอาจมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์เพื่อให้ได้เรซินที่มีสมบัติตามต้องการ

5.2.4 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ขึ้นมีสมบัติเชิงกลบางประการด้อยกว่าพอลิเอสเทอร์ทางการค้าเล็กน้อย ดังนั้นในการนำไปใช้งานอาจจะต้องพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ผสมกับพอลิเอสเทอร์บริสุทธิ์เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น หรือปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์โดยการใช้กรดอิมตัว ได้แก่ กรดแอดิพิค และกรดซัคซินิก แทนกรดไม่อิ่มตัว

## รายการอ้างอิง

- [1] Lawrence, J.R. Polyester resins. New York : Van Nostrand Reinhold, 1960.
- [2] ปรีชา พหลเทพ. โพลีเอสเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2536.
- [3] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. เคมีโพลีเอสเตอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2527.
- [4] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาการรีไซเคิลพลาสติก. กรุงเทพฯ: ภาควิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [5] เฉษฐา ชัยจิรนนท์. เอกสารข้อมูลทางเทคนิค. กรุงเทพฯ: สยามเคมีคอล อินดัสตรี, 2526.
- [6] Scheirs, J., and Kaminsky, W. Feedstock recycling of PET. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. United Kingdom : John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [7] Karayannidis, G.P., and Achilias, D.S. Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). Macromolecular Materials and Engineering 2 (February 2007): 128–146.
- [8] Vaidya, U.R., and Nadkarni, V.M. Unsaturated polyesters from PET waste : 3. Kinetics of polycondensation. Journal of Applied Polymer Science 9 ( March 2003): 235-245.
- [9] 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 15 (August 1988): 2071 - 2082.
- [10] Pardal, F., and Tersac, G. Comparative reactivity of glycols in PET Glycolysis. Polymer Degradation and Stability 25 (May 2006): 2567-2578.
- [11] Vaidya, U.R., and Nadkarni, V.M. Unsaturated polyesters from PET waste : 1. Synthesis and characterization. Industrial & Engineering Chemistry Research 8 (April 2004): 194-198.
- [12] Fujita, A., Sato M., and Murakami, M. Process for the depolymerization of polyester scrap. U.S. Patent 4,609,680.
- [13] Potiyaraj, P., Klubdee, K., and Limpiti, T. Physical properties of unsaturated polyester resin from glycolyzed PET fabrics. Journal of Applied Polymer Science 11 (November 2006): 2536 – 2541.

- [14] Puangsansuk, K., Opaprakasit, M., Udomkichdecha, W., and Potiyaraj, P. Effects of saturated Acids on physical properties of UPE resins prepared from recycled PET products. Journal of Polymers and the Environment 26 (August 2009): 65-70.
- [15] Thostenson, E.T., and Chou, T.W. Microwave processing: fundamentals and applications. Composites 22 (February 1999): 1055-1071.
- [16] Pingale, N.D., and Shukla, S.R. Microwave assisted ecofriendly recycling of poly (ethylene terephthalate) bottle waste. European Polymer Journal 26 (September 2008): 4151-4156.
- [17] Limpiti, T., and Potiyaraj, P. Mechanical property improvement of UPE resin from glycolyzed PET with commercial UPE resin. Journal of Metals, Materials and Minerals 15 (May 2009): 45-51.



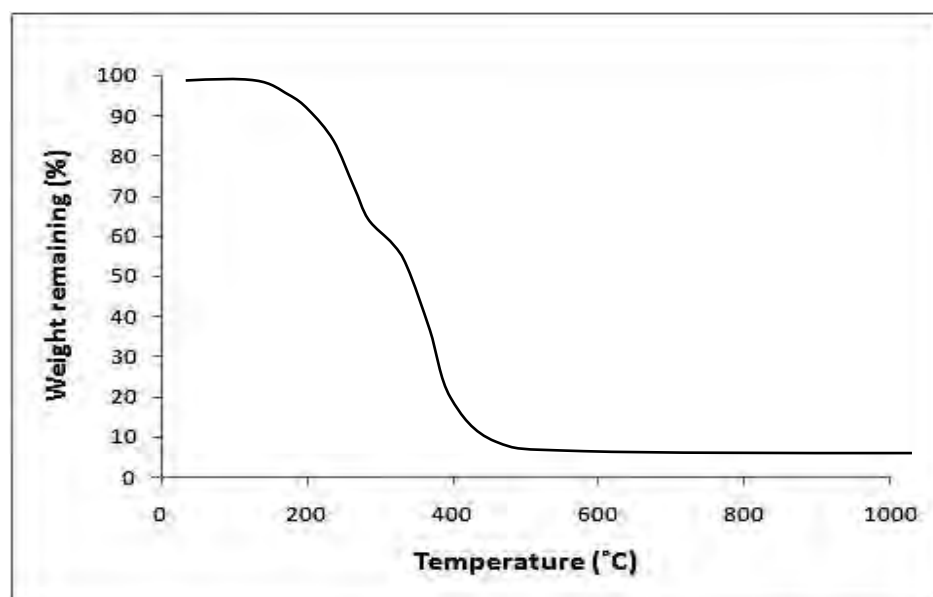
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

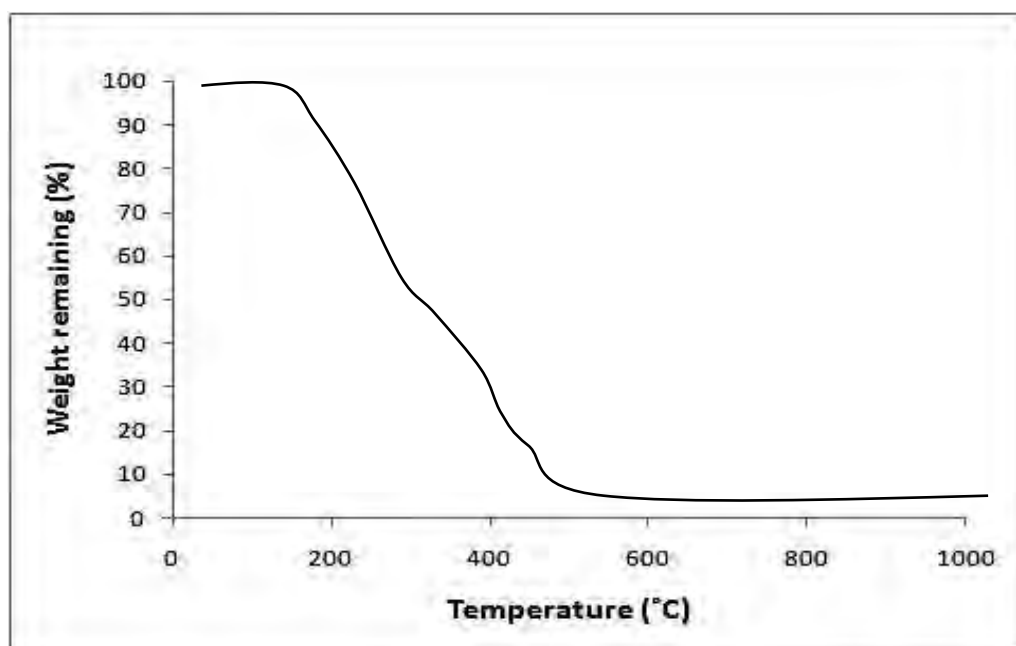
ตารางที่ ก-1 ร้อยละของน้ำหนักที่ได้ของไกลโคไลซ์โพรตักส์ที่เวลาต่างๆ

วัสดุ เวลา(นาที)	ร้อยละของน้ำหนักที่ได้ของไกลโคไลซ์โพรตักส์					
	15	20	25	30	35	40
PET-EG 1:4	24.53	27.96	38.25	55.77	46.11	40.48
PET-EG 1:6	28.96	29.67	41.97	60.39	56.64	49.28
PET-EG 1:8	46.86	56.23	63.44	78.57	82.54	70.82
PET-PG 1:4	30.31	34.8	41.63	61.52	55.74	47.97
PET-PG 1:6	35.76	43.04	58.91	65.73	61.43	58.82
PET-PG 1:8	50.78	59.32	68.44	85.82	80.19	75.54
PET-DEG 1:4	21.73	25.12	35.5	50.94	40.48	36.31
PET-DEG 1:6	26.09	27.75	38.32	69.56	67.87	66.42
PET-DEG 1:8	40.3	51.41	58.96	75.83	64.32	57.61

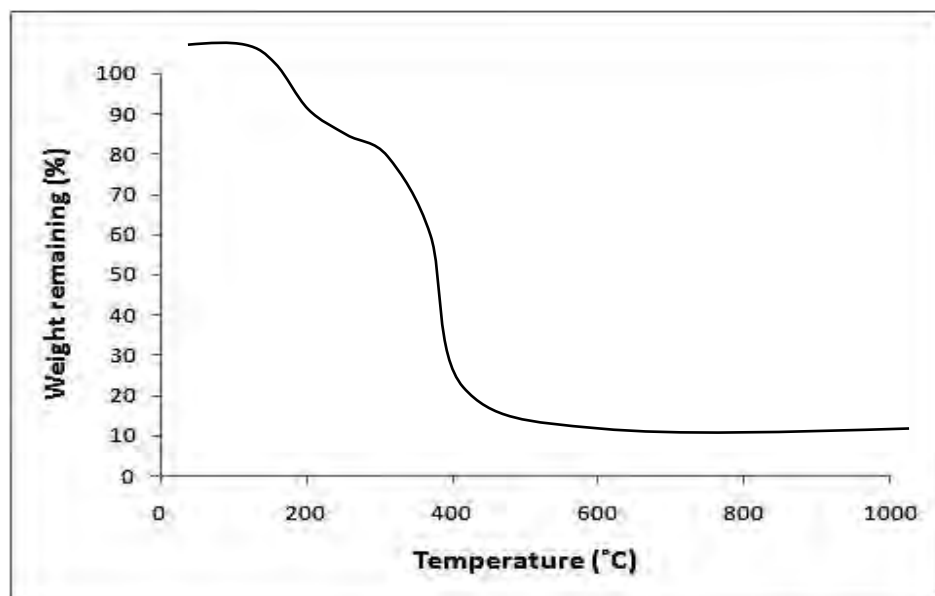
## ภาคผนวก ข



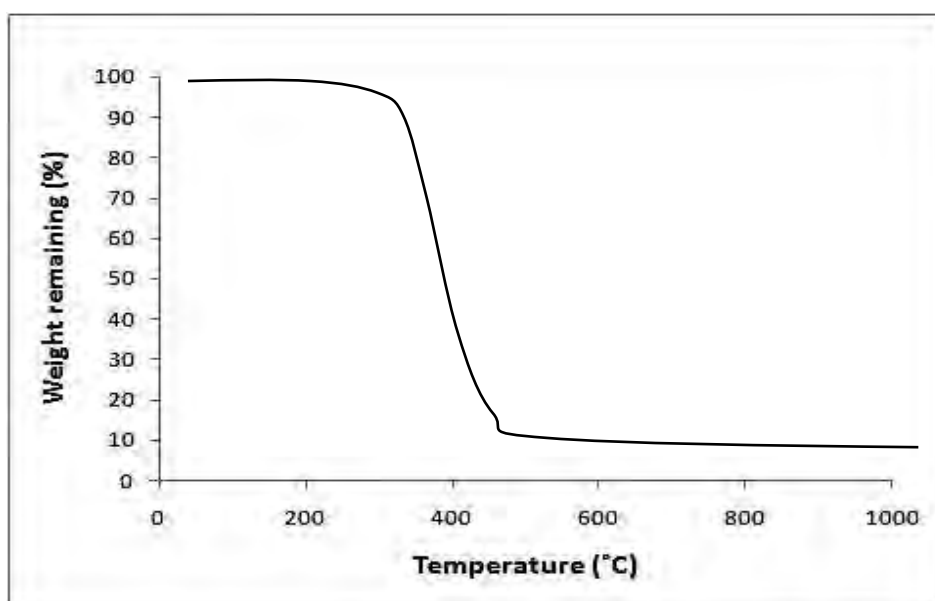
รูป ข-1 TGA เทอร์โมแกรมโกลโคไลซีไฟรด์กส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อเอทิลีนโกลคอลล 1:4



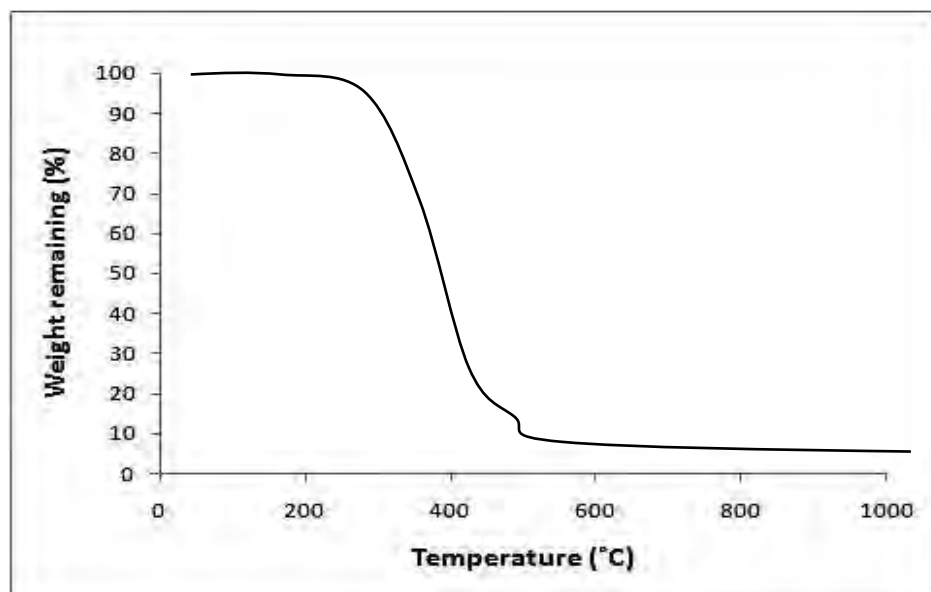
รูป ข-2 TGA เทอร์โมแกรมโกลโคไลซีไฟรด์กส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อเอทิลีนโกลคอลล 1:6



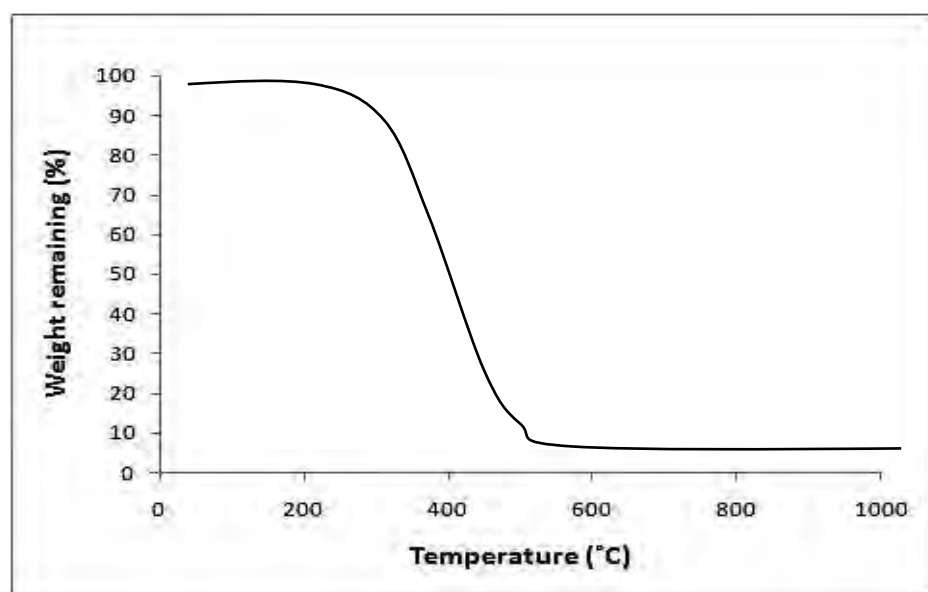
รูป ข-3 TGA เทอร์โมแกรมโกลโคไลซีไฟรด์กส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อเอทิลีนโกลคอลล 1:8



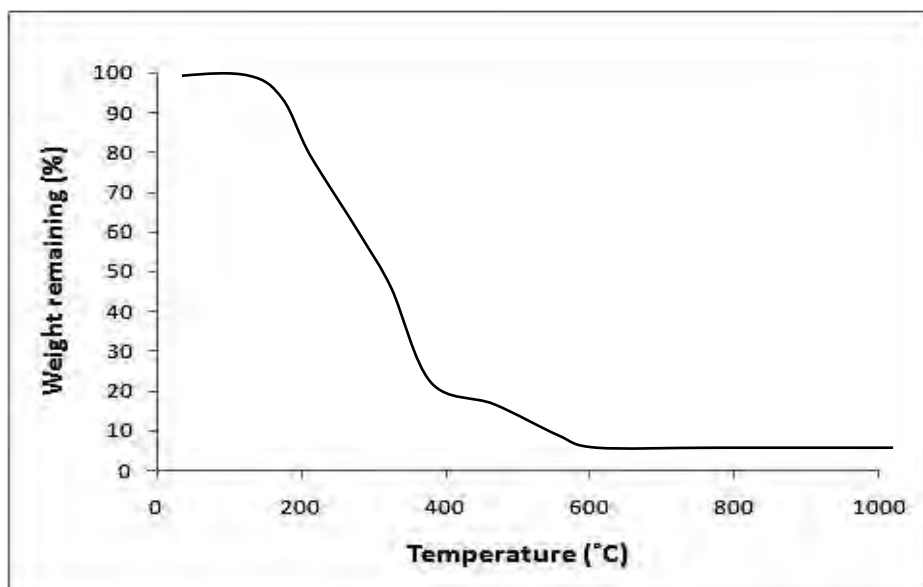
รูป ข-4 TGA เทอร์โมแกรมโกลโคไลซีไฟรด์กส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อโพรพิลีนโกลคอลล 1:4



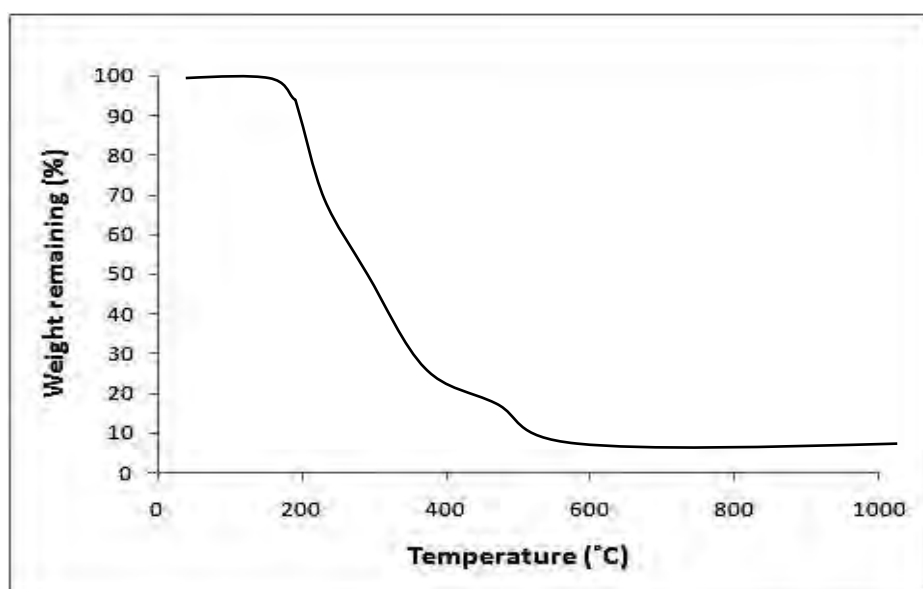
รูป ข-5 TGA เทอร์โมแกรมไกลโคไลซีไฟรด์กส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพตต่อไพโรฟิลีนไกลคอล 1:6



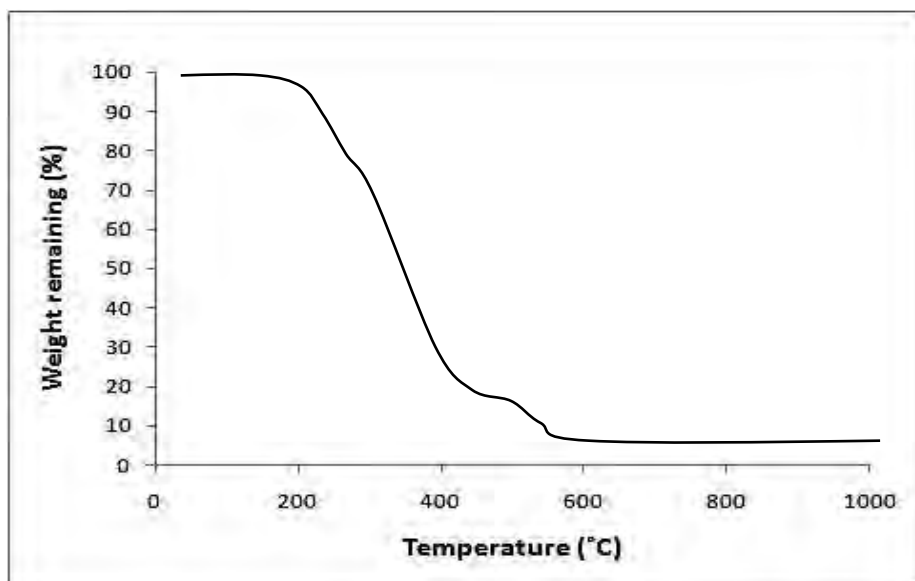
รูป ข-6 TGA เทอร์โมแกรมไกลโคไลซีไฟรด์กส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพตต่อไพโรฟิลีนไกลคอล 1:8



รูป ข-7 TGA เทอร์โมแกรมโพลโคโไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อไดเอทิลีนโกลคอลล 1:4

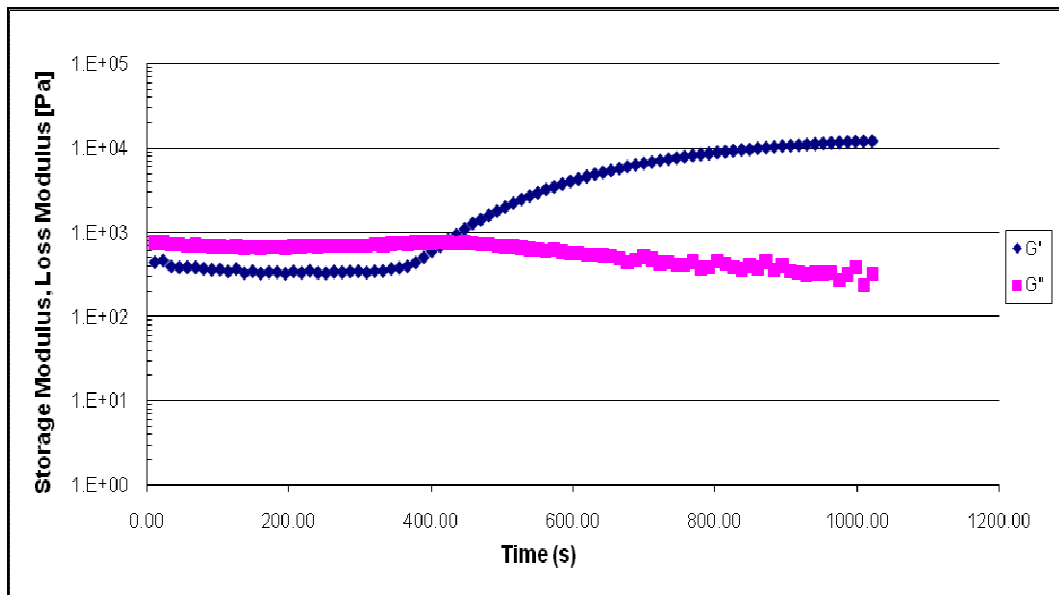


รูป ข-8 TGA เทอร์โมแกรมโพลโคโไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อไดเอทิลีนโกลคอลล 1:6

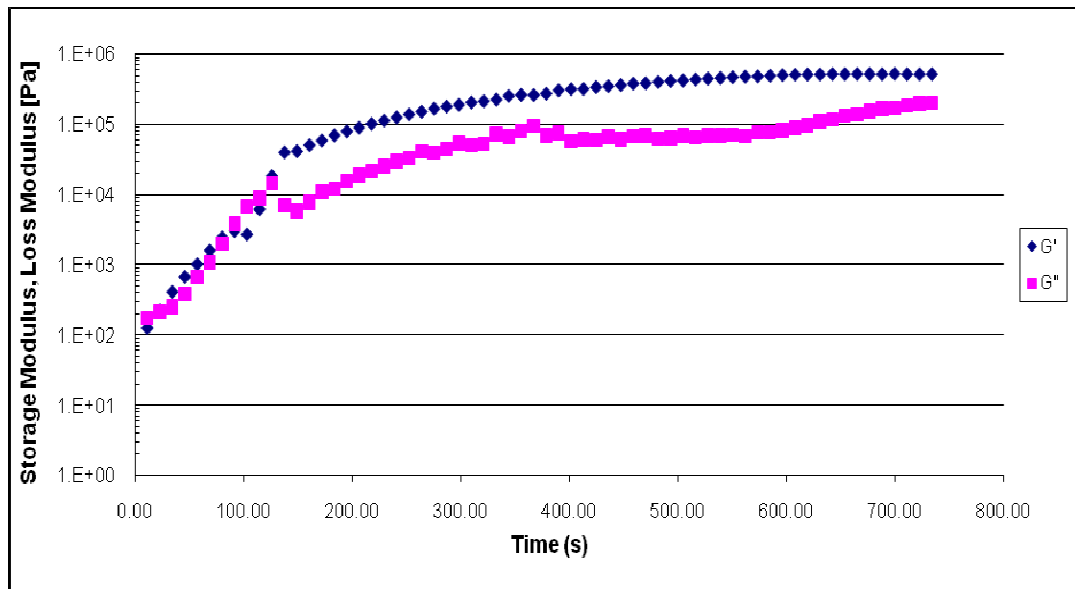


รูป ข-9 TGA เทอร์โมแกรมโกลโคไลซีไฟรด์กส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อไดเอทิลีนโกลคอลล 1:8

## ภาคผนวก ค

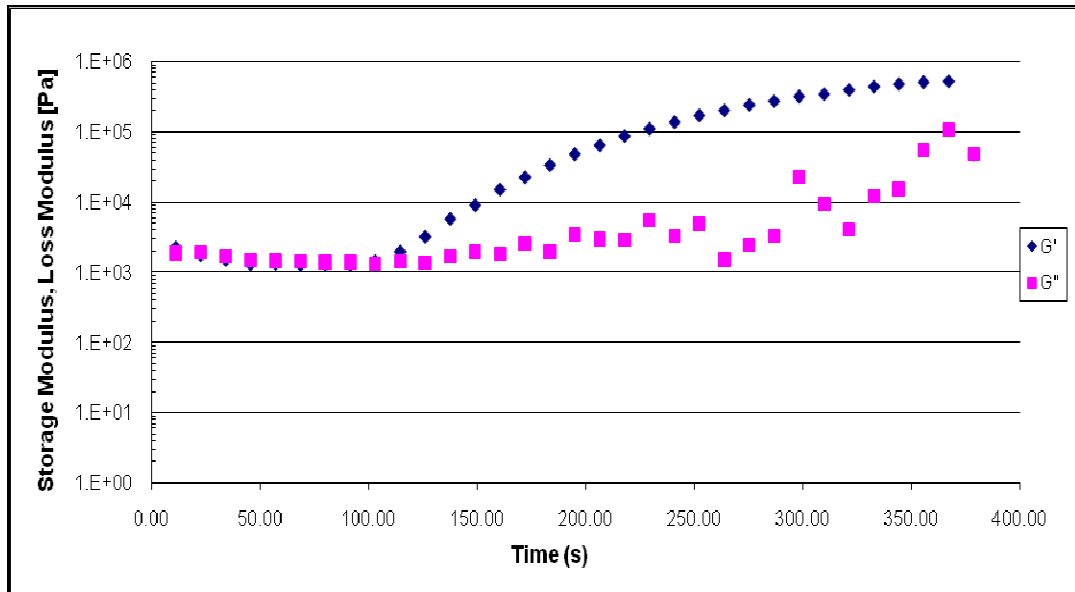


รูป ค-1 cure time ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ อัตราส่วนโดยโมลเพตต่อเอทิลีนไกลคอล 1:4

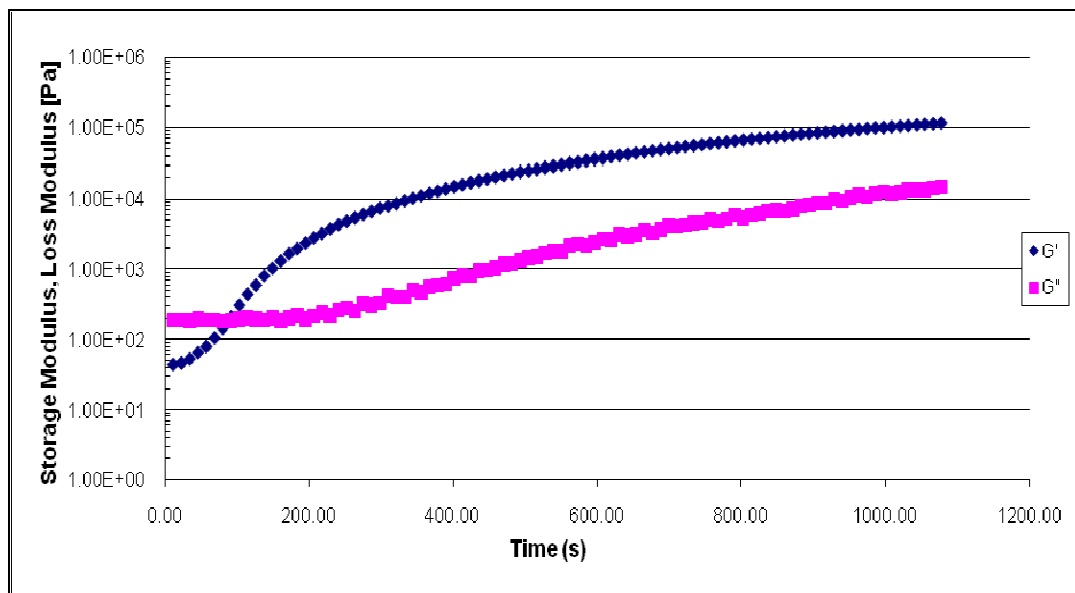


รูป ค-2 cure time ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ อัตราส่วนโดยโมลเพตต่อเอทิลีนไกลคอล 1:6

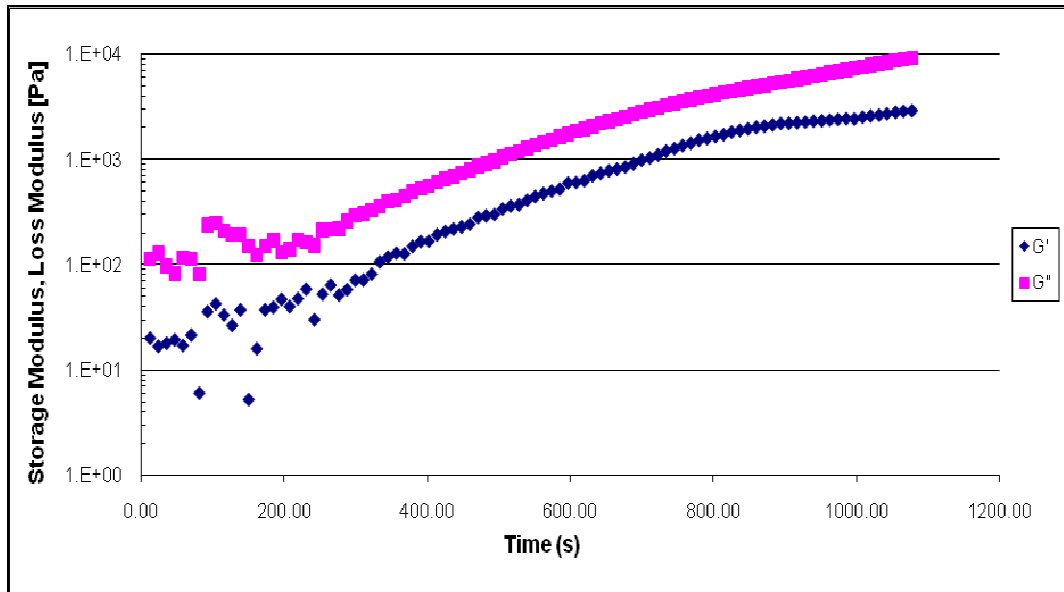




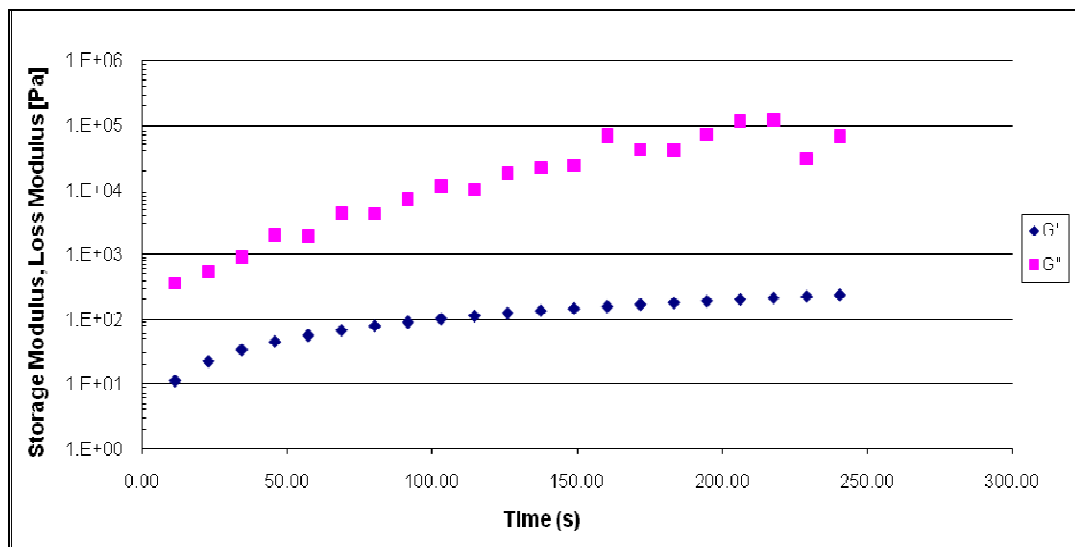
รูป ค-3 cure time ของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อเอทิลีนไกลคอล 1:8



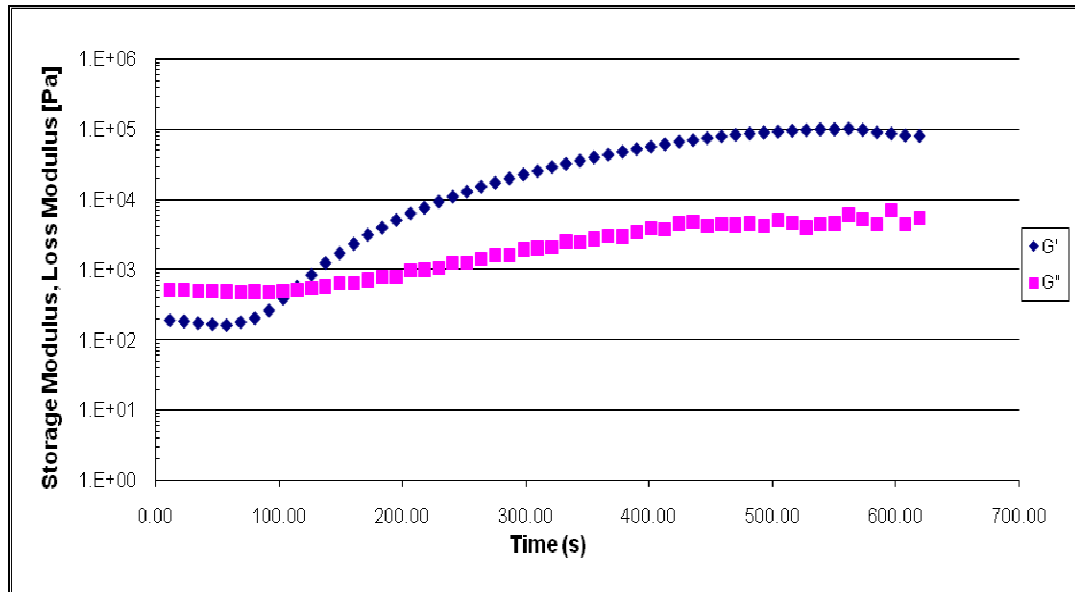
รูป ค-4 cure time ของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อโพลีเอทิลีนไกลคอล 1:4



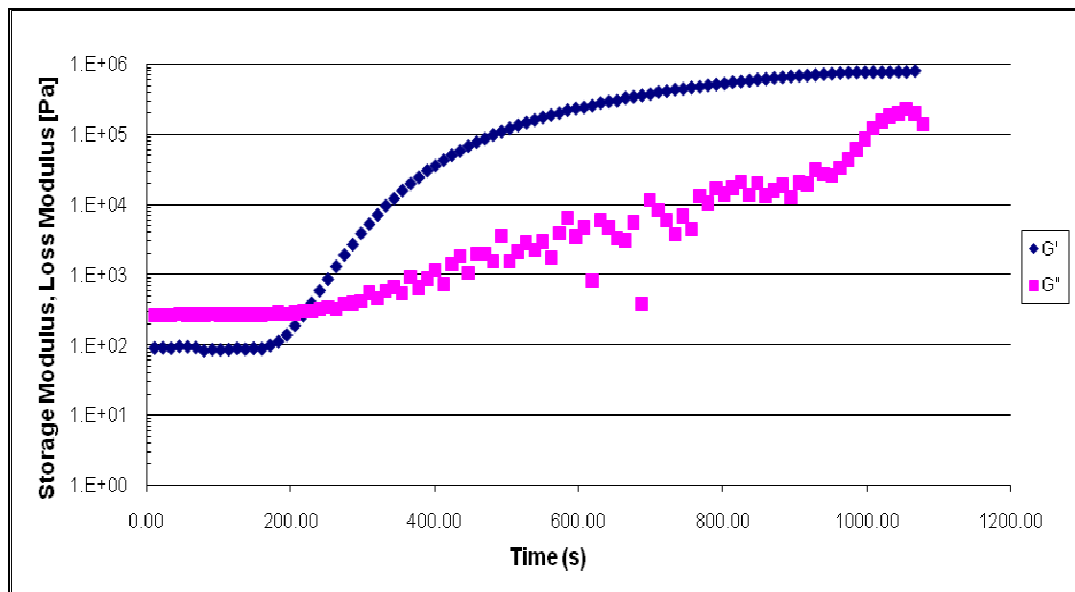
รูป ค-5 cure time ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อโพลีลีนไกลคอล 1:6



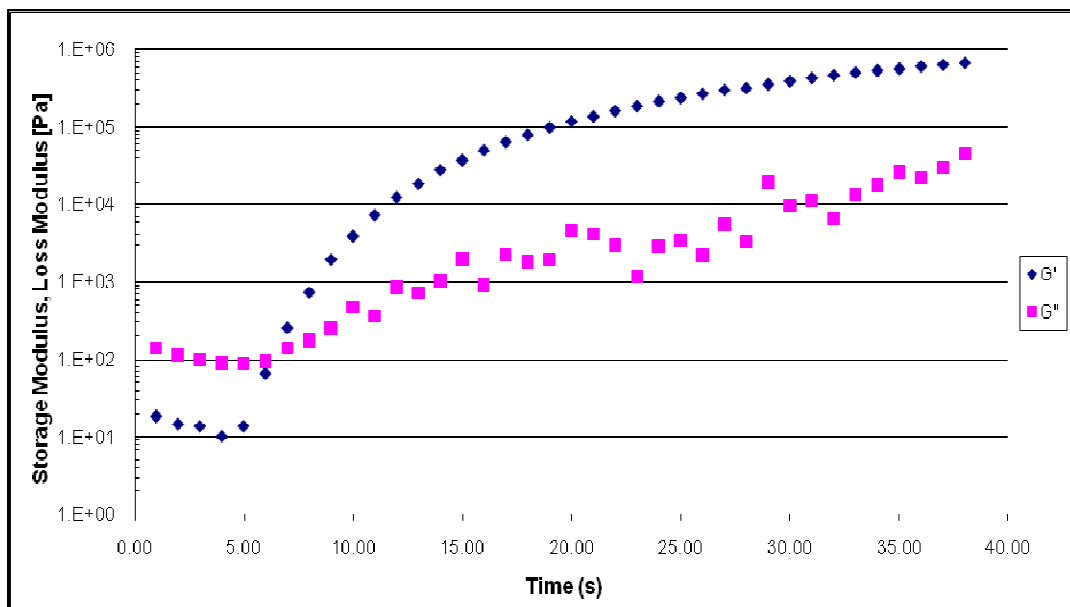
รูป ค-6 cure time ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อโพลีลีนไกลคอล 1:8



รูป ค-7 cure time ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อไดเอทิลีนไกลคอล 1:4



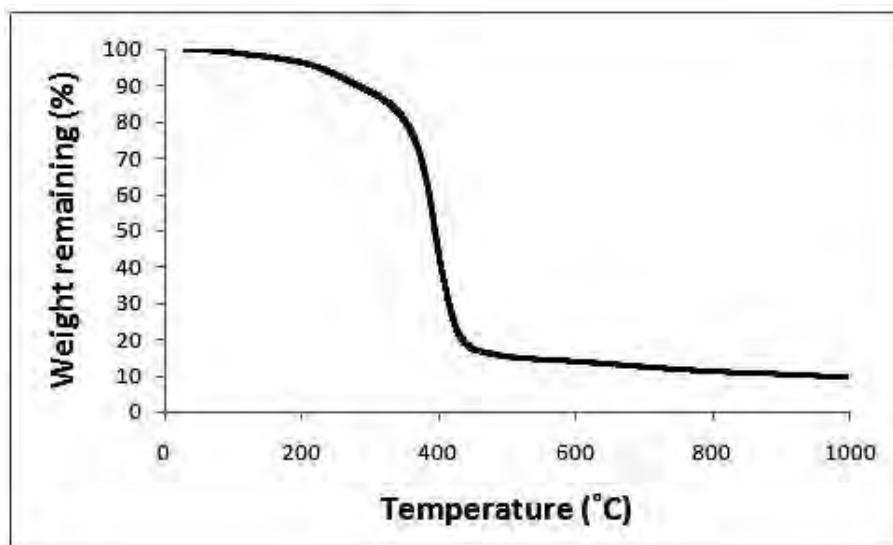
รูป ค-8 cure time ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อไดเอทิลีนไกลคอล 1:6



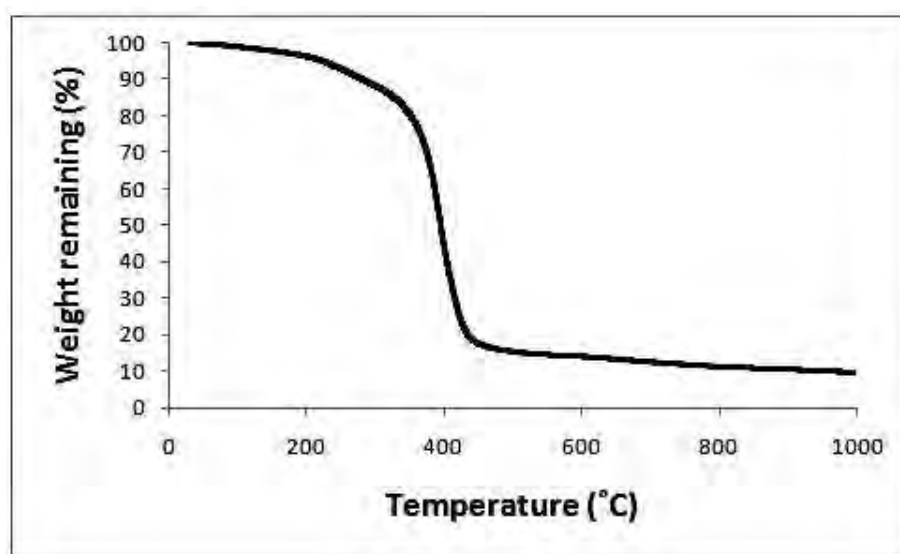
รูป ค-9 cure time ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่

อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อไดเอทิลีนไกลคอล 1:8

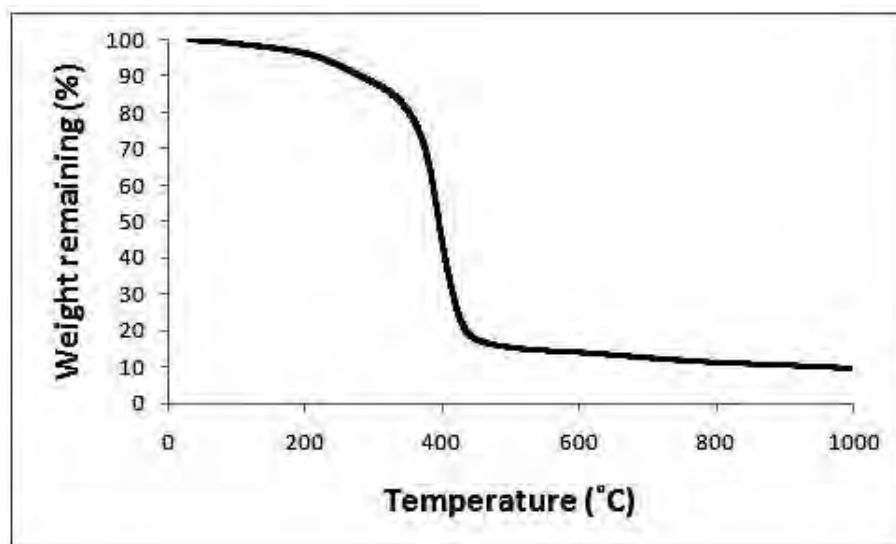
## ภาคผนวก ง



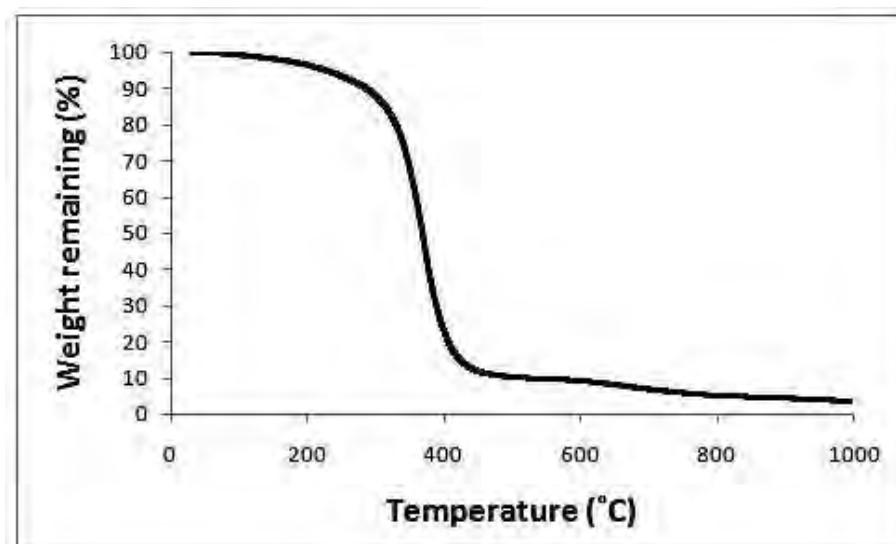
รูป ง-1 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่  
อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อเอทิลีนไกลคอล 1:4



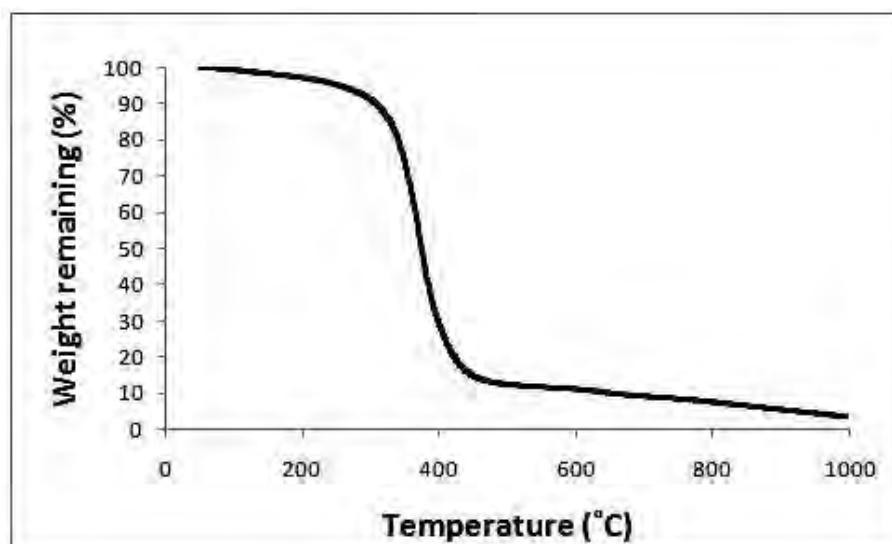
รูป ง-2 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่  
อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อเอทิลีนไกลคอล 1:6



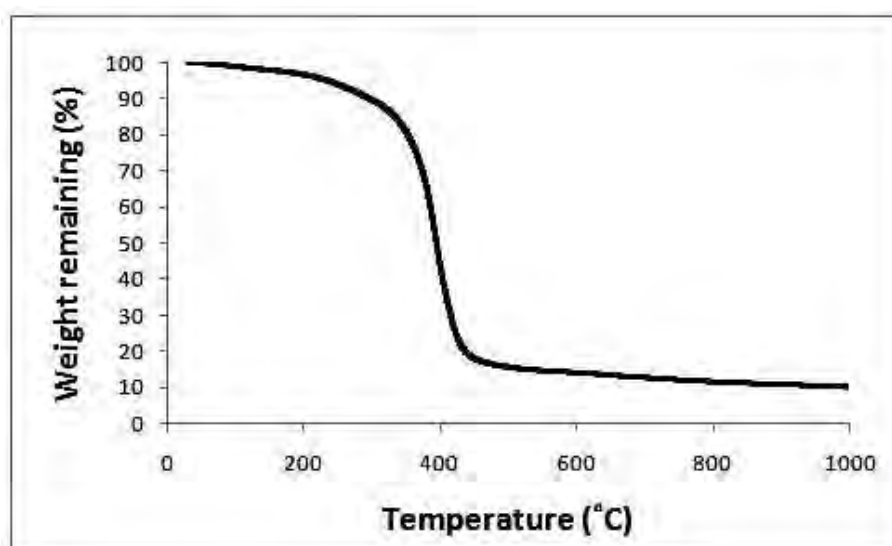
รูป ง-3 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อเอทิลีนไกลคอล 1:8



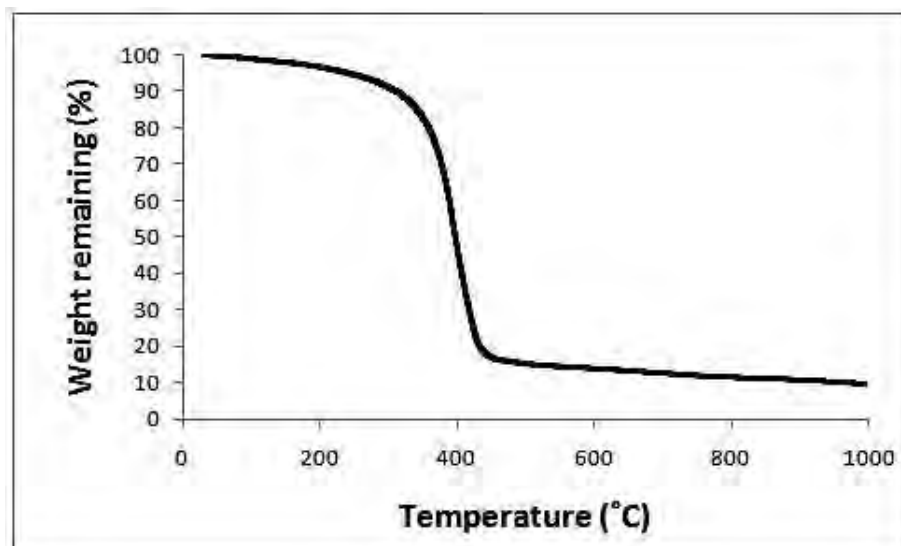
รูป ง-4 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:4



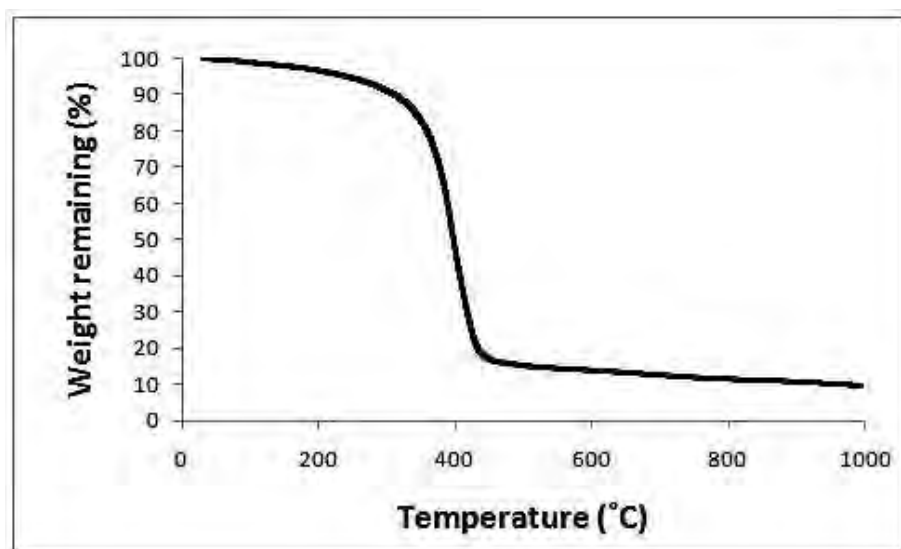
รูป ง-5 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:6



รูป ง-6 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพศต่อโพรพิลีนไกลคอล 1:8

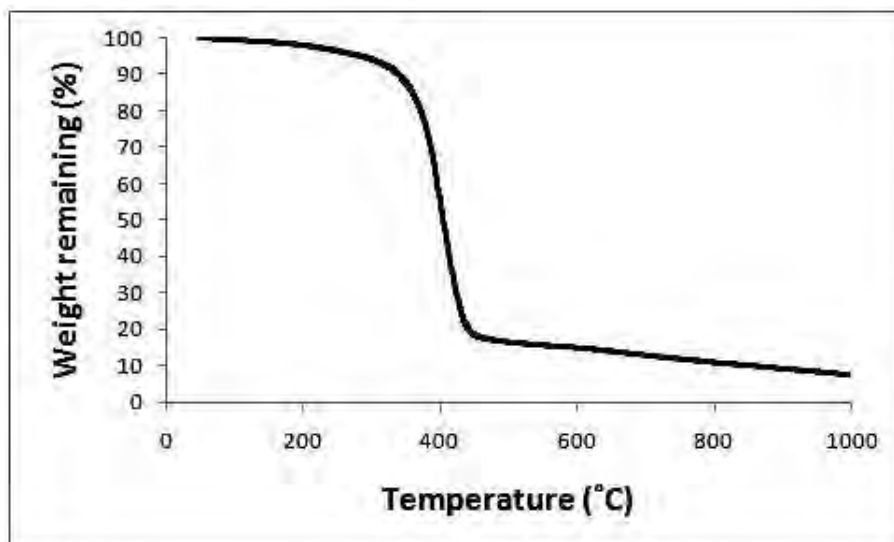


รูป ง-7 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพตต่อไดเอทิลีนไกลคอล 1:4



รูป ง-8 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่อัตราส่วนโดยโมลเพตต่อไดเอทิลีนไกลคอล 1:6





รูป ง-9 TGA เทอร์โมแกรมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่  
อัตราส่วนโดยโมลเพตต่อไดเอทิลีนไกลคอล 1:8

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศรีจรี อุดมถาวรสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษา ในภาคปลายปีการศึกษา 2552