

การเตรียมโหมพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้ว
ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

นางสาวชุตติมา เขี่ยมสอาด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF POLYURETHANE FOAMS FROM GLYCOLYZED PRODUCTS OF USED PET
BOTTLES UNDER MICROWAVE

Miss Chutima Aiemsart

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

ชุตินมา เขี่ยมสะอาด : การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวด
 PET ใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ. (PREPARATION OF POLYURETHANE FOAMS
 FROM GLYCOLYZED PRODUCTS OF USED PET BOTTLES UNDER
 MICROWAVE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, 97 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์
 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือ PET ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยนำขวด PET มาย่อยสลายด้วย
 ไดเอทิลีนไกลคอล ที่อัตราส่วนระหว่าง PET ต่อไกลคอล 1:4 ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ ในภาวะที่มี
 ซิงค์แอซีเตต โซเดียมไบคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปริมาณร้อยละ
 0.5 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลาย PET พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด
 สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการไกลโคไลซ์ PET ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ
 จากนั้นนำไกลโคไลซ์พรดักส์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนตเพื่อสังเคราะห์
 เป็นโฟมพอลิยูรีเทนร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล
 4,000 และ 6,000 เพื่อศึกษาผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่มีต่อโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้ เมื่อนำโฟม
 พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้
 ในขั้นตอนการไกลโคไลซ์และชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนมีผล
 ต่อสมบัติและสัญญาณวิทยาของโฟม โดยโฟมที่เตรียมได้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลล์ปิด การ
 กระจายตัวของเซลล์ที่ใช้ซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สม่ำเสมอเท่าการกระจายตัวของเซลล์
 ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต แต่โฟมที่เตรียมจากไกลโคไลซ์พรดักส์ที่ใช้
 ซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการคืนตัวที่ดีกว่าและมีความหนาแน่นสูงกว่า
 ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่การใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนัก
 โมเลกุล 4,000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ให้โฟมที่มีความสม่ำเสมอของเซลล์โฟมดีกว่าการใช้
 พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6,000 อีกทั้งยังให้โฟมที่มีความหนาแน่นสูงกว่า
 มีการคืนตัวที่ดีกว่า และมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันที่สูงกว่า แต่มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า
 เล็กน้อย

ภาควิชา..... วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา..... วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา..... 2553.....

#5272283723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : PET / GLYCOLYSIS / POLYURETHANE FOAMS / MICROWAVE / RECYCLING
 CHUTIMA AIEMSA-ART : PREPARATION OF POLYURETHANE FOAMS FROM
 GLYCOLYZED PRODUCTS OF USED PET BOTTLES UNDER MICROWAVE.
 THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 97 pp.

In this research, polyurethane foams were prepared from microwave-assisted glycolyzed products of poly(ethylene terephthalate) or PET. Post-consumer PET bottles were depolymerized with diethylene glycol at PET:glycol molar ratio of 1:4, under microwave energy using zinc acetate, sodium carbonate and sodium bicarbonate as a catalyst at 0.5% by weight. It was found that all catalysts were able to be used effectively to complete the glycolysis. The glycolyzed products were reacted with diphenylmethane diisocyanate in order to synthesize polyurethane foam in the presence of poly(ethylene glycol) of molecular weight of 4,000 and 6,000 as a chain extender. It was found that the type of catalyst and chain extender affected properties and morphology of the prepared foam. The prepared foam contained mostly closed cells. It was found that polyurethane foam prepared from glycolyzed products using sodium carbonate and sodium bicarbonate as a catalyst had more uniform cells than using zinc acetate. However, foam prepared from glycolyzed products which used zinc acetate possessed better compression set and higher density. The degradation temperatures were similar for all foams. When poly(ethylene glycol) of the molecular weight of 4,000 was used, it gave better foam uniformity, higher density, better compression set and higher glass transition temperature while the degradation temperature were slightly lower.

Department:..... Materials Science..... Student's Signature.....
 Field of Study: ... Applied Polymer Science and Textile Technology ... Advisor's Signature.....
 Academic Year: 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความช่วยเหลือ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์จากบุคคลหลายท่าน อีกทั้งยังได้รับแนวทางและคำแนะนำทางวิชาการในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ หลายๆ ท่านเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนาม ดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โภธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด อีกทั้งยังสนับสนุนทุนในการวิจัย และการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีภูถักกิจ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์เสาวรจรรย์ ช่วยจุลจิตร์ รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี และ รองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ต่างๆ อันมีค่าแก่ผู้วิจัยเสมอมา
3. ศูนย์ด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูงที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการศึกษาและทุนวิจัย
4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบุคลากรทุกท่าน
5. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. บริษัท สยามเคมีคอล อินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการทำวิจัย
7. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตภาควิชาวัสดุศาสตร์ ทุกคนที่ให้การช่วยเหลือ สนับสนุนและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วาสารปริทรรศน์.....	4
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate , PET).....	4
2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	5
2.1.2 การสังเคราะห์เพ็ต.....	6
2.1.3 ลักษณะโครงสร้างและสมบัติของเพ็ต.....	8
2.1.4 การขึ้นรูป.....	9
2.1.5 การใช้งาน.....	9
2.2 การรีไซเคิลพลาสติก (plastic recycling).....	10
2.2.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling).....	11
2.2.2 การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling).....	11
2.3 การรีไซเคิลเพ็ต.....	11
2.3.1 การรีไซเคิลเพ็ตด้วยกระบวนการทางกายภาพ.....	12
2.3.2 การรีไซเคิลเพ็ตด้วยกระบวนการทางเคมี.....	13
2.4 ไมโครเวฟ (microwave).....	15
2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ (microwave radiation)	15
2.4.2 กลไกการทำงานของเตาไมโครเวฟ.....	15
2.4.3 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ.....	16
2.5 ความหมายหรือคำนิยามของโฟม.....	18
2.6 การจำแนกประเภทของโฟม.....	19
2.6.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ.....	19

บทที่	หน้า
2.6.2 จำแนกตามลักษณะของเซลล์.....	20
2.6.3 จำแนกตามประเภทของพลาสติก.....	21
2.7 กระบวนการเกิดโฟม (foam formation).....	21
2.8 โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam).....	24
2.8.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน.....	24
2.8.2 การนำไปใช้งานของโฟมพอลิยูรีเทน.....	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3. วิธีการทดลอง.....	37
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	37
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	37
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	37
3.3.1 ขั้นตอนการย่อยสลายขวดพีตด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ.....	38
3.3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์โฟม.....	38
3.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ.....	38
3.4 วิธีการทดลอง.....	39
3.4.1 การย่อยสลายพีตด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ.....	39
3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์.....	41
3.4.3 การสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์.....	43
3.4.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ของโฟมพอลิยูรีเทน.....	44
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	47
4.1 การย่อยสลายขวดพีตด้วยกระบวนการไกลโคไลซ์.....	47
4.1.1 ลักษณะของไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	47
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์.....	48
4.1.3 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ของไกลโคไลซ์ด้วยเทคนิคเจลเพอเมอชันโครมาโทกราฟี (GPC)	51
4.1.4 การหาค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	52
4.2 การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์.....	53
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้.....	53
4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้.....	54

บทที่	
4.2.3 สมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิยูรีเทน.....	56
4.2.4 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิยูรีเทน.....	61
4.2.5 ตรวจสอบความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทน.....	64
4.2.6 ความสามารถในการคืนตัวของโฟมพอลิยูรีเทน.....	65
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก.....	73
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	80
ภาคผนวก จ.....	84
ภาคผนวก ฉ.....	88
ภาคผนวก ช.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ลักษณะของพอลิออลที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนประเภทต่าง..... 28
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างพอลิออลทางการค้าที่นิยมใช้..... 29
ตารางที่ 2.3	ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เชียรีเอมีน..... 31
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนของไกลโคไลซ์โพรดักส์ พอลิเมอริกเอ็มดีไอ น้ำและเซนเอกซ์เทนเดอร์ ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน..... 43
ตารางที่ 4.1	เลขคลื่น (Wave number) ของพีคสำคัญต่างๆ กับหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของ ไกลโคไลซ์โพรดักส์..... 49
ตารางที่ 4.2	น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ จากการไกลโคไลซ์เพ็ต..... 52
ตารางที่ 4.3	ค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์เพ็ตด้วยตัวเร่ง ปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ..... 53
ตารางที่ 4.4	ลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้..... 54
ตารางที่ 4.5	ตำแหน่งของสเปกตรัมที่พบในโครงสร้างของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ ซึ่งมี พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 และ 6000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์..... 56
ตารางที่ 4.6	อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆ ที่เตรียมได้จากไกลโคไลซ์ โพรดักส์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันในการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ต..... 60

สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของเพ็ต.....	4
รูปที่ 2.2	การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 2.3	สัณฐานโครงสร้าง (structure configuration) ของโฟม.....	20
รูปที่ 2.4	โครงสร้างเรโซแนนซ์ของหมู่ไอโซไซยาเนต.....	24
รูปที่ 2.5	โครงสร้างทางเคมีของ 2,4-Toluene diisocyanate และ 2,6-Toluene diisocyanate.....	26
รูปที่ 2.6	โครงสร้างทางเคมีของ 4,4-MDI และ 2,4-MDI.....	27
รูปที่ 2.7	กระบวนการผลิตพอลิเมอริก MDI และ MDI บริสุทธิ์.....	27
รูปที่ 3.1	เครื่องบดละเอียด.....	39
รูปที่ 3.2	ตู้อบไมโครเวฟที่ดัดแปลงเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	40
รูปที่ 3.3	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโทรมิเตอร์.....	41
รูปที่ 3.4	เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล.....	42
รูปที่ 3.5	เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์.....	42
รูปที่ 3.6	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	44
รูปที่ 3.7	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงคาลอริมิเตอร์.....	45
รูปที่ 3.8	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	45
รูปที่ 3.9	เครื่องมือทดสอบความสามารถในการคืนตัว.....	46
รูปที่ 4.1	ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้วด้วยไดเอทิลีนไกลคอลล ในภาวะที่มี (ก) ซิงค์แอสีเตต (ข) โซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ค) โซเดียมคาร์บอเนตเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	48
รูปที่ 4.2	FT-IR สเปกตรัมของเพ็ตที่ถูกไกลโคไลซ์ด้วยไดเอทิลีนไกลคอลล.....	49
รูปที่ 4.3	FT-IR สเปกตรัมของขวดเพ็ต.....	50
รูปที่ 4.4	GPC โครมาโทแกรมของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์เพ็ต.....	51
รูปที่ 4.5	GPC โครมาโทแกรมของไดเอทิลีนไกลคอลล.....	51
รูปที่ 4.6	FT-IR สเปกตรัมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวดเพ็ตที่มี พอลิเอทิลีนไกลคอลลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์.....	55

รูปที่ 4.7	FT-IR สเปกตรัมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวดพีตที่มี พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเซอร์เทเนอร์	55
รูปที่ 4.8	TGA เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวดพีตที่มี พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเซอร์เทเนอร์	57
รูปที่ 4.9	TGA เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวดพีตที่มี พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเซอร์เทเนอร์	58
รูปที่ 4.10	DSC เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวดพีตที่มี พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเซอร์เทเนอร์	59
รูปที่ 4.11	DSC เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ของขวดพีตที่มี พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเซอร์เทเนอร์	60
รูปที่ 4.12	สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Zn) - PEG 4000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า	61
รูปที่ 4.13	สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Zn) - PEG 6000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า	62
รูปที่ 4.14	สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (NaHCO ₃) - PEG 4000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า	62
รูปที่ 4.15	สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (NaHCO ₃) - PEG 6000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า	63
รูปที่ 4.16	สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 4000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า	63
รูปที่ 4.17	สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 6000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า	64
รูปที่ 4.18	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมที่สูตรต่างๆ	65
รูปที่ 4.19	ความสามารถในการคืนตัวของโฟมที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเซอร์เทเนอร์	65
รูปที่ 4.20	ความสามารถในการคืนตัวของโฟมที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเซอร์เทเนอร์	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มุมเหตุจูงใจและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนวัสดุจากธรรมชาติ และ/หรือวัสดุประเภทอื่น เนื่องจากวัสดุธรรมชาตินั้นวันจะหายากและมีแนวโน้มที่จะหมดไป อีกทั้งสมบัติบางประการไม่ตอบสนองต่อการใช้งานในบางประเภท เช่น มีความแข็งแรงต่ำ ไม่คงทน ต่อสภาพแวดล้อม และมีน้ำหนักมาก โดยเหตุนี้พลาสติกจึงเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากยิ่งขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านพลาสติกมีความก้าวหน้าทำให้พลาสติกมีข้อดีหรือสมบัติสอดคล้องกับลักษณะของการใช้งานเหนือวัสดุประเภทอื่นหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศธรรมชาติได้ดีกว่าวัสดุจากธรรมชาติ หรือโลหะ มีความทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าเซรามิก และแก้ว อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่หลากหลาย จึงนิยมนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย ได้แก่ ภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ชิ้นส่วนรถยนต์ ของเล่นเด็ก ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ PET เป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอร์ชนิดหนึ่งที่ยิมนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย ทั้งเส้นใย ขวดน้ำดื่ม และขวดน้ำอัดลม ด้วยสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความใส ความทนต่อแรงกระแทก ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม และมีน้ำหนักเบา รวมทั้งไม่เป็นพิษต่อผู้บริโภค จึงทำให้ PET เป็นวัสดุที่นิยมนำไปใช้งานในการอุปโภคบริโภคสูงขึ้นเรื่อยๆ ด้วยปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว จึงส่งผลให้ในปัจจุบันเกิดขยะซึ่งมี PET เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นขยะจากการบริโภคหรือเศษที่เหลือจากกระบวนการผลิต ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกสะสมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีอาจหลีกเลี่ยงได้ [1] ด้วยเหตุนี้งานวิจัยต่างๆ จึงได้มุ่งเน้นพัฒนาวิธีการรีไซเคิล PET ทั้งทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะเหล่านี้ การรีไซเคิลทางกายภาพเป็นการนำขยะพลาสติก ทั้งจากกระบวนการผลิตและจากการอุปโภคบริโภค มาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้ง โดยอาจจะนำไปผสมกับวัตถุดิบบริสุทธิ์หรือไม่ก็ได้ แล้วนำไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดิมหรือเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่อีกครั้ง ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจำนวนมากจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี อย่างไรก็ตามการรีไซเคิลด้วยวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในเรื่องคุณภาพเนื่องจาก

มักมีการแตกสลาย (degradation) ของพอลิเมอร์ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงหรือมีอายุการใช้งานที่ยาวนานได้ ส่วนการรีไซเคิลทางเคมี คือ การทำให้ขยะพลาสติกเกิดการสลายตัวทางเคมีเพื่อให้ได้มอนอเมอร์หรือสารเคมีพื้นฐานต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์และสารเคมีชนิดอื่นๆ ต่อไป หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง นั่นคือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีกลายเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ [2]

การรีไซเคิลที่เกิดด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นการย่อยสลายพีทด้วยปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งกระบวนการเคมีที่ใช้ในการรีไซเคิลนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น ไกลโคไลซิส (glycolysis) อะมิโนไลซิส (aminolysis) และไฮโดรไลซิส (hydrolysis) [3] เป็นต้น กระบวนการย่อยสลายพีทด้วยการไกลโคไลซิสเป็นวิธีที่มีการศึกษากันมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ยุ่งยากนัก สามารถย่อยสลายพีทโดยไม่ต้องใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ไม่มีสารที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนในระบบและผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปใช้งานหรือสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นได้หลากหลาย เช่น พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ยูรีเทนออยล์ พลาสติกไซเซออร์สำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งหรือชนิดยืดหยุ่น เป็นต้น [4]

โฟมพอลิยูรีเทนเป็นหนึ่งในวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลายทั้งในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากโฟมพอลิยูรีเทนเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี และยังสามารถทำเป็นรูปร่างต่างๆ ตามต้องการได้ง่าย จึงทำให้โฟมพอลิยูรีเทนถูกนำไปผลิตเป็นวัสดุใช้งานในด้านต่างๆ ได้หลากหลาย เช่น วัสดุกันกระแทก พื้นรองเท้า เบาะรองนั่ง ฉนวนความร้อนและวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น โฟมพอลิยูรีเทนสามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานาตกับไดออล และอาจใช้สารประเภทเซนเอกซ์เทนเดอร์ (chain extender) ร่วมด้วย

โดยทั่วไปการย่อยสลายพีทด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสนั้น แม้จะเป็นวิธีที่ได้สารใหม่ซึ่งมีประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อได้อย่างหลากหลาย แต่เวลาและพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างยาวนาน กล่าวคือ โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนกับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 190 – 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลาราว 4 – 8 ชั่วโมง [5] ทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและพลังงาน จึงเป็นข้อจำกัดสำคัญของการนำกระบวนการดังกล่าวไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำไมโครเวฟมาเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนทดแทนการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม เนื่องจากประสิทธิภาพในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นสูงกว่าทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในตู้อบไมโครเวฟ ซึ่งนอกจากช่วยประหยัดพลังงานแล้วยังช่วยย่นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลงไปได้อีกมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ
2. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะนำขวดเพ็ตใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยไดเอทิลีนไกลคอล โดยปฏิกิริยาไกลโคลิซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิงก์แอซีเทต ไฮเดียมไบคาร์บอเนต และไฮเดียมคาร์บอเนต จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ (glycolized products) มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน ร่วมกับสารตั้งต้นประเภทไดไอโซไซยาเนต คือ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (4,4 diphenylmethane diisocyanate, MDI) ในระบบที่มีเซนเอกซ์เทนเดอร์ร่วมอยู่ด้วยแล้วศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา และเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และโครงสร้างเซลล์ของโฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

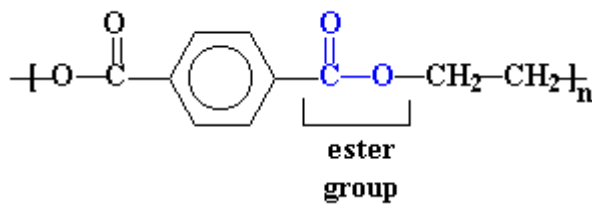
ได้โฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ตใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) [6]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ เพ็ต (PET) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์แบบเส้นชนิดอิมิตัวที่มีความสำคัญ เนื่องจากสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย เพ็ตมีโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพ็ตถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1941 โดยวินฟิลด์ (Whinfield) และดิกสัน (Dickson) แห่งบริษัท The Calico Printers Association Ltd. ประเทศอังกฤษ ต่อมาได้ขายลิขสิทธิ์ให้กับบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ประเทศอังกฤษ และบริษัท Dupont ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้พัฒนาต่อมาจนสามารถผลิตเส้นใยสังเคราะห์ออกสู่ตลาดภายใต้ชื่อเรียกทางการค้าว่า Dacron® และ Terylene® ดังนั้น คนส่วนใหญ่จะรู้จัก เพ็ต ครั้งแรกในรูปของเส้นใยที่เรียกว่า “เส้นใยพอลิเอสเทอร์”



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพ็ต

การพัฒนาเพ็ตเพื่อใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1970 ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเริ่มจากการที่บริษัทผู้ผลิตน้ำอัดลมมีนโยบายทางการตลาดที่ต้องการเพิ่มขนาดบรรจุภัณฑ์จาก 1 ลิตร เป็น 2 ลิตร แต่การใช้แก้วเป็นบรรจุภัณฑ์นั้น จะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งมีอัตราการแตกสูงมาก ทำให้ผลกำไรลดลง นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้วและอะลูมิเนียมนั้นต้องใช้พลังงานในการผลิตสูง ดังนั้นจึงเป็นจุดเริ่มต้นให้อุตสาหกรรมน้ำอัดลมหันมาแก้ปัญหาด้วยการใช้ขวดพลาสติกที่ผลิตมาจากเพ็ตแทน โดยทำเป็นขวดด้วยกระบวนการเป่า ยืด เนื่องจากใช้พลังงานในการผลิตที่น้อยกว่า ซึ่งบรรจุภัณฑ์จากเพ็ตได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็ว และมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีสมบัติเด่น ดังนี้

- 1) มีความทนต่อแรงกระแทกและการตกกระทบ (drop impact) ได้ดีจึงปลอดภัยในการใช้งาน การรับน้ำหนักด้านบนสำหรับเก็บ บรรจุและปิดฝา
- 2) มีความใส

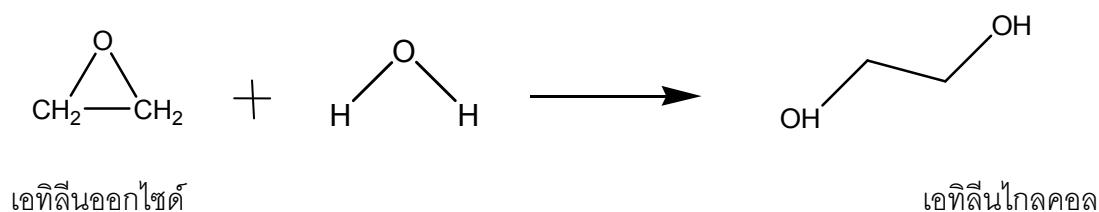
- 3) น้ำหนักเบาเพียงหนึ่งในสิบของขวดแก้ว ทำให้ประหยัดค่าขนส่งและลดภาระการเคลื่อนย้าย
- 4) สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีแม้ที่ความดันสูง
- 5) ปลอดภัยต่ออาหารสัมผัสและไม่ทำให้รสชาติอาหารหรือเครื่องดื่มเสียไป

จากสมบัติของพีทที่เหนือกว่าพลาสติกชนิดอื่นๆ ในแง่ดังกล่าว ทำให้มีการนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อย่างกว้างขวาง เช่น ผลิตขวดน้ำมันพืช ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำแร่ บรรจุภัณฑ์อาหาร ยา และสารเคมี เป็นต้น เมื่อปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ในปัจจุบันเกิดขยะซึ่งมีองค์ประกอบพีทเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นขยะจากการบริโภคหรือเศษที่เหลือจากกระบวนการผลิต ดังนั้น การนำพีทมาแปรใช้ใหม่หรือการรีไซเคิล จึงกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากการลดปริมาณขยะพลาสติกและใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า

2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ [7]

- 1) เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG)

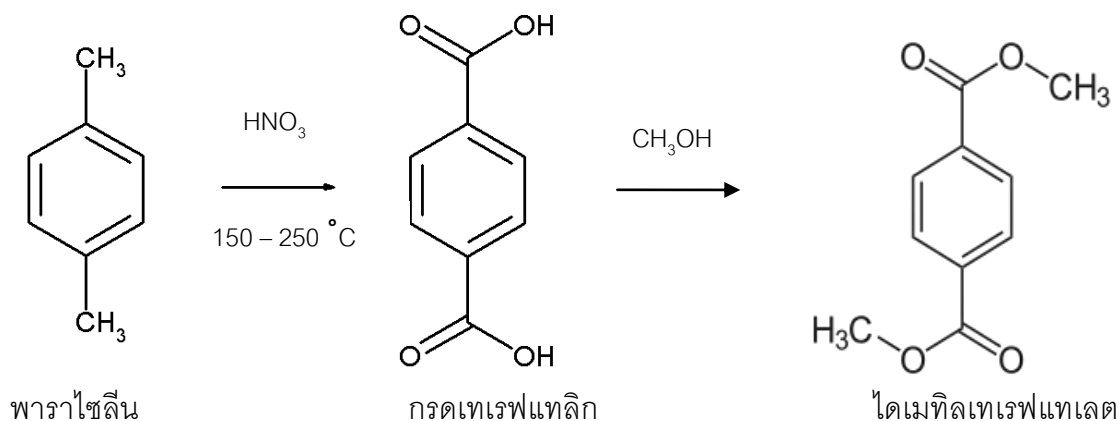
เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเติมน้ำให้กับเอทิลีนออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บรรยากาศ ดังสมการ



เอทิลีนไกลคอล เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีจุดเดือดประมาณ 197 องศาเซลเซียส

- 2) ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate, DMT)

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

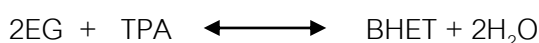


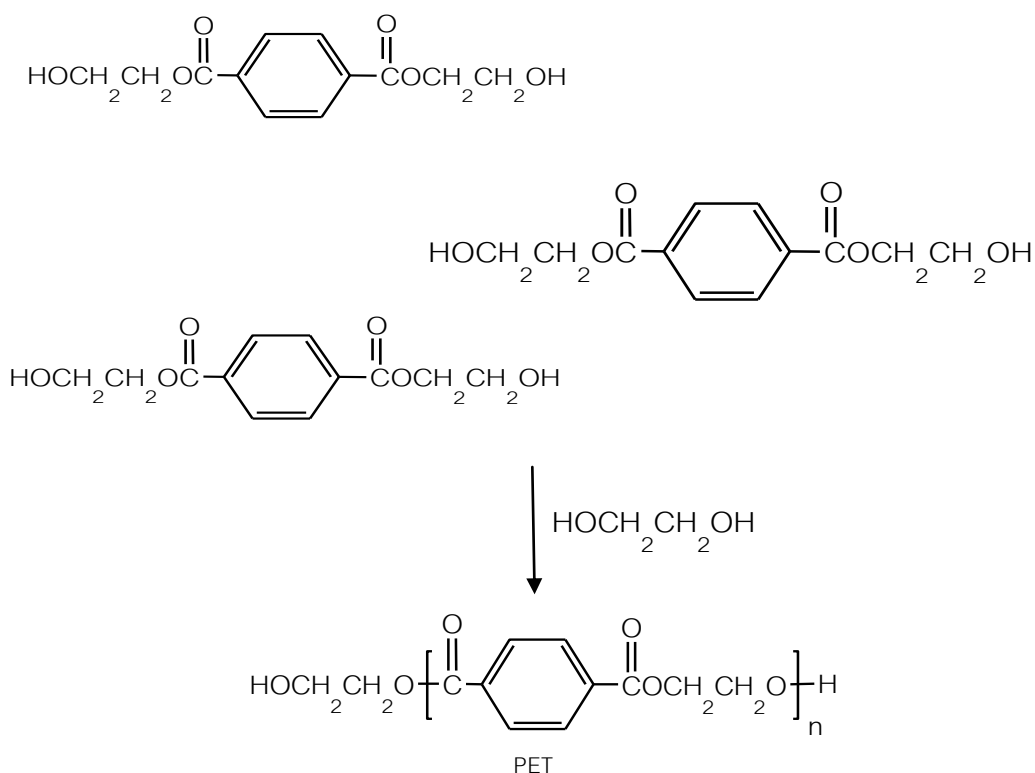
ไดเมทิลเทเรฟทาเลตมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีจุดเดือด 142 องศาเซลเซียส

2.1.2 การสังเคราะห์พีที

พีทีสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดแอซิด (di-acid) และ ไดแอลกอฮอล์ (di-alcohol) โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง (direct esterification) ระหว่างกรดเทเรฟทาลิก และเอทิลีนไกลคอล หรือจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) ระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลตและเอทิลีนไกลคอล ซึ่งอาจเรียกว่า “ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน” (transesterification) ก็ได้ ซึ่งในทางอุตสาหกรรมนิยมสังเคราะห์จากปฏิกิริยาหลังมากกว่า เนื่องจากไดเมทิลเทเรฟทาเลตทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายโดยการกลั่นแบบลดความดันหรือการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ดีในเอทิลีนไกลคอล ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เกิดได้ดีในระยะเริ่มแรกของปฏิกิริยา ในทางตรงข้ามกรดเทเรฟทาลิกทำให้บริสุทธิ์ได้ยากและมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายทั่วไปต่ำ ซึ่งไม่ว่าจะใช้ปฏิกิริยาแบบใด การสังเคราะห์พีทีจะแบ่งปฏิกิริยาออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 : เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดเทเรฟทาลิกกับเอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินไป (1:1.5 molar) ที่อุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส ความดัน 4 บรรยากาศ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนนี้จะเป็นไดเอสเทอร์ (di-ester) คือ บิส-2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต [bis(2-hydroxyethyl)terephthalate, BHET] และมีน้ำเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยา ดังสมการต่อไปนี้





เนื่องจากปฏิกิริยานี้สามารถย้อนกลับได้จึงต้องกำจัดเอทิลีนไกลคอลออกจากระบบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อนำไปใช้งานต่อไป กระบวนการในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบหลอมเหลว (melt polymerization) เพราะอุณหภูมิในขั้นตอนนี้จะสูงกว่า T_m ของพอลิเมอร์

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์เพ็ตในขั้นที่ 1 ได้แก่ เกลืออะซิเตตของโลหะ เช่น แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม โคบอลต์ หรือ แมกนีเซียม และปกติจะใช้แอนติโมนี (III) ออกไซด์ (antimony (III) oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้นที่ 2

2.1.3 ลักษณะโครงสร้างและสมบัติของเพ็ต

เพ็ต เป็นพอลิเมอร์แข็งเกร็ง ไม่มีสี มี T_g ประมาณ 67-80 องศาเซลเซียส และมี T_m 245 - 265 องศาเซลเซียส เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอ จึงสามารถเกิดผลึกได้ แต่มีอัตราการเกิดผลึกค่อนข้างช้า ถูกผลิตครั้งแรกเพื่อใช้งานเป็นเส้นใย เช่นเดียวกับไนลอน แต่มี T_m สูงกว่าไนลอนเล็กน้อย ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดผ่านสปินเนอเร็ตเข้าไปในอากาศ เส้นใยจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจึงเป็นอสัณฐานและไม่แข็งแรง แต่เมื่อนำไปดึงที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g จะทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวและความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น สุดท้ายจึงนำเส้นใยไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดึง เพื่อให้เส้นใยมีความคงรูป และเกิด

ผลึกได้มากที่สุด ซึ่งในการทำฟิล์มก็จะมีอัตราดีรีด การจัดเรียงโมเลกุลและการทำให้คงรูปเช่นเดียวกัน

เพ็ต เป็นพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพต่อแสง ความร้อนและสารเคมี จึงแทบไม่ต้องใส่สารเติมแต่งหรือสารเพิ่มเสถียรภาพใดๆ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP), และ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ดังนั้น เพ็ต จึงนับว่าเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดในการบรรจุอาหาร อีกทั้งยังเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ณ อุณหภูมิห้อง, ละลายได้เฉพาะในตัวทำละลายที่สามารถให้โปรตอนได้ เช่น สามารถละลายได้ ณ อุณหภูมิห้องในคลอริเนเท็ด ฟลูออริเนเท็ด แอซิติกแอซิด ฟีนอล และกรดไฮโดรฟลูออริก ส่วน ณ อุณหภูมิสูงจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น แอนนิโซล ไดเมทิลซัลโฟน และแอโรแมติกคีโตนไดบิวทิลฟทาเลต เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสมบัติทนกรดและด่างที่เจือจางได้ แต่จะสลายตัวได้ด้วยกรดและเบสเข้มข้น

2.1.4 การขึ้นรูป

การขึ้นรูปเพ็ต ด้วยวิธีฉีดแบบยังไม่ประสบความสำเร็จ ทั้งนี้เพราะ เพ็ต มีอัตราการผลิตค่อนข้างช้า และมี T_g สูง ผลิตรถยนต์ที่ได้จะเป็นอสัณฐาน (เรียกว่า "APET") เพราะเกิดผลึกได้จำกัดในระหว่างการเย็นตัว ชิ้นงานจะโปร่งใสและไม่แข็งแรง จึงไม่มีคุณค่าทางการค้ามากนัก ซึ่งต้องนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส จึงจะเกิดผลึกเพิ่มขึ้น แต่วิธีการนี้มีผลทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยว หดตัวและขุ่น ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการใช้สารก่อนิวเคลียส (เช่น talc, MgO, calcium, silicate และ zinc stearate) หรือใส่พลาสติกไซเซอร์ (เพื่อลด T_g) หรือใช้แม่แบบที่ร้อน (เพื่อลดอัตราการเย็นตัว)

จากการใช้เพ็ต ที่มีสารก่อนิวเคลียส และตั้งอุณหภูมิเครื่องฉีดที่ประมาณ 265 องศาเซลเซียส ฉีดเข้าไปในแม่แบบที่ร้อน 130-140 องศาเซลเซียส จะทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัว ผลิตรถยนต์ที่ได้จะมีความเป็นผลึกสูง (เรียกว่า "CPET") แต่จะขุ่นและแข็งแกร้ง สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระดับ 120 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตาม เพ็ต ก็ยังไม่เป็นที่น่าสนใจในการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบเท่าใดนัก

2.1.5 การใช้งาน

1) เส้นใยเพ็ต

ตัวอย่างของเส้นใยเพ็ต ในทางการค้าที่รู้จักกันดี ได้แก่ เส้นใยแดครอน (Dacron) ของบริษัทดูปองต์ และเส้นใยโคเดล (Kodel) ของบริษัทโกดัก เส้นใยเพ็ตเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากสมบัติการต้านทานการยับย่น (wrinkle resistance) ความสามารถในการจับจีบ (permanent pleat capability) สามารถนำไปผสมร่วมกับฝ้ายและขนสัตว์ได้

นอกจากอุตสาหกรรมสิ่งทอแล้ว สามารถนำไปเสริมแรงในยางรถยนต์ สายพานลำเลียงของ (conveyor belt) ท่อได้อีกด้วย

2) พิล์มและแผ่นเพ็ต

ตัวอย่างของฟิล์มและแผ่นเพ็ต ในทางการค้าที่รู้จักกันดี ได้แก่ ฟิล์มไมลาร์ (Mylar) ของบริษัทดูปองต์ และฟิล์มโคดาร์ (Kodak) ของบริษัทโกดัก ซึ่งจะขึ้นรูปโดยวิธีการดึง 2 ทิศทาง (biaxial oriented) การดึงเป็นการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกให้กับเพ็ต ยิ่งปริมาณการดึงมีมากเท่าไร สมบัติความทนแรงดึงก็จะสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความสามารถในการยืดดึงจะลดลง

การประยุกต์ใช้งานของฟิล์มและแผ่นเพ็ต ได้แก่ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มหด (heat-shrink film) ฟิล์มถ่ายภาพ (photographic film) แผ่นฉนวนกันไฟฟ้า (electrical insulation) ฟิล์มเคลือบตกแต่ง (decorative film laminate) เป็นต้น

3) ขวดเพ็ต

ขวดที่ผลิตจากเพ็ต นิยมนำไปทำภาชนะบรรจุน้ำอัดลม (soft drink container) ซึ่งจะถูกขึ้นรูปโดยวิธีการฉีด-เป่า (injection blow molding) หรือด้วยกระบวนการฉีดแล้วเป่ายืด (injection stretch blow molding process) ขวดที่ได้จะมีความเหนียวสามารถทนทานการตกแตก ทนทานด้านทานกลืน ราคาไม่แพง ยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้ต่ำ ดังนั้นในการบรรจุน้ำอัดลมจึงนิยมใช้ขวดที่ผลิตจากเพ็ต เพราะสามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ได้นานถึง 6 เดือน เนื่องจากสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีนั่นเอง

เพ็ตที่ใช้ทำขวดมักเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ซึ่งผลิตจากไกลคอลมากกว่าหนึ่งชนิด และ/หรือ กรดไธเบสิกมากกว่าหนึ่งชนิด ที่เรียกว่า "PETG" เช่นการใช้ isophthalic acid (IPA) เป็นมอนอเมอร์ร่วมกับ TPA และใช้ cyclohexanedimethanol (CHDH)/diethylene glycol (DEG) ร่วมกับเททรีนไกลคอล เป็นต้น มีผลทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง และมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) มากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะใสและขึ้นรูปได้ง่าย

2.2 การรีไซเคิลพลาสติก (Plastic Recycling)

การรีไซเคิลพลาสติก เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตหรือที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภทตามความหมายของ ASTM D5033-90 ดังนี้ [1-3]

1. การรีไซเคิลระดับที่หนึ่ง (primary recycling) เป็นการนำเศษพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการผลิตเดิมมาผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้งเพื่อนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เดิมหรือใกล้เคียง

2. การรีไซเคิลระดับที่สอง (secondary recycling) เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้ว มาผ่านกระบวนการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบอื่นที่แตกต่างจากการใช้งานครั้งแรก ซึ่งมักพบว่าพลาสติกชนิดอื่นปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก

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

4. การรีไซเคิลระดับที่สี่ (quaternary recycling) เป็นการนำพลังงานที่ได้จากการเผาขยะพลาสติกมาใช้

2.2.1 การรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling)

การรีไซเคิลทางกายภาพ เป็นการรีไซเคิลโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ กล่าวคือ เป็นการนำขยะพลาสติก ทั้งที่เป็นขยะจากกระบวนการผลิตและจากการบริโภคมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่อีกครั้ง โดยการนำไปผสมกับวัตถุดิบบริสุทธิ์หรือไม่ก็ได้ แล้วนำไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดิมหรือเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่อีกครั้ง ซึ่งถือเป็นการรีไซเคิลระดับที่หนึ่ง และระดับที่สองตามที่จำแนกไว้ใน ASTM D5033-90 ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี การรีไซเคิลทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ ได้แก่

1) กระบวนการรีเคลมเมชัน (reclamation process) เป็นกระบวนการที่ต้องมีการแยกขยะพลาสติกตามชนิดของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการการผลิตเป็นพลาสติกรีไซเคิล เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตอื่นๆ ต่อไป

2) กระบวนการแบบคอมมิงเกิลด์ (commingled plastics process) เป็นการนำขยะพลาสติกซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นขยะผสมไปผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เลย โดยไม่ผ่านการคัดแยกชนิดของพลาสติก

2.2.2 การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling)

การรีไซเคิลทางเคมีนั้นถูกจัดอยู่ในการรีไซเคิลระดับที่สาม ตามที่ระบุไว้ใน ASTM D5033-90 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยทำให้ขยะพลาสติกนั้นเกิดการสลายตัวทางเคมี เพื่อให้ได้มอนอเมอร์หรือสารเคมีพื้นฐานต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์และสารเคมีชนิดอื่น ๆ ต่อไป หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง นั่นคือ พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีกลายเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ โดยทั้งนี้การเกิดการสลายตัวทางเคมีดังกล่าว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการใหญ่ๆ คือ กระบวนการแบบเปียก (wet process) และกระบวนการแบบแห้ง (dry process) ซึ่งจะกล่าวถึงแต่กระบวนการแรกเท่านั้น

กระบวนการแบบเปียกเป็นกระบวนการที่ทำให้ขยะพลาสติกเกิดการสลายตัวทางเคมีด้วยปฏิกิริยากับสารเคมีซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวย่อยสลาย (degradation agent) โดยชนิดของปฏิกิริยาเคมีนั้นจะขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่นำไปใช้ในการย่อยสลายนั่นๆ เช่น น้ำ กรด แอลกอฮอล์ หรือไกลคอล เป็นต้น โดยขยะพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้นั้นต้องมีโครงสร้างและพันธะที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารย่อยสลายเหล่านั้นได้ ซึ่งส่วนมาก ได้แก่ พวกรวมๆ ยูรีเทน เอสเทอร์ อีเทอร์ และเอไมด์ นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นยังมีความเฉพาะเจาะจงอีกด้วย กล่าวคือ แม้จะใช้ตัวย่อยสลายชนิดเดียวกันแต่ถ้าใช้ย่อยสลายพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ผลลัพธ์ที่ได้ก็必将มีความแตกต่างกันไป สำหรับข้อดีของการรีไซเคิลทางเคมี คือการรีไซเคิลทางเคมี จะได้มอนอเมอร์และสารเคมีพื้นฐานต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์และสารเคมีอื่นๆ ต่อไปหรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง และสำหรับสารที่ได้นั้นจะมีความบริสุทธิ์มากซึ่งเป็นจุดเด่นของการรีไซเคิลทางเคมี นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับการรีไซเคิลขยะพลาสติกจำพวกเทอร์โมเซตซึ่งไม่สามารถใช้การรีไซเคิลแบบกายภาพได้เพราะขยะพวกนี้ไม่สามารถหลอมได้

2.3 การรีไซเคิลเพ็ด

2.3.1 การรีไซเคิลเพ็ดด้วยกระบวนการทางกายภาพ

ในการรีไซเคิลขยะเพ็ดด้วยกระบวนการทางกายภาพนั้นควรใช้กระบวนการรีเคลมเมชันเพื่อแยกขยะพลาสติกกับสิ่งเจือปนออกก่อน จากนั้นสามารถนำไปจัดการได้หลายวิธี เช่น

- 1) นำขยะเพ็ดมาหลอมแล้วนำไปขึ้นรูปและตัดให้เป็นเม็ดเพ็ดใหม่เพื่อนำเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลนี้ไปใช้ร่วมกับพลาสติกบริสุทธิ์ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้
- 2) นำขยะเพ็ดมาหลอมแล้วนำ ฉีดเป็นเส้นใยเพื่อนำ ไปผลิตเป็นเส้นใยพอลิเอสเตอร์ต่อไป

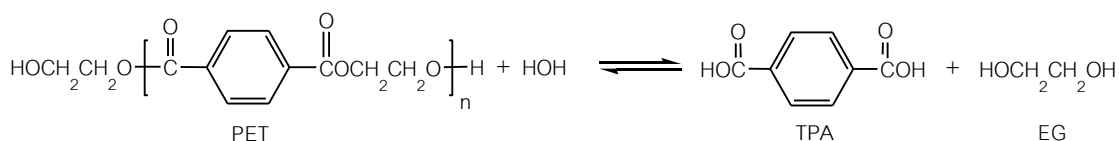
3) นำขยะพื้ตมาใช้เป็นตัวเติม (filler) ในพลาสติกบางชนิด

2.3.2 การรีไซเคิลพื้ตด้วยกระบวนการทางเคมี

ในการรีไซเคิลพื้ตด้วยกระบวนการทางเคมีนั้น เริ่มจากการย่อยสลายพื้ตด้วยกระบวนการทางเคมี จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือสารชนิดอื่นต่อไป สำหรับการย่อยสลายพื้ตทางเคมีนั้นสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับสารตั้งต้นที่ใช้ได้แก่ ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) เมทาโนลิซิส (methanolysis) ไกลโคลิซิส (glycolysis) อะมิโนลิซิส (aminolysis) แอซิโดลิซิส (acidolysis) และ แอมโมโนลิซิส (ammonolysis)

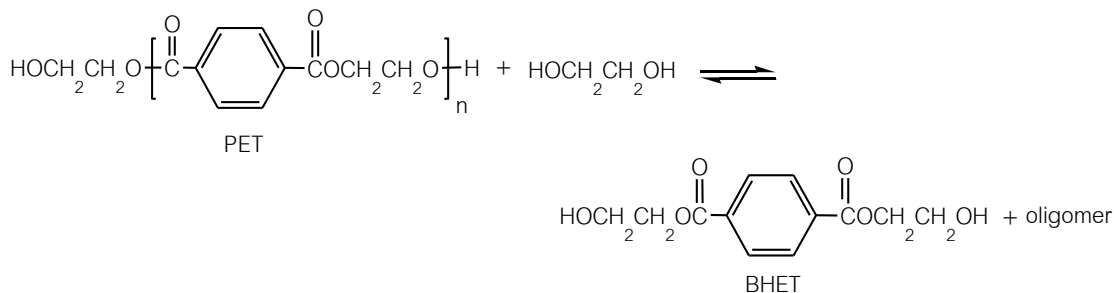
1) ปฏิริยาไฮโดลิซิส (hydrolysis)

ปฏิริยาไฮโดลิซิสจะใช้น้ำเป็นสารย่อยสลายโดยใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิริยาบางชนิดหรือทำให้เกิดปฏิริยาในภาวะที่ค่อนข้างรุนแรง (ใช้อุณหภูมิและความดันสูง) ซึ่งถ้าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิริยาจะเรียกว่า ปฏิริยาแอซิดไฮโดลิซิส (acid hydrolysis) หรือถ้าใช้สารอัลคาไลน์ที่มีฤทธิ์เป็นเบสเรียกว่า ปฏิริยาอัลคาไลน์ไฮโดลิซิส (alkaline hydrolysis) ซึ่งผลที่ได้จากปฏิริยา คือ กรดเทรฟเทอริกและเอทิลีนไกลคอล โดยกรดเทรฟเทอริกที่ได้สามารถทำให้บริสุทธิ์โดยการตกผลึกจากตัวทำละลายและสามารถนำกลับไปใช้เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นต่อไปได้ แต่กระบวนการไฮโดลิซิสมีข้อเสียหลายประการ เช่น ปัญหาเกี่ยวกับการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิริยา การใช้ภาวะที่รุนแรงในการดำเนินปฏิริยา การแยกผลผลิตที่ได้จากเอทิลีนไกลคอล นอกจากนี้การไฮโดลิซิสพื้ตต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิริยาที่นานมาก ซึ่งปฏิริยาการย่อยสลายเป็นไปตามสมการต่อไปนี้



2) ปฏิริยาแอลกอฮอล์ลิซิส (alcoholysis reaction)

การย่อยสลายพื้ตด้วยปฏิริยาแอลกอฮอล์ลิซิส เป็นการนำแอลกอฮอล์บางชนิดมาใช้เป็นสารย่อยสลายภายใต้ความร้อนและความดัน ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้เมทานอลเป็นสารย่อยสลาย จึงมักเรียกระบวนการนี้ว่า เมทาโนลิซิส (methanolysis) และผลที่ได้จากปฏิริยา คือ ไดเมทิลเทรฟเทอริก และเอทิลีนไกลคอล แต่เอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการสามารถ



2.4 ไมโครเวฟ [8]

2.4.1 คลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่างอินฟราเรดกับคลื่นวิทยุ (100 เซนติเมตร – 1 มิลลิเมตร) ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนั้นไม่ใช่คลื่นความร้อนตั้งแต่ต้นแต่อยู่ในรูปของพลังงาน (energy) และถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุและ/หรือเกิดการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนกับอนุภาครอบๆ ที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและเกิดการดูดซับพลังงานดังกล่าว เป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน แต่ทั้งนี้การดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุซึ่งนั้นไม่ได้หมายความว่าวัสดุทุกประเภทจะสามารถใช้กับคลื่นไมโครเวฟได้ เช่น วัสดุพวกโลหะจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟทั้งหมด ในขณะที่แก้วหรือพลาสติกบางชนิดจะยอมให้คลื่นไมโครเวฟผ่านไปทั้งหมด สารซึ่งมีน้ำ หรือสารจำพวกดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟจะดูดซับพลังงานทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยเกิดจากการสั่นของโมเลกุล ปัจจุบันเรานิยมใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดที่ใช้พลังงานในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีคุณภาพดี มีประสิทธิภาพสูง และสามารถลดเวลาของกระบวนการลงได้เป็นอย่างมากและยังให้ผลผลิตที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ส่งผลให้การใช้คลื่นไมโครเวฟได้รับความนิยมแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น

2.4.2 กลไกการทำงานของเตาไมโครเวฟ

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในห้องแลปนั้นจะใช้ช่วงความถี่ที่ 2450 MHz โดยจะให้พลังงาน 500-1100 Watts โดยภายในตู้อบไมโครเวฟจะมีท่อที่เรียกว่าแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดคลื่น เมื่อเราเปิดสวิตช์ท่อแมกนีตรอนจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟคลื่นนี้จะถูกพัดลมพัดคลื่นให้กระจายทั่วเตา ผลิตภัณฑ์ก็จะดูดซับคลื่นไมโครเวฟเอาไว้

1) การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric heating)

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

2) การทำให้เกิดความร้อนจากสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ ได้แก่

1. Relative dielectric constant
2. Relative dielectric loss

โดยค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulating ability) ของวัสดุซึ่งวัสดุเป็นฉนวนที่ไม่ดีตั้งนั้นวัสดุจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น

2.4.3 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ

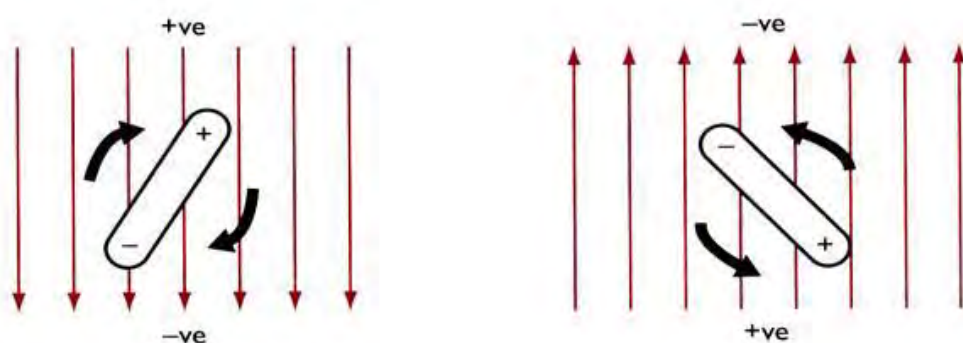
จากการที่วัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีสมบัติไดอิเล็กทริก และเมื่ออนุภาคได้รับพลังงานไมโครเวฟแล้วจะถูกพลังงานไมโครเวฟนั้นเขย่าโมเลกุลให้สั่นภายใต้สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า อนุภาคเหล่านี้จะปรับตัวให้มีเฟสตรงกับสนาม แต่อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้จะถูกต้านด้วยแรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและแรงต้านไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดเป็นความร้อนขึ้น ซึ่งกลไกการเกิดความร้อนนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1) การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization/conduction mechanism) ภายในเตาไมโครเวฟ (microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน(magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้างและหน้าสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในวัสดุสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ซึ่งเกิดการชน (collisions) หรือ

เสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในวัสดุนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในวัสดุจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนมีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันเช่น โซเดียม - โบตัสเซียม - หรือแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้อิออนบวก (cations) และอิออนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (Interactions) กับสนามไฟฟ้าใด ๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน จนเกิดการสั่นกลายเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในทำให้ตัวนำร้อน ข้อจำกัดของวิธีการนี้ คือ ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูง

2) การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation/dipole polarization)

ในวัสดุทั่วไปจะประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าสลับนั้น ๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟ คือ 915 หรือ 2,450 พันล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในวัสดุ แสดงดังภาพที่ 2.2 ในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็งเช่น น้ำแข็งนั้นโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองมากพอที่จะชนกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงเพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้และในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงจำนวนน้อยมากที่จะชนกันจนสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

การเกิดความร้อนในวัสดุนั้นจะเกิดบริเวณจุดที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการ

เดือดของน้ำ โดยเกิดการนำความร้อนสู่บริเวณข้างเคียงและสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง จึงเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ที่หมูนได้จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ได้รับคลื่นอย่างสม่ำเสมอ โลหะที่เป็นส่วนประกอบในเตา หรือภาชนะพลาสติกที่ใส่ผลิตภัณฑ์จะไม่ร้อน เนื่องจากโลหะจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟทั้งหมดและพลาสติกจะไม่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟเลย นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากผลิตภัณฑ์จะทำให้ภาชนะที่ใส่ร้อนผลิตภัณฑ์จะถ่ายเทความร้อนสู่โมเลกุลข้างเคียง

3) การเกิดการสั่น/หมุน ระหว่างอนุภาคที่มีขั้ว Interfacial Polarization

วิธีการนี้เป็นการรวมเอาวิธี conduction และวิธี dipolar polarization เข้าด้วยกัน เพื่อใช้งานในระบบที่ตัวอย่างเป็นวัสดุนำไฟฟ้ากระจายตัวอยู่ในวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น การกระจายตัวของโลหะในกัมมะถัน กัมมะถันไม่ตอบสนองต่อไมโครเวฟ ส่วนโลหะจะสะท้อนพลังงานของไมโครเวฟ แต่เมื่อนำสารทั้งสองมารวมกันจะกลายเป็นวัสดุที่ดูดคลื่นไมโครเวฟได้เป็นอย่างดีโดยโลหะจะต้องอยู่ในรูปผง ตัวอย่างจะดูดคลื่นและทำให้เกิดความร้อนได้ด้วยวิธีการ dipolar polarization กัมมะถันที่อยู่รอบๆ ผงโลหะจะประพุดิตัวเสมือนเป็นตัวทำลายสำหรับโมเลกุลมีขั้ว และต้านการเคลื่อนที่ของไอออนด้วยแรงที่มีค่าเท่ากับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ทำให้ไอออนเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มจนเกิดความร้อนขึ้น

2.5 ความหมายหรือคำนิยามของโฟม [9-11]

โฟมพลาสติก หรือ เซลลูลาร์พอลิเมอร์ (cellular polymer) หรือ โฟมพอลิเมอร์ (polymeric foam) หมายถึง พลาสติกที่มีโพรงแก๊สเล็ก ๆ มากมายกระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก ซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge) โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้ประกอบด้วยเฟส (Phase) ตั้งแต่สองเฟสขึ้นไป คือ เฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix phase) และเฟสที่เป็นแก๊ส (gaseous phase) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟู (blowing agent) และกระจายตัวในเฟสของพอลิเมอร์ในรูปของช่องว่าง (Void) เรียกว่าเซลล์ (cell) สำหรับเฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็งอาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว หรือพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) นอกจากนี้อาจมีเฟสที่เป็นของแข็งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย ได้แก่ ตัวเติม (fillers) ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แก้ว เซรามิก หรือโลหะ เป็นต้น หรือสารประกอบอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น โฟมพลาสติกอาจยืดหยุ่น (flexible) หรือแข็ง (rigid) ขึ้นกับอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (glass transition temperature) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ปริมาณผลึก (degree of crystallinity) และระดับการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ของพอลิเมอร์ นอกจากนี้โฟมพลาสติกอาจมีสมบัติกึ่งยืดหยุ่น (semi-flexible) หรือ กึ่งแข็ง (semi-rigid) ก็ได้

2.6 การจำแนกประเภทของโฟม

โฟมสามารถจำแนกประเภทได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับการศึกษา โดยทั่วไปมักจำแนกตามลักษณะทางกายภาพของโฟม บางกรณีอาจจำแนกตามลักษณะโครงสร้างของเซลล์ หรืออาจพิจารณาตามประเภทของพลาสติกหลักที่ใช้ ซึ่งโฟมแต่ละประเภทจะมีลักษณะและรายละเอียดแตกต่างกันออกไปดังนี้

2.6.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

ประเภทของโฟมหากจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โฟมชนิดแข็ง (rigid foam) และโฟมชนิดยืดหยุ่น (flexible foam) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ความแข็งของสายโซ่พอลิเมอร์ (rigidity of the polymer backbone) ระดับของการเกิดผลึก (degree of crystallinity) และระดับการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ของโฟม

1) โฟมชนิดแข็ง (rigid foam)

โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะอยู่ในสถานะผลึก (crystalline state) หรือถ้าอยู่ในสถานะอสัณฐาน (amorphous state) จะมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature; T_g) ที่สูง มีลักษณะที่แข็ง ไม่คืนตัวเมื่อถูกกด เช่น โฟมพอลิโอฟีน (polyolefin foam) โฟมพอลิสไตรีน (polystyrene foam; PS) โฟมฟีนอลิก (phenolics; PFs) โฟมพอลิคาร์บอนเนต (polycarbonate foam; PC) และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (rigid polyurethane foam; PU) เป็นต้น

2) โฟมชนิดยืดหยุ่น (flexible foam)

โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T_g) ที่ต่ำ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น และคืนตัวเมื่อถูกกดได้ง่าย เช่น โฟมยาง (rubber foam) โฟมพลาสติกไคลด์พอลิไวนิลคลอไรด์ (plasticized poly(vinyl chloride) foam; pPVC) และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น เป็นต้น

3) โฟมชนิดกึ่งแข็ง (semi-rigid foam)

มีลักษณะอยู่ระหว่างโฟมชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น กล่าวคือ โฟมชนิดนี้จะมีอีลาสติคโมดูลัส (elastic modulus) ที่สูงกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่น แต่มีพฤติกรรมทางความเค้น-ความเครียด (stress-strain behavior) คล้ายกับโฟมชนิดยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดแข็ง

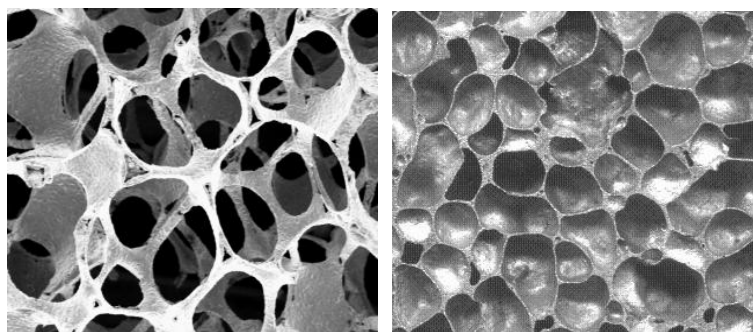
2.6.2 จำแนกตามลักษณะของเซลล์

1) เซลล์เปิด (open-cell type)

ลักษณะเซลล์แบบนี้มีโครงสร้างที่เป็นโพรงแก๊สเล็กๆ กระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก โดยไม่พบผนังหรือเยื่อบางๆ กั้นระหว่างโพรงแก๊สหรือเซลล์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 (ก) ทำให้น้ำและอากาศสามารถไหลผ่านได้ โฟมที่มีส่วนประกอบของเซลล์ประเภทนี้จะมีความยืดหยุ่นสูง เหมาะในการนำไปใช้ทำเบาะรถยนต์ เฟอรินเจอร์ ที่นอน และวัสดุที่ใช้ดูดซับเสียง

2) เซลล์ปิด (close-cell type)

ลักษณะเซลล์แบบนี้มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยโพรงแก๊สเล็กๆ กระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก โดยพบผนังหรือเยื่อบางๆ กั้นระหว่างโพรงแก๊สหรือเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ทำให้น้ำและอากาศไม่สามารถไหลผ่านได้ แต่สามารถแพร่ผ่านได้ โฟมที่มีส่วนประกอบของเซลล์ปิดจะมีความเป็นฉนวนที่ดี



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 สัณฐานโครงสร้าง (structure configuration) ของโฟม (ก) เซลล์เปิด และ (ข) เซลล์ปิด

ในทางปฏิบัติโครงสร้างของเซลล์ทั้ง 2 ชนิด จะอยู่ร่วมกัน ซึ่งจะไม่เป็นโฟมเซลล์เปิดหรือปิดโดยสมบูรณ์ ความแตกต่างระหว่างโฟมเซลล์เปิดและโฟมเซลล์ปิดจะอยู่ที่โฟมเซลล์เปิดจะประกอบด้วยโครงสร้างเป็นแกนคล้ายๆ เสาค้ำ (strut) ในขณะที่โฟมเซลล์ปิดจะมีหน้าต่าง (window) หรือเยื่อบางๆ เชื่อมปิดระหว่างแกน พฤติกรรมเชิงกลของระบบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเซลล์เปิดต่อเซลล์ปิด เช่น ถ้าโฟมมีอัตราส่วนของเซลล์ปิดที่สูงจะทำให้โฟมมีค่าความแข็งตึง (stiffness) และความแข็งแรงที่สูง

2.6.3 จำแนกตามประเภทของพลาสติก

1) โฟมเทอร์โมเซต (thermoset foam)

เป็นโฟมพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิล (recycle) ได้ยาก เพราะต้องอาศัยการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมีที่ซับซ้อน โฟมชนิดนี้ที่รู้จักกันดี ได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน โฟมอีพอกซี (epoxy foam) และโฟมฟีนอลิก เป็นต้น

2) โฟมเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic foam)

โฟมประเภทนี้สามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ง่าย เช่น โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิโพลีเอทิลีน และโฟมไวนิลคลอไรด์

2.7 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation)

โฟมพลาสติกสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการเอ็กซ์เพนชัน (expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การเกิดฟอง (bubble formation or initiation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นและขยายตัวต่อในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว โดยวิธีการทำให้พลาสติกเกิดฟองแก๊สหรือโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

- การสลายตัวของสารฟูจากความร้อนหรือผลจากปฏิกิริยาทางเคมี (thermal decomposition of a chemical blowing agent; CBA) คือ ผสมสารฟูที่เป็นของแข็งกับพอลิเมอร์และให้ความร้อนทำให้สารฟูเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สขึ้น เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น

- การเกิดฟองแก๊สเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (blowing due to an 'in situ' chemical reaction) โดยแก๊สจะเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งแก๊สจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับการพอลิเมอไรเซชันและการเชื่อมขวาง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานาตกับน้ำ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น

- การลดความดัน (low pressure release of a gas) ซึ่งเป็นการขยายตัวของแก๊สในเนื้อพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น การอัดรีด (extrusion) โฟมพอลิสไตรีน

- การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในพอลิเมอร์ (blowing by vapour from a volatile liquid) ที่เป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ ตัวอย่างของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) และเมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) เป็นต้น

- การใช้ฟิลเลอร์ชั่วคราว (use of a temporary filler) วิธีนี้จะไม่มีการผลิตแก๊สขึ้นแต่จะใช้อนุภาคของแข็งผสมกับพอลิเมอร์ แล้วขึ้นรูปเป็นพลาสติกแข็ง จากนั้นชะ (leach) ฟิลเลอร์ออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีเซลล์เปิดเกิดขึ้น วิธีนี้มักใช้ในการเตรียมโฟมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene foam; PTFE foam) เนื่องจาก PTFE เป็นพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการขยายตัวได้ง่าย

- การกักเก็บแก๊สเชิงกล (mechanical entrapment of gas) คือ การทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในพอลิเมอร์เหลว หรือสารละลายพอลิเมอร์ หรือสารแขวนลอยพอลิเมอร์ แล้วทำให้แข็งตัวโดยสารเร่งปฏิกิริยา หรือความร้อน ทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก

- การเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (hollow spheres or micro-balloons) ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งไมโครสเฟียร์อาจมีองค์ประกอบเป็นเม็ดแก้ว หรือเม็ดพลาสติก (ต่างชนิดกับพอลิเมอร์ที่ใช้)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ความเรียบของผิวหน้าวัสดุ คุณลักษณะของอนุภาคตัวเติม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดแก๊ส และแรงตึงผิว (surface tension)

ในขั้นตอนการเกิดฟอง สารละลายพอลิเมอร์ต้องการพลังงานอิสระ (F) ของระบบเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.1

$$F = \gamma A \quad (2.1)$$

γ คือแรงตึงของสารละลายพอลิเมอร์ (surface tension of polymer solution) และ A คือพื้นที่สัมผัสทั้งหมด (total interfacial area) โดยเมื่อค่าแรงตึงผิวมีค่าต่ำจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย

ขั้นตอนที่ 2 : การเพิ่มขนาดของฟอง (bubble growth)

การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (sphere) ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้ภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของความดันระหว่างภายในกับภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ (ΔP) ค่าแรงตึงผิวที่สัมผัส (γ) และรัศมีของฟอง (r) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดง ดังสมการที่ 2.2

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.2)$$

ความแตกต่างของความดันจะมีค่ามากในฟองที่มีขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะให้มีค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัวหรือเพิ่มขนาดขึ้น จากฟองที่มีขนาดเล็กไปยังขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$\Delta P_1^2 = 2\gamma \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔP_1^2 คือ ความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง ซึ่งมีขนาดรัศมีของฟองเท่ากับ r_1 และ r_2 ตามลำดับ

ขณะเกิดการขยายตัวของฟองในโพลิเมอร์พลาสติก สมบัติต่างๆของวัสดุจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองขึ้นกับสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์เฟสความดันที่เกิดเนื่องจากสารฟู่ ความดันภายนอกที่เกิดบนโพลิเมอร์พลาสติก ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารฟู่ในเฟสพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลซึ่งมีผลต่ออัตราการขยายตัวของเซลล์และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณที่เชื่อมต่อกันของเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การยุบตัว (collapse) ของโพลิเมอร์พลาสติก

ขั้นตอนที่ 3 : ความเสถียรของฟอง (bubble stability)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ซึ่งความเสถียรของโครงสร้างของโฟมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความหนืดและแรงตึงผิวลดลง ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผนังเซลล์บางลง และเกิดการยุบตัวเมื่อได้รับแรง นอกจากนี้ ความเสถียรของโครงสร้างโฟมยังขึ้นกับการเชื่อมขวางอีกด้วย

การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ ทำได้โดยทำให้เกิดความเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโพลิเมอร์พอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม [12] การเพิ่มความหนืดจะเป็นการลดผลของการถ่ายเทของเหลว (drainage effect) ไปรอยต่อระหว่างเซลล์ ซึ่งการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลระหว่างการพอลิเมอร์ไรเซชันหรือการเชื่อมขวาง (crosslinking) หรือการลดอุณหภูมิ

วิธีทำให้โฟมมีความเสถียรหลายวิธี ได้แก่ วิธีการทางเคมี เช่น กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์

2.8 พอลิยูรีเทน (Polyurethane) [2,13]

พอลิยูรีเทน คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน(-NHCOO-) ในสายโซ่โมเลกุล ซึ่งถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1930 โดย Otto Bayer และ ผู้ร่วมงาน (co-workers) ณ ประเทศเยอรมัน โดยพอลิยูรีเทน นั้นสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแบบรวมตัว(addition reaction) ระหว่างได- หรือพอลิไอโซไซยานาต (di- or polyisocyanate) กับได- หรือ พอลิโออล (di- or polyol) หรือสารประกอบอื่นๆ ที่มีไฮโดรเจนอะตอมที่ว่างไวต่อปฏิกิริยาอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของไดไอโซไซยานาตและไดออลที่ใช้

พอลิยูรีเทนทางการค้า โดยแรกเริ่มเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยานาต (hexamethylenediisocyanate, HDI) กับบิวเทนไดออล(butane diol) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสมบัติเหมือนพอลิเอไมด์ (polyamide) ซึ่งสามารถใช้ทำเส้นใย เพื่อทำแพร่งได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1950 เริ่มมีการผลิตมากขึ้นและนำไปใช้งานหลากหลายโดยมีการเตรียมพอลิยูรีเทนจากโทลูอีนไดไอโซไซยานาต (toluene diisocyanate, TDI) และพอลิเอสเทอร์พอลิโออล (polyester polyol) ซึ่งนำมาทำโฟมชนิดยืดหยุ่นและต่อมามีการคิดค้นนำพอลิอีเทอร์พอลิโออล (polyether polyol) มาใช้แทนพอลิเอสเทอร์พอลิโออล ซึ่งจากการคิดค้นพัฒนาต่างๆ เหล่านี้ทำให้พอลิยูรีเทนนั้นมีสมบัติที่หลากหลายและได้รับความนิยมนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

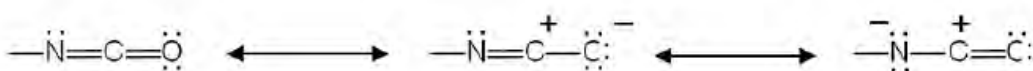
พอลิยูรีเทนมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พอลิคาร์บาเมต (polycarbamate) เป็นอนุพันธ์เอสเทอร์แอมิดของกรดคาร์บาไมค ($R_2HNCOOH$) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารเคลือบผิว อีลาสโตเมอร์ เส้นใย หรือโฟมชนิดแข็งและยืดหยุ่น เป็นต้น

2.8.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

1) ไอโซไซยานาต (isocyanate)

ปฏิกิริยาพื้นฐานของไอโซไซยานาต

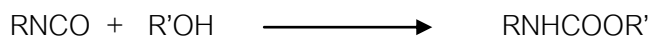
หมู่ไอโซไซยานาต ($N=C=O$) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย เนื่องจากความมีขั้วและมีโครงสร้างเรโซแนนซ์ (resonance structure) ทำให้บริเวณที่ออกซิเจนมีอิเล็กตรอนหนาแน่นมาก รองลงมาคือไนโตรเจน และคาร์บอนตามลำดับ



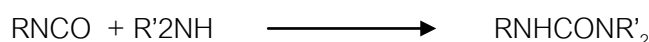
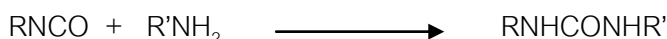
รูปที่ 2.4 โครงสร้างเรโซแนนซ์ของหมู่ไอโซไซยานาต

โดยทั่วไปไอโซไซยาเนตจะเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีไฮโดรเจนซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยา (active hydrogen) ดังนี้

- แอลกอฮอล์ : โดยทั่วไปพอลิไอโซไซยาเนตจะเกิดปฏิกิริยากับพอลิแอลกอฮอล์ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิยูรีเทน ดังสมการ



- เอมีน : เมื่อทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตจะได้อูเรีย ดังสมการ



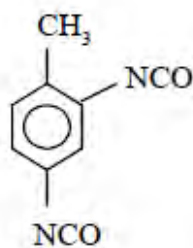
- น้ำ : ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจะได้กรดคาร์บาไมกซึ่งไม่เสถียรจะแตกตัวต่อได้เอมีนองศาที่หนึ่ง (primary amine) และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



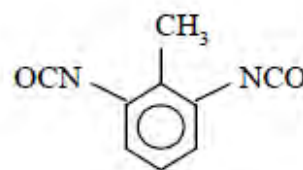
นอกจากนี้วิธีหนึ่งที่ทำให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติต่างกัน คือ การเลือกใช้ ไอโซไซยาเนตต่างชนิดกัน ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพและ สมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของไดไอโซไซยาเนตมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิยูรีเทน ซึ่งในทางทฤษฎีพบว่าไอโซไซยาเนตอะโรมาติกนั้นจะมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่าไอโซไซยาเนตแบบอะลิฟาติก เนื่องจากแรดิคัล (radical) ของหมู่ไอโซไซยาเนตมีความไม่เสถียรกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากแรดิคัลในวงเบนซีนไม่เสถียร สำหรับไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ได้แก่ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (diphenylmethane diisocyanate: MDI) และโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (toluenediisocyanate: TDI) ซึ่งอาจใช้เป็นของผสมระหว่าง 2,4 - และ 2,6- TDI หรือใช้ 2,4 -TDI อย่างเดียวก็ได้ โดย TDI ใช้ทำได้ทั้งโฟมชนิดยืดหยุ่นและชนิดแข็ง แต่เนื่องจาก TDI เป็นพิษ จึงเปลี่ยนมาใช้พอลิเมอริก ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (MDI) แทน โดย Pure MDI หรือ monomeric MDI จะนิยมใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนชนิดพลาสติก และ เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ ส่วน polymeric MDI จะนิยมใช้ในการผลิตโฟมทั้งชนิดแข็งและนุ่ม

โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (toluene diisocyanate, TDI)

TDI มีสถานะเป็นของเหลวระเหยง่าย และมีความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ โดย TDI ที่ผลิตทางการค้ามี 2 ประเภท คือ TDI 80/20 และ TDI 60/40 ซึ่งตัวเลขที่ตามหลังแสดงอัตราส่วนร้อยละของผสมของ 2,4 TDI และ 2,6 -TDI isomer ตามลำดับ ดังสูตรโครงสร้างต่อไปนี้



2,4-Toluene diisocyanate



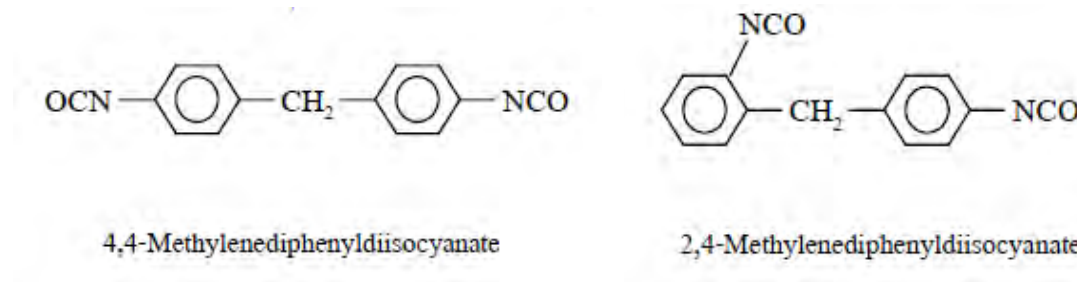
2,6-Toluene diisocyanate

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) ทำให้เกิดออร์โธไนโตรโทลูอีนบริสุทธิ์ (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 ทำให้เกิดความระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจ ตอนบนและตอล่าง 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

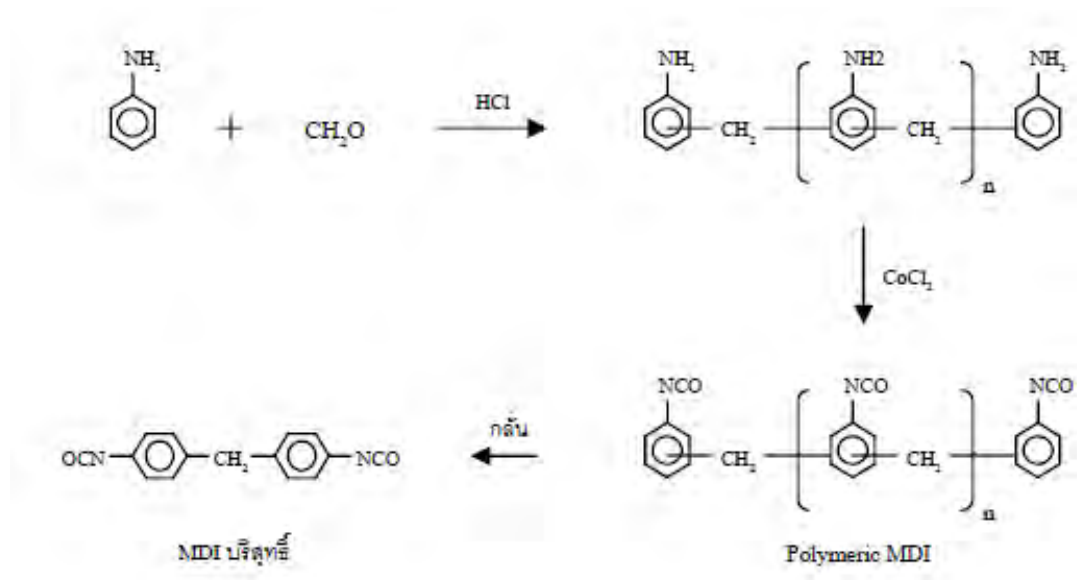
เมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (methylenediphenyldiisocyanate , MDI)

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 2.6



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

MDI บริสุทธิ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเป็นของแข็งสีขาวถึงสีเหลืองอ่อน มีจุดหลอมเหลวประมาณ 38 °C ผลิตได้ยาก และมีราคาแพง เมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 °C อาจทำให้เกิดเป็นไดเมอร์ (dimer) และกลายเป็นของเหลวได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้มีการพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อที่จะตัดแปร MDI บริสุทธิ์ ให้เป็นพอลิเมอร์ MDI ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิใช้งาน ปกติ และลดการเปลี่ยนเป็นไดเมอร์พอลิเมอร์ MDI สังเคราะห์ได้จากฟอรั่มัลดีไฮด์ 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 โดยทั่วไปโพลีเมชนิดยืดหยุ่นจะมีดีกรีของการเชื่อมขวางต่ำและเตรียมจากพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คือ ประมาณ 1,000 - 6,500 g/mol¹ และมีฟังก์ชันนัลลิตีต่ำ คือ 2.0 - 3.0 ในขณะที่โพลีเมชนิดแข็งจะมีดีกรีการเชื่อมขวางสูงซึ่งจะเตรียมจากพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ คือ ประมาณ 150 - 1,000 g/mol¹ และมีฟังก์ชันนัลลิตีสูง คือ 2.5 - 8.0 เพื่อลดความยาวของสายโซ่โมเลกุลและเกิดโครงสร้างแบบเชื่อมขวางที่มีความหนาแน่นสูงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของพอลิออลที่ใช้ในการเตรียมโพลีเมพอลิยูรีเทนประเภทต่าง ๆ

ลักษณะของพอลิออล	โพลีเมยืดหยุ่นและ elastomers	โพลีเมแข็ง
น้ำหนักโมเลกุล	1,000 - 6,000	150 - 1,000
ฟังก์ชันนัลลิตี	2.0 - 3.0	2.5 - 8.0
ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH/g)	28 - 160	250 - 1,000

ค่าไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซิลนัมเบอร์ (hydroxyl value, OHV หรือ hydroxyl number) เป็นค่าที่ใช้วัดความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของพอลิออล มีหน่วยเป็น mg KOH/g โดยปกติพอลิออลที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะแสดงค่าไฮดรอกซิลไว้เพื่ออำนวยความสะดวกในการออกสูตรโพลีเมของลูกค้า สำหรับค่าไฮดรอกซิลสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Hydroxyl value (OHV)} &= \frac{56.1 \times \text{functionality} \times 100}{\text{molecular weight}} \\ &= \frac{56.1 \times 1,000}{\text{equivalent weight}} \end{aligned}$$

พอลิเอเทอร์พอลิออลเป็นพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของพอลิเมอร์แบบเปิดวง (ring-opening polymerization) ของแอลคิลีนออกไซด์ โดยพอลิเอเทอร์พอลิออลจะมีจุดเด่นที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ด้านทานการไฮโดรลิซิสและจุลินทรีย์ได้ดี

ส่วนพอลิเอเทอร์พอลิออลที่ใช้นั้นจะใช้น้ำหนักประมาณ 1000-2000 และต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายโมเลกุลเพื่อทำปฏิกิริยาได้ซึ่งพอลิเอเทอร์พอลิออลลักษณะนี้สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาของกรดไดเบสิก เช่น กรดอะดิพิก กรดเซบาสิก กับไกลคอล เช่น เอทิลีนไกลคอล หรือพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล โดยพอลิเอเทอร์พอลิออลนั้นจะมีจุดเด่นที่สมบัติทางกายภาพ ความเสถียรทางความร้อน และความต้านทานต่อน้ำมันได้ดี ตัวอย่างของพอลิออลทางการค้าที่นิยมใช้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของพอลิออลทางการค้าที่นิยมใช้

Alcohol	Chemical structure	Functionality
Ethylene glycol (EG)	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$	2
Diethylene glycol (DEG)	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$	2
Glycerol	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2-\text{OH} \end{array}$	3
Trimethylol propane (TMP)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH} \end{array}$	3
Pentaerythriol	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2-\text{OH} \end{array}$	4
Sorbitol	$\text{HO}-\text{CH}_2-(\text{CHOH})_4-\text{CH}_2-\text{OH}$	6

พอลิยูรีเทนสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติได้หลากหลาย แต่ทั้งนี้พื้นฐานของโครงสร้างโมเลกุลนั้นจะประกอบไปด้วยหมู่ยูรีเทน และหมู่เอสเทอร์หรือหมู่อีเทอร์ที่ได้มาจากส่วนของพอลิออล โดยพบว่ากรณีที่ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนเป็นอีลาสโตเมอร์นั้น ปริมาณของหมู่ยูรีเทนมีผลเล็กน้อยเมื่อเทียบกับหมู่อื่นในสายโซ่โมเลกุล เช่น หมู่เอสเทอร์ หรือ หมู่อีเทอร์ แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังประกอบไปด้วยหมู่ยูรีเทน และการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของพอลิยูรีเทนสามารถทำให้มีสมบัติหลากหลายด้วย

ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนนั้นจะมีการพิจารณาชนิดและการรวมตัวของไอโซไซยานาตและพอลิออล เพื่อปรับให้ได้สมบัติตามความต้องการ ดังนั้นจึงควรทราบถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างทางเคมีและสมบัติต่างๆ ซึ่งความยืดหยุ่น (flexibility) เป็นสมบัติหนึ่งของพอลิยูรีเทนที่สามารถปรับให้มีความยืดหยุ่นมากหรือน้อยได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น โดยสมบัติดังกล่าวนั้นสามารถปรับได้โดยอาศัยการเลือกชนิดของโครงสร้างทางเคมีและการรวมตัวกันของสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน และข้อดีอีกประการคือไดไอโซไซยานาตนั้นมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาสูง สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่มีความแตกต่างกันได้ ดังนั้นจึงสามารถสังเคราะห์ ได้ที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาเพียงไม่นาน

3) สารเติมแต่ง (additives)

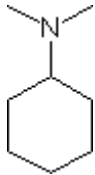
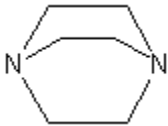
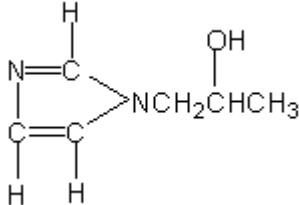
เชนเอ็กซ์เทนเดอร์ (chain extender)

เชนเอ็กซ์เทนเดอร์หรือไดออล สายสั้นเป็นสารชนิดเดียวกับพอลิออล แต่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่า น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100-350 ใกล้เคียงกับไดไอโซไซยานาต โดยโครงสร้างของเชนเอ็กซ์เทนเดอร์นั้นมีผลต่อสมบัติของพอลิยูรีเทนด้วย โดยเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ที่มีลักษณะสมมาตรหรือสามารถจัดเรียงตัวกันได้ดีนั้นจะสามารถทำให้พอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ที่มีลักษณะสายโซ่สั้นและมีกิ่ง ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลได้แต่ในบางกรณีเราอาจจะเติมเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ที่เป็นสายโซ่ยาว หรือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิโพรพิลีนไกลคอล ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000-6000 ซึ่งการเติมเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ลักษณะนี้เข้าไปในพอลิยูรีเทนเพื่อขยายสายโซ่ของพอลิยูรีเทนให้มีส่วนของอะลิฟาติกมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความนิ่มและมีสมบัติอีลาสโตเมอร์มากขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

(1) เทอร์เชียรีเอมีน (tertiary amine) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง ทำให้เกิดสมดุลระหว่างการเกิดเจลกับปฏิกิริยาการเกิดฟอง ทำให้สามารถควบคุมการผลิตโฟมได้ง่าย แต่ข้อเสียของเอมีน คือ จะมีกลิ่นเหลืออยู่ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานโฟม ซึ่งหลีกเลี่ยงโดยการใช้อะมีนที่ระเหยได้ ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เชียรีเอมีน แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

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)	

(2) โลหะอินทรีย์ (organo-metallic) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ที่นิยมใช้ ได้แก่ สแตนเนสออกโทเอต (stannous octoate) ซึ่งเป็นสารประกอบดีบุก และไดบิวทิลไดลอรูเรต (dibutyltin dilaurate) โดยจะทำหน้าที่คล้ายลูอิสแอซิด (Lewis acid) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเบสของสารไอโซไซยาเนตและพอลิออล

สารลดแรงตึงผิว (surfactant)

สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโฟม ซึ่งทำหน้าที่ช่วยในการเกิดโฟม ช่วยลดแรงตึงผิว ช่วยควบคุมขนาดเซลล์ของโฟมและความสม่ำเสมอของเซลล์ และควบคุมปริมาณเซลล์ปิด โดยทำให้เกิดความเสถียรของฟองแก๊ส และช่วยลดความเข้มข้นของความเค็มที่ผนังเซลล์

สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ คือ ออแกนซิลอกเซน (organosiloxanes) หรือสารลดแรงตึงผิวที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ โดยสารลดแรงตึงผิวที่มีความสำคัญและมีการใช้งานมากจะเป็นประเภทพอลิอีเทอร์ซิลอกเซนที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (poly(dimethyl siloxane), PDMS) และพอลิฟีนิลเมทิลซิลอกเซน (poly(phenyl siloxane)) เป็นต้น ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนอาจใช้สารลดแรงตึงผิวมากกว่า 1 ชนิด ก็ได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุ (non-ionic)

สารฟู่ (blowing agent)

สารฟู่ ทำหน้าที่ทำให้เกิดฟองหรือรูเล็กๆ ขึ้นในโครงสร้างของพลาสติก โดยทั่วไปสารฟู่แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามกลไกหรือปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดแก๊สดังนี้

(1) สารฟู่เชิงกายภาพ (Physical blowing agents) สารฟู่ประเภทนี้ให้แก๊สออกมาโดยการเปลี่ยนสถานะทางกายภาพ (Physical state) ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาจเป็นสารประกอบเคมีที่สามารถให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการทางกายภาพ (เช่น การกลายเป็นไอ การดูดซับ) หรืออาจเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ (เช่น ฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแอลกอฮอล์ และสารประกอบอีเทอร์ เป็นต้น)

(2) สารฟู่เชิงเคมี (Chemical blowing agents) สารฟู่ประเภทนี้จะให้แก๊สออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition) หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมี หรืออันตรกิริยา (Interaction) ของสารประกอบเคมีตั้งแต่ 2 ชนิด โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมี เหล่านี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible) แต่มีบางกรณีเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

สารฟู่สำหรับโฟมพอลิยูรีเทน ได้แก่ น้ำ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbon, CFCs) หรือที่เรียกว่า “ฟร็อน” (freon) โดยน้ำจะทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา โดยทั่วไปอัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิเอสเทอร์พอลิออลจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพอลิออลที่ใช้ นั่นคือ อัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิเอสเทอร์พอลิออล คือ 3 - 5 : 100 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิอีเทอร์พอลิออลจะเป็น 1.8 - 5 : 100 สำหรับ CFCs นั้นเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำและกลายเป็นไอได้โดยอาศัยปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่าง

ไอโซไซยานาต์กับพอลิเอทิลีน แต่เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่า greenhouse effect ซึ่งเกิดจากการที่ฟริออนไปทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ ทำให้การผลิตโฟมพอลิยูรีเทนได้หันมาใช้สารฟลูออโรคาร์บอนที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารไฮโดรคาร์บอน หรือไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (hydrofluorocarbon, HFCs) เป็นต้น

สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมที่ใช้เป็นสารอนินทรีย์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (inert inorganic filler) ซึ่งวัตถุประสงค์ในการใช้สารตัวเติม คือ เพื่อเพิ่มน้ำหนัก ลดต้นทุน และเพิ่มความแข็งแรง สารตัวเติมที่ใช้อาจเป็นผงหรือเส้นใย

การเติมสารตัวเติมที่เป็นผงเข้าไปในโฟมยืดหยุ่น จะช่วยลดความสามารถในการติดไฟ ช่วยเพิ่มน้ำหนัก อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความทนแรงกด (compression strength) ด้วย

การเติมสารตัวเติมที่เป็นเส้นใยจะช่วยเพิ่มความทนแรงดึง (tensile strength) เพิ่มความแข็งแรงและช่วยเพิ่มช่วงของอุณหภูมิในการใช้งานของโฟมอีกด้วย

ในบางครั้งอาจใช้สารตัวเติมที่เป็นแร่ (mineral filler) เพื่อลดต้นทุน และเพิ่มความทนแรงกดของโฟมแข็ง

2.8.2 การนำไปใช้งานของพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ให้หลากหลาย มีสมบัติแตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งลักษณะของวัสดุเป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้คือ

1) พลาสติกทั่วไป (hard solid plastic)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บรรจุภัณฑ์

2) อีลาสโตเมอร์ (soft solid elastomers)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเหมือนยางสังเคราะห์ทั่วไปได้แก่ พื้นรองเท้า ลูกกลิ้ง ปะเก็น หนังเทียม สายพาน และอื่นๆ เช่น กาว สารเคลือบผิว เส้นใยสแปนเดกซ์ เป็นต้น

3) โฟมชนิดแข็ง (low density rigid foam)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่ โครงสร้างของส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา เช่น ลำตัวเครื่องบินและเรือและวัสดุที่นำความร้อนต่ำ เช่น ฉนวนสำหรับอาคาร รถขนส่งผลิตภัณฑ์แช่แข็ง ตู้เย็น ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น

4) โฟมชนิดยืดหยุ่น (low density flexible foam)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่ เฟอร์นิเจอร์ เบาะรองนั่ง เก้าอี้นุ่ม ที่นอน แผ่นรองใต้พรม เป็นต้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vaidya และ Nadkarni [14] ได้ศึกษาถึงการย่อยสลายพีตด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส โดยใช้โพรพิลีนไกลคอลที่มากเกินพอในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพีตต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 37.5:62.5 50:50 และ 62.5:37.5 และใช้ซิงก์แอสซีเทตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งผลที่ได้จากการย่อยสลายส่วนใหญ่ประกอบด้วย มอนอเมอร์ และไดเมอร์ โดยประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโพรพิลีนไกลคอลที่ใช้เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินพอ จะได้ bis (2-hydroxyethylene) terephthalate (BHET) เป็นส่วนใหญ่

Baliga และ Wong [15] ศึกษาถึงแอสซีเทตของโลหะชนิดต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีด้วยกัน 4 ชนิด คือ ซิงก์แอสซีเทต เลดแอสซีเทต โคบอลต์แอสซีเทต และแมงกานีสแอสซีเทต สำหรับการย่อยสลายขวดพีตโดยกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยเอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินพอที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการย่อยสลาย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย BHET (มากกว่าร้อยละ 75) และไดเมอร์ จากการตรวจสอบไม่พบโพลิโกลิเมอร์ขนาดใหญ่ของพีตอยู่เลย นอกจากนี้ยังพบว่าซิงก์แอสซีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงสุดเพราะให้ BHET ออกมามากที่สุด และพบว่าสีที่มีอยู่ในขวดเครื่องดื่มบางชนิดไม่มีผลต่อปฏิกิริยาไกลโคไลซิส

Pardal และ Tersac [16] ศึกษากลไกของกระบวนการไกลโคไลซิสจากไกลคอล 3 ชนิด คือ ไดเอทิลีนไกลคอล ไดโพรพิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ TBT เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก TBT ต่อพีตเท่ากับ 0.5 ต่อ 100 พบว่า ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของไกลคอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 220 องศาเซลเซียส เรียงตามลำดับดังนี้ ไดเอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล และไดโพรพิลีนไกลคอล ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของไกลคอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 190 องศาเซลเซียส เรียงตามลำดับดังนี้ ไดเอทิลีนไกลคอล ไดโพรพิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล

วารุณี วัฒนถนอม [17] ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนเพื่อใช้แยกไอออนของโลหะหนักจากการย่อยสลายขวดพีตที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสโดยใช้โพรพิลีนไกลคอลที่มากเกินพอในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพีตต่อโพรพิลีนไกลคอลเท่ากับ 37.5:62.5 และใช้ซิงก์แอสซีเทตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของพีตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซิสไปทำปฏิกิริยากับกรดแอดิฟิกเพื่อสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเทอร์พอลิออล แล้วนำพอลิออลที่เตรียมได้ผสมกับพอลิออลทางการค้าในอัตราส่วนต่างๆ กัน ทำให้ได้พอลิออลผสมที่ใช้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทน จากปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอริกไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (polymeric MDI)

กรดฟีนอลฟอสฟอนิกและน้ำ ซึ่งโพลีเมอร์ที่เตรียมได้นั้นประกอบด้วยสารแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่สามารถทำการแยกไอออนของโลหะหนัก เช่น ตะกั่วและทองแดงออกจากสารละลายได้

การนำไมโครเวฟมาใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในปฏิกิริยาเคมีนั้นกำลังได้รับความสนใจกันโดยทั่วไป เนื่องจากช่วยย่นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาได้มากและประหยัดพลังงาน ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2.450×10^9 เฮิร์ตซ์ มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สั้นกว่า ไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในการให้ความร้อนสำหรับการประกอบอาหารในครัวเรือนโดยทั่วไป ในเตาไมโครเวฟที่ใช้กันในบ้าน มีแมกนีตรอนทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไมโครเวฟ โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานในรูปคลื่นไมโครเวฟซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แล้วส่งผ่านคลื่นเข้าสู่วัตถุที่สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟจนทำให้โมเลกุลภายในเกิดการสั่นและหมุนส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นมาภายในทั่วทั้งวัตถุและส่งผ่านสู่โมเลกุลของวัตถุข้างเคียงทำให้เกิดการให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว

Li และคณะ [18] ศึกษาการย่อยสลายเพ็ดด้วยกระบวนการไฮโดรลิซิสในภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยากับภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ กันภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส กำลังของไมโครเวฟที่ใช้ 260 วัตต์ ใช้เวลาดำเนินปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 210 นาที และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อเพ็ดเป็น 10:1 พบว่าซิงก์แอสซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับมังกานีสแอสซิเตต โพแทสเซียมแอสซิเตต และโซเดียมออกซาลेट และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้คือร้อยละ 0.4 ต่อน้ำหนักของเพ็ด ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซิสส่วนใหญ่ประกอบด้วย BHET

Pingale และ Shukla [19] ศึกษาการย่อยสลายขวดเพ็ดด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสโดยใช้เอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วนระหว่างเพ็ดกับเอทิลีนไกลคอล 1:4 ถึง 1:10 โดยโมล เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ ในภาวะที่มีซิงก์แอสซิเตต โซเดียมคาร์บอเนต และเบเรียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.3 ถึง 1 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณ BHET ที่ได้สูงสุดนั้นอยู่ในช่วง 35 ถึง 40 นาที ที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และที่อัตราส่วนโดยโมลของเพ็ดต่อเอทิลีนไกลคอล 1:6 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ BHET ที่ได้จากการไกลโคไลซิสด้วยไมโครเวฟนั้นใกล้เคียงกับวิธีการให้ความร้อนทั่วไป แต่อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้สั้นลงอย่างมาก กล่าวคือจาก 8 ชั่วโมง เหลือประมาณ 35 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ไมโครเวฟซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานได้เป็นอย่างมาก

พร้อมภูมิ พันธุ์โรจน์ [20] ได้เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีดีภายใต้พลังงานไมโครเวฟโดยใช้ไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีดีต่อ ไกลคอล 1:6 ในภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิงค์แอสีเตต โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของพีดี พบว่าซิงค์แอสีเตต โซเดียมไบคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการไกลโคไลซ์พีดีภายใต้พลังงานไมโครเวฟ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับ MDI เพื่อสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทน ร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1,000 4,000 และ 6,000 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์โดยใช้ซิงค์แอสีเตตและโซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ได้ทุกชนิด ซึ่งชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมไกลโคไลซ์โปรดักส์มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป คุณสมบัติเริ่มการสลายตัว ความแข็ง ความทนแรงดึง และคุณสมบัติกลศาสตร์อื่น ๆ ของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ โดยเฉพาะเมื่อใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์จะทำให้ฟิล์มพอลิยูรีเทนมีความเป็นอิลาสโตเมอร์มากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

3.1.1 การย่อยสลายเม็ดด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ไดเอทิลีนไกลคอล ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเม็ดและไกลคอลเท่ากับ 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิงค์แอสซีเทต โซเดียมไบคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต รวมทั้งการวิเคราะห์ไกลโคไลซ์โปรดักส์ที่ได้

3.1.2 การสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขูดเม็ดใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยนำมาทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นประเภทไดไอโซไซยาเนต คือ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (4,4 diphenylMethanediisocyanate, MDI) ในระบบที่มีเซนเอกซ์เทนเดอร์อยู่ด้วย แล้วนำโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.2 วัสดุและสารเคมี

3.2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายขูดเม็ดด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

1. ขูดเม็ดใช้แล้ว
2. ไดเอทิลีนไกลคอล (HO CH₂CH₂O CH₂CH₂OH) : UNIVAR เกรดวิเคราะห์
3. ซิงค์แอสซีเทต ((CH₃COO)₂ZN₂H₂O) : UNIVAR เกรดวิเคราะห์
4. โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃): UNIVAR เกรดวิเคราะห์
5. โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃): UNIVAR เกรดวิเคราะห์

3.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน

1. ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ที่ได้จากการย่อยสลายขูดเม็ด
2. เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต หรือเอ็มดีไอ (MDI; C₁₅H₁₀N₂O₂): บริษัทสยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด
3. น้ำกลั่น
4. พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG; C_{2n+2}H_{4n+6}O_{n+2}): UNILAB เกรดวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล 4000 และ 6000

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.3.1 ขั้นตอนการย่อยสลายขวดเปิดด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

1. เครื่องบดละเอียด (pulverizer) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Pulverisette 15 (Idar-Oberstein, Germany)
2. เครื่องชั่ง แบบตัวเลขความละเอียดในระดับทศนิยม 2 ตำแหน่ง
3. ตู้อบไมโครเวฟ ยี่ห้อ LG รุ่น MS2127CW (ประเทศไทย) ซึ่งดัดแปลงเป็นพิเศษสำหรับใช้ในการทดลอง
4. ขวดแก้วก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมฐานรอง
5. เครื่องควบแน่น (condenser) พร้อมข้อต่อ สำหรับการรีฟลักซ์
6. ตู้อบสูญญากาศ (vacuum oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น behchickung-loading model 100-800 (Schwabach, Germany)
7. เครื่องปั่นแบบหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ยี่ห้อ Kubota รุ่น Compact Tabletop Centrifuge 2420 (Tokyo, Japan)
8. หลอดหมุนเหวี่ยง (centrifuge tube) ชนิดพลาสติก ขนาด 50 มิลลิลิตร
9. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์โพลีพอลิยูรีเทน

1. เครื่องปั่นกวนเชิงกลชนิดปรับความเร็วรอบได้ ยี่ห้อ IKA-WARKE รุ่น Eurostar digital (Staufen, Germany)
2. แม่แบบพลาสติก
3. นาฬิกาจับเวลา
4. เครื่องชั่ง แบบตัวเลขความละเอียดในระดับทศนิยม 2 ตำแหน่ง
5. เทอร์โมมิเตอร์ (0-200 องศาเซลเซียส)
6. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
7. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
8. หลอดหยด (dropper) พลาสติก ขนาด 3 มิลลิลิตร

3.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ

1. ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NICOLET 6700 FT-IR (Madison, WI)
2. เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล หรือจีพีซี (gel permeation chromatography system, GPC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Class-VP (Tokyo, Japan)

3. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน หรือทีจีเอ (thermogravimetric analyzer, TGA) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851° (Greifensee, Switzerland)
4. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ หรือดีเอสซี (differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DSC822° (Greifensee, Switzerland)
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL จำกัด รุ่น JSM-5800LV (Tokyo, Japan)
6. เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) ยี่ห้อ Brookfield รุ่น RVT (Stoughton, MA, U.S.A.)
7. เครื่องมีดทดสอบความสามารถในการคืนตัว

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การย่อยสลายพีตด้วยการไกลโคไลซ์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

1. นำขวดพีตที่ใช้แล้วมาล้างทำความสะอาด แล้วนำไปอบให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด (pulverizer) ที่มีตะแกรงร่อนเพื่อคัดขนาดของอนุภาคให้เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องบดละเอียด

2. นำผงพีตที่ได้จากการบดละเอียดแล้ว บรรจุลงในขวดก้นกลม
3. เติมไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) ในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างพีตกับไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4 และตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของพีตที่ใช้

ลงในขวดก้นกลม ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ ซิงค์แอซีเตต โซเดียมไบคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต

4. ดำเนินปฏิกิริยาการย่อยสลายที่เวลาต่างๆ คือ ที่เวลา 5 6 7 8 9 และ 10 นาที ภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าคงที่ คือ 600 วัตต์ โดยใช้ตู้อบไมโครเวฟที่ดัดแปลง โดยเฉพาะสำหรับการทดลองนี้ พร้อมกับต่อเครื่องควบแน่นแบบรีฟลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในขณะที่ทำปฏิกิริยามีการรีฟลักซ์ตลอดการทดลอง



รูปที่ 3.2 ตู้อบไมโครเวฟที่ดัดแปลงเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา

5. เมื่อครบระยะเวลาดำเนินปฏิกิริยา ปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเรียกว่า ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ หรือ ไกลโคไลซ์โพรดักส์ (glycolized product)

6. นำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ ที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นแบบหมุนเหวี่ยง ที่ความเร็ว 4,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที โดยทำซ้ำจำนวน 2 ครั้ง เพื่อทำการตกตะกอนสิ่งสกปรกหรือส่วนที่ไม่ละลายออกจากผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ทั้งหมด

7. นำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติ และสังเคราะห์เป็นโพลิเมอร์ในขั้นตอนต่อไป

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์

1. วิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี โดยนำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ที่ได้จากการย่อยสลายขดพืดด้วยการไกลโคลิซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อหาแถบดูดกลืนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งสามารถบอกถึงโครงสร้างทางเคมีของสารได้ โดยทดสอบในช่วงความถี่ $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความละเอียด (resolution) 4.0 cm^{-1}



รูปที่ 3.3 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโทรมิเตอร์

2. วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล (GPC) ซึ่งเป็นเทคนิคโครมาโทกราฟีที่นิยมใช้มากที่สุดในการตรวจวิเคราะห์พอลิเมอร์เนื่องจากสามารถใช้วิเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำถึงสูงมากได้ ใช้สารตัวอย่างในปริมาณน้อย ให้ข้อมูลทั้งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล โดยการวิเคราะห์เริ่มจากนำไกลโคไลซ์พอดักส์ที่ได้จากการย่อยสลายขดพืดด้วยการไกลโคลิซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ มาวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล หรือจีพีซี ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยชั่งสารน้ำหนักประมาณ 15 มิลลิกรัม แล้วนำไปละลายในเททระไฮโดรฟิวแรน

(tetrahydrofuran, THF) จากนั้นนำสารที่ได้มากรองเอาฝุ่นละอองออกโดยใช้กระดาษกรอง แล้วนำสารที่ได้ฉีดเข้าเครื่องจีพีซี ซึ่ง THF ทำหน้าที่เป็นเฟสเคลื่อนที่



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีแบบซึมผ่านเจล

3. วิเคราะห์และตรวจสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยร่นำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซ์ใส่บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิเมตร ให้ท่วมสเกลของหัววัดความหนืด แล้วจึงเปิดเครื่อง หาความหนืดที่ได้ นำความเร็วรอบและเบอร์ของหัววัดความหนืดไปหาค่าแฟกเตอร์จากคู่มือของเครื่อง และนำค่าที่อ่านได้จากสเกลบนเครื่อง คำนวณหาคความหนืดที่ได้ หน่วยเป็นเซนติพอยส์ โดยหัววัดความหนืดที่ใช้คือเบอร์ 1 ที่ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์

3.4.3 การสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรดักส์

1. เตรียมไกลโคไลซ์โพรดักส์ เช่นเอกซ์เทนเดอร์ น้ำ และ พอลิเมอริกเอ็มดีไอในสัดส่วนต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของไกลโคไลซ์โพรดักส์ พอลิเมอริกเอ็มดีไอ น้ำ และ เซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

สูตรที่	ชื่อสูตร	ผลิตภัณฑ์ ไกลโคไลซ์ (G*) (ส่วน)	เซนเอกซ์เทนเดอร์ (C*)	น้ำ	พอลิเมอริก เอ็มดีไอ (part by weight ของ G* และ C*)
1	PU (Zn(Ac) ₂)	100	-	3	194
2	PU (Zn(Ac) ₂) - PEG 4000	50	50	3	124
3	PU (Zn(Ac) ₂) - PEG 6000	50	50	3	144
4	PU (NaHCO ₃)	100	-	3	217
5	PU (NaHCO ₃) - PEG 4000	50	50	3	136
6	PU (NaHCO ₃) - PEG 6000	50	50	3	135
7	PU (Na ₂ CO ₃)	100	-	3	202
8	PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 4000	50	50	3	128
9	PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 6000	50	50	3	127

2. ในกรณีที่เซนเอกซ์เทนเดอร์เป็นผง ต้องนำไปหลอมเหลวในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่มีอุณหภูมิ 80 – 90 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 – 15 นาที

3. ผสมเซนเอกซ์เทนเดอร์กับไกลโคไลซ์โพรดักส์ในแม่แบบพลาสติก

4. กวนของผสมด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลชนิดปรับความเร็วรอบได้ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (blowing agent) ดังอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1

5. ในระหว่างที่ปั่นกวน ให้เติมพอลิเมอริกเอ็มดีไอ ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1

6. นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

3.4.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ของโพลีเอทิลีน

1. วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของโพลีเอทิลีนด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ซึ่งทำให้ทราบถึงลักษณะทางเคมีที่เกิดขึ้นในโพลีเอทิลีน โดยใช้ช่วงความถี่ $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความละเอียด 4.0 cm^{-1}

2. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนหรือทีจีเอ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างประมาณ 3 – 10 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะอะลูมินา (alumina crucible) แล้วทดสอบในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 1,000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไปเป็นร้อยละ (% weight loss)



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

3. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ หรือ ดีเอสซี ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) หรืออุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่มีน้ำหนักประมาณ 3 – 10 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะอะลูมิเนียม ซึ่งน้ำหนักสารที่แน่นอนแล้วปิดผนึก ซึ่งใช้อากาศเป็นสารอ้างอิง ภาวะที่ใช้ในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ทดสอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน และลดอุณหภูมิให้ต่ำลงด้วยไนโตรเจนเหลว



รูปที่ 3.7 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์

4. ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของโครงสร้างเซลล์โพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) โดยนำชิ้นงานตัวอย่างตัดเป็นแผ่นบางๆ ให้ความหนามีค่าใกล้เคียงกัน แล้วนำไปติดบนแท่นวางชิ้นทดสอบ จากนั้นไปเคลือบทอง แล้วนำมาวิเคราะห์ที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ที่กำลังขยาย 50 และ 100 เท่า โดยใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ (kV)



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

5. ตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานโฟม ตามมาตรฐาน ASTM D3574 Test A โดยตัดชิ้นงานโฟมให้มีขนาด 50 x 50 x 25 มิลลิเมตร จำนวนอย่างน้อย 3 ชิ้นทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณค่าตามสมการที่ 3.1

$$D = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น ในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

M คือ น้ำหนักของชิ้นงาน หน่วยเป็นกิโลกรัม

V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

6. ทดสอบความสามารถในการคืนตัว (compression set under constant deflection) ตามมาตรฐาน ASTM D3574 Test D ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการคืนตัวของชิ้นงานโฟมภายใต้แรงกด ด้วยเครื่องทดสอบที่ประกอบด้วยแผ่นเหล็ก 2 แผ่นหรือมากกว่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 วัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นนำไปคำนวณค่าตามสมการที่ 3.2 โดยมีวิธีทดสอบโดยสรุปดังนี้ เตรียมชิ้นทดสอบขนาด 50 x 50 x 25 มิลลิเมตร จำนวนอย่างน้อย 3 ชิ้น ทดสอบต่อสูตร

$$C_t (\%) = \frac{T_0 - T_f}{T_0} \times 100 \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบความสามารถในการคืนตัว

บทที่ 4

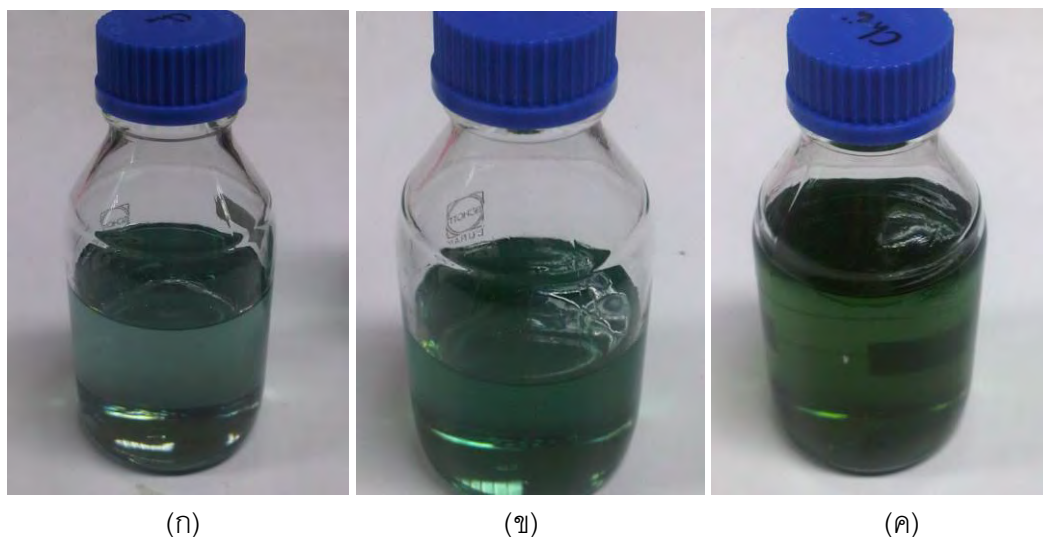
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การย่อยสลายขวดเปิดด้วยกระบวนการไกลโคไลซ์

เมื่อนำขวดเปิดใช้แล้วที่ผ่านการบดละเอียด มาย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้ ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเปิดกับไดเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1:4 ในภาวะที่มีซิงค์แอสีเทต โซเดียมไบคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของเปิดที่ใช้ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายขวดเปิดแตกต่างกัน กล่าวคือ ซิงค์แอสีเทต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการเร่งการไกลโคไลซ์เปิดให้เสร็จสมบูรณ์ในระยะเวลาที่สั้นที่สุด โดยผงเปิดเปลี่ยนเป็นของเหลวทั้งหมดในเวลา 6 นาที รองลงมาคือ 7 นาที และ 9 นาที เมื่อใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเปิดด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ เสร็จสมบูรณ์ได้ในระยะเวลาที่สั้นมากเมื่อเทียบกับการไกลโคไลซ์โดยการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การนำไมโครเวฟมาใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในปฏิกิริยาเคมีทำให้ลดระยะเวลาในการย่อยสลายขวดเปิดจากการให้ความร้อนปกติ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 – 8 ชั่วโมง [5] เนื่องจากทุกอนุภาคจะร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะของเหลวและสารที่มีขั้วหรือสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากจะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ดีทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วและถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอก ซึ่งรวมถึงเปิดด้วย ทำให้ปฏิกิริยาที่ได้นั้นเกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ใช้แหล่งความร้อนแบบดั้งเดิม [8] และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลาย คือ ไกลโคไลซ์โพรดักส์

4.1.1 ลักษณะของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ลักษณะของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการรีไซเคิลทางเคมีผ่านการไกลโคไลซ์ด้วย ไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปภายใต้พลังงานไมโครเวฟ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.31 โดยพบว่าการไกลโคไลซ์เปิดโดยใช้ซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีฟ้าอมเขียว โปร่งแสง มีความหนืดเล็กน้อย และเป็นเนื้อเดียวกันไม่แยกเฟส ในขณะที่ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตกับโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะ เป็น ของเหลวสีเขียวใส โปร่งแสง มีความหนืดเล็กน้อยและเป็นเนื้อเดียวกันเช่นเดียวกับไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่ง



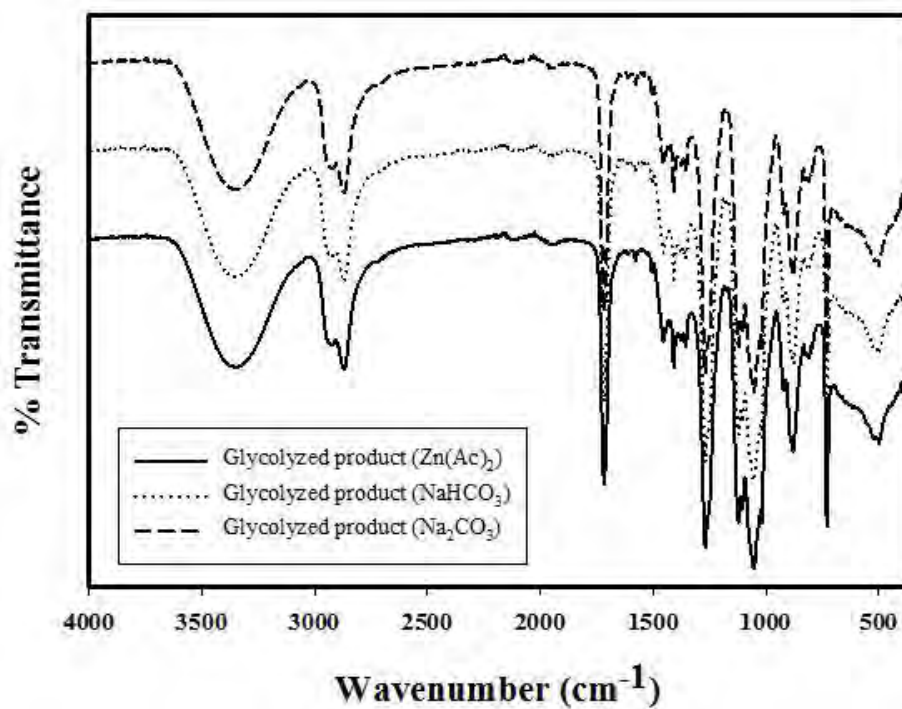
รูปที่ 4.1 ไกลโคไลซ์โปรตีนที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดพีตใช้แล้วด้วยไดเอทิลีนไกลคอล
เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

(ก) ซิงค์แอสีเทต (ข) โซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ค) โซเดียมคาร์บอเนต

เมื่อนำไกลโคไลซ์โปรตีนที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดพีตในภาวะที่มี ซิงค์แอสีเทต โซเดียมไบคาร์บอเนต และ โซเดียมคาร์บอเนต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไปวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ 112, 114 และ 112 เซนติพอยส์ ตามลำดับ

4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์

เมื่อนำไกลโคไลซ์โปรตีนมาตกตะกอนเพื่อแยกไกลคอลส่วนเกินออก แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

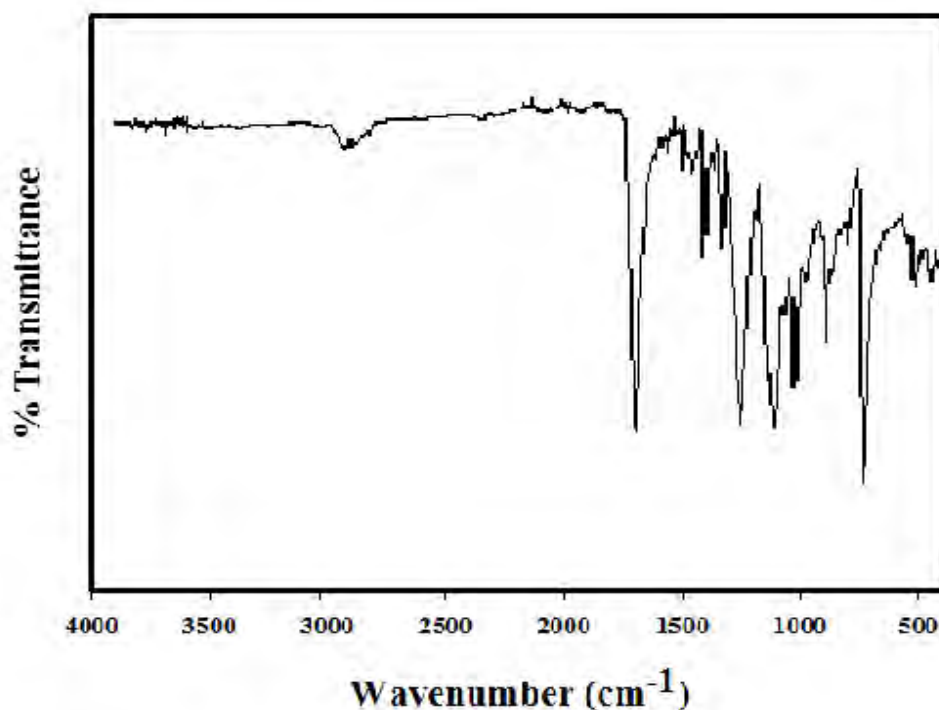


รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของเพ็ดที่ถูกไกลโคไลซ์ด้วยไดเอทิลีนไกลคอล

ตารางที่ 4.1 เลขคลื่น (Wave number) ของพีคสำคัญต่างๆ กับหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของไกลโคไลซ์โปรดักส์

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

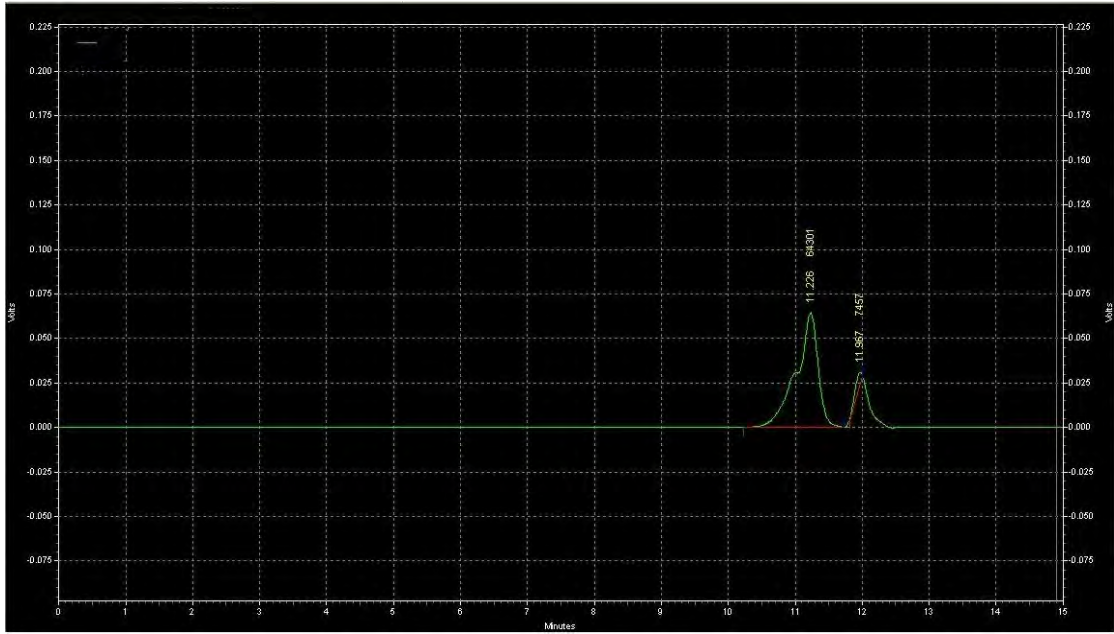
จากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 พบว่าสเปกตรัมของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ปรากฏพีกที่ใกล้เคียงกัน คือ ที่ตำแหน่ง 3348 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกในสเปกตรัมช่วงกว้างของเลขคลื่นที่ $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ และ 1053 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (-OH) และพันธะของคาร์บอนกับหมู่ไฮดรอกซิล (-C-OH) ตามลำดับ คาดว่าพบจากส่วนของพีตที่ถูกไกลโคไลซิสแล้วได้โมเลกุลเล็กลง [21] และส่วนของไดเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปเหลือในระบบ, ที่เลขคลื่น 2870 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ -CH ในโครงสร้างของ -CH_2 ที่คาดว่าจะมีอยู่ในโครงสร้างของพีตที่ถูกไกลโคไลซิส [22], ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1716 cm^{-1} เป็นพีกในสเปกตรัมช่วงเลขคลื่นที่ $1600\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิลพีกของ C=O, เลขคลื่น 1268 cm^{-1} พีกของ ether linkage (-C-O-C-) และที่เลขคลื่น 729 cm^{-1} แสดงถึง C-H ที่ตำแหน่ง para บนวงอะโรแมติก หมู่ฟังก์ชันที่พบในสเปกตรัมสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของพีตที่ถูกไกลโคไลซ์ กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของขูดพีตดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่งประมาณ $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล พีกดังกล่าวปรากฏชัดเจนในไกลโคไลซ์โปรดักส์ เนื่องจากโมเลกุลของพีตถูกตัดขาดเป็นสายโซ่สั้นๆ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ส่วนปลายของโมเลกุล สายโซ่โมเลกุลยิ่งสั้นปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลก็จะเพิ่มขึ้น



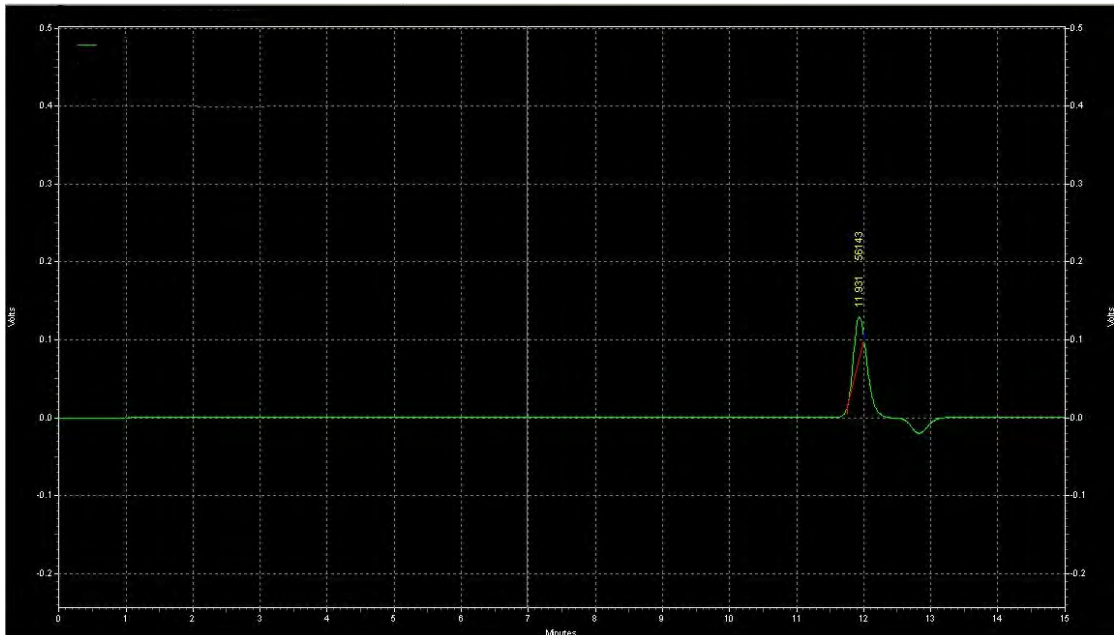
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของขูดพีต

4.1.3 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์

เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์มาวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคจีพีซีได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.5 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 GPC โครมาโทแกรมของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์เพ็ด



รูปที่ 4.5 GPC โครมาโทแกรมของไดเอทิลีนไกลคอลล

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจีพีซีโครมาโทแกรมของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ นั้นพบว่าจะให้โครมาโทแกรมของจีพีซีที่คล้ายคลึงกัน คือ ปรากฏพีคทั้งหมด 2 พีค ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีตนั้นประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน โดยพีคที่หนึ่งนั้นจะแสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีต ส่วนพีคที่สองนั้น แสดงถึงไดเอทิลีนไกลคอลส่วนเกินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เนื่องจากพีคที่สองนั้นปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับพีคในรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงจีพีซีโครมาโทแกรมของไดเอทิลีนไกลคอล และเมื่อนำไปคำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พีต

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้	\bar{M}_n	\bar{M}_w	Polydispersity Index
Zn (Ac) ₂	923	948	1.027
NaHCO ₃	1050	1155	1.100
Na ₂ CO ₃	925	950	1.027

จากตารางที่ 4.2 พบว่าไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้นั้นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 923, 1050 และ 925 เมื่อใช้ซิงค์แอซีเทต โซเดียมไบคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการย่อยสลายพีตด้วยปฏิกิริยาไกลโคลิซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

4.1.4 การหาค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ก่อนนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ไปใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนจำเป็นต้องหาค่าไฮดรอกซิลเสียก่อน เนื่องจากค่าไฮดรอกซิลที่หาได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณพอลิเมอร์ MDI ที่เหมาะสม สำหรับการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน

จากการทดสอบหาค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรตักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พืชด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ

ไกลโคไลซ์โพรตักส์	ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH/g)
Glycolyzed product (Zn(Ac) ₂)	550
Glycolyzed product (NaHCO ₃)	651
Glycolyzed product (Na ₂ CO ₃)	588

4.2 การเตรียมโพลียูรีเทนจากไกลโคไลซ์โพรตักส์

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของโพลียูรีเทนที่เตรียมได้

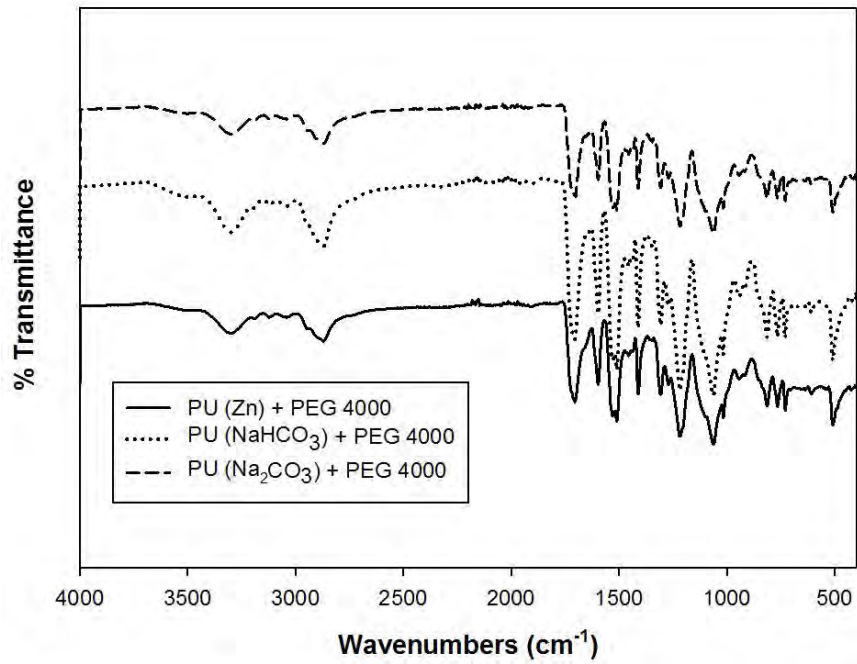
โพลียูรีเทนเตรียมได้โดยนำไกลโคไลซ์โพรตักส์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์พืชด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ไปทำปฏิกิริยากับพอลิเมอริกเอ็มดีไอ ร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ กันโดยใช้อัตราส่วนระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนตกับหมู่ไฮดรอกซิลเท่ากับ 1 (NCO/OH=1) และศึกษาผลของชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์ และความแตกต่างของไกลโคไลซ์โพรตักส์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ลักษณะของโพลียูรีเทนที่เตรียมได้แสดงไว้ ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของโพลียูรีเทนที่เตรียมได้

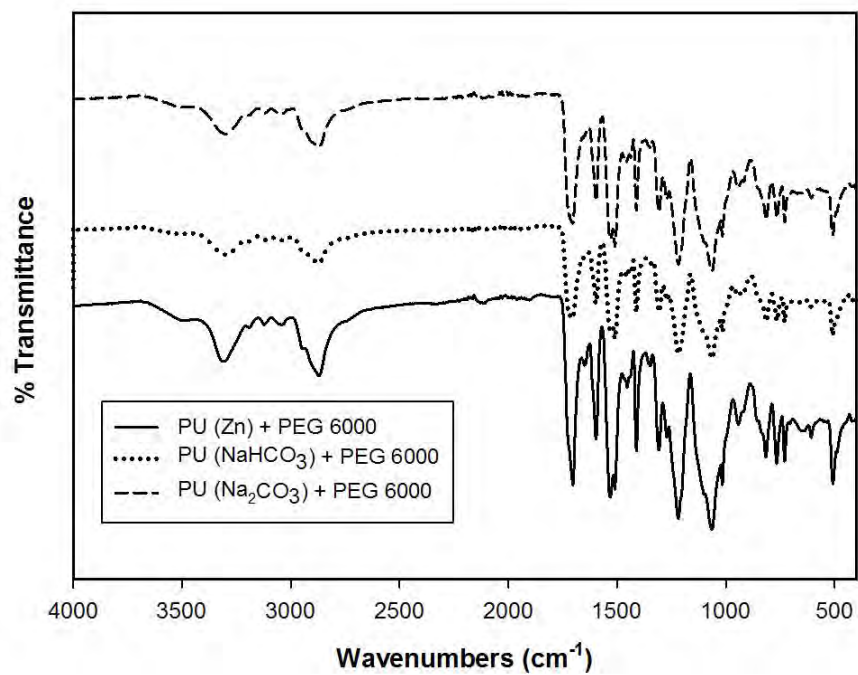
สูตรที่	ชื่อสูตร	ลักษณะของโพลียูรีเทนที่เตรียมได้
1	PU (Zn(Ac) ₂)	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้ คือ มีลักษณะแข็ง เป็นผง และเปราะ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
2	PU (Zn(Ac) ₂) - PEG 4000	แข็ง สีขาว เนื้อโฟมหยาบ เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อโฟม บ้างเล็กน้อย
3	PU (Zn(Ac) ₂) - PEG 6000	แข็ง สีขาว เนื้อโฟมหยาบ เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อโฟม
3	PU (NaHCO ₃)	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้ คือ มีลักษณะแข็ง เป็นผง และเปราะ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
5	PU (NaHCO ₃) - PEG 4000	แข็ง เนื้อโฟมละเอียด สีขาว
6	PU (NaHCO ₃) - PEG 6000	แข็ง เนื้อโฟมละเอียด สีขาว
7	PU (Na ₂ CO ₃)	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้ คือ มีลักษณะแข็ง เป็นผง และเปราะ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
8	PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 4000	แข็ง เนื้อโฟมแน่นละเอียด สีขาว
9	PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 6000	แข็ง เนื้อโฟมละเอียด สีขาว มีช่องว่างระหว่างเนื้อโฟมเล็กน้อย

4.2.2 โครงสร้างทางเคมีของโพลียูรีเทน

เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับพอลิเมอริกเอมีดไอโซร่วมกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ พบว่าหมู่ไฮดรอกซิลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตเกิดพันธะยูรีเทน ซึ่งเมื่อนำโฟมไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6-4.7 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคที่ปรากฏและหมู่ฟังก์ชันไว้ในตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวดพีตที่มีพอลิเอทิลีน ไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของโฟมพอลิยูรีเทนจากไกลโคไลซีโพรดักส์ของขวดพีตที่มีพอลิเอทิลีน ไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งของสเปกตรัมที่พบในโครงสร้างของโพลิเมอร์ที่เตรียมได้ ซึ่งมีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 และ 6000 เป็นเซนเซอร์

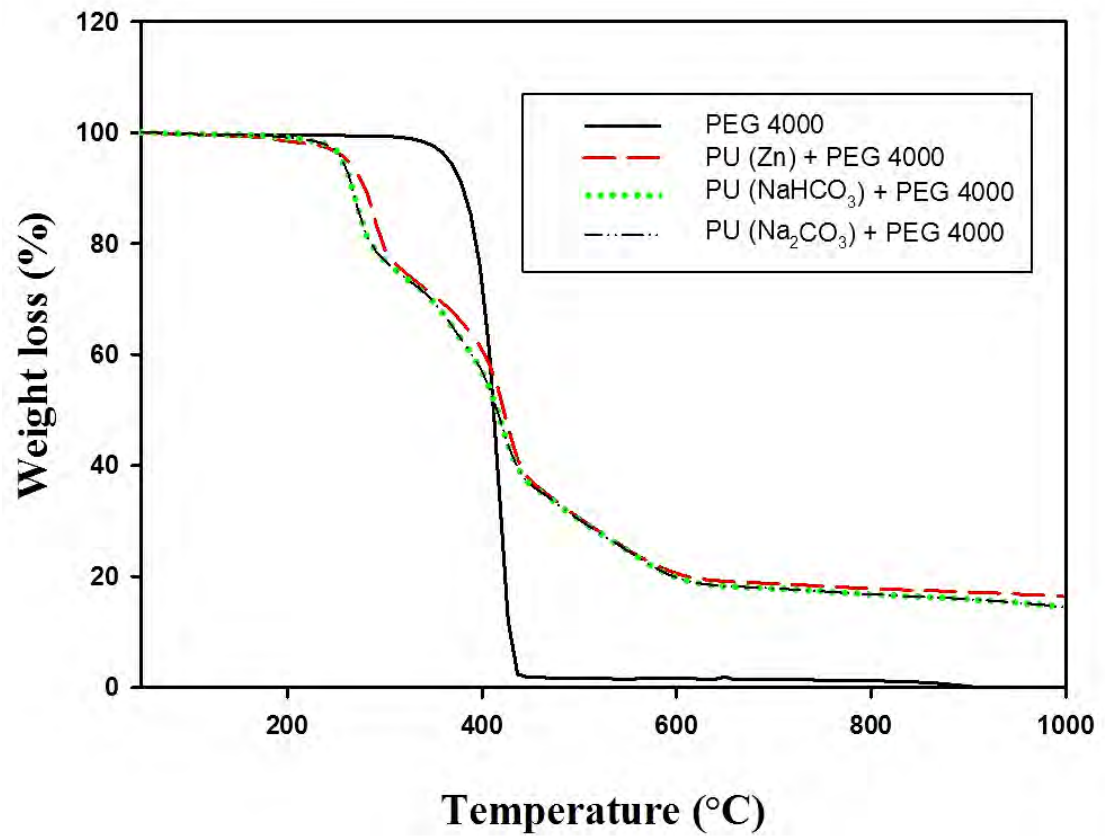
ตำแหน่งพีกที่ปรากฏ (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
3200-3600	-NH- stretching
2800-3000	-CH ₂ , -CH ₃
1600-1800	-C=O
1500-1800	-NH bending
1200-1400	-C-O-C-
1150-1100	-C-N
1000-1100	-C-OH

จากรูปที่ 4.6 – 4.7 และตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า หมู่ฟังก์ชันที่พบในสเปกตรัมสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของโพลิเมอร์ที่เตรียมได้ เมื่อพิจารณาที่รูป 4.5 – 4.7 พบว่าที่เลขคลื่นช่วง 3306 cm^{-1} และ 1530 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ -NH- stretching และ -NH- bending ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ -NH ในพันธะยูรีเทน และที่เลขคลื่น 1704 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (-C=O) อีเทอร์ ที่มีอยู่ใน urethane linkage, ที่เลขคลื่น 2870 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ -CH ในโครงสร้างของ -CH₂-CH₂ ที่คาดว่าอยู่ในโครงสร้างของโพลิเอทิลีนไกลคอลและ PEG ที่เข้าทำปฏิกิริยากันเป็นพอลิเมอร์ [23] ที่เลขคลื่น 1704 cm^{-1} และ 1218 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (-C=O) อีเทอร์และ ether linkage (-C-O-C-) ตามลำดับ ซึ่งอาจประกอบกันเป็น ester linkage สามารถพบได้ในโครงสร้างของโพลิเอทิลีนไกลคอลและ PEG และที่เลขคลื่นประมาณ 1,000 cm^{-1} อาจแสดงถึงพันธะ -C-N ที่มีอยู่ใน urethane linkage [24] แต่บริเวณที่เลขคลื่น 2270 cm^{-1} ไม่พบพีกใดเด่นชัด ซึ่งสามารถบอกได้ว่าไม่มีหมู่ของไอโซไซยาเนตหลงเหลืออยู่นั่นเอง

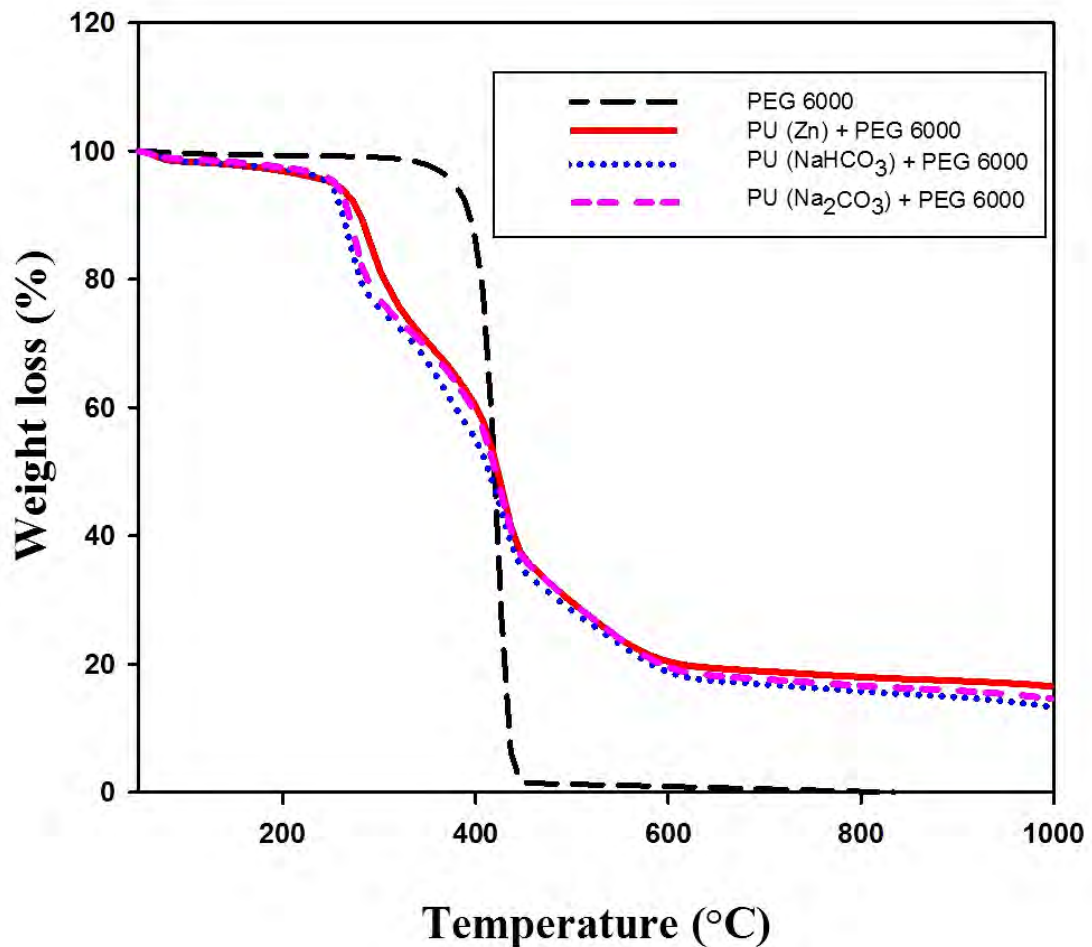
4.2.3 สมบัติทางความร้อนของโพลิเมอร์ที่เตรียมได้

1) คุณสมบัติการสลายตัว

ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของโพลิเมอร์ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคที่จี้เอ แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้โดยมีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์



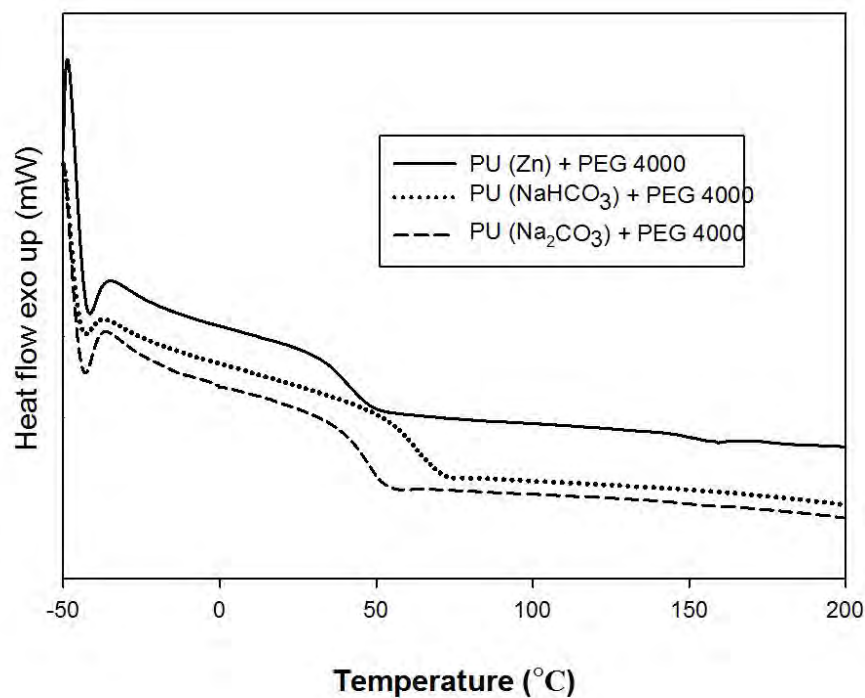
รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของโพลิเอทิลีนเทอเรนที่เตรียมได้โดยมีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์

จากรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 พบว่าโพลิเอทิลีนเทอเรนทุกสูตรแสดงเทอร์โมแกรมในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ มีช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน 2 ช่วง แม้จะใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ โดยโพลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ นั้น จะมีการสลายตัวในช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นการสลายตัวในส่วนของสายโซ่ที่มาจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ และช่วงที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นการสลายตัวในส่วนของสายโซ่ที่มาจากพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ใช้เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ ส่วนโพลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ นั้น มีการสลายตัวในช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 260 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ามีส่วนทำให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้จากเทอร์โมแกรม ที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 ยังพบว่าโพลิเอทิลีนเทอเรนที่เตรียมจากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเตต โซเดียมคาร์บอเนต และ

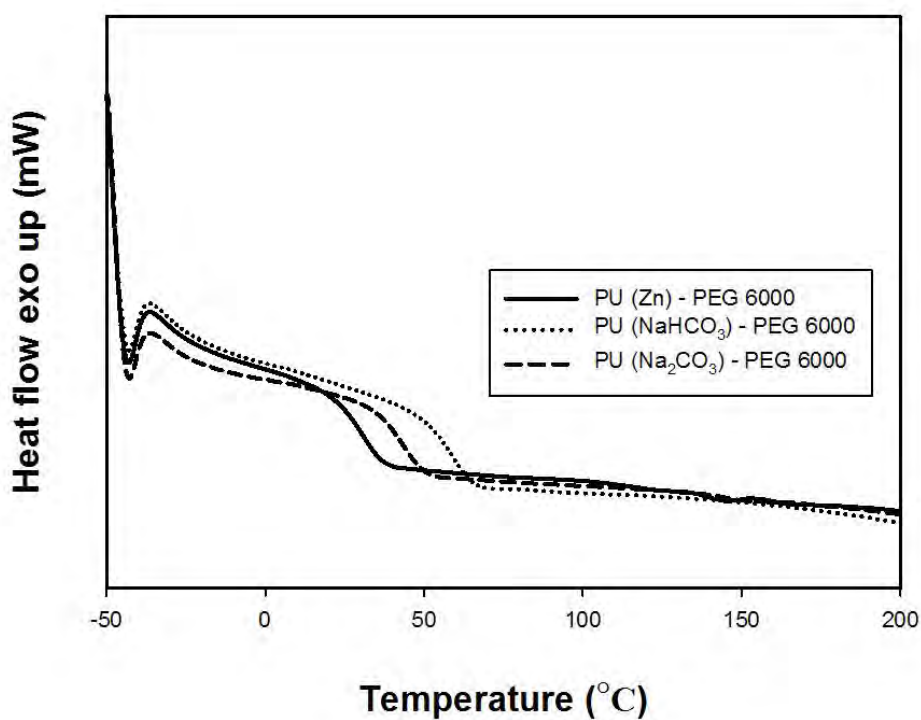
โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไกลโคไลซ์ขูดเพ็ดนั้น มีเสถียรภาพทางความร้อนไม่ต่างกันเท่าใดนัก

2) อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน

เมื่อนำโพลียูรีเทนที่เตรียมได้มาตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC หาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T_g) พบว่าได้ DSC เทอร์โมแกรมและข้อมูลเปรียบเทียบแต่ละสูตรได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 - 4.11 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า T_g โพลียูรีเทนที่ได้ในแต่ละสูตรนั้น มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความยาวสายโซ่โมเลกุลของโพลีเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สัดส่วนของ soft segment ต่อ hard segment เพิ่มมากขึ้น อีกทั้ง PEG มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวเคลื่อนไหวและเคลื่อนที่ได้ง่าย ดังนั้นจึงใช้ความร้อนน้อยลงในการให้พลังงานเพื่อทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนไหวและเคลื่อนที่ได้ง่าย



รูปที่ 4.10 DSC เทอร์โมแกรมของโพลียูรีเทนที่เตรียมได้โดยมีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์



รูปที่ 4.11 DSC เทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ที่เตรียมได้โดยมีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์

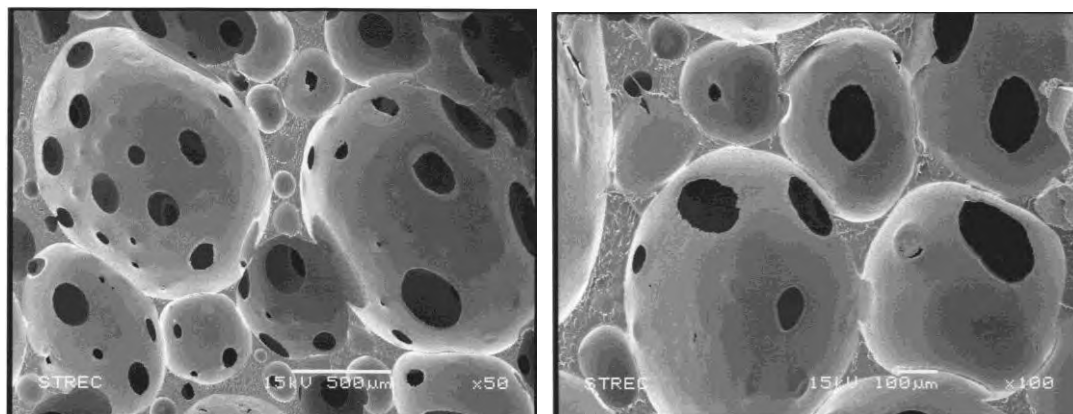
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของโพลิเมอร์สูตรต่างๆ ที่เตรียมได้จากไกลโคไลซ์ไพรดิกส์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันในการไกลโคไลซ์ขวดเพ็ด

สูตรที่	ชื่อสูตร	T_g (°C)
1	PU (Zn(Ac) ₂)- PEG 4000	31.8
2	PU (Zn(Ac) ₂)- PEG 6000	21.8
3	PU (NaHCO ₃) - PEG 4000	53.1
4	PU (NaHCO ₃) - PEG 6000	50.1
5	PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 4000	37.7
6	PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 6000	35.3

4.2.4 สันฐานวิทยาของโฟมพอลิยูรีเทน

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในรูปที่ 4.12 – 4.17 แสดงสันฐานวิทยาของเซลล์โฟมของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน ในการไกลโคไลซ์ขูดเปิด ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่า พบว่าเซลล์โฟมของโฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้ทุกสูตรมีลักษณะค่อนข้างกลม และมีลักษณะเป็นเซลล์ปิดเป็นส่วนใหญ่ แต่ความสม่ำเสมอของเซลล์โฟมจะแตกต่างกัน คือ โฟมพอลิยูรีเทนสูตร PU (Zn(Ac)₂) – PEG มีลักษณะของเซลล์โฟมไม่สม่ำเสมอ โดยประกอบไปด้วยเซลล์โฟมขนาดใหญ่และขนาดเล็กปะปนกัน เนื่องจากขณะขึ้นรูปเป็นโฟมนั้น เกิดการฟุ้งตัวอย่างรวดเร็ว คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟมมีมาก เป็นผลให้ปริมาณเซลล์โฟมเพิ่มขึ้นแต่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่เซลล์โฟมของโฟมพอลิยูรีเทนสูตร PU (NaHCO₃) – PEG 4000 PU (NaHCO₃) – PEG 6000 PU (Na₂CO₃) - PEG 4000 และ PU (Na₂CO₃) - PEG 6000 ขนาดของเซลล์โฟมค่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องมาจากการฟุ้งตัวในระหว่างการขึ้นรูปเป็นโฟมเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ขนาดของเซลล์โฟมที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ

ส่วนผลของความยาวสายโซ่ของเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้ พบว่าโฟมพอลิยูรีเทนที่ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ จะให้เซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากทำให้พอลิยูรีเทนที่ได้มีความยืดหยุ่นมากกว่า การฟุ้งตัวเป็นเซลล์โฟมจึงเกิดขึ้นง่ายกว่า

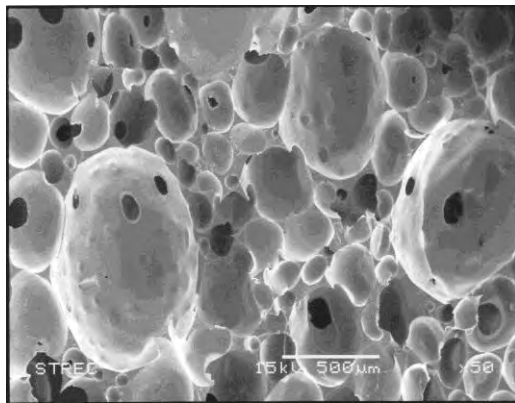


(ก)

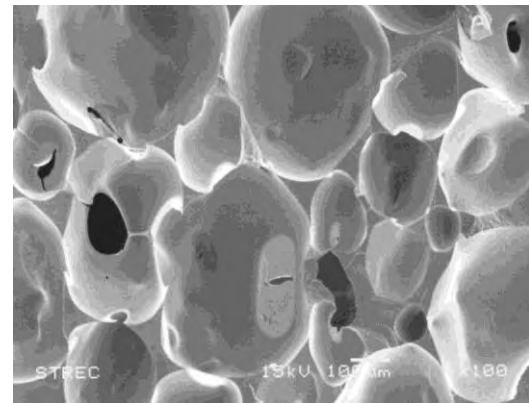
(ข)

รูปที่ 4.12 สันฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Zn(Ac)₂)- PEG 4000 ที่กำลังขยาย

(ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า

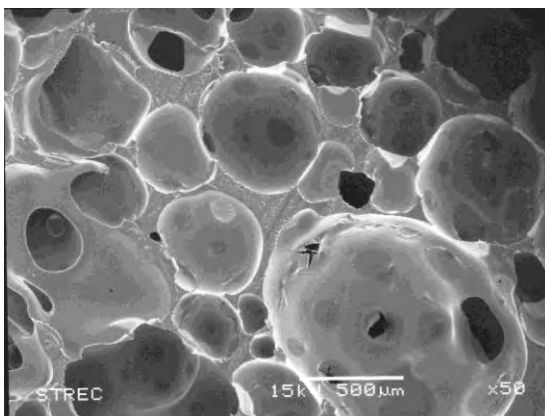


(ก)

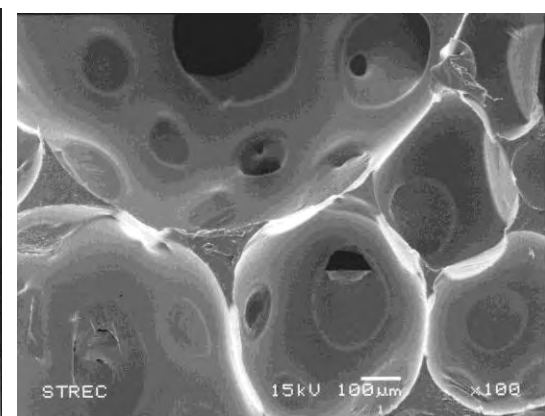


(ข)

รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Zn(Ac)₂)- PEG 6000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า

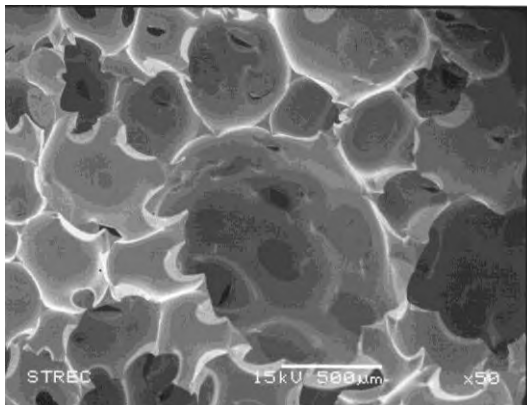


(ก)

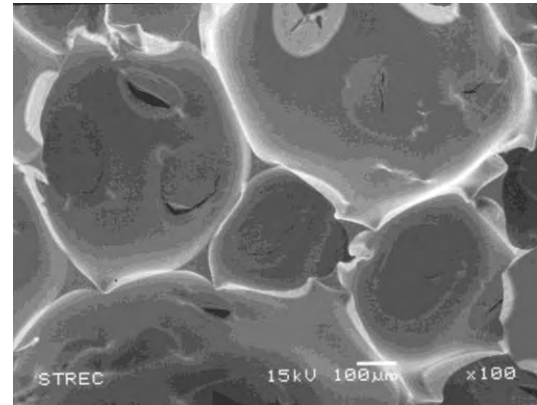


(ข)

รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (NaHCO₃) - PEG 4000 ที่กำลังขยาย (ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า



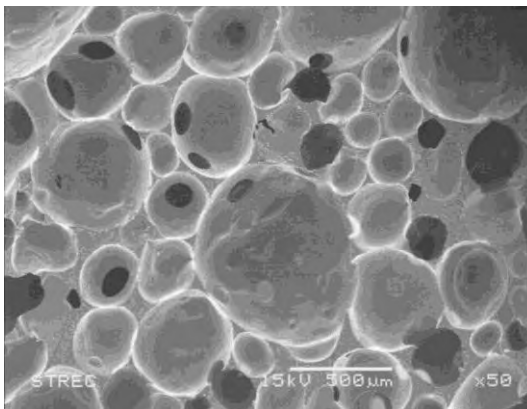
(ก)



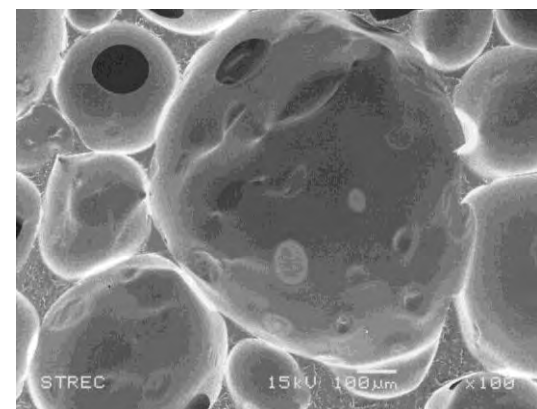
(ข)

รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (NaHCO_3) - PEG 6000 ที่กำลังขยาย

(ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า



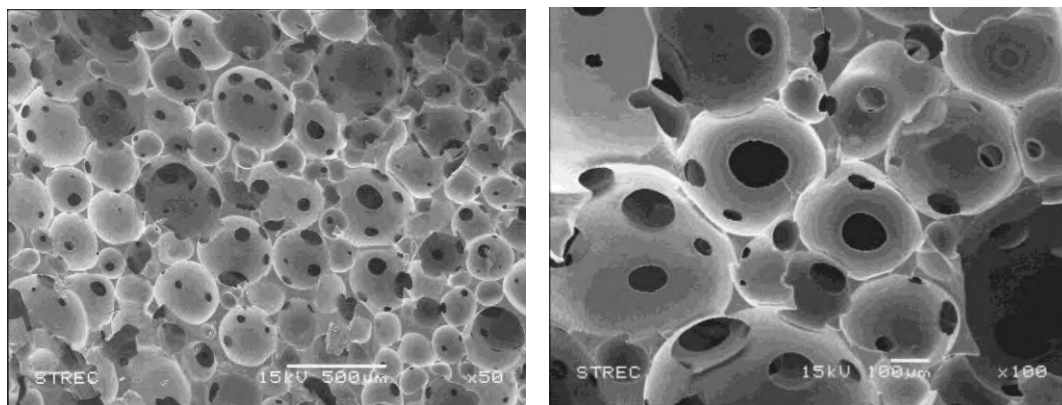
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Na_2CO_3) - PEG 4000 ที่กำลังขยาย

(ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า



(ก)

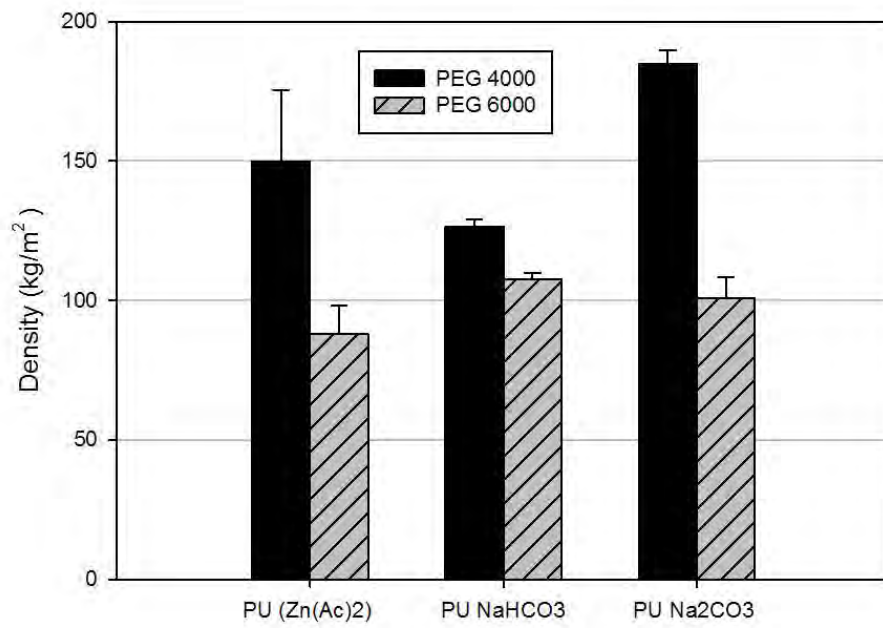
(ข)

รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของเซลล์ของโฟม สูตร PU (Na_2CO_3) - PEG 6000 ที่กำลังขยาย
(ก) 50 เท่า และ (ข) 100 เท่า

4.2.5 ตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานโฟม

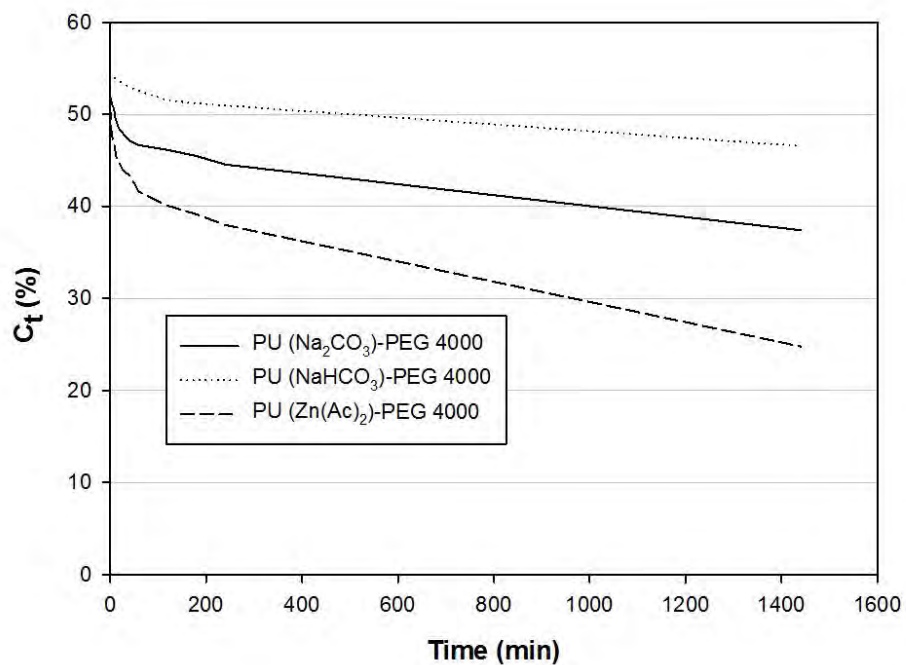
เมื่อนำโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ไปทดสอบหาความหนาแน่น ได้ผลดังแสดงในรูปที่ โดยพบว่าความหนาแน่นของโฟมที่ได้ อยู่ในช่วงตั้งแต่ 87.8 – 184.6 กิโลกรัม/ลบ.ม.

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า โฟมสูตร PU (Na_2CO_3) - PEG 4000 นั้นมีความหนาแน่นของโฟมมากที่สุด คาดว่าเนื่องมาจากการที่เซลล์โฟมของสูตรนี้ค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ โครงสร้างโฟมส่วนใหญ่เป็นเซลล์ปิดและเนื้อโฟมมีความละเอียด เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อโฟมน้อยทำให้ชิ้นโฟมมีความหนาแน่นของพอลิเมอร์มากที่สุด ในขณะที่โฟมสูตร PU ($\text{Zn}(\text{Ac})_2$) - PEG 6000 มีความหนาแน่นน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากเซลล์โฟมของสูตรนี้ค่อนข้างไม่ความสม่ำเสมอประกอบด้วยเซลล์ขนาดเล็กและใหญ่ อีกทั้งขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาโฟมเกิดการฟุ้งตัวเร็ว และฟุ้งตัวมาก เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อโฟม ปริมาตรของโฟมจึงเพิ่มมากขึ้น เนื้อโฟมหยาบ ดังนั้นความหนาแน่นของโฟมจึงลดลง

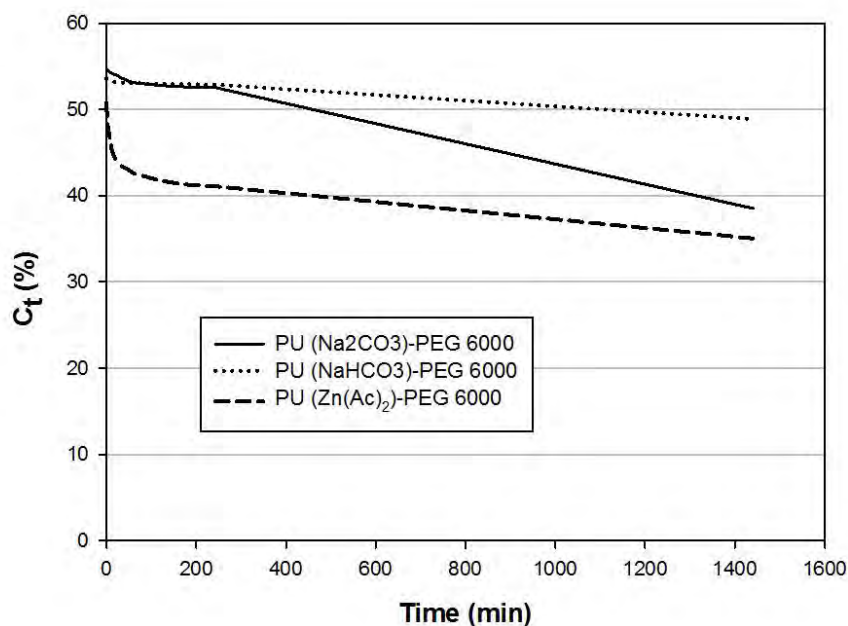


รูปที่ 4.18 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมที่สูตรต่างๆ

4.2.6 ความสามารถในการคืนตัว (compression set under constant deflection)



รูปที่ 4.19 ความสามารถในการคืนตัวของโฟมที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์



รูปที่ 4.20 ความสามารถในการคืนตัวของโพลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000 เป็นเซนเซอร์

จากรูปที่ 4.19 - 4.20 พบว่าโพลิเมอร์ทุกสูตรจะมีอัตราเร็วในการคืนตัวที่ช้าและคงที่มีเปอร์เซ็นต์การคืนตัวได้ไม่ค่อยดีเท่าไรนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก PEG 4000 และ 6000 นั้นพบว่า โพลิเมอร์ที่เตรียมจาก PEG 4000 มีอัตราเร็วในการคืนตัวที่เยอะกว่าเนื่องจาก PEG 6000 มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลที่ยาว และไม่กะทัดรัด ทำให้ไม่มีการเกาะเกี่ยวของสายโซ่โมเลกุล เมื่อโมเลกุลเคลื่อนที่ไปแล้วจึงมักไม่คืนกลับ ดังนั้นเป็นผลให้โพลิเมอร์ที่เตรียมจาก PEG 6000 มีการคืนตัวที่ต่ำ นอกจากนี้ก็โดยสาเหตุดังกล่าวน่าจะมาจากเซลล์โพลิเมอร์มีลักษณะเป็นแบบปิด และผนังเซลล์มีความแข็งแรงเป็นบางจุดทำให้เกิดการแตกหักของผนังเซลล์เมื่อได้รับแรงกด ทำให้โพลิเมอร์คืนตัวกลับมาได้น้อยลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การย่อยสลายขวดPETใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงกว่าการย่อยสลายด้วยการให้ความร้อนแบบเดิม กล่าวคือPETถูกย่อยสลายหมดที่ระดับพลังงานไมโครเวฟ 600 วัตต์ ภายในเวลาประมาณ 5 – 10 นาที ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายPETให้หมดไปนี้ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาด้วยการให้ความร้อนแบบเดิม

5.1.2 นอกจากการใช้ซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ยังสามารถใช้สารชนิดอื่นที่ไม่เป็นพิษและหาได้ง่ายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไกลโคไลซิสภายใต้พลังงานไมโครเวฟได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยพบว่าซิงค์แอสีเทตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถย่อยสลายPETได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือโซเดียมไบคาร์บอเนตซึ่งให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วนโซเดียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

5.1.3 เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มาสังเคราะห์เป็นโฟมพอลิยูรีเทนได้ โดยการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอริกเอ็มดีไอ พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้ เนื่องจากไกลคอลที่ใช้เป็นโมเลกุลเล็ก สายโซ่โมเลกุลของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้จึงค่อนข้างแข็งเกร็งอันเป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างโมเลกุลของPET เมื่อนำมาเตรียมเป็นโฟมจึงไม่ยืดหยุ่นพอที่จะเกิดเป็นเซลล์โฟมได้

5.1.4 เมื่อนำไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มาสังเคราะห์เป็นโฟมพอลิยูรีเทนได้ โดยการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอริกเอ็มดีไอ และใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นโฟมพอลิยูรีเทนได้ เนื่องจากเซนเอกซ์เทนเดอร์ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับโมเลกุลของพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้น ทำให้มีความยืดหยุ่นพอที่จะเกิดเป็นเซลล์โฟมได้

5.1.5 ลักษณะและสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้ ขึ้นกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ใช้ กล่าวคือ การใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ที่มีสายโซ่ยาวกว่าจะให้โฟมที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า

5.1.6 ลักษณะและสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้ ขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในขั้นตอนการไกลโคไลซ์ กล่าวคือ โฟมที่สังเคราะห์ได้จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีความสม่ำเสมอของเซลล์โฟมมากที่สุด รองลงมาได้แก่โฟมที่สังเคราะห์ได้จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตและซิงค์แอซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.7 การคืนตัวของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในขั้นตอนการไกลโคไลซ์และชนิดของเซนเอกซ์เทนเดอร์ กล่าวคือ โฟมที่สังเคราะห์จากไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ใช้ซิงค์แอซีเตตในขั้นตอนการไกลโคไลซ์ และโฟมที่ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 4,000 เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ มีความสามารถในการคืนตัวที่ดีกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ระดับพลังงานของไมโครเวฟรวมทั้งระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไกลโคไลซิส การปรับเปลี่ยนกำลังวัตต์และระยะเวลาที่สามารถทำให้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน จึงอาจศึกษาปัจจัยดังกล่าวเพื่อให้ได้ไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่มีความเหมาะสมกับการนำไปสังเคราะห์เป็นโฟมพอลิยูรีเทนที่มีสมบัติต่างๆ

5.2.2 การใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ส่งผลต่อสมบัติ ลักษณะ รวมทั้งสัณฐานวิทยาของโฟมที่ได้เป็นอย่างมาก จึงอาจศึกษาถึงปัจจัยเกี่ยวกับชนิดและความยาวของสายโซ่เซนเอกซ์เทนเดอร์ เพื่อให้ได้โฟมพอลิยูรีเทนที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน

5.2.3 เนื่องจากไกลคอลที่ใช้ในการย่อยสลายนี้มีสายโซ่ค่อนข้างสั้น ส่งผลให้สายโซ่ของไกลโคไลซ์โพรดักส์ที่ได้มีความแข็งแรง ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมพอลิยูรีเทนได้ ดังนั้นอาจศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไกลคอลที่มีสายโซ่ยาวขึ้นเพื่อให้สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมพอลิยูรีเทนได้โดยไม่ต้องใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์

5.2.4 การเปลี่ยนชนิดของไดไอโซไซยานาตที่ใช้ อาจสามารถสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนที่มีสมบัติ ลักษณะ รวมทั้งสัณฐานวิทยาที่แตกต่างไปได้

รายการอ้างอิง

- [1] Scheirs, J., and Kaminsky, W. Feedstock recycling of PET. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. United Kingdom : John Wiley & Sons Ltd, (2006).
- [2] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาการรีไซเคิลพลาสติก. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [3] Karayannidis, G.P., and Achilias, D.S. Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). Macromolecular Materials and Engineering 2, (2007): 128–146.
- [4] Xi, G., Lu, M. and Sun, C. Study on depolymerization of waste polyethylene terephthalate into monomer of bis(2-hydroxyethyl terephthalate). Polymer Degradation and Stability 87, (2005): 117-120.
- [5] Navnath, D.P., Vikrant, S.P., and Shukla, S. R. Glycolysis of postconsumer polyethylene terephthalate waste. Journal of Applied Polymer Science 115, (2010) : 249–254.
- [6] ดวงดาว อาจองค์. เอกสารประกอบการสอนวิชาพลาสติกเชิงพาณิชย์และพลาสติกวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [7] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีโพลีเมอร์พื้นฐาน พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2527.
- [8] Louis, L. Nowacky ,J. Energy Conservation in Textile and Polymer Processing. Washington, D.C. : American Chemical Society,1979.
- [9] Pentrakoon, D., and Ellis, W. An Introduction to plastic foams. Bangkok : Chulalongkorn University press, 2005
- [10] George, W. The ICI Polyurethanes Book. 2nd Edition. Netherland, 1990.
- [11] ธราศรัย แสงภักดี. การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [12] Daniel, K and Kurt, C.F. Handbook of polymeric foams and foam technology. New York, 199.

- [13] Ma, E. C. Thermoplastic polyurethane elastomers. In B. M. Walker; and C.P. Rader (eds.), Handbook of Thermoplastic Elastomers. New York: Van Nostrand Reinhold, (1988): 224-255.
- [14] Vaidya, U.R., and Nadkarni, V.M. Unsaturated polyesters from PET waste: 3. Kinetics of polycondensation. Journal of Applied Polymer Science 9, (2003): 235-245.
- [15] Baliga, S., and Wong, W.T. Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) recycled from post-consumer soft-drink bottles. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry 15, (1988): 2071 - 2082.
- [16] Pardal, F., and Tersac, G. Comparative reactivity of glycols in PET Glycolysis. Polymer Degradation and Stability 25, (2006): 2567-2578.
- [17] วารุณี วัฒนถนอม. การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจากขวดพลาสติกที่ใช้แล้วเพื่อใช้แยกไอออนของโลหะหนัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [18] 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.
- [19] Pingale, N.D., and Shukla, S.R. Microwave assisted ecofriendly recycling of poly(ethylene terephthalate) bottle waste. European Polymer Journal 26, (2008): 4151-4156.
- [20] พร้อมภูมิ พันธุ์โรจน์. การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวดพลาสติกใช้แล้วภายใต้พลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [21] วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาการตรวจสอบและการวิเคราะห์พอลิเมอร์ กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [22] 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.

- [23] Hepburn, C. Polyurethane Elastomers. 2nd ed. London : Elsevir applied science, 1991.
- [24] Pardal, F., and Tersac, G. Comparative reactivity of glycols in PET glycolysis. Polymer Degradation and Stability 91, (2006): 2567-2578.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ค่าไฮดรอกซิลของไกลโคไลซ์โพรดักส์

ไกลโคไลซ์โพรดักส์	ครั้งที่	ปริมาณ NaOH (ml)	น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)	ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH/g)
Glycolyzed product (Zn(Ac) ₂)	1	90.5	0.50	539.10
	2	90.2	0.50	555.95
	3	90.0	0.51	556.06
	เฉลี่ย			550.37
Glycolyzed product (NaHCO ₃)	1	88.4	0.50	657.03
	2	88.4	0.50	657.03
	3	88.7	0.50	640.18
	เฉลี่ย			651.41
Glycolyzed product (Na ₂ CO ₃)	1	89.5	0.50	595.26
	2	89.6	0.50	589.64
	3	89.6	0.51	578.08
	เฉลี่ย			587.66

Normality ของ NaOH = 0.5005

ปริมาณของ NaOH ที่ใช้ไทเทรต blank = 100.1 ml

ก-2 การคำนวณค่าไฮดรอกซิลนัมเบอร์ของไกลโคไลซีไฟรด์ิกส์ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่าง ๆ ต่อไปนี้

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

เมื่อ B คือ ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ไทเทรต blank (ml.)

A คือ ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้สารตัวอย่าง (ml.)

N คือ Normality ของ NaOH

W คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g)

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข

การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน

ข-1 การคำนวณปริมาณพอลิเมอริกเอมดีไอ ที่อัตราส่วน NCO : OH = 1 : 1

การคำนวณปริมาณพอลิเมอริกเอมดีไอ เมื่อใช้สารประกอบไฮดรอกซิลหลายชนิด โดยใช้ค่า Equivalent weight (Eqw) ของสารประกอบไฮดรอกซิล ปริมาณสารที่ใช้ และ Eqw ของพอลิเมอริกเอมดีไอ ดังนี้

1. คำนวณค่า Eqw และ No. Eqw ของสารประกอบไฮดรอกซิล

$$\text{จากสูตร Equivalent weight} = \frac{56.1 \times 1,000}{\text{OH}}$$

$$\text{No. Eqw} = \frac{\text{ปริมาณที่ใช้}}{\text{Equivalent weight}}$$

2. คำนวณปริมาณพอลิเมอริกเอมดีไอที่ใช้

$$\text{จากสูตร ค่าไอโซไซยาเนต (isocyanate value)} = \frac{4,200}{\text{Equivalent weight}}$$

เนื่องจากค่าไอโซไซยาเนตของพอลิเมอริกเอมดีไอ = 29.2 %

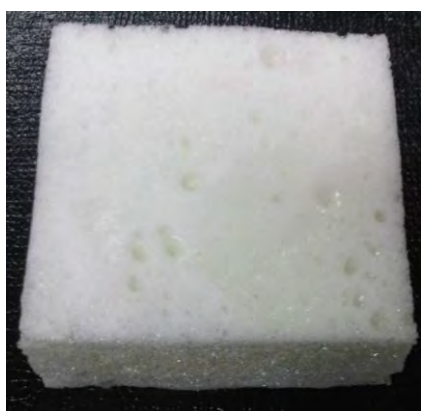
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น Equivalent weight ของพอลิเมอริกเอมดีไอ} &= \frac{4,200}{29.2} \\ &= 143.84 \end{aligned}$$

ปริมาณพอลิเมอริกเอมดีไอที่ใช้ = Eqw ของพอลิเมอริกเอมดีไอ x No. Eqw รวมของสารประกอบไฮดรอกซิล

ภาคผนวก ค

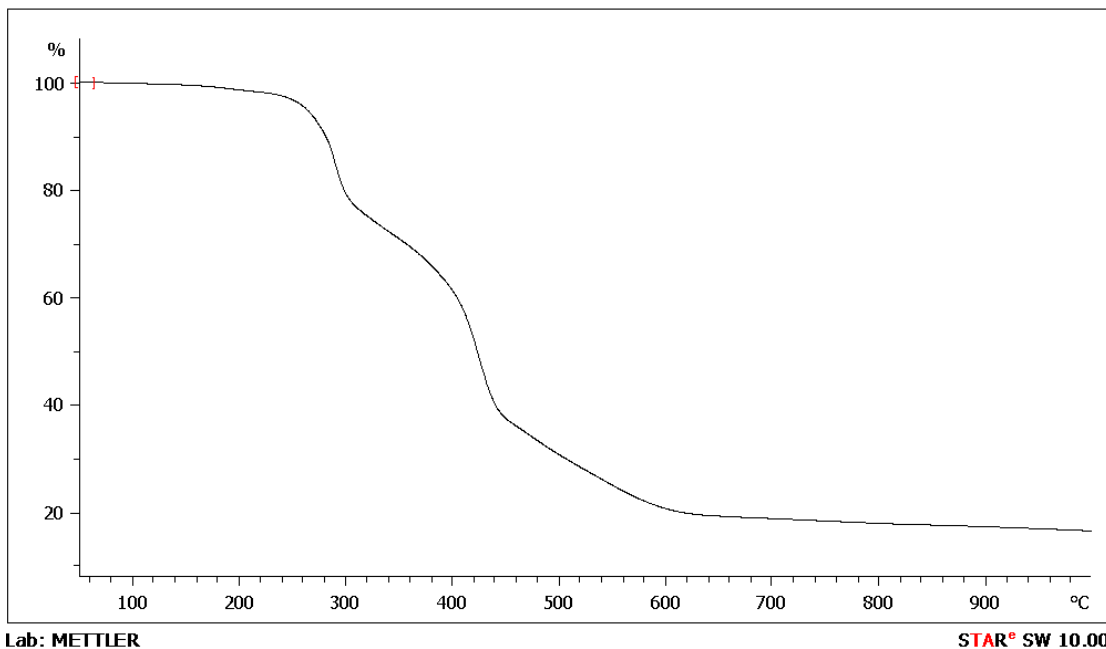
ภาคผนวก ค

ลักษณะของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆ

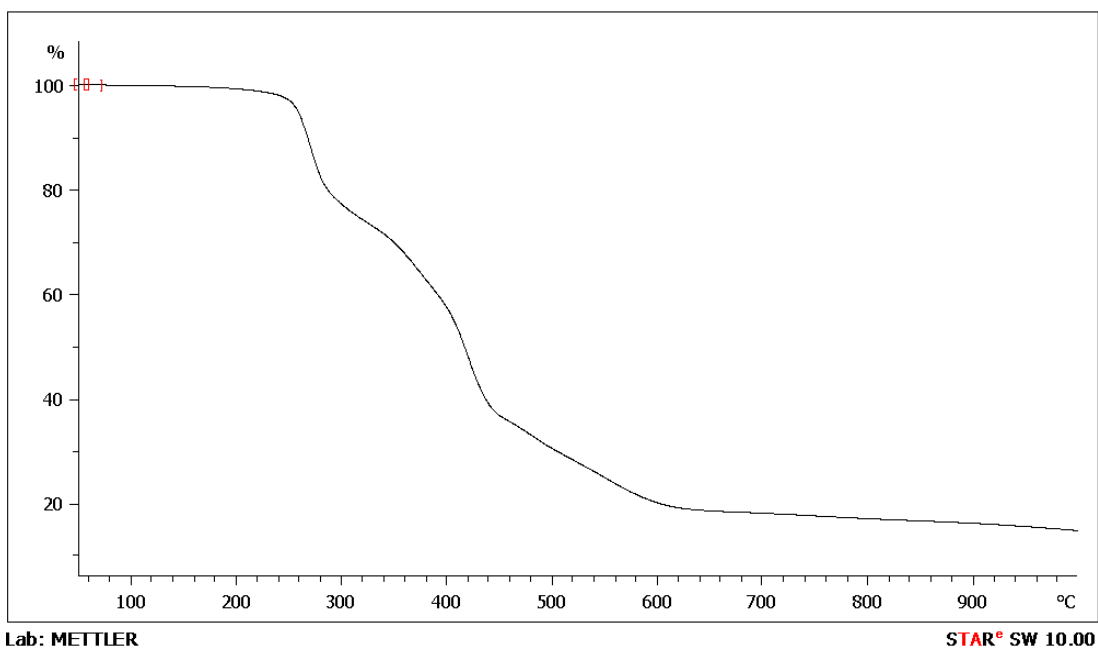
รูป ค-1 สูตร PU ($\text{Zn}(\text{Ac})_2$) - PEG 4000รูป ค-2 สูตร PU ($\text{Zn}(\text{Ac})_2$) - PEG 6000รูป ค-3 สูตร PU (NaHCO_3) - PEG 4000รูป ค-4 สูตร PU (NaHCO_3) - PEG 6000รูป ค-5 สูตร PU (Na_2CO_3) - PEG 4000รูป ค-6 สูตร PU (Na_2CO_3) - PEG 6000

ภาคผนวก ง

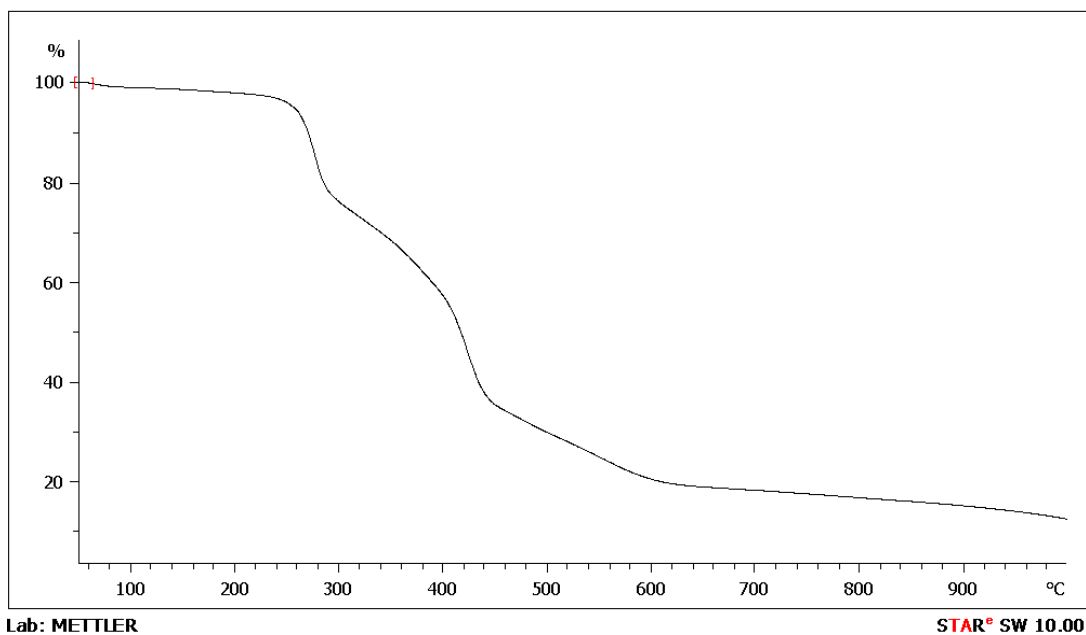
ภาคผนวก ง
ทีจีเอเทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ชนิดต่างๆ



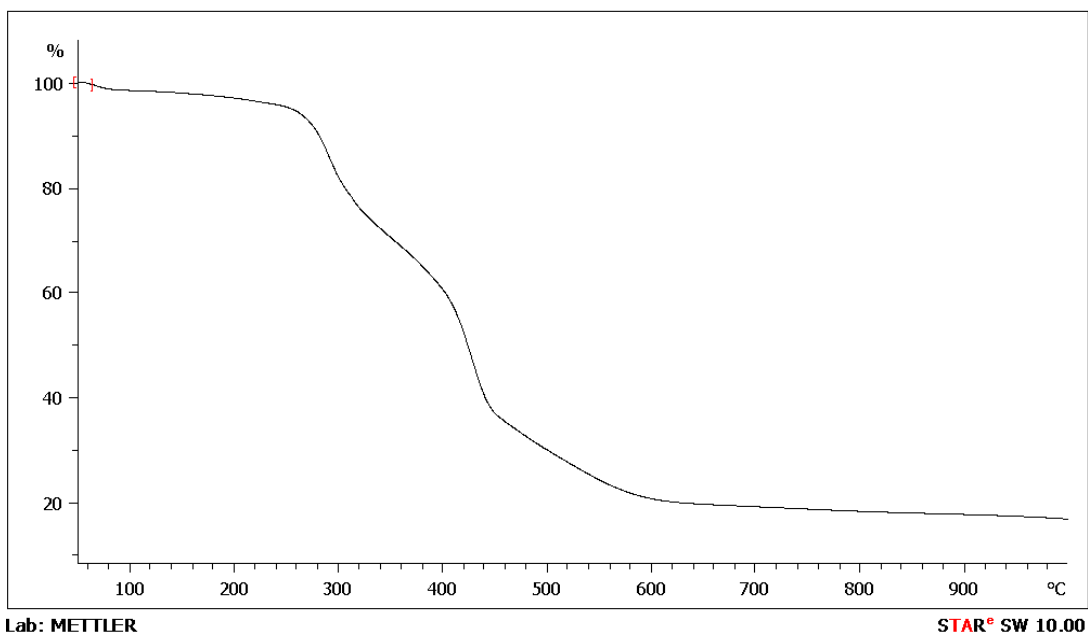
รูป ง-1 TGA เทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ชนิด PU (Zn(Ac)₂) - PEG 4000



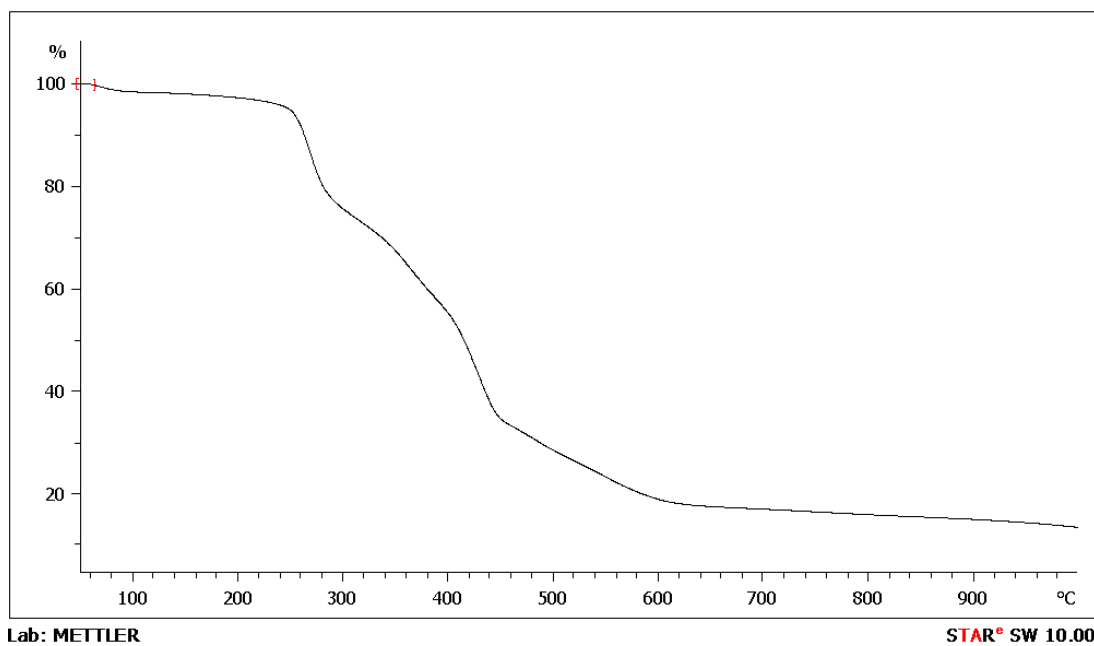
รูป ง-2 TGA เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU (NaHCO₃) - PEG 4000



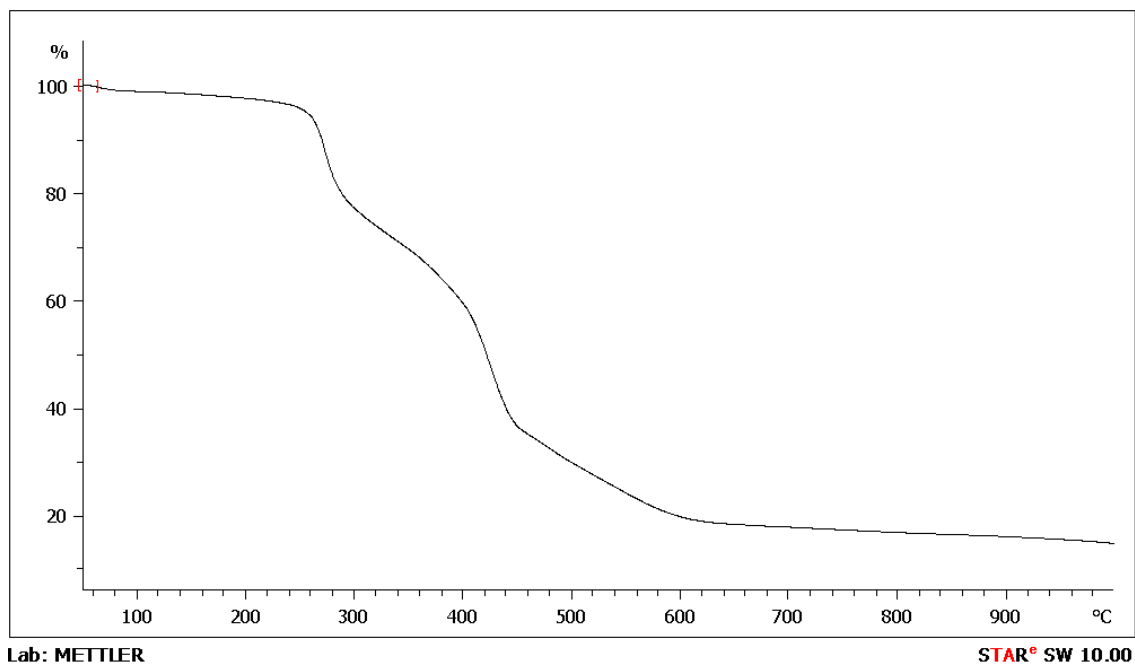
รูป ง-3 TGA เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU (Na₂CO₃) - PEG 4000



รูป ง-4 TGA เทอร์โมแกรมของโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU (Zn(Ac)₂) - PEG 6000



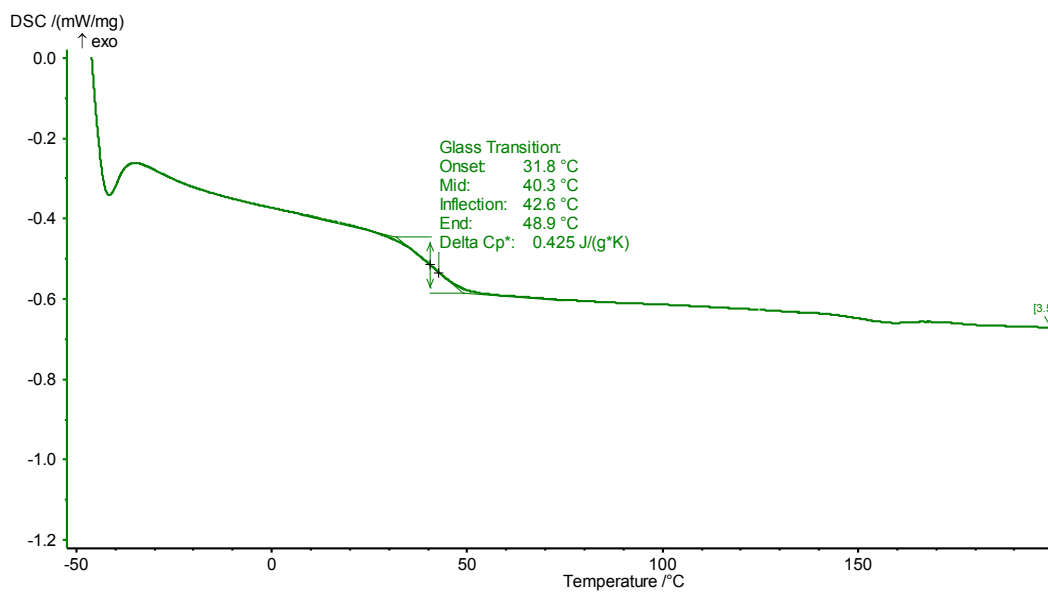
รูป ง-5 TGA เทอร์โมแกรมของโพลีเอทิลีน เทอร์ฟทาเลต สูตร PU (NaHCO₃) - PEG 6000



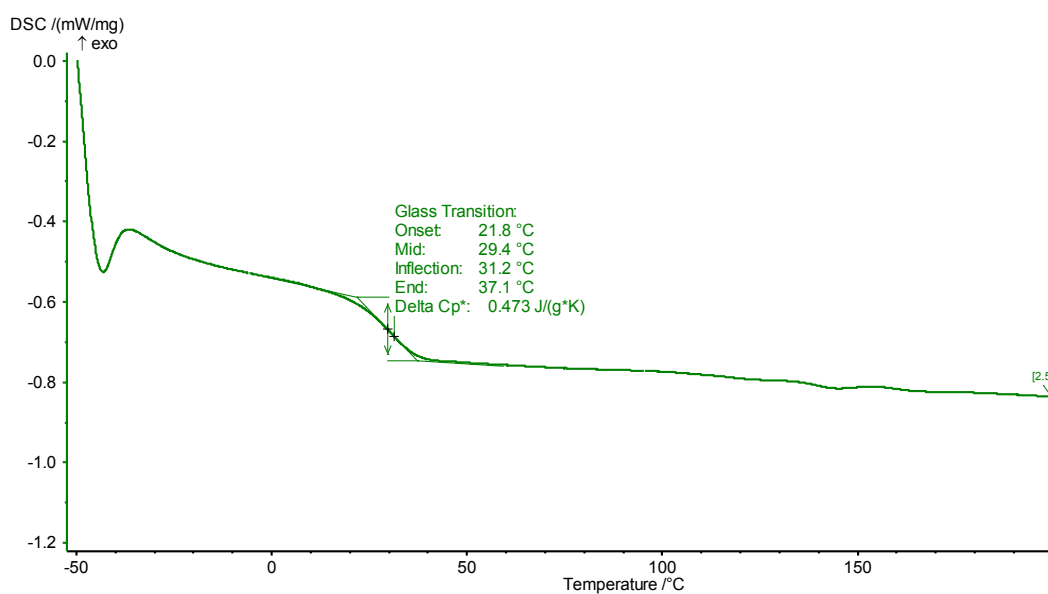
รูป ง-6 TGA เทอร์โมแกรมของโพลีเอทิลีน เทอร์ฟทาเลต สูตร PU (Na₂CO₃) - PEG 6000

ภาคผนวก จ

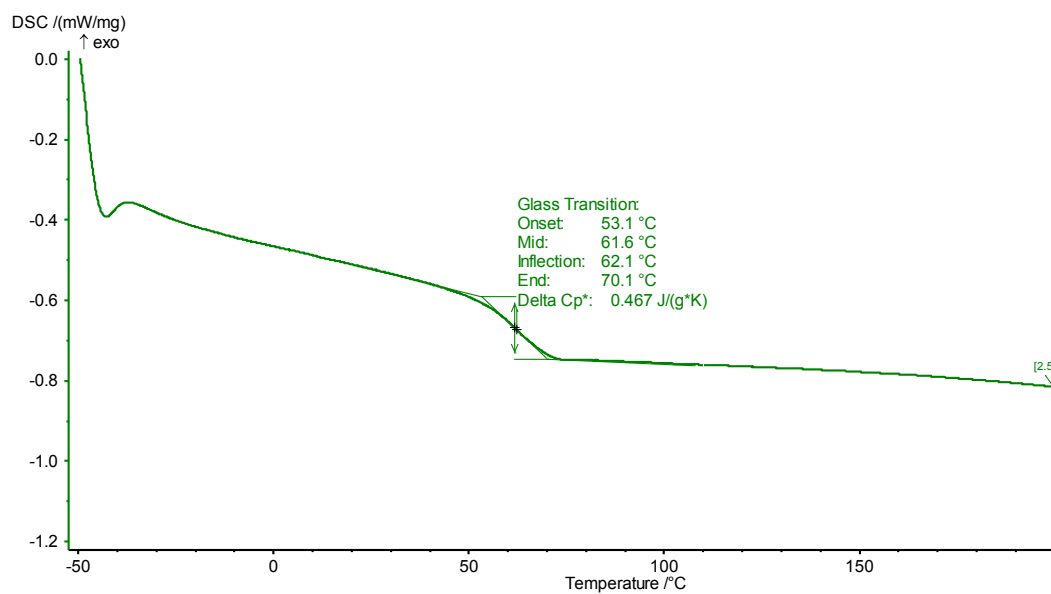
ภาคผนวก จ
 ดีเอสซีเทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ชนิดต่างๆ



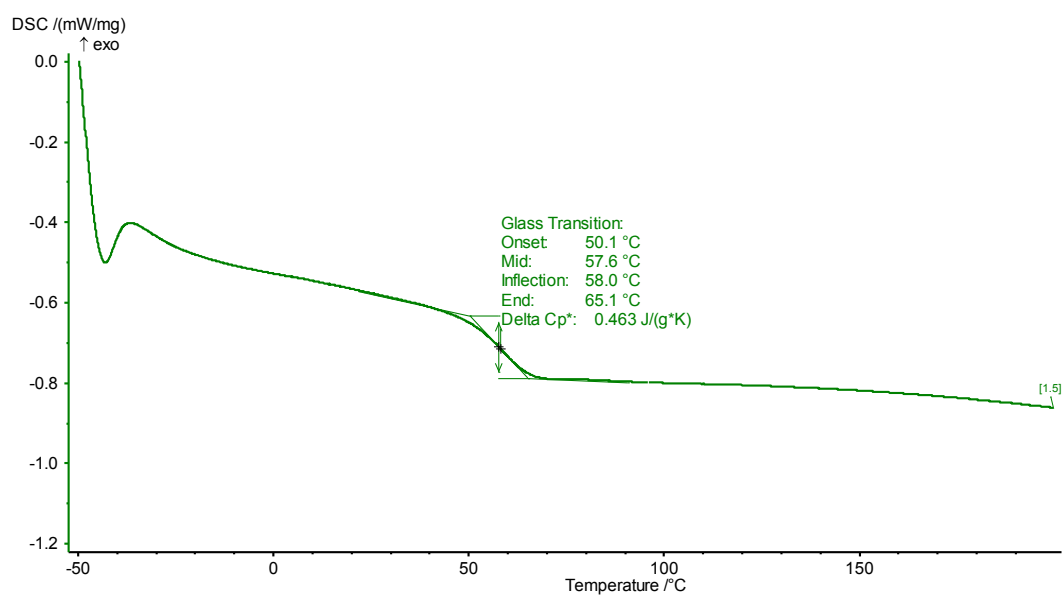
รูป จ-1 DSC เทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ชนิด PU (Zn(Ac)₂) - PEG 4000



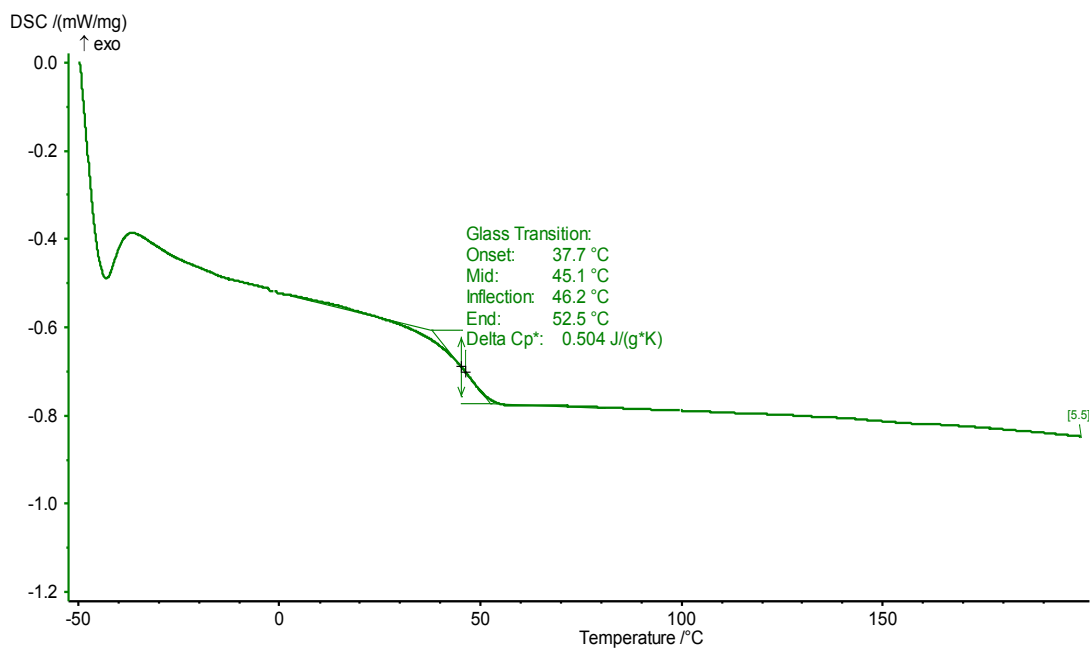
รูป จ-2 DSC เทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ของโพลิเอทิลีน เทน สูตร PU (Zn(Ac)₂) - PEG 6000



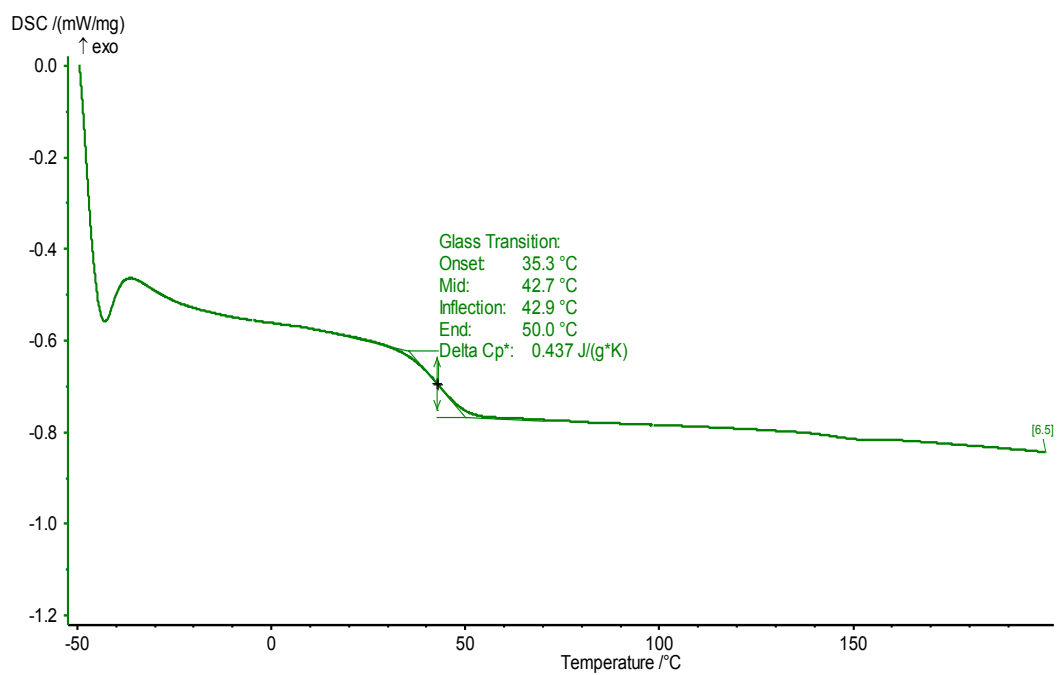
รูป จ-3 DSC เทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ของโพลิเอทิลีน เทน สูตร PU (NaHCO₃) - PEG 4000



รูป จ-4 DSC เทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ของโพลิเอทิลีน เทน สูตร PU (NaHCO₃) - PEG 6000



รูป จ-5 DSC เทอร์โมแกรมของโพลียูรีเทน สูตร PU (Na₂CO₃) - PEG 4000



รูป ๑-6 DSC เทอร์โมแกรมของโพลิเมอร์ของไฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU (Na_2CO_3) - PEG 6000

ภาคผนวก จ

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานโฟม

ตาราง จ-1 ค่าความหนาแน่นของโฟมที่สูตรต่างๆ

สูตร ชิ้นที่	Density (kg/m ³)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
PU (Zn(Ac) ₂) - PEG 4000	179.40	134.80	134.80	149.67 ± 25.74
PU (Zn(Ac) ₂) - PEG 6000	97.20	89.50	76.70	87.80 ± 10.35
PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 4000	183.70	183.70	183.70	184.57 ± 5.15
PU (Na ₂ CO ₃) - PEG 6000	94.40	108.80	99.30	100.83 ± 7.32
PU (NaHCO ₃) - PEG 4000	126.60	122.90	128.10	125.87 ± 2.67
PU (NaHCO ₃) - PEG 6000	108.50	109.30	105.20	107.67 ± 2.17

ภาคผนวก ช

ภาคผนวก ช

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟม

ตาราง ช-1 ความสามารถในการคืนตัวของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU(Zn(Ac)₂)-PEG 4000

เวลา (นาที)	A		B		C		ค่าเฉลี่ย C _t (%)
	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	
0	1.3925	46.6219	1.2613	51.7686	1.2563	54.0256	50.8054
1	1.4925	42.7887	1.2688	51.4818	1.2638	53.7511	49.3405
2	1.5513	40.5367	1.2688	51.4818	1.2663	53.6597	48.5594
4	1.6163	38.0450	1.2713	51.3862	1.2713	53.4767	47.6360
6	1.6488	36.7992	1.2738	51.2906	1.2775	53.2479	47.1126
8	1.6663	36.1284	1.2738	51.2906	1.2788	53.2022	46.8737
10	1.7050	34.6430	1.2738	51.2906	1.2825	53.0650	46.3329
12	1.7550	32.7264	1.2775	51.1472	1.2825	53.0650	45.6462
14	1.7963	31.1452	1.2788	51.0994	1.2850	52.9735	45.0727
16	1.8188	30.2827	1.2813	51.0038	1.2875	52.8820	44.7228
20	1.8288	29.8994	1.2838	50.9082	1.2875	52.8820	44.5632
25	1.8538	28.9411	1.2850	50.8604	1.2975	52.5160	44.1058
30	1.8738	28.1744	1.2938	50.5258	1.2975	52.5160	43.7387
40	1.8938	27.4078	1.3000	50.2868	1.3000	52.4245	43.3730
50	1.9538	25.1078	1.3025	50.1912	1.3050	52.2415	42.5135
60	2.0188	22.6162	1.3063	50.0478	1.3100	52.0586	41.5742
120	2.1025	19.4058	1.3288	49.1874	1.3238	51.5554	40.0495
180	2.1338	18.2080	1.3563	48.1358	1.3388	51.0064	39.1167
240	2.2000	15.6684	1.3713	47.5621	1.3488	50.6404	37.9570
24 hr	2.3925	4.6478	1.8375	29.7323	1.6425	39.8902	24.7568

ตาราง ข-2 ความสามารถในการคืนตัวของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU(Zn(Ac)₂)-PEG 6000

เวลา (นาที)	A		B		C		ค่าเฉลี่ย C _t (%)
	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	
0	1.4513	47.8905	1.2525	52.5568	1.2500	51.9000	50.7824
1	1.5313	45.0180	1.2563	52.4148	1.2525	51.8038	49.7455
2	1.6300	41.4722	1.2600	52.2727	1.2538	51.7557	48.5002
4	1.7000	38.9587	1.2613	52.2254	1.2550	51.7076	47.6306
6	1.7263	38.0162	1.2638	52.1307	1.2550	51.7076	47.2848
8	1.7825	35.9964	1.2663	52.0360	1.2563	51.6595	46.5640
10	1.8325	34.2011	1.2663	52.0360	1.2563	51.6595	45.9655
12	1.8775	32.5853	1.2675	51.9886	1.2575	51.6114	45.3951
14	1.9038	31.6427	1.2675	51.9886	1.2588	51.5633	45.0649
16	1.9388	30.3860	1.2675	51.9886	1.2588	51.5633	44.6460
20	1.9738	29.1293	1.2675	51.9886	1.2588	51.5633	44.2271
25	2.0063	27.9623	1.2688	51.9413	1.2588	51.5633	43.8223
30	2.0250	27.2890	1.2725	51.7992	1.2588	51.5633	43.5505
40	2.0488	26.4363	1.2750	51.7045	1.2588	51.5633	43.2347
50	2.0688	25.7181	1.2750	51.7045	1.2588	51.5633	42.9953
60	2.1000	24.5961	1.2763	51.6572	1.2588	51.5633	42.6055
120	2.1688	22.1275	1.2788	51.5625	1.2600	51.5152	41.7351
180	2.2013	20.9605	1.2838	51.3731	1.2600	51.5152	41.2829
240	2.2138	20.5117	1.2863	51.2784	1.2600	51.5152	41.1018
24 hr	2.4688	11.3555	1.4825	43.8447	1.3014	49.9230	35.0411

ตาราง ข-3 ความสามารถในการคืนตัวของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU(NaHCO₃)-PEG 4000

เวลา (นาที)	A		B		C		ค่าเฉลี่ย C _t (%)
	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	
0	1.2550	54.4051	1.2463	53.5631	1.2538	55.8927	54.6203
1	1.2550	54.4051	1.2475	53.5174	1.2600	55.6728	54.5318
2	1.2550	54.4051	1.2488	53.4708	1.2663	55.4529	54.4429
4	1.2550	54.4051	1.2525	53.3311	1.2750	55.1451	54.2938
6	1.2575	54.3143	1.2550	53.2379	1.2788	55.0132	54.1885
8	1.2575	54.3143	1.2625	52.9585	1.2850	54.7933	54.0220
10	1.2600	54.2234	1.2650	52.8653	1.2888	54.6614	53.9167
12	1.2600	54.2234	1.2675	52.7722	1.2950	54.4415	53.8124
14	1.2600	54.2234	1.2713	52.6325	1.3013	54.2216	53.6925
16	1.2600	54.2234	1.2738	52.5393	1.3013	54.2216	53.6614
20	1.2600	54.2234	1.2763	52.4462	1.3100	53.9138	53.5278
25	1.2600	54.2234	1.2788	52.3530	1.3175	53.6500	53.4088
30	1.2600	54.2234	1.2850	52.1201	1.3263	53.3421	53.2285
40	1.2600	54.2234	1.2950	51.7475	1.3375	52.9464	52.9724
50	1.2600	54.2234	1.3050	51.3749	1.3488	52.5506	52.7163
60	1.2600	54.2234	1.3163	50.9557	1.3550	52.3307	52.5033
120	1.2613	54.1780	1.3588	49.3722	1.3938	50.9675	51.5059
180	1.2625	54.1326	1.3838	48.4406	1.3963	50.8795	51.1509
240	1.2638	54.0872	1.3975	47.9283	1.3988	50.7916	50.9357
24 hr	1.4475	47.4114	1.4688	45.2735	1.5088	46.9217	46.5355

ตาราง ข-4 ความสามารถในการคืนตัวของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU(NaHCO₃)-PEG 6000

เวลา (นาที)	A		B		C		ค่าเฉลี่ย C _t (%)
	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	
0	1.2513	53.9134	1.2500	55.0157	1.2500	51.9185	53.6159
1	1.2550	53.7753	1.2513	54.9708	1.2500	51.9194	53.5552
2	1.2575	53.6832	1.2550	54.8358	1.2500	51.9194	53.4795
4	1.2613	53.5451	1.2550	54.8358	1.2500	51.9194	53.4334
6	1.2638	53.4530	1.2550	54.8358	1.2500	51.9194	53.4027
8	1.2663	53.3610	1.2550	54.8358	1.2500	51.9194	53.3721
10	1.2688	53.2689	1.2550	54.8358	1.2500	51.9194	53.3414
12	1.2688	53.2689	1.2563	54.7908	1.2500	51.9194	53.3264
14	1.2700	53.2228	1.2588	54.7009	1.2500	51.9194	53.2810
16	1.2713	53.1768	1.2588	54.7009	1.2500	51.9194	53.2657
20	1.2738	53.0847	1.2600	54.6559	1.2525	51.8232	53.1879
25	1.2738	53.0847	1.2600	54.6559	1.2538	51.7751	53.1719
30	1.2750	53.0387	1.2600	54.6559	1.2538	51.7751	53.1566
40	1.2750	53.0387	1.2600	54.6559	1.2563	51.6790	53.1245
50	1.2763	52.9926	1.2613	54.6109	1.2563	51.6790	53.0942
60	1.2788	52.9006	1.2613	54.6109	1.2563	51.6790	53.0635
120	1.2838	52.7164	1.2650	54.4759	1.2563	51.6790	52.9571
180	1.2838	52.7164	1.2650	54.4759	1.2575	51.6309	52.9411
240	1.2863	52.6243	1.2650	54.4759	1.2588	51.5828	52.8943
24 hr	1.5550	42.7256	1.3050	53.0364	1.2750	50.9578	48.9066

ตาราง ข-5 ความสามารถในการคืนตัวของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU (Na₂CO₃)-PEG 4000

เวลา (นาที)	A		B		C		ค่าเฉลี่ย C _t (%)
	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	
0	1.2925	51.5918	1.2813	52.1922	1.2788	51.9267	51.9036
1	1.3175	50.6554	1.2553	53.1623	1.2988	51.1748	51.6642
2	1.3213	50.5150	1.2568	53.1063	1.3100	50.7519	51.4577
4	1.3475	49.5318	1.2583	53.0504	1.3150	50.5639	51.0487
6	1.3575	49.1573	1.2613	52.9384	1.3225	50.2820	50.7926
8	1.3663	48.8296	1.2625	52.8918	1.3275	50.0940	50.6051
10	1.3875	48.0337	1.3188	50.7929	1.3300	50.0000	49.6089
12	1.3938	47.7996	1.3238	50.6063	1.3350	49.8120	49.4060
14	1.4013	47.5187	1.3313	50.3265	1.3400	49.6241	49.1564
16	1.4175	46.9101	1.3413	49.9534	1.3475	49.3421	48.7352
20	1.4450	45.8801	1.3463	49.7668	1.3500	49.2481	48.2983
25	1.4613	45.2715	1.3488	49.6735	1.3625	48.7782	47.9077
30	1.4663	45.0843	1.3513	49.5802	1.3725	48.4023	47.6889
40	1.5075	43.5393	1.3513	49.5802	1.3750	48.3083	47.1426
50	1.5125	43.3521	1.3513	49.5802	1.3900	47.7444	46.8922
60	1.5225	42.9775	1.3513	49.5802	1.4013	47.3214	46.6264
120	1.5338	42.5562	1.3588	49.3004	1.4225	46.5226	46.1264
180	1.5400	42.3221	1.3675	48.9739	1.4613	45.0658	45.4539
240	1.5625	41.4794	1.3800	48.5075	1.4988	43.6560	44.5476
24 hr	1.7663	33.8483	1.3888	48.1810	1.8575	30.1692	37.3995

ตาราง ข-6 ความสามารถในการคืนตัวของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน สูตร PU (Na₂CO₃)-PEG 6000

เวลา (นาที)	A		B		C		ค่าเฉลี่ย C _t (%)
	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	ความหนา (cm)	C _t (%)	
0	1.2500	52.5392	1.2500	55.8694	1.2525	55.6244	54.6777
1	1.2550	52.3502	1.2500	55.8694	1.2588	55.4030	54.5409
2	1.2563	52.3028	1.2500	55.8694	1.2588	55.4030	54.5251
4	1.2575	52.2553	1.2538	55.7370	1.2588	55.4030	54.4651
6	1.2575	52.2553	1.2588	55.5605	1.2625	55.2702	54.3620
8	1.2588	52.2078	1.2588	55.5605	1.2638	55.2259	54.3314
10	1.2600	52.1604	1.2600	55.5163	1.2650	55.1816	54.2861
12	1.2613	52.1129	1.2625	55.4281	1.2663	55.1373	54.2261
14	1.2625	52.0655	1.2650	55.3398	1.2663	55.1373	54.1809
16	1.2625	52.0655	1.2675	55.2515	1.2688	55.0487	54.1219
20	1.2650	51.9705	1.2688	55.2074	1.2688	55.0487	54.0755
25	1.2700	51.7807	1.2725	55.0750	1.2688	55.0487	53.9681
30	1.2863	51.1637	1.2750	54.9868	1.2688	55.0487	53.7331
40	1.2950	50.8315	1.2800	54.8102	1.2688	55.0487	53.5635
50	1.3088	50.3094	1.2863	54.5896	1.2688	55.0487	53.3159
60	1.3213	49.8348	1.2875	54.5455	1.2700	55.0044	53.1282
120	1.3363	49.2653	1.2913	54.4131	1.2788	54.6944	52.7909
180	1.3425	49.0280	1.2938	54.3248	1.2838	54.5173	52.6234
240	1.3263	49.6450	1.2975	54.1924	1.2838	54.5173	52.7849
24 hr	1.7025	35.3596	1.7925	36.7167	1.5938	43.5341	38.5368

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุติมา เขี่ยมสะอาด เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2553 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี