

การเตรียมยูรีเทนออยล์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้ว
ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

นายศิวพล พูลเพิ่ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF URETHANE OILS FROM GLYCOLYZED PRODUCTS
OF USED PET BOTTLES UNDER MICROWAVE

Mr. Sivaphon Phunphoem

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 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมยูรีเทนออยล์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์
ขวดพีดีซีแล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

โดย

นายศิวพล พูลเพิ่ม

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีภูถักกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่างจุลจิตร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

คิวพล พูลเพิ่ม : การเตรียมยูรีเทนออยล์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดพีอีซี
แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ. (PREPARATION OF URETHANE OILS FROM
GLYCOLYZED PRODUCTS OF USED PET BOTTLES UNDER MICROWAVE).

อ. ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.อรอุษา สรวารี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:
รศ.ดร. ประณัฐ โพธิยะราช, 99 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการนำขวดพีอีซีแล้วมาย่อยสลายด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสภายใต้
พลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 600 วัตต์ โดยใช้โพพิลีนไกลคอลเป็นสารย่อยสลาย ที่อัตราส่วนโดย
น้ำหนักของขวดพีอีซีต่อโพพิลีนไกลคอลเท่ากับ 37.5 : 62.5 และใช้ซิงก์แอซีเตตเป็นตัวเร่ง
ปฏิกิริยา พบว่า ไกลโคไลซ์โพดักส์ที่ได้ประกอบด้วยโพลิโเมอร์ไดออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย
โดยจำนวนเท่ากับ 2265 นำไกลโคไลซ์โพดักส์มาทำปฏิกิริยากับโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตและ
น้ำมันชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำมันลินสีด น้ำมันถั่วเหลืองหรือน้ำมันปาล์ม ที่อัตราส่วนระหว่าง
หมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1 : 0.9 และใช้เมทานอลเป็นสารบดล็อก ได้ยูรีเทนออยล์
เป็นผลิตภัณฑ์ นำยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติเปรียบเทียบกับคอนเว-
ชันนอลยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากกลีเซอรอล และยูรีเทนออยล์ทางการค้า จากการทดลองพบว่า
ยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้ทุกสูตรมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีเหลืองที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยยูรี-
เทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพดักส์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า และใช้เวลาในการแห้งตัว
เป็นฟิล์มนานกว่าคอนเวชันนอลยูรีเทนออยล์ นอกจากนี้ ยังพบว่า ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์
ได้จากน้ำมันลินสีดมีระยะเวลาการแห้งน้อยที่สุดและที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันปาล์มมีระยะเวลา
การแห้งนานที่สุด

จากการทดสอบสมบัติและเปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ทางการค้า พบว่า ยูรีเทนออยล์ที่
สังเคราะห์ได้มีสีเข้มกว่าและมีความหนืดต่ำกว่ายูรีเทนออยล์ทางการค้า สำหรับสมบัติของฟิล์ม
พบว่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ฟิล์มมีความแข็งดี มีความอ่อนตัว ความติดแน่น ความทน
แรงกระแทกและความทนน้ำดีเยี่ยม แต่ความทนต่างพอใช้

ภาควิชาวัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ..

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

#5272568623: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
 KEY WORD: WASTE PET BOTTLES / MICROWAVE-ASSISTED GLYCOLYSIS /
 URETHANE OIL

SIVAPHON PHUNPHOEM: PREPARATION OF URETHANE OILS FROM
 GLYCOLYZED PRODUCTS OF USED PET BOTTLES UNDER MICROWAVE.
 ADVISOR: ASSOC. PROF. ONUSA SARAVARI, CO-ADVISOR: ASSOC PROF.
 PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 99 pp.

Post-consumer PET bottles were depolymerized with propylene glycol at a weight ratio between PET and glycol of 37.5:62.5 under microwave energy at irradiation power of 600 watt, using zinc acetate as a catalyst. The glycolyzed product, consisting of oligomeric diols with a number-average molecular weight of 2265 was obtained. The glycolyzed product was further reacted with toluene diisocyanate and various oils such as linseed, soybean and palm oils at hydroxyl to isocyanate ratio of 1 : 0.9 with methanol acting as a blocking agent to obtain urethane oil. The prepared urethane oil was characterized for molecular weight and its properties were determined and compared with those of the glycerol-based conventional and commercial urethane oils. It was found that all the synthesized urethane oils were yellowish viscous liquids with low molecular weight. The glycolyzed product-based urethane oils had lower molecular weight and took longer time to dry than the conventional urethane oils. Using linseed oil in urethane oil preparation resulted in shortest drying time while the drying time of the urethane oil prepared from palm oil was longest.

Compared with the commercial urethane oil, all the synthesized urethane oils were darker and had lower viscosity. The film properties of all the synthesized urethane oils were comparable to those of the commercial urethane oil. The films exhibited good hardness, excellent adhesion, flexibility, impact resistance. They also showed excellent water resistance but only fair alkali resistance.

Department: Materials Science

Student's Signature.....

Field of Study: Applied Polymer Science and Textile Technology

Advisor's Signature.....

Academic Year: 2010....

Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โปธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัย คำแนะนำและแนวคิดซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
5. รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
6. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. บริษัทสยามเคมีคัลอินดัสตรี จำกัด
8. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรควิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 เพ็ท [PET, Poly(ethylene terephthalate)].....	4
2.1.1 การสังเคราะห์เพ็ท.....	4
2.2 การรีไซเคิล.....	6
2.3 การรีไซเคิลเพ็ทด้วยกระบวนการทางเคมี.....	7
2.4 ไมโครเวฟ.....	9
2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ.....	9
2.4.2 กลไกการทำงานของเตาไมโครเวฟ.....	10
2.4.3 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ.....	10
2.5 สารเคลือบผิว.....	13
2.5.1 วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว.....	13
2.5.2 ประเภทของสารเคลือบผิว.....	13
2.5.3 การเกิดฟิล์ม.....	14
2.5.4 การแห้งของสารเคลือบผิว.....	14

บทที่

2.6 สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน (Polyurethane coating).....	15
2.6.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน.....	15
2.6.2 สมบัติของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน.....	18
2.6.3 ประเภทของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน.....	18
2.7 ยูรีเทนออยล์ (Urethane Oil).....	19
2.7.1 สารตั้งต้นในการเตรียมยูรีเทนออยล์.....	20
2.7.2 การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์.....	22
2.7.3 กลไกของการเกิดพอลิเมอไรเซชันและการแห้งตัวของยูรีเทนออยล์.....	23
2.7.4 สมบัติและการใช้งานของยูรีเทนออยล์.....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3. การทดลอง.....	30
3.1 การย่อยสลายขวดพีอีซีแล้ว.....	31
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	31
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31
3.1.3 เครื่องทดสอบ.....	31
3.1.3 วิธีการทดลอง.....	33
3.2 การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์.....	34
3.2.1 วัสดุและสารเคมี.....	34
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	36
3.2.3 เครื่องทดสอบ.....	36
3.2.3 วิธีการทดลอง.....	37
3.3 การทดสอบสมบัติของยูรีเทนออยล์.....	39
3.3.1 การทดสอบสมบัติยูรีเทนออยล์ในสถานะของเหลว.....	39
3.3.2 ระยะเวลาการแห้งตัว.....	41
3.3.3 การทดสอบสมบัติของฟิล์มยูรีเทนออยล์.....	42
3.3.4 การเปรียบเทียบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้ กับยูรีเทนออยล์ทางการค้า.....	46

บทที่

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	47
4.1 การเตรียมโกลโคไลซีโพรดักส์จากขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว.....	47
4.2 การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์.....	52
4.3 การทดสอบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้.....	63
4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้ กับยูรีเทนออยล์ทางการค้า.....	68
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลของปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติของยูรีเทนออยล์	21
ตารางที่ 2.2 ผลของชนิดของน้ำมันที่มีต่อสมบัติของยูรีเทนออยล์	21
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของพอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์	22
ตารางที่ 3.1 สูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์	38
ตารางที่ 3.2 การจัดลำดับความบกพร่องของฟิล์มจากการกรีดเป็นตาราง	45
ตารางที่ 4.1 สมบัติของไกลโคไลซ์โพรด์กส์ที่ได้จากกระบวนการไกลโคลิซิส	49
ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์แต่ละชั้นตอนจากการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ โดยใช้ไกลโคไลซ์โพรด์กส์เป็นพอลิออล	62
ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์แต่ละชั้นตอนจากการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ โดยใช้กลีซอรอลเป็นพอลิออล	62
ตารางที่ 4.4 สมบัติของยูรีเทนออยล์สูตรต่างๆ ในสถานะของเหลว	64
ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการแห้งตัวของฟิล์มยูรีเทนออยล์ (ชั่วโมง:นาที)	65
ตารางที่ 4.6 สมบัติของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์	66
ตารางที่ 4.7 สมบัติความหนา ความหนาต่างของยูรีเทนออยล์สูตรต่างๆ	67
ตารางที่ 4.8 สมบัติของยูรีเทนออยล์ทางการค้าเปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ ที่สังเคราะห์สูตรต่างๆ	70

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า.....	12
รูปที่ 3.1 พูเรียทรานสฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR).....	31
รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล (จีพีซี).....	31
รูปที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการย่อยสลายขวดเพ็ด.....	33
รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ยูรีเทนออกยด์.....	38
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์.....	39
รูปที่ 3.6 ชุดเทียบสีแบบการ์ดเนอร์.....	40
รูปที่ 3.7 เครื่องปาดฟิล์ม.....	42
รูปที่ 3.8 Mechanical scratch test apparatus.....	43
รูปที่ 3.9 Conical mandrel test apparatus.....	44
รูปที่ 3.10 Cross hatch cutter.....	45
รูปที่ 4.1 ไกลโคไลซีโพรดักส์ที่ได้จากกระบวนการไกลโคไลซิสขวดเพ็ดที่ใช้แล้ว.....	47
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของไกลโคไลซีโพรดักส์.....	48
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ด.....	49
รูปที่ 4.4 GPC โครมาโตแกรมของไกลโคไลซีโพรดักส์.....	50
รูปที่ 4.5 กลไกการย่อยสลายเพ็ดด้วยโพรพิลีนไกลคอล.....	51
รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่าง	
(a) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากไกลโคไลซีโพรดักส์และน้ำมันลินสีด	
(b) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากไกลโคไลซีโพรดักส์และน้ำมันถั่วเหลือง	
(c) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากไกลโคไลซีโพรดักส์และน้ำมันปาล์ม.....	53
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่าง	
(a) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากกลีเซอรอลและน้ำมันลินสีด	
(b) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากกลีเซอรอลและน้ำมันถั่วเหลือง	
(c) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์ม.....	54

รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

(a) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันลินสีด

(b) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันถั่วเหลือง

(c) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันปาล์ม 56

รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

(a) กลีเซอรอลกับน้ำมันลินสีด

(b) กลีเซอรอลกับน้ำมันถั่วเหลือง

(c) กลีเซอรอลกับน้ำมันปาล์ม 57

รูปที่ 4.10 กลไกการแข็งตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของหมู่ไอโซไซยาเนตกับอากาศ 58

รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

(a) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันลินสีด

(b) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันถั่วเหลือง

(c) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันปาล์ม 59

รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

(a) กลีเซอรอลกับน้ำมันลินสีด

(b) กลีเซอรอลกับน้ำมันถั่วเหลือง

(c) กลีเซอรอลกับน้ำมันปาล์ม 60

รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของ (a) ยูรีเทนออยล์ และ (b) ฟิล์มยูรีเทนออยล์ทางการค้า 68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate)) หรือที่รู้จักกันในชื่อ “เพ็ต” (PET) เป็นพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานในปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งนิยมนำมาผลิตเป็นขวดน้ำดื่ม (soft drink bottles) เนื่องจากเพ็ตมีสมบัติที่สามารถเทียบเคียงได้กับบรรจุภัณฑ์ดั้งเดิมที่ทำมาจากแก้วหรืออะลูมิเนียม อาทิเช่น ความแข็งแรง ความใส ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม และความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ในขณะที่เพ็ตมีข้อได้เปรียบบรรจุภัณฑ์ดั้งเดิมหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นปัจจัยด้านราคาของวัตถุดิบ การใช้พลังงาน ความร้อนในการขึ้นรูปที่ไม่สูงมากนัก รวมทั้งความหนาแน่นที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้สามารถประหยัดต้นทุนทั้งด้านการผลิตและด้านการขนส่ง ด้วยเหตุดังกล่าวนี้เองส่งผลให้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากเพ็ตได้รับการยอมรับและมีสัดส่วนการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามผลกระทบที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้จากความต้องการการใช้งานบรรจุภัณฑ์จากเพ็ตก็คือปัญหาขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นจากการสะสมเพ็ตที่ใช้แล้ว เนื่องจากเพ็ตไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาตินั่นเอง วิธีการหนึ่งที่ได้รับการผลักดันอย่างต่อเนื่องในการแก้ปัญหาขยะพลาสติก คือ การนำเพ็ตมาแปรใช้ใหม่หรือรีไซเคิลนั่นเอง

การรีไซเคิลเพ็ตสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การรีไซเคิลทางกายภาพ และการรีไซเคิลทางเคมี ซึ่งการรีไซเคิลทางกายภาพนั้นทำได้โดยการนำขยะเพ็ตไปหลอมรวมกับเพ็ตใหม่เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ระหว่างการขึ้นรูปนี้เอง พอลิเมอร์อาจเกิดการแตกสลาย (degradation) ด้วยความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ จึงมักได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและความแข็งแรงลดลง สำหรับวิธีการรีไซเคิลทางเคมีเป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อย่อยสลายเพ็ตให้แตกสลายเป็นสารโมเลกุลเล็กชนิดต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารอื่น หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ต่อไปได้ กระบวนการรีไซเคิลทางเคมีสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ไกลโคลิซิส (glycolysis) เมทานอลิซิส (methanolysis) อะมิโนลิซิส (aminolysis) และไฮโดรลิซิส (hydrolysis) โดยวิธีการที่มีการศึกษาวิจัยกันมากที่สุด คือการรีไซเคิลเพ็ตด้วยปฏิกิริยาไกลโคลิซิส ทั้งนี้เพราะเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ไม่ก่อให้เกิดสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนในระบบ และให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคลิซิสเพ็ด หรือไกลโคไลซ์โพรดักส์ ประกอบไปด้วยโพลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายโมเลกุล จึงสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารเคมีหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ต่อไปได้ เช่น การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ไปทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และสไตรีนมอนอเมอร์ นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์สำหรับงานเคลือบผิว โดยการนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันและโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต

อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการไกลโคลิซิสจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ค่อนข้างยาวนาน กล่าวคือ โดยทั่วไปจะต้องดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 4 – 8 ชั่วโมง ทำให้ต้นทุนด้านพลังงานค่อนข้างสูงก่อให้เกิดข้อจำกัดสำคัญในการพัฒนากระบวนการดังกล่าวในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาวิจัยในการนำพลังงานไมโครเวฟมาทดแทนการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม

พลังงานไมโครเวฟถูกนำมาใช้ทดแทนการให้ความร้อนจากแหล่งพลังงาน ทั้งในอุตสาหกรรมและตามอาคารบ้านเรือน เนื่องจากสามารถให้ความร้อนสูงได้ในระยะเวลาอันสั้น ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานและลดต้นทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในวงการเคมีก็เช่นเดียวกัน มีความสนใจในการพัฒนาพลังงานไมโครเวฟมาใช้ให้ความร้อนกับปฏิกิริยาเคมีแทนแหล่งความร้อนแบบดั้งเดิม โดยพบว่าสามารถลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้สั้นลงอย่างมาก โดยทั่วไปแหล่งให้พลังงานไมโครเวฟ เช่น ตู้อบไมโครเวฟ มีแมกนีตรอนทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานในรูปคลื่นไมโครเวฟ แล้วส่งผ่านคลื่นเข้าสู่วัตถุที่สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟจนทำให้โมเลกุลภายในเกิดการสั่นและการหมุนส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นมาภายในทั่วทั้งวัตถุและส่งผ่านสู่โมเลกุลของวัตถุข้างเคียงทำให้เกิดการให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว

ด้วยแนวคิดดังกล่าวจึงมีงานวิจัยเพื่อนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการรีไซเคิลเพ็ดด้วยปฏิกิริยาไกลโคลิซิส โดยพบว่าสามารถลดเวลาในการทำปฏิกิริยาลงให้สั้นลงอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์เพ็ดภายใต้พลังงานไมโครเวฟมาสังเคราะห์เป็นยูรีเทนออยล์ แล้วทดสอบสมบัติของฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่ได้เปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ทางการค้า

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ยูรีเทนออยล์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวด PET ที่ใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ
2. ศึกษาสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับสมบัติของยูรีเทนออยล์ทางการค้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการรีไซเคิลทางเคมีของ PET ด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยนำขวด PET ที่ใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยโพธิ์ลิ้นไกลคอลลในอัตราส่วน 37.5 : 62.5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไกลโคไลซ์โพธิ์ลิ้นที่ได้มาสังเคราะห์เป็นยูรีเทนออยล์ โดยการนำมาทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตน้ำมันชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันลินสีด และน้ำมันปาล์ม ในอัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1 : 0.9 จากนั้นศึกษาสมบัติของยูรีเทนออยล์และฟิล์ม ได้แก่ สี ค่าของกรด ความหนืด ปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยได้ สมบัติการละลาย ระยะเวลาการแห้งตัว ความตึงเครียด ความแข็ง ความอ่อนตัวไม่เปราะ ความทนทานต่อแรงกระแทก และความทนทานต่อน้ำและต่าง พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากกลีเซอรอลและยูรีเทนออยล์ทางการค้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ยูรีเทนออยล์สำหรับใช้เป็นวารนิชเคลือบพื้นผิวที่สังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวด PET ที่ใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate)) หรือเพ็ต คือ พอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์เชิงเส้นที่อิมิตัว จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมชนิดหนึ่ง เพ็ตถูกใช้งานครั้งแรกในรูปของเส้นใยที่เรียกว่า เส้นใยพอลิเอสเทอร์ โดยวินฟิลด์และดิกสัน (Whinfield & Dickson) พบว่าพอลิเอสเทอร์ที่เตรียมได้มีจุดหลอมเหลวสูง และละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ยาก จึงเหมาะในการทำเส้นใยสิ่งทอและเป็นวัสดุฉนวนการค้ำในชื่อของไมลาร์ (Mylar) แดครอน (Dacron) และเทอริลีน (Terylene)

การพัฒนาเพ็ตเพื่อใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์ เริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1970 ในสหรัฐอเมริกา โดยแรกเริ่มได้ผลิตขึ้นในรูปของขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ที่มีทั้งความเหนียว ใส และกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี เพื่อทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้ว และอะลูมิเนียม ที่ต้องใช้พลังงานในการผลิตสูง และมีอัตราการแตกสูง ซึ่งบรรจุภัณฑ์จากเพ็ตได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็ว และมีอัตราการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากสมบัติเด่นด้านต่างๆ ได้แก่

- ความทนแรงกระแทก และการตกกระทบได้ดี จึงปลอดภัยในการใช้งาน
- ใส
- น้ำหนักเบา
- สามารถเก็บน้ำอัดลมที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ภายใต้อุณหภูมิสูงได้อย่าง

ปลอดภัย

- ปลอดภัยต่ออาหารที่สัมผัส และไม่ทำให้รสชาติเสียไป

จากสมบัติของเพ็ตที่เหนือกว่าพลาสติกชนิดอื่น ทำให้มีการนำไปใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อย่างกว้างขวาง เช่น ทำเป็นขวดน้ำมันพืช ขวดน้ำดื่ม บรรจุภัณฑ์อาหาร ยา และสารเคมี เป็นต้น

[1]

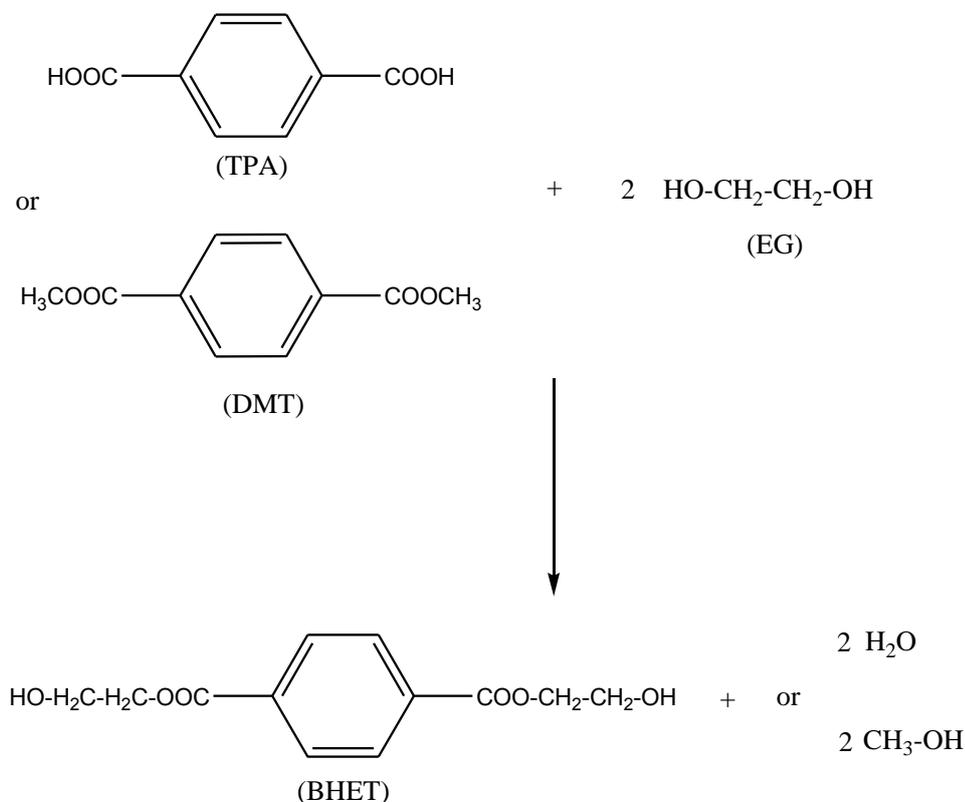
2.1.1 การสังเคราะห์เพ็ต [2]

เพ็ตสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรงระหว่างเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) กับกรดเทเรฟทาเลอิก (terephthalic acid) หรือจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์

(ester interchange) ระหว่างเอทิลีนไกลคอล กับไดเมทิลเทเรฟทาเลต (DMT) ซึ่งในทางอุตสาหกรรมนิยมสังเคราะห์จากปฏิกิริยาแบบหลังมากกว่า เนื่องจากสามารถทำให้ไดเมทิลเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ได้ง่ายโดยการกลั่นแบบลดความดันหรือการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ดีในเอทิลีนไกลคอล ทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดได้ดีในระยะเริ่มแรกของปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามกรดเทเรฟทาลิกทำให้บริสุทธิ์ได้ยาก และมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายทั่วไปต่ำ

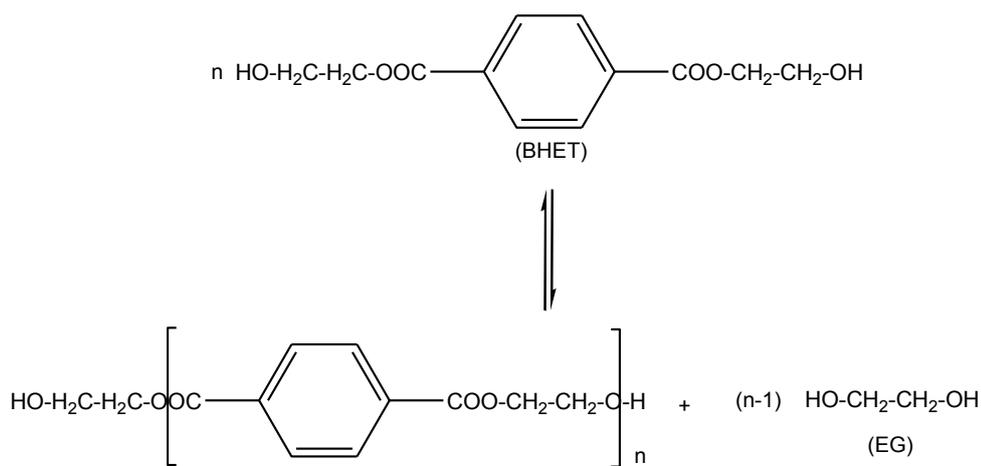
ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พีที ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการผสมระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับไดเมทิลเทเรฟทาเลตหรือกรดเทเรฟทาลิก แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้คือ BHET (bis(2-hydroxyethyl)terephthalate) และน้ำ (หรือเมทานอลถ้าใช้ไดเมทิลเทเรฟทาเลต) ซึ่ง BHET จะเปลี่ยนเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่มี $n = 1 - 4$ ขั้นตอนนี้แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



น้ำหรือเมทานอลที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกไปเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับและใช้เอทิลีนไกลคอลมากเกินไปเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยให้ความร้อนกับของผสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 (BHET) ที่อุณหภูมิ 270-285 องศาเซลเซียส ที่ความดันประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท ผลผลิตจากปฏิกิริยา คือ พลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเอทิลีนไกลคอล ดังสมการต่อไปนี้



เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ จึงต้องมีการกำจัดเอทิลีนไกลคอลออกจากระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พีอีทีในปัจจุบันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผสม คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ เช่น สารประกอบแอสีเทตของแมกนีเซียม สังกะสี แคลเซียม โคบอลต์ หรือแมงกานีส ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เช่น แอนติโมนีออกไซด์ สารประกอบดีบุก หรือไทเทเนียม เป็นต้น [2]

2.2 การรีไซเคิล

การรีไซเคิลเป็นการนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM D5033 ดังนี้

1. Primary recycling เป็นการนำเศษพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการผลิตมาผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์เดิมหรือใกล้เคียง

2. Secondary recycling เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการผลิตได้เป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่แตกต่างจากการใช้งานครั้งแรก ซึ่งมักพบว่ามีการปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก

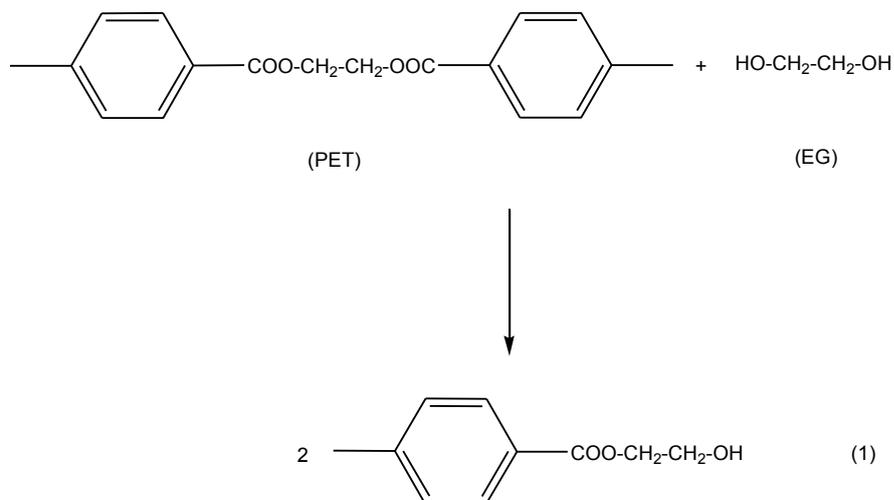
3. Tertiary recycling เป็นการนำเศษพลาสติกจากแหล่งชุมชน หรือที่ผ่านการคัดแยกมาใช้ผลิตสารเคมีพื้นฐานทั่วไป ซึ่งกระบวนการที่ใช้มักเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis process) และกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis process)

4. Quarternary recycling เป็นการนำพลังงานที่ได้จากการเผาขยะพลาสติกมาใช้เพื่อจัดเป็นพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ใหม่ในรูปแบบต่างๆมากที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นบรรจุภัณฑ์พวกขวดน้ำดื่มที่มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้จะเป็นจำพวกฟิล์มหรือบรรจุภัณฑ์อื่นๆ ที่ทำจากพีท การรีไซเคิลพีทสามารถใช้วิธีทางกายภาพหรือทางเคมี ซึ่งการรีไซเคิลทางกายภาพจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกหรือพอลิเมอร์ เพียงแต่จำเป็นต้องคัดแยกประเภทและทำความสะอาดก่อนที่จะนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่ สำหรับการรีไซเคิลทางเคมีจัดเป็นเทคโนโลยีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเปลี่ยนพลาสติกให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีต่างๆ รวมทั้งพอลิเมอร์ได้อีกด้วย การรีไซเคิลทางเคมีเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องคัดแยกประเภทพลาสติก เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่ใช้จะเกิดกับพลาสติกแต่ละชนิดอยู่แล้ว ซึ่งผลผลิตที่ได้สามารถนำไปกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกสารโมเลกุลเล็กชนิดต่างๆ ออกจากกัน [3-4]

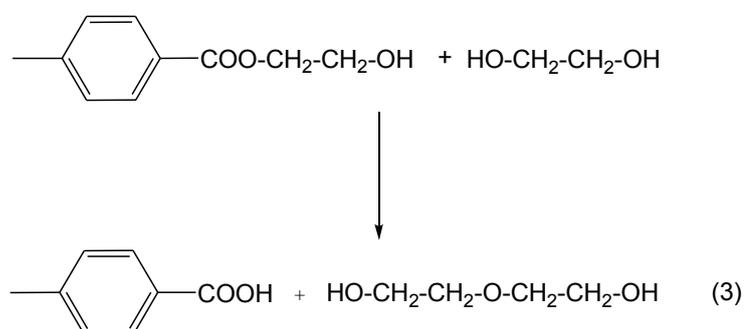
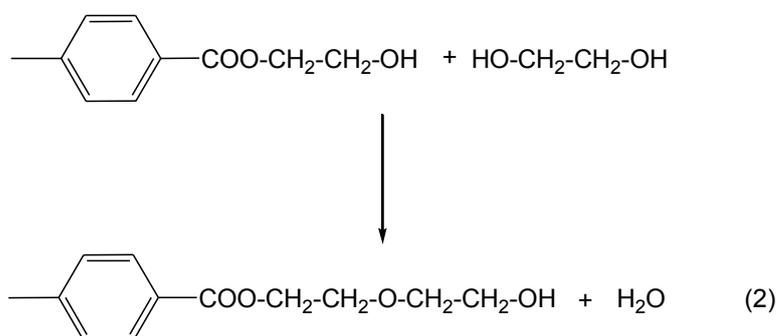
2.3 การรีไซเคิลพีทด้วยกระบวนการทางเคมี

ปัจจุบันการรีไซเคิลพีทด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นการทำให้พอลิเมอร์แตกสลายด้วยสารเคมี เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง และสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เมทาโนลิซิส (methanolysis) ไกลโคลิซิส (glycolysis) ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) อะมิโนลิซิส (aminolysis) แอมโมโนลิซิส (ammonolysis) และ แอซิโดลิซิส (acidolysis) [5]

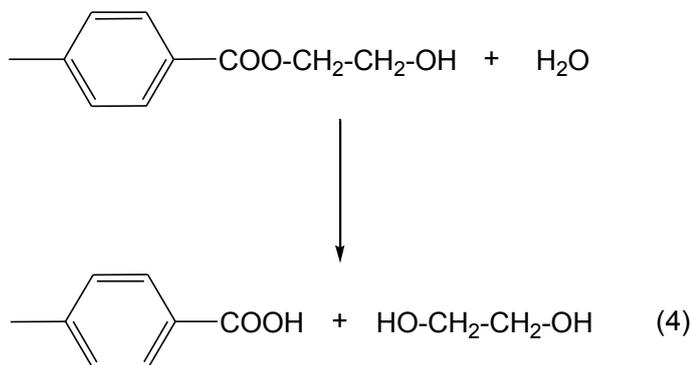
สำหรับวิธีไกลโคลิซิสเป็นการย่อยสลายพีทโดยการใช้น้ำไดออลที่มากเกินไป อาทิ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) โพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol, PG) และไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol, DEG) และใช้เกลือของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลที่ได้จากปฏิกิริยาได้แก่ มอนอเมอร์ และโพลิเมอร์ไดออล ปฏิกิริยาไกลโคลิซิสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)



นอกจากนี้อาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ได้แก่ ปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน (etherification) ทำให้น้ำ ดังสมการที่ (2) หรือได้ไดเอทิลีนไกลคอล และสารที่ปลายโมเลกุลเป็นหมู่คาร์บอกซิล ดังสมการที่ (3)



ปฏิกิริยาข้างเคียงที่สำคัญอีกปฏิกิริยาหนึ่งคือ ไฮโดรลิซิส ดังสมการที่ (4)



โดยทั่วไปสารที่มีหมู่คาร์บอกซิลที่ปลายโมเลกุลจะทำปฏิกิริยากับไกลคอลที่มากเกินพอในเวลาต่อมาได้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ [6]

2.4 ไมโครเวฟ [7]

2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่างอินฟราเรดกับคลื่นวิทยุ (100 cm – 1 mm) ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนั้นไม่ใช่คลื่นความร้อนตั้งแต่ต้น แต่อยู่ในรูปของพลังงาน และถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุหรือเกิดการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนกับอนุภาครอบๆ ที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและเกิดการดูดซับพลังงานดังกล่าว เป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน แต่ทั้งนี้การดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุซึ่งนั้นไม่ได้หมายความว่าวัสดุทุกประเภทจะสามารถใช้กับคลื่นไมโครเวฟได้ เช่น วัสดุพวกโลหะจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟทั้งหมด ในขณะที่แก้วหรือพลาสติกบางชนิดจะยอมให้คลื่นไมโครเวฟผ่านไปได้ทั้งหมด สารซึ่งมีน้ำหรือสารจำพวกดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟจะดูดซับพลังงานทั้งหมด แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเนื่องมาจากการสั่นของโมเลกุล ปัจจุบันเรานิยมใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีคุณภาพดี มีประสิทธิภาพสูง และสามารถลดเวลาของกระบวนการลงได้เป็นอย่างมาก และยังให้ผลผลิตที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ส่งผลให้การใช้ไมโครเวฟได้รับความนิยมแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น

2.4.2 กลไกการทำงานของตู้อบไมโครเวฟ

ตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ในห้องแล็บนั้นจะใช้ช่วงความถี่ที่ 2450 MHz โดยจะให้พลังงาน 500 – 1100 วัตต์ โดยภายในตู้อบไมโครเวฟจะมีท่อที่เรียกว่าแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดคลื่น เมื่อเราเปิดสวิตช์ท่อแมกนีตรอนจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งคลื่นนี้จะถูกพัดลมพัดคลื่นไมโครเวฟให้กระจายทั่วเตา ผลิตภัณฑ์ก็จะดูดซับคลื่นไมโครเวฟเอาไว้

1) การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric heating) พลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric energy) จากไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ (radio frequency) เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งส่งผ่านในรูปของคลื่น (wave) และแทรกเข้าไปในผลิตภัณฑ์ ซึ่งพลังงานนี้จะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยทั่วไปเราสามารถทำให้เกิดความร้อนในผลิตภัณฑ์ได้ทั้งทางโดยตรง (direct method) ซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวของผลิตภัณฑ์เอง เช่น ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ และโดยทางอ้อม (indirect method) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายนอกและส่งผ่านพื้นผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ไปยังด้านใน โดยเกิดจากการแผ่รังสี (radiation) การพาความร้อน (convection) หรือการนำความร้อน (conduction)

2) การทำให้เกิดความร้อนจากสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งสมบัติทางความร้อนที่สำคัญได้แก่

- relative dielectric constant

- relative dielectric loss

โดยค่าเหล่านี้จะทำให้เราทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulating ability) ของวัสดุ ซึ่งวัสดุเป็นฉนวนที่ไม่ดี ดังนั้นวัสดุจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น

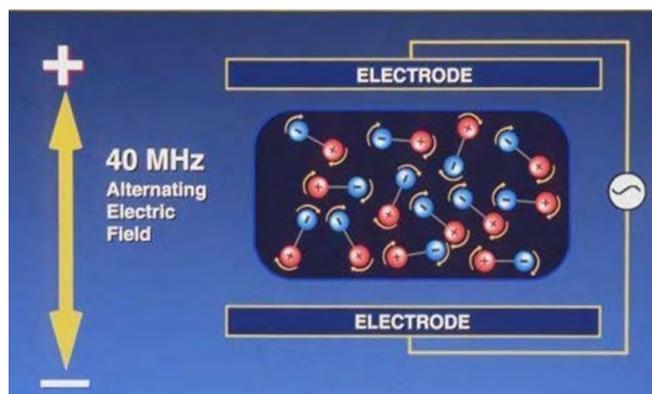
2.4.3 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ

จากการที่วัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีสมบัติไดอิเล็กทริก และเมื่ออนุภาคได้รับพลังงานไมโครเวฟแล้วจะถูกพลังงานไมโครเวฟนั้นเขย่าโมเลกุลให้สั่นภายใต้สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า อนุภาคเหล่านี้จะปรับตัวให้มีเฟสตรงกับสนาม อย่างไรก็ตามการเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้จะถูกต้านด้วยแรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและแรงต้านไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อนุภาค

เกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งกลไกการเกิดความร้อนนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization/conduction mechanism) ภายในเตาไมโครเวฟ (Microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ที่มีหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือ บนสู่ล่าง ข้างสู่ข้าง และหน้าสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในวัสดุสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ จึงเกิดการชน (collision) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่เคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในวัสดุนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในวัสดุจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกัน เช่น โซเดียม โปตัสเซียม หรือแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้ไอออนบวก (cations) และ ไอออนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (interaction) กับสนามไฟฟ้าใดๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน จนเกิดการสั่นกลายเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในส่งผลให้ตัวนำร้อน ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูง

2) การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation/dipole polarization) ในวัสดุทั่วไปจะประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random orientation) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางของสนามไฟฟ้าสลับนั้นๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟ คือ 915 หรือ 2,450 พันล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็ง เช่น น้ำแข็งนั้นโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองมากพอที่จะชนกับโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียง เพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้และในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงจำนวนน้อยมากที่จะชนกันจนสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

การเกิดความร้อนในวัสดุนั้นจะเกิดบริเวณจุดที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการเดือดของน้ำ โดยเกิดการนำความร้อนสู่บริเวณข้างเคียงและสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง จึงเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ถ้าที่หมูนได้จะช่วยให้อุณหภูมิที่สัมผัสกับคลื่นอย่างสม่ำเสมอ โลหะที่เป็นส่วนประกอบในเตาหรือภาชนะพลาสติกที่ใส่ผลิตภัณฑ์จะไม่ร้อน เนื่องจากโลหะจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟทั้งหมดและพลาสติกจะไม่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟเลย นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากผลิตภัณฑ์จะทำให้ภาชนะที่ใส่ร้อนเนื่องจากผลิตภัณฑ์เกิดการถ่ายเทความร้อนสู่โมเลกุลข้างเคียง

3) การเกิดการสั้น/หมุนระหว่างอนุภาคที่มีขั้ว (interfacial polarization) วิธีการนี้เป็นการรวมเอาวิธี conduction และวิธี dipolar polarization เข้าด้วยกัน เพื่อใช้งานในระบบที่ตัวอย่างเป็นวัสดุนำไฟฟ้ากระจายตัวอยู่ในวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น การกระจายตัวของโลหะในกัมมะถัน กัมมะถันไม่ตอบสนองต่อไมโครเวฟ ส่วนโลหะจะสะท้อนพลังงานของไมโครเวฟ แต่เมื่อนำสารทั้งสองมารวมกันจะกลายเป็นวัสดุที่ดูดคลื่นไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี โดยโลหะจะต้องอยู่ในรูปผงตัวอย่างจะดูดคลื่นและทำให้เกิดความร้อนได้ด้วยวิธีการ dipolar polarization กัมมะถันที่อยู่รอบๆ ผงโลหะจะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวทำละลายสำหรับโมเลกุลมีขั้ว และด้านการเคลื่อนที่ของไอออนด้วยแรงที่มีค่าเท่ากับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ทำให้ไอออนเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดความร้อนขึ้น

2.5 สารเคลือบผิว

สารเคลือบผิว (surface coatings) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในปัจจุบัน ทั้งนี้วัตถุประสงค์ของการเคลือบผิวมีด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำ และสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสี และอายุการใช้งานนานขึ้น
2. เพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงาม เช่น เพื่อให้มีความเงา หรือ เพื่อให้เกิดสี

2.5.1 ประเภทของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- 1) สี (paint) หมายถึง สารที่มีส่วนผสมของผงสี (pigment) สารยึด (binder) หรือ สิ่งนำสี (vehicle) ตัวทำละลาย (solvent) และสารเติมแต่ง (additives)
- 2) วาร์นิช (varnish) คือ สารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยสารยึดเพียงอย่างเดียว
- 3) แล็กเกอร์ (lacquer) ได้แก่ สารละลายซึ่งได้จากการนำเรซินหรือสารยึดมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

2.5.2 องค์ประกอบโดยทั่วไปของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวโดยทั่วไปประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักๆ ดังนี้

- 1) ผงสี (pigment) เป็นสารที่ให้สี และมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิว หรือ กำลั้งซ่อนแสง ผงสีอาจเป็นสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ก็ได้
- 2) สารยึด (binder) คือ สารที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของผงสีและสารประกอบอื่นๆ เข้าไว้ด้วยกัน ให้เกิดเป็นฟิล์มติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ เช่น น้ำมันแห้งเร็ว เรซินธรรมชาติ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น
- 3) ตัวทำละลาย (solvent) มีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดและละลายสารยึดที่เป็นของแข็ง หรือกึ่งแข็งที่อุณหภูมิห้อง
- 4) สารเติมแต่ง (additive) เป็นสารที่เติมลงไปเพียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้มีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น สารเร่งแห้ง (drier) เป็นต้น

2.5.3 การเกิดฟิล์ม

กระบวนการการเกิดฟิล์ม (film formation) คือ การที่สารเคลือบผิวเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นแผ่นฟิล์มที่ติดแน่นบนพื้นผิวที่เราเคลือบ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1) แอพพลิเคชั่น (application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบผิวหน้า หรือทำให้ผิวหน้าของวัสดุเกิดเป็นฟิล์มบางๆ ขึ้น การทำอาจใช้แปรง ลูกกลิ้ง การพ่น หรือ การจุ่มก็ได้

2) ฟิกเซชัน (fixation) เป็นการทำให้ฟิล์มติดแน่น ไม่หลุดออกจากผิวหน้า และ ไม่เกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่ไม่ต้องการ กรณีที่เป็นสารเคลือบผิวที่มีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ การเกิดฟิล์มในขั้นตอนฟิกเซชัน จะเกิดโดยการระเหยของตัวทำละลายหรือถ้าสารเคลือบผิวเป็นแบบระบบลาเท็กซ์ (latex system) ขั้นตอนฟิกเซชัน จะเกิดโดยอาศัยการระเหยของน้ำ

3) การบ่ม (curing) เป็นการทำให้ฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนฟิกเซชันแล้วมีความทนทานดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้แสง ความร้อนหรืออากาศ เช่น สีน้ำมันทาบ้านจะเกิดการบ่ม โดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นฟิล์มแห้งแข็งที่มีความทนทานเพิ่มขึ้น หรือการนำเคลือบ (enamel) ที่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตไปอบ ก็เป็นวิธีการบ่มอีกวิธีหนึ่ง

กระบวนการการเกิดฟิล์มของสารเคลือบผิวบางชนิด ไม่จำเป็นจะต้องมี 3 ขั้นตอนเสมอไป เช่น แล็กเกอร์ มีขั้นตอนฟิกเซชันและการบ่มรวมกันโดยอาศัยการระเหยของตัวทำละลายระหว่างการแอพพลิเคชั่น เป็นต้น

2.5.4 การแห้งของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวจะแห้งโดยกรรมวิธีต่างๆ กัน ได้ 2 แบบ คือ

1) การแห้งโดยกรรมวิธีทางกายภาพ (physical drying) กระบวนการแห้งตัวของฟิล์ม เกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย กลายเป็นฟิล์มที่ยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิ (secondary force) อย่างอ่อนๆ ฟิล์มที่ได้ยังคงละลายได้ง่ายในตัวทำละลายของมัน ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่แห้งด้วยกรรมวิธีนี้ได้แก่ แล็กเกอร์ เป็นต้น

2) การแห้งโดยกรรมวิธีทางเคมี (chemical drying) ฟิล์มที่ได้โดยวิธีนี้จะยึดติดกับผิวของวัสดุที่ถูกเคลือบด้วยพันธะปฐมภูมิ (primary force) จากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ดังนั้นฟิล์มที่ได้จึงทนทานต่อตัวทำละลาย การแห้งด้วยกรรมวิธีทางเคมีนี้อาจเกิดโดย

การแห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้อนุภาคของสารเคลือบที่จับออกซิเจนมีขนาดใหญ่ขึ้น จนรวมตัวเป็นฟิล์มแห้ง การแห้งโดยวิธีนี้อาจเร่งให้แห้งเร็วขึ้นด้วยการเติมสารเร่งแห้ง

การแห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ กระบวนการแห้งตัวซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของสารยึด โดยไม่มีแก๊สออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้อง ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิห้องเรียกสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดบ่มเย็น เช่น พอลิยูรีเทนเรซิน เป็นต้น แต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิสูง เรียกว่าสารเคลือบผิวชนิดอบ [8]

2.6 สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน (polyurethane) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพอลิคาร์บาเมต เป็นอนุพันธ์เอสเทอร์แอมิดของกรดคาร์บาเมิก ($R_2NHCOOH$) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารเคลือบผิว อิลาสโตเมอร์ เส้นใย หรือ โฟมทั้งชนิดแข็งและยืดหยุ่น เป็นต้น [9]

พอลิยูรีเทนสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง ได- หรือ พอลิไอโซไซยาเนต และ ได- หรือ พอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ หรือสารประกอบอื่นๆ ที่มีไฮโดรเจนอะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล โดยอาศัยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบขั้น (step polymerization)

ในปี ค.ศ. 1848 Wurtz พบว่าเอทิลไอโซไซยาเนตสามารถทำปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์ ได้ เอทิลคาร์บาเมต ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า ยูรีเทน ดังสมการ



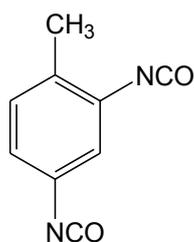
ในงานเคลือบผิวสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนตัวหนึ่งจะต้องมีฟังก์ชันแนลิตี (functionality) อย่างน้อยเท่ากับ 3 ซึ่งอาจได้มาจาก ไตรออล และไดไอโซไซยาเนต หรือไดออล และ ไตรไอโซไซยาเนต แต่โดยทั่วไปมักให้มีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูงกว่า [8]

2.6.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน

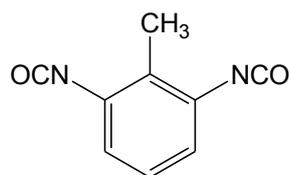
1) ไอโซไซยาเนต (isocyanate)

ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้มีเพียง 2 ชนิด ในขณะที่สารประกอบไฮดรอกซิลที่ใช้มีมากมายหลายชนิด ส่วนไอโซไซยาเนต 2 ชนิดดังกล่าวได้แก่

- TDI ที่ผลิตในทางการค้ามี 2 ประเภทคือ TDI 80 / 20 และ TDI 60 / 40 ซึ่งตัวเลขที่ตามหลังแสดงอัตราส่วนร้อยละของผลผสมของ 2,4- และ 2,6- isomers ตาม ลำดับ ดังสูตรโครงสร้าง



Toluene 2,4-diisocyanate
(2,4-TDI)

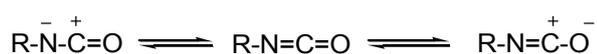


Toluene 2,6-diisocyanate
(2,6-TDI)

โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมเคลือบผิวนิยมใช้ TDI 80 /20 มากกว่า TDI 60 /40 เนื่องจากหมู่ไอโซไซยาเนตในตำแหน่งที่ 4 มีความว่องไวมากกว่าในตำแหน่งที่ 6 [9]

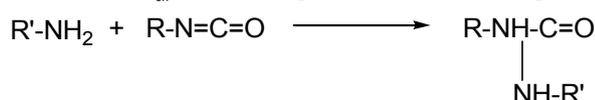
ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนต

หมู่ไอโซไซยาเนตมีโครงสร้างแบบเรโซแนนซ์ (resonance) และมีขั้ว ดังโครงสร้าง



ดังนั้นไอโซไซยาเนตจึงเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับสารประกอบที่มีไฮโดรเจนที่ว่องไว ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต กับสารประกอบที่มีไฮโดรเจนอะตอมในโครงสร้างมีดังนี้

- แอมีน เมื่อทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตจะได้ยูเรีย ดังสมการ



- น้ำ ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจะได้กรดคาร์บอนิกซึ่งไม่เสถียร และจะแตกตัวได้แอมีนองศาที่ 1 (primary amine) และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

2.6.2 สมบัติของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

สารเคลือบผิวที่ได้จากพอลิยูรีเทนมีสมบัติดังนี้ คือ

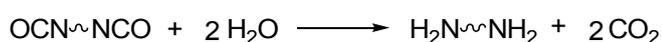
- 1) พันธะยูรีเทนเกิดไฮโดรลิซิสได้ยาก จึงทนต่อต่าง น้ำ และกรดได้ดี
- 2) ฟิล์มของพอลิยูรีเทนจะทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ โดยเฉพาะตัวทำละลาย แอโรแมติก และ คลอริเนตไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งยังทนต่อน้ำมันด้วย
- 3) ฟิล์มที่ผ่านการบ่มเต็มที่แล้ว จะมีแรงยึดผิวหน้าดี มีความทนทานต่อการขีดสี สูง มีความเหนียว ทนทานต่อลมฟ้าอากาศ
- 4) สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน ซึ่งมีแอโรแมติกไอโซไซยาเนตเป็นองค์ประกอบ มักจะเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต และเหลืองง่ายขึ้นถ้าโมเลกุลมีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจนได้ เชื่อกันว่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปออกซิไดส์ หมู่อะโรมาติกให้เกิดเป็นสารสีเหลือง [8]

2.6.3 ประเภทของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

สารเคลือบผิวจากพอลิยูรีเทนสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด คือ

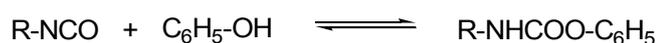
- 1) ยูรีเทนออยล์ หรือ ยูรัลคิต (urethane oil or uralkyd; ASTM type 1) เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับกลีเซอไรด์ที่ได้จากกระบวนการแอลกอฮอล์ลิซิสของน้ำมัน
- 2) พอลิยูรีเทนชนิด 1 ส่วนแบบบ่มด้วยความชื้น (one-pack moisture cured urethane; ASTM type 2) ประกอบด้วยพรีพอลิเมอร์ซึ่งมีหมู่ไอโซไซยาเนตอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ พรีพอลิเมอร์ที่ใช้ทั่วไปคือพอลิอีเทอร์ที่ปลายโซ่เป็นหมู่ไอโซไซยาเนต

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของพอลิยูรีเทนชนิดนี้คือ น้ำจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตเกิดเป็นหมู่อะมิโน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับหมู่ไอโซไซยาเนตที่มีอยู่ในพรีพอลิเมอร์ เกิดเป็นโมเลกุลที่ใหญ่กว่าเดิม ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะระเหยออกไปพร้อมตัวทำละลาย ดังสมการ



พอลิยูรีเทนชนิดนี้ต้องการความชื้นสัมพัทธ์อย่างน้อยที่สุด 30% ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จึงจะเกิดการบ่มได้รวดเร็วพอเพียง

3) พอลิยูรีเทนชนิด 1 ส่วนแบบอบ (one-pack urethane stoving systems; ASTM type 3) โดยการปิด (block) หมู่ไอโซไซยาเนตด้วยฟีนอล ซึ่งจะเกิด adduct คือ ฟีนิลยูรีเทน (phenyl urethane) ที่ไม่เสถียร และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส เกิดเป็นหมู่ไอโซไซยาเนตขึ้นมาใหม่ ดังนี้



หมู่ไอโซไซยาเนตที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเอสเทอร์ที่ใส่รวมอยู่ด้วย และในขณะเดียวกัน ฟีนอลที่เกิดขึ้นจะระเหยไป ถ้าอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส

4) พอลิยูรีเทนชนิด 2 ส่วนแบบบ่มด้วยความชื้นและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (two-pack moisture cured urethane plus catalyst; ASTM type 4) ได้จากปฏิกิริยาระหว่างพรีพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไอโซไซยาเนตอิสระกับความชื้น โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันคือ เมทิลไดเอทานอลแอมีน

5) พอลิยูรีเทนชนิด 2 ส่วน (two-pack polyisocyanate plus polyol; ASTM type 5) ได้จากปฏิกิริยาระหว่างพรีพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไอโซไซยาเนตอยู่ที่ปลายโซ่ กับพอลิเอสเทอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ปลายโซ่ พอลิยูรีเทนชนิดนี้มีจุดอ่อน คือ ทำแล้วต้องใช้งานให้หมด มิฉะนั้นถ้าเหลือจะแข็งตัว [11]

2.7 ยูรีเทนออยล์

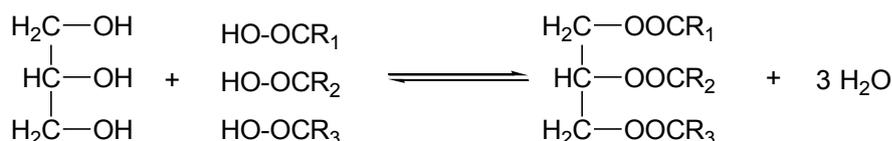
ยูรีเทนออยล์ (urethane oil) หรือยูรีลคิดจัดเป็นพอลิยูรีเทนที่ดัดแปรด้วยน้ำมัน เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับกลีเซอไรด์ที่ได้จากกระบวนการแอลกอฮอล์ซิสของน้ำมัน ยูรีเทนออยล์ สามารถพิจารณาเป็นอัลคิเดเรซินได้เมื่อแทนที่ไดไอโซไซยาเนตด้วยฟแทลิก แอนไฮไดรด์ ซึ่งอัลคิเดเรซินเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแอนไฮไดรด์กับกลีเซอไรด์ที่ได้จากกระบวนการแอลกอฮอล์ซิสของน้ำมัน

ลักษณะของฟิล์มยูรีเทนออยล์ขึ้นกับธรรมชาติของน้ำมัน พอลิออล และไดไอโซไซยาเนต ที่ใช้ในการผลิต โดยทั่วไปการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์จะใช้อัตราส่วนระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนตต่อหมู่ไฮดรอกซิลน้อยกว่า 1 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียร และป้องกันไม่ให้มีไอโซไซยาเนตเหลืออยู่ [12]

2.7.1 สารตั้งต้นในการเตรียมยูรีเทนออยล์

1) น้ำมัน

น้ำมันเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กล่าวคือ เป็นไตรเอสเทอร์ (triester) ของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน ดังนี้



เมื่อ $R_1, R_2, R_3 =$ โซ่กรดไขมัน ($\text{C}_9\text{-C}_{22}$)

น้ำมัน หรือ กรดไขมันที่ใช้ในยูรีเทนออยล์จะเป็นตัวกำหนดสมบัติการแห้งตัวของยูรีเทนออยล์ เนื่องจากกลไกการแห้งตัวของยูรีเทนออยล์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พอลิเมอไรเซชันของพันธะคู่ที่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลของกรดไขมัน หรือน้ำมัน [11]

โดยทั่วไปปริมาณพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของน้ำมันวัดได้จากค่าไอโอดีน (iodine value) น้ำมันที่มีค่าไอโอดีนยิ่งสูง แสดงว่ายิ่งมีพันธะคู่มาก ดังนั้นจึงสามารถแห้งตัวในอากาศได้เร็วกว่าน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนต่ำ [12]

สำหรับน้ำมันที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ นิยมใช้น้ำมันประเภทน้ำมันแห้งเร็ว (drying oil) เช่น น้ำมันลินสีด (linseed oil) และน้ำมันแห้งช้า (semi-drying oil) ตัวอย่างเช่น น้ำมันทานตะวัน (sunflower oil) น้ำมันคำฝอย (safflower oil) น้ำมันถั่วเหลือง (soybean oil) และน้ำมันทอลล์ (tall oil) น้ำมันละหุ่งที่ถูขจัดน้ำออก (dehydrated castor oil; DCO) เป็นต้น [11]

นอกจากนี้ น้ำมันยังมีผลต่อสมบัติอื่นๆ ที่สำคัญของยูรีเทนออยล์ ซึ่งปริมาณและชนิดของน้ำมันที่ใช้จะมีผลต่อสมบัติของยูรีเทนออยล์ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 – 2.2 [12]

ตารางที่ 2.1 ผลของปริมาณของน้ำมันที่มีต่อสมบัติของยูรีเทนออยล์

Urethane oil	Oil	Drying time	Color	Flexibility	Mineral Spirits Solubility
100	0	↓ เพิ่มขึ้น	↓ เพิ่มขึ้น	↓ เพิ่มขึ้น	↓ เพิ่มขึ้น
0	100				

ตารางที่ 2.2 ผลของชนิดของน้ำมันที่มีต่อสมบัติของยูรีเทนออยล์

Oil	Iodine value	Drying time	Color	Gloss retention
Tung	165			
Dehydrated castor	140	↓ เพิ่มขึ้น	↓ เพิ่มขึ้น	↓ เพิ่มขึ้น
Sunflower	145	↓	↓	↓
Soya bean	140			

2) ไดไอโซไซยาเนต และ พอลิออล

ไดไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้คือโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (TDI) ส่วนพอลิออลที่ใช้จะมีหมู่ฟังก์ชันตั้งแต่ 2 ถึง 6 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

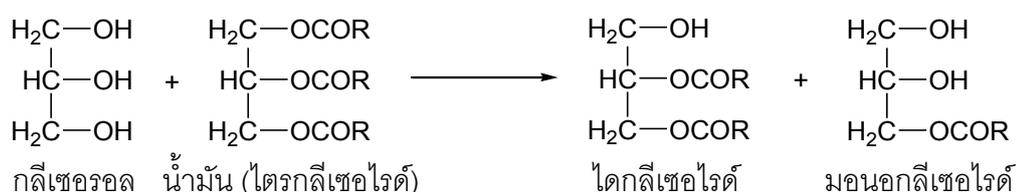
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของพอลิแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

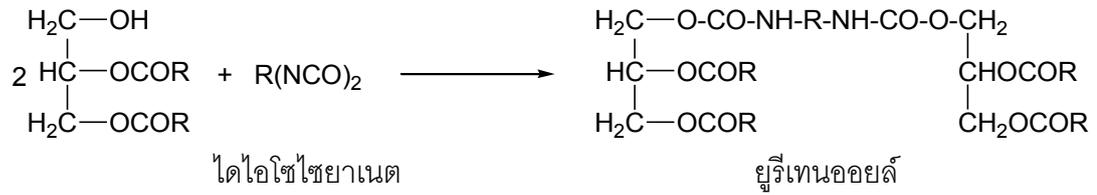
ชนิดของพอลิแอลกอฮอล์	โครงสร้างทางเคมี	Functionality
Ethylene glycol	$\text{HOCH}_2\text{H}_4\text{OH}$	2
Diethylene glycol	$\text{HOC}_2\text{H}_4\text{OC}_2\text{H}_4\text{OH}$	2
Propylene glycol	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	2
Glycerine	$\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	3
Trimethylolethane	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_3$	3
Trimethylolpropane	$\text{C}_2\text{H}_5\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_3$	3
Pentaerythritol	$\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$	4
Sorbitol	$\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	6

2.7.2 การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

ยูรีเทนออยล์สังเคราะห์ได้จากการนำของผสมระหว่างน้ำมันและพอลิแอลกอฮอล์ มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 230-245 องศาเซลเซียส น้ำมันจะเกิดปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิสเปลี่ยนจากสารประกอบไตรกลีเซอไรด์เป็นไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับโพลีอินไดไฮโดรไซยาเนต ที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส โดยหมู่ไฮดรอกซิลในไดกลีเซอไรด์ หรือมอนอกลิเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไดไฮโดรไซยาเนตได้พันธะยูรีเทน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำมันกับไตรออลและไดไฮโดรไซยาเนตในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์สามารถแสดงได้ดังนี้ [11]





R = ไฮดรอกซีแมน (C₉ - C₂₂)

2.7.3 กลไกของการเกิดพอลิเมอร์เซชันและการแห้งตัวของยูรีเทนออยล์

กรรมวิธีการแห้งตัวของฟิล์มจากการเกิดออกซิเดชันแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

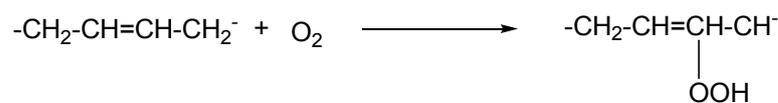
ขั้นตอนที่ 1 : การออกซิไดส์เอง (autoxidation) น้ำมันรับออกซิเจนเข้ามาเกิดเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (peroxy-compounds)

ขั้นตอนที่ 2 : การเกิดฟิล์ม (film formation) สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากขั้นตอนที่ 1 จะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นโมเลกุลที่ซับซ้อนซึ่งเชื่อมกันอยู่โดยพันธะปฏุมภูมิ

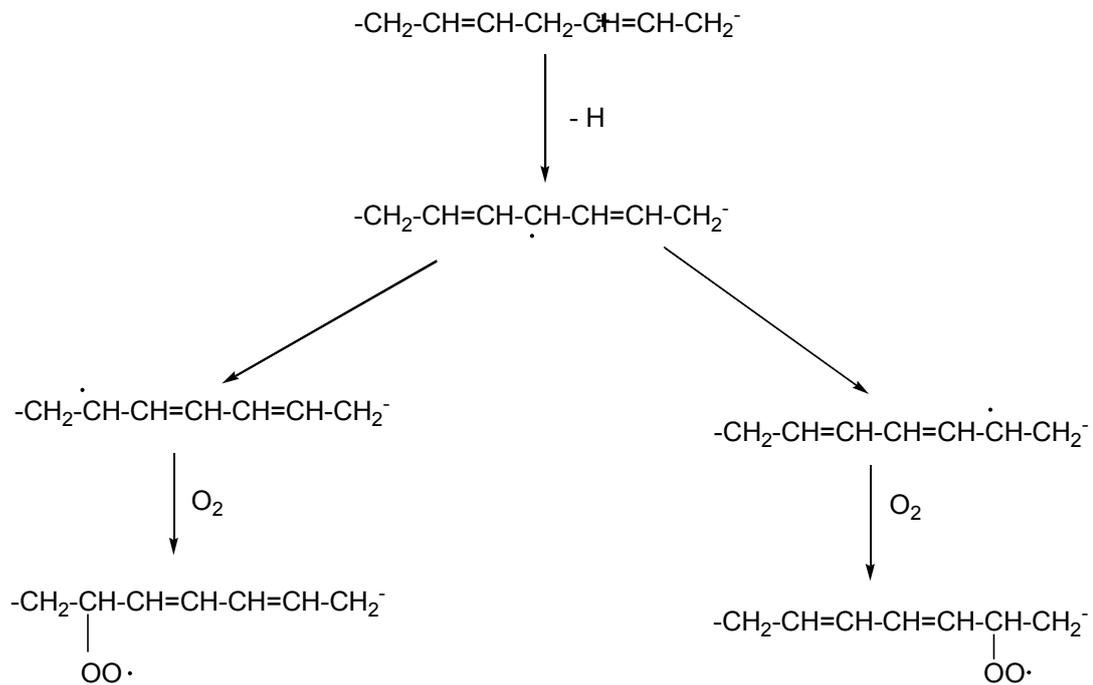
ขั้นตอนที่ 3 : การทิ้งไว้ให้บ่มตัว (aging) ฟิล์มรับออกซิเจนต่อไปอีกแล้วเกิดการสลายตัวบางส่วนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้

1) กระบวนการออกซิไดส์เอง (autoxidation process)

ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยาตรงหมู่เมทิลีนที่อยู่ตำแหน่งแอลฟากับพันธะคู่เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ดังนี้

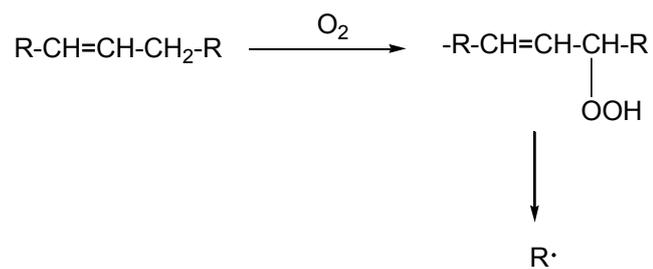


ในกรณีของเมทิล และเอทิลเอสเทอร์ของกรด 9,12-ลิโนลีนิกหลังปฏิกิริยาการออกซิไดส์เอง จะเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่มีพันธะคู่ 2 พันธะเป็นแบบพันธะคู่สลับเดี่ยวซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

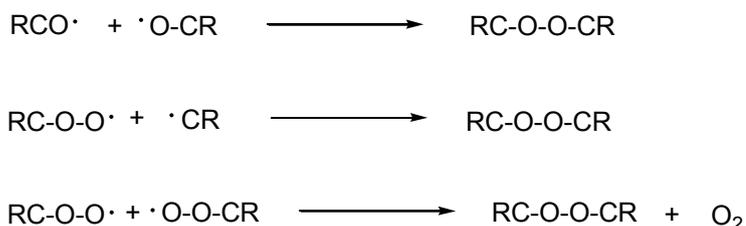


จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาการแข็งตัวของน้ำมัน เกิดโดยมีกลไกเป็นแบบฟรีเรดิคัล (free radical) ดังนี้

ขั้นเริ่มต้น : น้ำมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะสลายตัวให้ฟรีเรดิคัล



ขั้นแพร่ขยาย : ฟรีเรดิคัลที่เกิดขึ้นจากขั้นเริ่มต้นจะเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะคู่ของโมเลกุลอื่นๆ ของน้ำมันเกิดเป็นโมเลกุลที่ใหญ่กว่าเดิม โดยมีฟรีเรดิคัลอยู่ที่ปลายโมเลกุล



2.7.4 สมบัติและการใช้งานของยูรีเทนออยล์

ยูรีเทนออยล์เป็นที่นิยมอย่างมากในงานวารันิชเคลือบพื้น เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ

- ทนทานต่อการขัดสี
- ทนทานต่อสารเคมี และตัวทำละลาย
- มีความอ่อนตัวไม่เปราะ
- มีความแข็ง
- ทนต่อความชื้น
- รักษาความเงาของฟิล์มได้ดี
- การแห้งตัวของฟิล์มเร็ว
- มีสมบัติการกระจายตัวดี

ยูรีเทนออยล์มีจุดอ่อนอยู่บ้างคือฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่มีแอโรแมติกไดไอโซไซยาเนต เป็นองค์ประกอบมักจะเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการขึ้นเหลืองได้ โดยเตรียมยูรีเทนออยล์จากอะลิฟาติกไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงแทน

นอกเหนือจากงานวารันิชเคลือบพื้น ยูรีเทนออยล์สามารถนำไปใช้งานทางด้านอื่น ตัวอย่างเช่น ยูรีเทนออยล์ที่มีน้ำมันปริมาณสูงจะใช้เป็นสารยึดในหมึกพิมพ์ เพื่อช่วยให้ผงสีมีสมบัติเปียกและกระจายตัวดี หรือ ยูรีเทนออยล์ที่ปราศจากหมู่คาร์บอกซิล สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับผงโลหะอย่างดีเยี่ยม จึงใช้เป็นสารยึดในซิงกิริชไพรมเมอร์ (zinc - rich primers) และสีบรอนซ์ (bronze paints) เป็นต้น [8]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการรีไซเคิลทางเคมีเป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อย่อยสลายพืดให้แตกสลายเป็นสารโมเลกุลเล็กชนิดต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมพอลิเมอร์ ชนิดอื่นๆ ต่อไป ได้ ซึ่งกระบวนการรีไซเคิลทางเคมีทำได้หลายวิธี เช่น ไกลโคลิซิส (glycolysis) เมทาโนลิซิส

(methanolysis) อะมิโนลิซิส (aminolysis) และไฮโดรลิซิส (hydrolysis) โดยวิธีการที่มีการศึกษาวิจัยกันมากที่สุด คือการรีไซเคิลพีดีด้วยปฏิกิริยาไกลโคลิซิส [13] ทั้งนี้เพราะเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ไม่ก่อให้เกิดสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนในระบบและให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคลิซิสพีดีประกอบไปด้วยโพลิโกลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายโมเลกุล จึงสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารเคมีหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ต่อไปได้ เช่น การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยนำโกลโคไลซ์โพรดักส์ไปทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และสไตรีนมอนอเมอร์ นอกจากนี้ ยังมีการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์สำหรับงานเคลือบผิว โดยการนำโกลโคไลซ์โพรดักส์ไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันและโกลูอินไดไอโซไซยาเนต

ในปี ค.ศ. 2004 Saravari และคณะ [14] ได้นำขวดพีดีที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการไกลโคลิซิส โดยใช้โพรพิลีนไกลคอล (PG) เป็นสารย่อยสลายที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PET:PG เท่ากับ 37.5: 62.5 และใช้ซิงก์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วนำโกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันถั่วเหลืองและโกลูอินไดไอโซไซยาเนตเพื่อสังเคราะห์เป็นยูรีเทนออยล์ ที่อัตราส่วนระหว่างหมู่ OH:NCO เท่ากับ 1: 1 ถึง 1: 0.7 ทั้งที่ใช้และไม่ใช้เมทานอลเป็นสารบดออกจากการทดลองพบว่า ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้ทุกสูตรมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีเหลืองอ่อน และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยการเติมสารบดออกมีผลทำให้ยูรีเทนออยล์มีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าการไม่เติมสารบดออก นอกจากนี้ยังแห้งตัวเป็นฟิล์มได้เร็วกว่า โดยฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้ทุกสูตรมีความแข็งและความติดแน่นดี มีความทนทานต่อน้ำและกรดดีเยี่ยม และมีความทนต้งพอใช้ อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่ได้มีความอ่อนตัวต่ำและความทนทานต่อการขีดขูดต่ำเมื่อเทียบกับฟิล์มยูรีเทนออยล์ทางการค้า

ต่อมาในปี ค.ศ. 2007 Saravari และคณะ [15] ได้ทำการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์จากน้ำมันปาล์มและโกลโคไลซ์โพรดักส์จากขวดพีดีที่ใช้แล้ว โดยในกระบวนการไกลโคลิซิสใช้โพรพิลีนไกลคอล (PG) เป็นสารย่อยสลายที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PET:PG เท่ากับ 37.5: 62.5 และใช้ซิงก์แอซีเตต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำโกลโคไลซ์โพรดักส์ไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์มและโกลูอินไดไอโซไซยาเนตเพื่อสังเคราะห์เป็นยูรีเทนออยล์ ที่อัตราส่วนระหว่างหมู่ OH:NCO เท่ากับ 1:1 ถึง 1:0.8 ทั้งที่ใช้และไม่ใช้เมทานอลเป็นสารบดออก จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนของหมู่ NCO ลดลง หรือเมื่อใช้สารบดออก จะมีผลทำให้ความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของยูรีเทนออยล์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการแห้งเป็นฟิล์มลดลง โดยฟิล์มที่ได้มีความ

แข็งดี มีความอ่อนตัวและมีความทนทานต่อแรงกระแทกดีมาก ความทนน้ำดีเยี่ยม ความทนกรดดี และความทนด่างพอใช้ นอกจากนี้ फिल्मที่ได้ยังมีความติดแน่นที่ดีกว่าฟิล์มยูรีเทนออกยล์ทางการค้า อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการไกลโคไลซิสจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ค่อนข้างยาวนาน กล่าวคือ โดยทั่วไปจะต้องดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 4 – 8 ชั่วโมง [16,17] ทำให้ต้นทุนด้านพลังงานค่อนข้างสูงก่อให้เกิดข้อจำกัดสำคัญในการพัฒนากระบวนการดังกล่าวในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาวิจัยในการนำพลังงานไมโครเวฟมาทดแทนการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม โดยตู้อบไมโครเวฟ จะมีแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไมโครเวฟ ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานในรูปคลื่นไมโครเวฟ แล้วส่งผ่านคลื่นเข้าสู่วัตถุที่สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟจนทำให้โมเลกุลภายในเกิดการสั่นและการหมุนส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นมาภายในทั่วทั้งวัตถุและส่งผ่านสู่โมเลกุลของวัตถุข้างเคียงทำให้เกิดการให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว และพบว่าปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าแหล่งพลังงานความร้อนแบบดั้งเดิมมาก [18]

ในปี ค.ศ. 2008 Li และคณะ [19] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ต่อกระบวนการไฮโดรลิซิสเพ็ตภายใต้พลังงานไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส กำลังของไมโครเวฟที่ใช้ 260 วัตต์ ใช้เวลาดำเนินปฏิกิริยา 210 นาที และใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเพ็ตต่อน้ำเท่ากับ 1:10 พบว่า ซิงก์แอสซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแมงกานีสแอสซิเตต โปแทสเซียมแอสซิเตต และโซเดียมออกซิเลต และปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ร้อยละ 0.4 ต่อน้ำหนักของเพ็ต โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรลิซิสส่วนใหญ่คือ bis-2-hydroxy ethyl terephthalate (BHET)

ในปี ค.ศ. 2008 Pingale และ Shukla [18] ศึกษาการย่อยสลายเพ็ตด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้เอทิลีนไกลคอล (EG) เป็นตัวทำละลาย ในอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง PET:EG เท่ากับ 1:4 ถึง 1:10 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ คือ ซิงก์แอสซิเตต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนต และแบเรียมไฮดรอกไซด์ ที่ปริมาณร้อยละ 0.3 ถึง 1 โดยน้ำหนัก พบว่า ปริมาณ BHET ที่ได้จากการไกลโคไลซิสด้วยไมโครเวฟนั้นใกล้เคียงกับวิธีการให้ความร้อนทั่วไป โดยได้ BHET ปริมาณสูงที่สุด ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง PET:EG เท่ากับ 1:6 และใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก แต่สิ่งที่เห็นได้ชัดคือ เวลาที่ใช้ลดลงอย่างมาก กล่าวคือ จาก 8 ชั่วโมงเหลือเพียงแค่ 35 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ไมโครเวฟซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานได้มาก

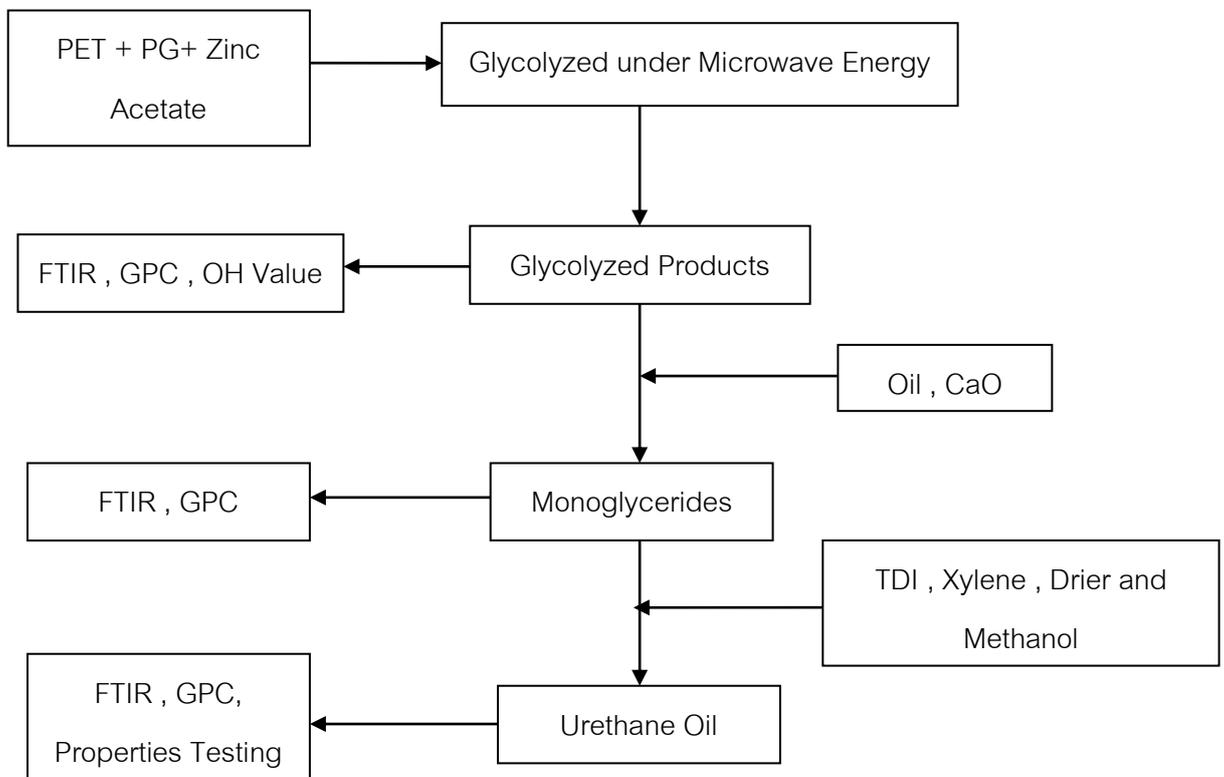
ในปี ค.ศ. 2009 พร้อมภูมิ พันธุ์วิโรจน์ [20] ได้เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีตภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยการนำขวดพีตใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตต่อไกลคอลเท่ากับ 1:6 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิงก์แอสซีเทต โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของพีต จากการทดลอง พบว่า ซิงก์แอสซีเทต โซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการไกลโคไลซ์พีตภายใต้พลังงานไมโครเวฟ และเมื่อนำไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนตเพื่อสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทน ร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1,000 4,000 และ 6,000 โดยใช้กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ที่ใช้ซิงก์แอสซีเทต และโซเดียมไบคาร์บอเนต สามารถนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ได้ทุกชนิด ซึ่งเมื่อนำฟิล์มพอลิยูรีเทนไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า ชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมไกลโคไลซ์โปรดักส์มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว ความแข็ง ความทนแรงดึง และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ จะทำให้ฟิล์มพอลิยูรีเทนมีความเป็นอียาสโตเมอร์มากขึ้น

บทที่ 3

การทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง

นำขวด PET ใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยโพพรพิลีนไกลคอลด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสโดยใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ไกลโคไลซ์พอร์ติกส์ จากนั้นนำไกลโคไลซ์พอร์ติกส์เริ่มการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ โดยทำการวัดค่าไฮดรอกซิลและน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์พอร์ติกส์ จากนั้นสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์โดยนำไกลโคไลซ์พอร์ติกส์ไปทำปฏิกิริยากับโพลูอินไดไฮโดรไซยานเตตและน้ำมันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยการทดลองนี้ใช้น้ำมัน 3 ชนิด คือ น้ำมันลินสีด น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม นำยูรีเทนออยล์ที่ได้ไปหาค่าน้ำหนักโมเลกุลและทดสอบสมบัติพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลและยูรีเทนออยล์ทางการค้า



3.1 การย่อยสลายขวดพีดีซีแล้ว

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. ขวดพีดีซีแล้ว
2. โพรพิลีนไกลคอล จากบริษัท Ajax Chemical (Auburn, NSW, Australia).
3. ซิงก์แอซีเทต จากบริษัท Fluka (Buchs, Switzerland).

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ (microwave reactor) สำหรับทำปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย

- ตู้อบไมโครเวฟยี่ห้อ LG รุ่น MS2127GW (Bangkok, Thailand) และนำมาดัดแปลงสำหรับใช้ในการทดลอง

- ขวดก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร

- ชุดควบแน่น (condenser) สำหรับการรีฟลักซ์

- ตัวจับยึดท่อควบแน่นและมอเตอร์สำหรับใบพัด

2. ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น 100-800 (Schwabach, Germany)

3. เครื่องบดละเอียด (pulverizer) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Pulverisette 15 (Idar-Oberstein, Germany)

3.1.3 เครื่องทดสอบ

1. ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR) รุ่น Thermo Nicolet NEXUS 670 (Nicolet Instrument. Inc., Madison, WI, USA) (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR)

5. เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล หรือ จีพีซี (gel permeation chromatography system, GPC) รุ่น Shimadzu Class-VP (Shimadzu Scientific Instruments, Columbia, USA) (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล (จีพีซี)

3.1.4 วิธีการทดลอง

3.1.4.1 การเตรียมวัสดุดิบ

- 1) นำขวดเพ็ตที่ผ่านการใช้งานแล้วมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า จากนั้นนำมาอบให้แห้งแล้วตัดให้มีขนาดประมาณ 1×1 ตารางเซนติเมตร
- 2) บดขวดเพ็ตที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องบดละเอียด โดยใช้ตะแกรงบด เพื่อให้ผงเพ็ตที่ได้มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

3.1.4.2 การไกลโคลิซิสเพ็ต

- 1) นำผงเพ็ตแล้วบรรจุลงในขวดก้นกลม
- 2) เติมโพพิลีนไกลคอลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเพ็ตต่อไกลคอลเท่ากับ 37.5 : 62.5
- 3) เติมซิงก์แอซิเตต ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพ็ตที่ใช้
- 4) นำขวดก้นกลมไปติดตั้งในตู้อบไมโครเวฟ พร้อมประกอบเข้ากับชุดควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการย่อยสลายขวดเพ็ต

5) ดำเนินปฏิบัติการการย่อยสลายภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงานคงที่เท่ากับ 600 วัตต์ เป็นเวลา 35 นาที โดยมีการกวนและรีฟลักซ์ตลอดการดำเนินปฏิบัติการย่อยสลาย

6) เมื่อครบระยะเวลาดำเนินการปฏิบัติการ จะได้ไกลโคไลซ์โปรตีน ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปี

7) ตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โปรตีนด้วยเทคนิคจีพีซี ด้วยคอลัมน์แบบ PLgel 5 ไมโครเมตร mixed D ใช้เทระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran, THF) เป็น mobile phase และใช้พอลิสไตรีนเป็นสแตนดาร์ด ฉีดด้วยอัตรา 1.0 มิลลิลิตร/นาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ที่อุณหภูมิ 30 °C

8) วิเคราะห์ค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โปรตีน เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณไฮโซไซยานเนตที่สมมูลในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ในขั้นต่อไป ตามมาตรฐาน ASTM D 2849-69 (Method C)

3.2 การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

3.2.1 วัสดุและสารเคมี

1. ไกลโคไลซ์โปรตีนที่ได้จากการย่อยสลายเปิดในหัวข้อ 3.1
2. กลีเซอรอล
3. น้ำมันลินสีด ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน)
4. น้ำมันถั่วเหลือง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน)
5. น้ำมันปาล์ม ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท มรกต อินดัสตรี จำกัด
6. แคลเซียมออกไซด์ ของบริษัท Fluka (Buchs, Switzerland).
7. ไซลีน ของบริษัท Labscan Asia (Bangkok, Thailand).

8. โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (TDI 80/20) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน)

9. สารเร่งแห้ง (drier) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน).

10. เมทานอล ของบริษัท Fluka (Buchs, Switzerland).

11. ยูรีเทนออยล์ทางการค้า ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน)

น้ำมันลินสีดที่ใช้ในการทดลอง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท สยามเคมีคัล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีสมบัติดังนี้

ค่าของกรด	2
ค่าไอโอดีน	178
ความถ่วงจำเพาะ	0.927
สี (การ์เดนอร์)	2
ความหนืด (สตอกส์)	0.50
ค่าสะพานนิฟิเคชัน	188

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้ในการทดลอง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท สยามเคมีคัล อินดัสตรี จำกัด(มหาชน) ซึ่งมีสมบัติดังนี้

ค่าไอโอดีน	123-142
ความถ่วงจำเพาะ	0.916-0.922
ค่าสะพานนิฟิเคชัน	188-195
สารที่สะพานนิฟิเคชันไม่ได้, ร้อยละ	1-1.5
ดัชนีหักเห, 25 °C	1.471-1.475

น้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลอง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท มรกต อินดัสตรี จำกัด
ซึ่งมีสมบัติดังนี้

ค่าของกรด	2
ค่าไอโอดีน	52.25
ความถ่วงจำเพาะ	0.907
สี (การ์ตเนอร์)	4
ความหนืด (สตอกส์)	0.70
ปริมาณกรดไขมันอิสระ	0.050%
ค่าสะaponิฟิเคชัน	200

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดก้นกลม 4 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เครื่องกวน
3. ชุดควบคุมอุณหภูมิ
4. เครื่องควบคุมแรงแบบกลับไหลกลับพร้อมข้อต่อ
5. ท่อนำแก๊สไนโตรเจน
6. เครื่องชั่ง
7. ตัวตักน้ำ

3.2.3 เครื่องทดสอบ

1. พูเรียทรานสฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR) รุ่น Thermo Nicolet NEXUS 670 (Nicolet Instrument. Inc., Madison, WI, USA)

2. เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล หรือ จีพีซี (gel permeation chromatography system, GPC) รุ่น Shimadzu Class-VP (Shimadzu Scientific Instruments, Columbia, USA)

3.2.4 วิธีการทดลอง

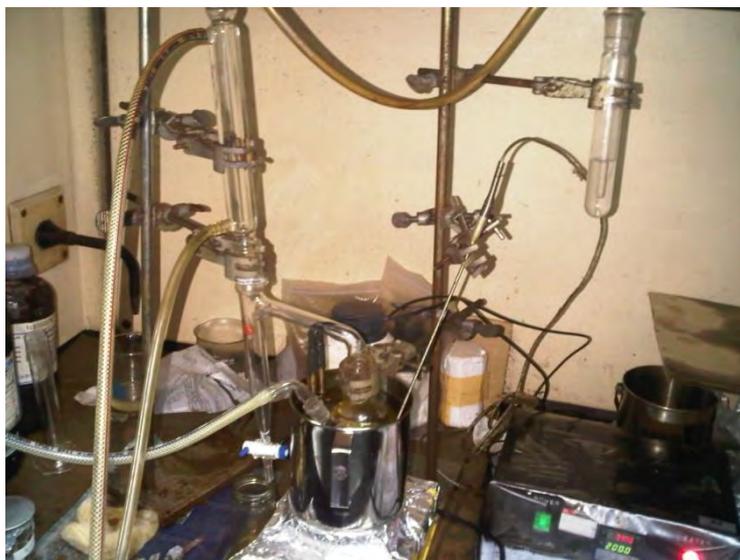
3.2.4.1 การเตรียมมอนอและไดกลีเซอไรด์จากปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ลิซิสระหว่างน้ำมันกับไกลโคไลซ์โพรดักส์หรือกลีเซอรอล

- 1) ใส่ไกลโคไลซ์โพรดักส์หรือกลีเซอรอล และน้ำมัน ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 ลงในขวดก้นกลม 4 คอซึ่งต่อกับเครื่องควบแน่นแบบกลั่นไหลกลับที่ต่อกับตัวดักน้ำ เพื่อกำจัดน้ำและความชื้นออกจากระบบ และท่อนำแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- 2) ให้ความร้อนกับของผสมจนกระทั่งอุณหภูมิถึง 200 °C พร้อมทั้งกวนของผสมตลอดเวลาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน
- 3) เติมแคลเซียมออกไซด์และให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิของผสมถึง 245 °C และให้อุณหภูมิของของผสมคงที่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) นำของผสม 1 ส่วนมาทดสอบการละลายในเอทานอล 2 ส่วน จนกระทั่งเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์จึงลดความร้อนลง ทิ้งไว้ให้เย็นจนของผสมมีอุณหภูมิ 50 °C นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งก็คือมอนอและไดกลีเซอไรด์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR Spectroscopy และ GPC
- 5) เติมไซลีนปริมาณครึ่งหนึ่งของค่าที่แสดงในตาราง 3.1 ลงในของผสม

ตารางที่ 3.1 สูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

สูตร	โพลีโพลีไฮดรอกซี โพรดีกส์ (g)	กลีเซอรอล (g)	น้ำมัน (g)	TDI (g)	ไซลีน (g)	CaO (mg)	สาร เร่งแห้ง (mg)	เมทานอล (g)
Gp-Flaxseed urethane oil	100	-	98.59	36.15	100.60	100	100	1
Gp-Soybean urethane oil	100	-	98.59	36.15	100.60	100	100	1
Gp-Palm urethane oil	100	-	98.59	36.15	100.60	100	100	1
Conventional Flaxseed urethane oil	-	100	257.14	255.10	262.39	100	100	1
Conventional Soybean urethane oil	-	100	257.14	255.10	262.39	100	100	1
Conventional Palm urethane oil	-	100	257.14	255.10	262.39	100	100	1

อัตราส่วนระหว่างหมู่ OH:NCO = 1: 0.9



รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

3.2.4.2 การเตรียมยูรีเทนออยล์จากมอนอและไดกลีเซอไรด์

1) เติมโพลีอินไดไฮโซไซยานาต ไสลินส่วนที่เหลือ และสารเร่งแห้ง ซึ่งผสมอยู่ด้วยกันลงในมอนอและ ไดกลีเซอไรด์อย่างช้าๆ และเพิ่มความร้อนจนกระทั่งของผสมมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 75 – 80 °C และให้อุณหภูมิของของผสมคงที่ ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไป ณ อุณหภูมินี้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2) ทิ้งให้เย็นแล้วเติมเมทานอลลงไป

3) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งก็คือยูรีเทนออยล์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR Spectroscopy และ GPC

3.3 การทดสอบสมบัติของยูรีเทนออยล์

3.3.1 การทดสอบสมบัติยูรีเทนออยล์ในสถานะของเหลว

3.3.1.1 ความหนืด (Viscosity)

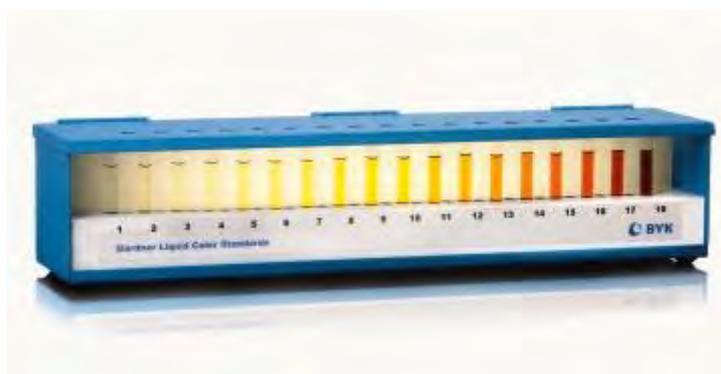
ในการทดลองนี้วัดโดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield DV-III programmable viscometer (Brookfield Engineering Labs, Stoughton, MA USA) (รูปที่ 3.5) โดยใช้ความเร็วรอบ 100 rpm และใช้ spindle เบอร์ 21



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์

3.3.1.2 สี (Color)

การวัดสีทำได้โดยบรรจุสารเคลือบผิวในหลอดทดสอบ แล้วนำไปเทียบกับสีของสารละลายสีมาตรฐาน (Gardner solution) ซึ่งเป็นสารละลายผสมในน้ำ (aqueous solution mixture) ของ $\text{FeCl}_3 + \text{CCl}_4 + \text{HCl}$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กันและมีเบอร์วัดสีตั้งแต่เบอร์ 1 – 18 โดยที่เบอร์ 1 สีจะอ่อนที่สุด และเบอร์ 18 สีจะเข้มที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 การรายงานผลให้บันทึกเป็นหมายเลขของมาตรฐานที่เทียบได้พอดี หรือที่อ่อนกว่าหรือเข้มกว่า เช่น ค่าของสีอยู่ระหว่าง 3 และ 4 อาจรายงานลำดับขั้นดังนี้ 3- 3 3.5 3+ 4- และ 4



รูปที่ 3.6 ชุดเทียบสีแบบการ์ดเนอร์

3.3.1.3 ปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยไม่ได้ (% Nonvolatile Content)

การหาปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยไม่ได้ทำได้โดยการนำสารเคลือบผิวหนัก 5 กรัม (ซึ่งน้ำหนักให้แน่นอน) ใส่ในภาชนะกั้นแบน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น นำมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบต่ออีกประมาณ 30 นาที แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งจนน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยน้ำหนักส่วนที่หายไปคือ ปริมาณสารที่ระเหยได้ ดังนั้น

$$\text{ปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยไม่ได้} = 100 - \frac{(\text{น้ำหนักสารก่อนอบ} - \text{น้ำหนักสารหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักสารก่อนอบ}}$$

3.3.1.4 ค่าของกรด (Acid Number)

ค่าของกรดเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของกรดอิสระที่มีในสารตัวอย่าง การวิเคราะห์หาค่าของกรดตามมาตรฐาน ASTM D1639 เริ่มจากการนำสารตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนไปละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลาง แล้วไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 N โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) เป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นคำนวณหาค่าของกรดโดยใช้สูตรคำนวณดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าของกรด} = \frac{56.1 \times \text{ความเข้มข้นของ KOH} \times \text{มิลลิลิตรของ KOH ที่ใช้}}{\text{น้ำหนักเป็นกรัมของสารที่ใช้}}$$

3.3.1.5 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

นำยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้ไปทดสอบการละลายในตัวทำละลายประเภทต่างๆ เช่น ไชลีน , ไวท์สปีริต และนอร์มัลปิพทานอล

3.3.2 ระยะเวลาการแห้งตัว (Drying time)

การหาระยะเวลาการแห้งตัวของฟิล์มยูรีเทนออยล์ ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1640-95 เริ่มจากการนำยูรีเทนออยล์มาปาดเคลือบลงบนแผ่นเหล็กด้วยแอปพลิเคเตอร์ เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มเปียก 90 ไมโครเมตร และจับเวลาการแห้งตัวของฟิล์ม โดยการแห้งตัวของฟิล์มของสารเคลือบผิวซึ่งแห้งได้เองในอากาศสามารถแบ่งตามระยะเวลาการแห้งได้ตามลำดับดังนี้

1. แห้งฝุ่นไม่ติด (dust dry) หมายถึง การแห้งถึงขั้นที่ฝุ่นไม่ติดพื้นผิวที่เคลือบไว้แล้วอีกต่อไป
2. แห้งที่ผิว (surface dry) หมายถึง การแห้งเฉพาะผิวหน้า แต่ข้างล่างยังนิ่ม และเหนียว
3. แห้งแตะได้ (touch dry) หมายถึง การแห้งถึงขั้นที่แตะเบาๆแล้วไม่มีรอยนิ้วมือติดอยู่
4. แห้งแตะไม่ติด (tack-free dry) หมายถึง การแห้งถึงขั้นที่ผิวไม่อยู่ในสภาพเหนียวติด แม้ว่าจะมีแรงกด การแห้งขั้นนี้เป็นระยะเวลาที่เมื่อใช้นิ้วกดเบาๆที่ ผิวฟิล์มจะไม่มีรอยเกิดขึ้นบนผิวฟิล์ม
5. แห้งแข็ง (hard dry) หมายถึง การแห้งถึงขั้นที่สามารถเคลือบอีกชั้นหนึ่งทับได้ด้วยแปรง ทดสอบโดยใช้นิ้วหัวแม่มือกดลงบนผิวฟิล์มแล้วหมุนรอบๆ ถ้าผิวไม่แตกร้าวหรือเสียหายแสดงว่าผิวเคลือบนั้นแห้งแข็งแล้ว

3.3.3 การทดสอบสมบัติของฟิล์มยูรีเทนออยล์

3.3.3.1 การเตรียมฟิล์มยูรีเทนออยล์

นำยูรีเทนออยล์มาปาดเคลือบลงบนแผ่นทดสอบที่เป็นแผ่นโลหะหรือแผ่นกระจกด้วยเครื่องปาดฟิล์ม หรือแอปพลิเคเตอร์ (Sheen Instruments, Surrey, England) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งควบคุมความหนาของฟิล์มเปียกได้ตั้งแต่ 30 60 90 และ 120 ไมโครเมตร สำหรับการทดลองนี้ใช้ความหนาของฟิล์มเปียกเท่ากับ 90 ไมโครเมตร จากนั้นทิ้งไว้จนฟิล์มแห้งแล้วนำไปทดสอบสมบัติต่อไป



รูปที่ 3.7 เครื่องปาดฟิล์ม

3.3.3.2 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็ง หมายถึง ความสามารถของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่ทนต่อการเกิดรอยจากการกด หรือขูดขีดด้วยของแข็ง การหาความแข็งของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่ใช้ทั่วไปคือ การทดสอบการขูดขีด (scratch test) ซึ่งก็คือ การหาความต้านทานต่อการแทงทะลุของฟิล์มของสารเคลือบผิว โดยการขีดด้วยเข็มทดสอบด้วยเครื่อง mechanical scratch test apparatus (Sheen Instruments, Surrey, England) (รูปที่ 3.8) ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 285 เล่ม 32-2527 การรายงานความแข็งของฟิล์มของตัวอย่างทดสอบก็คือ น้ำหนักน้อยที่สุด (กรัม) ที่ทำให้เข็มแทงทะลุผิวของฟิล์มเคลือบ



รูปที่ 3.8 Mechanical scratch test apparatus

3.3.3.3 ความอ่อนตัว (Flexibility)

การทดสอบความอ่อนตัวของฟิล์มยูรีเทนออยล์ ทำได้โดยการทดสอบความทนทานต่อการแตกร้าว หรือการหลุดล่อนจากแผ่นทดสอบเมื่อนำไปดัดโค้งรอบแกนรูปกรวย (bending test) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3 – 37 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร เครื่องมือสำหรับการทดสอบดังกล่าวเรียกว่า conical mandrel test apparatus (Sheen Instruments, Surrey, England) (รูปที่ 3.9) การรายงานผลการทดสอบให้ระบุเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำให้ผิวฟิล์มร้าวหรือหลุดล่อนจากแผ่นทดสอบ ในกรณีที่ไม่มีพบข้อบกพร่องให้ระบุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนรูปกรวยที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 3.9 Conical mandrel test apparatus

3.3.3.4 ความติดแน่น (Adhesion)

ความติดแน่นของฟิล์ม ของสารเคลือบผิวเป็นตัวบอกระดับความมากน้อยของการยึดเกาะระหว่างฟิล์มกับพื้นผิววัสดุ ทดสอบโดยใช้วิธี cross-cut tape ตามมาตรฐาน ASTM D 3359-95 Method B ในการทดสอบใช้ cross hatch cutter (Sheen Instruments, Surrey, England) (รูปที่ 3.10) กรีดเป็นตารางบนผิวของฟิล์มให้ทะลุถึงแผ่นทดสอบ จากนั้นใช้เทปติดที่บริเวณรอยขีดให้สนิทแล้วดึงเทปออกอย่างรวดเร็ว ตรวจดูข้อบกพร่องของฟิล์มแล้วนำไปเปรียบเทียบกับภาพมาตรฐาน และรายงานผลเป็นเกรด ซึ่งแบ่งเกรดไว้ตั้งแต่ 5B - 0B ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การจัดลำดับความบกพร่องของฟิล์มจากการกรีดเป็นตาราง

เกรด	ลักษณะของฟิล์ม	ภาพ
5B	ขอบของรอยตัดเรียบ ไม่มีส่วนเสียหาย	
4B	เกิดการหลุดล่อนของส่วนที่ติดกัน แต่ความเสียหายต้องไม่เกิน 5%	
3B	เกิดการหลุดล่อนตามขอบและส่วนที่ติดกัน ความเสียหายมากกว่า 5% แต่ไม่เกิน 15%	
2B	เกิดการหลุดล่อนตามขอบและตามแนวยาวของส่วนที่ถูกตัด ความเสียหายมากกว่า 15%	
1B	เกิดการหลุดล่อนตามขอบและตามแนวยาวของส่วนที่ถูกตัด ความเสียหายมากกว่า 35% แต่ไม่เกิน 65%	
0B	เกิดการหลุดล่อนมากและเกิดทุกจุดบนสารเคลือบจนไม่สามารถจัดอยู่ในเกรด 1B ได้	



รูปที่ 3.10 Cross hatch cutter

3.3.3.5 ความทนน้ำ (Water resistance)

การหาความทนน้ำ เป็นการหาความสามารถของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่จะกันไม่ให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ การทดสอบทำโดยนำแผ่นทดสอบไปจุ่มน้ำภายในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อครบระยะเวลาแล้วนำแผ่นทดสอบออกจากน้ำแล้วซับด้วยกระดาษซับ ตรวจสอบผิวแผ่นทดสอบเพื่อดูรอยพองหรือข้อบกพร่องอื่นๆ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการตรวจสอบพื้นผิวแผ่นทดสอบอีกครั้ง

3.3.3.6 ความทนด่าง (Alkali resistance)

ทดสอบโดยการนำแผ่นทดสอบไปจุ่มในกรดหรือด่าง ภายในช่วงระยะเวลาที่กำหนดแล้วตรวจดูสภาพของฟิล์ม ถ้าฟิล์มมีความทนทานต่อกรดหรือด่างได้ดีหลังจุ่มแล้วฟิล์มจะต้องมีสภาพเหมือนเดิมไม่มีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้น

3.4 การเปรียบเทียบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้กับยูรีเทนออยล์ทางการค้า

ทำการเปรียบเทียบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้ กับยูรีเทนออยล์ทางการค้า โดยยูรีเทนออยล์ทางการค้าได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท สยามเคมีคัล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) และมีชื่อทางการค้าว่า “ Burnock ul – 65 “.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การเตรียมไกลโคไลซ์โพรดักส์จากขวดเพ็ดที่ใช้แล้ว

4.1.1 ลักษณะของไกลโคไลซ์โพรดักส์

เมื่อนำขวดเพ็ดประเภทขวดบรรจุน้ำดื่มที่ผ่านการบดหยาบมาทำการย่อยสลายด้วยกระบวนการไกลโคลิซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟด้วยโพรพิลีนไกลคอลที่มากเกินไป ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเพ็ดต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 37.5 : 62.5 โดยมีซิงก์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดใส สีเขียวอมฟ้า ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสีดังกล่าวเกิดจากการใส่สารเติมแต่งลงในขวดเพ็ดเพื่อให้ขวดมีความใส



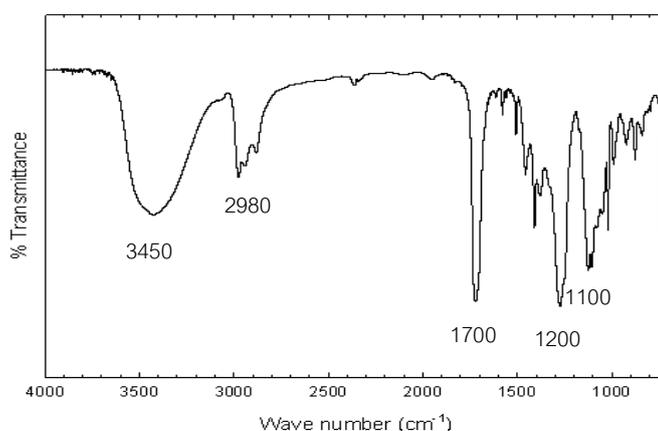
รูปที่ 4.1 ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากกระบวนการไกลโคลิซิสขวดเพ็ดที่ใช้แล้ว

4.1.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของไกลโคไลซีโพรดักส์

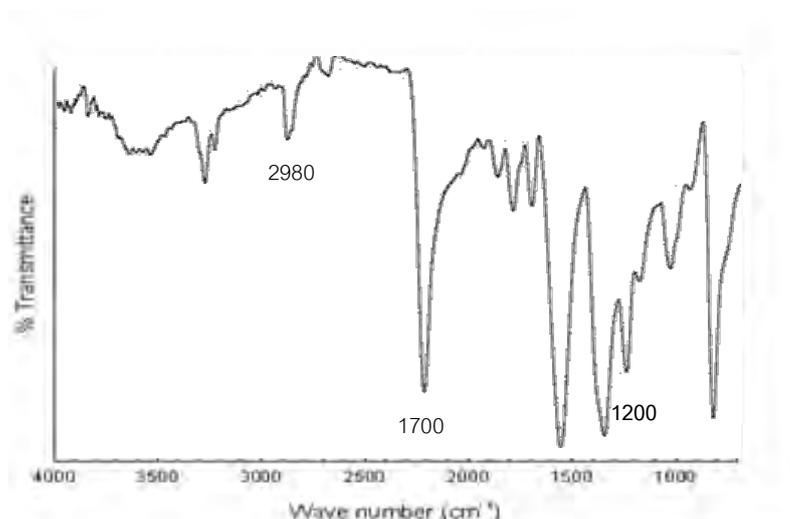
เมื่อนำไกลโคไลซีโพรดักส์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบสเปกตรัมที่สำคัญดังนี้

1. พบพีกของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3450 cm^{-1}
2. พบพีก C-H stretching ที่ตำแหน่ง 2980 cm^{-1}
3. พบพีกของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1}
4. พบพีก C-O-C stretching ที่ 1200 cm^{-1}
5. พบพีก C-OH stretching ที่ 1100 cm^{-1}

เมื่อเปรียบเทียบ FT-IR สเปกตรัมของไกลโคไลซีโพรดักส์ กับ FT-IR สเปกตรัมของเพ็ด (รูปที่ 4.3) พบว่า FT-IR สเปกตรัมทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยสเปกตรัมของไกลโคไลซีโพรดักส์มีความกว้างของพีกที่ตำแหน่ง 3450 cm^{-1} ซึ่งพีกนี้เป็นลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันแบบไฮดรอกซิล ในขณะที่สเปกตรัมของเพ็ดไม่พบพีกดังกล่าว ซึ่งให้เห็นว่าไกลโคไลซีโพรดักส์ประกอบด้วยส่วนของโมเลกุลของเพ็ดที่ถูกตัดออกเป็นโมเลกุลย่อยๆ โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายโมเลกุล นอกจากนี้แล้ว เมื่อนำไกลโคไลซีโพรดักส์มาทดสอบการละลายในเอทานอล พบว่าไกลโคไลซีโพรดักส์สามารถละลายได้ดี เป็นการยืนยันว่าโครงสร้างของไกลโคไลซีโพรดักส์ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล



รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของไกลโคไลซีโพรดักส์



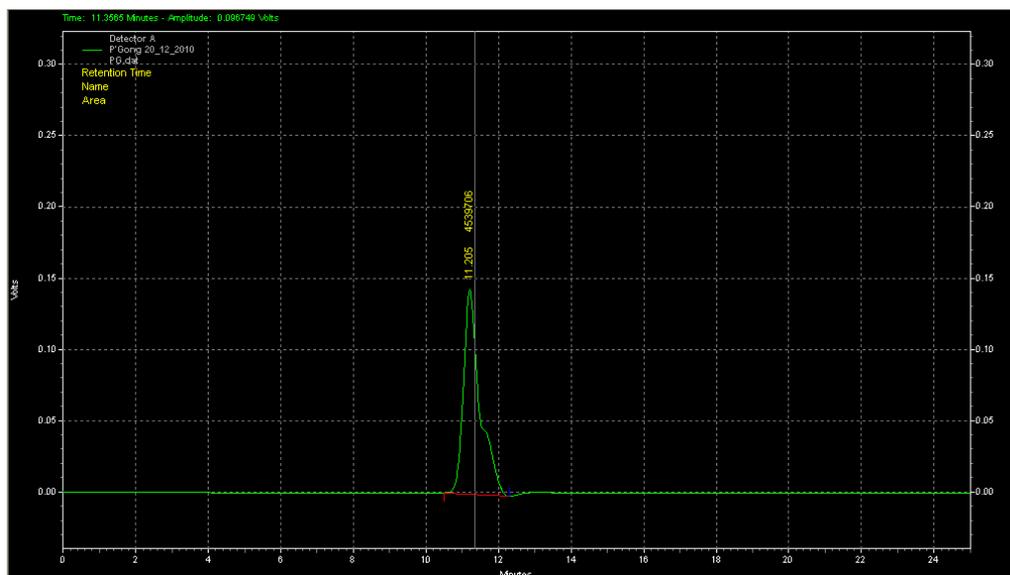
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ต

4.1.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์

เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุล ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 โดยพบว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่เตรียมได้ประกอบด้วยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน 2 ขนาด ซึ่งสังเกตได้จาก GPC โครมาโตแกรมที่มีลักษณะเป็นไหล่พีก โดยมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 2,265 ในขณะที่เพ็ตที่นิยมนำมาผลิตเป็นขวดน้ำดื่มมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 26,000 [21] ซึ่งจากผลดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายเพ็ตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสได้เป็นสารขนาดโมเลกุลเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง

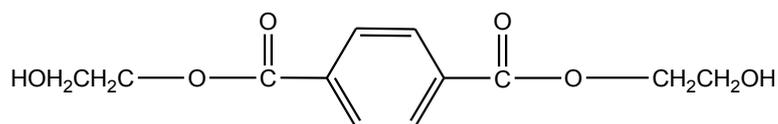
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากกระบวนการไกลโคไลซิส

\bar{M}_n	\bar{M}_w	PDI	Viscosity (cP)
2265	2699	1.19	230

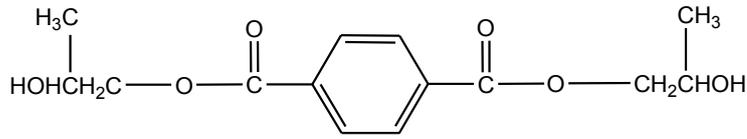


รูปที่ 4.4 GPC โครมาโทแกรมของไกลโคไลซ์โพรดักส์

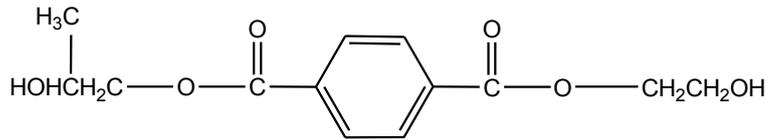
ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ในงานวิจัยนี้ แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา [14, 15] ซึ่งพบว่าการย่อยสลายของพีตด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสจากการใช้โพรพิลีนไกลคอลเป็นสารย่อยสลายด้วยวิธีการดั้งเดิม (ใช้ความร้อนสูง 190 °C และเวลาย่อยสลายนาน 6.30 ชั่วโมง) ทำให้ได้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนอยู่ในช่วง 240-1107 โดยไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ประกอบด้วยมอนอเมอร์ ไดเมอร์ และโอลิโกเมอร์ของ bis(2-hydroxyethyl)terephthalate (BHET), bis(2-hydroxypropyl)terephthalate (BHPT), และ α -(2-hydroxyethyl)- α' -(2-hydroxypropyl)terephthalate ซึ่งโครงสร้างเคมีของสารดังกล่าวแสดงได้ดังนี้



bis(2-hydroxyethyl)terephthalate; BHET

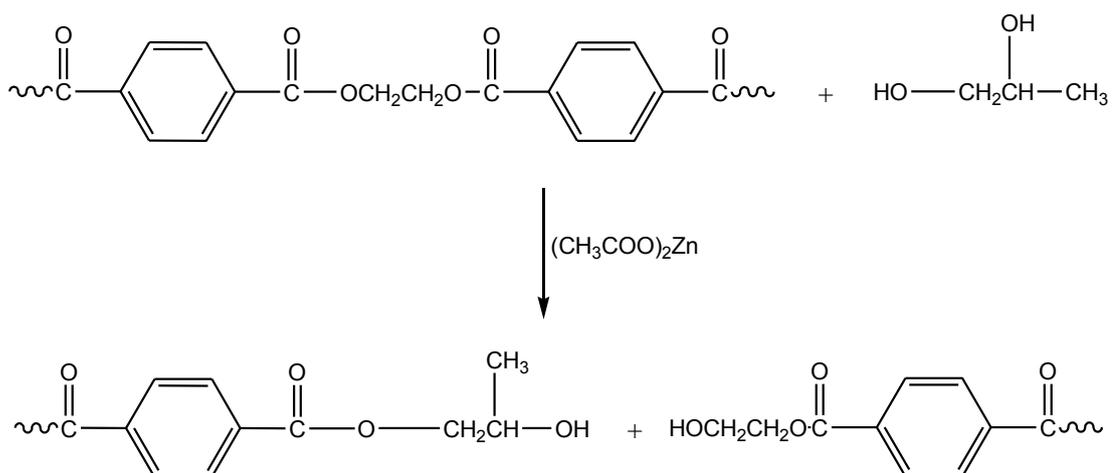


bis(2-hydroxypropyl)terephthalate; BHPT

 α -(2-hydroxyethyl)- α' -(2-hydroxypropyl)terephthalate

ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์พอร์ดักส์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคไลซิส ทำให้สรุปได้ว่า ไกลโคไลซ์พอร์ดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายภายใต้พลังงานไมโครเวฟในงานวิจัยนี้เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าการใช้วิธีแบบดั้งเดิม โดยไกลโคไลซ์พอร์ดักส์ที่ได้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยโพลิโเมอร์ของ BHET, BHPT, และ α -(2-hydroxyethyl)- α' -(2-hydroxypropyl)terephthalate

กลไกการย่อยสลายเปิดด้วยโพรพิลีนไกลคอลสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโพรพิลีนไกลคอลนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่ของเพ็ตตรงตำแหน่งของพันธะเอสเตออร์ แล้วนำไปสู่การแตกออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีปลายโมเลกุลเป็นหมู่ไฮดรอกซิล



รูปที่ 4.5 กลไกการย่อยสลายเปิดด้วยโพรพิลีนไกลคอล

4.1.4 การหาค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรด์กส์

เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรด์กส์ไปสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ จำเป็นต้องทดสอบหาค่าไฮดรอกซิลซึ่งค่าไฮดรอกซิลที่หาได้จะถูกนำไปใช้คำนวณหาปริมาณโพลูอินไดไฮโซไซยานาเนตที่เหมาะสมสำหรับใช้สังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ จากการทดสอบหาค่าไฮดรอกซิลตามมาตรฐาน ASTM D 2849-69 (Method C) พบว่าค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรด์กส์มีค่าประมาณ 253 mg KOH/g

4.2 การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

ยูรีเทนออยล์สังเคราะห์ได้จากการนำพอลิออล ซึ่งก็คือไกลโคไลซ์โพรด์กส์ที่ได้จากการย่อยสลายขดเพ็ดหรือกลีเซอรอล มาทำปฏิกิริยากับน้ำมันซึ่งเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ โดยในงานวิจัยจะใช้ น้ำมัน 3 ชนิด คือ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันลินสีด และใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอและไดกลีเซอไรด์ จากนั้นนำมอนอและไดกลีเซอไรด์ไปทำปฏิกิริยากับโพลูอินไดไฮโซไซยานาเนตจะได้ยูรีเทนออยล์เป็นผลิตภัณฑ์ โดยในการศึกษาจะใช้อัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยานาต (OH : NCO) คงที่เท่ากับ 1 : 0.9

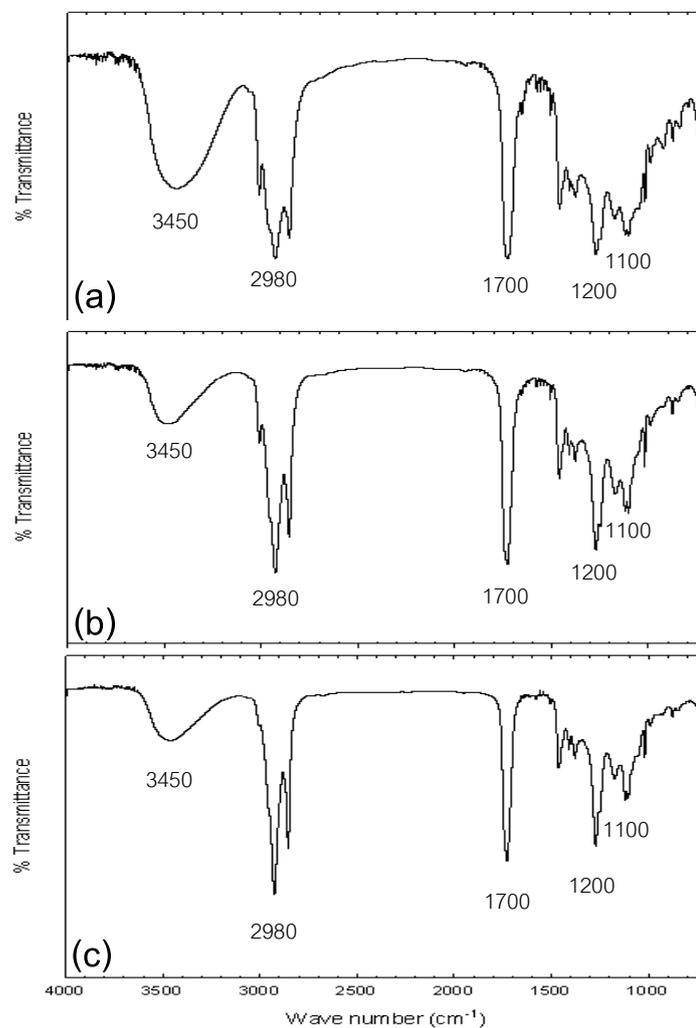
4.2.1 การวิเคราะห์มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่ได้จากปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิค

FT-IR

เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการเกิดปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ระหว่างพอลิออลและน้ำมัน จึงนำมอนอและไดกลีเซอไรด์มาทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า FT-IR สเปกตรัมของมอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมได้ทั้งจากไกลโคไลซ์โพรด์กส์และกลีเซอรอล แสดงหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ปรากฏทั้งในพอลิออลและน้ำมันเข้าไว้ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ โดยพบสเปกตรัมที่สำคัญดังนี้

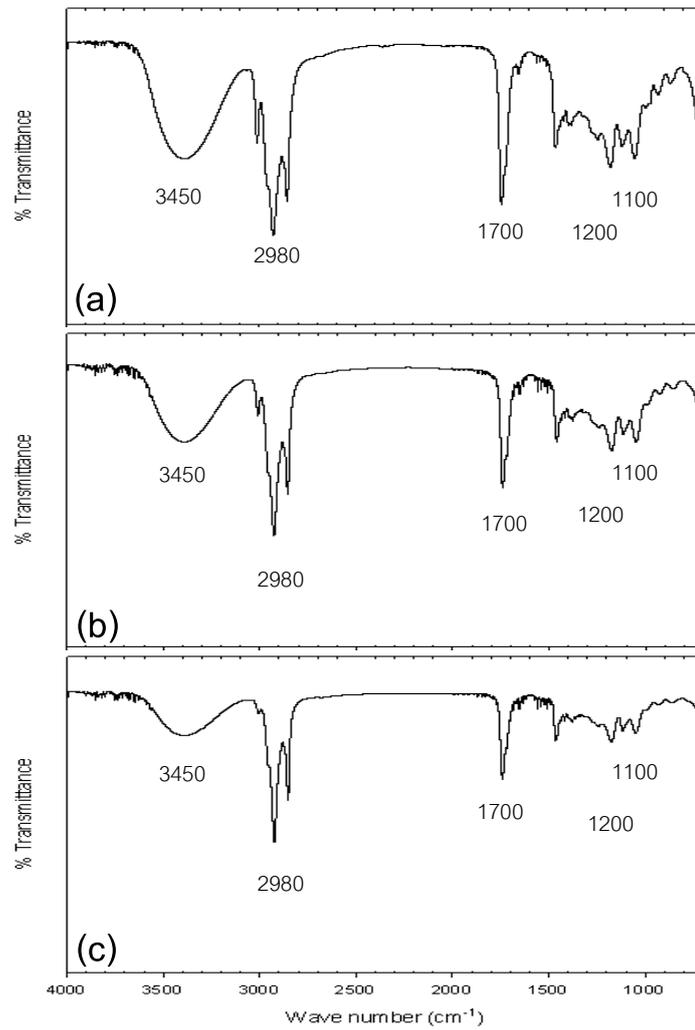
1. พบพีคของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3450 cm^{-1}
2. พบพีค C-H stretching ที่ตำแหน่ง 2980 cm^{-1}
3. พบพีคของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1}
4. พบพีค C-O-C stretching ที่ 1200 cm^{-1}
5. พบพีค C-OH stretching ที่ 1100 cm^{-1}

ดังนั้นเบื้องต้นจึงพอจะสรุปได้ว่า ปฏิกริยาแอลกอฮอล์อิสระระหว่างน้ำมันกับไกลโคไลซ์โพรดักส์หรือกลีเซอรอล ได้มอนอและไดกลีเซอไรด์เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งการตรวจสอบเพื่อยืนยันว่าได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอและไดกลีเซอไรด์หรือไม่ สามารถทำได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ 1 ส่วน มาทดสอบการละลายในเอทานอล 2-3 ส่วน ถ้าผลิตภัณฑ์สามารถละลายได้ดี แสดงว่าผลิตภัณฑ์นั้นเป็นมอนอและไดกลีเซอไรด์แล้ว เนื่องจากโดยปกติแล้ว น้ำมันไม่สามารถละลายในเอทานอล ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถละลายได้ดี แสดงให้เห็นว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์หรือกลีเซอรอลเข้าทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับน้ำมัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอและไดกลีเซอไรด์แล้ว



รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่าง

- (a) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์และน้ำมันลินสีด
- (b) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์และน้ำมันถั่วเหลือง
- (c) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์และน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่าง

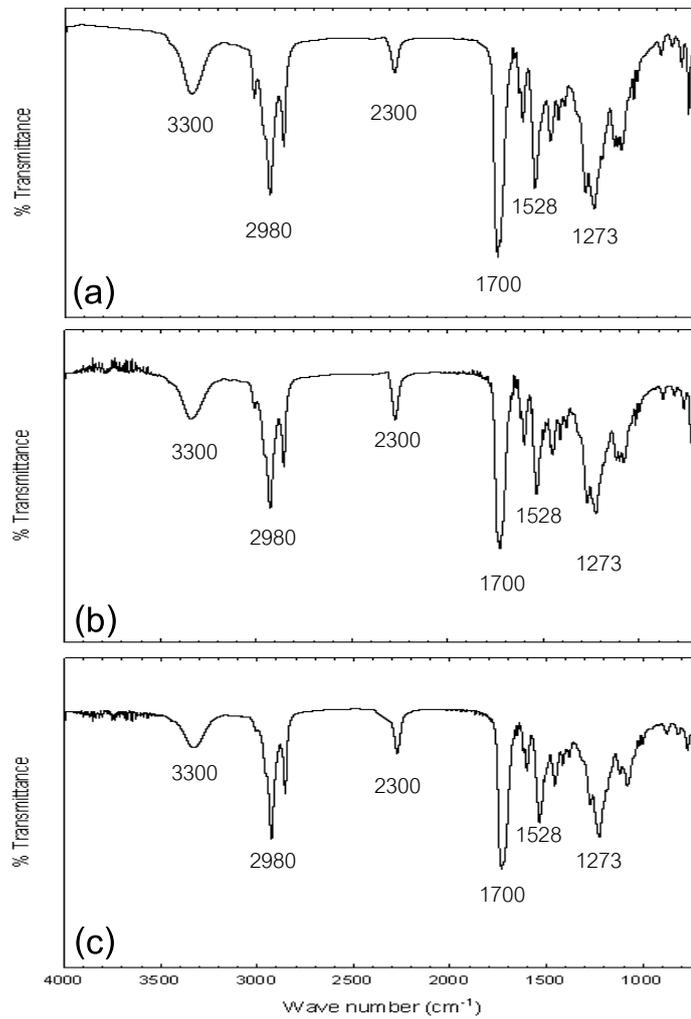
- (a) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากกลีเซอรอลและน้ำมันดินสด
- (b) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากกลีเซอรอลและน้ำมันถั่วเหลือง
- (c) มอนอและไดกลีเซอไรด์ที่เตรียมจากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์ม

4.2.2 การวิเคราะห์ยูรีเทนออยล์ด้วยเทคนิค FT-IR Spectroscopy

เมื่อนำมอนอและไดโกลีเซอไรต์ที่สังเคราะห์ได้มาทำปฏิกิริยากับโพลูอินไดไฮโดรไซยาเนต พบว่าหมู่ไฮดรอกซิลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮโดรไซยาเนตของ TDI เกิดเป็นพันธะยูรีเทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในยูรีเทนออยล์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ FT-IR สเปกตรัมของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละสูตรซึ่งแสดงในรูป 4.8 และ 4.9 พบว่ายูรีเทนออยล์ทุกสูตรมีลักษณะของ FT-IR สเปกตรัมเหมือนกัน นั่นคือ

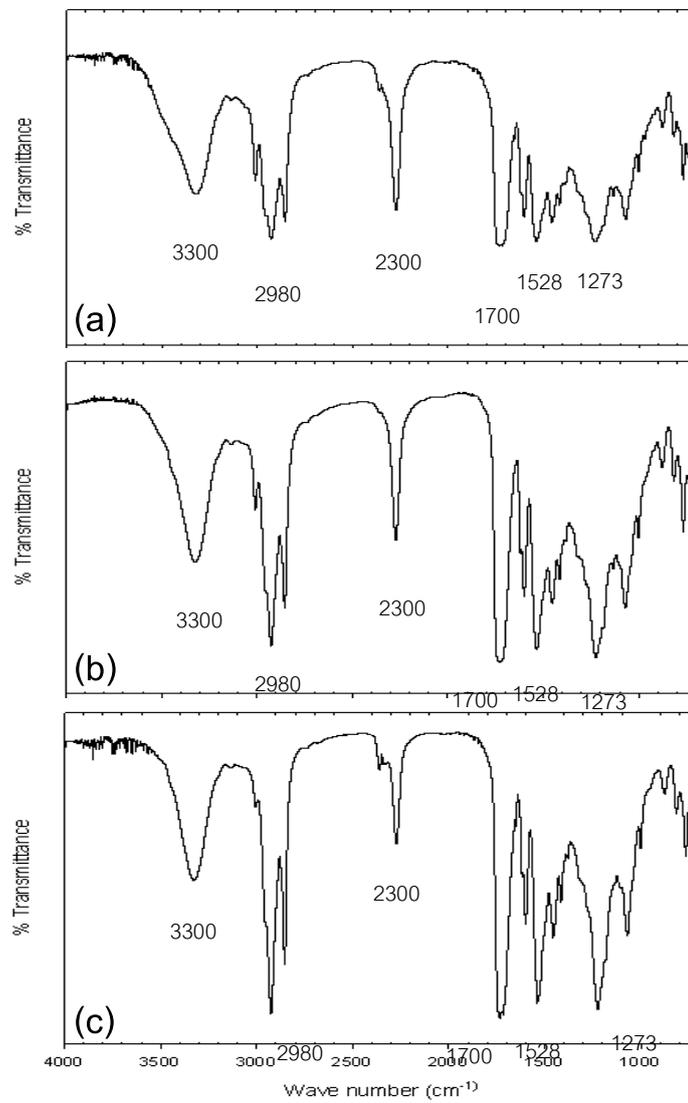
1. พบพีคของหมู่ N-H ที่ตำแหน่ง 3300 cm^{-1}
2. พบพีคของ C-H stretching ที่ตำแหน่ง 2980 cm^{-1}
3. พบพีคของหมู่ไฮโดรไซยาเนต NCO ที่ตำแหน่ง 2300 cm^{-1}
4. พบพีคของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1}
5. พบพีคตำแหน่งของ C-N และ N-H ที่ตำแหน่ง 1528 cm^{-1}
6. พบพีคตำแหน่งของ C-O-C stretching ที่ตำแหน่ง 1273 cm^{-1}

โดยพีคที่ตำแหน่ง 3300 cm^{-1} และ 1528 cm^{-1} เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ -NH- ในพันธะยูรีเทน และพีคที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในเอสเทอร์และยูรีเทน นอกจากนี้ยังพบพีคของหมู่ไฮโดรไซยาเนตที่ตำแหน่ง 2300 cm^{-1} แสดงว่ายังคงมีหมู่ไฮโดรไซยาเนตเหลืออยู่



รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

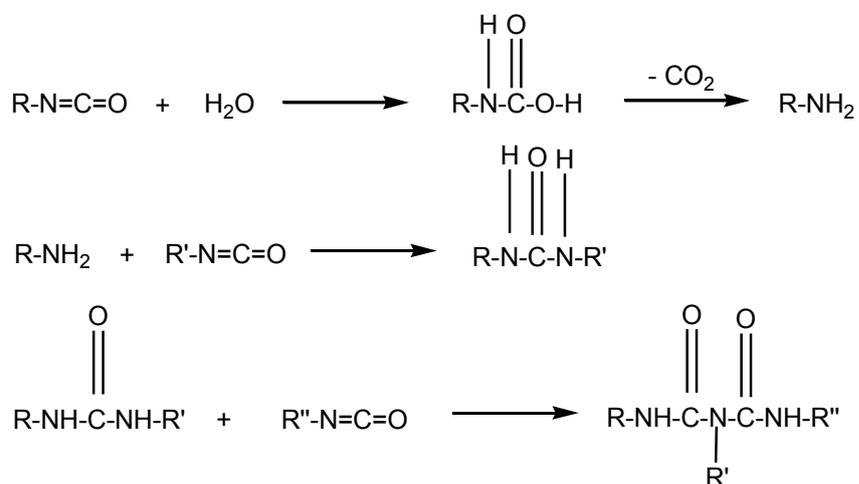
- (a) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันลินสีด
- (b) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันถั่วเหลือง
- (c) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันปาล์ม



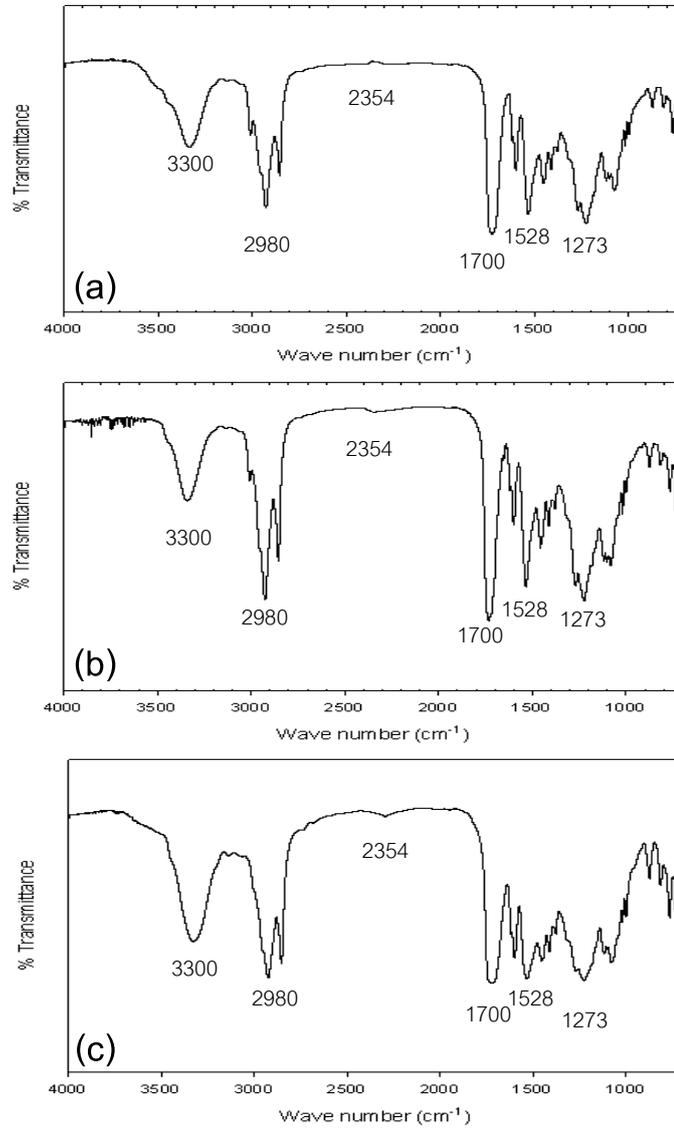
รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของยูรีเทนออกยลที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

- (a) กลีเซอรอลกับน้ำมันลินสีด
- (b) กลีเซอรอลกับน้ำมันถั่วเหลือง
- (c) กลีเซอรอลกับน้ำมันปาล์ม

เมื่อนำยูรีเทนออยล์แต่ละสูตรไปทำให้เป็นฟิล์มแห้ง แล้วนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR Spectroscopy อีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 โดยพบว่าความเข้มพีคของหมู่ไอโซไซยาเนตที่ตำแหน่ง 2300 cm^{-1} อีกต่อไป แต่ปรากฏพีคของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 2354 cm^{-1} แสดงว่าในระหว่างการแห้งตัวหรือการบ่มตัวของฟิล์มยูรีเทนออยล์นั้น หมู่ไอโซไซยาเนตที่เหลืออยู่ได้เข้าทำปฏิกิริยากับความชื้นในบรรยากาศเกิดกรดคาร์บามิกที่ไม่เสถียร ซึ่งจะเกิดการแตกตัวให้แอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแอมีนจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตอีกหมู่ได้เป็นยูเรีย และอาจเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตได้ไบยูเรต [15, 17] แสดงได้ดังสมการ

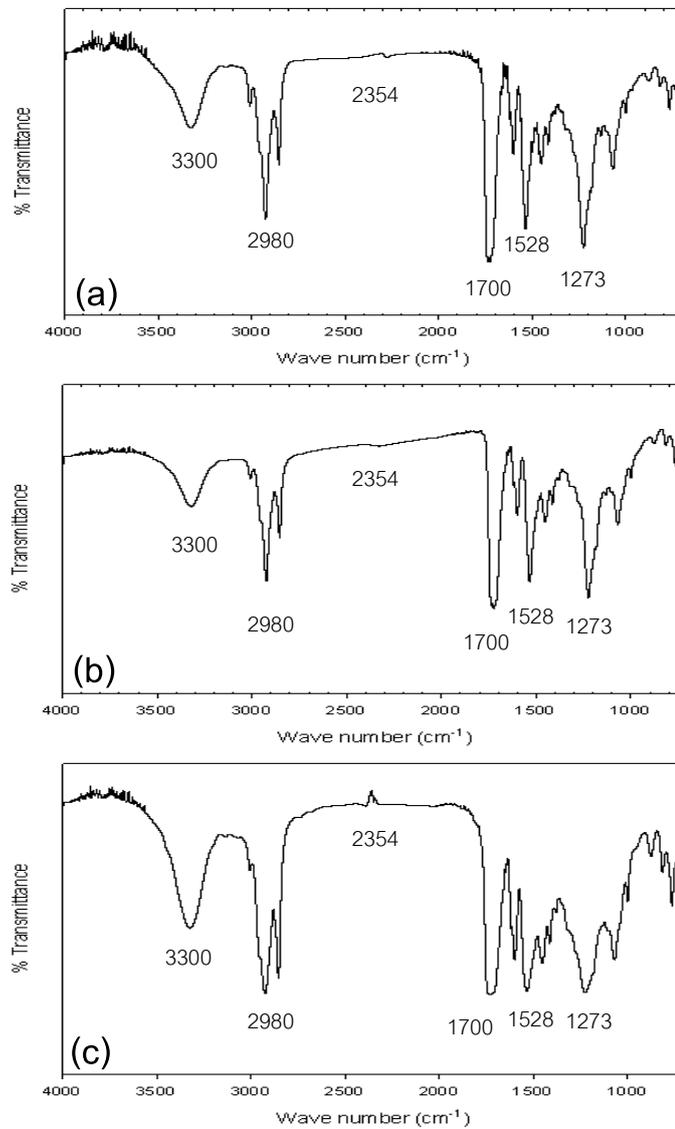


รูปที่ 4.10 กลไกการแห้งตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของหมู่ไอโซไซยาเนตกับอากาศ



รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

- (a) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันลินสีด
- (b) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันถั่วเหลือง
- (c) ไกลโคไลซ์โพรดักส์กับน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 4.12 FT-IR สเปกตรัมของฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง

- (a) กลีเซอรอลกับน้ำมันลินสีด
- (b) กลีเซอรอลกับน้ำมันถั่วเหลือง
- (c) กลีเซอรอลกับน้ำมันปาล์ม

4.2.3 การศึกษาน้ำหนักโมเลกุลและค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์แต่ละขั้นตอน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละขั้นมาวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC และทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ได้เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอและไดกลีเซอไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น และเมื่อนำมอนอและไดกลีเซอไรด์มาทำปฏิกิริยากับ TDI ก็พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค FT-IR และผลการวิเคราะห์ความหนืด กล่าวคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดมากขึ้น

จากตาราง 4.3 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละขั้นตอนเมื่อใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้น ให้ผลการทดสอบในลักษณะเดียวกับการใช้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ นั่นคือผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลและ TDI เกิดเป็นสารโมเลกุลใหญ่ ซึ่งก็คือยูรีเทนออยล์ และยูรีเทนออยล์ที่ได้จากน้ำมันลินสีดมีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดในขณะที่ยูรีเทนออยล์ที่ได้จากน้ำมันปาล์มมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด

ทั้งนี้สาเหตุที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันอาจเป็นเพราะความแตกต่างของชนิดของพอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์ เนื่องมาจากไกลโคไลซ์โพรดักส์มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ากลีเซอรอล จึงส่งผลให้มีกลีเซอรอลมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ ดังนั้นจึงทำให้ยูรีเทนออยล์ทุกสูตรที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่ายูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นเนื่องมาจากชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ทำให้ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละสูตรมีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยนี้มีผลไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์แต่ละขั้นตอนจากการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์โดยใช้ไกลโคไลไซโพรดักส์เป็นพอลิออล

ผลิตภัณฑ์	\bar{M}_n	\bar{M}_w	PDI	ความหนืด (cP)
GP Linseed mono/diglyceride	3243	3747	1.16	297
GP Linseed urethane oil	3682	7934	2.15	1185
GP Soybean mono/diglyceride	3113	3745	1.20	275
GP Soybean urethane oil	3511	7261	2.07	1130
GP Palm mono/diglyceride	3089	3556	1.15	230
GP Palm urethane oil	3432	6594	1.92	1065

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์แต่ละขั้นตอนจากการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพอลิออล

ชนิดสาร	\bar{M}_n	\bar{M}_w	PDI	ความหนืด (cP)
Glycerol Linseed mono/diglyceride	3760	4611	1.23	618
Glycerol Linseed urethane oil	8811	12305	1.40	1610
Glycerol Soybean mono/diglyceride	3349	3959	1.18	595
Glycerol Soybean urethane oil	8480	11328	1.34	1570
Glycerol Palm mono/diglyceride	3253	3796	1.17	578
Glycerol Palm urethane oil	7090	8695	1.23	1350

4.3 การทดสอบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้

4.3.1 การทดสอบสมบัติในสถานะของเหลว

ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้ทุกสูตรมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด มีสีเหลืองค่อนข้างเข้ม จนถึงสีเหลืองเข้ม และเมื่อนำมาทดสอบค่าของกรด สี และปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยไม่ได้ (% Nonvolatile content; %NV) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยพบว่า สีของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าอยู่ในช่วง 8+ ถึง 10 ค่าของกรดอยู่ในช่วง 0.28-1.68 และปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยไม่ได้ (%NV) อยู่ในช่วง 71.61 – 72.44 %

เมื่อนำยูรีเทนออยล์มาทดสอบความสามารถในการละลายในตัวทำละลายต่างๆ พบว่า ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์สามารถละลายได้ดีในไซลีน แต่ไม่ละลายใน ไวท์สปีริตกับนอร์มัลบิวทานอล เนื่องจากยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้จากไกลโคไลซ์โพรดักส์นั้นมี โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหมู่อะโรแมติก (จากไกลโคไลซ์โพรดักส์และ TDI) และมีขั้ว ปานกลาง ทำให้สามารถละลายได้ดีในไซลีนซึ่งเป็นตัวทำละลายอะโรมาติก แต่ไม่สามารถละลาย ได้ในไวท์สปีริตซึ่งเป็นตัวทำละลายอะลิฟาติก และนอร์มัลบิวทานอลที่มีขั้วสูง อย่างไรก็ตาม สำหรับยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลนั้นสามารถละลายได้ดีทั้งในไซลีนซึ่งเป็นตัวทำ ละลายอะโรมาติกและในไวท์สปีริตซึ่งเป็นตัวทำละลายอะลิฟาติก เนื่องจากยูรีเทนออยล์ที่ สังเคราะห์ได้จากกลีเซอรอลนั้นมีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นอะโรแมติกและ ส่วนที่เป็นอะลิฟาติก ทำให้สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายทั้งสองชนิด แต่ไม่สามารถละลาย ได้ในนอร์มัลบิวทานอลที่มีขั้วสูง

ตารางที่ 4.4 สมบัติของยูรีเทนออยล์ในสถานะของเหลว

สูตร	สี (การ์ดเนอร์)	% NV	ค่าของกรด (mg KOH/g)	ความสามารถในการละลาย*		
				ไวท์สปีด	ไซลีน	นอร์มัล บิวทานอล
GP Linseed urethane oil	8+	72.09	0.28	X	√	X
Conventional Linseed urethane oil	8+	72.44	0.56	√	√	X
GP Soybean urethane oil	10	71.61	1.10	X	√	X
Conventional Soybean urethane oil	10	71.79	1.11	√	√	X
GP Palm urethane oil	8+	72.28	0.55	X	√	X
Conventional Palm urethane oil	8+	72.15	1.66	√	√	X

* √, ละลาย; X, ไม่ละลาย

4.3.2 การทดสอบระยะเวลาการแห้งตัว

เมื่อนำยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบหระยะเวลาการแห้งตัว โดยใช้ความหนาเมื่อฟิล์มเปียกเท่ากับ 90 ไมโครเมตร ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยพบว่าระยะเวลาในการแห้งของฟิล์มยูรีเทนออยล์ทุกสูตร ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นคือ ยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากน้ำมันลินสีดมีระยะเวลาการแห้งตัวเร็วที่สุดในขณะที่ยูรีเทนออยล์ที่

เตรียมจากน้ำมันปาล์มแห้งตัวช้าที่สุด ทั้งนี้เพราะน้ำมันลินสีดเป็นน้ำมันแห้งเร็ว มีความไม่อิ่มตัวมากที่สุด ในขณะที่น้ำมันปาล์มมีความไม่อิ่มตัวน้อยที่สุด ดังนั้นน้ำมันลินสีดจึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นฟิล์มได้ดีที่สุด จึงใช้ระยะเวลาในการแห้งตัวของฟิล์มน้อยที่สุด ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ทุกสูตรจะมีระยะเวลาการแห้งตัวช้ากว่า ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลทุกสูตร ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ายูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ ส่งผลให้ใช้เวลาน้อยกว่าเพื่อทำให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ นั่นคือมีระยะเวลาในการแห้งตัวเร็วกว่า

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการแห้งตัวของฟิล์มยูรีเทนออยล์ (ชั่วโมง:นาที)

สูตร	แห้งแตะได้ (touch dry)	แห้งแตะไม่ติด (tack-free dry)	แห้งแข็ง (hard dry)
GP Linseed urethane oil	2:20	3:30	5:10
Conventional Linseed urethane oil	1:30	2:30	4:30
GP Soybean urethane oil	3:00	6:00	8:30
Conventional Soybean urethane oil	2:10	4:45	7:10
GP Palm urethane oil	6:00	15:30	24:30
Conventional Palm urethane oil	3:30	7:45	14:40

4.3.3 การทดสอบสมบัติของฟิล์มยูรีเทนออยล์

4.3.3.1 สมบัติเชิงกล

เมื่อนำยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้มาปาดลงบนแผ่นทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนดด้วย แอปพลิเคเตอร์ ซึ่งในการทดลองได้กำหนดความหนาของฟิล์มเปียกเท่ากับ 90 ไมโครเมตร จากนั้นทิ้งไว้จนฟิล์มแห้ง แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติของฟิล์มยูรีเทนออยล์

สูตร	ความแข็ง (กรัม)	ความอ่อนตัว (ϕ , mm)	ความทนแรง กระแทก (นิว-ปอนด์)	ความติด แน่น
GP Linseed urethane oil	600	3	160	5B
Conventional Linseed urethane oil	800	3	160	5B
GP Soybean urethane oil	600	3	160	5B
Conventional Soybean urethane oil	700	3	160	5B
GP Palm urethane oil	600	3	160	5B
Conventional Palm urethane oil	700	3	160	5B

ผลการทดสอบความแข็งโดยวิธีการชูดขีด พบว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากน้ำมันต่างชนิดกันจะให้มีความแข็งของฟิล์มยูรีเทนต่างกัน โดยพบว่า

- ฟิล์มยูรีเทนที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลทุกสูตรมีความแข็งมากกว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ทุกสูตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากน้ำมันลินสีดซึ่งมีความแข็งมากถึง 800 กรัม ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการมีปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างที่สูงมาก
- ฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ทุกสูตรนั้นมีความแข็งเท่ากัน อาจเป็นผลเนื่องจากการมีปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างใกล้เคียงกัน

สำหรับความอ่อนตัวของฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่วัดได้จากการนำแผ่นทดสอบไปตัดโค้งรอบแกนรูปกรวย พบว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์ทุกสูตรมีความอ่อนตัวสูง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของยูรีเทนออยล์ที่ประกอบด้วยสายโซ่อะลิฟาติกของส่วนที่เป็นโมเลกุลของ

น้ำมัน ทำให้โมเลกุลมีความอ่อนตัวสูง ซึ่งสอดคล้องกับความทนทานต่อแรงกระแทกของฟิล์มยูรีเทนทุกสูตร ที่มีความทนทานต่อแรงกระแทกดีเยี่ยม

นอกจากนี้แล้วผลการทดสอบความติดแน่นของฟิล์มยูรีเทนออยล์ พบว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์มีความติดแน่นกับพื้นผิวของวัสดุดี เนื่องจากหมูยูรีเทนในโครงสร้างสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับพื้นผิวของวัสดุทำให้ยึดติดกับพื้นผิวได้ดี ส่งผลให้ฟิล์มมีความติดแน่นกับพื้นผิววัสดุสูง

4.3.3.2 การทดสอบความทนน้ำและความทนต่าง

เมื่อนำฟิล์มยูรีเทนออยล์ไปทดสอบความทนน้ำ ความทนต่อต่าง โดยวิธีการจุ่มน้ำ หรือต่างภายในช่วงเวลาที่กำหนด แล้วตรวจสอบสภาพฟิล์มเพื่อดูข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ปรากฏว่าได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.7

เมื่อพิจารณาผลจากตารางที่ 4.7 พบว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์ทุกสูตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการทดสอบความทนน้ำ แสดงว่าฟิล์มมีความทนน้ำดีเยี่ยม ซึ่งเป็นผลมาจากพันธะยูรีเทนเกิดไฮโดรลิซิสได้ยาก อย่างไรก็ตามเมื่อนำฟิล์มยูรีเทนออยล์ไปทดสอบความทนต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์มีความทนต่างพอใช้

ตารางที่ 4.7 สมบัติความทนน้ำ ความทนต่างของยูรีเทนออยล์สูตรต่างๆ

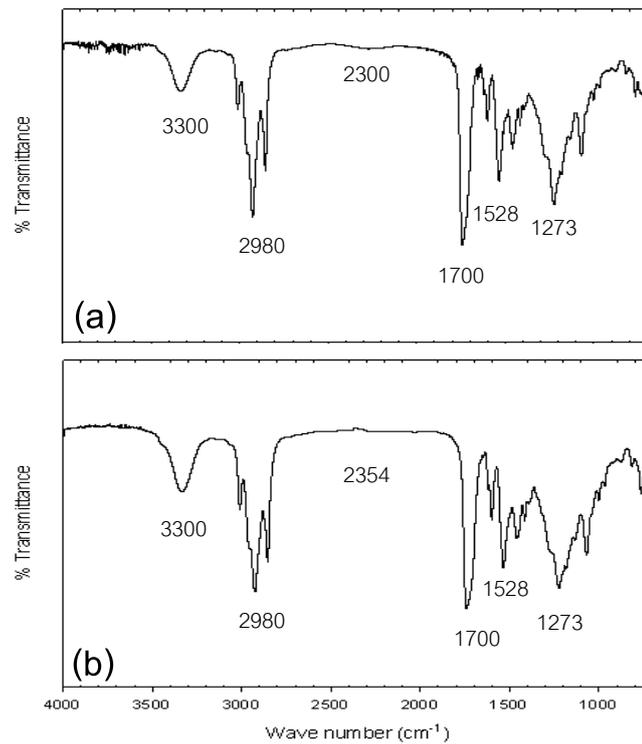
สูตร	ความทนน้ำ ¹	ความทนต่าง ²
GP Linseed urethane oil	ดีเยี่ยม	3:30
Conventional Linseed urethane oil	ดีเยี่ยม	3:45
GP Soybean urethane oil	ดีเยี่ยม	2:40
Conventional Soybean urethane oil	ดีเยี่ยม	3:00
GP Palm urethane oil	ดีเยี่ยม	2:30
Conventional Palm urethane oil	ดีเยี่ยม	2:40

หมายเหตุ (1) ทดสอบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(2) ทดสอบโดยแช่ในต่าง คือ 5% NaOH เวลาที่ระบุคือ ช่วงระยะเวลาที่ฟิล์มเริ่มเกิดการพอง (blistering) หลังจุ่มในต่าง

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้กับยูรีเทนออยล์ทางการค้า

จากผลการทดสอบสมบัติของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ยูรีเทนออยล์ทุกสูตรมีสมบัติใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบ FT-IR สเปกตรัมของยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละสูตรเปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ทางการค้า พบว่ายูรีเทนออยล์ทุกสูตรมีลักษณะของ FT-IR สเปกตรัมเหมือนกันกับยูรีเทนออยล์ทางการค้า อย่างไรก็ตาม FT-IR สเปกตรัมของยูรีเทนออยล์ในแต่ละสูตรนั้นมีความแตกต่างจากยูรีเทนออยล์ทางการค้าตรงที่ความเข้มของพีคของหมู่ไอโซไซยานาตที่เหลืออยู่ ซึ่งพบว่ายูรีเทนออยล์ทางการค้าจะมีปริมาณของหมู่ไอโซไซยานาตที่เหลือน้อยกว่ามาก ความแตกต่างนี้น่าจะเป็นผลมาจากสูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ รวมไปถึงชนิดของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์



รูปที่ 4.13 FT-IR สเปกตรัมของ (a) ยูรีเทนออยล์ และ (b) ฟิล์มยูรีเทนออยล์ทางการค้า

เมื่อนำยูรีเทนออยล์ทางการค้ามาทดสอบสมบัติต่างๆมาเปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.8

สมบัติในสถานะของเหลว พบว่ายูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์ได้มีสีเข้มกว่า มีความหนืดต่ำกว่าและปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยไม่ได้มากกว่า ทั้งนี้เพราะความแตกต่างของชนิดของสารตั้งต้นและสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นต่างๆ ที่ใช้การสังเคราะห์มีความแตกต่างกัน ผลจากการทดสอบความสามารถในการละลายในตัวทำละลายต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ยูรีเทนออยล์ทางการค้ามีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนอะลิฟาติกและอะโรมาติกรวมกัน ทำให้สามารถละลายในตัวทำละลายที่เป็นตัวทำละลายอะลิฟาติก และตัวทำละลายอะโรมาติก ซึ่งยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลก็ให้ผลการทดสอบในลักษณะเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์นั้นสามารถละลายได้ดีในไซลีน แต่ไม่ละลายในไวท์สปิริตกับนอร์มัลปิพทานอล

เมื่อพิจารณาสมบัติในสถานะฟิล์มแห้ง พบว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอลจะมีค่าความแข็งเท่ากับหรือสูงกว่าฟิล์มยูรีเทนออยล์ทางการค้าเล็กน้อย ในขณะที่ฟิล์มยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์จะมีค่าความแข็งต่ำกว่าฟิล์มทางการค้าเล็กน้อย ซึ่งความแข็งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางภายในโครงสร้าง ดังนั้น ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์โดยใช้กลีเซอรอลซึ่งมีจำนวนหมู่ฟังก์ชันมากกว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์จึงมีความแข็งมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ทางการค้าซึ่งมักใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง จึงมีผลให้ค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกับยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากกลีเซอรอล อย่างไรก็ตามสมบัติด้านความอ่อนตัว ความยืดหยุ่น และความทนแรงกระแทกนั้นมีความเท่ากัน นอกจากนี้ผลของการทดสอบความทนน้ำของฟิล์มทุกสูตรให้ค่าดีเยี่ยม ในขณะที่ความทนต่างให้ผลแตกต่างกันเล็กน้อย

จากผลดังกล่าว จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไกลโคไลซ์โพรดักส์มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

ตารางที่ 4.8 สมบัติของยูรีเทนออยล์ทางการค้าเปรียบเทียบกับยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์สูตรต่างๆ

สมบัติในสถานะของเหลว	Commercial	GP Linseed	Conventional Linseed	GP Soybean	Conventional Soybean	GP Palm	Conventional Palm
สี (การ์ตเนอร์)	6	8+	8+	10	10	8+	8+
ความหนืด (cP)	1810	1185	1610	1130	1570	1065	1350
(%NV)	62.17	72.09	72.44	71.61	71.79	72.28	72.15
ค่าของกรด (mg KOH/g)	0.50	0.28	0.56	1.12	1.12	0.56	1.68
ความสามารถในการละลาย							
- ไวท์ลปีริต	ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย
- โซลีน	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย	ละลาย
- นอร์มัลบิวทานอล	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย

(ต่อ)

สมบัติในสถานะฟิล์มแห้ง							
ความแข็ง (การขูดขีด ; หน่วย กรัม)	700	600	800	600	700	600	700
ความอ่อนตัว (ϕ , mm)	3	3	3	3	3	3	3
ความทนแรงกระแทก (นี- ปอนด์)	160	160	160	160	160	160	160
ความติดแน่น (cross-cut tape test)	5B	5B	5B	5B	5B	5B	5B
ความทนน้ำ (RT, 24 h)	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม	ดีเยี่ยม
ความทนด่าง (5% NaOH, RT)	3:00	3:30	3:45	2:40	3:00	2:30	2:40

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สามารถเตรียมโกลโคไลซ์โพรดักส์จากขวดเพ็ตใช้แล้วด้วยกระบวนการโกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟโดยใช้โพรพิลีนไกลคอลเป็นสารย่อยสลายในอัตราส่วนน้ำหนักของเพ็ตต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 37.5 : 62.5 และใช้ซิงค์อะซีเตต 0.5% โดยน้ำหนักของเพ็ตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.2 โกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนและโดยน้ำหนักเท่ากับ 2265 และ 2699 ตามลำดับ โดยประกอบด้วยโพลิเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ปลายโซ่ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์ได้ จากการนำโกลโคไลซ์โพรดักส์มาทำปฏิกิริยากับโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตและน้ำมันชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันลินสีด น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1: 0.9 และใช้เมทานอลเป็นสารบดออก

5.1.3 ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากโกลโคไลซ์โพรดักส์ทุกสูตรมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีเหลืองเข้ม มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และละลายได้ดีในไซลีน แต่ไม่ละลายในโทลูอีนและนอร์มัล-ปิพทานอล

5.1.4 ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากน้ำมันลินสีดมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดสูงที่สุด ในขณะที่ยูรีเทนออยล์ที่เตรียมจากน้ำมันปาล์มมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดต่ำที่สุด

5.1.5 ระยะเวลาในการแห้งตัวของฟิล์มยูรีเทนออยล์ขึ้นกับชนิดของน้ำมันที่ใช้ โดยยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากน้ำมันลินสีดจะแห้งได้เร็วที่สุด และที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มแห้งได้ช้าที่สุด

5.1.7 คอนเว็นชันนอลยูรีเทนออยล์ที่ใช้กิลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าและแห้งเป็นฟิล์มได้เร็วกว่ายูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากโกลโคไลซ์โพรดักส์

5.1.8 จากการทดสอบสมบัติ พบว่า ยูรีเทนออยล์ที่สังเคราะห์จากโกลโคไลซ์โพรดักส์มีสมบัติของฟิล์มอยู่ในเกณฑ์ที่ดีใกล้เคียงกับยูรีเทนออยล์ทางการค้า กล่าวคือ มีความแข็งดี มีความติดแน่น ความอ่อนตัว ความทนทานต่อแรงกระแทก และมีความทนน้ำดีเยี่ยม แต่ความทนต่างพอใช้

จากผลการทดลองทั้งหมด ทำให้สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากกระบวนการไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาภาวะในการย่อยสลายเพิ่มเติม โดยศึกษาภาวะที่ทำให้ได้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยลง

5.2.2 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อไอโซไซยาเนตที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์เพิ่มเติม เพื่อให้ยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้ไม่ปรากฏหมู่ไอโซไซยาเนตหลงเหลืออยู่

รายการอ้างอิง

- [1] เสาวรจณ์ ช้วยจุลจิตร์ และ อมร เพชรสม .
การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวดเพ็ตที่ใช้แล้ว.
รายงานผลการวิจัยทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2537.
- [2] Goodman, I., and Rhys, J. A. Polyester. Vol. 1: Saturated Polyesters. London: American Elsevier, 1965.
- [3] Sasee, F., and Emig, G. Chemical Recycling of Polymer Materials. Chemical Engineering & Technology 21 (1998) : 777-789.
- [4] La Monitia, F.P. Recycling of Plastics Materials. Toronto-Scarborough: Chem Tec, 1993.
- [5] Paszum, D. and Spychaj, T. Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate). Ind. Eng. Chem. Res 36 No.4 (1997): 1373-1383.
- [6] Guclu, G., Kasgoz, A., Ozbudak, S., and Orbay, M. Glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) Waste in Xylene. Journal of Applied Polymer Science 69 (1998) : 2311-2319.
- [7] Louis, L., and Nowacky, J. Energy Conservation in Textile and Polymer Processing. Washington, D.C. : American Chemistry Society, 1979.
- [8] อรุณา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่2: กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [9] Wicks, Z. W., Jones, F. N., and Pappas, S. P. Organic Coating: Science and Technology. 2 nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [10] Nylén, P., and Sunderland, E. Modern Surface Coatings. London: John Wiley & Sons, 1965.
- [11] Australia. Oil and Colour Chemists' Association. Surface Coatings. Vol.1: Raw Material and Their Usage. London: Chapman&Hall, 1993.
- [12] Martens, C. R. Technology of Paints, Varnish and Lacquers. New York: Robert E. Krieger, 1974.

- [13] Karayannidis, G. P., and Achilias, D. S. Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate). Macromolecular Materials and Engineering 292 (2007): 128-146.
- [14] Saravari, O., Vessabutr B., and Pimpan, V. Synthesis of Urethane Oils from Waste Poly(ethylene terephthalate) Bottles. Journal of Applied Polymer Science 92 (2004): 3040-3045.
- [15] Saravari, O., Pathomwattanasak, K., and Pimpan, V. Synthesis of Urethane Oils from Palm Oil and Waste PET Bottles. Journal of Applied Polymer Science 105 (2007): 1802-1807.
- [16] Shukla, S. R., and Kulkarni, K. S. Depolymerization of Poly(ethylene terephthalate) Waste. Journal of Applied Polymer Science 85 (2002): 1765-1770.
- [17] Shukla, S. R., and Harad, A. M. Glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) Waste. Journal of Applied Polymer Science 97 (2005): 513-517.
- [18] Pingale, N. D., and Shukla, S. R. Microwave Assisted Ecofriendly Recycling of Poly(ethylene-terephthalate) Bottle Waste. European Polymer Journal 44 (2008): 4151-4156.
- [19] Li, K., Sang, X., and Zhang, D. Depolymerization of Poly(ethylene terephthalate) with Catalyst under Microwave Radiation. Journal of Applied Polymer Science 109 (2008): 1298-1301.
- [20] พร้อมภูมิ พันธุ์วิโรจน์. การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดPETใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2552.
- [21] Fardadco, I. R. Bottle grade PET. [Online]. 2011. Available from : <http://www.golrizpet.com/en/BottlegradePET.aspx> [2011, May, 1].

ภาคผนวก

ภาคผนวก

การย่อยสลายขวดพีตที่ใช้แล้วเพื่อให้ได้ไกลโคไลซ์โพรดักส์

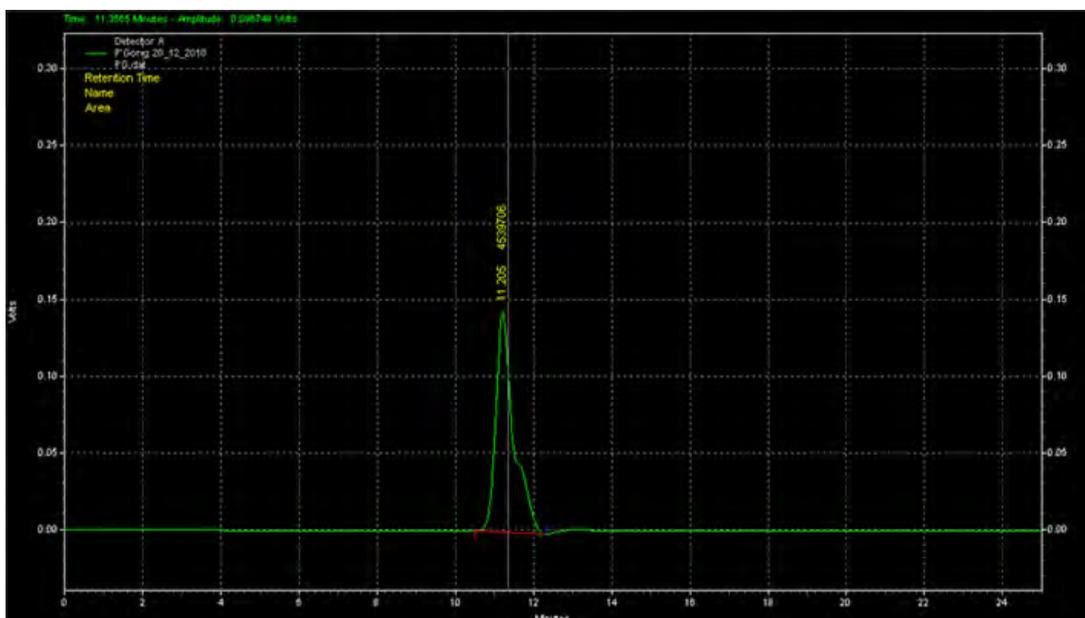
ค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ครั้งที่	ปริมาณ NaOH (ml)	น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)
1	29.00	1.00
2	29.10	1.01
3	28.90	1.00

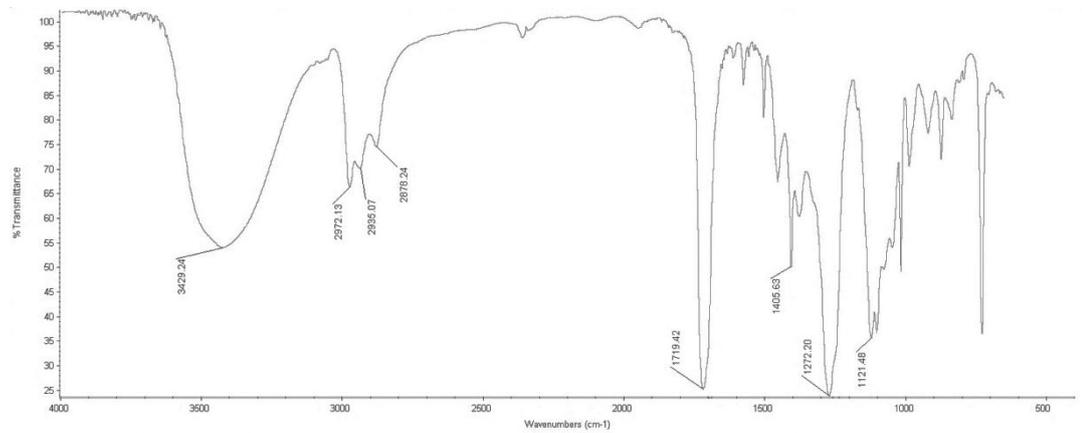
Normality ของ NaOH = 0.4995

ปริมาณของ NaOH ที่ใช้ในการไตเตรต blank = 98 ml

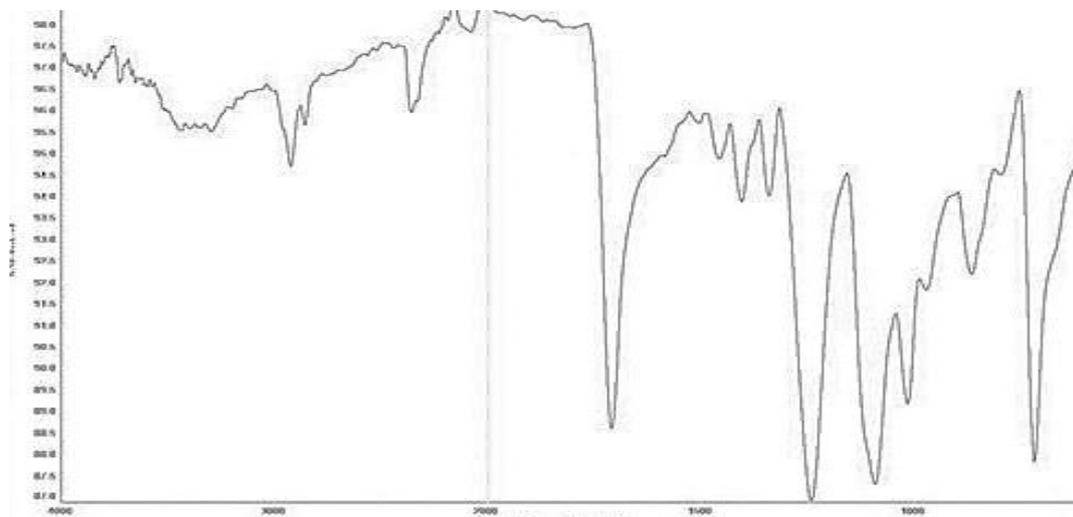
โครมาโตแกรมจากการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิค GPC



FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของไกลโคไลซีโพรดักส์

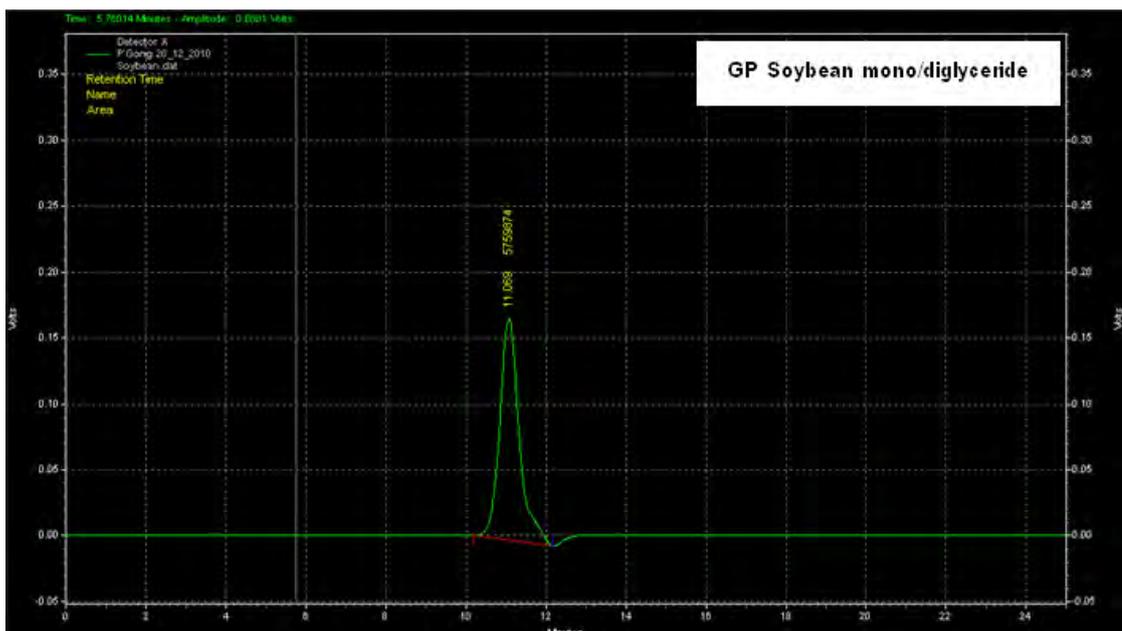
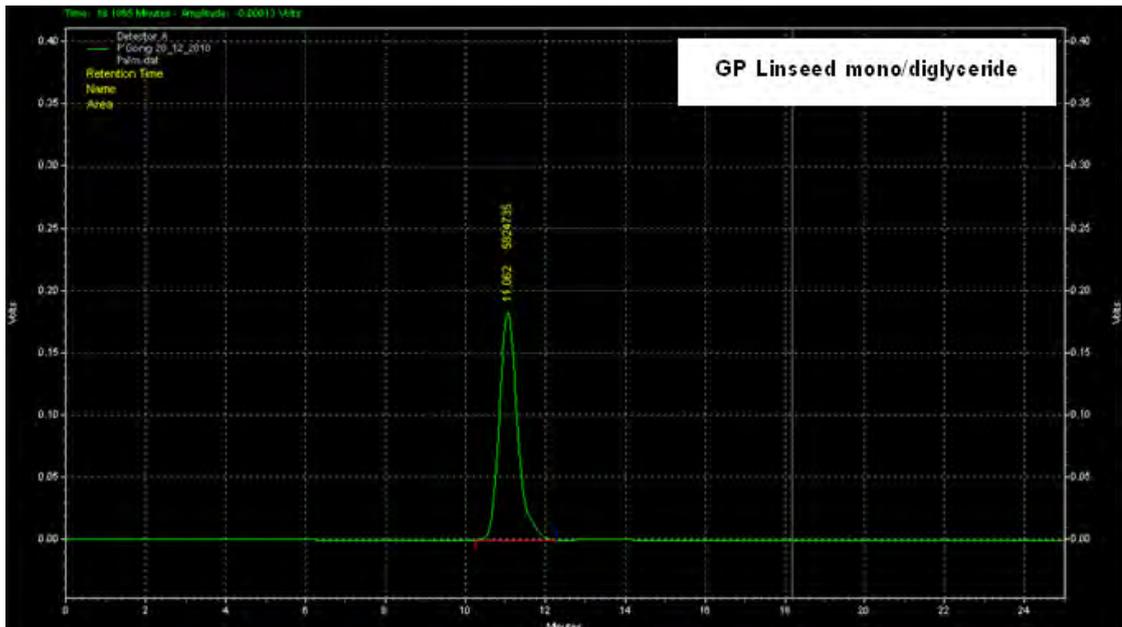


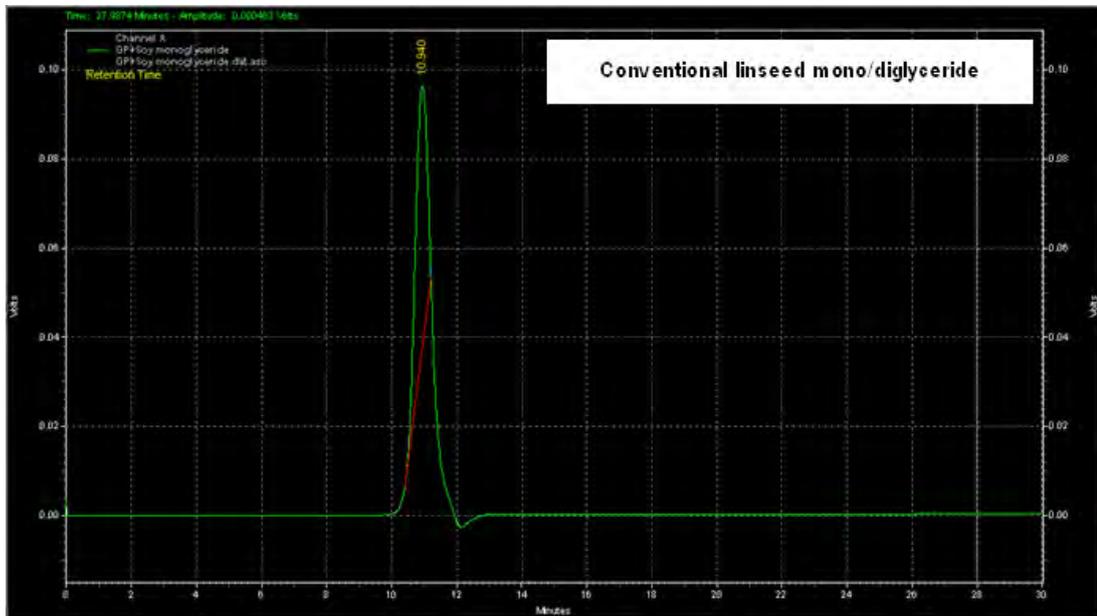
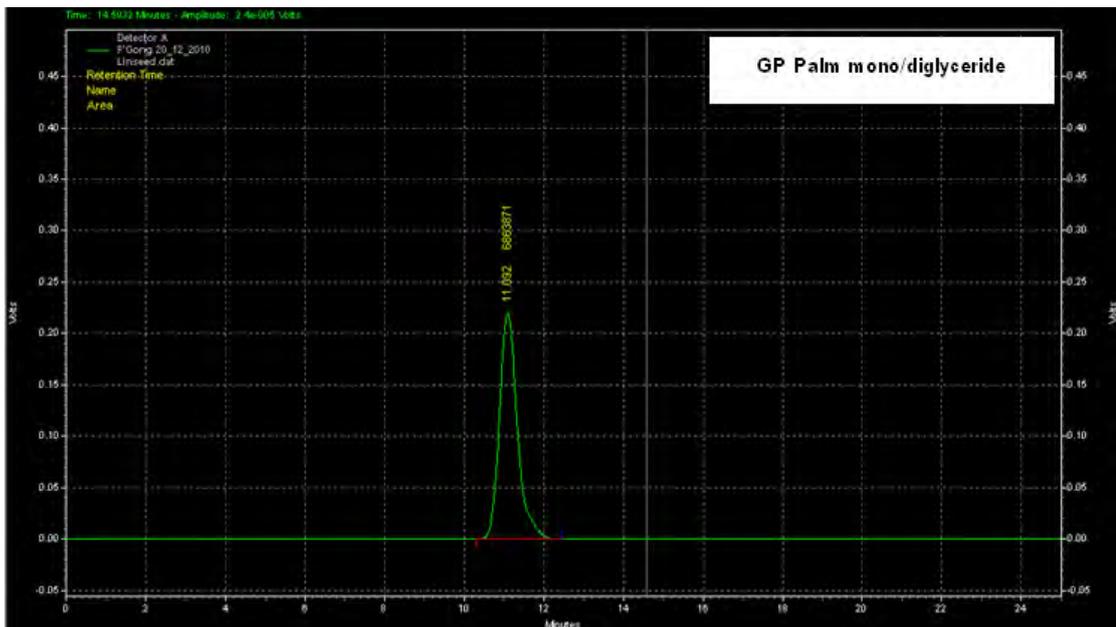
FT-IR สเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันของเศษขวดพีตที่ใช้แล้ว

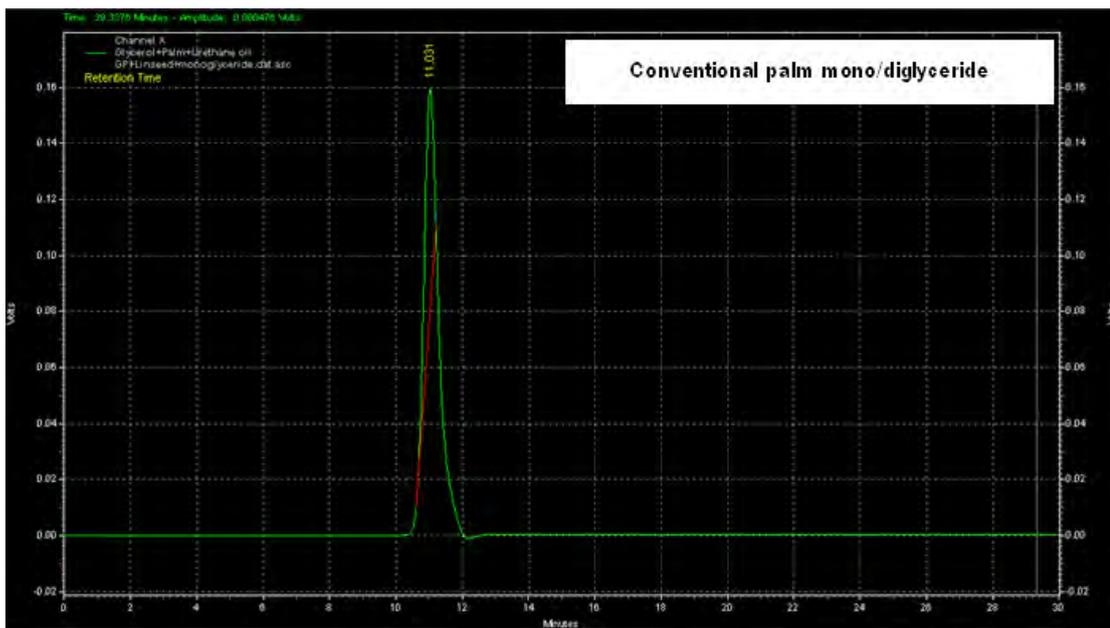
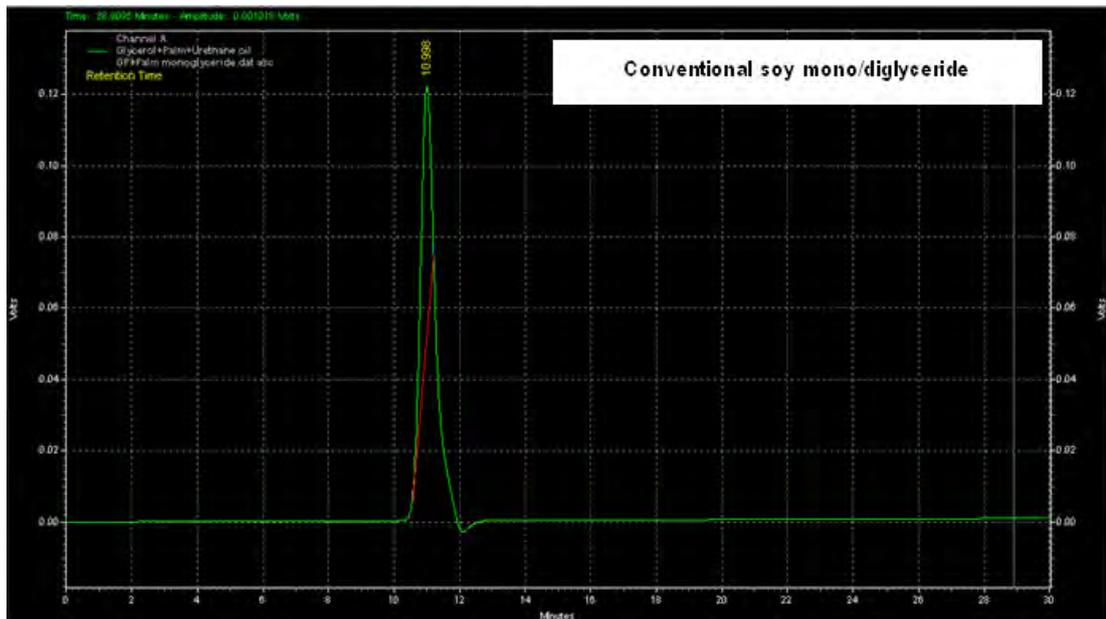


การสังเคราะห์หมอนอและไตรกลีเซอไรด์

โครมาโตแกรมจากการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของหมอนอและไตรกลีเซอไรด์ที่เตรียมได้จากน้ำมันแต่ละสูตรด้วยเทคนิค GPC

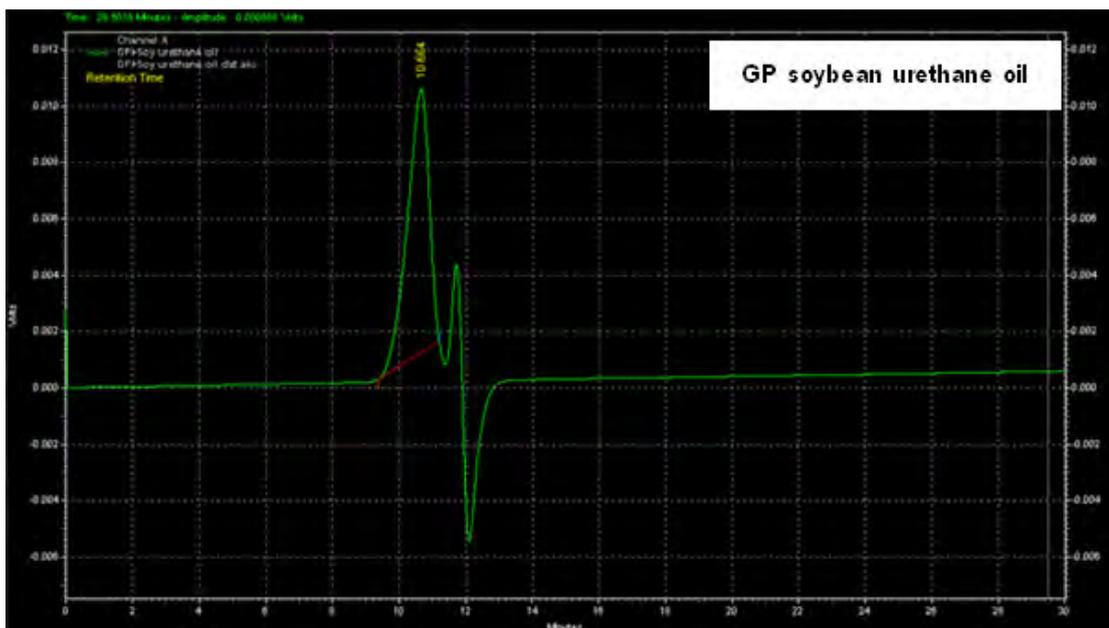
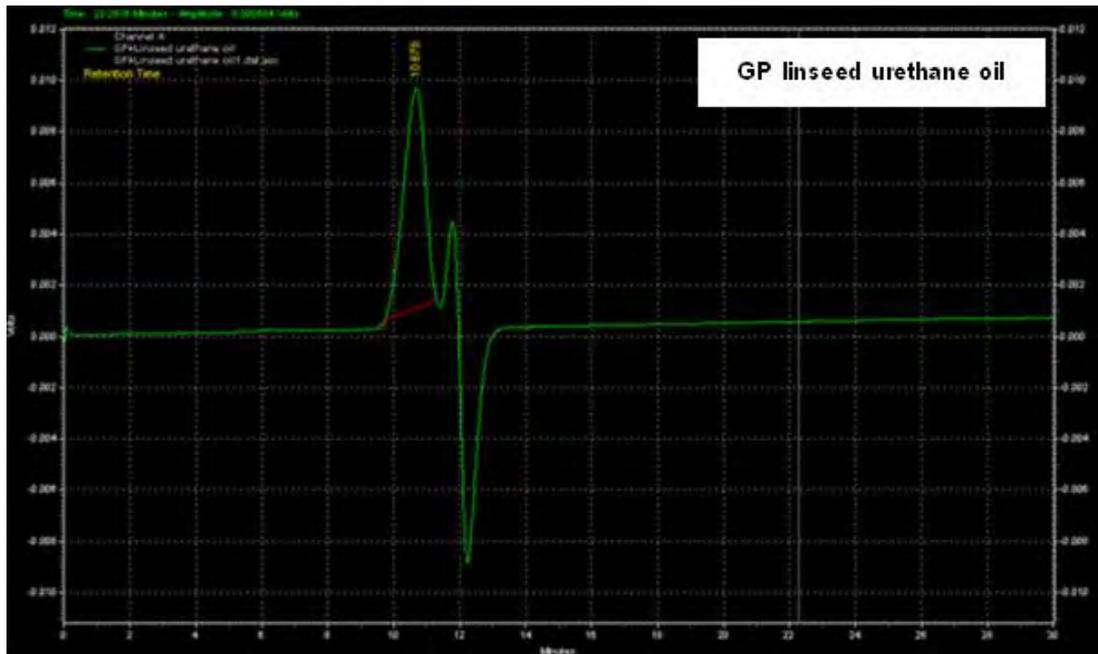


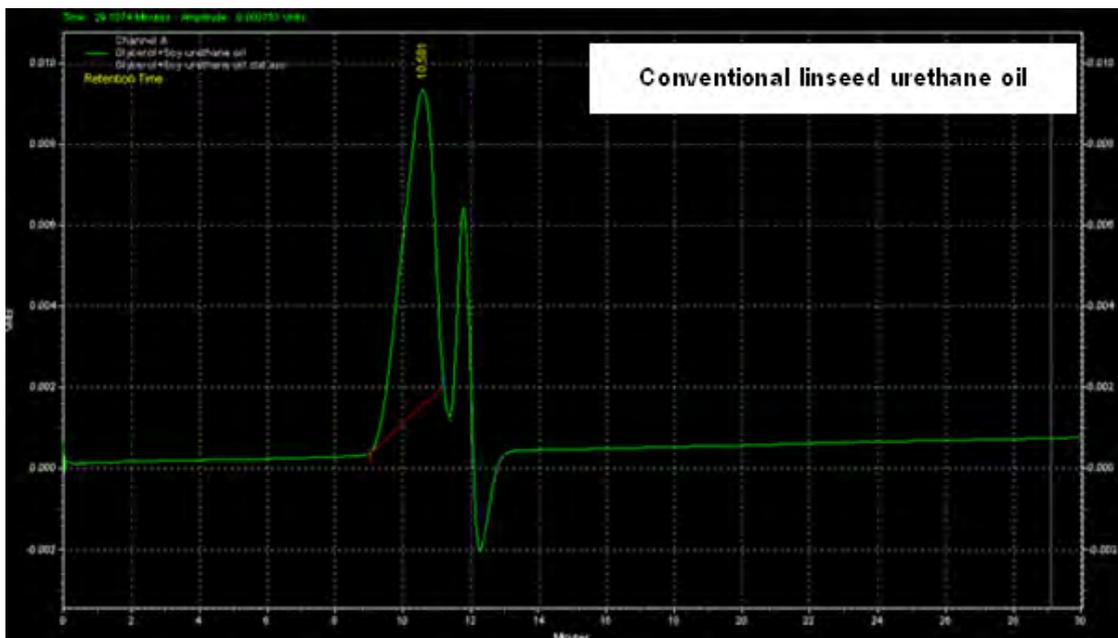


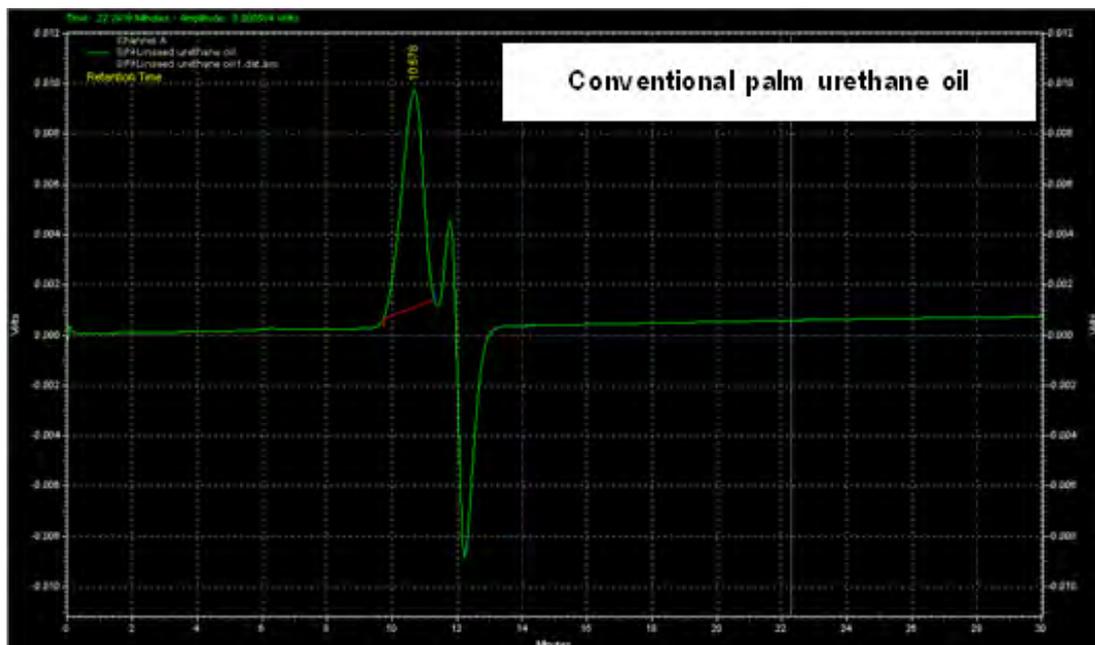
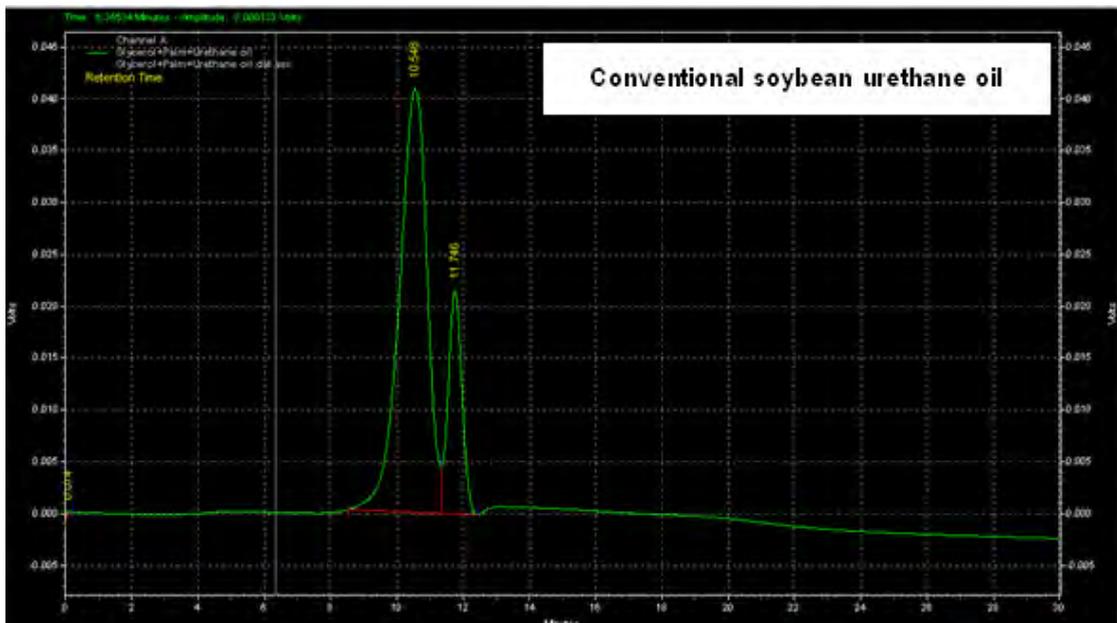


การสังเคราะห์ยูรีเทนออยล์

โครมาโตแกรมจากการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของยูรีเทนออยล์ที่เตรียมได้จากน้ำมันแต่ละ
สูตรด้วยเทคนิค GPC







การทดสอบสมบัติของยูรีเทนออยล์

ปริมาณร้อยละของสารที่ระเหยไม่ได้ของยูรีเทนออยล์ (%NV)

สูตร	น.น. สารก่อนอบ (g)	น.น. สารหลังอบ (g)	%NV
GP Linseed urethane oil	3.17	2.27	71.61
GP soybean urethane oil	3.03	2.19	72.28
GP Palm urethane oil	3.01	2.17	72.09
Conventional linseed urethane oil	3.12	2.24	71.79
Conventional soybean urethane oil	3.16	2.28	72.15
Conventional palm urethane oil	3.12	2.26	72.44
Commercial urethane oil	3.78	2.35	62.17

ค่าของกรดของยูรีเทนออยล์

ความเข้มข้นของ KOH = 0.10023 N

สูตร	ครั้งที่	น.น. สารตัวอย่าง (g)	ปริมาตรที่ใช้ในการไตเตรต (ml)	ค่าของกรด
GP Linseed urethane oil	1	1.01	0.05	0.28
	2	1.03	0.05	0.27
	3	1.01	0.05	0.28
	เฉลี่ย			0.28
GP Soybean urethane oil	1	10.2	0.20	1.10
	2	1.02	0.20	1.10
	3	1.03	0.20	1.09
	เฉลี่ย			1.10
GP Palm urethane oil	1	1.01	0.10	0.56
	2	1.02	0.10	0.55
	3	1.02	0.10	0.55
	เฉลี่ย			0.55

(ต่อ)

สูตร	ครั้งที่	น.น. สารตัวอย่าง (g)	ปริมาตรที่ใช้ในการไตเตรต (ml)	ค่าของกรด
Conventional linseed urethane oil	1	1.02	0.10	0.55
	2	1.01	0.10	0.56
	3	1.01	0.10	0.56
	เฉลี่ย			0.56
Conventional soybean urethane oil	1	1.02	0.20	1.10
	2	1.01	0.20	1.11
	3	1.01	0.20	1.11
	เฉลี่ย			1.11
Conventional palm urethane oil	1	1.02	0.30	1.65
	2	1.01	0.30	1.67
	3	1.01	0.30	1.67
	เฉลี่ย			1.66

ระยะเวลาการแห้งตัวของยูรีเทนออยล์ (นาทีก)

สูตร	ครั้งที่	แห้งแตะได้ (touch dry)	แห้งแตะไม่ติด (tack-free-dry)	แห้งแข็ง (hard dry)
GP Linseed urethane oil	1	140	210	300
	2	135	215	310
	3	145	205	320
	เฉลี่ย	140	210	310
GP Soybean urethane oil	1	180	370	510
	2	180	360	520
	3	180	350	500
	เฉลี่ย	180	360	510
GP Palm urethane oil	1	370	930	1470
	2	360	930	1470
	3	350	930	1470
	เฉลี่ย	360	930	1470

(ต่อ)

สูตร	ครั้งที่	แห้งแตะได้ (touch dry)	แห้งแตะไม่ติด (tack-free-dry)	แห้งแข็ง (hard dry)
Conventional linseed urethane oil	1	90	150	260
	2	90	160	280
	3	90	140	270
	เฉลี่ย	90	150	270
Conventional soybean urethane oil	1	130	285	430
	2	135	270	430
	3	125	300	430
	เฉลี่ย	130	285	430
Conventional palm urethane oil	1	210	465	880
	2	210	460	890
	3	210	470	870
	เฉลี่ย	210	465	880

การทดสอบความแข็งด้วยวิธีการชุบซีด

สูตร	ความทนต่อการชุบซีด (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย
GP Linseed urethane oil	600	600	600	600
GP Soybean urethane oil	600	600	600	600
GP Palm urethane oil	600	600	600	600
Conventional linseed urethane oil	800	800	800	800
Conventional soybean urethane oil	700	700	700	700
Conventional palm urethane oil	700	700	700	700

ความอ่อนตัวของฟิล์ม

สูตร	ความอ่อนตัว (ϕ , mm)			
	1	2	3	เฉลี่ย
GP Linseed urethane oil	3	3	3	3
GP Soybean urethane oil	3	3	3	3
GP Palm urethane oil	3	3	3	3
Conventional linseed urethane oil	3	3	3	3
Conventional soybean urethane oil	3	3	3	3
Conventional palm urethane oil	3	3	3	3

ความติดแน่น (cross-cut, tape test, 1x1 mm)

สูตร	ความติดแน่น			
	1	2	3	เฉลี่ย
GP Linseed urethane oil	5B	5B	5B	5B
GP Soybean urethane oil	5B	5B	5B	5B
GP Palm urethane oil	5B	5B	5B	5B
Conventional linseed urethane oil	5B	5B	5B	5B
Conventional soybean urethane oil	5B	5B	5B	5B
Conventional palm urethane oil	5B	5B	5B	5B

ความทนแรงกระแทก (นิ้ว-ปอนด์)

สูตร	ความทนแรงกระแทก (นิ้ว-ปอนด์)			
	1	2	3	เฉลี่ย
GP Linseed urethane oil	160	160	160	160
GP Soybean urethane oil	160	160	160	160
GP Palm urethane oil	160	160	160	160
Conventional linseed urethane oil	160	160	160	160
Conventional soybean urethane oil	160	160	160	160
Conventional palm urethane oil	160	160	160	160

ความหนืด, 5% NaOH

สูตร	ความหนืด, 5% NaOH (นาที)			
	1	2	3	เฉลี่ย
GP Linseed urethane oil	210	200	220	210
GP Soybean urethane oil	160	160	160	160
GP Palm urethane oil	150	160	140	150
Conventional linseed urethane oil	225	225	225	225
Conventional soybean urethane oil	180	170	190	180
Conventional palm urethane oil	160	160	160	160

วิธีการหาค่าไฮดรอกซิล

การคำนวณค่าไฮดรอกซิล

ค่าไฮดรอกซิลสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าไฮดรอกซิล} = \frac{(B-A) \times N \times 56.1}{W}$$

เมื่อ B คือ ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ไตเตรต blank (ml)

A คือ ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ไตเตรตสารตัวอย่าง (ml)

N คือ normality ของ NaOH

W คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g)

โดยที่ Normality ของ NaOH สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Normality} = \frac{W}{V \times 0.2046}$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของ $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ (g)

V คือ ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไตเตรต $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ (ml)

การคำนวณปริมาณโพลูอินไดไฮโซไซยาเนต

จากค่าไฮดรอกซิลสามารถคำนวณหาจำนวนโมลของ OH ได้จากความสัมพันธ์

$$\text{จำนวนโมล OH} = \frac{\text{ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH/g)} \times 10 \times \text{ปริมาณสารตัวอย่าง (g)}}{56.1}$$

เนื่องจากโมลของ OH = 2 โมลของ TDI

ถ้าใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง OH : NCO = 1:0.9

$$\text{จำนวนโมล NCO} = \frac{\text{จำนวนโมล OH}}{2}$$

$$\frac{\text{ปริมาณ TDI (g)}}{\text{Mw ของ TDI}} = \frac{\text{จำนวนโมล OH}}{2}$$

$$\text{ดังนั้นปริมาณ TDI ที่ใช้} = \frac{\text{จำนวนโมล OH} \times \text{Mw ของ TDI}}{2}$$

ASTM D1640-95

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิวพล พูลเพิ่ม เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ.2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2551 จากนั้น เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา พ.ศ.2552 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา พ.ศ.2553 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี