

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว
ที่เตรียมจากขวด PET ที่ใช้แล้วด้วยบิสฟีนอลเอ



T107827

นางสาวจันทิมา ท่วมเพิ่มทรัพย์
นางสาวปวิณธร ธีรธนาธร

มท.
จ ๒๕๕๓
๒๕๕๓

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 107827

วัน,เดือน,ปี. 1.4.11.ค. 2553

b. 12212039
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Modification of Unsaturated Polyester Resin from Recycled PET by Using Bisphenol A



Miss Chanthima Thumpermsup
Miss Pavintorn Teratanatorn

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมจาก
 ขวด PET ที่ใช้แล้วด้วยบิสฟีนอลเอ
นักศึกษา นางสาวจันทิมา ท่วมเพิ่มทรัพย์
 นางสาวปวิณธร ชีรธนาธร
ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2549
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	
กรรมการ	ผศ.ดร.สุภรัตน์ รักชลธิ	
กรรมการ	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมจากขวด PET ที่ใช้แล้วด้วยบิสฟีนอลเอ
นักศึกษา	นางสาวจันทิมา ท่วมเพิ่มทรัพย์ 46050054 นางสาวปวิณธร ธีรนาธร 46050073
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin, UPR) จากขวด PET ที่ใช้แล้ว และมุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติของเรซินที่สังเคราะห์ได้โดยใช้บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) ในเชิงเปรียบเทียบถึงผลของสมบัติเชิงกลกับพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ เพื่อให้เรซินที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านคอมโพสิต สามารถสังเคราะห์ได้โดยการทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET โดยใช้ไกลคอล อัตราส่วนของ PET ต่อไกลคอล คือ 1:5.04 โดยโมล ได้ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสเกิดเป็น BHET และอนุพันธ์ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาผสมกับบิสฟีนอลเอแล้วทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ในอัตราส่วนไฮดรอกซิล:คาร์บอนิลเป็น 1:1:1 แล้วจึงเติมมอนอเมอร์สไตรีน (Styrene monomer) 35% โดยน้ำหนักเป็นสารเชื่อมโยงและใช้ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) 0.2% โดยน้ำหนักเป็นสารยับยั้งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เมื่อจะทำการขึ้นรูปเติมเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาและเติมไดเมทิลอะนิลีน (Dimethylaniline) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วศึกษาเวลาที่เรซินใช้ในการแห้งสัมผัส (Set to touch) พบว่าเรซินที่สังเคราะห์ได้สามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ และไดเมทิลอะนิลีนได้ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อปริมาณบิสฟีนอลเอเพิ่มขึ้น เรซินที่ได้จะมีความหนืดและมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการแห้งสัมผัสจะลดลง เมื่อเลือกสูตรที่เหมาะสมคือมีเวลาแห้งสัมผัส 30-60 นาทีตามการอ้างอิงจากภาคอุตสาหกรรม จะได้แก่สูตรที่ใช้บิสฟีนอลเอ 10% เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 2.5% และไดเมทิลอะนิลีน 2% มาทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความแข็งกด (Hardness) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ลดลง จะเห็นได้ว่าบิสฟีนอลเอสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเรซินได้ อีกทั้งยังทำให้เรซินสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ง่ายและเร็วขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Speacial Project Title	Modification of Unsaturated Polyester Resin from Recycled PET by Using Bisphenol A
Student Names	Miss Chanthima Thumpermsup Miss Pavintorn Teratanatorn
Department	Chemistry, Faculty of Science
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2006
Special Project Advisors	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud Asst.Prof.Dr. Pathavut Monvisade

Abstract

This special project was focused on synthesis of novel unsaturated polyester resin from waste PET bottles and modification of its structures by using bisphenol A (BPA) in order to improve resin properties for composite applications. First, glycolized products were obtained by depolymerization of PET with 3 glycols. Ratio of PET : Glycols was 1:5.04 by mole. Products of depolymerization were BHET and deviratives. The glycolized products were then reacted with maleic anhydride by using hydroxyl:carbonyl ratio of 1.1:1 by mole. In this step, bisphenol A was added by mole. In curing reaction, styrene monomer was added 35% by weight as a crosslinking agent, benzoyl peroxide (BPO) as an initiator and dimethylaniline (DMA) as an activator. It was found that the modified resin can be cured by BPO and DMA at room temperature. Viscosity of the resins was increased while the color was darker when %BPA loading was increased. However, adding BPA had effects on other properties such as decreasing cure time. By using 10%BPA, 2.5%BPO and 2%DMA curing agents, the set to touch time of the resin was in the range of 30-60 min as recommended by industrial company. It was revealed that tensile strength, modulus, impact strength of the cured resins were increased, However, %elongation at break was decreased. Therefore, adding bisphenol A could improve both UPR mechanical properties and curing behaviors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือดังมีรายนามต่อไปนี้

- คุณพ่อ คุณแม่และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและคอยให้กำลังใจตลอดเวลาที่
ทำโครงการพิเศษนี้

- รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และผศ.ดร.ภัทธวูธ มนต์วิเศษ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดี
 อีกทั้งความเอาใจใส่มาโดยตลอด

- ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ
 สำหรับข้อเสนอนี้ที่เป็นประโยชน์และช่วยแก้ไขอุปสรรคโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์
 ยิ่งขึ้น

- คุณวัฒนา คล้ายรัศมี วิศวกรฝ่ายพัฒนา บริษัท ออริจิน มิกิ (ไทยแลนด์) จำกัด สำหรับ
 คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และความช่วยเหลือในการอนุเคราะห์บิลสปีนอลเอ

- บริษัท เจริญวัฒนา ไฟเบอร์กลาส จำกัด สำหรับความช่วยเหลือในการอนุเคราะห์
 สสารเคมีและข้อมูลเพิ่มเติม

- คุณปานฤทัย แก้วบริสุทธิ สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำเมื่อเกิดปัญหา

- คุณสุวิวัฒน์ ศิวาคม, คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์, คุณปราณี บุญวัฒน์ และคุณสุดใจ สอน-
 สะอาด สำหรับการเอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี

- เพื่อนทุกๆคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจกันเสมอมา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ซึ่งไม่ได้
 กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวจันทิมา ท่วมเพิ่มทรัพย์

นางสาวปวิณธร ธีรธนาธร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตโครงการพิเศษ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	3
2.1.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	4
2.1.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	6
2.1.3 การแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	7
2.2 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	7
2.2.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	9
2.2.2 การสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	10
2.3 บิสฟีนอลเอ	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	18
3.1 สารเคมี	18
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	19
3.3 วิธีการทดลอง	20
ตอนที่ 1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET	20
3.3.1 ปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET	20
3.3.2 การหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value)	22
ตอนที่ 2 การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	23
3.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	23
3.3.4 การเติมสารเชื่อมโยง	24
ตอนที่ 3 การขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	24
ตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	30
4.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET	30
4.2 การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	30
4.3 อิทธิพลของบิสฟีนอลเอที่มีผลต่อความหนืดและเวลาเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	31
4.3.1 ความหนืดของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากเครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์	31
4.3.2 อิทธิพลของบิสฟีนอลเอที่มีต่อเวลาในการเชื่อมโยง	32
4.4 ผลของบิสฟีนอลเอที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	40
5.1 สรุปผลการทดลอง	40
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานเรซินจากโครงการพิเศษ	41
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับโครงการพิเศษในอนาคต	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	44
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	8
ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA)	13
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET	21
ตารางที่ 4.1 เวลาในการเกิดปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรดของเรซิน	31
ตารางที่ 4.2 ความหนืดของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีปริมาณบิสฟีนอลเอต่างกัน	32
ตารางที่ 4.3 เวลาเชื่อมโยงของเรซินที่มีปริมาณบิสฟีนอลเอต่างกัน	33
ตารางที่ 4.4 ผลของสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิบัติการเชื่อมโยงของพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวด้วยสไตรีน	6
รูปที่ 2.2 กระบวนการสลาย PET ด้วยไกลคอล (Glycol)	11
รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA)	14
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การเตรียมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET	21
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนวิธีดำเนินการทดลอง	26
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน (Depolymerization) ของ PET	27
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	28
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	29
รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน	30
รูปที่ 4.2 พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ได้หลังจากการเติมบิสฟีนอลเอ (1) 5% (2) 10% และ (3) 15% ของส่วนผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส	32
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างโครงสร้างของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ	34
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง มอดุลัสแรงดึง ความแข็งกดและความแข็งแรงกระแทกของเรซินที่ปรับสมบัติกับไม่ปรับสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ	35
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบร้อยละการยืด ณ จุดขาดของเรซินที่ปรับสมบัติกับไม่ปรับสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ	36
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของเรซินชนิดต่างๆ	37
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบร้อยละการยืด ณ จุดขาดของเรซินชนิดต่างๆ	38
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบมอดุลัสแรงดึงของเรซินชนิดต่างๆ	38
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกของเรซินชนิดต่างๆ	39
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบความแข็งกดของเรซินชนิดต่างๆ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาโครงการพิเศษ

ปัจจุบันการนำพอลิเมอร์มาใช้เพื่อผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ นั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีสมบัติที่เหนือกว่าวัสดุอื่น เช่น มีความหนาแน่นต่ำ มีสมบัติจำเพาะ(สมบัติต่อน้ำหนัก)สูง ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ จึงทำให้ขยะที่เกิดจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีปริมาณมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ตัวอย่างขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีจำนวนมากและเป็นปัญหาในการกำจัดได้แก่ ถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE) ทั้งชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และขวด PET

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin, UPR) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการวัสดุที่มีสมบัติทนความร้อนกรดและเบสได้ดี และยังสามารถนำมาผลิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ซึ่งทำให้มีสมบัติจำเพาะที่สูงขึ้น จึงสามารถนำมาใช้แทนวัสดุจำพวกโลหะหรือไม้ได้ในบางการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์ให้มีการใช้งานได้หลากหลายด้วย ตัวอย่างการใช้งานพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ได้แก่ การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หรือใช้เป็นเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต เป็นต้น

โครงการนี้เป็นโครงการต่อเนื่องซึ่งทำการศึกษาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) ที่ได้จากขวด PET ที่ใช้แล้ว ซึ่งให้สมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับการใช้ PET บริสุทธิ์ และมีต้นทุนต่ำกว่าเรซินทางการค้า แต่การนำ PET ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้เป็นสารตั้งต้น จะผ่านกระบวนการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (Depolymerization) ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติบางประการของพอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้ยังไม่เหมาะสม นอกจากนี้เรซินชนิดนี้จะต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพงอีกด้วย

ดังนั้น โครงการนี้จึงศึกษาการนำบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตมาจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่ใช้แล้วนำกลับมาแปรรูปเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว และมุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยใช้บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) เพื่อทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ ได้หลากหลายยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์โครงการพิเศษ

ปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมจากขวด PET ที่ใช้แล้วด้วยบิสฟีนอลเอโดยศึกษาสมบัติต่างๆของเรซินที่เตรียมได้เพื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ

1.3 ขอบเขตโครงการพิเศษ

1. เตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตโดยใช้ขวด PET ที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส โดยใช้เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) พรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) และไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) ในอัตราส่วน 1:1:0.5 โดยโมลตามลำดับ และใช้ซิงค์อะซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. หาค่าหน้าหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (M_n) ของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจากค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value)
3. เตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากการทำปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในอัตราส่วน 1:1:1 ซึ่งในส่วนของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจะมีการเติมบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) ลงไป 5 , 10 และ 15% โดยโมลและใช้มอนอเมอร์สไตรีนเป็นสารเชื่อมโยง
4. ขึ้นรูปเรซินด้วยเทคนิคการหล่อ (Casting) เพื่อศึกษาเวลาที่เรซินมีผิวแห้งสัมผัส (Set to touch time) แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็งกด (Hardness)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) โดยใช้บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) ช่วยปรับปรุงสมบัติได้
2. ลดปริมาณขยะจากขวด PET โดยเปลี่ยนเป็นเรซินที่มีมูลค่าและมีประโยชน์มากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin, UPR)

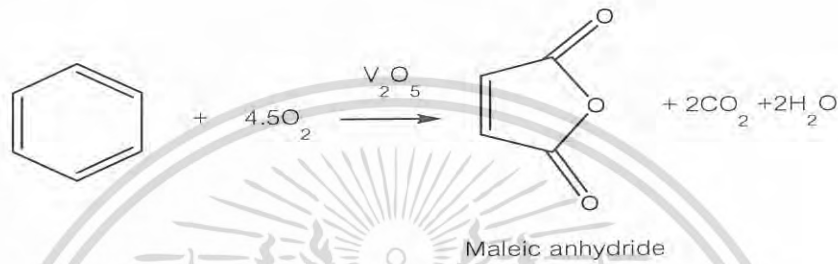
พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ระหว่างสารประเภทไดออล (Diol) เช่น พรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol) กับสารประเภทกรดไม่อิ่มตัว (Unsaturated acid) หรือสารประเภทแอนไฮไดรด์ (Anhydride) เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ทำการเชื่อมโยงพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ได้โดยใช้ไวนิลมอนอเมอร์ เช่น สไตรีนทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ โดยมีตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระเช่น เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl Ethyl Ketone Peroxide, MEKP) บางครั้งอาจเรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวทำให้แข็ง (Hardener) พันธะไม่อิ่มตัวบางตำแหน่งบนสายโซ่ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจะทำปฏิกิริยากับพันธะไม่อิ่มตัวของไวนิลมอนอเมอร์ ทำให้เรซินเกิดการแข็งตัว สำหรับพันธะไม่อิ่มตัวที่เหลือจะเกิดการเชื่อมโยงกันเองระหว่างสายโซ่ด้วย นอกจากนี้สไตรีนจะเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารช่วยเจือจางเรซิน (Diluent) อีกด้วยการเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงให้เร็วขึ้นสามารถทำได้โดยการเติมสารเร่งตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) เช่น โคบอลท์แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate) และไดเอทิลอะนิลีน (Diethyl aniline) หรือการเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมโยงได้ ซึ่งลักษณะทั่วไปของเรซินที่ได้จะเป็นของเหลวค่อนข้างข้นและมีองศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ต่ำ ประมาณ 8-10 (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1500-2500 กรัมต่อโมล) [1] การประยุกต์การนำไปใช้งานของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถทำได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นวัสดุดิบในการทำคอมโพสิตเส้นใยแก้ว เนื่องจากมีคุณสมบัติทนความร้อน ทนกรดและเบส ราคาถูกกว่าเรซินประเภทอื่นๆ และง่ายต่อการนำมาใช้งาน แต่อาจมีข้อเสียคือ มีการหดตัวค่อนข้างสูงเมื่อทำการเชื่อมโยง อายุการเก็บ (Shelf-life) ค่อนข้างสั้น และมีการดูดซับน้ำสูง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

1. กรดไม่อิ่มตัวและสารประเภทแอนไฮไดรด์ (Unsaturated acid and anhydride)

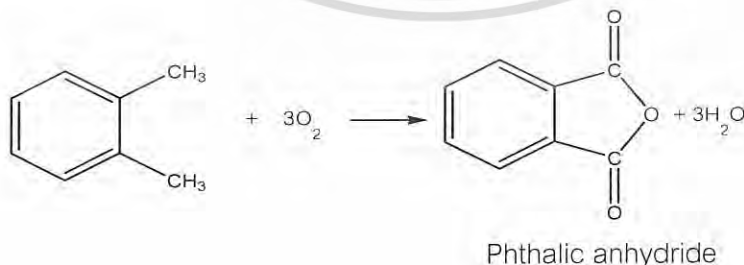
- มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน โดยทำการผ่านไอระเหยของเบนซีนกับอากาศ เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยาเวเนเดียมเพนตะออกไซด์ (Vanadiumpentoxide) บนอะลูมินาที่อุณหภูมิประมาณ 350-450 °C นิยมใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือน้ำค่อนข้างน้อย



- กรดฟูมาริก (Fumaric acid) เป็น trans-isomer ของกรดมาเลอิก (Maleic acid) ซึ่งพอลิเมอร์ที่เกิดจากกรดฟูมาริกจะมีสมบัติทนความร้อน

2. แอนไฮไดรด์ที่เติมเพื่อปรับปรุง

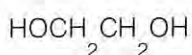
นิยมใส่พทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเอสเทอร์ เนื่องจากพทาลิกแอนไฮไดรด์ที่เติมลงไปจะลดความว่องไวของพันธะคู่ ทำให้ความเปราะลดลง ซึ่งพทาลิกแอนไฮไดรด์เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของออโรไซลีน (o-Xylene) โดยการผ่านก๊าซออโรไซลีนกับอากาศเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์หรือเวเนเดียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C



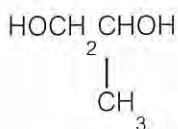
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไกลคอล (Glycol)

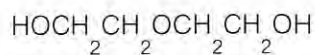
ไกลคอลที่นิยมใช้คือ เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) และไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG)



Ethylene glycol



Propylene glycol



Diethylene glycol

4. มอนอเมอร์ (Monomer)

ใช้เป็นตัวทำละลายพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว และทำให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห มอนอเมอร์ที่นิยมใช้คือ มอนอเมอร์สไตรีน (Styrene monomer) เนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่ดี ราคาถูก และเกิดปฏิกิริยาง่าย

5. สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor)

เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อป้องกันการเกิดการเชื่อมโยงก่อนการขึ้นรูป และยังลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะที่เรซินเกิดการแข็งตัวอีกด้วย สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาที่นิยมใช้จะเป็นสารประเภทควิโนน (Quinone) เช่น เบนโซควิโนน (Benzoquinone) ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone)

6. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

เป็นสารที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซินเกิดขึ้นได้เร็วมากขึ้น นิยมใช้สารประเภทเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO)

7. สารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator)

เป็นสารที่ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีมากขึ้นที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสารเร่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความจำเพาะเจาะจงกับตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด มักเป็นสารประเภทเกลือของโลหะ เช่น โคบอลต์แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate) หรือสารประเภทเอมีน เช่น ไดเมทิลอะนิลีน (Dimethyl aniline)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว [3,4]

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างไกลคอลกับกรดไม่อิ่มตัว ซึ่งจะเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง และเมื่อได้ผลิตภัณฑ์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวแล้ว จะทำการเติมไวนิลมอนอเมอร์เพื่อเพิ่มความไม่อิ่มตัว ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความหนืดและเป็นตัวทำลาย โดยพันธะบางส่วนบนพอลิเอสเทอร์เรซินจะทำปฏิกิริยากับพันธะไม่อิ่มตัวบางส่วนบนไวนิลมอนอเมอร์ขณะที่เรซินเกิดการแข็งตัว

การเตรียมเรซินดังกล่าว ถึงแม้จะมีการเติมไวนิลมอนอเมอร์ลงไปแล้วแต่ก็ยังไม่มีการเชื่อมโยง เนื่องจากมีการเติมตัวยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) ไว้ด้วยเพื่อป้องกันการเกิดการเชื่อมโยงก่อนการนำไปขึ้นรูป ดังนั้นในขั้นตอนการขึ้นรูปจะต้องทำการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ลงไปเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้ขณะที่ทำการขึ้นรูปขึ้นงาน



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวด้วยสไตรีน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

การแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างพันธะคู่ในพอลิเอสเทอร์เรซินกับพันธะคู่ในสไตรีนมอนอเมอร์แล้วเกิดการเชื่อมโยงกัน โดยการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถเกิดได้หลายวิธี ดังนี้

1. ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และความร้อน
2. ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และสารเร่งตัวเร่งปฏิกิริยา (Accerelator) มีผลทำให้พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก โดยแบ่งเป็น 2 ช่วง ดังนี้

- ช่วงเวลาการเกิดเจล (Gel time) เรซินจะมีลักษณะเป็นเจลคล้ายก้อน
- ช่วงเวลาการแข็งตัวหรือเกิดการเชื่อมโยง (Cure time) เรซินจะรวมตัวกันจนแข็งเรซินที่แข็งตัวและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วต้องผ่านกระบวนการให้อุณหภูมิอีกครั้ง (Post cure) โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 100-120°C เป็นเวลา 3-6 ชั่วโมง หรือต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ ลดการหดตัวหรือชิ้นงานเปลี่ยนรูปร่าง

3. ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light)
4. ใช้ลำอิเล็กตรอน (Electron beam)

ปัจจัยที่มีผลต่อการแข็งตัวของเรซิน มีดังนี้

1. ปริมาณตัวเร่งและสารเร่งตัวเร่งปฏิกิริยา : ถ้าใช้ปริมาณมากจะเกิดการแข็งตัวเร็ว
2. อุณหภูมิ : ที่อุณหภูมิสูงเรซินจะเกิดการแข็งตัวเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ
3. ปริมาณน้ำหรือความชื้น : ถ้าปริมาณน้ำในเรซินมาก จะเกิดการแข็งตัวได้ช้า ซึ่งควรมีค่าไม่เกิน 0.05%
4. ปริมาณออกซิเจน : ออกซิเจนเป็นตัวยับยั้งการเกิดการแข็งตัวของเรซิน ดังนั้นถ้าปริมาณออกซิเจนมาก การแข็งตัวก็จะช้าลงด้วย

2.2 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET)

PET เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Trans-esterification) ระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับไดเอทิลเทเรฟทาเลต จะมีลักษณะเป็นอสัณฐานหรือกึ่งผลึกขึ้นอยู่กับขั้นตอนในกระบวนการผลิตและสมบัติทางความร้อน โดยนิยมนำ PET มาใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร เครื่องดื่ม ใช้ผลิตเป็นเส้นใย หรือผลิตภัณฑ์แผ่นบางใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น พิล์มเอ็กเซเรย์ และแผ่นใสสำหรับถ่ายเอกสาร นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่สำคัญในการทำคอมโพสิตโดยใช้เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงด้วย

PET ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม เนื่องจากมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านน้ำและอากาศได้ดี มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น มีความแข็งและทนต่อแรงกระแทก โดยความแข็งจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน มีความโปร่งแสงทำให้สามารถมองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้ชัดเจน ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค คือ สามารถตรวจสอบความสมบูรณ์ของสินค้าได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถทำเป็นเส้นใยสิ่งทอได้ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงและละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ยาก และเมื่อนำ PET มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ฟิล์มบางยังสามารถเคลือบด้วยอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดียิ่งขึ้น หรืออาจเพิ่มชั้นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) เพื่อเพิ่มการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านคอมโพสิตเสริมแรงโดยใช้เส้นใยแก้ว เพื่อใช้แทนโลหะในงานบางประเภทอีกด้วย

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) [6]

ความหนาแน่น	1370 kg/m ³
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg)	75°C
อุณหภูมิหลอมเหลว	260°C
ความสามารถในการนำความร้อน	0.25 W/m.K
ค่าความร้อนจำเพาะ	1.0 kJ/kg.K
ความสามารถในการยอมให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่าน	5.7 g/m ² .hr
ความสามารถในการยอมให้ก๊าซไนโตรเจนซึมผ่าน	5.2 g/m ² .hr

เมื่อ PET เกิดการเสื่อมสภาพ มักจะให้สารประเภทอัลดีไฮด์ และเกิดการเชื่อมโยง (ปรากฏการณ์การเกิดเจลหรือ fish-eye) อัลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายผลไม้ ซึ่งการเสียสภาพอาจเกิดจากผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะอุณหภูมิสูงเกิน 300°C (572°F) ความดันสูง หรืออาจเกิดตั้งแต่กระบวนการผลิตคือ ความเร็วเกลียวหนอน (Screw speed) มากเกินไป เมื่อแรงเฉือนสูงขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิของระบบสูงขึ้นด้วย เวลาที่พอลิเมอร์อยู่ในเครื่องนานเกินไป [7]

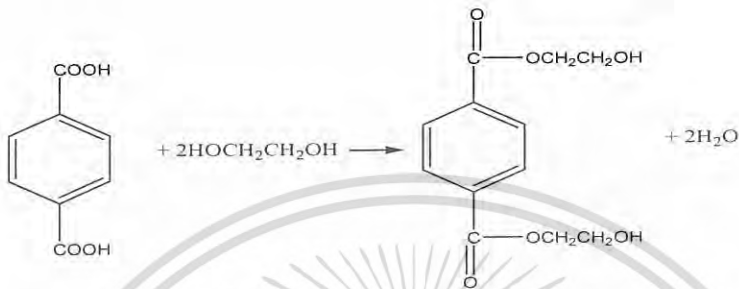
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) [8]

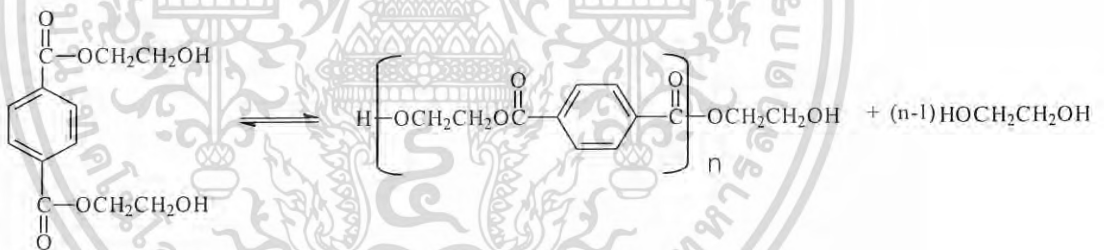
สามารถทำการสังเคราะห์ PET ได้ 2 วิธีคือ

1. ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification)

ขั้นที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดเทเรฟทาติกกับเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์คือ bis(2-hydroxyethyl)terephthalate (BHET) แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ BHET ซึ่งจะทำให้ได้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 270-285°C จากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ จึงมีการกำจัดเอทิลีนไกลคอลส่วนเกินออกจากปฏิกิริยาด้วย แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้

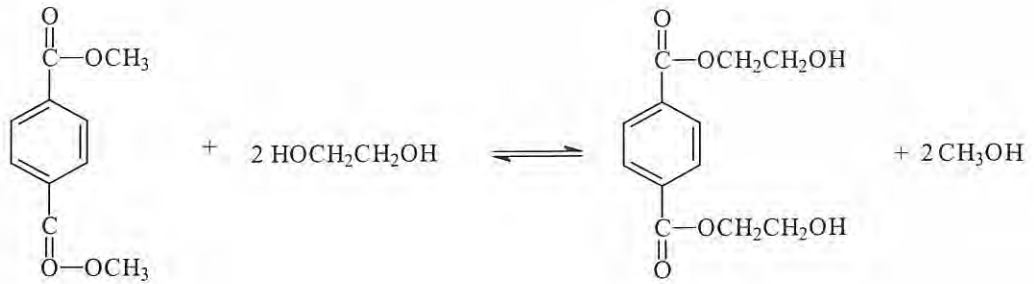


2. ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (Ester interchange)

ขั้นที่ 1 เริ่มจากการผสมไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate) กับเอทิลีน

ไกลคอลอัตราส่วน 1:2.1 ถึง 2.2 โดยโมลแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-210°C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ผลผลิตข้างเคียงคือ เมทานอล (Methanol) โดยจะถูกกลั่นออกไปเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้คือ BHET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ BHET เช่นเดียวกับวิธีแรก

2.2.2 การสลายของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) [9]

จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ การสลายโดยใช้ความร้อน การสลายทางเคมี และกระบวนการไกลโคไลซิส

1. การสลายโดยใช้ความร้อน (Thermolysis)

- กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลว เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthesis crude oil) สามารถนำกลับไปใช้ในโรงกลั่นได้

- กระบวนการทำให้เป็นก๊าซ (Gasification)

เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบมีออกซิเจน และจะใช้อุณหภูมิสูงกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง

- กระบวนการไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation)

เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงจากกระบวนการกลั่นน้ำมัน โดยสายโซ่พอลิเมอร์จะแตกออกด้วยความร้อนและสัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินพอที่ความดันสูง จนเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) และปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเชื้อเพลิงเหลว

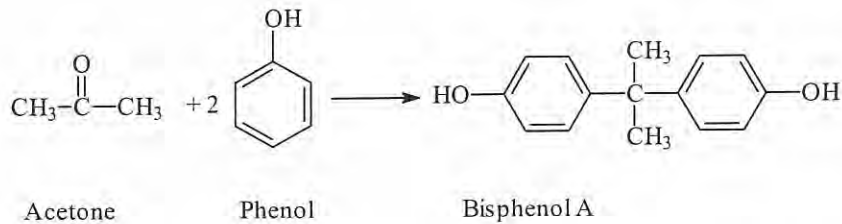
2. การสลายทางเคมี (Solvolytic)

- กระบวนการเมทาโนไลซิส (Methanolysis)

เป็นกระบวนการที่ใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยาภายใต้ความดัน ที่อุณหภูมิ 200°C ได้ผลิตภัณฑ์คือ Dimethyl terephthalate (DMT) และเอทิลีนไกลคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) [10]

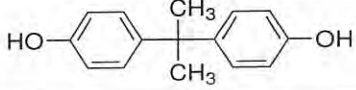


บิสฟีนอลเอ สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของอะซิโตน 1 โมลกับฟีนอล 2 โมล โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำโดยการผ่านไอไฮโดรคลอไรด์เข้าไปในของผสมทั้งสองเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา กระบวนการนี้ฟีนอลและอะซิโตน จะถูกฉีดเข้าไปในถังปฏิกรณ์ที่มีตัวแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นประจุบวกอยู่ภายใน ซึ่งการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นบิสฟีนอลเอ จะเริ่มเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 75°C แล้วของผสมจะถูกผ่านเข้าไปในส่วนเพิ่มความเข้มข้นผลิตภัณฑ์ (Concentrator) ที่ปราศจากน้ำและอะซิโตนภายใต้ความดันต่ำ ทำให้บิสฟีนอลเอ เกิดการตกผลึกออกมาแล้วจะถูกนำมาล้างด้วยฟีนอล และทำการระเหยฟีนอลออกภายใต้สภาวะความดันต่ำ สิ่งเจือปนที่เกิดขึ้น เช่น ไตรหรือโมโนไฮดรอกซิล จะถูกกำจัดโดยการกลั่นและการสกัดแบบตกผลึก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ชนิดต่างๆสามารถมีเปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น พอลิคาร์บอนเนต (Polycarbonate, PC) สามารถมีสิ่งเจือปนคือ 2,4-isopropylidenediphenol ได้มากที่สุดคือ 0.2% ถ้ามีปริมาณสิ่งเจือปนมากกว่านี้จะมีผลต่อสมบัติทางแสงและความเหนียวที่ได้ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) จะมีสิ่งเจือปนคือ 2,4-isomer ได้ถึง 5-7%

บิสฟีนอลเอ สามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน เช่น ในงานวัสดุที่ไม่ใช่พอลิเมอร์ บิสฟีนอลเอ สามารถนำไปเป็นสารตัวเติมในยางรถยนต์ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) งานด้านการเคลือบกระดาษ เพื่อเพิ่มสมบัติป้องกันความร้อน และงานด้านสีอินทรีย์ โดยจะเพิ่มความต้านทานการลุกติดไฟ (Flame resistance) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ส่วนในงานด้านวัสดุพอลิเมอร์ จะใช้ในอุตสาหกรรมอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) นอกจากนี้ยังนิยมนำมาใช้ในการผลิตเรซินชนิดอื่นๆอีกหลายชนิด เช่น ฟีนอพลาสติกเรซิน (Phenoplas resin) ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) พอลิเอไมด์ชนิดปรับปรุง (Modified polyamide) โดยพลาสติกที่ผสมบิสฟีนอลเอ สามารถผลิตได้จากการนำโพพิลีนทำปฏิกิริยากับบิสฟีนอลเอ ทำให้เกิดไกลคอลแล้วนำมาทำปฏิกิริยาต่อกับกรดฟูมาริก (Fumaric acid) เพื่อให้เกิดเป็นเรซินต่อไป ซึ่งเรซินที่ได้จะมีสมบัติทนกรดได้ดีกว่าและยังสามารถทนสารประเภทอัลคาไลได้มากกว่าสารประเภทไวนิลชนิดอื่นๆ

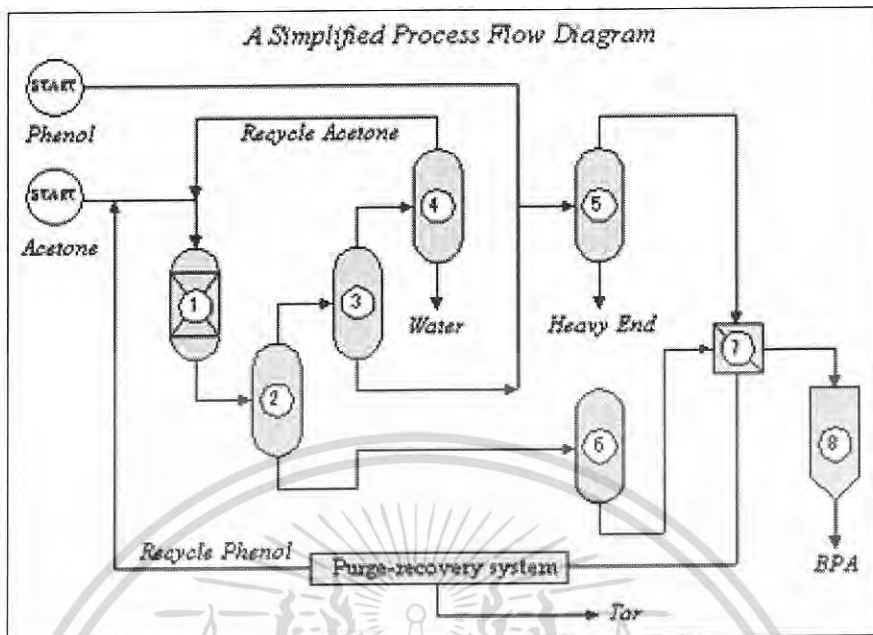
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) [10]

ชื่อ	Bis(4-hydroxyphenyl)dimethylmethane 2,2-bis(4-hydroxyphenyl)propane 4,4'-dihydroxydiphenyl dimethyl methane
สูตรทางเคมี	$C_{15}H_{16}O_2$
สูตรโครงสร้าง	
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	228.28
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นของแข็งสีขาวหรือสีน้ำตาลใส
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.195
อุณหภูมิจุดเดือด (°C)	220
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (°C)	150-155
อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	220
ความดันไอ (ที่ 25°C, Pa)	5.32×10^{-7}
ความสามารถในการละลายน้ำ (ที่ 25°C, mg/l)	120-300
ความสามารถในการละลายได้ (ที่ 28°C, g/kg)	ละลายใน CCl_4 ได้เล็กน้อย ละลายได้ในเบนซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตบิสฟีนอลเอ [11]



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA)

กระบวนการนี้จะเริ่มจากการป้อนอะซิโตนและฟีนอลปริมาณมากเกินพอเข้าไปทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ (ส่วนที่ 1) ซึ่งภายในบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนชนิดประจุบวก จากถังปฏิกรณ์อะซิโตนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา น้ำ และฟีนอลบางส่วนที่เหลือจะถูกแยกออกจากของผสมโดยการกลั่น (ส่วนที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ) จากส่วนที่ 4 อะซิโตนจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในถังปฏิกรณ์ (ส่วนที่ 1) อีกครั้งและน้ำก็จะถูกขับออกในส่วนนี้ด้วย ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการต่อไปจะมีการป้อนฟีนอลบริสุทธิ์เข้ามาผสมและทำให้ฟีนอลผสมนี้บริสุทธิ์ในส่วนที่ 5 โอลิผลิตภัณฑ์ดิบที่ได้จากกระบวนการที่ 2 จะประกอบด้วยบิสฟีนอลเอ ฟีนอล และสิ่งเจือปน จะถูกส่งไปที่กระบวนการทำให้เกิดการตกผลึก (ส่วนที่ 6) และทำการกำจัดสิ่งเจือปนโดยใช้ Mother liquor ซึ่งผลิตภัณฑ์จะถูกแยกออกจาก Mother liquor โดยใช้ฟีนอลบริสุทธิ์ในเครื่องของแข็ง-ของเหลว (Solid liquid separator) (ส่วนที่ 7) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกหลอมเหลวและส่งไปในส่วนทำให้เป็นของแข็งอาจเป็นในรูปเม็ดหรือแผ่น Mother liquor ที่ยังมีสิ่งเจือปน ฟีนอลและบิสฟีนอลเอ (BPA) หลอมเหลวผสมอยู่จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในส่วนที่ 8 (Purge recovery system) โดยส่วนนี้สิ่งเจือปนจะสลายไปและได้สารที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dan และคณะ [12] ทำการศึกษาผลกระทบจากรังสียูวีที่มีต่ออีพอกซีมาเลเอตเรซินที่มีการเติมบิสฟีนอลเอ (Epoxy maleate of bisphenol A, EMBA) โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และออปติคัลไมโครสโคปี (OM) โดยพบว่ารังสียูวีสามารถทำให้ EMBA เกิดการเปลี่ยนแปลง คือแสงจะทำให้พันธะคู่ใน EMBA แตกออกเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Photo-oxidation) และเกิดการเชื่อมโยงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ประเภทเปอร์ออกไซด์ขึ้นด้วย จากนั้นมีการหลุดของคาร์บอนมอนอกไซด์หรือคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วเกิดเป็นสายโซ่สั้นๆ ขึ้น ซึ่งจากปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของ EMBA อันเนื่องมาจากแสงได้

Yoshiki และคณะ [13] ศึกษาการเสื่อมสภาพของอีพอกซีเรซิน (1-p cumylphenoxy-3-phenoxy-2-propanol) และพอลิคาร์บอเนต (4-a-cumylphenyl phenylcarbonate) ที่มีการเติมบิสฟีนอลเอที่อุณหภูมิ 440°C ในวิภาคของเหลวที่ใช้ตัวทำละลาย พบว่าบิสฟีนอลเอจะสลายตัวออกมาเป็นฟีนอลและ p-isopropylphenol สำหรับอีพอกซีเรซิน บิสฟีนอลเอจะสลายตัวออกมาเมื่อใช้ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว อุณหภูมิ 380°C และใช้ CaCO₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่สำหรับพอลิคาร์บอเนต บิสฟีนอลเอจะสลายตัวออกมาเมื่อใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่ำและใช้ตัวทำละลายมีขั้ว เช่น ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane)

Dayang และคณะ [14] ศึกษาลักษณะเฉพาะของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์จากขวด PET ที่ใช้แล้วและหาเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมของการเชื่อมโยง ด้วยเทคนิคการหาค่าไฮดรอกซิลและค่าความเป็นกรด DSC และ FTIR โดยทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสของ PET ด้วย EG ในอัตราส่วน PET:EG เป็น 1:4 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ 180-190°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน แล้วสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยนำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสมาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์อัตราส่วน 1.1:1 อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการเชื่อมโยงโดยใช้สไตรีนมอนอเมอร์ 35% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 70°C พบว่า โมเลกุลของ PET จะแตกเป็นมอนอเมอร์หรือไดเมอร์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเอสเทอริฟิเคชัน (Polyesterification) กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวได้สมบูรณ์ในเวลา 5 ชั่วโมง และปฏิกิริยาเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซินด้วยสไตรีนโดยใช้ Methyl ethyl ketone peroxide และ Cobolt octoate เป็นตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยา จะสมบูรณ์เมื่อใช้อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สำหรับการเชื่อมโยงภายหลัง (Post cure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Guoxi และคณะ [15] ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสของ PET ที่ใช้แล้ว โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 196°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ EG/PET เป็น 0.5-6 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา/PET เป็น 0-1.5 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-5 ชั่วโมง และใช้ซิงค์อะซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสเป็น BHET พบว่า %ของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจะเพิ่มขึ้น ขึ้นกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ EG/PET เพิ่มขึ้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจนถึงจุดสมดุล สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ EG/PET เป็น 5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา/PET เป็น 1% และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง จะได้ BHET 85.6% นอกจากนี้ยังวิเคราะห์โครงสร้างของ BHET ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูง โดยใช้ IR, ^1H NMR, ^{13}C NMR และ DTA สเปกตรัม และตรวจวิเคราะห์หาลำดับส่วนและจุดเดือดของโพลิเมอร์จาก DTA ซึ่งพบว่าลำดับส่วนและจุดเดือดจะลดลงเมื่อองค์ประกอบของการเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

ปณิดา และคณะ [16] ศึกษาการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวด PET ที่ใช้แล้วโดยศึกษาผลของ DEG เมื่อทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ร่วมกับไกลคอลผสม (EG PG และ DEG) โดยใช้อัตราส่วนของ EG:PG:DEG เป็น 1:1:0, 1:1:0.5 และ 1:1:1 โดยโมล พบว่าเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น จะทำให้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ๓ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่จะทำให้มอดุลัสแรงดึง มอดุลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ DEG ยังทำให้เรซินมีความขุ่นมากขึ้นและใช้เวลาในการแข็งตัวนานขึ้นด้วย

Nidchakarn และคณะ [17] ศึกษาการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยใช้ PET จากเศษพลาสติกของฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่ใช้แล้ว โดยการทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ร่วมกับไกลคอลผสม (EG PG และ DEG) ซึ่งโครงการพิเศษนี้จะศึกษาผลของ DEG ด้วย โดยใช้อัตราส่วนของ EG:PG:DEG เป็น 1:1:0 และ 1:1:0.5 โดยโมล พบว่าเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น จะทำให้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ๓ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่จะทำให้มอดุลัสแรงดึง มอดุลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ DEG ยังส่งผลให้เรซินใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานขึ้น และทำให้ความหนืดของเรซินเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suh และคณะ [18] ศึกษาสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมจากปฏิกิริยาไกลโคไลซิส PET ด้วย PG และ DEG ซึ่งใช้อัตราส่วนโดยโมลของ PET:PG เป็น 1:5.04 โดยใช้ PG และ DEG ที่ปริมาณต่างๆ ใช้ซิงค์อะซิเตตปริมาณ 0.5%โดยน้ำหนักของ PET ทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสที่อุณหภูมิ 195°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไกลโคไลซิสซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว เมื่อนำเรซินที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น ทำให้มอดุลัสแรงดึงลดลง แต่จะให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดและความเหนียวสูงขึ้น



107827

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 สารเคมี

1. ขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) ที่ใช้แล้ว
2. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
3. พรอปิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
4. ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
5. บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, BPA) เกรดการค้า บริษัท HOPEWELL INTERNATIONAL
6. ซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
7. พทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
8. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
9. ไพรีดีน (Pyridine) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
10. ฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
11. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
12. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
13. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid)
14. เอทานอล (95%Ethanol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
15. อะซิโตน (Acetone) เกรดการค้า
16. ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
17. สไตรีน (Styrene) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
18. ไดเมทิลอะนิลีน (Dimethyl aniline) เกรดการค้า บริษัท เจริญวัฒนา ไฟเบอร์กลาส จำกัด ผลิตโดย บริษัท พงษ์พนา จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) เกรดการค้า บริษัท เจริญวัฒนา
ไฟเบอร์กลาส จำกัด ผลิตโดย บริษัท พงษ์พนา จำกัด
20. น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil)
21. น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)
22. ไช้ (Grease)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ขวดก้านกลม 3 คอ ขนาด 500 และ 1000 มิลลิลิตร
2. เครื่องควบแน่นแบบรีฟลักซ์
3. เครื่องปั่นกวนเชิงกล
4. กระบอกตวง ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
5. ปีกเกอร์ ขนาด 25 , 50 , 100 , 250 และ 500 มิลลิลิตร
6. ขวดก้านกลม ขนาด 100 มิลลิลิตร
7. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 , 100 และ 250 มิลลิลิตร
8. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
9. บีเปต ขนาด 1, 10 และ 25 มิลลิลิตร
10. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
11. แม่พิมพ์ซิลิโคนสี่เหลี่ยม ขนาด 8x8 นิ้ว
12. แม่พิมพ์โลหะ
13. ตู้อบ
14. เครื่องชั่ง
15. แท่นให้ความร้อน
16. อ่างน้ำมันพาราฟิน
17. เทอร์โมสแตท (Thermostat)
18. เครื่อง Ultrasonic bath
19. เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น LR 5K
บริษัท LLOYD INSTRUMENT
20. เครื่องทดสอบความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) บริษัท
BROOKFIELD ENGINEERING LABS. INC.
21. เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact tester) บริษัท YASUDA จำกัด
22. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness) บริษัท INTRO ENTERPRISE จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.5 N

ซึ่ง KHP 10 กรัม นำไปอบที่ 100°C เป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์แล้วจึงนำออกมาซึ่งได้น้ำหนัก 5.1058 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

ซึ่งฟีนอล์ฟทาลีนมา 0.1 กรัม ละลายในเอทานอล ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

3. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N

ซึ่ง KOH 1.4025 กรัม ละลายน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

4. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 N

ซึ่ง KOH 7.0125 กรัม ละลายน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

ตอนที่ 1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET

3.3.1 ปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET

1. ตัดขวด PET ให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วล้างน้ำให้สะอาดและอบให้แห้ง
2. ซึ่ง PET ที่บดแล้วและไกลคอลผสมในอัตราส่วน 1:5.04 โมล (ไกลคอลผสมประกอบด้วยเอทิลีนไกลคอล พรอพิลีนไกลคอลและไตรเอทิลีนไกลคอล) ลงในขวดก้นกลม 3 คอ ขนาด 1000 มิลลิลิตร
3. ซึ่งซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) 0.5% โดยน้ำหนักของ PET เติมลงในขวดก้นกลม 3 คอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET

อัตราส่วน PET:ไกลคอล (โมล)	อัตราส่วน EG:PG:DEG (โมล)	น้ำหนัก PET (กรัม)	น้ำหนัก EG (กรัม)	น้ำหนัก PG (กรัม)	น้ำหนัก DEG (กรัม)	น้ำหนัก ซิงค์อะซิเตต (กรัม)
1:5.04	1:1:0.5	192.00	124.99	153.21	106.84	0.96

4. จัดชุดอุปกรณ์โดยต่อเทอร์โมสแตท เครื่องควบคุมแรงดันแบบรีฟลักซ์ และชุดปั่นกวนเชิงกล เข้ากับขวดก้นกลม 3 คอ ดังรูปที่ 3.1
5. ทำการปั่นกวนภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที เพื่อให้สารผสมเข้ากันและไล่ออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบ
6. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 ± 10 °C แล้วสุ่มตัวอย่างออกมาทุกๆ 1 ชั่วโมงหลังจากอุณหภูมิถึงที่ตั้งไว้เพื่อนำมาหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value)
7. หยุดปฏิกิริยาเมื่อค่าไฮดรอกซิลอยู่ในช่วง 370 ± 20 mgKOH/g เพื่อควบคุมการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเรซินที่ได้ แล้วนำค่าไฮดรอกซิลที่ได้มาคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนต่อไป



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การเตรียมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value) [19]

1. ชั่งผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสที่ได้ 1 กรัม ใสลงในขวดก้นกลมขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายผสมของพทาลิกแอนไฮไดรด์กับพีรีดีน โดยชั่งพทาลิกแอนไฮไดรด์ 15.71 กรัม ผสมกับพีรีดีน 100 มิลลิลิตร คนให้สารละลายเข้ากัน
3. นำสารละลายผสมที่เตรียมได้มา 25 มิลลิลิตร เติมนลงในขวดก้นกลมแล้วเขย่าให้ผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสละลายจนหมด
4. ทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 115°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ล้างคอนเดนเซอร์ด้วยพีรีดีน 50 มิลลิลิตร
5. นำสารที่ได้เทลงในขวดรูปชมพู่ เติมนีโบล์ฟทาลีน 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นทำการไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 N จนถึงจุดยุติ (สารละลายมีสีชมพูอ่อน)
6. ทำแบลนค์ (Blank) เช่นเดียวกับตัวอย่าง
7. คำนวณหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value) ตามสมการที่ 3.1 โดยมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของ KOH ต่อกรัม (mgKOH/g)

$$\text{Hydroxyl value} = \frac{[(B-A)N \times 56.1]}{W}$$

สมการที่ 3.1 สมการหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value)

เมื่อ A คือ ปริมาตรของสารละลาย KOH ที่ใช้ในการไทเทรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาตรของสารละลาย KOH ที่ใช้ไทเทรตแบลนค์ (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลาย KOH (N)

W คือ น้ำหนักสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

8. คำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (Number molecular weight, \bar{M}_n) ของผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสตามสมการที่ 3.2 โดยมีหน่วยเป็นกรัมต่อโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\overline{Mn} = \frac{112200}{\text{OH value}}$$

สมการที่ 3.2 สมการหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส

ตอนที่ 2 การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

1. ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากตอนที่ 1 แล้วเติมบิสฟีนอลเอลงไป 5, 10 และ 15% โดยโมล ในส่วนของไกลโคไลซิส
2. เติมหาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยใช้อัตราส่วนของ ไกลโคไลซิส (Hydroxyl) : มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Carbonyl) เป็น 1.1:1
3. จัดชุดอุปกรณ์โดยต่อเทอร์โมสแตท เครื่องควบแน่นแบบรีฟลักซ์ และชุดปั่นกรวนเชิงกล เข้ากับขวดก้นกลม 3 คอ ดังรูปที่ 3.1 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน
4. ทำการสุ่มตัวอย่างออกมาทุกๆ 1 ชั่วโมงหลังจากอุณหภูมิถึง 170°C เพื่อหาค่าความเป็นกรด (Acid value)

3.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

1. สุ่มสารตัวอย่างและชั่งน้ำหนักที่แน่นอนลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมหาละออง 20 มิลลิลิตร และฟีนอล์ฟทาลีน 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน (กรณีไม่ละลายสามารถให้ความร้อนได้ แต่ต้องไม่ถึงจุดเดือด)
3. นำสารตัวอย่างมาไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N บันทึกปริมาตรที่ใช้
4. ทำแบลนด์ (Blank) เช่นเดียวกับตัวอย่าง
5. คำนวณค่าความเป็นกรด (Acid value) ตามสมการที่ 3.3 โดยมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของ KOH ต่อกรัม (mgKOH/g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Acid value} = \frac{[(A-B)N \times 56.1]}{W}$$

สมการที่ 3.3 สมการหาค่าความเป็นกรด (Acid value)

เมื่อ A คือ ปริมาตรของสารละลาย KOH ที่ใช้ในการไทเทรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาตรของสารละลาย KOH ที่ใช้ไทเทรตแบลนด์ (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลาย KOH (N)

W คือ น้ำหนักสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

6. หยุดปฏิกิริยาเมื่อได้ค่าความเป็นกรด (Acid value) เป็น 70 ± 5 mgKOH/g เพื่อควบคุมสมบัติของเรซินที่ได้

3.3.4 การเติมสารเชื่อมโยง

1. ละลายพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในมอนอเมอร์สไตรีน (Styrene monomer) ที่มีปริมาณ 35% ของน้ำหนักพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเป็นสารเชื่อมโยง และเติมไฮโดรควิโนน 0.2% ของน้ำหนักพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงก่อนการขึ้นรูป โดยทำที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำเรซินที่ได้ไปวัดความหนืดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) โดยใช้หัวหมุน (Spin) เบอร์ 3 และใช้ความเร็วรอบของหัวหมุน 30 รอบต่อนาที

ตอนที่ 3 การขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

1. ทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยอะซิโตนและทาไขมัน (Grease) บางๆ
2. นำเรซินที่ได้จากตอนที่ 2 มาผสมกับเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) ในปริมาณต่างๆที่ทำให้เรซินเกิดการเชื่อมโยง
3. ไล่ฟองอากาศโดยใช้เครื่อง Ultrasonic bath เป็นเวลา 25 นาที
4. เติมไดเมทิลอะนิลีน (Dimethyl aniline, DMA) ในปริมาณต่างๆที่ทำให้เรซินเกิดการเชื่อมโยง
5. นำเรซินเหลวในแม่พิมพ์ให้เต็ม แล้วปิดแม่พิมพ์อย่างช้าๆเพื่อให้ผิวหน้าขึ้นงานเรียบ (ในขั้นตอนการเทเรซินและปิดแม่พิมพ์ ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ) ใช้แผ่นโลหะปิดทับแม่พิมพ์อีกชั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วบันทึกเวลาแห้งสัมผัส (Set to touch time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ Set to touch time เป็นเวลาที่เรซินมีผิวแห้งสัมผัส และไม่มีเรซินติดขึ้นมากับแผ่นใสที่ปิดแม่พิมพ์

6. เลือกสูตรเรซินที่ใช้เวลาในการเซตตัวตามที่กำหนด (30-60 นาที) และใช้ปริมาณ BPO และ DMA ที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล

หมายเหตุ เป็นเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปซึ่งอ้างอิงจากภาคอุตสาหกรรม บริษัท เจริญวัฒนา ไฟเบอร์กลาส

ตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. สมบัติความการรับแรงดึง (Tensile properties) [20]

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ ใช้ Load cell 30 kN ความยาวเกจ (Gauge length) 35 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน (Cross head speed) 1 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)

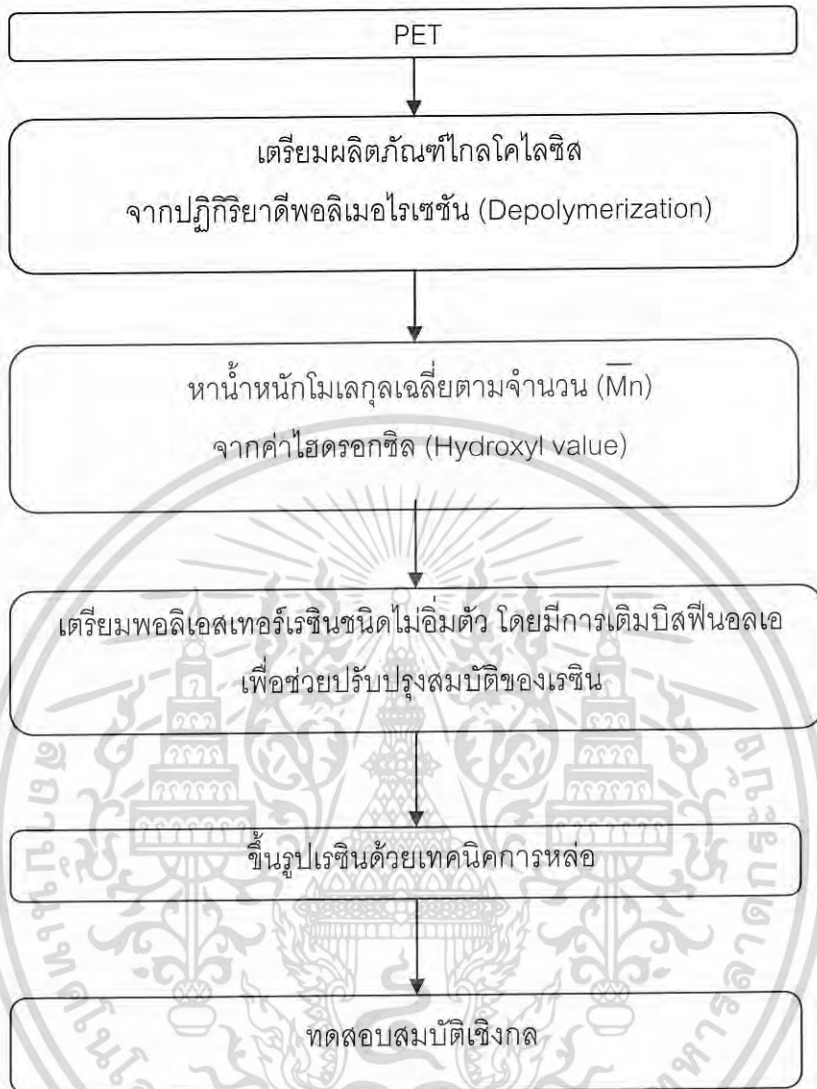
2. สมบัติความแข็งกด (Hardness property) [21]

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้ตัวอย่างชิ้นงานที่มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร ทดสอบหาค่าความแข็งกด (Hardness) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้อง

3. สมบัติความแข็งแรงกระแทก (Impact property) [22]

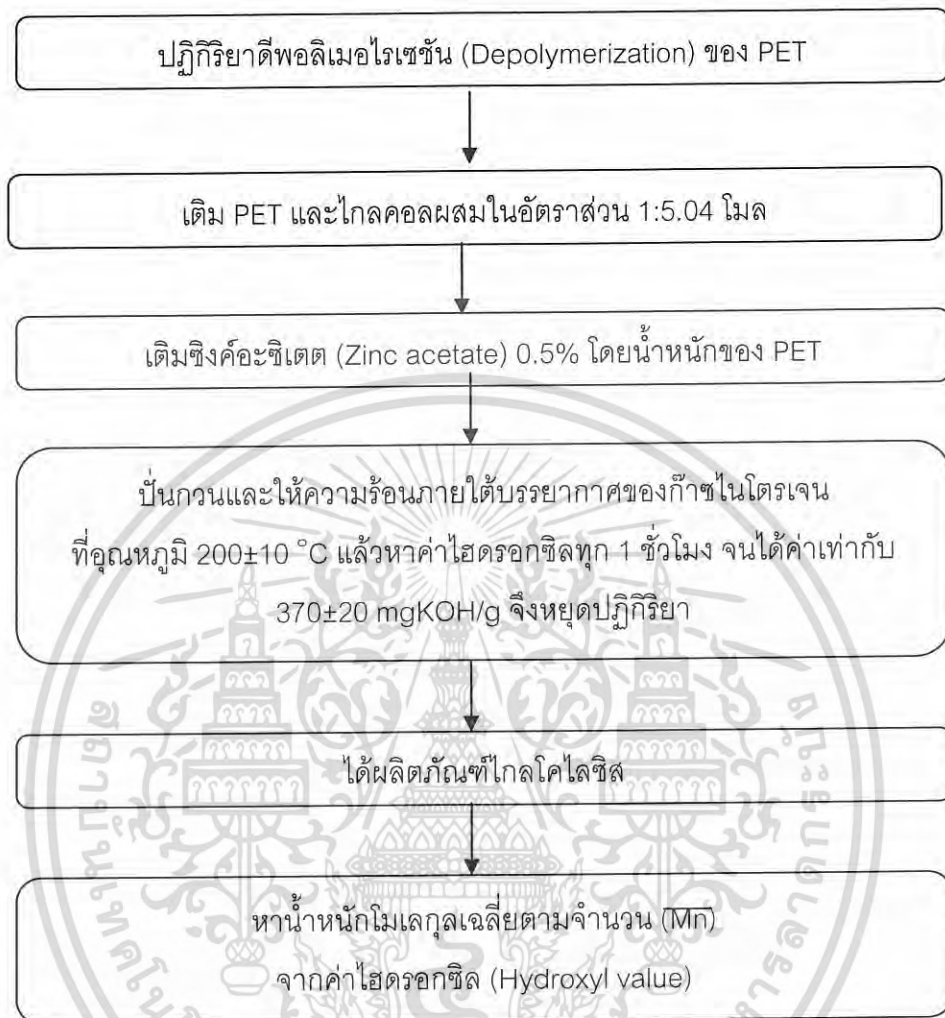
ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างแบบ Notch Izod ให้มีขนาด 3.2x12.7x60 มิลลิเมตร แล้วทำรอยบากให้มีความลึก 2.54 มิลลิเมตร ทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ในหน่วยกิโลจูลต่อตารางเมตร (kJ/m^2) ด้วยเครื่องวัดแรงกระแทก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



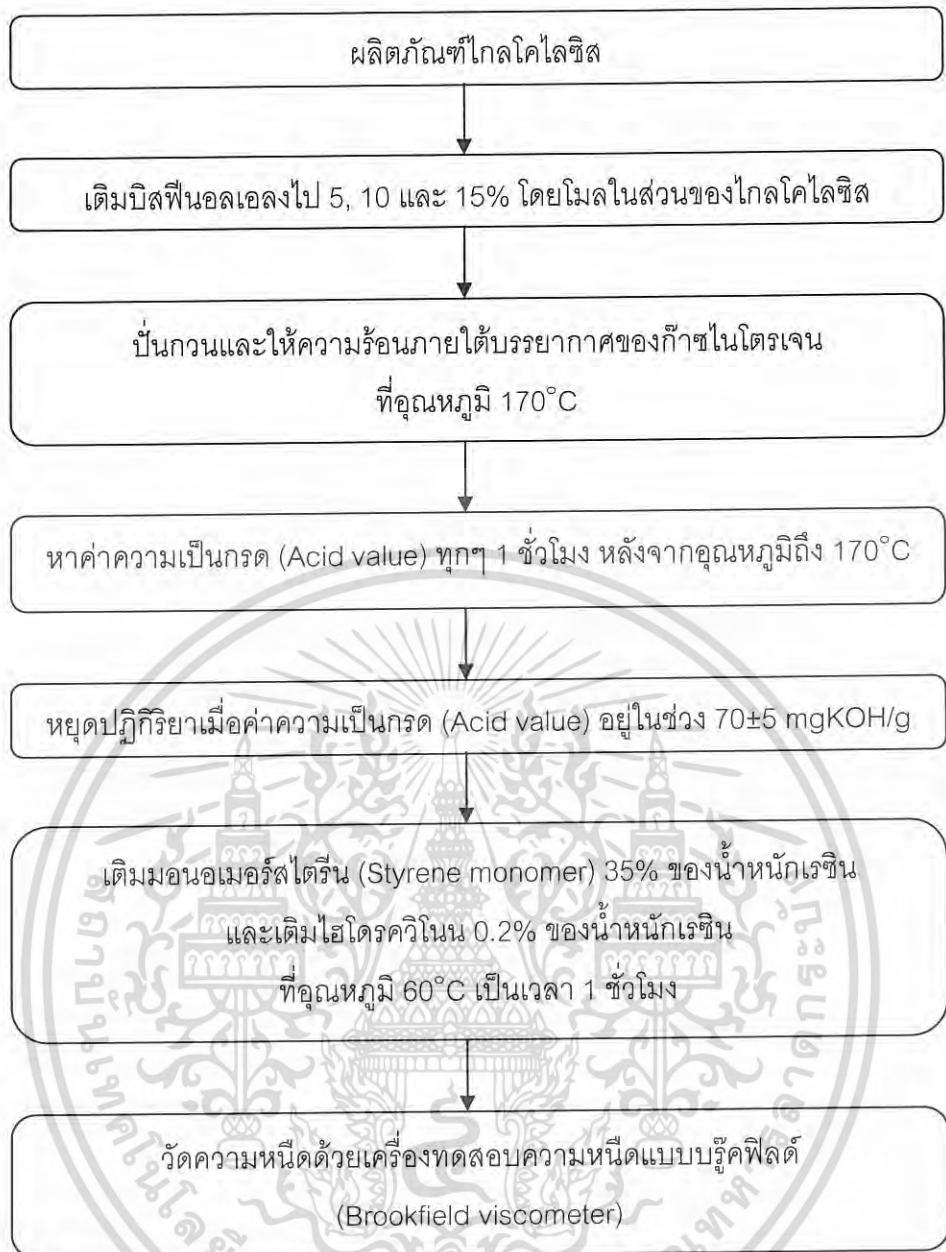
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนวิธีดำเนินการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



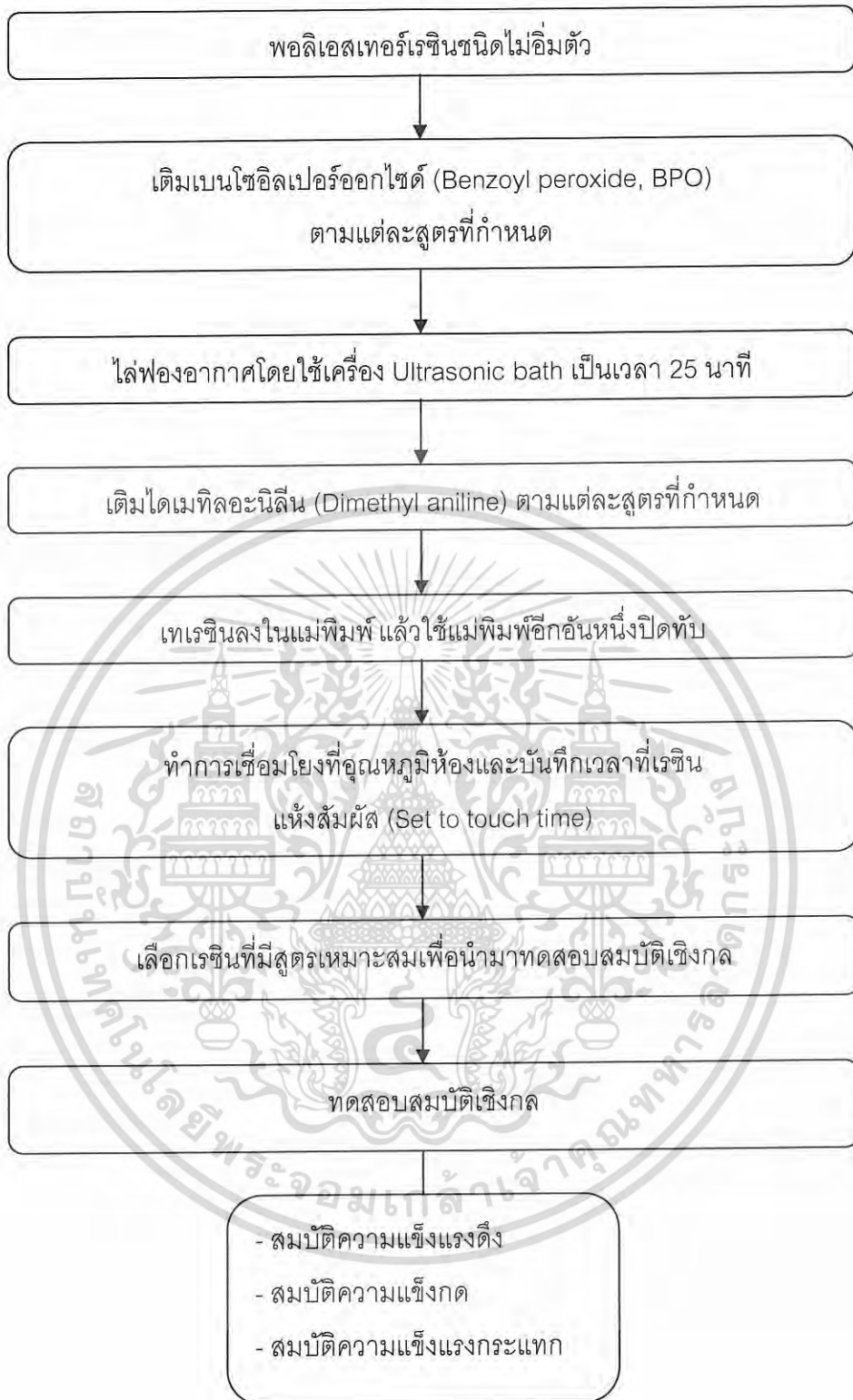
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจากปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ของ PET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจากปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันของ PET

PET ถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยเอทิลีนไกลคอล พรอพิลีนไกลคอล และ ไดเอทิลีนไกลคอล โดยใช้อัตราส่วน PET : ไกลคอลผสมเป็น 1: 5.04 โดยโมล และใช้ซิงค์อะซิเตต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 200 ± 10 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน และจะควบคุม ค่าไฮดรอกซิลให้อยู่ในช่วง 370 ± 20 mgKOH/g เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนของ ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสให้มีค่าใกล้เคียงกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีขาวขุ่น เรียกว่าผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส (Glycolized product) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาหาค่าน้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนโดยใช้ค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value) ซึ่งการทดลองนี้สามารถหาค่าไฮ-ดรอกซิลอยู่ในช่วง 370 ± 20 mgKOH/g เมื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (\overline{M}_n) พบว่ามีค่าประมาณ 300 g/mol



รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน

4.2 การเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซิลกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอนิล โดยใช้ อัตราส่วนโดยโมลของไฮดรอกซิลต่อคาร์บอนิล เป็น 1.1:1 และในขั้นนี้จะมีการเติมบิสฟีนอลเอใน ส่วนของไกลโคไลซิสเพิ่มลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเรซินที่ได้ ซึ่งปริมาณบิสฟีนอลเอที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาคือ 5% 10% และ 15% โดยโมล จากนั้นนำเรซินที่ได้มาหาค่าความเป็นกรด (Acid value) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เวลาในการทำปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรดของเรซิน

% บิสฟีนอลเอ	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชม.)	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
5	4	68.94
10	3-4	70.19
15	2-3	72.78

ค่าความเป็นกรด (Acid value) เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองนี้จะควบคุมให้อยู่ในช่วง 70 ± 5 mgKOH/g เพื่อควบคุมสมบัติของเรซิน จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า เวลาในการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อปริมาณบิสฟีนอลเอเพิ่มขึ้น เนื่องจากบิสฟีนอลเอมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์มากกว่าไกลคอลชนิดอื่นๆ ที่ใช้ ทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง

4.3 อิทธิพลของบิสฟีนอลเอที่มีผลต่อความหนืดและเวลาเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

4.3.1 ความหนืดของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากเครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์

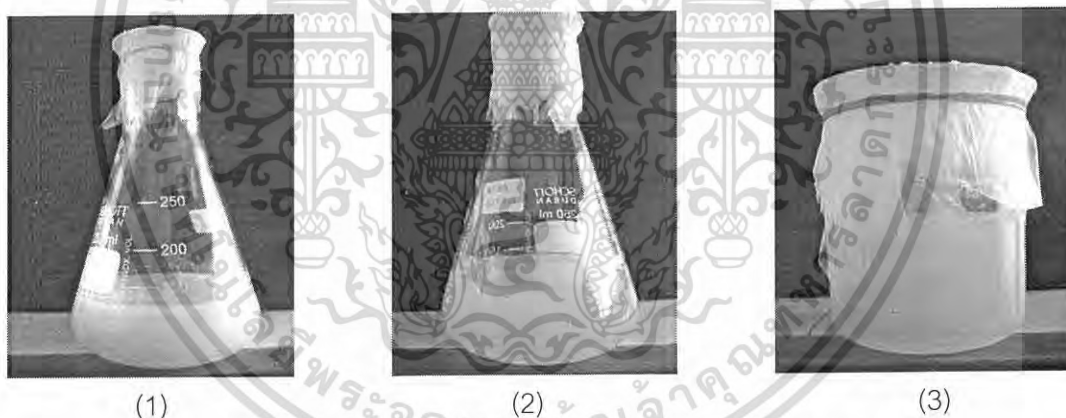
ความหนืดเป็นตัวแปรสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเรซิน ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงกระทำสายโซ่จะมีการจัดเรียงตัวตามแนวแรงและหลุดออกจากกัน โมเลกุลที่มีสายโซ่ยาวจะต้านทานการจัดเรียงตัวตามแนวแรงหรือหลุดออกจากกันได้ยากกว่าโมเลกุลที่สายโซ่สั้นทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของเรซินมีความสำคัญโดยเฉพาะการขึ้นรูปคอมโพสิต (Composite fabrication) กล่าวคือถ้าความหนืดของเรซินมากเกินไป อาจเป็นอุปสรรคในการขึ้นรูปทำให้เรซินไหลแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ยากและอาจเกิดปัญหาในการกำจัดฟองอากาศภายในชิ้นงานคอมโพสิต ถ้าความหนืดน้อยเกินไปอาจเกิดการไหลย้อย (Sagging) หลุดออกจากชิ้นงาน หรืออาจทำให้ความหนาผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความหนืดของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีปริมาณบิสฟีนอลเอต่างกัน

% บิสฟีนอลเอ	ความหนืด (cP)
5	1618
10	1686
15	1703

ในการทดลองนี้ใช้หัวหมุน (spin) เบอร์ 3 ความเร็วรอบของหัวหมุน 30 รอบ/นาที ความหนืดที่วัดได้อยู่ในช่วง 1618-1703 cP (ตารางที่ 4.2) เนื่องจากบิสฟีนอลเอมีโครงสร้างขนาดใหญ่ และมีความเกะกะทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ออกจากกันได้ยากกว่าเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่งผลให้ความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณบิสฟีนอลเอมากขึ้น อย่างไรก็ตามความหนืดเรซินในช่วง 1600-1700 cP เป็นความหนืดของเรซินที่ไม่มากเกินไป สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ นอกจากนี้ปริมาณบิสฟีนอลเอที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เรซินที่สังเคราะห์ได้มีสีเหลืองเข้มขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.2 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ได้หลังจากการเติมบิสฟีนอลเอ

(1) 5% (2) 10% และ (3) 15% ของส่วนผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิส

4.3.2 อิทธิพลของบิสฟีนอลเอที่มีต่อเวลาในการเชื่อมโยง

ในการเชื่อมโยงพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีการเติมบิสฟีนอลเอปริมาณต่างๆ กัน จะมีผลต่อปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) การใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้นที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดอุปสรรคในการขึ้นรูปได้แก่ การใช้สารเชื่อมโยงปริมาณน้อยเกินไปจะใช้เวลานานในการเชื่อมโยงหรือไม่แข็งตัว แต่ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปอาจทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงสั้นเกินไปจนไม่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลิตได้ทันเวลา อีกทั้งทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารเชื่อมโยงคือ BPO ปริมาณ 2.5-5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์คอมโพลิต และสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ DMA ปริมาณ 1-3% โดยน้ำหนัก ผลการทดลองสามารถแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เวลาเชื่อมโยงของเรซินที่มีปริมาณบิสฟีนอลเอและปริมาณสารเชื่อมโยงต่างกัน

% ตัวริเริ่มและ ตัวกระตุ้นตัวเร่ง	เวลาในการแห้งสัมผัส (Set to touch time) (นาทีก)		
	5% บิสฟีนอลเอ	10% บิสฟีนอลเอ	15% บิสฟีนอลเอ
5%BPO-1%DMA	40	-	30
4%BPO-1%DMA	ไม่แข็งตัวใน 120 นาที	-	65
4%BPO-2%DMA	90	-	45
2.5%BPO-1%DMA	-	-	60
2.5%BPO-2%DMA	ไม่แข็งตัวใน 120 นาที	45 (Dry time 1 วัน)	25 (Dry time 5 วัน)
2.5%BPO-3%DMA	ไม่แข็งตัวใน 120 นาที	30	20

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบเรซินที่ใช้สารเชื่อมโยงปริมาณเท่ากัน จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณบิสฟีนอลเอมากขึ้นจะมีผลทำให้เวลาแห้งสัมผัสลดลง เนื่องจากโครงสร้างของบิสฟีนอลเอที่มีขนาดใหญ่ เกะกะ เคลื่อนที่ได้ยากซึ่งมีผลมาจากวงเบนซีน ทำให้โครงสร้างของเรซินเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น จึงมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการแห้งผิวหรือแห้งสัมผัสของชิ้นงานลดลง

จากการทดลองปรับปริมาณสารเชื่อมโยง BPO พบว่าถ้าใช้ปริมาณ BPO น้อยกว่า 2.5% จะทำให้เวลาแห้งสัมผัสช้านานกว่า 120 นาที ซึ่งนานเกินไปไม่นิยมใช้งานเชิงอุตสาหกรรม (เวลาที่แนะนำจากภาคอุตสาหกรรมคือ 30-60 นาที) ปริมาณ BPO ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณบิสฟีนอลเอ กล่าวคือ ถ้าเลือกใช้บิสฟีนอลเอ 10% หรือ 15% ปริมาณ BPO ที่เหมาะสมคือ 2.5% แต่ถ้าใช้บิสฟีนอลเอ 5% อาจจะต้องใช้ BPO ถึง 5% จึงจะทำให้เรซินแห้งสัมผัสในเวลาที่กำหนด

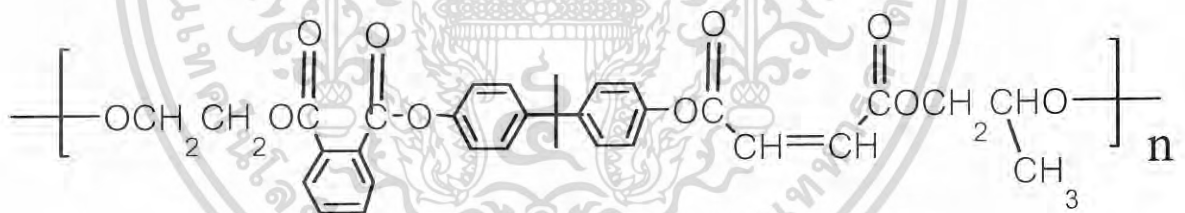
จากการปรับปริมาณสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา DMA 1-3% พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ DMA จะทำให้เวลาแห้งสัมผัสเร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ปริมาณ DMA มากจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเหลืองเข้มขึ้นจากสีของสารประกอบเอมีน ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคในการใช้งานผลิตภัณฑ์คอมโพลิตบางประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของบิสฟีนอลเอที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

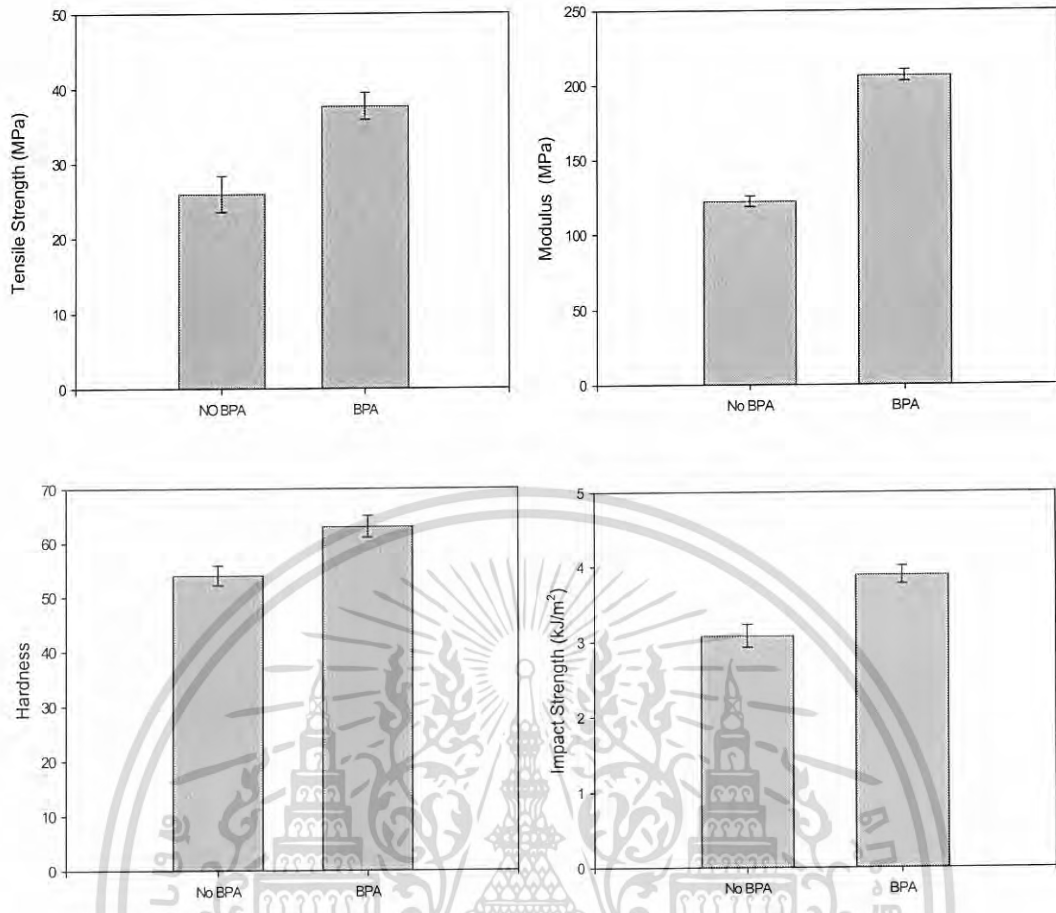
เมื่อเรซินเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเรซินเปลี่ยนจากเส้นตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต้องมีปริมาณการเชื่อมโยงที่พอเหมาะเพื่อให้ชิ้นงานแข็งแรงเหมาะสมกับการใช้งาน ปริมาณการเชื่อมโยงสามารถระบุได้จากความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ซึ่งจะสัมพันธ์กับจำนวนพันธะเชื่อมโยงในหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุ ถ้าเรซินเกิดพันธะเชื่อมโยงมากจะมีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูง สมบัติเชิงกลต่างๆ จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นเชื่อมโยงด้วย

ในการเลือกสูตรเรซินเพื่อมาทดสอบสมบัติเชิงกลต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการเช่น เวลาแห้งสัมผัส ปริมาณ BPO ที่ใช้และอาจพิจารณาเวลาแห้งแข็ง (Dry time) ด้วย ซึ่งจากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าเรซินที่มีเวลาแห้งสัมผัสและปริมาณ BPO อยู่ในช่วงที่กำหนดคือ เรซินสูตรที่ใช้บิสฟีนอลเอ 10%, BPO 2.5% และ DMA 2% และเรซินสูตรที่ใช้บิสฟีนอลเอ 15%, BPO 2.5% และ DMA 2% แต่ในการทดลองพบว่าเวลาแห้งแข็ง (Dry time) ของเรซินที่ใช้บิสฟีนอลเอ 15%ค่อนข้างนานถึง 5 วัน แต่ในเรซินที่ใช้บิสฟีนอลเอ 10% ใช้เวลาแห้งแข็งเพียง 1-2 วัน ดังนั้นในการทดลองนี้เรซินที่จะนำมาขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติคือ เรซินที่ใช้บิสฟีนอลเอ 10%, BPO 2.5% และ DMA 2%



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างโครงสร้างของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

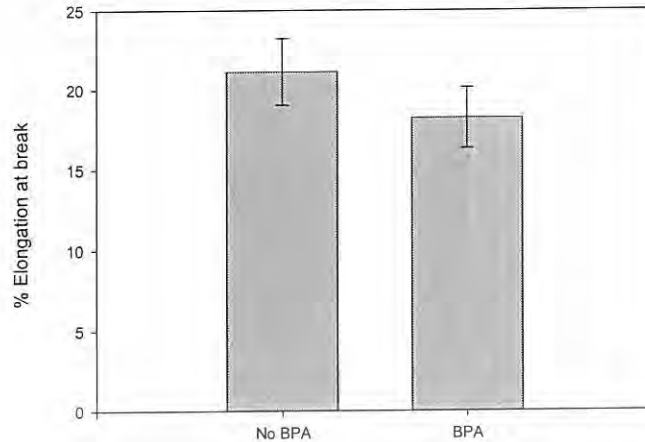


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง โมดูลัสแรงดึง ความแข็งกดและความแข็งแรงกระแทกของเรซินที่ปรับสมบัติกับไม่ปรับสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ

จากการทดลองพบว่า เรซินที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอจะมีค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัสแรงดึง ความแข็งกดและความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างเรซินที่มีวงเบนซีนจากบิสฟีนอลเอ ซึ่งวงเบนซีนนี้เองจะเป็นส่วนเพิ่มความแข็งแรง (Rigidity) ให้กับสายโซ่โมเลกุล เมื่อชิ้นงานได้รับแรงจึงสามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงานได้มากขึ้นด้วย

นอกจากนี้ความแข็งแรงกระแทกอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของเรซินที่เติมบิสฟีนอลเอ เนื่องจากโครงสร้างบิสฟีนอลเอมีขนาดค่อนข้างใหญ่และยาว เมื่อเข้าไปแทรกอยู่ในสายโซ่โมเลกุล จะทำให้ระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมโยงมีมากขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงจึงสามารถกระจายแรงที่ได้รับได้มากกว่า ชิ้นงานจึงสามารถรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบร้อยละการยืด ณ จุดขาดของเรซินที่ปรับสมบัติกับไม่ปรับสมบัติด้วย บิสฟีนอลเอ

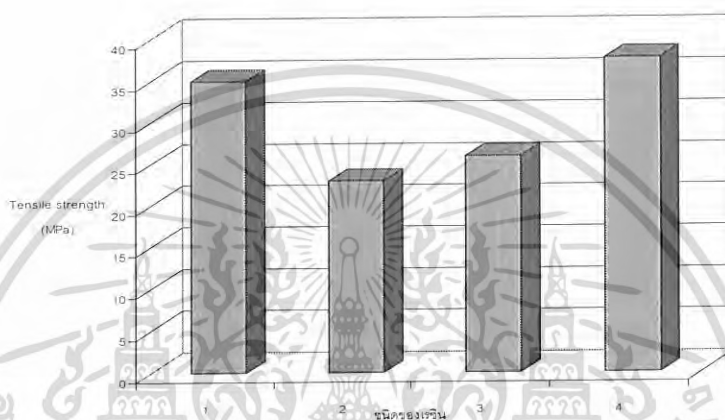
จากรูปจะเห็นว่าเรซินที่มีการเติมบิสฟีนอลเอจะมีร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจาก บิสฟีนอลเอที่เติมลงไปจะทำหน้าที่เหมือนเป็นไกลคอลชนิดหนึ่งซึ่งจะแทรกอยู่ในโครงสร้างของเรซินแบบสุมกับไกลคอลชนิดอื่นๆ ซึ่งโครงสร้างของบิสฟีนอลเอที่มีวงเบนซีนจะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงของไกลคอลชนิดอื่นๆ มีผลทำให้ชิ้นงานมีความยืดหยุ่นลดลง เมื่อได้รับแรงดึงชิ้นงานจึงสามารถยืดตัวได้น้อยลง

ตารางที่ 4.4 ผลของสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้

สมบัติเชิงกลที่ทดสอบ	เรซินที่ไม่มีบิสฟีนอลเอ	เรซินที่มีบิสฟีนอลเอ
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), MPa	25.89±2.40	37.65±1.80
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break), %	21.12±2.10	18.23±1.90
มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus), MPa	122.12±3.60	206.41±3.80
ความแข็งกด (Hardness), Shore D	54±2	63±2
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength), kJ/m ²	3.08±0.15	3.89±0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

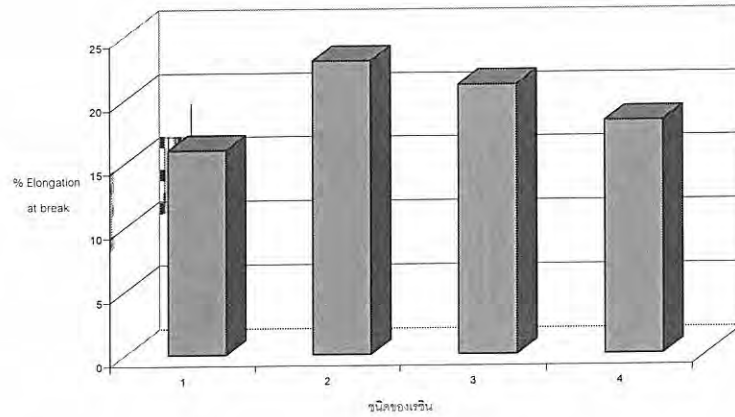
การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจาก PET ที่ใช้แล้วมีการศึกษากันมาอย่างต่อเนื่อง โดยสังเคราะห์จากขวด PET ที่ใช้แล้วและปรับปรุงสมบัติโดยการเติม DEG หลังกระบวนการไกลโคไลซิส, สังเคราะห์จากฟิล์ม X-ray ที่ใช้แล้วและเติม DEG พร้อมกับไกลคอลชนิดอื่นในกระบวนการไกลโคไลซิส และสังเคราะห์จากขวด PET ที่ใช้แล้วและมีการเติม DEG พร้อมกับไกลคอลชนิดอื่นในกระบวนการไกลโคไลซิส ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลที่ได้ออกกับพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ได้จากขวด PET โดยมีการเติม DEG พร้อมกับไกลคอลชนิดอื่นในกระบวนการไกลโคไลซิสและมีการปรับปรุงสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของเรซินชนิดต่างๆเมื่อ

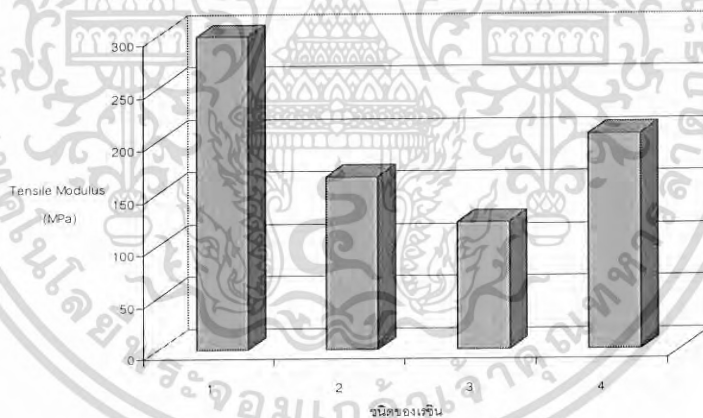
- (1) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ภายหลังปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [16]
- (2) เรซินจากฟิล์ม X-ray ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [17]
- (3) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส
- (4) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิสและมีการเติมบิสฟีนอลเอช่วยปรับปรุงสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบร้อยละการยืด ณ จุดขาดของเรซินชนิดต่างๆเมื่อ

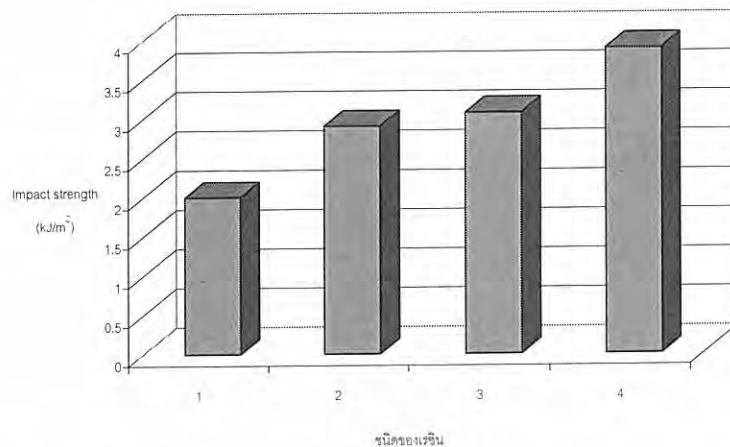
- (1) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ภายหลังจากปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [16]
- (2) เรซินจากฟิล์ม X-ray ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [17]
- (3) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส
- (4) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิสและมีการเติมบิสฟีนอลเอช่วยปรับปรุงสมบัติ



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบมอดุลัสแรงดึงของเรซินชนิดต่างๆเมื่อ

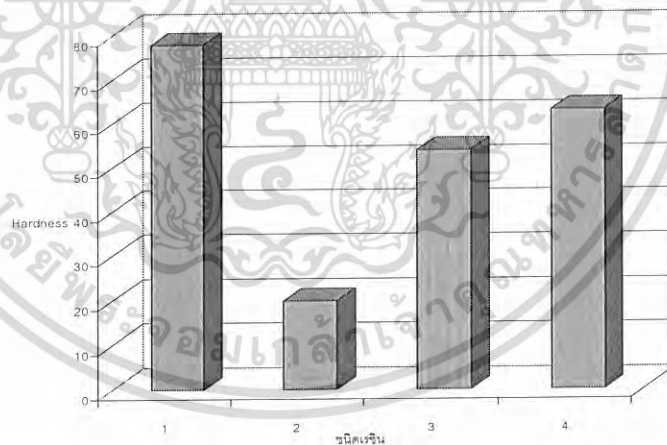
- (1) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ภายหลังจากปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [16]
- (2) เรซินจากฟิล์ม X-ray ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [17]
- (3) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส
- (4) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิสและมีการเติมบิสฟีนอลเอช่วยปรับปรุงสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกของเรซินชนิดต่างๆเมื่อ

- (1) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ภายหลังปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [16]
- (2) เรซินจากฟิล์ม X-ray ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [17]
- (3) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส
- (4) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิสและมีการเติมบิสฟีนอลเอช่วยปรับปรุงสมบัติ



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบความแข็งกดของเรซินชนิดต่างๆเมื่อ

- (1) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ภายหลังปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [16]
- (2) เรซินจากฟิล์ม X-ray ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [17]
- (3) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส
- (4) เรซินจากขวด PET ที่เติม DEG ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิสและมีการเติมบิสฟีนอลเอช่วยปรับปรุงสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

PET สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยการทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันด้วยไกลคอลผสมระหว่างเอทิลีนไกลคอล พรอพิลีนไกลคอล และ ไดเอทิลีนไกลคอล จะได้เป็นผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส (Glycolized product) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้มาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และทำการเชื่อมโยงด้วยสไตรีน ซึ่งเรซินที่ได้ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งแต่ค่อนข้างเปราะ โครงงานพิเศษนี้จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเรซินให้ดีขึ้น เพื่อให้สามารถนำเรซินไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมบิสฟีนอลเอ ในอัตราส่วนต่างๆ คือ 5, 10 และ 15% โดยโมลเพิ่มลงในส่วนไกลโคไลซิส ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนประมาณ 300 g/mol ซึ่งควบคุมค่าไฮดรอกซิลให้อยู่ในช่วง 350-400 mgKOH/g
2. เมื่อปริมาณบิสฟีนอลเอมากขึ้น ทำให้ได้เรซินที่มีสีเหลืองเข้มขึ้นและเวลาในการแห้งสัมผัส (Set to touch time) เร็วมากขึ้นด้วย ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมควรมีเวลาที่เรซินแห้งสัมผัสอยู่ในช่วง 30-60 นาที
3. ปริมาณบิสฟีนอลเอที่แตกต่างกันจะมีผลต่อปริมาณการใช้ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาและตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยคือ เมื่อปริมาณบิสฟีนอลเอมากขึ้นปริมาณการใช้ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาและตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะลดลง ดังนั้นเมื่อจะนำไปใช้งานด้านอุตสาหกรรมควรเลือกปริมาณการใช้ให้เหมาะสม ซึ่งในทางการค้าไม่ควรใช้ปริมาณตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาเกิน 5% ของน้ำหนักเรซิน ดังนั้นสูตรที่ได้คือ
 - ปริมาณบิสฟีนอลเอที่ใช้คือ 5% โดยโมลของส่วนไกลโคไลซิส
 - ปริมาณตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาที่ใช้คือ 2.5% ของน้ำหนักเรซิน
 - ปริมาณตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 2% ของน้ำหนักเรซิน
4. บิสฟีนอลเอที่เติมลงในเรซินทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็งกด (Hardness) เพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานเรซินจากโครงการพิเศษ

1. เรซินที่ได้จากโครงการนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ไม่คำนึงถึงสีของผลิตภัณฑ์เนื่องจากเมื่อเติมบิสฟีนอลเอลงไปจะทำให้สีของเรซินมีสีเหลืองและจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อมีปริมาณบิสฟีนอลเอมากขึ้น
2. ถ้าต้องการขึ้นรูปชิ้นงานเรซินโดยให้มีเวลาเชื่อมโยงลดลงอาจเพิ่มปริมาณบิสฟีนอลเอให้มากขึ้นเหมาะสมกับการใช้งาน
3. ควรเติมบิสฟีนอลเอพร้อมกับไกลคอลผสมในการเตรียมผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสเพื่อให้บิสฟีนอลเอเข้าไปทำปฏิกิริยากับ PET ได้โดยตรง
4. จากการเติมบิสฟีนอลเอจะทำให้เรซินที่ได้มีความหนืดมากขึ้น จึงควรหาวิธีการได้ฟองอากาศออกให้หมดเพื่อให้ได้ผลของสมบัติเชิงกลที่ถูกต้องมากขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับโครงการพิเศษในอนาคต

1. ควรศึกษาสมบัติทางอื่นๆของเรซินที่ปรับปรุงด้วยบิสฟีนอลเอ เช่น สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) สมบัติการหดตัว สมบัติทางแสง สมบัติความทนทานต่อกรดและด่าง ฯลฯ
2. ทดลองนำเรซินมาขึ้นรูปเป็นคอมโพสิตเช่น คอมโพสิตเส้นใยแก้ว แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อให้แน่ใจว่าเรซินที่ปรับปรุงสมบัตินี้สามารถนำมาใช้ในงานคอมโพสิตได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.G. Roger and T. E.Long, **Synthetic method in step growth polymers**, USA, 2003 : 58-59.
- [2] J.R.Lawrence, **Polyester Resin**, Var Nostrand Reinhold, New York, 1960.
- [3] K.J.Saunders, **Organic Polymer Chemistry (2nd Ed.)**, Chapman and Hall, London, 1988.
- [4] J.A. Brydson, **Plastic Materials (7th Ed.)**, Butterworth-heinemann, London, 1999.
- [5] P.George, S.Dimitris, D.Irini and N.Dimitris, **Alkyd resins derived from glycolized waste poly(ethylene terephthalate)**, European Polymer Journal, Vol.41(2), 2005 : 201-210.
- [6] E.Chris, 2000-2004, **Poly(ethylene terephthalate)**, [Online], Available : www.polymerprocessing.com/polymers/PET.html.
- [7] I.Kroschwitz and H.Grant, **Encyclopedia of chemical technology**, Vol.19 : 654-677.
- [8] A.Trudy, 2000, **Technology for Polyester Regeneration**, [Online], Available : www.academic.scranton.edu/faculty/CANNM1/industrialchemistry/IndustrialChemistrymodule.html.
- [9] มนชัย ทาจันท์, **เทคโนโลยีการรีไซเคิล PET**, Polymer Science, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, มกราคม-มีนาคม 2549 : 61-65.
- [10] C.P.Groshart, P.C.Okkerman and A.M.C.M.Pijnenburg. **Chemical study on Bisphenol A**, 2001 : 19-22.
- [11] Chiyoda Corporation, 1997-2007, **Bisphenol A**, [Online], Available : www.chiyoda-corp.com/biz/e/hpi/ct_bisa.shtml.
- [12] D.Rosu, N.Constantin and L.Rosu, **Effect of UV radiation on photolysis of epoxy maleate of bisphenol A**, Journal of Photochemistry and Photobiology, Vol.177, 2006 : 218-224.
- [13] Y.Sato, Y. Kando, K. Tsujita and N.Kawai. **Degradation behavior and recovery of bisphenol A from epoxy resin and polycarbonate resin by liquid phase chemical recycling**, Polymer Degradation and Stability, Vol.89, 2005 : 317-326.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] D.Ratnasari, I.Ahmad and A.Ramli, Chemical recycling of PET waste from soft drinkbottles to produce a thermosetting polyester resin. Malaysian Journal of Chemistry, Vol.8, 2006 : 22-26.
- [15] G.Xi, M.Lu and C.Sun. Study on depolymerization of waste poly(ethyleneterephthalate) into monomer of bis(2-hydroxyethyl terephthalate). Polymer Degradation and Stability, Vol.87, 2002 : 117-120.
- [16] ปณิดา การสมวรรณ, เพ็ญสุภา คัมภีรานนท์ และศิริรัตน์ ชินะโรจน์, การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วสำหรับงานคอมโพสิต โครงการพิเศษระดับปริญญาตรี, สาขาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [17] N.Krueson, A.Seephueng, N.Laorod, Unsaturated Polyester Resin From X-rayfilm, Special project.B.Sc.in Science and Technology of Polymer, Faculty of Science. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2005.
- [18] D.J.Suh, O.O.Park and K.H.Yoon, The properties of unsaturated polyester based on the glycolyzed poly(ethylene terephthalate) with various glycol composition, Polymer, Vol.41, 2000 : 461-466.
- [19] The American Society for Testing and Materials, ASTM D 2849-69, Standard Methods of Testing Urethane Foam Polyol Raw Material, 1998 : 630-650.
- [20] The American Society for Testing and Materials, ASTM D 638-87b, Standard Methods for Tensile Properties of Plastic, 1992 : 155-166.
- [21] The American Society for Testing and Materials, ASTM D 2240-91, Standard Methods for Rubber Property-Durometer Hardness, 1992 : 226-229.
- [22] The American Society for Testing and Materials, ASTM D 256-90b, Standard Methods for Impact Resistance of Plastic and Electrical Insulating Materials, 1992 : 58-74.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีกรคำนวณ

ก.1 วิธีกรคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจากค่าไฮดรอกซิล

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้} \quad & \text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส} & = & W & \text{กรัม} \\ & \text{ปริมาตร KOH ที่ใช้ไทเทรต} & = & V & \text{มิลลิลิตร} \\ \text{ดังนั้น} \quad & \text{จำนวนโมลของหมู่ } -\text{COOH} & = & \frac{NV}{1000} & \text{โมล} \end{aligned}$$

ถ้าผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสเป็นเส้นตรง 1โมเลกุลมี $-\text{COOH}$ 2 หมู่

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{จำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส} = \frac{NV}{2(1000)} \text{ โมล}$$

$$\begin{aligned} \text{ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส} & \frac{NV}{1000} \text{ โมล} \text{ น้ำหนัก } W \text{ กรัม} \\ \text{ถ้าผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส} & 1 \text{ โมล} \text{ น้ำหนัก } \frac{2W(1000)}{NV} \text{ กรัม} \quad (\text{ก.1}) \end{aligned}$$

เนื่องจากค่าไฮดรอกซิล (OH Value) $= \frac{NV \times 56.1}{W}$ mgKOH/g

หรือ $\frac{NV}{W} = \frac{\text{OH Value}}{56.1}$ (ก.2)

แทนสมการ (ก.2) ลงใน (ก.1)

$$\text{ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส } 1 \text{ โมล} \text{ น้ำหนัก } \frac{2 \times 56.1 \times 1000}{\text{OH Value}} \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad & \text{น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส} \\ & = \frac{112200}{\text{OH Value}} \text{ กรัม/โมล} \quad (\text{ก.3}) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (Mn)

จากการทดลอง ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่สังเคราะห์ได้มีค่าไฮดรอกซิล 368.59 mgKOH/g

แทนค่าไฮดรอกซิลลงในสมการ (ก.3)

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (Mn)} = \frac{112200}{368.59} = 304.40 \text{ กรัม/โมล}$$

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยบิสฟีนอลเอ

ตอนที่ 1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส

สารตั้งต้นที่ใช้	ปริมาณ (กรัม)
PET recycle	192.00
Ethylene Glycol (EG)	124.99
Propylene Glycol (PG)	153.21
Diethylene Glycol (DEG)	106.84
Zinc Acetate	0.96
รวม	578.00

ตอนที่ 2 การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

บิสฟีนอลเอ (%)	PET : Glycol (โมล)	EG : PG : DEG (โมล)	บิสฟีนอลเอ (โมล)	ไฮดรอกซิล : คาร์บอนิล (โมล)	มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (กรัม)
5	1 : 5.04	1 : 1 : 0.5	0.055	1.1 : 1	78.54
10	1 : 5.04	1 : 1 : 0.5	0.11	1.1 : 1	79.35
15	1 : 5.04	1 : 1 : 0.5	0.165	1.1 : 1	80.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่ 1 มีบิสฟีนอลเอ 5% โดยโมลของส่วนไกลโคไลซิส

$$\text{ไฮดรอกซิล : คาร์บอนิล} = 1.1 : 1$$

$$\begin{aligned} \text{ไฮดรอกซิล} &= \text{โมลของไกลคอล} + \text{โมลของบิสฟีนอลเอ} \\ &= 5.04 + 0.055 = 5.095 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\text{ไฮดรอกซิล : คาร์บอนิล (1.1 : 1)} = 5.095 : 4.632 \text{ โมล}$$

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คือ } 4.632 \times 98 = 453.936 \text{ กรัม}$$

แต่ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสมี 100 กรัม

$$\text{เพราะฉะนั้น จะมีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คือ } (100 \times 453.936) = 78.54 \text{ กรัม}$$

578.00

สูตรที่ 2 มีบิสฟีนอลเอ 10% โดยโมลของส่วนไกลโคไลซิส

$$\text{ไฮดรอกซิล : คาร์บอนิล} = 1.1 : 1$$

$$\begin{aligned} \text{ไฮดรอกซิล} &= \text{โมลของไกลคอล} + \text{โมลของบิสฟีนอลเอ} \\ &= 5.04 + 0.11 = 5.15 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\text{ไฮดรอกซิล : คาร์บอนิล (1.1 : 1)} = 5.15 : 4.68 \text{ โมล}$$

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คือ } 4.68 \times 98 = 458.64 \text{ กรัม}$$

แต่ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสมี 100 กรัม

$$\text{เพราะฉะนั้น จะมีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คือ } (100 \times 458.64) = 79.35 \text{ กรัม}$$

578.00

สูตรที่ 3 มีบิสฟีนอลเอ 15% โดยโมลของส่วนไกลโคไลซิส

$$\text{ไฮดรอกซิล : คาร์บอนิล} = 1.1 : 1$$

$$\begin{aligned} \text{ไฮดรอกซิล} &= \text{โมลของไกลคอล} + \text{โมลของบิสฟีนอลเอ} \\ &= 5.04 + 0.165 = 5.205 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\text{ไฮดรอกซิล : คาร์บอนิล (1.1 : 1)} = 5.205 : 4.732 \text{ โมล}$$

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คือ } 4.732 \times 98 = 463.736 \text{ กรัม}$$

แต่ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสมี 100 กรัม

$$\text{เพราะฉะนั้น จะมีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คือ } (100 \times 463.736) = 80.23 \text{ กรัม}$$

578.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้