

การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้ว
ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

นายพร้อมภูมิ พันธุ์โรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Mr. Prompoom Phanwiroj

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2009
Copyright of Chulalongkorn University

พร้อมภูมิ พันธุ์วิโรจน์ : การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ. (PREPARATION OF POLYURETHANE FILMS FROM MICROWAVE-ASSISTED GLYCOLYZED PRODUCTS OF POST-CONSUMER PET BOTTLES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, 88 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ตภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยเริ่มจากการนำขวดเพ็ตใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินพอในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเพ็ตต่อ ไกลคอล 1:6 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิงค์แอสีเตต โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพ็ต เมื่อพิจารณาอัตราการย่อยสลายเพ็ตและร้อยละผลได้ของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์ พบว่าซิงค์แอสีเตต โซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ จากนั้นนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนตเพื่อสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทน ร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1,000 4,000 และ 6,000 โดยใช้กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย ซึ่งสามารถขึ้นรูปพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้เป็นฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นและเรียบใสคล้ายยางได้ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์โดยใช้ซิงค์แอสีเตตและโซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ได้ทุกชนิดเมื่อนำฟิล์มพอลิยูรีเทนไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมไกลโคไลซ์โพรดักส์มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว ความแข็ง ความทนแรงดึง และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ โดยเฉพาะเมื่อใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์จะทำให้ฟิล์มพอลิยูรีเทนมีความเป็นอิลาสโตเมอร์มากขึ้น

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2552

#5172379223 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : PET / GLYCOLYSIS / POLYURETHANE / MICROWAVE / RECYCLING

PROMPOOM PHANWIROJ : PREPARATION OF POLYURETHANE FILMS FROM
MICROWAVE-ASSISTED GLYCOLYZED PRODUCTS OF POST-CONSUMER PET
BOTTLES. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.PRANUT POTIYARAJ, PH.D.,
88 pp.

In this research, thermoplastic polyurethane were prepared from microwave-assisted glycolyzed products of poly(ethylene terephthalate) (PET). Postconsumer soft-drink PET bottles were depolymerized with excess diethylene glycol at the ratios between PET and glycol of 1:6 under microwave energy in the presence of a catalyst. The catalysts used in the experiment are zinc acetate, sodium bicarbonate, sodium carbonate, sodium chloride and calcium chloride. As revealed by the rate of PET depolymerization and percentage yield of the reaction, zinc acetate, sodium bicarbonate and sodium carbonate were found to be effective catalysts used for PET glycolysis under microwave energy. In order to synthesis polyurethane, the glycolyzed products were reacted with diphenyl methane diisocyanate. A chain extender, that is castor oil or polyethylene glycols with molecular weight of 1000, 4000 and 6000, was also used during the solution polymerization. Clear flexible polyurethane films with smooth texture were then successfully obtained. The prepared polyurethane films were then studied for their physical properties. It was pointed out that the type of chain extender used for polyurethane polymerization and the type of catalyst used for PET glycolysis affected processability, onset thermal degradation temperature, hardness, tensile strength as well as glass transition temperature of the prepared films. Furthermore, when a high molecular weight polyethylene glycol was used as a chain extender, the obtained film exhibited more elastomeric characteristics.

Department:.....Materials Science..... Student's Signature.....

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

Academic Year: 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์อย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาของท่านผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงแนะแนวทางในการจัดทำรูปแบบวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมและให้ความรู้ต่างๆ อันมีค่าให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณหน่วยงานต่างๆ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี และการทดสอบ ดังรายนามต่อไปนี้

1. บริษัท สยามเคมีคอล อินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เอ็มดีไอ
2. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี
3. คุณวรวรตน์ แก้วนิล ที่ให้ความช่วยเหลือในการประกอบและทดลองเครื่องไมโครเวฟสำหรับการทดลอง
4. คุณวสมพงศ์ เลิศชัยประเสริฐ ที่ให้ความอนุเคราะห์เปิดสำหรับการรีไซเคิล
5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบุคลากรทุกท่าน
6. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการศึกษา และทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้การสนับสนุนและคอยให้กำลังใจผู้วิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นิสิตภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือและความปรารถนาดีแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต.....	4
2.2 การรีไซเคิลพลาสติก.....	6
2.2.1 การรีไซเคิลพลาสติกทางกายภาพ.....	7
2.2.2 การรีไซเคิลทางเคมี.....	8
2.3 การรีไซเคิลเพ็ต.....	8
2.3.4 การรีไซเคิลเพ็ตด้วยกระบวนการทางกายภาพ.....	9
2.2.3 การรีไซเคิลเพ็ตด้วยกระบวนการทางเคมี.....	9
2.4 ไมโครเวฟ.....	13
2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ.....	13
2.4.2 กลไกการทำงานของเตาไมโครเวฟ.....	14
2.2.3 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ.....	15
2.5 พอลิยูรีเทน.....	17
2.5.1 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน.....	18
2.5.2 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน.....	18

บทที่	หน้า
2.5.3 การนำไปใช้งานของพอลิยูรีเทน.....	25
2.6 เทคนิคการสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
2.6.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลก์.....	26
2.6.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย.....	26
2.7 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
2.7.1 การหล่อแบบ.....	26
2.8 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ.....	27
2.8.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคFT-IR.....	27
2.8.2 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส.....	32
2.8.3 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี.....	33
2.8.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	36
2.8.5 การทดสอบความแข็ง.....	38
2.8.7 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง.....	41
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
3. วิธีการทดลอง.....	45
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	45
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	45
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	46
3.3.1 การเตรียมวัสดุ.....	46
3.3.2 การโกลโคไลซ์เพ็ด.....	46
3.3.3 การหาอัตราการย่อยสลายเพ็ด และร้อยละผลได้ของเพ็ดที่ถูกโกลโคไลซ์.....	48
3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติโกลโคไลซ์โพรดักส์.....	48
3.3.5 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย.....	50
3.3.6 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยการหล่อแบบ.....	51
3.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี.....	52
3.3.8 การทดสอบความแข็ง.....	52
3.3.9 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง.....	53

บทที่	หน้า
3.3.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	53
3.3.10 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต.....	54
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	56
4.1 ไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	56
4.1.1 อัตราการย่อยสลาย.....	56
4.1.2 ลักษณะของไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	57
4.1.3 ร้อยละผลได้ของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์	58
4.1.4 อุณหภูมิการสลายตัว.....	60
4.1.5 อุณหภูมิการหลอมเหลว.....	61
4.2 พอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	62
4.2.1 การขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ.....	63
4.2.2 ลักษณะของฟิล์มพอลิยูรีเทน.....	64
4.2.3 โครงสร้างทางเคมี.....	65
4.2.4 ความแข็ง.....	67
4.2.5 สมบัติด้านแรงดึง.....	68
4.2.6 เสถียรภาพทางความร้อน.....	72
4.2.7 สมบัติเชิงกลพลวัต.....	73
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	88

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต..... 5
ตารางที่ 2.2	เซนเซอร์เทนเดอ์ทางค้ำที่นิยมใช้..... 23
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เซียร์เอมีน..... 24
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนโดยโมลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ เอ็มดีไอ และเซนเซอร์เทนเดอ์ใน การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย.. 50
ตารางที่ 4.1	ตำแหน่งของฟังก์ชันที่สำคัญต่างๆที่พบในสเปกตรัมของไกลโคไลซ์..... 60
ตารางที่ 4.2	ลักษณะของพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้เมื่อใช้เซนเซอร์เทนเดอ์และตัวเร่ง ปฏิกิริยาในการไกลโคไลซ์..... 63
ตารางที่ 4.6	ตำแหน่งฟังก์ชันที่สำคัญต่างๆที่พบในสเปกตรัมของชิ้นงานพอลิยูรีเทน อีลาสโตเมอร์..... 66

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	การจำแนกการรีไซเคิลทางเคมีของพีศด้วยสารตั้งต้นชนิดต่างๆ.....	10
รูปที่ 2.2	การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า.....	16
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน.....	18
รูปที่ 2.4	โครงสร้างเรโซแนนซ์ของหมู่ไอโซไซยาเนต	18
รูปที่ 2.5	โครงสร้างทางเคมีของ 2,4-TDI และ 2,6-TDI.....	20
รูปที่ 2.6	โครงสร้างทางเคมีของ 4,4-MDI และ 2,4-MDI	21
รูปที่ 2.7	กระบวนการผลิตพอลิเมอริก MDI และ MDI บริสุทธิ์.....	21
รูปที่ 2.8	ลักษณะการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ.....	27
รูปที่ 2.9	แผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer.....	28
รูปที่ 2.10	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม.....	29
รูปที่ 2.11	ปัจจัยทางโครงสร้างที่มีผลกระทบต่อ T_g	31
รูปที่ 2.12	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์.....	32
รูปที่ 2.13	เทอร์โมแกรมทั่วไปที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC.....	35
รูปที่ 2.14	รูปแบบแสดงการให้แรงกับชิ้นงานในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA.....	36
รูปที่ 2.15	การสั่นนอกเฟสของวัสดุ viscoelastic.....	37
รูปที่ 2.16	เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA.....	38
รูปที่ 2.17	ลักษณะการทดสอบและชนิดของหัวกด (indenter).....	40
รูปที่ 2.18	ลักษณะการทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมบัติด้านแรงดึง.....	42
รูปที่ 3.1	ชุดเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่ใช้ในการย่อยสลายพีศ.....	46
รูปที่ 3.2	Fourier Transform Infrared Spectrometer.....	48
รูปที่ 3.3	Thermogravimetric analyzer (TGA).....	49
รูปที่ 3.4	Differential scanning calorimeter.....	50
รูปที่ 3.5	Durometer ชนิด Shore A.....	52
รูปที่ 3.6	Universal testing machine.....	53
รูปที่ 3.7	Dynamic mechanical analyzer.....	55
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนการวิจัย.....	55

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.1	อัตราการทำลายสลายพีตด้วยไดเอทิลีนไกลคอล..... 57
รูปที่ 4.2	ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสด้วยไดเอทิลีนไกลคอลกับตัว เร่งปฏิกิริยาต่างๆ (ก) ซิงค์แอสีเทต (ข) โซเดียมโบคาร์บอเนต (ค) โซเดียม คาร์บอเนต..... 58
รูปที่ 4.3	ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ..... 59
รูปที่ 4.4	FT-IR สเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์..... 60
รูปที่ 4.5	ทีจีเอเทอร์โมแกรมของไกลโคไลซ์โพรดักส์..... 61
รูปที่ 4.6	อุณหภูมิหลอมเหลวของไกลโคไลซ์โพรดักส์..... 62
รูปที่ 4.7	พอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย..... 63
รูปที่ 4.8	ชิ้นงานพอลิยูรีเทนอิลาสโตเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ แบบสารละลายและขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ..... 65
รูปที่ 4.9	FT-IR สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ชิ้นงานพอลิยูรีเทนอิลาสโตเมอร์..... 65
รูปที่ 4.10	ค่าความแข็งของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้..... 67
รูปที่ 4.11	ความต้านแรงดึงของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ..... 69
รูปที่ 4.12	การยืดตัวที่จุดขาดพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากเซนเอกซ์เทนเดอร์..... 70
รูปที่ 4.13	มอดุลัสยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ 71
รูปที่ 4.14	เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิยูรีเทนที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ..... 72
รูปที่ 4.15	เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิยูรีเทนที่ใช้ตัวเร่งต่างชนิดกัน..... 72
รูปที่ 4.16	เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิยูรีเทนที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ..... 73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ เพ็ต (poly(ethylene terephthalate),PET) เป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีการนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภคในปริมาณสูง ด้วยสมบัติเด่นหลายประการ อาทิเช่น ความแข็งแรง ความใส ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม รวมถึงความไม่เป็นพิษต่อผู้บริโภค เพ็ตเป็นวัสดุที่นิยมนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม แต่เนื่องจากเพ็ตเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถแตกสลายได้เองตามธรรมชาติ ประกอบกับปริมาณการอุปโภคบริโภคที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา ทำให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกจากเพ็ตที่ใช้แล้ว ส่งผลต่อเนื้อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทุกคนต้องตระหนักและให้ความสนใจเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาอย่างจริงจัง วิธีการที่สามารถช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้คือ การนำขยะเหล่านั้นกลับมาแปรใช้ใหม่หรือที่เราเรียกกันว่าการรีไซเคิล

การรีไซเคิลนั้นมีกระบวนการหลักอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ การรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกายภาพ (physical recycling) และการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical recycling) การรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกายภาพเป็นการนำพลาสติก ซึ่งอาจเป็นเศษพลาสติกเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิต หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาหลอมหรือหลอมผสมกับพลาสติกใหม่เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ การรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกายภาพนั้นมีข้อดีคือมีต้นทุนไม่สูง และสามารถทำได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดเรื่องความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบและจากการที่เครื่องจักรที่ใช้ในการบดผสมนั้นก่อให้เกิดแรงเฉือนเชิงกลทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์แตกออกจนน้ำหนักโมเลกุลลดลง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งมีสมบัติบางประการไม่ดีเท่ากับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกใหม่ ส่วนการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมีนั้นเป็นการใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดการแตกสลายของพอลิเมอร์จนได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารโมเลกุลเล็กชนิดใหม่ ที่สามารถนำไปใช้หรือนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน การรีไซเคิลเพ็ตด้วยกระบวนการทางเคมีสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ไกลโคลลิซิส (glycolysis) เมทาโนลิซิส (methanolysis) และไฮโดรลิซิส (hydrolysis) กระบวนการย่อยสลายเพ็ตด้วยการไกลโคลลิซิสเป็นวิธีที่มีการศึกษากันมากที่สุดเพราะเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากนัก ไม่ต้องดำเนินปฏิกิริยาภายใต้ภาวะ

ที่รุนแรง ไม่ก่อให้เกิดสารที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนในระบบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว น้ำมันยูรีเทน เป็นต้น

โดยทั่วไปในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายพีศด้วยการไกลโคไลซิสนั้น จะต้องมีทำให้ ความร้อนเป็นระยะเวลาประมาณ 4-6 ชั่วโมง ทำให้การนำวิธีการดังกล่าวไปขยายผลสู่ระดับ อุตสาหกรรมเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสิ้นเปลืองทั้งเวลาและพลังงาน ในปัจจุบันมีความสนใจในการ นำไมโครเวฟมาเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนสำหรับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ แทนการให้ความร้อน แบบเดิม เนื่องจากประสิทธิภาพในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นสูงกว่า ทำให้ปฏิกิริยา เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในตู้อบไมโครเวฟมีแมกนีตรอนทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ไมโครเวฟ โดยการแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานในรูปคลื่นไมโครเวฟ แล้วส่งผ่านคลื่นเข้าสู่ วัตถุที่สามารถดูดซึมคลื่นไมโครเวฟจนทำให้โมเลกุลภายในเกิดการสั่นและหมุนส่งผลให้เกิดความ ร้อนขึ้นมาภายในทั่วทั้งวัตถุและส่งผ่านสู่โมเลกุลของวัตถุข้างเคียงทำให้เกิดการให้ความร้อนได้ อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว พบว่าปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าแหล่งพลังงานความร้อนแบบดั้งเดิมมาก

พอลิยูรีเทนเป็นหนึ่งในวัสดุพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานสูงเช่นกัน โดยโครงสร้างของ พอลิยูรีเทนจะประกอบด้วยหมู่ยูรีเทนซึ่งสามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับไดออล และอาจใช้สารประเภทเชนเอ็กเทนเดอร์ (chain extender) ร่วมด้วย สามารถ นำไปผลิตเป็นวัสดุได้หลากหลายสภาพเช่น โฟมชนิดแข็ง โฟมชนิดยืดหยุ่น อีลาสโตเมอร์ กาว สาร เคลือบผิว เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานหลายๆ ด้านได้ เช่นอุตสาหกรรม ขนวนกันความร้อน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารเคลือบผิวและสี เป็นต้น พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์เป็นพอลิยูรีเทนประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการดัดแปลงโครงสร้างของพอลิยูรีเทนให้มีสมบัติของอีลาสโตเมอร์ที่อุณหภูมิใช้งาน และสามารถสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติแข็งหรือยืดหยุ่นได้ตามต้องการ โดยการเลือกใช้สารเคมีที่มี โครงสร้างต่างๆ ที่เหมาะสมเป็นสารตั้งต้น วิธีในการสังเคราะห์เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขูดพีศใช้แล้วภายใต้ พลังงานไมโครเวฟ มาเตรียมเป็นพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นนอกจากจะ สามารถตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานที่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังเป็นการช่วยลดปริมาณขยะ พลาสติกที่เป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน รวมทั้งลดปริมาณการใช้วัตถุดิบจาก สารปิโตรเคมีที่ในอนาคตมีแต่น้อยลงอีกด้วย

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำขวดพลาสติกแล้วมาย่อยสลายด้วยไกลคอลภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งที่เป็นสารประเภทโลหะแอสีเทตและที่ไม่ใช่สารประเภทโลหะแอสีเทตต่อจลศาสตร์ของปฏิกิริยา จากนั้นนำไกลโคไลซ์พอร์คัสที่ได้มาสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์โดยนำมาทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นประเภทไดไอโซไซยาเนต คือ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (4,4 diphenylMethanediisocyanate, MDI) ในระบบที่มีเซนเอกซ์เทนเดอร์อยู่ด้วย เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้น

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

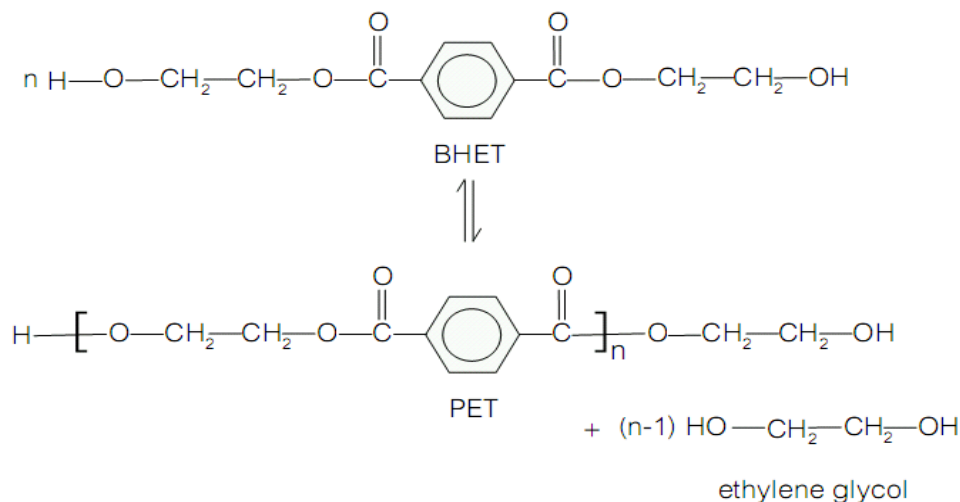
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต (poly(ethylene terephthalate), PET) [1]

เพ็ตเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ในตระกูลพอลิเอสเทอร์ประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในการอุปโภค บริโภคมากมาย โดยมีจุดเริ่มต้นมาจากการผลิตเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่มีชื่อทางการค้าว่า Dacron® และ Terylene® ต่อมาจึงเริ่มนำมาผลิตใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุที่ทำจากแก้วและอะลูมิเนียม และได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางส่งผลให้ปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างมหาศาล ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติเด่นหลายๆประการคือ

- 1) มีความใส
- 2) น้ำหนักเบา
- 3) มีความเหนียว ทนต่อแรงกระแทกและการตกกระแทบสูง ไม่เปราะเหมือนแก้ว
- 4) สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีแม้ที่ความดันสูง
- 5) สามารถนำมาเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารได้ ปลอดภัยและไม่มีผลกระทบต่อรสชาติอาหารที่บรรจุ

ซึ่งสมบัติเหล่านี้เป็นผลมาจากสมบัติทางกายภาพที่ดีของเพ็ตดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 แต่ทั้งนี้ลักษณะภายนอกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนั้นขึ้นกับกระบวนการการขึ้นรูป และประวัติการได้รับความร้อน (thermal history) รวมถึงกระบวนการสังเคราะห์เพื่อให้มีโครงสร้างตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานและพอลิเมอร์ชนิดกึ่งอสัณฐาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะโปร่งใสถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 500 นาโนเมตรและมีลักษณะขุ่นขาวหรือทึบแสงเมื่อมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับไมครอน และนอกจากนี้ความขุ่นยังขึ้นกับความเป็ผลึกอีกด้วย

ขั้นที่สอง ให้ความร้อนแก่ของผสมซึ่งได้จากขั้นแรก ที่อุณหภูมิ 270-285 องศาเซลเซียส ที่ความดันประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอทผลผลิตจากปฏิกิริยาคือพีเทน้าหนักโมเลกุลสูงและเอทิลีนไกลคอลเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ดังสมการต่อไปนี้



เนื่องจากปฏิกิริยานี้สามารถเกิดย้อนกลับได้ จึงต้องคอยกำจัดเอทิลีนไกลคอลออกจากระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อนำไปใช้งานต่อไปในขั้นตอนต่อไป โดยขั้นตอนนี้เป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเหลว (melt polymerization)

สำหรับขวดน้ำพีเทนที่เราใช้กันนั้นมักเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ซึ่งผลิตจากไกลคอลมากกว่าหนึ่งชนิดและ/หรือ กรดไดเบสิกมากกว่าหนึ่งชนิด เรียกว่า “PETG” เช่นการใช้ isophthalic acid (IPA) เป็นโคมอนอเมอร์ร่วมกับ TPA และใช้ cyclohexanedimethanol (CHDH) diethyleneglycol (DEG) ร่วมกับเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น ซึ่งผลจากการใช้มอนอเมอร์หลายตัวนั้น จะส่งผลให้คุณสมบัติของโครงสร้างลดลง และมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) มากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความใสและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

2.2 การรีไซเคิลพลาสติก (plastic recycling) [1]

การรีไซเคิลเป็นการจัดการวัสดุเหลือใช้ที่กำลังจะเป็นขยะ โดยนำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพ โดยเฉพาะการหลอม เพื่อให้เป็นวัสดุใหม่แล้วนำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง ซึ่งวัสดุที่ผ่านการแปรสภาพนั้นอาจจะเป็นผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ก็ได้ การรีไซเคิลพลาสติกได้ถูกให้ความหมายจาก ASTM D5033-90 ว่าเป็นกระบวนการที่นำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1) การรีไซเคิลระดับที่หนึ่ง (primary recycling) เป็นการนำเศษพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการการผลิตเดิมมาผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เดิมหรือใกล้เคียง

2) การรีไซเคิลระดับที่สอง (secondary recycling) เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วมากผ่านกระบวนการการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบอื่นที่แตกต่างจากการใช้งานครั้งแรกซึ่งมักพบว่า มีพลาสติกชนิดอื่นปนเปื้อนอยู่มาก

3) การรีไซเคิลระดับที่สาม (tertiary recycling) เป็นการนำขยะพลาสติกมาใช้ในการกระบวนการผลิตสารเคมีพื้นฐานทั่วไปโดยมุ่งเน้นขยะพลาสติกจากชุมชน หรือขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยกซึ่งกระบวนการที่ใช้จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) และ ไพโรลิซิส (pyrolysis)

4) การรีไซเคิลระดับที่สี่ (quaternary recycling) เป็นการนำพลังงานที่ได้จากการเผาขยะพลาสติกมาใช้

2.2.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling)

การรีไซเคิลทางกายภาพ เป็นการรีไซเคิลโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ นั่นคือ เป็นการนำขยะพลาสติกพลาสติก ทั้งจากกระบวนการผลิตและจากการอุปโภค บริโภค มาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้ง โดยอาจจะนำไปผสมกับวัตถุดิบบริสุทธิ์หรือไม่ก็ได้ แล้วนำไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดิมหรือเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่อีกครั้ง ซึ่งถือเป็นการรีไซเคิลระดับที่หนึ่งและระดับที่สองตามที่แจกแจงไว้ในมาตรฐาน ASTM D5033-90 ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจำนวนมากจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี การรีไซเคิลทางกายภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการได้แก่

1) กระบวนการรีเคลมเมชัน (reclamation process) เป็นกระบวนการที่มีการแยกขยะพลาสติกตามชนิดของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการการผลิตเป็นพลาสติกกรีไซเคิล เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตอื่นๆต่อไป

2) กระบวนการแบบคอมมิงเกิลด์ (commingled plastics process) เป็นการนำขยะพลาสติกซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นขยะผสมไปผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เลย โดยไม่ผ่านการคัดแยกชนิดของพลาสติก

2.2.2 การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling)

การรีไซเคิลทางเคมีนั้นถูกจัดอยู่ในการรีไซเคิลระดับที่สาม ตามที่ระบุไว้ใน ASTM D5033-90 โดยทำให้ขยะพลาสติกนั้นเกิดการสลายตัวทางเคมีเพื่อให้ได้มอนอเมอร์หรือสารเคมีพื้นฐานต่างๆซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์และสารเคมีชนิดอื่นๆต่อไป หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง นั่นคือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีกลายเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ โดยทั้งนี้การเกิดการสลายตัวทางเคมีดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการใหญ่ๆคือ กระบวนการแบบเปียก (wet process) และกระบวนการแบบแห้ง (dry process) ซึ่งจะกล่าวถึงแต่กระบวนการแรกเท่านั้น

กระบวนการแบบเปียกเป็นกระบวนการที่ทำให้ขยะพลาสติกเกิดการสลายตัวทางเคมีด้วยปฏิกิริยากับสารเคมีซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวย่อยสลาย (degradation agent) โดยชนิดของปฏิกิริยาเคมีนั้นจะขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่นำไปใช้ในการย่อยสลายนั่นๆ เช่น น้ำ กรด แอลกอฮอล์ หรือ ไกลคอล เป็นต้นโดยขยะพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้นั้นต้องมีโครงสร้างและพันธะที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารย่อยสลายเหล่านั้นได้ ซึ่งส่วนมากได้แก่ พวกรวมๆที่เทรน เอสเทอร์ อีเทอร์ และเอไมด์ นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นยังมีความเฉพาะเจาะจงอีกด้วย กล่าวคือ แม้จะใช้ตัวย่อยสลายชนิดเดียวกันแต่ถ้าใช้ย่อยสลายพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ผลลัพธ์ที่ได้ก็必将มีความแตกต่างกันไป สำหรับข้อดีของการรีไซเคิลทางเคมี คือการรีไซเคิลทางเคมี คือได้มอนอเมอร์และสารเคมีพื้นฐานต่างๆซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์และสารเคมีชนิดอื่นๆต่อไป หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง และสำหรับสารที่ได้นั้นจะมีความบริสุทธิ์มากซึ่งเป็นจุดเด่นของการรีไซเคิลทางเคมี นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับการรีไซเคิลขยะพลาสติกจำพวกเทอร์โมเซตซึ่งไม่สามารถใช้การรีไซเคิลแบบกายภาพได้เพราะขยะพวกนี้ไม่สามารถหลอมได้

2.3 การรีไซเคิลพีที (PET Recycling) [1]

ผลจากการที่พีทีเป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆมากมาย และความต้องการในการใช้งานมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณขยะพีทีในปัจจุบันนั้นสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ทั้งขยะที่เกิดจากการอุปโภค บริโภค หรือขยะที่เกิดจากกระบวนการผลิต ดังนั้นหนทางที่จะแก้ไขปัญหาขยะบรรจุภัณฑ์พีทีที่มากมายเหล่านี้ได้คือ “กระบวนการรีไซเคิล” ซึ่งวิธีการในการรีไซเคิลพีทีนั้นสามารถทำได้ทั้งกระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ โดยอาศัยสมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติกของพีทีซึ่งสามารถหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ด้วยความร้อน และกระบวนการ

รีไซเคิลทางเคมี โดยอาศัยความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารต่างๆเพื่อทำให้เกิดการย่อยสลายขึ้นได้นั่นเอง

2.3.1 การรีไซเคิลพีทด้วยกระบวนการทางกายภาพ

ในการรีไซเคิลขยะพีทด้วยกระบวนการทางกายภาพนั้นควรใช้กระบวนการรีเคลมเมชันเพื่อแยกขยะพลาสติกกับสิ่งเจือปนออกก่อน จากนั้นสามารถนำไปจัดการได้หลายวิธีเช่น

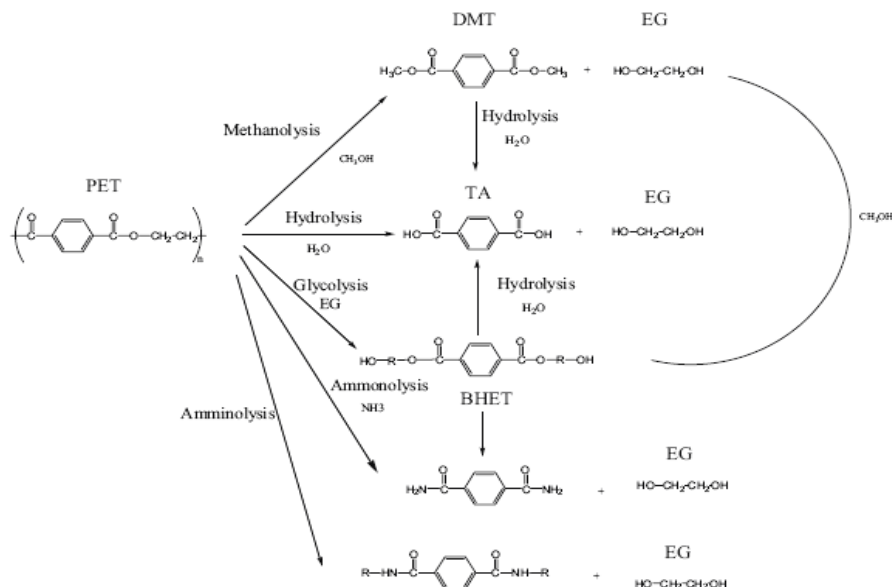
1) นำขยะพีทมาหลอมแล้วนำไปขึ้นรูปและตัดให้เป็นเม็ดพีทใหม่เพื่อนำเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลนี้ไปใช้ร่วมกับพลาสติกบริสุทธิ์ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้

2) นำขยะพีทมาหลอมแล้วนำฉีดเป็นเส้นใยเพื่อนำไปผลิตเป็นเส้นใยพอลิเอสเตอร์ต่อไป

3) นำขยะพีทมาใช้เป็นตัวเติม (filler) ในพลาสติกบางชนิด

2.3.2 การรีไซเคิลพีทด้วยกระบวนการทางเคมี

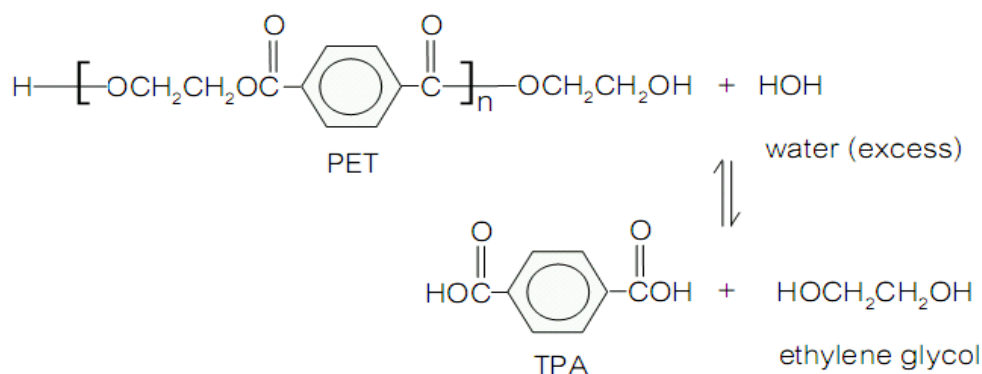
ในการรีไซเคิลพีทด้วยกระบวนการทางเคมีนั้น เริ่มจากการย่อยสลายพีทด้วยกระบวนการทางเคมี จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือสารชนิดอื่นต่อไป สำหรับการย่อยสลายพีททางเคมีนั้นสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับสารตั้งต้นที่ใช้ ได้แก่ ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) เมทาโนลิซิส (methanolysis) ไกลโคลิซิส (glycolysis) อะมิโนลิซิส (aminolysis) แอซิโดลิซิส (acidolysis) และ แอมโมโนลิซิส (ammonolysis)

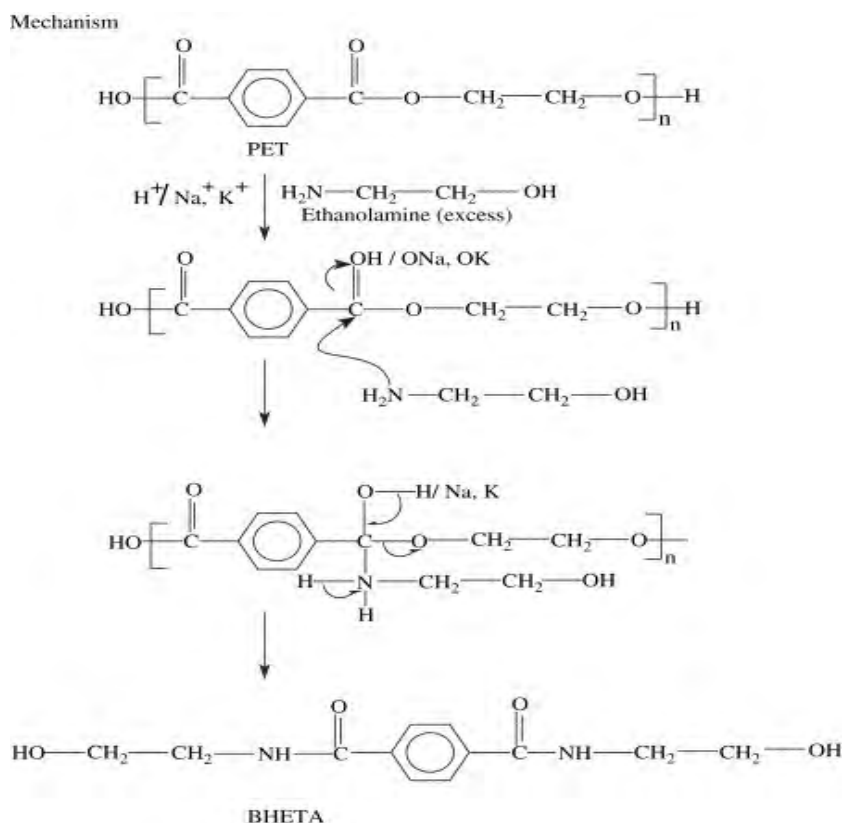


รูปที่ 2.1 การจำแนกการรีไซเคิลทางเคมีของพีทด้วยสารตั้ง

1. ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis reaction)

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะใช้น้ำเป็นสารถ่อย่อยสลายโดยใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดหรือ บังคับให้เกิดปฏิกิริยาในภาวะค่อนข้างรุนแรง(ที่อุณหภูมิและความดันสูง)ซึ่งผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ กรดเทรฟทาเลต และเอทิลีนไกลคอล โดยกรดที่ได้นี้สามารถทำให้บริสุทธิ์โดยการตกผลึกจาก ตัวทำละลายและสามารถนำกลับไปใช้ใหม่เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นต่อไป แต่กระบวนการไฮโดรลิซิสนั้นมีข้อด้อยหลายประการเช่น ปัญหาในการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ภาวะที่รุนแรงในการดำเนินปฏิกิริยาซึ่งทำให้ยากต่อการสร้างภาวะที่รุนแรงและยากต่อการ ควบคุม และการทำให้กรดเทรฟทาติกบริสุทธิ์ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง วิธีนี้จึงไม่เป็นที่นิยมในทาง การค้าเป็นต้น





2.4 ไมโครเวฟ [2]

2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่างอินฟราเรดกับคลื่นวิทยุ (100 เซนติเมตร – 1 มิลลิเมตร) ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนั้นไม่ใช่คลื่นความร้อนตั้งแต่ต้น แต่อยู่ในรูปของพลังงาน (energy) และถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุและ/หรือเกิดการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนกับอนุภาครอบๆ ที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและเกิดการดูดซับพลังงานดังกล่าว เป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน แต่ทั้งนี้การดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุซึ่งนั้นไม่ได้หมายความว่าวัสดุทุกประเภทจะสามารถใช้กับคลื่นไมโครเวฟได้ เช่น วัสดุพวกโลหะจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟทั้งหมด ในขณะที่แก้วหรือพลาสติกบางชนิดจะยอมให้คลื่นไมโครเวฟผ่านไปทั้งหมด สารซึ่งมีน้ำ หรือสารจำพวกดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟจะดูดซับพลังงานทั้งหมด จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยเกิดจากการสั่นของโมเลกุล ปัจจุบันเรานิยมใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดที่ใช้พลังงานในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก

ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีคุณภาพดี มีประสิทธิภาพสูง และสามารถลดเวลาของกระบวนการลงได้เป็นอย่างมากและยังให้ผลผลิตที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ส่งผลให้การใช้คลื่นไมโครเวฟได้รับความนิยมแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น

2.4.2 กลไกการทำงานของเตาไมโครเวฟ

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในห้องแลปนั้นจะใช้ช่วงความถี่ที่ 2450 MHz โดยจะให้พลังงาน 500-1100 Watts โดยภายในตู้อบไมโครเวฟจะมีท่อที่เรียกว่าแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดคลื่น เมื่อเราเปิดสวิตช์ ท่อแมกนีตรอนจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟคลื่นนี้จะถูกพัดลมพัดคลื่นให้กระจายทั่วเตา ผลิตภัณฑ์ก็จะดูดซับคลื่นไมโครเวฟเอาไว้

1. การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric heating)

พลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric energy) จากคลื่นไมโครเวฟและความถี่วิทยุ (radio frequency) เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งส่งผ่านในรูปของคลื่น(wave) และแทรก (penetrate) เข้าไปในผลิตภัณฑ์และพลังงานนี้จะถูกดูดซับ (absorb) และเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนขึ้น โดยทั่วไปเราสามารถทำให้เกิดความร้อนในผลิตภัณฑ์ได้ทั้งโดยทางตรง (direct method) ซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวของผลิตภัณฑ์ เช่น ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ และโดยทางอ้อม (indirect method) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายนอกและส่งผ่านพื้นผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ไปยังด้านใน โดยเกิดจากการแผ่รังสี (radiation) การพาความร้อน (convection) หรือการนำความร้อน (conduction)

2. การทำให้เกิดความร้อนจากสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของผลิตภัณฑ์

ในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัตถุที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ ได้แก่

1. Relative dielectric constant
2. Relative dielectric loss

โดยค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulating ability) ของวัตถุ ซึ่งวัสดุเป็นฉนวนที่ไม่ดี ดังนั้นวัสดุจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น

2.4.3 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ

จากการที่วัตถุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีสมบัติไดอิเล็กทริก และเมื่ออนุภาคได้รับพลังงานไมโครเวฟแล้วจะถูกพลังงานไมโครเวฟนั้นเขย่าโมเลกุลให้สั่นภายใต้สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า อนุภาคเหล่านี้จะปรับตัวให้มีเฟสตรงกับสนาม แต่อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้จะถูกต้านด้วยแรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและแรงต้านไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดเป็นความร้อนขึ้น ซึ่งกลไกการเกิดความร้อนนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

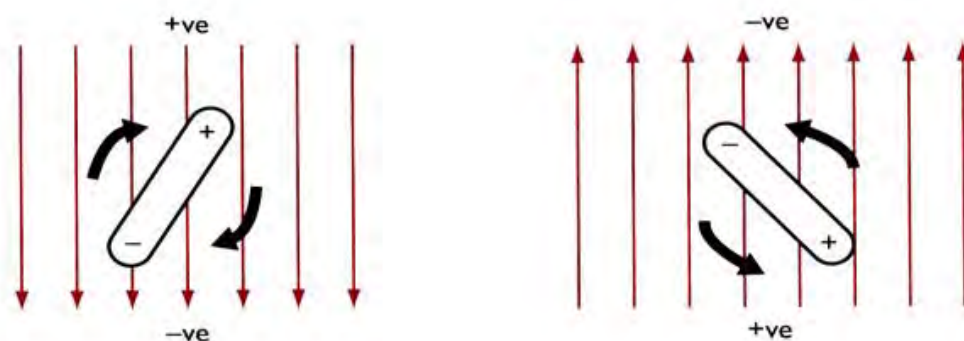
1. การเคลื่อนที่ของไอออน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (Ionic polarization/Conduction Mechanism)

ภายในเตาไมโครเวฟ (Microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้างและหน้าสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในวัสดุสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ จึงเกิดการชน (collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในวัสดุนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในวัสดุจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันเช่น โซเดียม - โปตัสเซียม - หรือแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้ไอออนบวก (cations) และไอออนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (Interactions) กับสนามไฟฟ้าใด ๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน จนเกิดการสั่นกลายเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในทำให้ตัวนำร้อน ข้อจำกัดของวิธีการนี้ คือ ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูง

2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (Dipole rotation/Dipole polarization)

ในวัสดุทั่วไปจะประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้าสลับนั้น ๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟ คือ 915 หรือ 2,450 พันล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในวัสดุ แสดงดังภาพที่ 8.3 ในส่วนของ

โมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็งเช่น น้ำแข็งนั้นโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองมากพอที่จะชนกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียง เพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้และในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงจำนวนน้อยมากที่จะชนกันจนสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

การเกิดความร้อนในวัสดุนั้นจะเกิดบริเวณจุดที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการเดือดของน้ำ โดยเกิดการนำความร้อนสู่บริเวณข้างเคียงและสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง จึงเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ภาชนะที่หมุนได้จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคลื่นอย่างสม่ำเสมอ โลหะที่เป็นส่วนประกอบในเตา หรือภาชนะพลาสติกที่ใส่ผลิตภัณฑ์จะไม่ร้อน เนื่องจากโลหะจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟทั้งหมดและพลาสติกจะไม่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟเลย นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากผลิตภัณฑ์จะทำให้ภาชนะที่ใส่ร้อน ผลิตภัณฑ์จะถ่ายเทความร้อนสู่โมเลกุลข้างเคียง

3. การเกิดการสั้น/หมุน ระหว่างอนุภาคที่มีขั้ว Interfacial Polarization

วิธีการนี้เป็นการรวมเอาวิธี Conduction และวิธี Dipolar Polarization เข้าด้วยกัน เพื่อใช้งานในระบบที่ตัวอย่างเป็นวัสดุนำไฟฟ้ากระจายตัวอยู่ในวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น การกระจายตัวของโลหะในกัมมะถัน กัมมะถันไม่ตอบสนองต่อไมโครเวฟ ส่วนโลหะจะสะท้อนพลังงานของไมโครเวฟ แต่เมื่อนำสารทั้งสองมารวมกันจะกลายเป็นวัสดุที่ดูดกลืนไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี โดยโลหะจะต้องอยู่ในรูปผง ตัวอย่างจะดูดกลืนและทำให้เกิดความร้อนได้ด้วยวิธีการ Dipolar Polarization กัมมะถันที่อยู่รอบๆ ผงโลหะจะประพุดิตัวเสมือนเป็นตัวทำลายสำหรับโมเลกุลมี

ชีว และดำเนินการเคลื่อนที่ของไอออนด้วยแรงที่มีค่าเท่ากับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ทำให้ไอออนเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดความร้อนขึ้น

2.5 พอลิยูรีเทน (Polyurethane) [3]

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดตัวหนึ่งโดยได้มีการค้นพบในประเทศเยอรมันเมื่อปี ค.ศ. 1930 โดย Otto Bayer ได้สังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน (-NHCOO-) ในสายโซ่โมเลกุล ซึ่งได้จากการนำไดไอโซไซยาเนต (diisocyanates) และ ไดออล (diols) มาทำปฏิกิริยากันโดยพอลิยูรีเทน ทางการค้าสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแบบรวมตัว (addition reaction) ระหว่างได- หรือ พอลิไอโซไซยาเนต (Di- or Polyisocyanate) กับได- หรือ พอลิไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (Di- or Polyhydric alcohol) หรือสารประกอบอื่นๆ ที่มีไฮโดรเจนอะตอมที่ว่างไว้ต่อปฏิกิริยาอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของไดไอโซไซยาเนตและไดออลที่ใช้ โดยแรกเริ่มพอลิยูรีเทนทางการค้านั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (hexamethylenediisocyanate, HDI) กับบิวเทนไดออล (butane diol) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสมบัติเหมือนพอลิเอไมด์ (polyamide) ซึ่งสามารถใช้ทำเส้นใยเพื่อทำแบริ่งได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1950 เริ่มที่การผลิตมากขึ้นและนำไปใช้งานหลากหลายโดยมีการเตรียมพอลิยูรีเทนจากโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (toluene diisocyanate, TDI) และพอลิเอสเทอร์ (polyester polyol) ซึ่งนำมาทำโฟมชนิดยืดหยุ่นและต่อมามีการคิดค้นนำพอลิอีเทอร์พอลิออล (polyether polyol) มาใช้แทนพอลิเอสเทอร์ พอลิออล ซึ่งจากการคิดค้นพัฒนาต่างๆ เหล่านี้ทำให้พอลิยูรีเทนนั้นมีสมบัติที่หลากหลายและได้รับความนิยมนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

พอลิยูรีเทนมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า พอลิคาร์บาเมต (polycarbamate) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเอสเทอร์แอมิดของกรดคาร์บามิก ($R_2HNCOOH$) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางเช่นใช้เป็นสารเคลือบผิว อีลาสโตเมอร์ เส้นใย หรือโฟมทั้งชนิดแข็งและยืดหยุ่น เป็นต้น

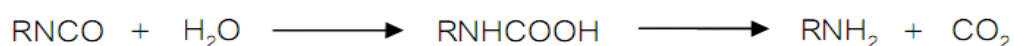
แอลกอฮอล์ : โดยทั่วไปพอลิไอโซไซยาเนตจะเกิดปฏิกิริยากับพอลิแอลกอฮอล์ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิยูรีเทน ดังสมการ



เอมีน : เมื่อทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตจะได้อยูเรีย ดังสมการ



น้ำ : ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจะได้กรดคาร์บาไมกซึ่งไม่เสถียรจะแตกตัวต่อเองได้เอมีนองศาที่หนึ่ง (primary amine) และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

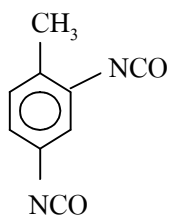


นอกจากวิธีหนึ่งที่ทำให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติต่างกัน คือ การเลือกใช้ไอโซไซยาเนตต่างชนิดกัน ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของไดไอโซไซยาเนตมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิยูรีเทน ซึ่งในทางทฤษฎีพบว่าไอโซไซยาเนตอะโรมาติกนั้นจะมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่าไอโซไซยาเนตแบบอะลิฟาติก เนื่องจากแรดิคัล(radical) ของหมู่ไอโซไซยาเนตมีความไม่เสถียรกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากแรดิคัลในวงเบนซีนไม่เสถียร

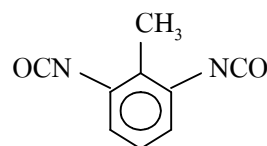
สำหรับไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ได้แก่ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (Diphenylmethane diisocyanate: MDI) และโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate: TDI) ซึ่งอาจใช้เป็นของผสมระหว่าง 2,4 – และ 2,6- TDI หรือใช้ 2,4 –TDI อย่างเดียวก็ได้ โดย TDI ใช้ทำได้ทั้งโฟมชนิดยืดหยุ่นและชนิดแข็ง แต่เนื่องจาก TDI เป็นพิษ จึงเปลี่ยนมาใช้พอลิเมริก ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (MDI) แทน โดย Pure MDI หรือ monomeric MDI จะนิยมใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนชนิดพลาสติก และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ส่วน Polymeric MDI จะนิยมใช้ในการผลิตโฟมทั้งชนิดแข็งและนิ่ม

โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate, TDI)

TDI มีสถานะเป็นของเหลวระเหยง่าย และมีความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ โดย TDI ที่ผลิตทางการค้ามี 2 ประเภท คือ TDI 80/20 และ TDI 60/40 ซึ่งตัวเลขที่ตามหลังแสดงอัตราส่วน ร้อยละของผสมของ 2,4 และ 2,6 –Isomer ตามลำดับ ดังสูตรโครงสร้างต่อไปนี้



2,4-Toluene diisocyanate



2,6-Toluene diisocyanate

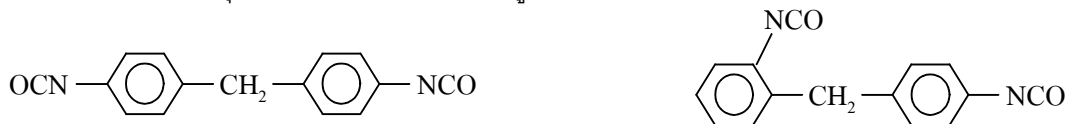
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ 2,4-Toluene diisocyanate และ 2,6-Toluene diisocyanate

TDI- ไอโซเมอร์ที่ใช้ส่วนมากเป็น TDI 80/20 (TDI-80) และ TDI 60/40 (TDI -60) มีใช้เป็นส่วนน้อย แต่ที่จำหน่ายในรูป TDI บริสุทธิ์ (TDI-100) ก็มีอยู่บ้าง การใช้ TDI ควรกระทำในภาวะเฉื่อย หรือภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ เพราะถ้า TDI สัมผัสกับอากาศจะตกตะกอน และจับตัวเป็นผลึก อุณหภูมิที่ใช้เก็บควรอยู่ที่ประมาณ 21-30 °C ซึ่ง TDI สังเคราะห์ได้จากโทลูอีนโดยกระบวนการไนเตรชัน (Nitration) รีดักชัน (Reduction) และฟอสจีนเนชัน (Phosgenation) โดย TDI 80/20 จะผลิตโดยผ่านกระบวนการไนเตรชัน 2 ครั้งติดต่อกัน จากนั้นทำการรีดักชันเพื่อให้ได้เอมีน จากนั้นตามด้วยกระบวนการฟอสจีนเนชัน เพื่อให้ได้ไดไอโซไซยาเนต ส่วน TDI 60/40 จะผ่านกระบวนการไนเตรชัน 1 ครั้ง จากนั้นผ่านกระบวนการเกิดผลึก (Crystallization) ทำให้ออร์โธไนโตรโทลูอีนบริสุทธิ์ (Pure o-Nitration) หรือพาราไนโตรโทลูอีนบริสุทธิ์ (Pure p-Nitrotoluene) แล้วจึงผ่านกระบวนการไนเตรชัน รีดักชัน และฟอสจีนเนชันตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิห้อง 2,4 -TDI จะมีความไวต่อปฏิกิริยามากกว่า 2,6 TDI เนื่องจากผลของหมู่แทนที่ (Steric hindrance effect) แต่ที่อุณหภูมิใกล้ 100 °C ผลของหมู่แทนที่จะไม่ส่งผลต่อความไวของปฏิกิริยา ทำให้ไอโซเมอร์ทั้ง 2 มีความไวต่อปฏิกิริยาเท่ากัน

TDI มีความเป็นพิษ โดยไอระเหยและฝุ่นละอองของ TDI ทำให้เกิดความระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจตอนบนและตอนล่าง แม้ได้รับในช่วงเวลาสั้นๆ ก็ตาม ส่งผลทำให้เกิดความระคายเคือง หายใจไม่ออก เกิดอาการแสบคอ ไอ หรือเป็นแผลถาวรในปอด นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอาการอาเจียน และเจ็บช่องท้อง รวมทั้งทำให้ปอดทำงานผิดปกติ ถ้ามีการสัมผัสกับ TDI นานๆ จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เกิดการเป็นผื่นแดง บวม เป็นแผลหรือไหม้ นอกจากนี้ไอของ TDI ถึงแม้มีความเข้มข้นต่ำ แต่ถ้าโดนจะทำให้หน้าตาไหลและแสบตาเล็กน้อย แต่ถ้าโดนสารที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้ปวดและแสบตาอย่างมาก ถ้า TDI เข้าตาจะทำให้ระคายเคืองอย่างรุนแรงและทำให้ตาอักเสบเรื้อรังได้

เมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (Methylenediphenyldiisocyanate, MDI)

โดยทั่วไป MDI จะมี 2 ประเภท คือ MDI บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ MDI (PMDI) ซึ่งส่วนใหญ่ MDI บริสุทธิ์ จะเป็น 4,4 -MDI และมี 2,4 MDI ผสมอยู่เล็กน้อย เพื่อช่วยลดจุดหลอมเหลว ดังแสดงในรูป 2.5



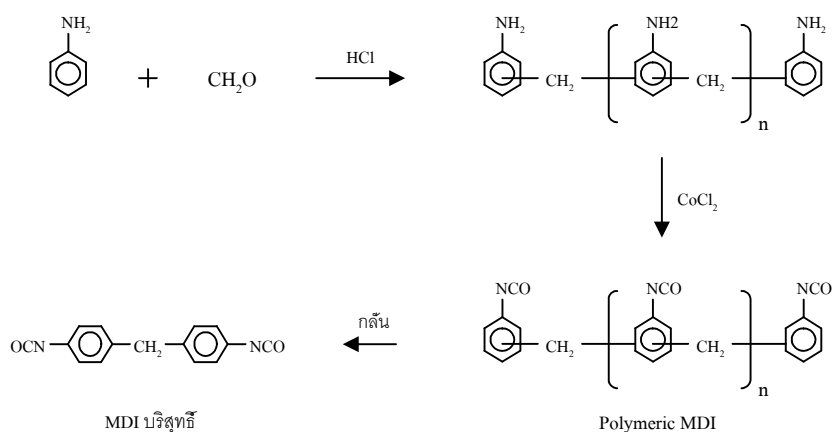
4,4-Methylenediphenyldiisocyanate

2,4-Methylenediphenyldiisocyanate

รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ 4,4-MDI และ 2,4-MDI

MDI บริสุทธิ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเป็นของแข็งสีขาวถึงสีเหลืองอ่อน มีจุดหลอมเหลวประมาณ 38 °C ผลิตได้ยาก และมีราคาแพง เมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 °C อาจทำให้เกิดเป็นไดเมอร์ (Dimer) และกลายเป็นของเหลวได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้มีการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อที่จะตัดแปร MDI บริสุทธิ์ ให้เป็นพอลิเมอร์ MDI ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิใช้งานปกติ และลดการเปลี่ยนเป็นไดเมอร์

พอลิเมอร์ MDI สังเคราะห์ได้จากฟอร์มาลดีไฮด์ อะนิลีน และฟอสจีน ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ MDI แสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์ MDI และ MDI บริสุทธิ์

2. พอลิออล (Polyols)

พอลิออลที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนมีหลายรูปแบบ โดยพอลิออลที่นิยมใช้ อาจจะเป็นพอลิอีเทอร์พอลิออล (polyether polyols) และพอลิเอสเทอร์พอลิออล (polyester polyols) ซึ่งสมบัติต่างๆ และความยากง่ายในการขึ้นรูปขึ้นกับการเลือกใช้พอลิออล โดยลักษณะจำเพาะและสมบัติของพอลิยูรีเทนที่ได้จะขึ้นกับขนาด น้ำหนักโมเลกุล ฟังก์ชันนัลลิตี (Functionality) และโครงสร้างของพอลิออล

พอลิอีเทอร์พอลิออลเป็นพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของพอลิเมอร์แบบเปิดวง (ring-opening polymerization) ของแอลคิลีนออกไซด์ โดยพอลิเอสเทอร์พอลิออลจะมีจุดเด่นที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ด้านทานการไฮโดรลิซิสและจุลินทรีย์ได้ดี

ส่วนพอลิเอสเทอร์พอลิออลที่ใช้นั้นจะใช้น้ำหนักประมาณ 1000-2000 และต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายโมเลกุลเพื่อทำปฏิกิริยาได้ซึ่งพอลิเอสเทอร์พอลิออลลักษณะนี้สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาของกรดไดเบสิก เช่นกรดอะดิพิก กรดเซบาสิก กับไกลคอล เช่นเอทิลีนไกลคอล หรือพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล โดยพอลิเอสเทอร์พอลิออลนั้นจะมีจุดเด่นที่สมบัติทางกายภาพ ความเสถียรทางความร้อน และความต้านทานต่อน้ำมันได้ดี

พอลิยูรีเทนสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติได้หลากหลาย แต่ทั้งนี้พื้นฐานของโครงสร้างโมเลกุลนั้นจะประกอบไปด้วยหมู่ยูรีเทน และหมู่เอสเทอร์หรือหมู่อีเทอร์ที่ได้มาจากส่วนของพอลิออล โดยพบว่ากรณีที่ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนเป็นอีลาสโตเมอร์นั้น ปริมาณของหมู่ยูรีเทนมีผลเล็กน้อยเมื่อเทียบกับหมู่อื่นในสายโซ่โมเลกุล เช่น หมู่เอสเทอร์ หรือ หมู่อีเทอร์ แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังประกอบไปด้วยหมู่ยูรีเทน และการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของพอลิยูรีเทนสามารถทำให้มีสมบัติหลากหลายด้วย

ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนนั้นจะมีการพิจารณาชนิดและการรวมตัวของไอโซไซยาเนตและพอลิออล เพื่อปรับให้ได้สมบัติตามความต้องการ ดังนั้นจึงควรทราบถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างทางเคมีและสมบัติต่างๆ ซึ่งความยืดหยุ่น (flexibility) เป็นสมบัติหนึ่งของพอลิยูรีเทนที่สามารถปรับให้มีความยืดหยุ่นมากหรือน้อยได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นโดยสมบัติดังกล่าวนั้นสามารถปรับได้โดยอาศัยการเลือกชนิดของโครงสร้างทางเคมีและการรวมตัวกันของสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน และข้อดีอีกประการคือไดไอโซไซยาเนตนั้นมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาสูง สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่มีความแตกต่างกันได้ ดังนั้นจึงสามารถสังเคราะห์ ได้ที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาเพียงไม่นาน




3. เซนเอกซ์เทนเดอร์ (Chain extender)

เซนเอกซ์เทนเดอร์หรือไดคอล สายสั้นเป็นสารชนิดเดียวกับพอลิเอทิลีน แต่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่า น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100-350 ใกล้เคียงกับไดไอโซไซยาเนต โดยโครงสร้างของเซนเอกซ์เทนเดอร์นั้นมีผลต่อสมบัติของพอลิยูรีเทนด้วย โดยเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่มีลักษณะสมมาตรหรือสามารถจัดเรียงตัวกันได้ดีนั้นจะสามารถทำให้พอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่มีลักษณะสายโซ่สั้นและมีกิ่ง ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลได้

แต่ในบางกรณีเราอาจจะเติมเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่เป็นสายโซ่ยาว หรือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่นพอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิโพรพิลีนไกลคอล ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000-6000 ซึ่งการเติมเซนเอกซ์เทนเดอร์ลักษณะนี้เข้าไปในพอลิยูรีเทนเพื่อขยายสายโซ่ของพอลิยูรีเทนให้มีส่วนของอะลิฟาติกมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความนิ่มและมีสมบัติอีลาสโตเมอร์มากขึ้น

เซนเอกซ์เทนเดอร์ในทางการค้าที่นิยมใช้แสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 เซนเอกซ์เทนเดอร์ทางการค้าที่นิยมใช้

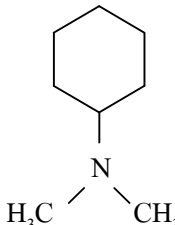
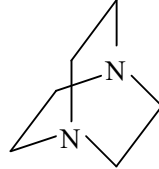
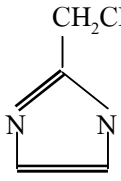
เซนเอกซ์เทนเดอร์	โครงสร้างทางเคมี
1,2-Ethandiol (ethylene glycol)	HO-CH ₂ CH ₂ -OH
1,2-Propanediol	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{HO}-\text{CH}_2\text{CH}-\text{OH} \end{array}$
1,4-Butanediol	HO-CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ -OH
1,6-Hexanediol	HO-CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ -OH
Diethylene glycol	HO-CH ₂ CH ₂ -O-CH ₂ CH ₂ -OH
1,4-Cyclohexanedimethanol	
p-Xylylene glycol	
1,4-Bis(2-hydroxyethoxy) benzene	

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

1. เทอร์เชียรีเอมีน (Tertiary amine) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เชียรีเอมีน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สูตรโครงสร้าง
1. N,N-ไดเมทิลอะมิโนเอทานอล (N,N-Dimethylaminoethanol)	$(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
2. N,N- ไดเมทิลไซโคลเฮกซิลลามีน (N,N- Dimethylcyclohexylamine, DMCHA)	
3. Bis-(2-ไดเมทิลอะมิโนเอทิล)อีเทอร์ (Bis-(2-Dimethylaminoethyl) Ether)	$(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2$
4. ไดอะมิโนไบไซโคลออกเทน (Diaminobicyclooctane, DABCO)	
5. 1-(2-ไฮดรอกซิลโพรพิล) อิมิดาโซล (1-(2-Hydroxypropyl) Imidazole)	$\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ 

2. โลหะอินทรีย์ (Organo-metallic) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ที่นิยมใช้ ได้แก่ สแตนนัสออกโทเอต (Stannous octoate) ซึ่งเป็นสารประกอบดีบุก และไดบิวทิลไดลอรูเรต (Dibutyltin dilaurate) โดยจะทำหน้าที่คล้ายลูอิสแอซิด (Lewis acid) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเบสของสารไอโซไซยานเนตและพอลิเอทิล

2.5.3 การนำไปใช้งานของพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ให้หลากหลาย มีสมบัติแตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งลักษณะของวัสดุเป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้คือ

1. พลาสติกทั่วไป (hard solid plastic)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บรรจุภัณฑ์

2. อีลาสโตเมอร์ (soft solid elastomers)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเหมือนยางสังเคราะห์ทั่วไปได้แก่ พื้นรองเท้า ลูกกอล์ฟ ปะเก็น หนังเทียม สายพาน และอื่นๆ เช่นกาว สารเคลือบผิว เส้นใยสแปนเดกซ์ เป็นต้น

3. โฟมชนิดแข็ง (low density rigid foam)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่ โครงสร้างของส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา เช่น ลำตัวเครื่องบิน และเรือและวัสดุที่นำความร้อนต่ำ เช่นฉนวนสำหรับอาคาร รถขนส่งผลิตภัณฑ์แช่แข็ง ตู้เย็น ชิ้นส่วนรถยนต์

4. โฟมชนิดยืดหยุ่น (low density flexible foam)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่ เฟอร์นิเจอร์ เบาะรองนั่ง เก้าอี้นวม ที่นอน แผ่นรองใต้พรม ตัวดูดซับน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล เป็นต้น

2.6 เทคนิคการสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย (polymerization technique)

โดยทั่วไปแล้วพบว่าปฏิกิริยาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์นั้น ประกอบไปด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์ไรลักษณะแบบเติม (addition polymerization) และแบบควบแน่น (condensation polymerization) แต่สำหรับพอลิยูรีเทน พบว่าแม้ว่าจะไม่สารโมเลกุลเล็กเป็นผลพลอยได้ (by product) แต่เมื่อพิจารณาจากมอนอเมอร์แล้วพบว่าสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นได้ ทั้งนี้ยังพบอีกว่า มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบขั้น (step-growth polymerization) เหมือนกับมอนอเมอร์ทั่วไปที่สังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น [9]

เทคนิคที่สนใจคือการสังเคราะห์คือพอลิเมอร์แบบบัลค์ (bulk polymerization) และการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (solution polymerization) ซึ่งการสังเคราะห์ทั้งสองลักษณะนี้มีลักษณะเป็นระบบแบบเนื้อเดียว (homogenous system)

2.6.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลก์

เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดทั้งหลักการและเครื่องมือ แต่การควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาค่อนข้างทำได้ยาก เนื่องจากระหว่างที่เกิดปฏิกิริยานั้นมีการคายความร้อนสูงซึ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก โดยช่วงที่มอนอเมอร์ทำปฏิกิริยาได้พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลสูง ความหนืดของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปัญหาการถ่ายเทความร้อนขึ้น สารตั้งต้นในระบบนี้มีแค่มอนอเมอร์ ไม่มีการใช้ตัวทำละลาย ข้อดีของเทคนิคนี้คือ ค่าใช้จ่ายสำหรับวัตถุดิบต่ำเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นและระบบมีความบริสุทธิ์ ไม่มีสารอื่นเจือปน

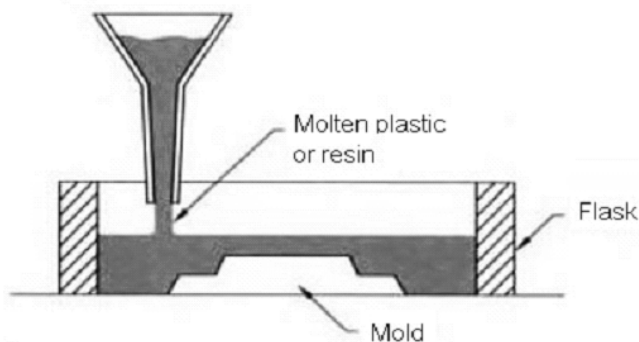
2.6.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย

เป็นกระบวนการที่มีการใช้ตัวทำละลายเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อน แก้ไขปัญหาของเทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลก์ แต่มีข้อเสียคืออุณหภูมิของปฏิกิริยาต้องถูกจำกัดให้ต่ำกว่าจุดเดือดของตัวทำละลาย ซึ่งการจำกัดอุณหภูมิจึงส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้การจำกัดตัวทำละลายให้หมดจากพอลิเมอร์ที่เตรียมได้นั้นก็เป็นเรื่องยาก ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้น และสุดท้ายการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมไม่มีผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาเลยนั้นทำได้ยาก

2.7 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.7.1 การหล่อแบบ (casting molding) [12]

หลักการทั่วไปคือ สารผสมพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์จะต้องอยู่ในรูปของเหลว หรือเตรียมให้อยู่ในรูปของเหลว จากนั้นจึงเทลงในแม่พิมพ์ซึ่งมีรูปแบบตามต้องการ แม่พิมพ์นิยมทำจากวัสดุที่ยืดหยุ่นได้เช่น ยาง และซิลิโคน เป็นต้น หรือทำจากวัสดุที่ไม่ยืดหยุ่นเช่นปูนพลาสติกและโลหะ เป็นต้น จากนั้นนำไปอบเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวาง พอลิเมอร์ที่นิยมขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้ได้แก่ อีพอกซีฟีนอลิก และพอลิเอสเตออร์ เป็นต้น



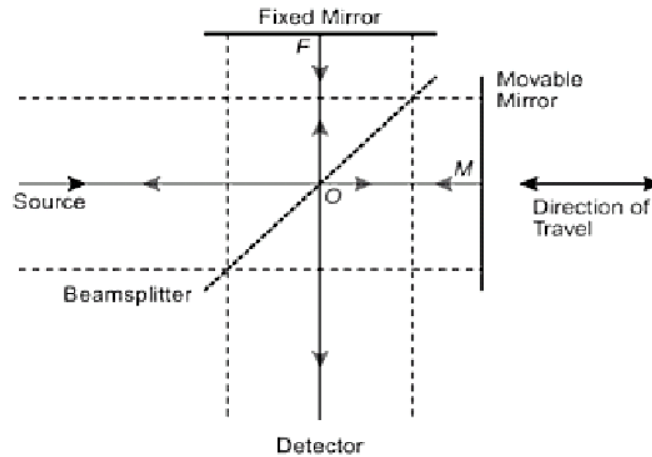
รูปที่ 2.8 ลักษณะการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ [13]

กระบวนการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบสามารถนำไปใช้กับพอลิยูรีเทนที่ได้จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย โดยทำการผสมองค์ประกอบต่างๆแล้วนำไปเทลงในแม่พิมพ์

2.8 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ

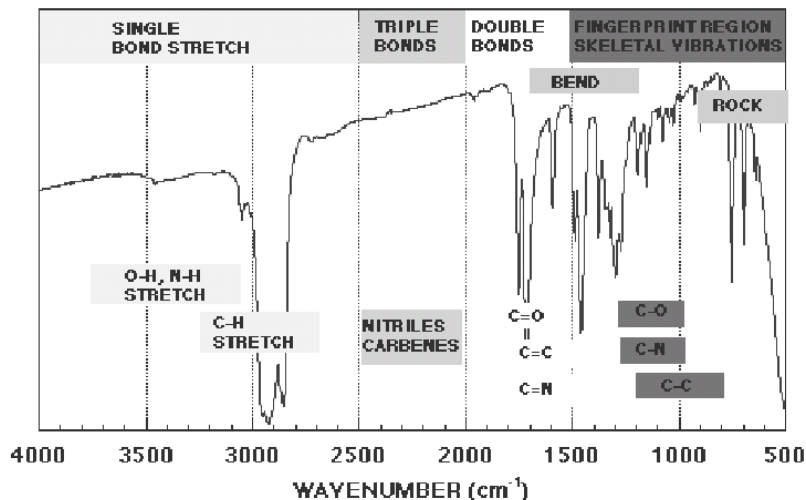
2.8.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) [14]

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และความไวแสงสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ ได้ โดยแหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR spectrometer เป็นแท่งเซรามิกซ์ที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรดสู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะ ซ์ดมันสะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือ ตัวแยก (beam splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางการเคลื่อนที่ของส่วนมา รวมกันเป็นลำแสงเดียวผ่านไปยังสารตัวอย่างซึ่งระบบนี้เรียกว่า The Michelson Interferometer ดังแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ โดยมีช่วงความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่างย่านที่มองเห็น (visible region) กับย่านไมโครเวฟ โดยแบ่งคลื่นอินฟราเรดมีความยาวคลื่นเป็นช่วงๆคือช่วงเลขคลื่นประมาณ $4000-12,800 \text{ ซม.}^{-1}$ ($2.5-0.78$ ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (near infrared region) ช่วงเลขคลื่น $10-200 \text{ ซม.}^{-1}$ ($50-2.5$ ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (middle infrared region) ช่วงเลขคลื่น $10-200 \text{ ซม.}^{-1}$ ($1000-50$ ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (far infrared region) โดยนักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจและใช้ประโยชน์จากคลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (middle IR) มากกว่าช่วงอื่น คลื่นอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น $4000-400 \text{ ซม.}^{-1}$ ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือหมุนของพันธะของโมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือเลขคลื่น กับการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรดสเปกตรัม (infrared spectrum หรือ IR spectrum) ดังแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม (IR spectrum)

อินฟราเรดเป็นสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลสารนั้นๆ ว่ามีฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่นสารกลุ่มแอลกอฮอล์ จะมีพีคของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3300-3600 cm^{-1} หมู่เอมีน มีพีคพันธะ N-H อยู่ที่ 3500 cm^{-1} สารเอสเทอร์มีพีคของหมู่มากประมาณ 1000-1300 cm^{-1} เป็นต้น

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน IR spectrum พีคในช่วง 1350-4000 cm^{-1} จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนแสงของพันธะในหมู่มากฟังก์ชันต่างๆ ที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่มากฟังก์ชัน (group function region) และในช่วงประมาณ 910-1350 cm^{-1} จะได้แถบการดูดกลืนแสงเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่า ย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (finger print region)

การใช้เครื่อง FT-IR spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาอันน้อยมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ เพื่อตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือ เพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่างที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เช่นการวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์แบบแผ่นกระดาษ ชนิดของเส้นใยสิ่งทอสารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางความร้อน

สมบัติหลักของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีพฤติกรรมที่แสดงออกมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเกิดขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวใช้ในการเลือกชนิดและภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ

ผลิตและการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังมีผลโดยตรงต่อการตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ ทางกายภาพและทางเชิงกล ตลอดจนมีผลต่อการพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกใช้งานของผู้บริโภค สมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของพอลิเมอร์นี้ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงหนึ่งในสองจุดหลักภาวะแทรนซิชันคืออุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก จุดเปลี่ยนที่สำคัญที่สุดในภาวะแทรนซิชันคือ อุณหภูมิหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก (melting temperature; T_m) แต่สำหรับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงสร้างผลึกหรือพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) นั้น สมบัติของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนตาม T_g

สมบัติทางความร้อนที่มีผลต่อพฤติกรรมของพอลิเมอร์

สมบัติหลักที่ใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์คือ T_g ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์แสดงสมบัติคล้ายแก้ว (glassy) และสมบัติคล้ายยาง (rubber) คำจำกัดความนี้ใช้ได้เฉพาะกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงสร้างผลึกเท่านั้น สำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึก อาจมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์เกิดขึ้นที่ภาวะคล้ายแก้วหรือกล่าวได้ว่าพฤติกรรมที่แสดงออกมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่ภาวะคล้ายแก้วนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะพอลิเมอร์อสัณฐานเท่านั้น

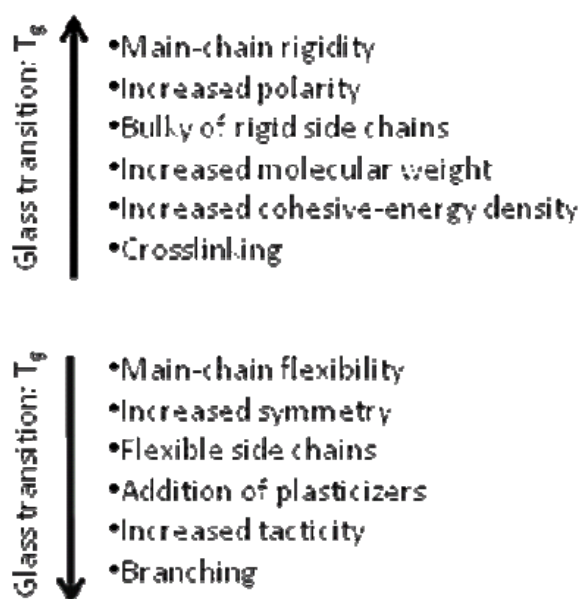
เมื่ออุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลง จะส่งผลกระทบต่อเคลื่อนไหวภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ โดยอุณหภูมิภาวะคล้ายแก้วนี้เป็นอุณหภูมิที่สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนไหว เมื่ออุณหภูมิของระบบต่ำมาก (เข้าใกล้ศูนย์) สายโซ่พอลิเมอร์มีการเคลื่อนไหวไปมาได้เพียงเล็กน้อยรอบตำแหน่งอยู่หนึ่งโดยการสั่นอะตอมขึ้นลงเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นอะตอมภายในโมเลกุลเกิดขึ้นทั้งในแนวนอนและแนวตั้งฉากกับสายโซ่โมเลกุล เมื่อภาวะคล้ายแก้วการสั่นของโมเลกุลเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ทำให้โมเลกุล เมื่อถึงภาวะคล้ายแก้วการสั่นของโมเลกุลเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระนำไปสู่การแสดงคุณลักษณะคล้ายหนัง (leathery) หรือคล้ายยาง ที่อุณหภูมิเหนือ T_g เล็กน้อย สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งการหมุน การสั่น และการแพร่ ขณะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_g มาก (เช่น อุณหภูมิมากกว่า T_g อยู่ 100 องศาเซลเซียส) พอลิเมอร์จะแสดงสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง

ผลของโครงสร้างโมเลกุลต่อ T_g พื้นฐานที่ใช้สำหรับการพิจารณาผลกระทบดังกล่าวได้แก่ อุณหภูมิที่เข้าใกล้ T_g โมเลกุลพอลิเมอร์จะมีการเคลื่อนตัวของกลุ่มอะตอมซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า มอนอเมอร์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มอะตอมดังกล่าวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเหนืออุณหภูมิ T_g โมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีการเคลื่อนตัวของกลุ่มอะตอมซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า มอนอเมอร์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่ของกลุ่มอะตอมดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเหนืออุณหภูมิ T_g สายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งขดตัวอยู่จะประพฤติตัวเป็นหน่วยอีลาสติก (elastic unit) โดยแสดงความเป็นอีลาสติก (elasticity) คล้ายยางนั้นหมายความว่าทุกๆพารามิเตอร์ซึ่งมี

ผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่ภายในโมเลกุลจะอิทธิพลต่ออุณหภูมิ T_g นั้นเอง ตัวอย่างของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ในสายโซ่โมเลกุล โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ ผลของการสังเคราะห์ร่วม (copolymerization) แพคติซิตี (tacticity) ตลอดจนพารามิเตอร์ที่มีผลต่อโครงสร้างโมเลกุลเช่น น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล การมีกิ่ง การเชื่อมขวาง และการเติมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงในพอลิเมอร์ เช่น โอลิโกเมอร์ พลาสติไซเซอร์และสารละลายเจือจาง (diluent) นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์หลักอื่น ๆ ที่มีผลต่อ T_g ด้วยคือ ความแข็งแรงของสายโซ่ (chain stiffness) ความพองตัว (bulkiness) ความสามารถในการละลาย (solubility) ความสามารถในการยืดหยุ่น (flexibility) ของสายโซ่ข้างเคียง และ ความมีขั้วของสายโซ่ ซึ่งพารามิเตอร์จะแสดงอยู่ในเทอมของความหนาแน่นของพลังงานที่ใช้ในการดึงดูดสารชนิดเดียวกันเข้าหากัน (cohesive energy)

การมีกิ่งก้านสาขาของพอลิเมอร์มีแนวโน้มต่อการเพิ่มปริมาตรอิสระในการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์และทำให้ T_g ลดลง ขณะที่การเชื่อมขวางจะลดปริมาตรอิสระลงและทำให้ T_g เพิ่มขึ้น

ในพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึก ผลึกนั้นจะช่วยในการเสริมแรงหรือเพิ่มความแข็งแรงในโครงสร้าง การเพิ่มปริมาณความเป็นผลึก (crystallinity) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ T_g ที่เพิ่มขึ้น ผลของตัวแปรทางโครงสร้างต่อการเพิ่มขึ้นของ T_g สรุปได้ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ปัจจัยทางโครงสร้างที่มีผลกระทบต่อ T_g [19]

สำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวของผลึกใช้แสดงภาวะแทรกซ้อนทางความร้อนการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ T_m จะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดมากเมื่อเทียบกับที่ T_g โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความร้อนของ

การหลอมเหลว (heat of fusion) การเปลี่ยนค่าความจุความร้อน (heat capacity) การเปลี่ยนแปลงปริมาตร การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเห (refractive index) การเปลี่ยนแปลงการหักเหสองแนว (birefringence) และความโปร่งแสง (transparency) สามารถใช้ตรวจวัด T_m ได้

โดยทั่วไปการหลอมเหลวของผลึกจะเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิที่กว้าง เนื่องจากความแน่นอนของ T_m ของแต่ละบริเวณที่เป็นผลึกขึ้นอยู่กับขนาดและความสมบูรณ์ของผลึก พอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างผลึกที่มีความสมบูรณ์ของผลึก พอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีความสมบูรณ์ของผลึกของผลึกมากกว่าจะมี T_m และค่า T_m ส่วนใหญ่เป็นอุณหภูมิซึ่งมีผลึกการหลอมเหลวสูงที่สุด [19]

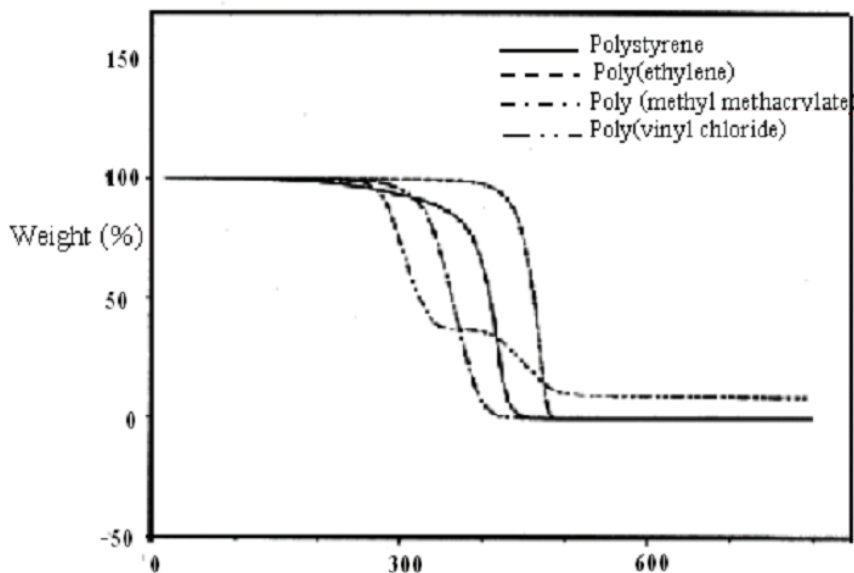
โดยเทคนิคการวิเคราะห์ความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ TGA, DSC และ DMA

2.8.2 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric analysis, TGA)

TGA เป็นเทคนิคการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่าง เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิใน scanning mode หรือกับเวลาใน isothermal mode เช่นในการเกิด desorption, absorption, sublimation, vaporization, oxidation และ decomposition เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ทางความร้อนที่เกิดขึ้นในบางกรณี อาจไม่มีส่วนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลเสมอไป เช่น การหลอมเหลว (melting) การตกผลึก (crystallization) หรือ glass transition เป็นต้น โดยการใช้งานส่วนใหญ่มักใช้ในการวิเคราะห์ decomposition และ thermal stability ภายใต้ภาวะที่แตกต่างกัน [20]

TGA เป็นวิธีเบื้องต้นในการวิเคราะห์ความเสถียรของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยใช้พื้นฐานการวัดน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (thermobalance) ในระหว่างการวิเคราะห์ อุณหภูมิของตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศปกติหรือก๊าซเฉื่อยจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างและอุณหภูมิ การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกของการวิเคราะห์หรือที่อุณหภูมิต่ำอาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลาย แต่ที่อุณหภูมิมักเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้ทราบเกี่ยวกับความเสถียรต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์ เทคนิคนี้ยังมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาสารที่ระเหยหรือสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์อีกด้วย [21]

การแสดงผลวิเคราะห์น้ำหนักแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวล (mass change; m) ในหน่วยของร้อยละกับอุณหภูมิ (temperature; T) หรือเวลา (time; t) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่ได้จากวิเคราะห์ TGA [21]

\

2.8.3 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry; DSC)

เป็นการวัดความแตกต่างของพลังงาน (energy) หรือการไหลของความร้อน (heat flow) ระหว่างสารทดสอบและสารอ้างอิง เป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ให้แก่สารทั้งสองถูกกำหนดไว้ ณ บรรยากาศการทดสอบ กล่าวคือ DSC เป็นเทคนิคที่สามารถบอกขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงของความร้อนในระบบที่สัมพันธ์กับปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อน หรือถูกทำให้เย็นตัวลง [20]

เครื่อง DSC เป็นเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อน (thermal transition) ของสารตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่างเมื่อถูกเพิ่ม(หรือลด) อุณหภูมิ ในบรรยากาศที่ถูกควบคุม

พื้นฐานของ DSC คือนำเอา 2 ถาด ถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (sample pan) ถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (reference pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า ปล่อยให้วางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน

(furnace) ชนิดเดียวกัน ซึ่งวางอยู่ข้างๆกัน เมื่อเริ่มการทดลอง furnace จะเริ่มให้ความร้อนแก่ภาชนะทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที) แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ DSC จะควบคุมให้ furnace ทั้งสอง (furnace ของ sample pan และ reference pan) เพิ่มอุณหภูมิภาชนะทั้งสองที่วางแยกกันด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง

สาเหตุที่ความร้อนของภาชนะทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากันคือ ภาชนะทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือ sample pan มีตัวอย่างพอลิเมอร์อยู่ข้างในทำให้ความต้องการทางความร้อนจาก furnace มากกว่า reference pan ที่ไม่มีสารอยู่ เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่เท่ากัน ดังนั้น furnace ที่อยู่ใต้ sample pan จะต้องทำงานหนักกว่า furnace ที่อยู่ใต้ reference pan คือต้องให้ความร้อนมากกว่าแลการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก furnace ทั้งสอง ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และแสดงข้อมูลเป็นกราฟ โดยมีแกน x เป็นค่าของอุณหภูมิและแกน Y เป็นค่าความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ furnace ทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

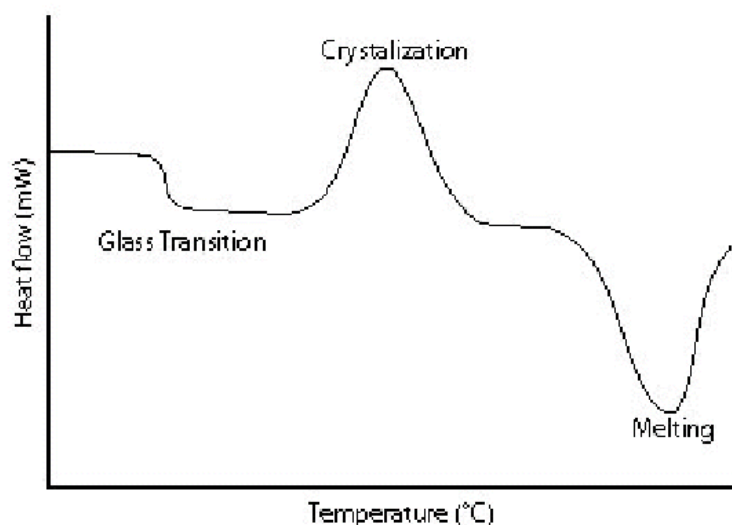
โดยปกติ การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม(หรือลด) อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่(เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ นาที โดยเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียสและสิ้นสุดการทดลองที่ 300 องศาเซลเซียส) หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere เช่น แก๊สไนโตรเจน) และบรรยากาศที่มีออกซิเจน (oxidizing atmosphere เช่น แก๊สออกซิเจน)

ความร้อนที่สารตัวอย่าง (heat flow) ที่ค่าสอดคล้องกับพลังงานที่สารตัวอย่างและ ถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วยมิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือมิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เรียกว่า enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เราเรียกว่า enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ exothermic

เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว furnace ต้องให้ความร้อน sample มากกว่าที่ให้ reference pan เพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิของ sample pan และ reference pan ให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง sample pan มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งไปยัง reference pan นั้น ขึ้นกับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ exothermic หรือแบบ endothermic

เครื่อง DSC นำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อากาศยาน ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ทั้งการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ และสำหรับงานวิจัย ตัวอย่างข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง DSC เช่น T_m T_g oxidation stability (ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน) reaction kinetic (จลพลศาสตร์ของปฏิกิริยา) และ purity (ความบริสุทธิ์) เป็นต้น

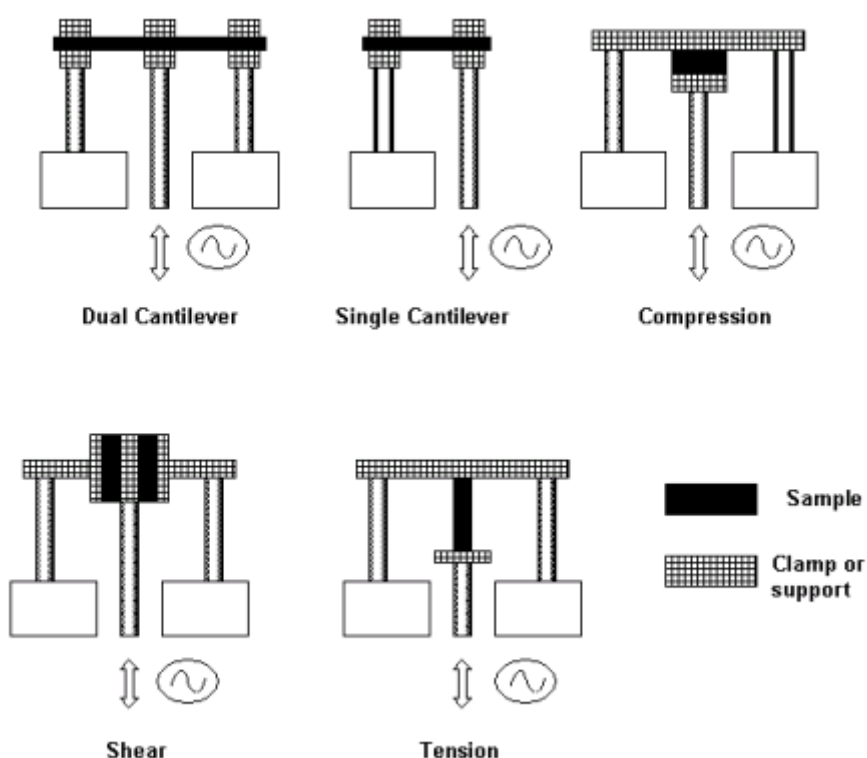
ในพอลิเมอร์แต่ละชนิด จะมีข้อมูลต่างๆ เหล่านี้เป็นค่าเฉพาะตัวเช่น low density polyethylene (LDPE) มี T_m อยู่ที่ประมาณ 110 องศาเซลเซียส และเกิด crystallization ที่ประมาณ 293 องศาเซลเซียส ในขณะที่พีที มี T_g ที่ประมาณ 69 องศาเซลเซียส และมี T_m อยู่ที่ประมาณ 256 องศาเซลเซียส และเกิด crystallization ที่ประมาณ 140 องศาเซลเซียส รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่าง DSC เทอร์โมแกรมทั่วไปที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนถึง 3 ลักษณะ โดยที่ T_m และ T_g เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ endothermic ในขณะที่การเกิด crystallization เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ exothermic [22]



รูปที่ 2.13 เทอร์โมแกรมทั่วไปที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC [23]

2.8.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Thermal Analysis; DMA) [20]

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตเป็นเทคนิคทำให้ตัวอย่างเสียรูปร่างได้แรงดึงหรือบิดเป็นจังหวะกลับไปมาเป็นวัฏจักร (oscillation) โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟความเค้น (stress) = ความเครียด (strain) ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ข้อมูลที่ได้สามารถบ่งบอกพฤติกรรมของการผ่อนคลายของชิ้นงานนั้นๆ รูปแบบการให้แรงกับชิ้นงานดังแสดงดังรูปที่ 2.15

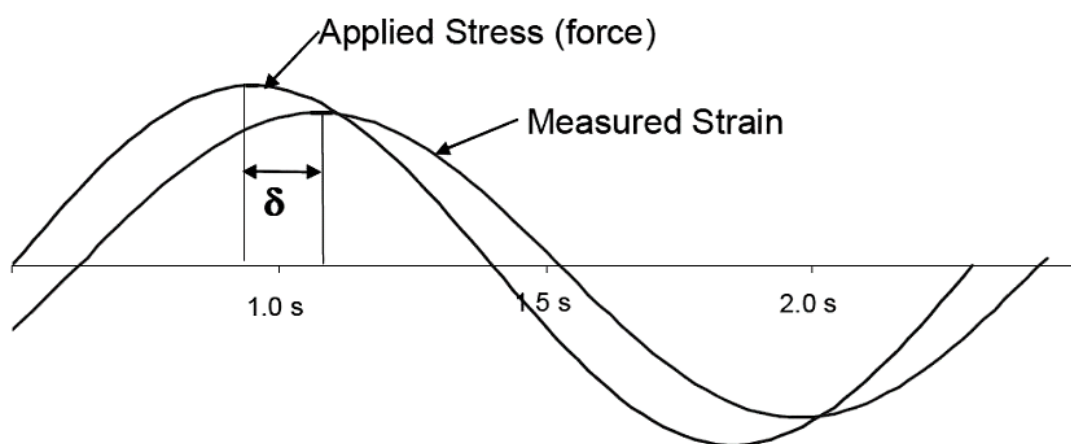


รูปที่ 2.14 รูปแบบแสดงการให้แรงกับชิ้นงานในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA[24]

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของวัสดุได้และสามารถใช้ในการศึกษาวิทยาการกระแส (rheology) ของวัสดุ ซึ่งเป็นการศึกษาการเสียรูป (deformation) และการไหล (flow) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำไม่ว่าจะเป็น constant stress, sinusoidal stress หรือ variable stress (steady shear) โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่เป็น viscoelastic เช่นพอลิเมอร์ซึ่งมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เวลา และความถี่ของแรงที่กระทำ กล่าวคือ เทคนิคนี้เป็นการวัด storage และ loss modulus ของชิ้นงานทดสอบภายใต้ oscillating load เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ เวลา และความถี่ของ oscillation ในขณะที่ชิ้นทดสอบถูกควบคุมภายใต้ภาวะการทดสอบ การทดลองโดยส่วนมากมัก

เป็นไปได้ในลักษณะที่กำหนดให้ dynamic strain คงที่มากกว่าให้ stress คงที่ ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา rheology ของวัสดุพอลิเมอร์คือ สามารถตรวจสอบสมบัติของวัสดุเพื่อทำนายการขึ้นรูป (processibility) และสามารถตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ เพื่อทำนายการตอบสนองต่อการใช้งาน (end-use performance)

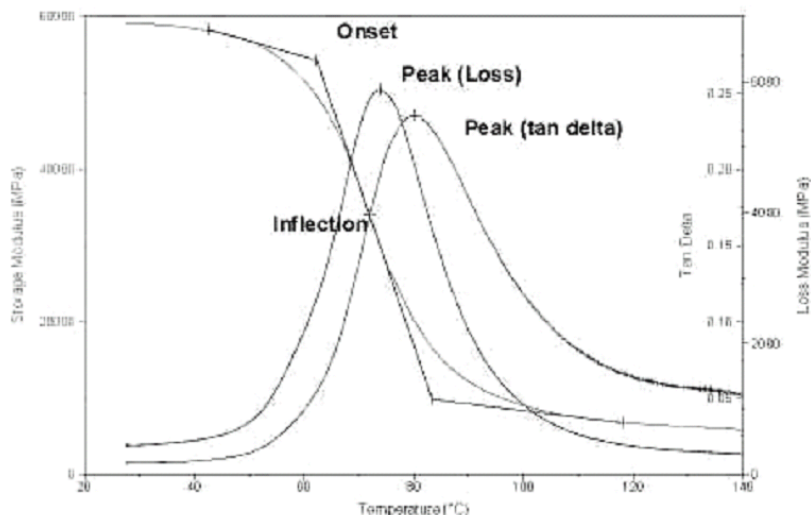
DMA เป็นการวัดการเคลื่อนไหวของวัสดุ โดยให้แรงกระทำแก่วัสดุในลักษณะเป็นคลื่นแบบ sin (sinusoidal) หากวัสดุมีลักษณะเป็น elastic อย่างสมบูรณ์จะพบว่า strain ที่เกิดขึ้นในเฟสที่ตรงข้ามกับ stress (in-phase) แต่หากวัสดุมีพฤติกรรมแบบ Newtonian liquid หรือ viscoelastic จะเกิด strain (ระยะยืดหรือความเครียด) เนื่องจาก stress เรียกว่า มุมเฟส (phase angle; δ)



รูปที่ 2.15 การสั่นนอกเฟสของวัสดุ viscoelastic

Modulus จากส่วน in-phase และ out-of-phase ของวัสดุ viscoelastic นั้นสามารถแยกออกจากกันได้โดยเรียกว่า storage modulus และ loss modulus ตามลำดับ โดย storage modulus นั้นสัมพันธ์กับความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแต่ละช่วง โดยมีลักษณะเป็นอีลาสติกมีการหดกลับได้ ส่วน loss modulus แสดงถึงแนวโน้มของวัสดุที่จะสูญเสียพลังงาน เช่น กลายเป็นความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานภายในขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป

Modulus มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ต่อเนื่องจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเปลี่ยนไป การเคลื่อนไหวของ main-chain หรือ side-chain ของพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง T_g จะส่งผลต่อ modulus และ $\tan \delta$ ได้อย่างชัดเจน ค่า $\tan \delta$ ในความหมายทางกายภาพคือ อัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียต่อพลังงานที่เก็บไว้ใน 1 รอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง



รูปที่ 2.16 เทอร์ โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA [26]

2.8.5 การทดสอบความแข็ง

ค่าความแข็ง (hardness) ของวัสดุเป็นสมบัติของสารที่มีความสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต ไปจนถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รอยกดบนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี

ความแข็ง เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่แสดงถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุต่างๆเมื่อมีแรงภายนอกหรือโหลดมากระทำกับวัตถุนั้นๆ ความแข็งเป็นปริมาณสัมพันธ์ที่มีความแตกต่างจากปริมาณทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น ระยะทาง เวลา ปริมาตร หรือกระแสไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีจำนวนหรือมาตรฐานที่แน่นอน แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางกายภาพอย่างอื่น เช่น tensile strength, yield strength, ชีดจำกัดความยืดหยุ่น ความต้านทานการเกิดรอย เป็นต้น ความแข็งของวัสดุจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับพอลิเมอร์ เนื่องจากการคำนวณน้ำหนัก ความดัน หรืออุณหภูมิ เพื่อที่จะดูว่าวัสดุนั้นมีความสามารถในการยืดหยุ่นได้หรือไม่เป็นสิ่งที่ยุ่งยาก ดังนั้นการวัดค่าความแข็งจึงเป็นหนึ่งในวิธีที่ง่ายและดีที่สุด เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบความแข็งเรียกว่า hardness tester [27]

เทคนิคการทดสอบความแข็งแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก โดยแต่ละเทคนิคมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป [28]

1. เทคนิคการกด (indentation technique)

เป็นการวัดความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อการเจาะทะลุจากแรงกดคงที่ ซึ่งส่งผ่านหัวกดลงบนเนื้อวัสดุ โดยจะมีหัวกดที่มีลักษณะแตกต่างกันไป ตัวอย่างของหน่วยการวัดความแข็งแรงโดยใช้เทคนิคนี้ซึ่งนิยมใช้ได้แก่ บริกเนลล์ นูฟ วิกเกอร์ส ร็อกเวลล์ และดูโรมิเตอร์ (durometer)

2. เทคนิคการวัดการกระดอนตัว (rebounding efficiency technique)

เป็นการวัดความแข็งโดยวัดระดับการกระดอนตัวของหัวทดสอบมาตรฐานภายหลังจากปล่อยกระแทกขึ้นงานทดสอบ หากวัสดุมีความแข็งมากหัวทดสอบก็จะมีการกระดอนตัวกลับมาก ตรงกันข้ามกับวัสดุที่มีความแข็งน้อยจะทำให้หัวทดสอบมีกการกระดอนกลับตัวน้อย ตัวอย่างของการวัดความแข็งโดยใช้เทคนิคนี้ได้แก่ การทดสอบแบบเซอร์โรสโคป (scleroscope)

3. เทคนิคการขีดหรือขีดขูด (scratch or plowing technique)

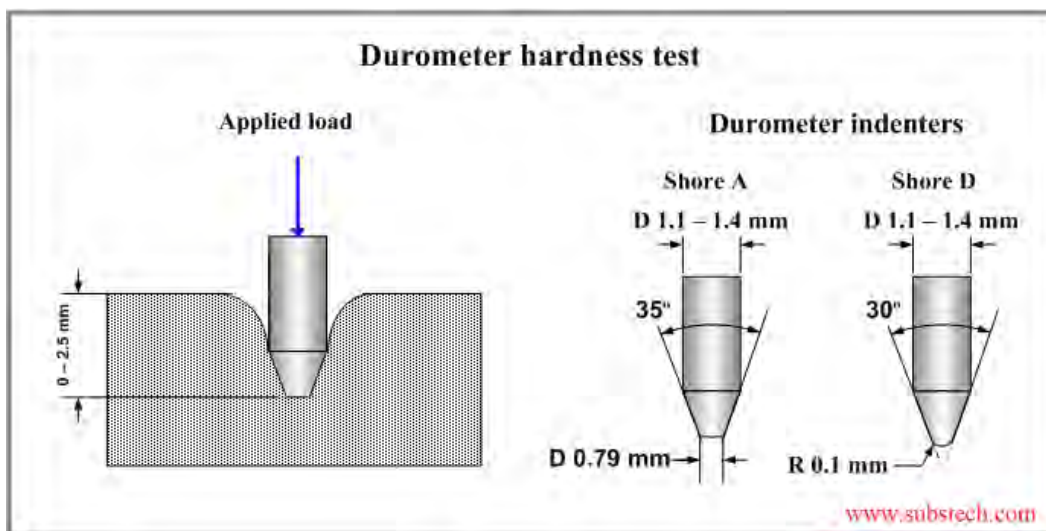
เป็นการวัดความทนทานของวัสดุต่อการขีดด้วยวัสดุประเภทอื่น โดยมีหลักการคือ วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่าจะสามารถขีดวัสดุที่อ่อนกว่าให้เกิดเป็นรอยได้ ตัวอย่างของการวัดความแข็งโดยใช้เทคนิคนี้ได้แก่ การทดสอบแบบมอส์ (mohs) การทดสอบแบบเบียร์บัม (bierbaum)

การทดสอบความแข็งพลาสติกอิลาสโตเมอร์ส่วนมาก วัดด้วยการทดสอบ shore durometer หรือการทดสอบความแข็งร็อกเวลล์ ทั้งสองวิธีวัดความต้านทานของพลาสติกต่อรอยกด ทั้งสองสเกลให้ค่าความแข็งตามหลักการไม่เกี่ยวข้องกับสมบัติและคุณลักษณะพื้นฐานความแข็งชนิดชอร์ เอ (shore A) หรือชนิดชอร์ ดี (shore D) เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับพอลิเมอร์อิลาสโตเมอร์ ยาง และปกติใช้กับพลาสติกอ่อน เช่น พอลิโพลิฟิน ฟลูออโรพอลิเมอร์ และพอลิไวนิลต่างๆ ชอร์เอจะใช้สำหรับยางอ่อน ในขณะที่ชอร์ ดีจะใช้สำหรับยางที่แข็งกว่า ความแข็งชนิดชอร์ เอ คือค่าความแข็งสัมพัทธ์ของวัสดุยืดหยุ่น เช่น ยาง หรือพลาสติกอ่อน สามารถที่จะหาได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า shore A durometer เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางและพลาสติก การอ่านค่าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นเวลากการกดบางครั้งจะถูกรายงานร่วมกับค่าความแข็ง [29]

ขึ้นทดสอบที่นำมาทดสอบควรมีผิวแบนเรียบทั้งด้านบนและด้านล่าง และพื้นที่ทั้งสองต้องขนานกัน ค่าความแข็งที่อ่านได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของขึ้นทดสอบโดยเฉพาะความหนา เพราะถ้า

ชั้นทดสอบบางมากเกินไปก็จะทำให้ผลการวัดที่ได้มีความผิดพลาดสูง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกดหัวกดลงบนชั้นงานทดสอบ เนื้อวัสดุที่อยู่บริเวณรอบๆจุดที่ถูกกดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อตอบสนองต่อแรงกด (เป็นวัฏจักรโค้งวงกลม) หากชั้นทดสอบบางมากเกินไปการตอบสนองต่อแรงกดก็จะได้ไม่เกิดเฉพาะจากชั้นงานทดสอบเท่านั้น แต่จะรวมการตอบสนองที่เกิดจากฐานกดซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งมากๆเข้าไปด้วย ส่งผลให้มีความต้านทานต่อการทะลุของหัวกดสูงกว่าปกติ นั่นทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง และในทำนองกลับกัน การวัดค่าความแข็ง ณ บริเวณที่ขีดขอบของชั้นงานทดสอบมากเกินไปก็จะส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ ต่ำกว่าความเป็นจริง

สำหรับการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ (ในหน่วยชอร์) มาตรฐาน ASTM D2240 ได้กำหนดไว้ว่าชั้นทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร (ชั้นทดสอบอาจเตรียมจากการนำแผ่นเรียบหลายๆแผ่นมาวางซ้อนกันจนได้ความหนาที่ต้องการ แต่กระนั้นจะทำได้ก็ต่อเมื่อชั้นงานที่นำมาซ้อนกันนั้นสามารถแนบกันได้สนิทเท่านั้น)(Placeholder1) และชั้นทดสอบควรมีด้านข้าง (lateral dimensions) ที่สูงเพียงพอที่ทำให้ผู้ทดสอบสามารถวัดความแข็งของยางในบริเวณห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตรได้ การกดหัวกดลงบนชั้นทดสอบควรกระทำด้วยความรวดเร็วและต้องออกแรงกดให้มากพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชั้นงานทดสอบแล้วจึงอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที หรือ 15 วินาที โดยทั่วไปควรทำการวัดแสงความแข็งอย่างน้อย 5 จุดบนชั้นงานทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้



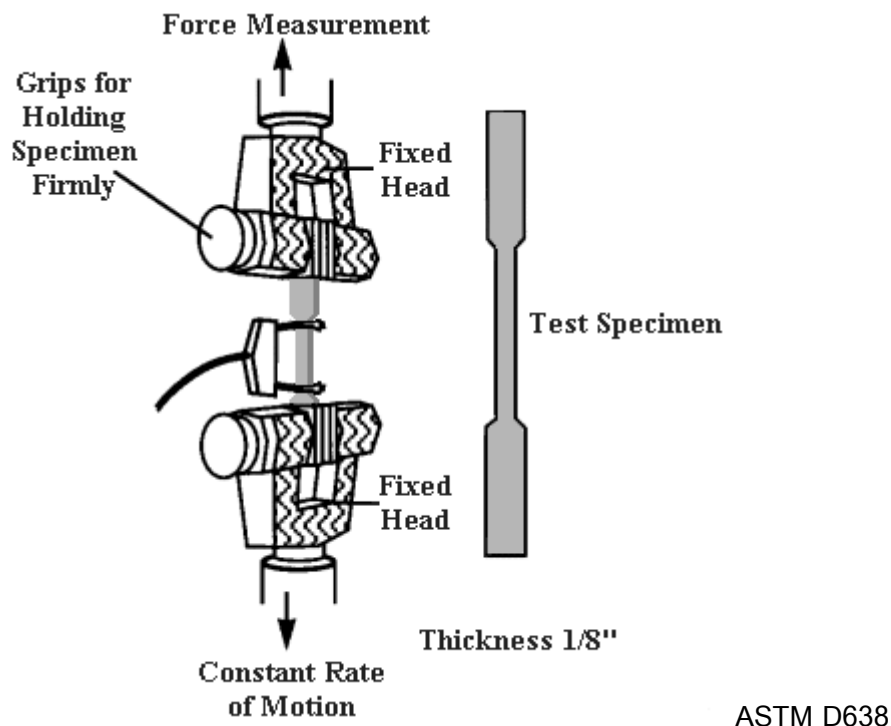
รูปที่ 2.17 ลักษณะการทดสอบและชนิดของหัวกด (indenter) [30]

แต่ทั้งนี้ผลการทดสอบอาจมีความแปรปรวนได้เนื่องจากค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความเร็วของการกดหัวกดลงบนชั้นทดสอบ ระยะเวลา

ที่อ่านค่าความแข็ง และแรงที่ใช้กดหัวกด เป็นต้น การเพิ่มความเร็วของการกดหัวกดจะทำให้ความแข็งที่ได้จากเครื่องมือมีค่าสูงขึ้น ระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็งก็มีผลอย่างมากต่อค่าที่วัดได้เช่นกัน เพราะโดยทั่วไปแล้วการอ่านค่าทันทีหลังจากที่ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นงานทดสอบก็อาจจะทำให้ค่าที่อ่านได้นั้นสูงกว่าค่าที่อ่านหลังจากนั้น 2-3 วินาที การลดลงของค่าความแข็งตามเวลาจะขึ้นกับสมบัติวิสโคอิลาสติกของชิ้นทดสอบ สำหรับชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่นสูง (มีโครงสร้างที่เป็นส่วนของแข็งยืดหยุ่นสูง) ค่าความแข็งที่วัดได้ก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามเวลาที่อ่านค่า แต่สำหรับชิ้นทดสอบที่มีความยืดหยุ่นต่ำก็จะพบว่าค่าความแข็งที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็วตามเวลาที่อ่านค่า และปัจจัยสุดท้ายที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งที่อ่านได้คือแรงที่ใช้ในการกดหัวกด ในเชิงทฤษฎีแล้วมาตรฐานได้ระบุว่าแรงที่ใช้ในการกดควรมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติแล้วผู้ทดสอบแต่ละคนออกแรงกดที่แตกต่างกันทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าที่อ่านได้เพราะแรงกดที่สูงอาจจะทำให้ค่าที่อ่านได้สูงตามไปด้วย ดังนั้นมาตรฐาน ASTM จึงได้เสนอแนะให้นำน้ำหนักมาตรฐานไปวางไว้ที่ตรงกลางของแกนหัวกดเพื่อลดความแปรปรวนของผลการทดสอบที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งน้ำหนักมาตรฐานที่แนะนำคือ 1 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ เอ และ 5 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ ดี [31,32]

2.8.7 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

เป็นการวัดสมบัติความทนต่อแรงดึงของพลาสติกประเภทอีลาสโตเมอร์ ซึ่งสมบัติความทนต่อแรงดึงเป็นสมบัติเชิงกลพื้นฐานที่โรงงานอุตสาหกรรมพลาสติกชนิดอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่ นิยมใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพหรือสเปกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีวิธีการวัด คือ จะให้แรงดึงกับชิ้นงานตัวอย่างจนกระทั่งชิ้นงานขาด วัดความทนต่อแรงดึงสูงสุด ณ จุดขาด (tensile strength) และสามารถระบุได้ว่าชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยยืดไปกี่เปอร์เซ็นต์ (elongation at break) วิธีการวัดและชิ้นงานที่ใช้จะต้องทำตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น มาตรฐาน ISO 37 หรือ ASTM D412 สำหรับกรณีที่ชิ้นงานนั้นเป็นยาง มาตรฐาน ASTM D638 สำหรับชิ้นงานพลาสติกทั่วไป และมาตรฐาน ASTM D882 สำหรับฟิล์มพลาสติกที่มีความหนาดำกว่า 1 มิลลิเมตร [22]



รูปที่ 2.18 ลักษณะการทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมบัติด้านแรงดึง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vaidya และ Nadkarni [54] ได้ย่อยสลายพีตด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสโดยใช้โพรพิลีนไกลคอลที่อัตราส่วนต่างๆ กัน และใช้ซิงก์แอสซีเทตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งผลที่ได้จากการย่อยสลายส่วนใหญ่ประกอบด้วย มอนอเมอร์ และไดเมอร์ โดยประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโพรพิลีนไกลคอลที่ใช้เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินไป จะได้ BHET เป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกัน

Baliga และ Wong [55] ได้ทดลองย่อยสลายขวดพีตโดยกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยเอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินไปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด คือ ซิงก์แอสซีเทต เลดแอสซีเทต โคบอลต์แอสซีเทต และแมงกานีสแอสซีเทต เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการย่อยสลาย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย BHET (มากกว่าร้อยละ 75) และไดเมอร์ จากการตรวจสอบไม่พบโพลิโกลิเมอร์ขนาดใหญ่ของพีตอยู่เลย นอกจากนี้ยังพบว่าซิงก์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงสุดเพราะให้ BHET ออกมามากที่สุด และพบว่าสีที่มีอยู่ในขวดเครื่องดื่มบางชนิดไม่มีผลต่อปฏิกิริยาไกลโคไลซิส

Pardal และ Tersac [56] ศึกษากลไกของกระบวนการไกลโคไลซิสจากไกลคอลล 3 ชนิด คือ ไดเอทิลีนไกลคอลล ไดโพรพิลีนไกลคอลล และกลีเซอรอล โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ TBT เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก TBT ต่อพีตเท่ากับ 0.5 ต่อ 100 พบว่า ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของไกลคอลลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 220 องศาเซลเซียส เรียงตามลำดับดังนี้ ไดเอทิลีนไกลคอลล กลีเซอรอล และไดโพรพิลีนไกลคอลลความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของไกลคอลลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 190 องศาเซลเซียส เรียงตามลำดับดังนี้ไดเอทิลีนไกลคอลล ไดโพรพิลีนไกลคอลล และกลีเซอรอล

โดยทั่วไปในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายพีตด้วยการไกลโคไลซิสนั้น จะต้องมีการให้ความร้อนเป็นระยะเวลาประมาณ 4 – 6 ชั่วโมง ทำให้การนำวิธีการดังกล่าวไปขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรมเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสิ้นเปลืองทั้งเวลาและพลังงาน ในปัจจุบันมีความสนใจในการนำไมโครเวฟมาเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนสำหรับปฏิกิริยาเคมีต่างๆ แทนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากประสิทธิภาพในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นสูงกว่า ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในตู้อบไมโครเวฟ จะมีแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไมโครเวฟทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานในรูปคลื่นไมโครเวฟ แล้วส่งผ่านคลื่นเข้าสู่วัตถุที่สามารถดูดซึมคลื่นไมโครเวฟจนทำให้โมเลกุลภายในเกิดการสั่นและหมุนส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นมาจากภายในทั่วทั้งวัตถุและส่งผ่านสู่โมเลกุลของวัตถุข้างเคียงทำให้เกิดการให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว พบว่าปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าแหล่งพลังงานความร้อนแบบดั้งเดิมมาก

Pingale และ Shukla [57] ได้ศึกษากระบวนการไกลโคไลซิสในการย่อยสลายขูดพีตด้วยเอทิลีนไกลคอลล ในอัตราส่วนโดยโมล 1:4 ถึง 1:10 เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้พลังงานไมโครเวฟใช้ซิงก์แอซีเตต โซเดียมคาร์บอเนต และแบเรียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.3 ถึง 1 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณ BHET ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ด้วยไมโครเวฟนั้นใกล้เคียงกับวิธีการให้ความร้อนทั่วไป แต่สิ่งที่เห็นได้ชัดคือ เวลาที่ใช้สั้นลงลงอย่างมาก กล่าวคือจาก 8 ชั่วโมงเหลือเพียงแค่ประมาณ 35 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ไมโครเวฟซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานได้เป็นอย่างมาก

Li และคณะ [58] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส กำลังของไมโครเวฟที่ใช้ 260 วัตต์ ใช้เวลาดำเนินปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 210 นาที และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพีตต่อน้ำเป็น 1:10 พบว่าซิงก์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับมังกานีสแอซีเตต โพแทสเซียม

แอซีเทต และไซเดียมออกซาลेट และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้คือร้อยละ 0.4 ต่อน้ำหนักของเพ็ท

ศิริประภา เจริญภักดี [59] ได้ทดลองเตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนหรือที่พียูจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของเพ็ท ที่พียู คือพอลิยูรีเทนซึ่งถูกดัดแปลงให้มีสมบัติของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ กล่าวคือมีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยางแต่ยังมีความเป็นเทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูป โดยการหลอมเหลวได้หลายครั้ง ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจึงสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการเดียวกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไปไม่ว่าจะเป็นการอัดรีด (extrusion) การเป่าเข้าแบบ (blow molding) การฉีด (injection) หรือการอัดแบบ (compression molding) สมบัติสำคัญอีกประการคือเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถดัดแปลงเพื่อนำไปใช้อย่างหลากหลายเพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพตามต้องการ โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณขององค์ประกอบที่เป็นส่วนแข็ง (hard segment) และส่วนนิ่ม (soft segment) ทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยดังกล่าวได้นำขวดเพ็ทมาย่อยสลายด้วยโพรพิลีนไกลคอล แล้วนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับไดฟนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (เอ็มดีไอ) ร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล โดยใช้กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบบัลก์ และแบบสารละลาย พบว่าสามารถเตรียมที่พียูที่มีสมบัติใกล้เคียงกับที่พียูทางการค้า

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟนั้นสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่สารประเภทโลหะแอซีเทต สารเหล่านี้มีราคาถูก หาได้ง่าย และไม่เป็นพิษ จึงมีความน่าสนใจในการนำมาศึกษา งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ต่อสมบัติของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ นอกจากนี้ยังจะได้ทดลองเตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ได้อีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. ขวดเพ็ตใช้แล้ว
2. ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG; $C_4H_{10}O_3$): UNILAB เกรดวิเคราะห์
3. ซิงก์แอซีเตต ($C_4H_{10}O_6Zn$): UNIVAR เกรดวิเคราะห์
4. โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$): UNIVAR เกรดวิเคราะห์
5. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3): UNIVAR เกรดวิเคราะห์
6. โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$): UNIVAR เกรดวิเคราะห์
7. แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$): UNIVAR เกรดวิเคราะห์
8. เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต หรือ เอ็มดีไอ (MDI; $C_{15}H_{10}N_2O_2$): บริษัท สยามเคมี

คอลอินดัสตรี จำกัด ชนิดมอนอเมอร์ มวลโมเลกุล = 250

9. น้ำมันละหุ่ง (castor oil)
10. พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG; $C_{2n+2}H_{4n+6}O_{n+2}$): UNILAB เกรดวิเคราะห์ น้ำหนักโมเลกุล 1000 4000 และ 6000
11. ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ หรือ ดีเอ็มเอฟ (DMF; $HCON(CH_3)_2$): LABSCAN เกรดวิเคราะห์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ (microwave reactor) สำหรับทำปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย

- ตู้อบไมโครเวฟยี่ห้อแอลจี รุ่น MS2127CW (ประเทศไทย) ที่ผ่านการดัดแปลงสำหรับใช้ในการทดลอง

- ขวดก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมฐานรอง
- ชุดควบแน่น (condenser) สำหรับการรีฟลักซ์
- มอเตอร์ปั่นกวนชนิดปรับความเร็วรอบได้ พร้อมใบพัดกวนทำจากTEFLON
- ตัวจับยึดท่อควบแน่นและมอเตอร์สำหรับใบพัด

2. เทอร์โมมิเตอร์แบบเลเซอร์

3. ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น 100-800 (Schwabach, Germany)
4. เครื่องบดละเอียด (pulverizer) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Pulverisette 15 (Idar-Oberstein, Germany)
5. ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 (Madison, WI)
6. เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermogravimetry analyzer) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851° (Schwerzenbach, Switzerland)
7. ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี (differential scanning calorimeter) ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DSC200 (Selb, Germany)
8. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR100K (Fareham, UK)
9. แม่แบบพอลิพรอพิลีน
10. เครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัสดุดิบ

- 1) นำขวดเพ็ตที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า จากนั้นนำมาอบให้แห้งแล้วจึงตัดให้มีขนาดประมาณ 1×1 ตารางเซนติเมตร
- 2) บดขวดเพ็ตที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องบดละเอียด โดยใช้ตะแกรงร่อน เพื่อให้มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

3.3.2 การโกลโคไลซ์เพ็ต

- 1) ชั่งน้ำหนักผงเพ็ตแล้วบรรจุลงในขวดก้นกลม

- 2) เติมไดเอทิลีนไกลคอล ด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเปิดต่อไกลคอลเท่ากับ 1:6
- 3) เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเพ็ดที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ ซิงค์แอสีเทต โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต แคลเซียมคลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์
- 4) เมื่อบรรจุสารต่างๆ ครบแล้ว นำไปติดตั้งในตู้อบไมโครเวฟ โดยประกอบเข้ากับชุดควบคุมแรงดันและไบพัดทวน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่ใช้ในการย่อยสลายเพ็ด

- 5) ดำเนินปฏิกิริยาการย่อยสลาย ภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงานคงที่เท่ากับ 600 วัตต์ เป็นเวลาต่างๆ กัน คือที่เวลา 10 12 14 16 18 และ 20 นาที โดยที่มีการกวนและรีฟลักซ์ตลอดการดำเนินปฏิกิริยาย่อยสลาย
- 6) เมื่อครบระยะเวลาดำเนินปฏิกิริยา จะได้สารที่เรียกว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ นำไปวิเคราะห์สมบัติของไกลโคไลซ์โพรดักส์ และสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนในขั้นต่อไป

3.3.3 การหาอัตราการย่อยสลายเพ็ด (rate of depolymerization) และร้อยละผลได้ (percentage yield) ของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์

1) นำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ มากรองแยกเฉพาะส่วนที่ยังไม่ถูกย่อยสลาย อบให้แห้งและชั่งน้ำหนักของเพ็ดที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา แล้วคำนวณหาร้อยละของการย่อยสลายของเพ็ดที่เวลาต่างๆ ตามสูตรต่อไปนี้

ร้อยละของการย่อยสลายเพ็ดที่เวลาต่างๆ

= $(\text{น้ำหนักเพ็ดที่ใช้ก่อนทำปฏิกิริยา} - \text{น้ำหนักเพ็ดที่เหลือ}) \times 100 / \text{น้ำหนักเพ็ดที่ใช้ก่อนทำปฏิกิริยา}$

2) นำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มาตกตะกอนในน้ำกลั่นร้อน กรองเอาตะกอนที่ได้ ออก แล้วแยกส่วนที่เป็นของเหลวมาลดอุณหภูมิลงจนเกิดการตกตะกอนขึ้น จากนั้นกรองตะกอนที่ได้นำมาอบให้แห้ง แล้วคำนวณร้อยละผลได้ของเพ็ดที่ถูกย่อยสลายที่เวลาต่างๆ ตามสูตรต่อไปนี้

ร้อยละผลได้ของเพ็ดที่ได้ถูกย่อยสลายที่เวลาต่างๆ

= $(\text{น้ำหนักของตะกอนที่ได้} / \text{น้ำหนักของไกลโคไลซ์โพรดักส์}) \times 100$

3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติของไกลโคไลซ์โพรดักส์

1) วิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) เพื่อหาแถบดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)

2) การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว โดยนำชิ้นงานพอลิยูรีเทนมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851^o ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน นำความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่เปลี่ยนไปในหน่วยร้อยละกับอุณหภูมิที่ได้มาวิเคราะห์หาอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (onset degradation, $T_{d,onset}$) นั่นคืออุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลสารที่สามารถวัดได้ และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (end-set degradation temperature, $T_{d,endset}$) คืออุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.3 Thermogravimetric analyzer (TGA)

3) การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) โดยนำโกลโคไลซ์โพรตักส์มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DSC200 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความร้อนกับอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน และลดอุณหภูมิให้ต่ำลงด้วย ไนโตรเจนเหลว



รูปที่ 3.4 Differential scanning calorimeter (DSC)

3.3.5 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย

1) เตรียมไกลโคไลซ์โพรดักส์ เอ็มดีไอ และเซนเอกซ์เทนเดอร์ในสัดส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนโดยโมลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ เอ็มดีไอ และเซนเอกซ์เทนเดอร์ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย

สูตรที่	ไกลโคไลซ์โพรดักส์	MDI	เซนเอกซ์เทนเดอร์	ปริมาณดีเอ็มเอฟ (เท่า โดยน้ำหนัก)
1	1(Zn)	1	-	5
2	1(Zn)	1	0.025 (Castor oil)	5
3	1(Zn)	1	0.025(PEG1000)	5
4	1(Zn)	1	0.025(PEG4000)	5
5	1(Zn)	1	0.025(PEG6000)	5
6	1(NaHCO ₃)	1	-	5
7	1(NaHCO ₃)	1	0.025 (Castor oil)	5
8	1(NaHCO ₃)	1	0.025(PEG1000)	5
9	1(NaHCO ₃)	1	0.025(PEG4000)	5

10	1(Na ₂ CO ₃)	1	0.025(PEG6000)	5
11	1(Na ₂ CO ₃)	1	-	5
12	1(Na ₂ CO ₃)	1	0.025 (Castor oil)	5
13	1(Na ₂ CO ₃)	1	0.025(PEG1000)	5
14	1(Na ₂ CO ₃)	1	0.025(PEG4000)	5
15	1(Na ₂ CO ₃)	1	0.025(PEG6000)	5

*อัตราส่วนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไซยาเนตเท่ากับ 1:2.5

- 2) หลอมเอมดีไอและตั้งไว้ที่อุณหภูมิคงที่ในช่วง 40 – 60 องศาเซลเซียส
- 3) อุ่นไกลโคไลซ์โพรดักส์เพื่อไล่น้ำที่อุณหภูมิ 100 – 110 องศาเซลเซียส
- 4) ผสมเซนเอกซ์เทนเดอร์ลงในไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ไล่น้ำแล้ว สำหรับเซนเอกซ์-เทนเดอร์ที่เป็นผง ต้องหลอมเหลวแล้วจึงผสมลงในไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ไล่น้ำแล้วขณะร้อน แล้วกวนเป็นเนื้อเดียวให้เข้ากัน
- 5) เติมดีเอ็มเอฟในปริมาณ 5 เท่าโดยโมลของไกลโคไลซ์โพรดักส์
- 6) เติมเอมดีไอลงในของเหลวผสมในขวดก้นกลม พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนแบบปรับความเร็วรอบได้พร้อมใบพัด และควบคุมอุณหภูมิของระบบให้อยู่ในช่วง 40 – 80 องศาเซลเซียส
- 7) เมื่อเติมเอมดีไอจนหมดแล้ว ทิ้งให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นนำไปอุ่นไล่น้ำในตู้อบไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 90 วัตต์ เป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นเตรียมเทลงในแม่แบบทันที

3.3.6 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยการหล่อแบบ

- 1) นำพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลายเทลงในแม่แบบพอลิพรอพิลีนโดยควบคุมความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร
- 2) นำแม่แบบไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน
- 3) นำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

วิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อหาแถบดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

3.3.8 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบที่นิยมสำหรับวัสดุที่มีความแข็งไม่สูงมาก เช่น ยาง และพลาสติกทั่วไป การทดสอบนี้มีด้วยกันหลายประเภท ซึ่งการเลือกใช้จะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่จะนำมาทดสอบ แรงกด และลักษณะของหัวกด ในการทดสอบนั้นจะให้แรงกดผ่านอุปกรณ์ลงในชิ้นงานทดสอบและใช้ความแข็งของสปริงกดเป็นส่วนให้แรงแทนที่จะเป็นน้ำหนักกด แรงจากสปริงจะส่งไปยังหัวทดสอบ ความลึกที่หัวทดสอบเจาะลงไปชิ้นงานจะมีค่าแปรผกผันกับค่าความแข็งของวัสดุบนมาตรวัดทั่วไปจะกำหนดให้อ่านค่าทดสอบที่ประมาณ 1 วินาที หรือ 15 วินาทีหลังการกด นำชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นมาวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องดูโรมิเตอร์ (durometer) ชนิดชอร์เอ (Shore A) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ตามมาตรฐาน ASTM D2240



รูปที่ 3.5 Durometer ชนิด Shore A

3.3.9 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

สำหรับสมบัติด้านแรงดึงนั้นเราจะวิเคราะห์ขึ้นเพื่อตรวจสอบต่างๆ ได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength) การยืดตัวที่จุดขาด (elongation at break) และมอดุลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 ซึ่งชิ้นงานที่ทดสอบนั้นจะถูกตัดให้เป็นแถบสี่เหลี่ยมยาว โดยมีความกว้างประมาณ 8 เท่าของความหนา และมีความยาวเกจ (gage length) 10 เซนติเมตร โดยที่มาตรฐานนี้จะใช้กับชิ้นงานที่เป็นประเภทฟิล์มพลาสติก นั่นคือ ต้องมีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR100K ดังแสดงในรูป 3.6 ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่ใช้ดึง (load cell) ขนาด 100 กิโลนิวตัน อัตราเร็วที่ใช้ในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที และบันทึกค่าที่ต้องการทราบ



รูปที่ 3.6 Universal Testing Machine

3.3.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

1) ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ซึ่งพิจารณาจากอุณหภูมิการ

สลายตัว โดยนำฟิล์มพอลิยูรีเทนมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851e ทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน นำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่เปลี่ยนไปในหน่วยร้อยละกับอุณหภูมิที่ได้มาวิเคราะห์หาอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (onset degradation temperature, $T_{d\ onset}$) หรือ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลสารที่สามารถวัดได้ รวมทั้งอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (end-set degradation temperature, $T_{d\ endset}$) คืออุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลได้อย่างสมบูรณ์

2) ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิตรี เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันหรืออุณหภูมิหลอมของพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DSC200 โดยนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นไปทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปโดยวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน และลดอุณหภูมิให้ต่ำลงด้วยไนโตรเจนเหลว

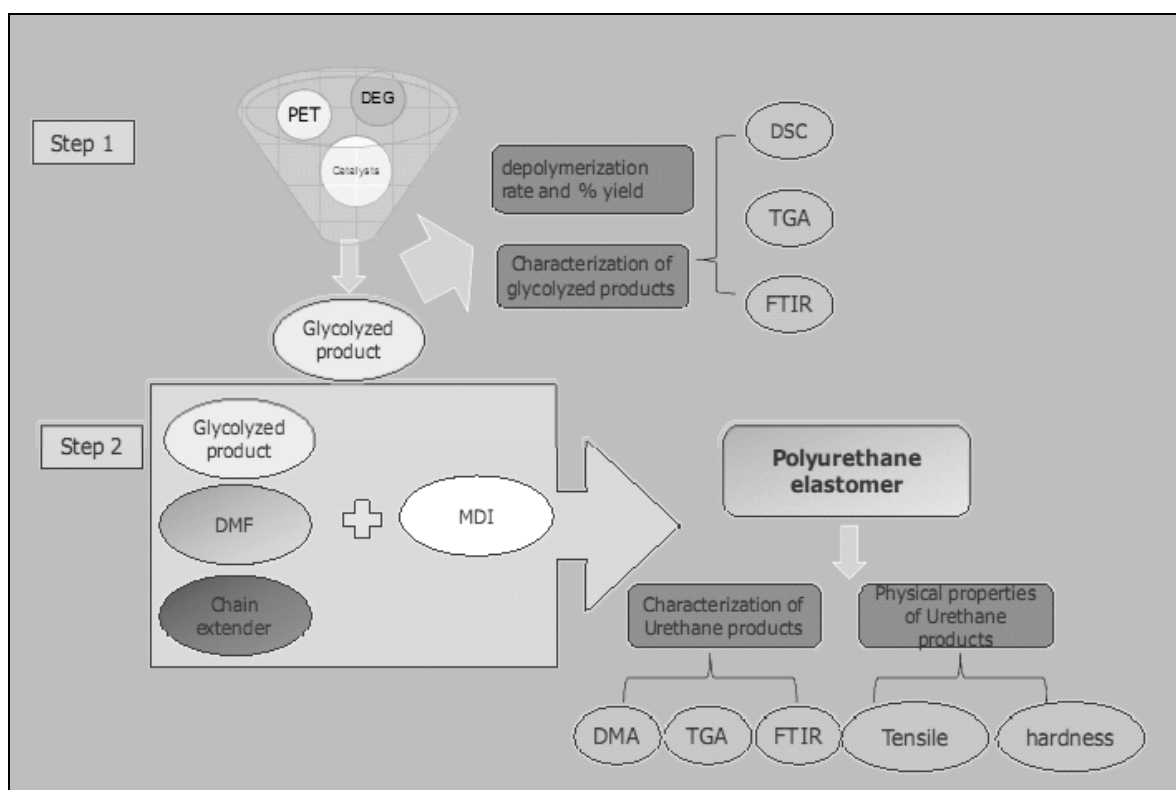
3.3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

เป็นการทดสอบเชิงกลพลวัตของชิ้นงานพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง dynamic mechanical analyzer (DMA) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DMA/SDTA 861 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้ลักษณะการทดสอบแบบกด (compression mode) เพื่อทดสอบชิ้นงานขนาดประมาณ 1×1 ตารางเซนติเมตร และความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ทดสอบโดยใช้ช่วงอุณหภูมิการทดสอบระหว่าง -80 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความถี่ 0.1 1 10 และ 100 เฮิรท์ (Hz) และใช้ในโตรเจนเหลวเพื่อช่วยในการลดอุณหภูมิที่ทดสอบให้ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.7 Dynamic mechanical analyzer

สำหรับขั้นตอนการดำเนินการทั้งหมดสามารถสรุปได้เป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการวิจัย

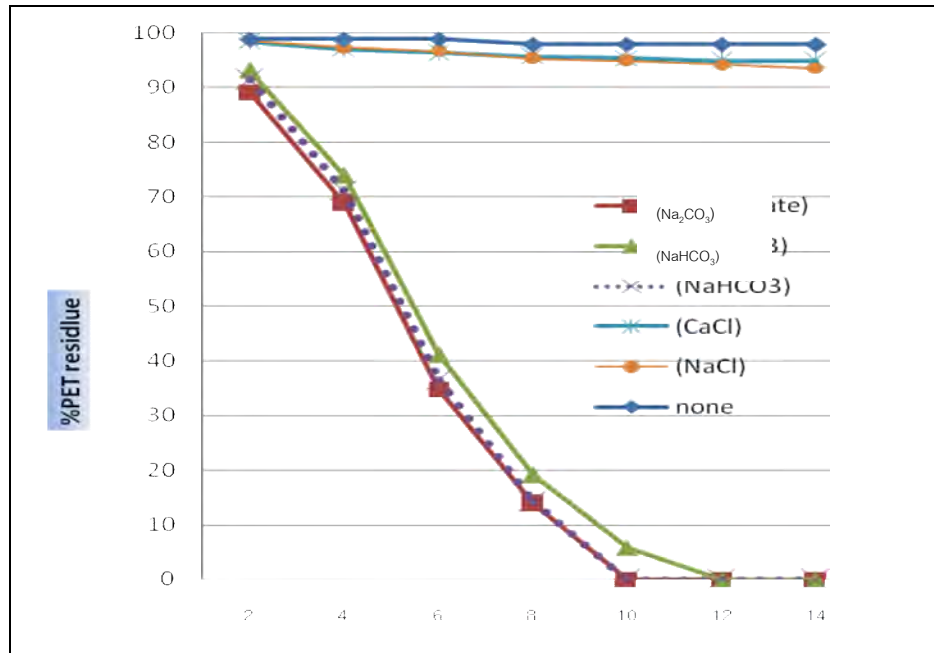
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ไกลโคไลซ์โพรดักส์ (Glycolyzed Products)

4.1.1 อัตราการย่อยสลายพืช

จากการทดลองย่อยสลายพืชด้วยไดเอทิลีนไกลคอลภายใต้พลังงานไมโครเวฟโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายพืชแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยซิงค์แอสซีเทตมีความสามารถช่วยให้การดำเนินไปของปฏิกิริยาไกลโคไลซิสดีที่สุด กล่าวคือ การย่อยสลายพืชภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 600 วัตต์ จนเสร็จสมบูรณ์โดยพืชถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นของเหลวทั้งหมด สิ้นสุดภายในระยะเวลาประมาณ 9 นาที ในขณะที่โซเดียมไบคาร์บอเนตนั้นมีประสิทธิภาพด้อยกว่าเล็กน้อย คือสามารถช่วยเร่งการย่อยสลายพืชให้เสร็จสมบูรณ์ได้ภายใน 10 นาที ส่วนโซเดียมคาร์บอเนตนั้นจะสามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายให้เสร็จสมบูรณ์ที่ประมาณ 12 นาที ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ แทบไม่มีส่วนช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาเลย ซึ่งผลที่ได้นั้นไม่ต่างกับการทำไกลโคไลซิสโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานั่นเอง (ซึ่งจากผลของประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลของปฏิกิริยาไกลโคไลซิสโดยการให้ความร้อนแบบทั่วไปแต่ประสิทธิภาพที่ได้จะด้อยกว่าอย่างเห็นได้) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตนั้นสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไกลโคไลซิสแทนสารประกอบของโลหะหนักอย่างซิงค์แอสซีเทตได้ โดยประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยานั้นจะเห็นผลชัดเจนเมื่อใช้ร่วมกับปฏิกิริยาไกลโคไลซิสด้วยไมโครเวฟ นอกจากนี้จะพบว่าปฏิกิริยาไกลโคไลซิสที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนนั้นจะใช้เวลาน้อยกว่าปฏิกิริยาที่ใช้แหล่งให้พลังงานเป็นตัวกำเนิดความร้อนทั่วไป ทั้งนี้เป็นเพราะปฏิกิริยาที่ได้มีความรุนแรงมากกว่าเนื่องจากทุกอนุภาคจะร้อนขึ้นทุกจุดอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะของเหลวและสารที่มีผิวหรือสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง จากจุดนี้ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากจะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาแล้ว ยังหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ดี ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วและเกิดการถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอก ซึ่งนั้นรวมถึงพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วย ทำให้ปฏิกิริยาที่ได้นั้นเกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาไกลโคไลซิสที่ใช้ความร้อนแบบเดิมมาก [2]

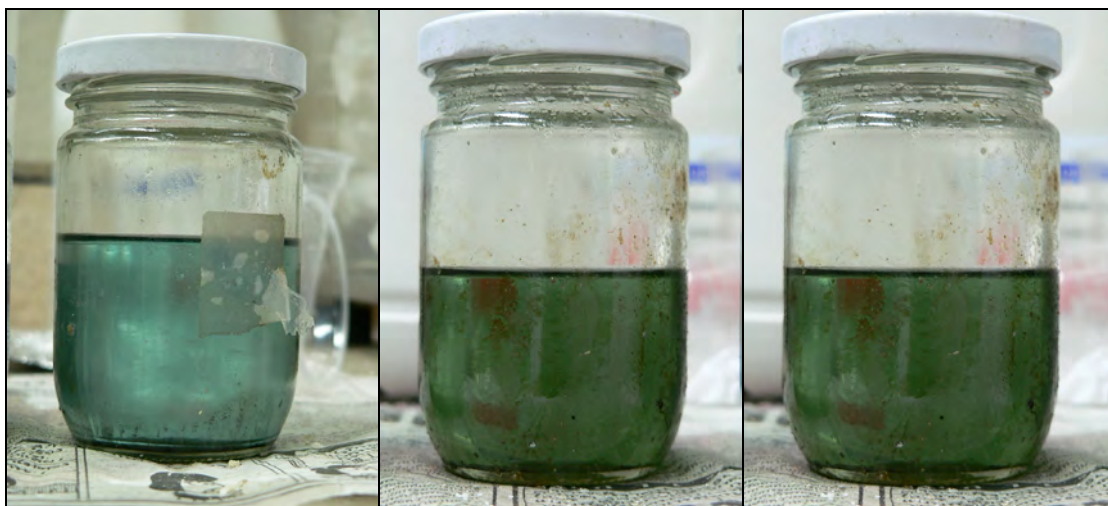


รูปที่ 4.1 อัตราการย่อยสลายพีอีด้วยไดเอทิลีนไกลคอล

การใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนต แทนซิงค์แอสีเทตเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟนั้น เป็นทางเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่ง เนื่องจากสารทั้งสองเป็นสารประกอบจำพวกเกลือธรรมชาติ หาซื้อได้ง่าย และมีราคาไม่สูงเท่ากับซิงค์แอสีเทต

4.1.2 ลักษณะของไกลโคไลซ์โพรดักส์

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการรีไซเคิลทางเคมีผ่านกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์โดยใช้ซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีลักษณะเป็นของเหลวใส สีฟ้าอมเขียว โปร่งแสง มีความหนืดเล็กน้อย และเป็นเนื้อเดียวกันไม่แยกชั้น ในขณะที่ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตกับโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นของเหลวสีเขียวยาว โปร่งแสง มีความหนืดเล็กน้อยและเป็นเนื้อเดียวกันเช่นเดียวกับไกลโคไลซ์ที่ใช้ซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่ง แต่จากการสังเกตพบว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะไวต่อความชื้นสูงกว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งซึ่งจะเห็นได้จากเมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดตะกอนขุ่นสีขาวขึ้นและจะหายไปเมื่อนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส



(ก)

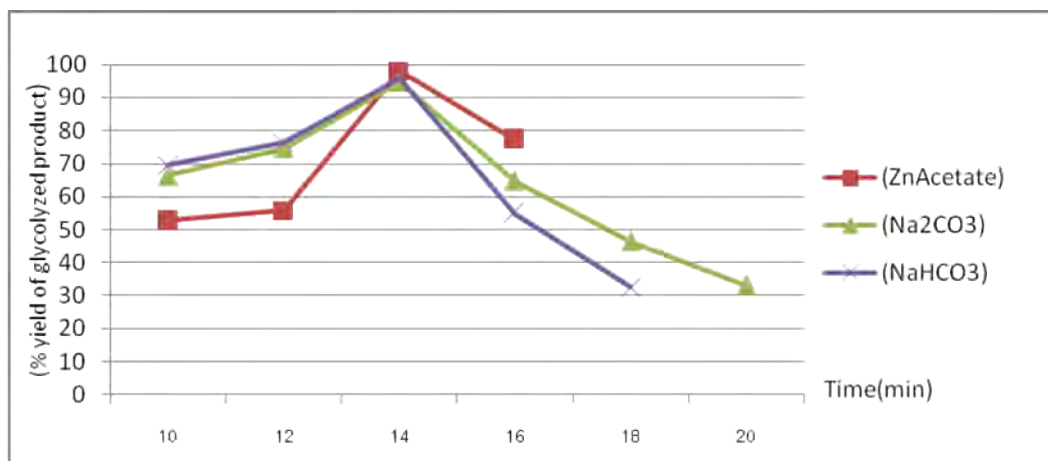
(ข)

(ค)

รูปที่ 4.2 โกลโคไลซ์โพรตักส์ที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคไลซิสด้วยไดเอทิลีนไกลคอลคอลลกับตัวเร่งปฏิกิริยา
ต่างๆ (ก) ซิงค์แอสซีเตต (ข) โซเดียมไบคาร์บอเนต (ค) โซเดียมคาร์บอเนต

4.1.3 ร้อยละผลได้ของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์

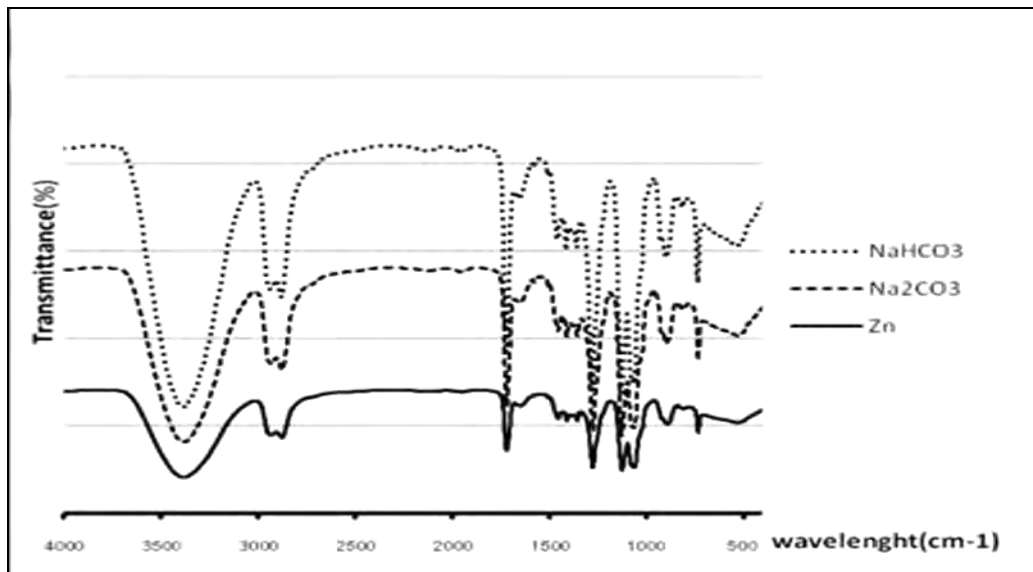
เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรตักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ที่เวลาต่างๆ มาผสมกับน้ำร้อน แล้วกรอง ส่วนที่ไม่ละลายออก จากนั้นนำส่วนที่ละลายได้ไม่ตกตะกอนไปลดอุณหภูมิลง แล้วกรองเอา ตะกอนที่เกิดขึ้นออกมาทำการชั่งน้ำหนักของตะกอนที่ได้ทั้งหมด ซึ่งเมื่อวิเคราะห์แล้วตะกอนที่ได้ คือเพ็ตที่ถูกย่อยสลาย จากนั้นนำมาคำนวณเป็นร้อยละผลได้ของเพ็ตที่ถูกย่อยสลายที่ได้ ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเพ็ตที่เวลาต่างๆ ซึ่งผลการศึกษา อิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณเพ็ตที่ถูกย่อยสลายซึ่งเป็นองค์ประกอบของ โกลโคไลซ์โพรตักส์ แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 โดยพบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาภายใต้พลังงาน ไมโครเวฟที่ให้ร้อยละผลได้ของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์สูงสุดอยู่ที่ 14 นาที ไม่ว่าจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดใด และเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเกิน 14 นาที ร้อยละผลได้ของเพ็ตมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงต่างๆ รวมทั้งปฏิกิริยาการรวมตัวกันใหม่ของ มอนอเมอร์ (repolymerization) [57]



รูปที่ 4.3 ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

4.1.4 โครงสร้างเคมีของไกลโคไลซ์โพรดักส์

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยปรากฏตำแหน่งพีกที่สำคัญดังที่แสดงในตาราง 4.1 โดยพบว่า FTIR สเปกตรัมของปรากฏพีกของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (-OH) และพันธะของคาร์บอนกับหมู่ไฮดรอกซิล (-C-OH) ที่ตำแหน่ง 3388 cm^{-1} และ 1126 cm^{-1} ตามลำดับ คาดว่าพบจากส่วนของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์แล้วได้โมเลกุลเล็กลง [42] และส่วนของไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปที่เหลือในระบบเลขคลื่น 2931 cm^{-1} และ 2877 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ -CH ในโครงสร้างของ -CH₂ ที่คาดว่ามิอยู่ในโครงสร้างของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ [43] และมีอยู่ในไดเอทิลีนไกลคอลและส่วนของไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปที่เหลือในระบบด้วยเช่นกัน เลขคลื่น 1717 cm^{-1} และ 1719 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (-C=O) อิสระซึ่งประกอบกันเป็น ester-linkage [42,43] และที่คลื่น 1409 cm^{-1} และ 1457 cm^{-1} แสดงถึงวงอะโรแมติกซึ่งคาดว่ามิอยู่ในพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ และที่เลขคลื่น 732 cm^{-1} แสดงถึง C-H ที่ตำแหน่ง para บนวงอะโรแมติก [42]



รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์

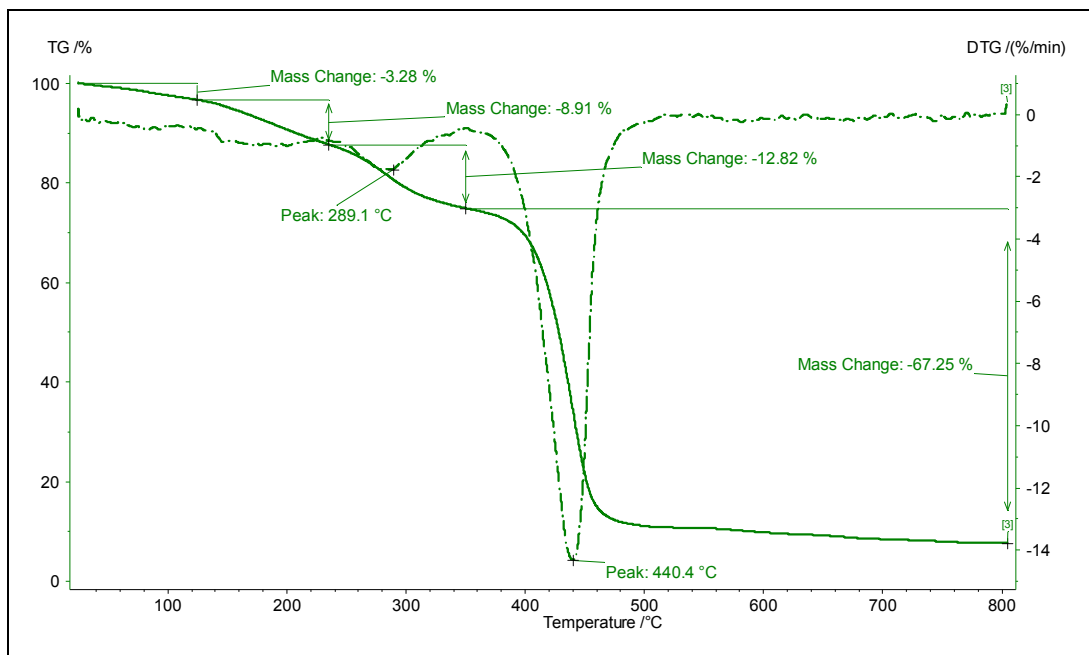
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งของพีกที่สำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ช่วงเลขคลื่น (ซม ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3200-3600	-OH
2800-3000	-CH ₂ , CH ₃
1600-1800	-C=O
1200-1400	-C-O-C-
1000-1100	-C-OH
700-800	Aromatic

4.1.4 อุณหภูมิการสลายตัว

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์เปิดด้วยไดเอทิลีนไกลคอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ นั้นจะให้เทอร์โมแกรมของTGAคล้ายคลึงกัน โดยพบอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทั้งสองช่วงด้วยกัน ช่วงแรกคือการสลายตัวของเพ็ตที่ถูกย่อยสลายที่มีขนาดโมเลกุลเล็กซึ่งเกิดที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 280 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 440 องศาเซลเซียส คือ

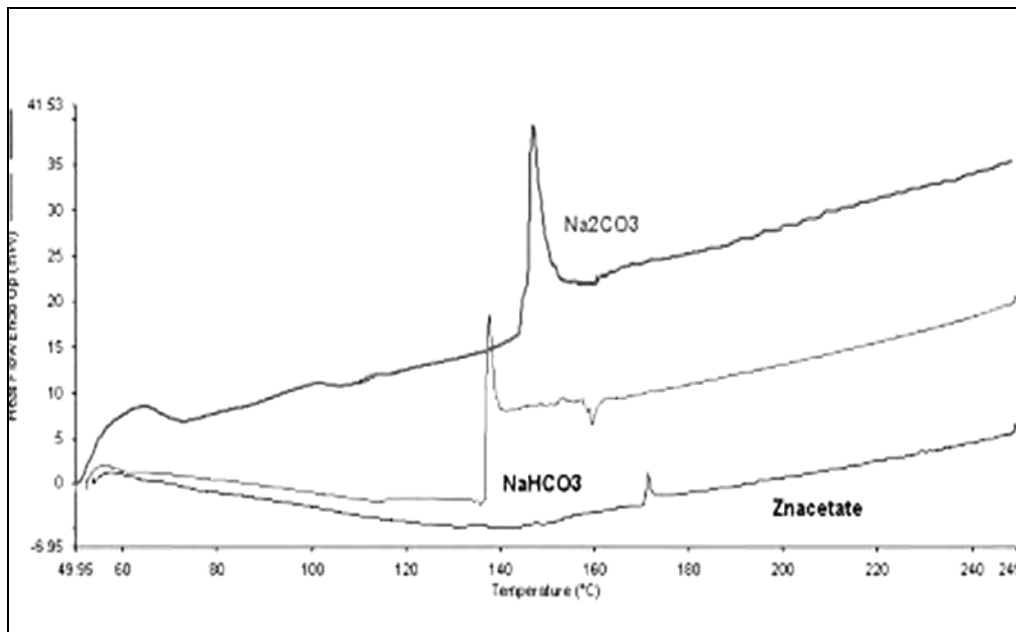
การสลายตัวของพีตที่ถูกย่อยสลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิประมาณ 440 องศาเซลเซียสนั้นเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของพีต ซึ่งเมื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่พีตที่ถูกย่อยสลายนั้นจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันย้อนกลับนั้นจะพบว่าความร้อนที่ใส่เข้าสู่ระบบการทดสอบจะสามารถกระตุ้นไกลโคไลซ์โพรดักส์บางส่วนให้มีพลังงานเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยารวมตัว (condensation polymerization) จนกลายเป็นพีตหรือพอลิเอสเทอร์อีกครั้ง ทำให้ผลเทอร์โมแกรมที่ได้จาก TGA นั้นแสดงอุณหภูมิการสลายตัวเป็นสองช่วง [22]



รูปที่ 4.5 TGAเทอร์โมแกรมของไกลโคไลซ์โพรดักส์

4.1.5 อุณหภูมิหลอมเหลว

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของไกลโคไลซ์โพรดักส์ด้วยเทคนิค DSC ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าจะปรากฏการเปลี่ยนแปลงที่แสดงถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไกลโคลิซิสด้วยตัวเร่งทั้งสามชนิด โดยอุณหภูมิการหลอมเหลวของพีตที่ถูกย่อยสลายทั้งสามอยู่ในช่วงของอุณหภูมิหลอมของมอนอเมอร์และไดเมอร์ของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ที่ได้ และนอกจากนี้การที่ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้นั้นมีอุณหภูมิการหลอมเหลวแค่อุณหภูมิเดียวนั้นสนับสนุนผลของเทอร์โมแกรมที่ได้จากเทคนิค TGA ว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่เตรียมนั้นมีองค์ประกอบเพียงชนิดเดียว



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิหลอมของไกลโคไลซ์โพรดักส์

4.2 พอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์

จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่า การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบบัลก์ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อไม่สม่ำเสมอ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกสังเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย ซึ่งให้ชิ้นงานที่มีลักษณะสม่ำเสมอ

การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลายทำได้โดยการนำไกลโคไลซ์โพรดักส์มาทำปฏิกิริยากับเอมีดีโอมอนอเมอร์ในสารละลาย ร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และ พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กัน โดยคำนวณให้สัดส่วนโดยโมลของหมู่ไอโซไซยาเนตกับหมู่ไฮดรอกซิลเท่ากับ 1 ($\text{NCO/OH}=1$) และศึกษาผลของชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์ และความแตกต่างของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ลักษณะของพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้เมื่อใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์และตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับไกลโคไลซ์โพรดักส์	ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้
No chain extender	ซิงค์แอซีเตต	มีลักษณะเหลวใส เมื่อเพิ่มเซนเอกซ์เทนเดอร์ มีสีเหลืองเล็กน้อยสำหรับชิ้นงานที่ใช้ซิงค์แอซีเตต(ทั้งที่ไม่เติมเซนเอกซ์เทนเดอร์, ชิ้นงานที่เติมน้ำมันละหุ่งและชิ้นงานที่เติม PEG Mw= 6000) มีความหนืดเล็กน้อย และมีกลิ่นของสารละลาย DMF เล็กน้อย
Castor oil	โซเดียมไคโรบอเนต	
PEG ($M_w=1000$)	โซเดียมคาร์บอเนต	
PEG ($M_w=4000$)		
PEG ($M_w=6000$)		

หมายเหตุ: สำหรับสูตรที่เติมเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลมีการปรับลดปริมาณของไกลโคไลซ์โพรดักส์ให้อยู่ที่ร้อยละ 92.5 โดยโมลของเอมดีไอ ซึ่งพบว่าเป็นปริมาณที่เหมาะสมและสามารถขึ้นรูปได้ในทุกสูตร

4.2.1 การขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทุกสูตรมีลักษณะเป็นของเหลว สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยวิธีหล่อแบบได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

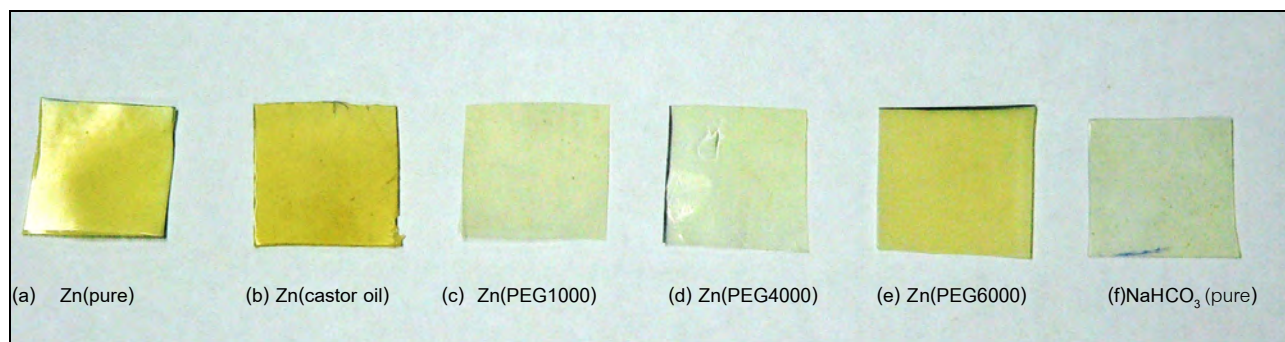


รูปที่ 4.7 พอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย

4.2.2 ลักษณะของฟิล์มพอลิยูรีเทน

เมื่อนำฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ไปอบให้แห้ง จะได้ชิ้นงานตามแบบที่หล่อไว้และยังมีกลิ่นของตัวทำละลายหลงเหลืออยู่ โดยผลที่ได้พบว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้หมดสำหรับเซนเอกซ์เทนเดอร์ทุกชนิดที่ใช้ แต่สำหรับพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมโบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้เฉพาะสูตรที่ไม่เติม เซนเอกซ์เทนเดอร์ และสูตรที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 6000 เท่านั้น ส่วนพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมโบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเปราะมากจนเกิดการแตกร่อนก่อนที่จะดึงออกมาจากแม่แบบ ทั้งนี้เนื่องมาจากพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมโบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นไวต่อความชื้นมาก จึงทำให้ระหว่างที่อบแห้งนั้นชิ้นงานได้ดูดความชื้นเข้าไปส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้เกิดการหดตัวและแตกเป็นรอยงา

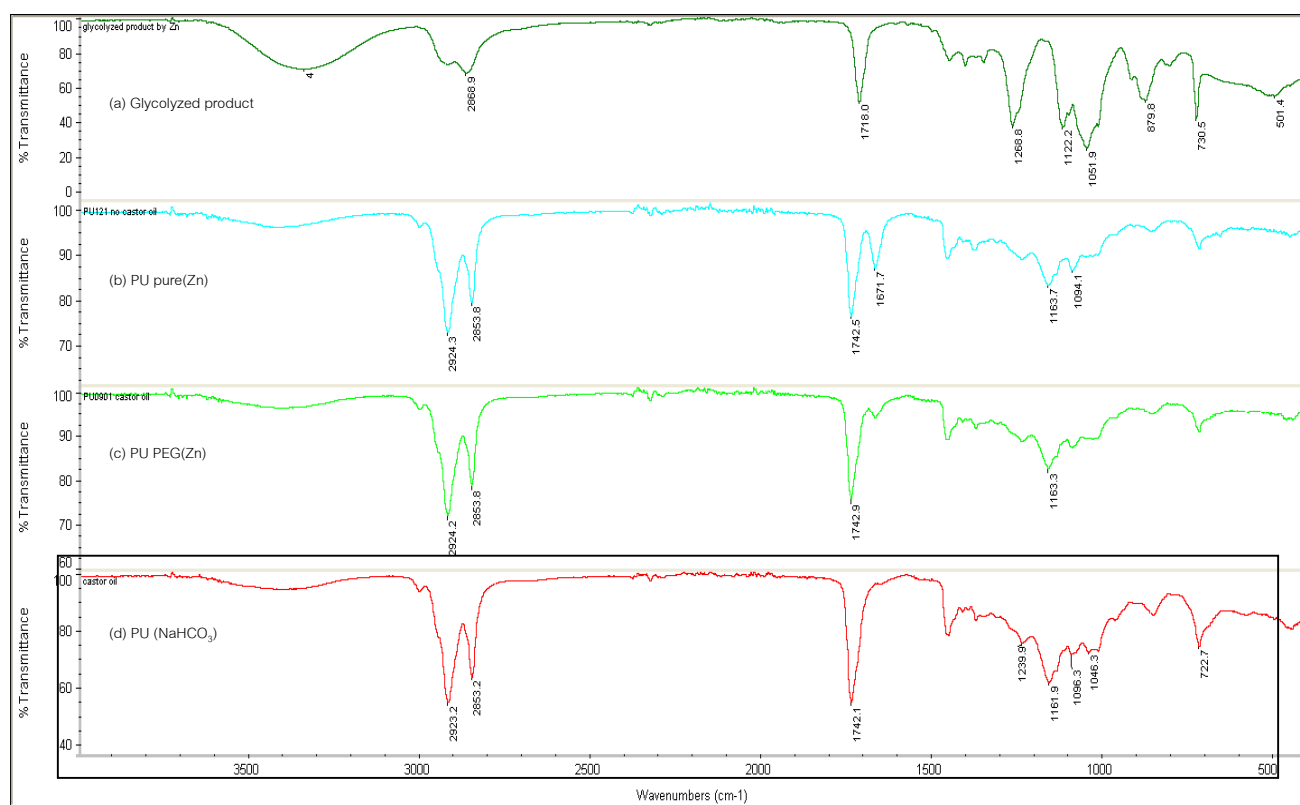
จากนั้นเมื่อวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะแข็งเปราะที่อุณหภูมิห้องมากกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมเซนเอกซ์เทนเดอร์ แต่มีความใสเหมือนกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันละหุ่งที่เติมเข้าไปนั้นมีลักษณะเป็นแอลกอฮอล์จำพวกไตรฟังก์ชันนัลซึ่งมีผลทำให้เกิดการเชื่อมขวางทางเคมีของพอลิยูรีเทนมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งเปราะมากขึ้น และเมื่อใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ พบว่าการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความขุ่นมากขึ้น แต่มีลักษณะนิ่มยืดหยุ่นคล้ายยางมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอลไปเพื่อทำหน้าที่ขยายสายโซ่ของพอลิยูรีเทนให้มีส่วนของสายโซ่ตรงยาวมากขึ้น ซึ่งหากยังใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้ก็ยังมีส่วนของสายโซ่ตรงยาวมากขึ้นกว่าการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมโบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีความใสและยืดหยุ่นกว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.8 फिल्मพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้จากการกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลายและขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ

4.2.3 โครงสร้างทางเคมี

เมื่อนำฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ได้มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าปรากฏสเปกตรัมดังแสดงในรูป 4.9 โดยปรากฏพีกสำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ขึ้นงานพอลิยูรีเทน

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งพีกสำคัญต่างๆที่พบในสเปกตรัมของชิ้นงานพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์

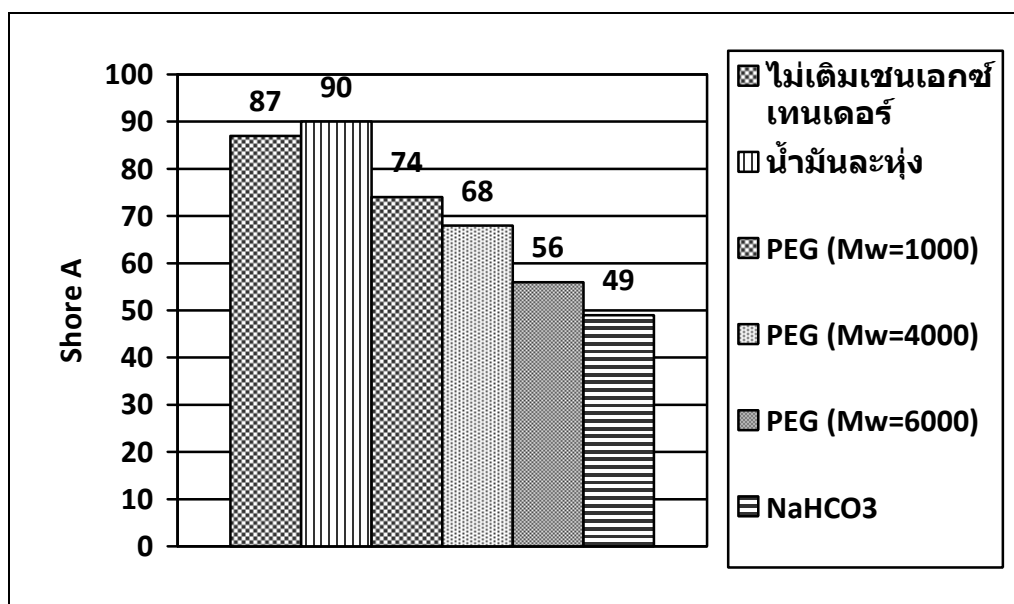
ช่วงเลขคลื่น (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3200-3300	-NH- stretching
2800-3000	-CH ₂ , CH ₃
1600-1800	-C=O
1500-1600	-NH- bending
1200-1400	-C-O-C-
1150-1110	-C-N-
1000-1100	-C-OH

เมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้กับโกลโคไลซ์โพรดักส์จะพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันดังแสดงในรูปที่ 4.9(ภายในกรอบ) และตารางที่ 4.3 เลขคลื่นที่ 1742 cm⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (-C=O) อิสระ ซึ่งจากหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว คาดว่ามีอยู่ใน urethane linkage ที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ [47] เลขคลื่นในช่วง 2903-2904 cm⁻¹ แสดงถึงการสั่นของ -CH- ในโครงสร้างของ -CH₂-CH₂ ซึ่งคาดว่ามีอยู่ในโครงสร้างของโกลโคไลซ์โพรดักส์ และของไดเอทิลีนไกลคอลที่เข้าทำปฏิกิริยากันเป็นพอลิยูรีเทน [43] เลขคลื่นที่ 1742.1 cm⁻¹ และ 1239 cm⁻¹ แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (-C=O) อิสระ และ ether linkage (-C-O-C-) ตามลำดับ ซึ่งอาจประกอบไปกันเป็น ester linkage [43,44] สามารถพบในโครงสร้างของโกลโคไลซ์โพรดักส์ หรือเลขที่คลื่น 1239 cm⁻¹ นั้นอาจแสดงถึง ether linkage ที่มีอยู่ในไดเอทิลีนไกลคอล เลขคลื่นที่ประมาณ 1161.9 cm⁻¹ อาจแสดงถึงพันธะ -C-N- ที่มีอยู่ใน urethane linkage [47] และเลขคลื่น 1046.3 cm⁻¹ และ 1096.3 cm⁻¹ แสดงถึงพันธะของคาร์บอนกับหมู่ไฮดรอกซิล (-C-OH-) ซึ่งคาดว่าพบจากส่วนของโกลโคไลซ์โพรดักส์ [42] และส่วนของไดเอทิลีนไกลคอลที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยา แต่ที่บริเวณเลขคลื่นที่ 2270 cm⁻¹ ไม่พบพีกที่เด่นชัด ซึ่งสามารถบอกได้ว่าหมู่ไฮโซไซยานาตเข้าทำปฏิกิริยาหมดสมบูรณ์ [7]

4.2.4 ความแข็ง

เมื่อนำฟิล์มพอลิยูรีเทนไปทดสอบหาความแข็งด้วยคูโรมิเตอร์ชนิดชอร์เอ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยพบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์มีความแข็งสูงกว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ไม่ได้ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ เนื่องจากน้ำมันละหุ่งที่เติมเข้าไปนั้นจะไปทำให้โครงสร้างของพอลิยูรีเทนเกิดการเชื่อมขวางทางเคมีมากขึ้น โครงสร้างมีความแข็งเกร็ง ส่งผลให้ค่าความแข็งที่วัดได้จากแรงต้านการกดเพิ่มขึ้นด้วย

ในขณะที่ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์นั้น พบว่ายิ่งพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ค่าความแข็งที่วัดได้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั้นจะเป็นการเพิ่มส่วนของสายโซ่ตรงให้กับโครงสร้างของพอลิยูรีเทนส่งผลให้โครงสร้างของพอลิยูรีเทนนั้นมีอิสระในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ลดแรงต้านการเปลี่ยนรูปร่างตรงบริเวณหัวกด ส่งผลให้ค่าความแข็งที่วัดได้จากแรงต้านการกดนั้นลดลง



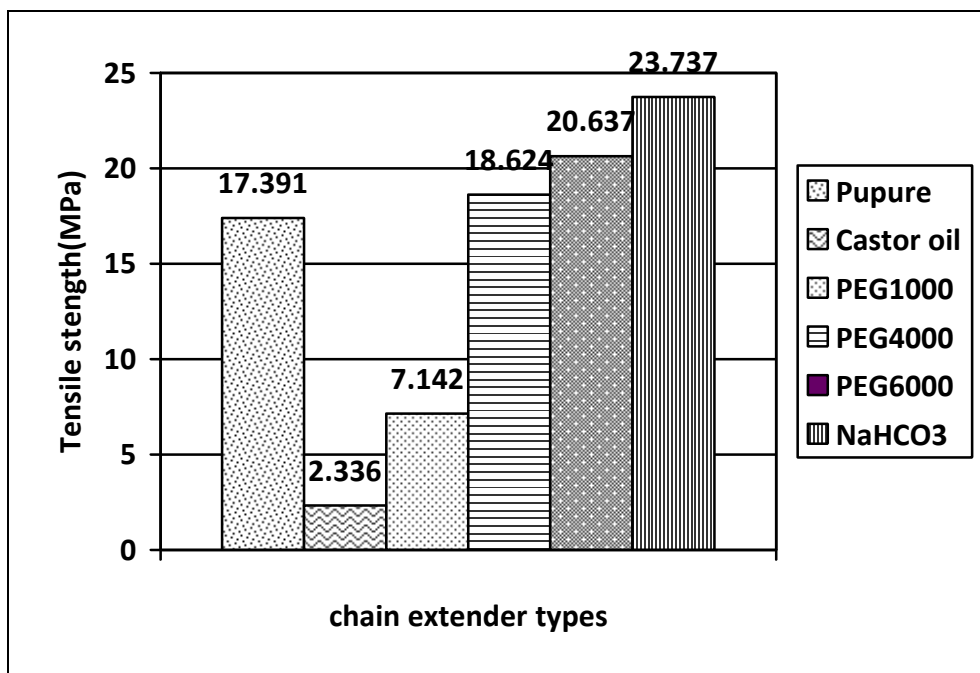
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้

นอกจากนี้การใช้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน จะให้ฟิล์มที่มีสมบัติที่แตกต่างกันไปด้วย โดยพบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีความแข็งน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วยสายโซ่ที่ยาวกว่า เมื่อนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนจึงได้พอลิยูรีเทนที่ได้จึงมีสายโซ่ที่ยาวกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้นั้นมีความแข็งน้อยกว่านั่นเอง

4.2.5 สมบัติด้านแรงดึง

ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีดีโดยใช้ซิงค์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถูกนำมาตรวจสอบสมบัติด้านแรงดึง ได้แก่ ความต้านแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาด และมอดุลัส จากรูปที่ 4.11 พบว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์มีความต้านแรงดึงต่ำกว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำมันละหุ่งเป็นไทรออลที่สามารถทำให้โครงสร้างเกิดการเชื่อมขวางกันได้ ส่งผลให้ฟิล์มพอลิยูรีเทนค่อนข้างเปราะ ในขณะที่พอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 1000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ มีความต้านแรงดึงต่ำกว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์เช่นกัน แม้ว่าจะมีความต้านแรงดึงสูงกว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ ส่วนพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 4000 และ 6000 มีค่าความต้านแรงดึงสูงกว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ เนื่องจากเป็นสารที่มีสายโซ่โมเลกุลยาว พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นทำให้มีความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น

สำหรับฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอสซีเทตและโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ในการสังเคราะห์ ถูกนำมาตรวจสอบสมบัติด้านแรงดึง รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความต้านแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาดสูงกว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาจเป็นเพราะซิงค์แอสซีเทตสามารถเร่งปฏิกิริยาการไกลโคไลซิสได้เร็วกว่า และปฏิกิริยาไกลโคไลซิสนั้นจะมีความรุนแรงมากกว่าปฏิกิริยาไกลโคไลซิสที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้นั้นมีสายโซ่ที่สั้นกว่า โครงสร้างมีความอิสระในการเคลื่อนที่ไม่มาก และน้ำหนักโมเลกุลที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า เป็นผลให้ชิ้นงานที่ได้นั้นมีค่าการต้านแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาดน้อยกว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

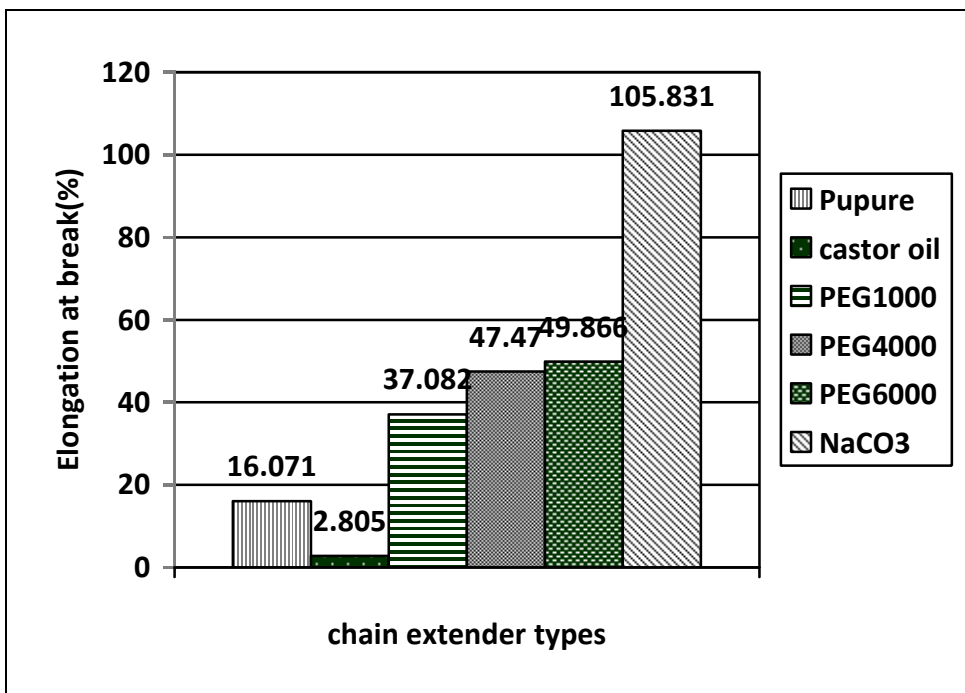


รูปที่ 4.11 ความต้านแรงดึงของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ

รูปที่ 4.12 แสดงการยืดตัวที่จุดขาดของฟิล์มพอลิยูรีเทน โดยฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์มีการยืดตัวที่จุดขาดต่ำลงมาก เพราะชิ้นงานที่ได้มีความเปราะมาก ขณะที่ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ทั้ง 1000 4000 และ 6000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ ล้วนมีค่าการยืดตัวของจุดขาดเพิ่มขึ้นกว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์มาก โดยมีค่าการยืดตัวที่จุดขาดแปรผันตามน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนไกลคอลที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอลที่เติมเข้าไปนั้นมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาว พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้จึงมีสายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนที่เป็นอิสระมากขึ้น โครงสร้างของพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้จึงมีความยืดหยุ่น และมีลักษณะคล้ายยางมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเทตและโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ในการสังเคราะห์ ถูกนำมาตรวจสอบสมบัติด้านแรงดึง รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความต้านแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาดสูงกว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาจเป็นเพราะซิงค์แอซีเทตสามารถเร่งปฏิกิริยาการไกลโคลิซิสได้เร็วกว่า และปฏิกิริยาไกลโคลิซิสนั้น

จะมีความรุนแรงมากกว่าปฏิกิริยาไกลโคไลซิสที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้นั้นมีสายโซ่ที่สั้นกว่า โครงสร้างมีความอิสระในการเคลื่อนที่ไม่มาก และน้ำหนักโมเลกุลที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า เป็นผลให้ชิ้นงานที่ได้นั้นมีค่าการต้านแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาดน้อยกว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

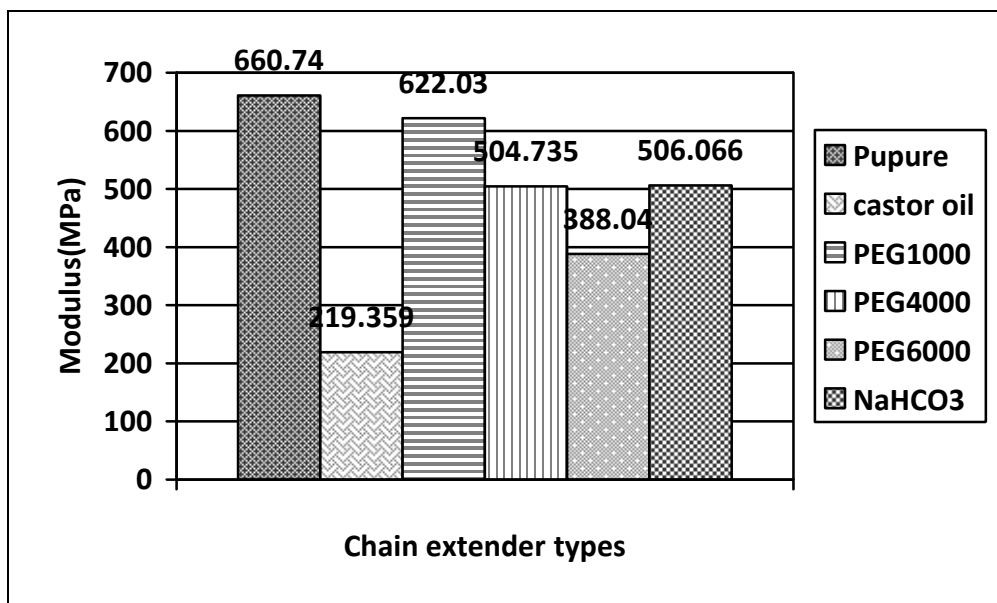


รูปที่ 4.12 การยืดตัวที่จุดขาดของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ

ผลของการใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ในการเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความต้านแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาด จากรูปที่ 4.13 ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่ต่ำมาก แสดงถึงชิ้นงานที่ได้นั้นมีความเปราะและไม่แข็งแรง ขณะที่ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นลดต่ำลงไปตามน้ำหนักโมเลกุลของเซนเอกซ์เตอร์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นในลักษณะของอีลาสโตเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเตตและโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาด ซึ่งค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีความยืดหยุ่นคล้ายอย่างน้อยกว่ามอดุลัส

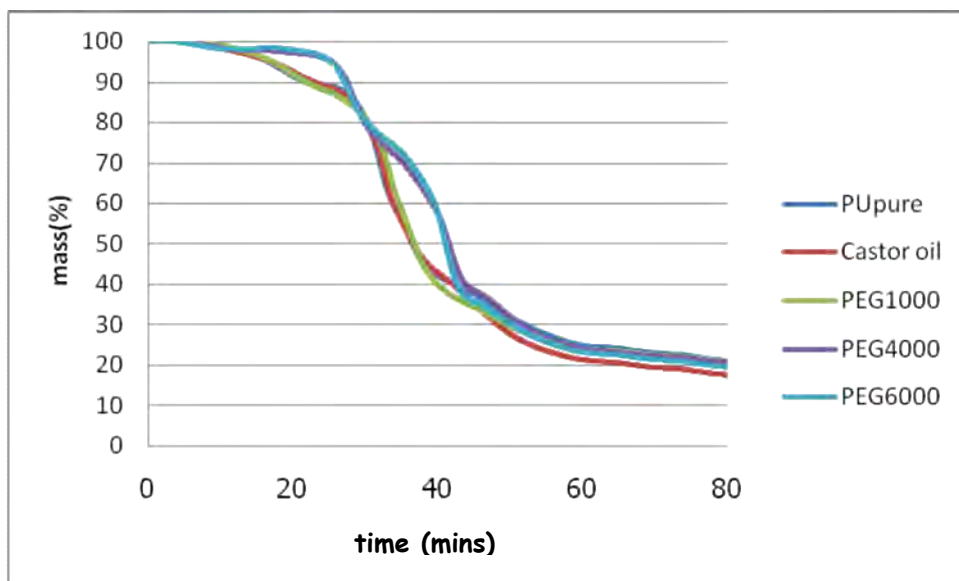
ยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซีโพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.13 มอดุลัสยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ

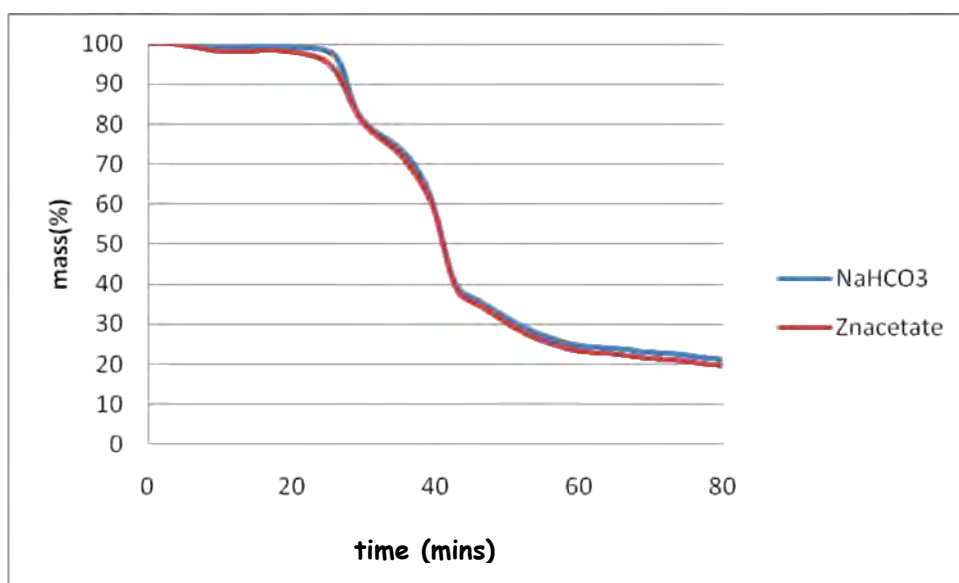
4.2.6 เสถียรภาพทางความร้อน

เมื่อนำชิ้นงานพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์โดยใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ ไปทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัว ดังแสดงผลในรูป 4.14 พบว่า มีช่วงการสลายตัวแบ่งออกเป็น 2 ช่วง พอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์นั้นจะมีอุณหภูมิการสลายตัวช่วงแรกสูงกว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์เล็กน้อย แต่โดยรวมถือว่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสรุปได้ว่าน้ำมันละหุ่งที่เติมเข้าไปนั้นไม่ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น แต่เมื่อใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นเซนเอกซ์เทอเนอร์ พบว่าการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 1000 นั้นยังให้พอลิยูรีเทนที่มีเสถียรภาพทางความร้อนใกล้เคียงกับที่พอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ แต่พอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 และ 6000 กลับมีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอลไปเพิ่มความยาวของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ต้องใช้เวลาพลังงานความร้อนในการสลายตัวมากขึ้น ดังนั้นจึงเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้นเท่าไรก็ยิ่งจะทำให้ชิ้นงานมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น



รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิยูรีเทนที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ

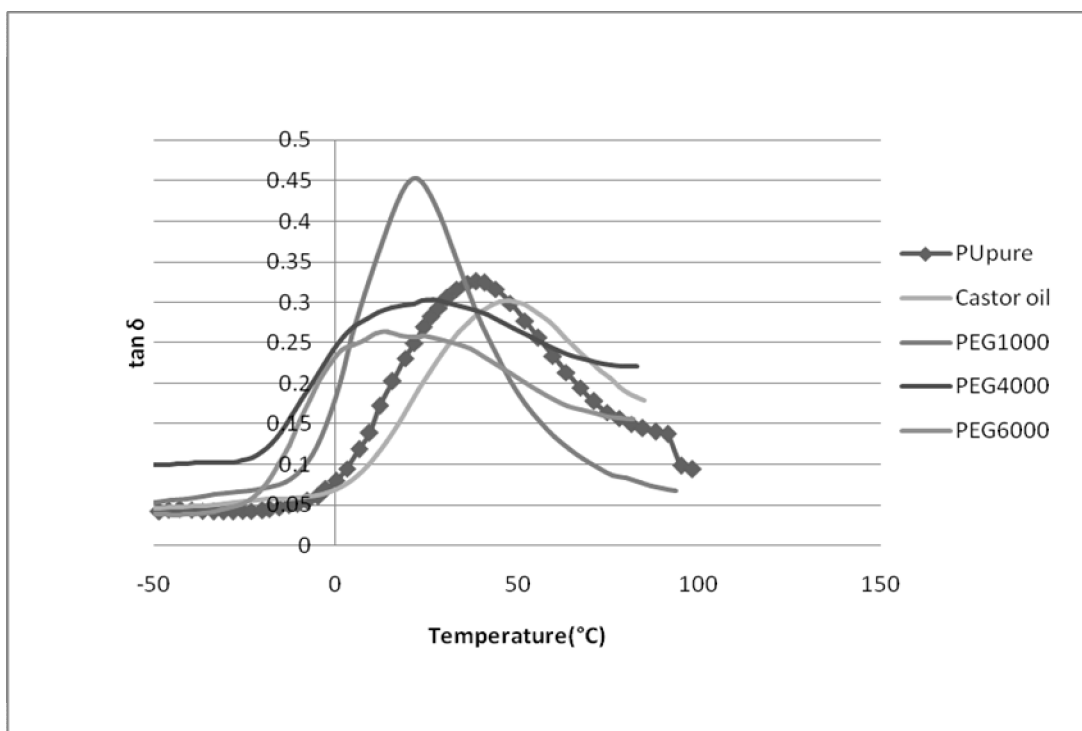
นอกจากนี้จากเทอร์โมแกรมที่แสดงในรูปที่ 4.15 ยังพบว่า ที่ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเตตและโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเสถียรภาพทางความร้อนไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก



รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

4.2.7 สมบัติเชิงกลพลวัต

รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตโดยเทคนิค DMA โดยพบว่าปรากฏพีกของ $\tan \delta$ ในเทอร์โมแกรมซึ่งบ่งถึงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิยูรีเทนที่เตรียมขึ้น โดยผลที่ได้นี้สัมพันธ์กับผลที่ได้จากทดลองอื่นๆ กล่าวคือเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์จะปรากฏพีกของ $\tan \delta$ ที่บ่งถึงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันสูงกว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ เนื่องจากพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์มีโครงสร้างเชื่อมขวางค่อนข้างมาก สายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนไหวได้ยาก ส่วนเทอร์โมแกรมของพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์นั้นพบว่าปรากฏพีกของ $\tan \delta$ ที่บ่งถึงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันต่ำพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอลไปเพิ่มความยาวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ยิ่งพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลมากก็ยิ่งไปเพิ่มความยาวของสายโซ่โมเลกุลพอลิ ยูรีเทน จึงทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันที่บ่งบอกโดยพีกของ $\tan \delta$ มีแนวโน้มลดลงไปด้วย



รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรมเปรียบเทียบพอลิยูรีเทนที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การย่อยสลายขวดPETที่ใช้แล้วด้วยไดเอทิลีนไกลคอลผ่านปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของพีดีต่อไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:6 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ ภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 600วัตต์ ได้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นมอนอเมอร์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรย่อยสลายโดยให้ความร้อนแบบเดิมพบว่า เวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาลดลงมาก

5.1.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยพบว่าซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถย่อยสลายPETได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ผลที่ได้นั้นไม่แตกต่างกับการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากนัก จึงสามารถใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนซิงค์แอสีเทตได้

5.1.3 เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอสีเทต โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์พอลิยูรีเทน โดยการทำปฏิกิริยากับเอ็มดีไอมอนอเมอร์และเฮกซะเมทิลไอโซไซยาเนตชนิดต่างๆ โดยใช้การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการหล่อแบบในแม่แบบพอลิโพรพิลีน แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเรียบ โปร่งใส ในบางสูตรมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง

5.1.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไกลโคไลซ์มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยไกลโคไลซ์โพรดักส์ทั้งที่ซิงค์แอสีเทตและโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งนั้นเมื่อนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนต่างก็สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ โดยพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีความนิ่มและยืดหยุ่นกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากซิงค์แอสีเทต ในขณะที่ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตนั้นเมื่อนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนแล้วไม่สามารถขึ้นรูปได้ในทุกสูตรเนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้นั้นมีความแข็งเปราะเกินที่จะขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้

5.1.5 ชนิดของเซนเซอร์ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยหากเลือกใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นเซนเซอร์ชิ้นงานที่ได้มีความขุ่นมากขึ้น แต่มีความนิ่มและยืดหยุ่นคล้ายยางเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามการใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเซอร์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะแข็งเปราะ

5.1.6 ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้มีความแข็งแรงลดลงและมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นเซนเซอร์ และที่อัตราส่วนสารอื่นๆ เท่ากันพบว่าชิ้นงานพอลิยูรีเทนซึ่งเตรียมจากไกลโคลซีโพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีแม้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าแต่มีเสถียรภาพทางความร้อนใกล้เคียงกับชิ้นงานพอลิยูรีเทนซึ่งเตรียมจากไกลโคลซีโพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.7 พอลิยูรีเทนที่ใช้น้ำมันละหุ่งเป็นเซนเซอร์มีคุณสมบัติการทนความร้อนที่ค่อนข้างสูงทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเปราะ ในขณะที่พอลิยูรีเทนที่ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นเซนเซอร์ชิ้นงานนั้นมียุณหภูมิการทนความร้อนที่ต่ำ ฟิล์มที่ได้จึงมีความยืดหยุ่นมากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 พอลิยูรีเทนที่ได้ อาจยังมีสมบัติไม่เหมาะสมนัก แต่อาจมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ โดยเปลี่ยนชนิดของไกลคอลให้ได้ไกลโคลซีโพรดักส์ที่มีสายโซ่ยาวขึ้นและมีโครงสร้างที่เหมาะสม เพื่อที่สามารถนำไปเตรียมเป็นพอลิยูรีเทนที่สามารถใช้ร่วมกับเซนเซอร์เซนเซอร์สายสั้นได้ และควรศึกษาผลของปริมาณของเซนเซอร์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนต่อสมบัติของพอลิยูรีเทนอย่างไร

5.2.2 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลายยังคงค่อนข้างสิ้นเปลืองตัวทำละลายที่ใช้ อาจมีการศึกษากระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอื่นๆ ที่มีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่า

รายการอ้างอิง

- [1] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชารีไซเคิลพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
- [2] Louis, L. Nowacky ,J. Energy Conservation in Textile and Polymer Processing Washington, D.C. : American Chemical Society, 1979.
- [3] Ma, E. C. Thermoplastic polyurethane elastomers. In B. M. Walker; and C. P. Rader (eds.), Handbook of Thermoplastic Elastomers, pp. 224-255. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [4] Schollenberger, C. S. Thermoplastic polyurethane elastomers. In A. K. Bhowmick; and H. L. Stephens (eds.), Handbook of Elastomers , pp. 387-416. London: CRC Press, 2000.
- [5] Dodge, J. Polyurethanes and polyureas. In M. E. Rogers; and T. E. Long (eds.), Synthetic Methods in Step-growth Polymers, pp. 215-218. New Jersey: WileyIEEE, 2003.
- [6] Lamba, N. M. K.; Woodhouse, K. A.; Cooper, S. L.; and Lelah, M. D. Polyurethanes in Biomedical Applications. London: CRC Press, 1997.
- [7] Yilgor, I.; Yilgor, E.; Guler, I. G.; Ward, T. C.; and Wilkes, G. L. FTIR investigation of the influence of diisocyanate symmetry on the morphology development in model. Polymer 47 (2006): 4105-4114.
- [8] Lonescu, M. Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes . Shropshire: iSmithers Rapra, 2005.
- [9] Szycher, M. Szycher's Handbook of Polyurethanes. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003
- [10] สรไกร ดันสิทธิ์พันธ์. เทคโนโลยีขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://pirun.ku.ac.th/b4755390/compression.html> [18 กุมภาพันธ์ 2553]

- [11] Dooley, K. M. Polymer Rheology-Basic Equations and Flow Behavior [Online].2005. Available from: <http://www.che.lsu.edu/faculty/dooley/rheo1.htm>[2009, July 2]
- [12] Salvendy G. Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management. 3rd ed. San Francisco, CA: Wiley-IEEE, 2001.
- [13] Madsen, D. A. Print Reading for Engineering and Manufacturing Technology. 2nd ed. Independence, KY: Cengage Learning, 2004.
- [14] อรทัย ลีลาพจนานพร. Fourier Transform Infrared Spectrometry [Online]. 2546. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-article/files/lpd_10_2546_ft-ir.pdf [12 มีนาคม 2552]
- [15] Griffiths, P. R.; and De Haseths, J. A. Fourier Transform Infrared Spectrometry . 2nd ed. San Francisco, CA: Wiley-Interscience, 2007.
- [16] Ilwaine, P. M. Mass Spectrometry and Infrared Spectroscopy as Instrumental Methods of Analysis [Online].2003. Available from: <http://www.lcc.ukf.net/Chem14/IR&Mass Spec.html> [2008, April 9]
- [17] กฤษณา ปิวสาร และคณะ. การวิเคราะห์พอลิเมอร์[Online]. 2549.แหล่งที่มา: <http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry> [12 มีนาคม 2553]
- [18] Trathnigg, B. Size exclusion chromatography. In H. Pasch; and B. Trathnigg (eds.), HPLC of Polymers, p. 41. New York: Springer, 1999.
- [19] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. การวิเคราะห์ลักษณะของพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์รามคำแหง, 2545.
- [20] รัชนา ศิริสุข. เอกสารประกอบการสอนวิชากระบวนการผลิตพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [21] จุฑาทิพย์ นิลคูหา และคณะ, การวิเคราะห์พอลิเมอร์ [Online]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry> [12 มีนาคม 2553]

- [22] เกศินี เหมวิเชียร และพิริยาธร สุวรรณมาลา. การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ [Online]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/>. [12 มีนาคม 2553]
- [23] Fleming, PTC. Differential Scanning Calorimetry & Thermo-Gravimetric analysis [Online]. Available from: <http://www.flemingptc.co.uk> [2009, April 9]
- [24] Anasys thermal methods consultancy. Introduction to Dynamic Mechanical Analysis(1)[Online]. Available from: <http://www.anasys.co.uk/library/dma1.htm> [2009, April 9]
- [25] Triton Technology Ltd. What is Dynamic Mechanical Analysis, DMA[Online]. Available from: http://www.triton-technology.co.uk/pdf/TTInf_DMA.pdf [2009, April 9]
- [26] MaterialsSolutions. ThermalAnalysis[Online].2006.Available from: <http://materials.npl.co.uk/matsol/thermal.html>[2009, April 9]
- [27] พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์. การวัดค่าความแข็งของวัสดุ [Online]. 2551. แหล่งที่มา: http://www.thaiscience.com/lab_vol/p22/hardness.asp. [4 มีนาคม 2553]
- [28] จินตมัย สุวรรณประทีป. การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:บริษัทพิมพ์ดีการพิมพ์ จำกัด, 2547.
- [29] วีระชัย ลามอ. ความแข็ง(hardness) [Online]. 2550. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/pep_5_2550_hardness.pdf (9 กุมภาพันธ์ 2553)
- [30] Kopeliovich, D. Shore (Durometer) Hardness Test[Online].2004. Available from: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore_durometer_hardness_test [2009, April]
- [31] พงษ์ธร แซ่คูย, และชาคริต สิริสิงห์. ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค), 2550.
- [32] ASTM Standard D 2240. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2005.

- [33] Vaidya, U.R.; and Nadkarni, V.M. Unsaturated polyester resins from poly(ethylene terephthalate) Waste. 1. Synthesis and characterization. Industrial & Engineering Chemistry Research 26 (1987): 194-198.
- [34] Vaidya, U.R.; and Nadkarni, V.M. Polyester polyols for polyurethanes from PET waste: kinetics of polycondensation. Journal of Applied Polymer Science 35 (1988): 775-785.
- [35] Vaidya, U.R.; and Nadkarni, V.M. Polyester polyols from glycolized PET waste: Effect of glycol type on kinetics of polyesterification. Journal of Applied Polymer Science 38 (1989): 1179-1190.
- [36] Baliga, S.; and Wong, T.W. Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) recycling from post-consumer soft-drink bottles. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry 27 (1989): 2071-2082.
- [37] Lee, S.-C.; Sze, Y.-W.; and Lin, C.-C. Polyurethanes synthesized from polyester polyols derived from PET waste. II. Thermal properties. Journal of Applied Polymer Science 52 (1994): 869-873.
- [38] Lee, S.-C.; Sze, Y.-W.; and Lin, C.-C. Polyurethanes synthesized from polyester polyols derived from PET waste. III. Mechanical Properties. Journal of Applied Polymer Science 55 (1995): 1271-1273.
- [39] Sanchez-Adsuar, M.S.; Papon, E.; and Villenave, J-J. Influence of the prepolymerization on the properties of thermoplastic polyurethane elastomers. Part I. Prepolymer characterization. Journal of Applied Polymer Science 76 (2000): 1596-1601.
- [40] Sanchez-Adsuar, M.S.; Papon, E.; and Villenave, J-J. Influence of the Prepolymerization on the Properties of Thermoplastic Polyurethane Elastomers. Part II. Relationship between the Prepolymer and Polyurethane Properties. Journal of Applied Polymer Science 76 (2000): 1602-1607.

- [41] Sanchez-Adsuar, M.S.; Papon, E.; and Villenave, J-J. Rheological characterization of thermoplastic polyurethane elastomers. Polymer International 49 (2000): 591598.
- [42] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาการตรวจสอบและกาวิเคราะห์พอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร:ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547
- [43] Patel, M. R.; Patel, J. V.; and Sinha, V. K. Polymeric precursors from PET waste and their application in polyurethane coatings. Polymer Degradation and Stability 90 (2005): 111-115.
- [45] Pardal, F.; and Tersac, G. Comparative reactivity of glycols in PET glycolysis. Polymer Degradation and Stability 91 (2006): 2567-2578.
- [46] Young, R. J.; and Lovell, R. A. Introduction to Polymers. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1991.
- [47] Hepburn, C. Polyurethane Elastomers . 2nd ed. London: Elsevir Applied Science, 1991.
- [48] Chuayjuljit, S.; Pimpan, V.; Saebae, P.; Thitsatarn, R.; and Surachaikasem, R. Synthesis of waterborne polyurethane coatings using a surfactant derived from recycling of waste PET bottles. Journal of Scientific Research Chulalongkorn University. 28 (2003): 39-50.
- [49] Murayama, T. Dynamic Analysis of Polymeric Material . New York: Elsevier Scienific,1978.
- [50] Nickles, D.E.; and Farahat, M.S. New motivation for the depolymerization products derived from poly(ethylene terephthalate) (PET) waste: A review. Macromolecular Materials and Engineering 290 (2005): 13-30.
- [51] Potiyaraj, P.; Klubdee, K.; and Limpiti, T. Physical properties of unsaturated polyester resin from glycolyzed PET fabrics. Journal of Applied Polymer Science 104 (2007): 2536- 2541.

- [52] Mecit, O.; and Akar, A. Synthesis of urethane oil varnishes from waste poly(ethylene terephthalate). Macromolecular Materials and Engineering 286 (2001): 513-515.
- [53] 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.
- [54] Vaidya, U.R.; and Nadkarni, V.M. Unsaturated polyesters from PET waste: Kinetics of polycondensation. Journal of Applied Polymer Science 34 (1987): 235-245.
- [55] Baliga, S.; and Wong, W.T. Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) recycled from post-consumer soft-drink bottles. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry 27 (1989): 2071-2082.
- [56] Pardal, F.; and Tersac, G. Comparative reactivity of glycols in PET glycolysis. Polymer Degradation and Stability 91 (2006) 2567-2578.
- [57] Pingale, N.D.; and Shukla, S.R. Microwave assisted ecofriendly recycling of poly(ethylene terephthalate) bottle waste. European Polymer Journal 44 (2008): 4151-4156.
- [58] Li, K.; Song, X.; and Zhang D. Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) with Catalyst under microwave radiation. Journal of Applied Polymer Science 109 (2008): 1298-1301.
- [59] ศิริประภา เจริญภักดี .การสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจากขยะพืด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยี สิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [60] Petrovic, Z. S. Polyurethane. In H. R. Kricheldorf; O. Nuyken; and G. Swift (eds.), Handbook of Polymer Synthesis, pp. 503-539. London: CRC Press,

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 อัตราการย่อยสลายพีตด้วยไดเอทิลีนไกลคอล

time	(ZnAcetate)	(Na ₂ CO ₃)	(NaHCO ₃)	(CaCl)	(NaCl)	none
2	89.23	93.18	91.51	98.49	98.67	99
4	68.87	73.94	71.34	97.1	97.43	99
6	34.92	41.27	36.58	96.39	96.68	99
8	13.92	19.18	14.45	95.73	95.37	98
10	0	5.84	0	95.45	94.96	98
12	0	0	0	95	94.24	98
14	0	0	0	94.93	93.64	98

ตาราง ก-2 ร้อยละผลได้ของพีตที่ถูกย่อยสลายที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

Time	(ZnAcetate)	(Na ₂ CO ₃)	(NaHCO ₃)
10	52.67810712	66.35465419	69.474779
12	55.85023401	74.57098284	76.339054
14	97.97191888	94.59178367	95.839834
16	77.32709308	64.7425897	54.914197
18	Gel	46.38585543	32.553302
20	0	33.07332293	0

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ค่าความแข็งแบบชอร์เอของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ได้เตรียมได้

ชนิดของเซนเอกซ์ เทนเดอร์ที่ห้	ตัวเร่งที่ใช้ในไกล โคไลซีโพรดักส์	ซิงค์แอซีเทต	โซเดียมไบ คาร์บอเนต	โซเดียม คาร์บอเนต
ไม่เติมเซนเอกซ์เทนเดอร์		87	75	-
น้ำมันละหุ่ง		90	-	-
PEG (Mw=1000)		74	-	-
PEG (Mw=4000)		69	-	-
PEG (Mw=6000)		56	49	-

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงานพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอ์ชนิดต่างๆ

ชิ้นงาน	ชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอ์ที่ใช้	ผลการทดสอบความต้านแรงดึง (MPa)			ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	-	17.553	17.638	16.983	17.391
2	Castor oil	3.316	3.784	3.908	3.669
3	PEG(Mw=1000)	7.045	7.244	7.137	7.142
4	PEG(Mw=4000)	18.284	19.015	18.573	18.624
5	PEG(Mw=6000)	21.102	19.945	20.846	20.637
6	โซเดียมไบคาร์บอเนต(ไม่เติมเซนเอกซ์เทนเดอ์)	22.793	19.945	24.461	23.737

ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบการยึดตัวที่จุดขาดของชิ้นงานพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เซนเอกซ์เทเนอร์ชนิดต่างๆ

ชิ้นงาน	ชนิดของเซนเอกซ์เทเนอร์ที่ใช้	ผลการทดสอบการยึดตัวที่จุดขาด(%)			ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	-	15.870	14.311	18.031	16.071
2	Castor oil	2.311	1.126	1.979	1.805
3	PEG(Mw=1000)	37.859	35.728	37.659	37.082
4	PEG(Mw=4000)	46.850	49.731	45.829	47.470
5	PEG(Mw=6000)	49.829	49.461	50.307	49.866
6	โซเดียมไบคาร์บอเนต(ไม่เติมเซนเอกซ์เทเนอร์)	97.842	103.64	116.01	105.831

ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นงานพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอ์ชนิดต่างๆ

ชิ้นงาน	ชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอ์ที่ใช้	ผลการทดสอบค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (MPa)			ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	-	639.669	677.326	665.224	660.740
2	Castor oil	253.876	198.236	205.965	219.359
3	PEG(Mw=1000)	652.755	609.078	604.256	622.030
4	PEG(Mw=4000)	496.809	509.078	508.318	504.735
5	PEG(Mw=6000)	378.667	394.916	390.536	388.040
6	โซเดียมไบคาร์บอเนต(ไม่เติมเซนเอกซ์เทนเดอ์)	490.536	508.318	519.343	506.066

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพร้อมภูมิ พันธุ์โรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม พ.ศ.2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 จากนั้น เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา พ.ศ.2551 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา พ.ศ.2552 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี