

การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวดพลาสติกใช้แล้ว

SYNTHESIS OF UNSATURATED POLYESTER RESIN FROM
WASTE PET BOTTLES

ปานฤทัย แก้วบริสุทธ์
PANROUTHAI KAWBORISUT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-SC-M-014-897

การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวดพลาสติกแล้ว

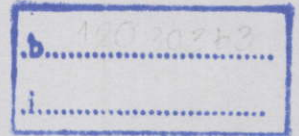
**SYNTHESIS OF UNSATURATED POLYESTER RESIN FROM
WASTE PET BOTTLES**



ปานฤทัย แก้วบริสุทธิ

PANROUTHAI KAWBORISUT

.....
ยน..... 87069
ปี... 3.0 ส.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2551

KMITL-2008-SC-M-014-397

**SYNTHESIS OF UNSATURATED POLYESTER RESIN FROM
WASTE PET BOTTLES**

PANROUTHAI KAWBORISUT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งไปขึ้นเว็บไซต์ของบุคคลอื่นหรือของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2008-SC-M-014-397

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

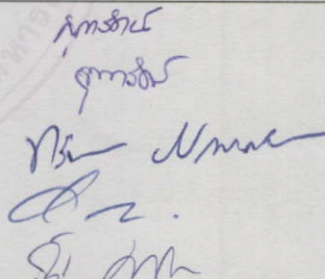
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวดพลาสติกแล้ว
Synthesis of Unsaturated Polyester Resin from Waste PET Bottles
ชื่อนักศึกษา นางสาวปานฤทัย แก้วบริสุทธิ์
รหัสประจำตัว 47064208
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์	รักชลธิ์	
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรัชญาวารากร	
รศ.ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	
รศ.ดร.อิทธิพล	แจ่มชัด	
ผศ.ดร.ภัทรารุช	มนต์วิเศษ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 21 พฤษภาคม 2551 เวลา 09.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 602

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ในการค้า
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารดังกล่าวหากมีการนำไปใช้

วันที่.....29.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ.2551.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวด เพทใช้แล้ว
นักศึกษา	นางสาวปานฤทัย แก้วบริสุทธิ์
รหัสประจำตัว	47064208
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำขวดน้ำดื่มชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ที่ใช้แล้วและเม็ดพลาสติก PET บริสุทธิ์มาใช้ประโยชน์เป็นพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resins, UPRs) โดยการทำให้ปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เชชันกับไกลคอลผสมระหว่างเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) พรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) และ ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) เพื่อให้ได้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เรียกว่าผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส (Glycolysis product) ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่แตกต่างกันได้แก่ 1:1:0, 1:1:0.5 และ 1:1:1 (โดยโมล) จากนั้นทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) ในอัตราส่วน Hydroxyl:Carboxyl เป็น 1.1 ต่อ 1 และใช้ปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ 30 % โดยน้ำหนักของเรซิน จากนั้นนำเรซินที่ได้มาหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาร่วมกับสารกระตุ้นในปฏิกิริยาเชื่อมโยง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบสารเชื่อมโยง 2 ระบบ ได้แก่ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์/ไดเมทิลแอนนิลีน (BPO/DMA) และ เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์/โคบอลต์แนฟทีเนต (MEKP/Co) แล้วทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเรซิน ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพและลักษณะการเชื่อมโยง จากการทดลองพบว่าเวลาการเกิดเจล (Gel-time) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น และอยู่ในช่วง 30-70 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับเรซินเชิงพาณิชย์ จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลบางประการของเรซิน ได้แก่ ความแข็งแรงดึง, โมดูลัสของยัง, โมดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มขึ้นในอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:0.5 แต่จะลดลงในอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:1 ส่วนเปอร์เซ็นต์การยึดฉวย จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงลดลง ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า T_g มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น อุณหภูมิคานทานการบิดงอ (HDT) ของเรซินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ DEG เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบการเชื่อมโยงเรซินสองระบบพบว่า สมบัติต่าง ๆ

ของเรซินมีค่าใกล้เคียงกัน การประยุกต์ใช้งานเรซินที่เป็นไปได้ได้แก่ ไฟเบอร์กลาสคอมโพสิต
และการเคลือบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of Unsaturated Polyester Resin from Waste PET Bottles
Student	Ms. Panrouthai Kawborisut
Student ID.	47064208
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade

ABSTRACT

This thesis was focused on using waste poly (ethylene terephthalate, PET) bottles and virgin PET as starting materials for producing unsaturated polyester resins (UPRs) by using depolymerization reaction of PET. First, glycolysis products were obtained by depolymerizing PET with ethylene glycol (EG), propylene glycol (PG), and diethylene glycol (DEG). Three molar ratios of EG:PG:DEG (i.e., 1:1:0, 1:1:0.5 and 1:1:1) were studied. The glycolysis products were then reacted with maleic anhydride (MA) by using hydroxyl:carbonyl ratio of 1.1:1 (mol ratio). Styrene monomer was added at 30% by weight of UPRs. The synthesized UPRs were then crosslinked by adding an initiator and accelerator and shaped into samples by mold casting technique. Two curing systems were also studied in this work, i.e., benzoyl peroxide/dimethyl aniline (BPO/DMA) and methyl ethyl ketone peroxide/cobalt naphthenate (MEKP/Co). Properties of the samples were then investigated including mechanical, thermal, physical properties and cure characteristics. It was found that gel-time of the resins was increased when the DEG was added. The gel-time of the synthesized resins was in a range of 30-70 min which was comparable to commercial resins. It was found that some mechanical properties, i.e., tensile strength, flexural strength, young's modulus and flexural modulus were increased at molar ratios of EG:PG:DEG (1:1:0.5) but were decreased at molar ratios of EG:PG:DEG (1:1:1). Elongation at break and impact strength were increased when increasing DEG. In contrast, hardness of UPRs was decreased when DEG was incorporated. In the study of thermal properties, it was revealed that T_g of the resins was decreased when increasing DEG. However, HDT was slightly increased when increasing DEG. By studying two different curing systems (i.e. BPO/DMA vs. MEKP/Co), it can be seen that the resins can be cured in both systems, yielding the crosslinked

resins with comparable properties. Possible applications for the prepared resins are UPRs for fiber-glass composites and coating materials etc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและความเอาใจใส่ของอาจารย์ที่ปรึกษาได้แก่ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฬารัตน์ ปรีชญาวารการ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย จากมหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และกรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีและศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ ทุกๆ ท่านที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณกระสินธุ์ ประสานปราน กรรมการผู้จัดการบริษัททีโอปโก้ดิ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการทำงานวิจัยให้งานสำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่าน สำหรับกำลังใจ ความหวังใจ ความปรารถนาดีและทุกๆ ความช่วยเหลือในขณะทำงานวิจัย ทำให้งานสำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจ ความเอาใจใส่ ความรักและแรงผลักดันจากบิดามารดาและน้อง

สำหรับคุณงามความดีอันใดซึ่งเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนขอมอบให้ทุกๆ ความปรารถนาดีและความหวังใจจากทุกๆ ท่านที่มีต่อผู้เขียนตลอดมา

ปานฤทัย แก้วบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญรูป.....	X
สารบัญตาราง.....	XIII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	4
2.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET).....	5
2.3 การย่อยสลาย PET เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีทางเคมี (Chemical recycling methods).....	8
2.3.1 กระบวนการแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis process).....	8
2.3.2 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis process).....	8
2.3.3 กระบวนการอะมิโนไลซิส (Aminolysis process).....	8
2.3.4 กระบวนการแอมโมโนไลซิส (Ammonolysis process).....	9
2.3.5 กระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis process).....	9
2.4 พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin, UPR).....	10
2.4.1 สมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	11
2.4.2 การใช้งาน.....	11
2.5 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	12
2.5.1 กรดไม่อิ่มตัวและแอนไฮไดรด์.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้คัดแหล่งเนื้อหา และอ้างอิงถึงผู้ให้ข้อมูลเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 แอนไฮไดรด์ที่ใช้เป็นตัวดัดแปร (Modifying agent).....	13
2.5.3 ไกลคอล (Glycol).....	13
2.5.4 มอนอเมอร์ (Monomer).....	14
2.5.5 สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor).....	14
2.5.6 ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator).....	15
2.5.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Acceleator).....	15
2.6 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	15
2.7 การเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	16
2.7.1 ระยะเวลาการแข็งตัวของเรซิน.....	17
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	21
3.1 สารเคมี.....	21
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	22
3.3 การเตรียมเคมีในการไทเทรต.....	23
3.4 ขั้นตอนในการทดลอง.....	23
3.4.1 ปฏิกิริยาคีพอลิเมอไรเซชัน PET.....	23
3.4.2 การหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value).....	24
3.4.3 การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	25
3.4.4 การวิเคราะห์หาค่าปริมาณกรด (Acid value).....	26
3.4.5 การเติมสารเชื่อมโยง.....	26
3.4.6 วัดความหนืด.....	26
3.4.7 การขึ้นรูปเรซิน.....	26
3.4.8 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ.....	27
3.4.9 การหาค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัว.....	27
3.5 การทดสอบสมบัติ.....	27
3.5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	27
3.5.2 สมบัติทางความร้อน.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลือทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.3 สมบัติทางแสง.....	29
3.6 สรุปปัจจัยที่ศึกษา.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	33
4.1 ปฏิกริยาดีพอลิเมอไรเซชันของ PET.....	33
4.2 การสังเคราะห์ UPRs.....	34
4.3 ผลของปริมาณ DEG และเกรดของ PET ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ UPRs.....	36
4.3.1 ผลต่อความใสของเรซิน.....	36
4.3.2 ความหนืดของ UPRs.....	37
4.4 ผลของปริมาณ DEG และเกรดของ PET ที่ต่างกัน (PET บริสุทธิ์ และ ขวด PET ที่ใช้แล้ว) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ UPRs.....	38
4.4.1 สีของชิ้นงาน UPRs.....	38
4.4.2 การหาความถ่วงจำเพาะและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานเรซิน.....	39
4.4.3 เวลาการแข็งตัวของเรซิน.....	41
4.5 ผลของปริมาณ DEG และเกรดของ PET ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ UPRs.....	42
4.5.1 สมบัติความต้านทานแรงดึง.....	43
4.5.2 สมบัติความแข็งกด (Hardness).....	47
4.5.3 สมบัติความโค้งงอ.....	48
4.5.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเรซินที่เตรียมได้กับเรซินเกรดการค้า.....	49
4.6 ผลของปริมาณ DEG ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน.....	50
4.6.1 ค่ามอดูลัสสะสมของชิ้นงาน.....	50
4.6.2 มอดูลัสสูญเสียบของชิ้นงาน.....	51
4.6.3 tan delta.....	52
4.6.4 การต้านทานความร้อนของชิ้นงานเรซิน.....	53
4.7 การเชื่อมโยง.....	53
4.7.1 สีของชิ้นงานเรซิน.....	54
4.7.2 เวลาการแข็งตัวของเรซิน.....	55
4.7.3 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเรซิน.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์สงวนไว้โดยผู้ถือเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.7.4 ผลของสารเชื่อม โยงที่มีต่อสมบัติเชิงกล.....	56
4.7.5 สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานเรซิน.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก การทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณขยะจากขวด PET ที่มีเป็นจำนวนมาก.....	1
รูปที่ 1.2 กราฟแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของขยะจากขวดน้ำ PET ในประเทศสหรัฐอเมริกา.....	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET).....	4
รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยการทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification).....	6
รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยการทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification).....	6
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	7
รูปที่ 2.5 การสลาย PET ด้วยกระบวนการแอลกอฮอล์ไลซิส.....	8
รูปที่ 2.6 การสลาย PET ด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส.....	9
รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในอุตสาหกรรม.....	10
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	12
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของกรดฟูมาริก.....	12
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของฟทาลิกแอนไฮไดรด์.....	13
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไกลคอล, พรอพิลีนไกลคอล และ ไดเอทิลีน ไกลคอล.....	14
รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	16
รูปที่ 3.1 การจัดเตรียมชุดการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน PET.....	24
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส.....	30
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	31
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปเรซิน.....	32
รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาคีพอลิเมอร์ไรเซชันของ PET ด้วยไกลคอล.....	33
รูปที่ 4.2 ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากปฏิกิริยาคีพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	34
รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาระหว่างผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	35
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความใสของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในแต่ละสูตร.....	36
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบสีของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	38
รูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซินกับสไตรีน.....	39
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างร่างแหตาข่ายของเรซินที่มี DEG น้อย และมี DEG มาก.....	41

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลกับความหนาแน่นเชื่อมโยง.....	43
รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงดึงของเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA	44
รูปที่ 4.10 เพลอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA	45
รูปที่ 4.11 โมดูลัสของแข็งของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA	46
รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงกระแทกของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA	47
รูปที่ 4.13 ความแข็งกดของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	47
รูปที่ 4.14 ความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	48
รูปที่ 4.15 โมดูลัสโค้งงอของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	49
รูปที่ 4.16 โมดูลัสสะสมของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	51
รูปที่ 4.17 โมดูลัสสูญเสียของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	51
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบสีของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วย BPO กับ DMA และ MEKP กับ Co.....	54
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co.....	57
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของแข็งของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co.....	57
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าเพลอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co.....	58
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co.....	58
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกระแทกของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co.....	59
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบMEKP/Co.....	59
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบโมดูลัสโค้งงอของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co.....	60
รูปที่ ก-1 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V1 ที่เชื่อมโยงด้วย BPO/DMA.....	67
รูปที่ ก-2 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V2 ที่เชื่อมโยงด้วย BPO/DMA.....	67
รูปที่ ก-3 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V3 ที่เชื่อมโยงด้วย BPO/DMA.....	68

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก-4 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R1 ที่เชื่อมโยงด้วย BPO/DMA.....	68
รูปที่ ก-5 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R2 ที่เชื่อมโยงด้วย BPO/DMA.....	69
รูปที่ ก-6 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R3 ที่เชื่อมโยงด้วย BPO/DMA.....	69
รูปที่ ก-7 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V1 ที่เชื่อมโยงด้วย MEKP/Co.....	70
รูปที่ ก-8 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V2 ที่เชื่อมโยงด้วย MEKP/Co.....	70
รูปที่ ก-9 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V3 ที่เชื่อมโยงด้วย MEKP/Co.....	71
รูปที่ ก-10 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R1 ที่เชื่อมโยงด้วย MEKP/Co.....	71
รูปที่ ก-11 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R2 ที่เชื่อมโยงด้วย MEKP/Co.....	72
รูปที่ ก-12 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V1 ที่เชื่อมโยงด้วย MEKP/Co.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมที่เตรียมผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิส.....	24
4.1 แสดงค่า Hydroxyl value, Acid value และค่า Molecular weight ของพอลิเอสเตอร์เรซินแต่ละ สูตร.....	34
4.2 ผลการวัดสีของเรซิน.....	37
4.3 ความหนืดของเรซิน.....	37
4.4 ผลการวัดสีของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	38
4.5 การเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานเรซินก่อนและหลังเกิดการเชื่อมโยง ด้วยระบบ BPO/DMA.....	40
4.6 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA	40
4.7 เวลาการแข็งตัวของเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA	42
4.8 สมบัติของ UPRs ทางการค้าเทียบกับเรซินสูตร R2.....	50
4.9 แสดงค่า T_g ของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA	52
4.10 อุณหภูมิด้านการบิดงอของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA.....	53
4.11 ผลการเปรียบเทียบการวัดสีของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบ BPO/DMA และ ระบบ MEKP/Co.....	55
4.12 เวลาการแข็งตัวของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co.....	55
4.13 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA และ ระบบ MEKP/Co.....	56
4.14 ค่า T_g ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA และระบบ MEKP/Co	60
4.15 ค่า HDT ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA และระบบ MEKP/ Co.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

BPO	Benzoyl peroxide
Co	Cobalt naphthenate
DEG	Diethylene glycol
DMA	Dimethyl aniline
DMTA	Dynamic Mechanical Thermal Analysis
EG	Ethylene glycol
HDT	Heat Deflection Temperature
KHP	Potassium hydrogen phthalate
KOH	Potassium hydroxide
MA	Maleic anhydride
MEKP	Methyl ethyl ketone peroxide
Mn	Number average molecular weight
PET	Polyethylene terephthalate
PG	Propylene glycol
R	ขวด PET ที่ใช้แล้ว
R1	เรซินที่มีอัตราส่วน EG:PG:DEG คือ 1:1:0 และใช้ขวด PET ใช้แล้ว
R2	เรซินที่มีอัตราส่วน EG:PG:DEG คือ 1:1:0.5 และใช้ขวด PET ใช้แล้ว
R3	เรซินที่มีอัตราส่วน EG:PG:DEG คือ 1:1:1 และใช้ขวด PET ใช้แล้ว
T _g	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
UPRs	Unsaturated polyester resins
V	PET เกรดบริสุทธิ์
V1	เรซินที่มีอัตราส่วน EG:PG:DEG คือ 1:1:0 และใช้ PET เกรดบริสุทธิ์
V2	เรซินที่มีอัตราส่วน EG:PG:DEG คือ 1:1:0.5 และใช้ PET เกรดบริสุทธิ์
V3	เรซินที่มีอัตราส่วน EG:PG:DEG คือ 1:1:1 และใช้ PET เกรดบริสุทธิ์

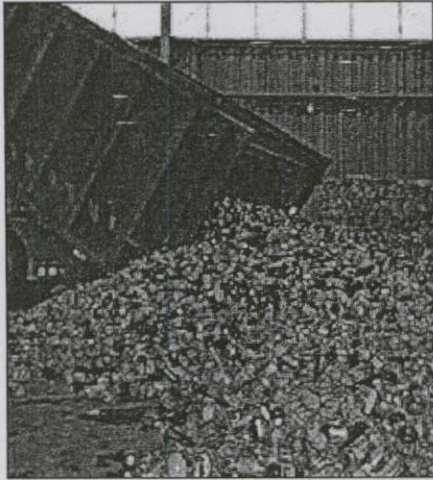
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

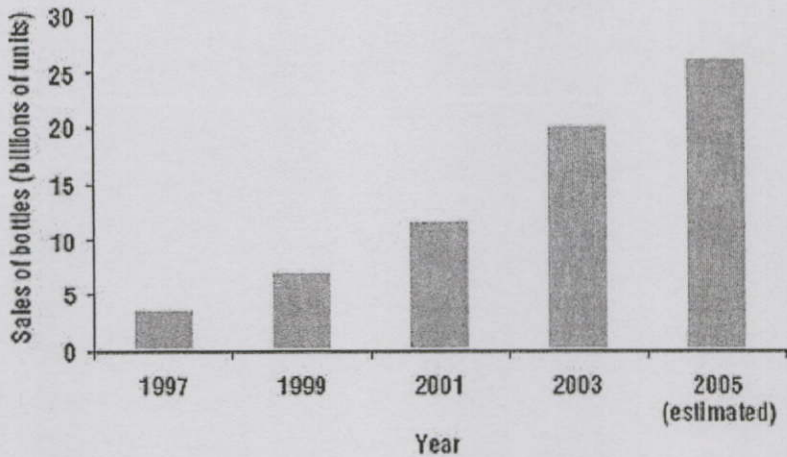
ปัจจุบัน “ขยะ” จัดเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่ง โดยเฉพาะขยะที่มาจากพลาสติก นับวันยิ่งเพิ่มจำนวนมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดแนวทางในการนำพลาสติกที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการต่างๆ



รูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณขยะจากขวด PET ที่มีเป็นจำนวนมาก

ขวดพีทหรือพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) เริ่มเข้ามามีบทบาทในประเทศไทย และมีปริมาณการใช้เพิ่มสูงขึ้นทุกปี รูปที่ 1.2 เป็นแผนภูมิแท่งแสดงถึงแนวโน้มของขยะจาก PET ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงปี ค.ศ. 1997-2005 [1] สาเหตุที่ทำให้ขวด PET ได้รับความนิยมน้อยลงแพร่หลายนั้น เนื่องจากสมบัติที่ดีได้แก่ ความใส น้ำหนักเบา ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ต่ำ และมีความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ดี การที่ขวด PET มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และออกซิเจน (O_2) ต่ำเนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสองแนว (Biaxial orientation) ซึ่งเป็นการจัดเรียงโมเลกุลทั้งแนวตั้ง และแนวนอนคล้ายตาข่ายและยังส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [2] ปัจจุบันขวด PET นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำ (ชนิดใส) ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำมันพืช นอกจากนี้ยังมีการนำ PET มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่น เช่น แผ่นฟิล์มเอ็กเซอร์เรย์ เส้นใย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของขยะจากขวดน้ำ PET ในประเทศสหรัฐอเมริกา[1]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำขวด PET ที่ใช้แล้วนำกลับมาแปรรูปใหม่ เพื่อให้เป็นสิ่งที่มีความประโยชน์ จึงได้ศึกษาการนำขวด PET ที่ใช้แล้วเหล่านี้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resins, UPRs) ซึ่งพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเป็นที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยแก้ว (fiber glass composites) เพราะราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับเรซินชนิดอื่นๆ เช่น อีพอกซีเรซิน ไวนิลเอสเตอร์เรซิน ฯลฯ ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ กระจกเทียม หินอ่อนเทียม ท่อน้ำ ท่อร้อยสายไฟ ถังไฟเบอร์กลาส กรอบรูปวิทยาศาสตร์ เป็นต้น เนื่องจากขวด PET และเรซิน UPRs เป็นวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นที่ทราบกันดีว่าปริมาณเชื้อเพลิงธรรมชาติปิโตรฟอสซิล ได้แก่ น้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติที่มีปริมาณลดลง และมีราคาเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการนำขวด PET มาใช้ประโยชน์ใหม่ เช่น เรซิน UPRs ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า และช่วยลดปริมาณขยะ PET อีกด้วย การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวขึ้นจะเป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในประเทศ ซึ่งในการวิจัยนี้ได้มีการใช้ไกลคอล 3 ชนิด ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) พรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) และไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) ในขั้นตอนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของไกลคอลทั้ง 3 ชนิด เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น ความเหนียว ไม่แข็งเปราะแตกง่ายของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวได้นำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสมาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะได้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวและศึกษาปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้เรซินที่ได้มีลักษณะเหลวใส สีเหลืองอ่อน จากนั้นนำเรซินที่ได้มาหล่อขึ้นรูปเพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาและสารกระตุ้นในปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการใช้งานด้านต่างๆ เช่นงานด้านวัสดุคอมโพสิต วัสดุเคลือบผิว เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวด PET ที่ใช้แล้วโดยเน้นศึกษาผลของอัตราส่วนสารตั้งต้น ไกลคอลผสม (EG:PG:DEG) ที่มีต่อสมบัติของเรซินที่ได้

1.2.2 ศึกษาการเชื่อมโยงของเรซินที่เตรียมได้เพื่อให้เหมาะสมกับสมบัติบางประการของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาอัตราส่วนของไกลคอลแต่ละชนิด (EG, PG และ DEG) ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวได้แก่อัตราส่วนเอทิลีนไกลคอล : พรอพิลีนไกลคอล : ไดเอทิลีนไกลคอล เป็น 1:1:0, 1:1:0.5 และ 1:1:1

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

1.3.3 เปรียบเทียบพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย PET เกรดบริสุทธิ์ (ตัวอย่างควบคุม) และที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย PET จากขวดน้ำที่ใช้แล้ว

1.3.4 ศึกษากระบวนการเชื่อมโยงในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเรซินเกิดการแข็งตัวในช่วงเวลาที่ต้องการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำขวด PET ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะที่มีมากมายในประเทศ

1.4.2 สามารถสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินได้จากขวด PET ที่ใช้แล้ว และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

1.4.3 ส่งเสริมอุตสาหกรรมผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในประเทศ

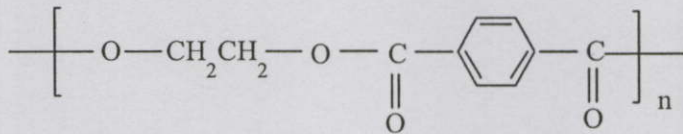
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) เป็นพอลิเมอร์แบบพอลิเอสเทอร์เชิงเส้นตรง (Linear polyester) ทางการค้าใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตบรรจุภัณฑ์ เส้นใย พลาสติก และวัสดุขึ้นรูปต่างๆ หน่วยซ้ำของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นเอสเทอร์ของกรดเทเรฟทาลิก (Terephthalic acid) และ เอทิลีน ไกลคอล (Ethylene glycol) ดังรูปที่ 2.1



Polyethylene terephthalate

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)

PET เป็นพอลิเมอร์ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนานกว่า 70 ปีในปี ค.ศ. 1941 PET ได้ถูกนำมาใช้งานในรูปของเส้นใยโดยบริษัทเล็กๆ ในประเทศอังกฤษ โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า เทรีลีน (Terylene[®]) และถูกนำมาพัฒนาต่อโดยบริษัทดูปองท์ ประเทศสหรัฐอเมริกาในชื่อเส้นใย เดครอน (Dacron[®]) เสื้อผ้าที่ผลิตจากเส้นใย PET มีสมบัติที่ดีคือไม่ยับง่าย ไม่หด และแห้งเร็วในปี ค.ศ. 1952 บริษัทดูปองท์ได้พัฒนาเทคนิคการผลิตฟิล์มพลาสติกที่มีความแข็งแรงสูงจาก PET โดยใช้ชื่อว่า ไมลาร์ (Mylar[®]) เพื่อนำมาใช้แทนฟิล์มเซลโลเฟนสำหรับห่ออาหาร ทำลูกโป่ง แผ่นฟิล์มเอ็กเรย์ และเทปสำหรับบันทึกเสียงเพลง ต่อมาในปี ค.ศ. 1967 PET ได้ถูกนำมาผลิตเป็นขวดพลาสติกทนแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย มีความใส สามารถมองเห็นสิ่งที่บรรจุภายในได้ จึงนิยมใช้บรรจุน้ำดื่ม น้ำมันพืชและเครื่องสำอาง นอกจากนี้ PET ยังมีคุณสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดีกว่าพลาสติกทั่วไปจึงนิยมนำมาผลิตเป็นขวดน้ำอัดลม [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

- ใส (Clarity)
- แข็งแรงและเหนียว
- ด้านทานความฉีกขาดได้ดี
- ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดี
- ทนต่อไขมัน น้ำมันและความร้อน
- สามารถนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับพรมหรือผลิตภัณฑ์สิ่งทอ
- Recycle ได้ง่าย
- นิยมนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำยาบ้วนปาก ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำมันพืช ขวดเครื่องสำอาง และภาชนะบรรจุอาหารนาชนิด เป็นต้น

2.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) [7]

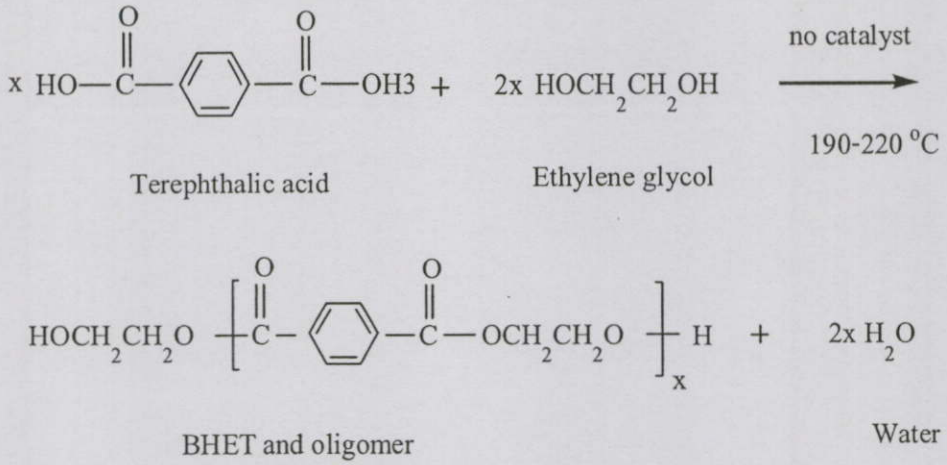
การสังเคราะห์ PET สามารถเตรียมได้ 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกของปฏิกิริยาจะเกิดเป็นสารประกอบโพลิโกเมอร์ ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) โดยตรงของกรดเทเรฟทาติก (Terephthalic acid, TPA) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) หรือการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ของไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate, DMT) กับเอทิลีนไกลคอล

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการเกิดโพลิโกเมอร์

1. การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification)

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดเทเรฟทาติกกับเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปและไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งถ้าสารตั้งต้นเป็นกรดเทเรฟทาติก และเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่อุณหภูมิ 190-220 °C และความดัน 2 บรรยากาศ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนพร้อมทั้งมีการกำจัดน้ำออก ระหว่างทำปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น bis (2-hydroxyethyl) terephthalate หรือที่เรียกว่า BHET ดังสมการในรูปที่ 2.2

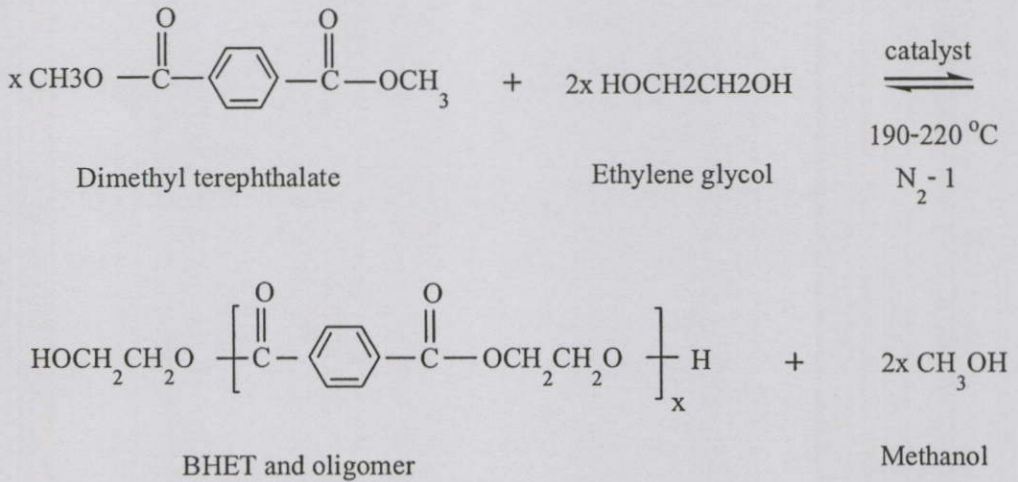
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) [7]

2. การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

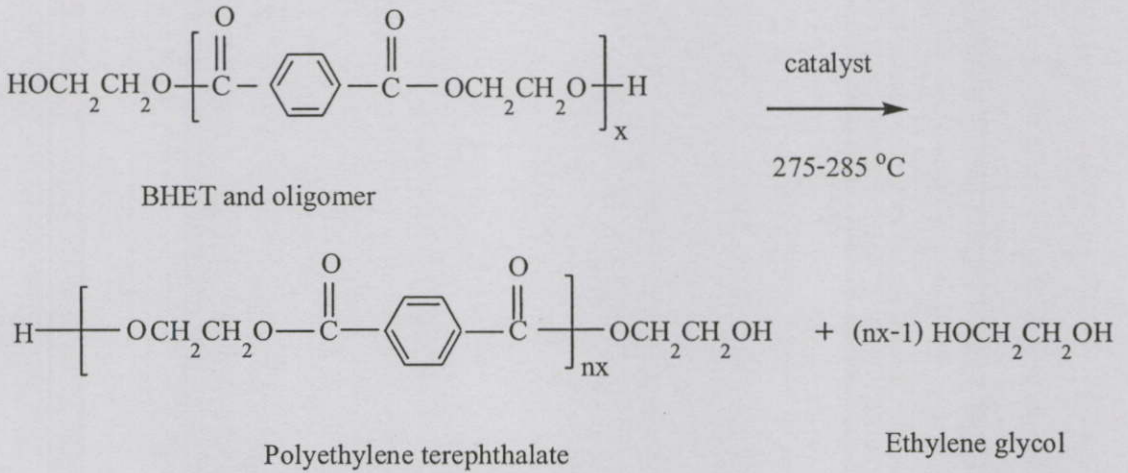
เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์หรือทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ในการทำปฏิกิริยาดำเนิน จากไดเมทิลเทเรฟทาเลต ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Acetates ของ Li, Ca, Mg, Zn หรือ Pb, Ti(OR)₄, PbO ที่อุณหภูมิ 190-220 °C และความดัน 1 บรรยากาศภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและมีการกำจัดเมทานอลออกระหว่างปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

(Transesterification) [7] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 เกิดจากการนำสารประกอบ BHET และโอลิโกเมอร์ที่ได้จากขั้นตอนแรกมาเป็นมอนอเมอร์ในการทำปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Sb acetate, Oxide ของ Sb, Ge, $Ti(OR)_4$ ที่อุณหภูมิ 275-285 °C เพื่อให้ได้ PET ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้จึงต้องมีการกำจัดเอทิลีน ไกลคอลส่วนเกินออกจากปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจะเกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนของปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [7]

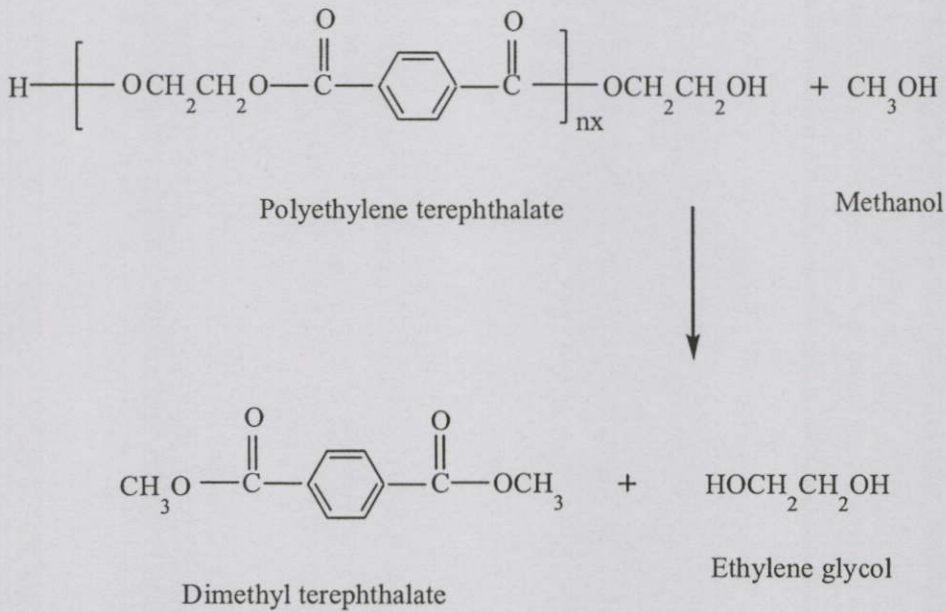
กระบวนการผลิตขวด PET นั้น เริ่มจากการนำเม็ด PET มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 160 ถึง 180 °C เป็นเวลาประมาณ 6-8 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ด PET และความชื้นที่มีอยู่ในเม็ด PET หลังการอบแล้ว เม็ด PET จะต้องมีความชื้นต่ำกว่า 0.0005% โดยน้ำหนัก จากนั้นเม็ด PET จะถูกส่งไปยังเครื่องฉีด (Injection machine) และผลิตหลอดพรีฟอร์ม (Preform) ซึ่งจะถูกส่งเข้าเครื่องเป่า (Blowing machine) เพื่อทำให้ร้อน และส่งเข้าสู่แม่พิมพ์ (Mold) เพื่อผ่านกระบวนการเป่าแล้วยืด (Stretch blow) ด้วยลม ที่ความดันประมาณ 40 บาร์ ขวดที่อยู่ในแม่พิมพ์ จะถูกทำให้เย็นลงด้วยน้ำหล่อเย็น ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 8 °C จากนั้นขวด PET จะถูกส่งต่อมายังสายพานลำเลียงและส่งเข้าเครื่องจัดเรียงขวดบนแท่นรองรับ กระบวนการเป่า ถือเป็นกระบวนการที่เป็นปัจจัยสำคัญของปัญหาการแตกกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับกระบวนการเป่าให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ขวดที่มีการกระจายตัวของเนื้อพลาสติกสม่ำเสมอทั้งบริเวณลำตัวและก้นขวด [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การย่อยสลาย PET เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีทางเคมี (Chemical recycling methods) แบ่งเป็น 5 กระบวนการ [6]

2.3.1 กระบวนการแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis process)

เป็นกระบวนการสลาย PET ด้วยเมทานอลที่อุณหภูมิและความดันสูง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (DMT) และเอทิลีนไกลคอล (EG) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การสลาย PET ด้วยกระบวนการแอลกอฮอล์ไลซิส

2.3.2 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis process)

การสลายด้วยกระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid hydrolysis)
2. การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Alkaline hydrolysis)
3. การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำ (Neutral hydrolysis)

ทั้ง 3 วิธีให้ผลิตภัณฑ์เหมือนกันคือ กรดเทเรฟทาติก (Terephthalic acid) และเอทิลีนไกลคอล (EG)

2.3.3 กระบวนการอะมิโนไลซิส (Aminolysis process)

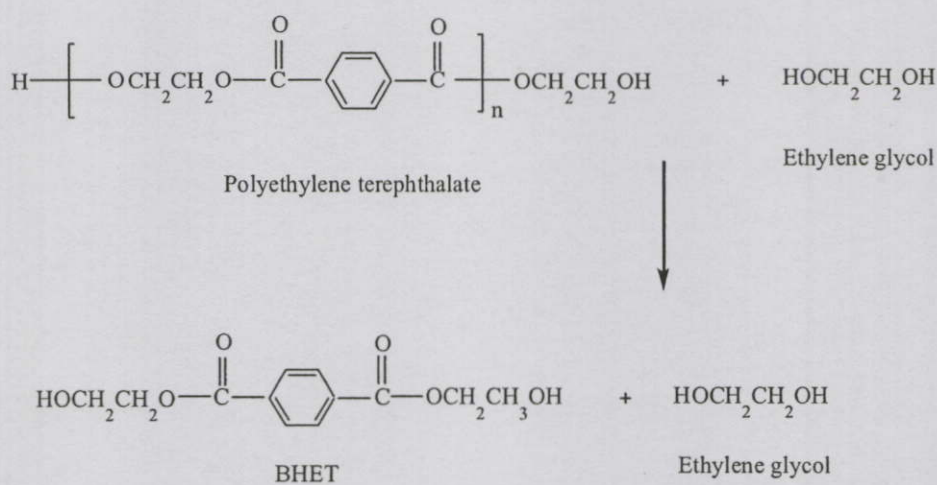
กระบวนการนี้ PET จะถูกสลายด้วยสารละลายเอมีนปฐมภูมิ เช่น เมทิลเอมีน (Methylamine) ซึ่งเป็นเอกสารที่สนใจไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเหมาะนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ เอทิลีนไกลคอล (EG) และ ไดเอมีน (Diamine) ของกรดเทเรฟทาติก (Terephthalic acid) อย่างไรก็ตามมีข้อคิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 กระบวนการแอมโมโนไลซิส (Ammonolysis process)

กระบวนการแอมโมโนไลซิส เป็นกระบวนการที่ใช้แอนไฮไดรด์แอมโมเนีย (Anhydrous ammonia) ในเอทิลีนไกลคอล ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารประกอบเอไมด์ (Amide) ของกรดเทเรฟทา-
ลิก

2.3.5 กระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis process)

กระบวนการไกลโคไลซิส เป็นกระบวนการสลาย PET ด้วยไกลคอล ซึ่งไกลคอลที่นิยมใช้
คือ เอทิลีนไกลคอล (EG) และพรอพิลีนไกลคอล (PG) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ bis (2-hydroxyethyl)
terephthalate (BHET) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การสลาย PET ด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส [6]

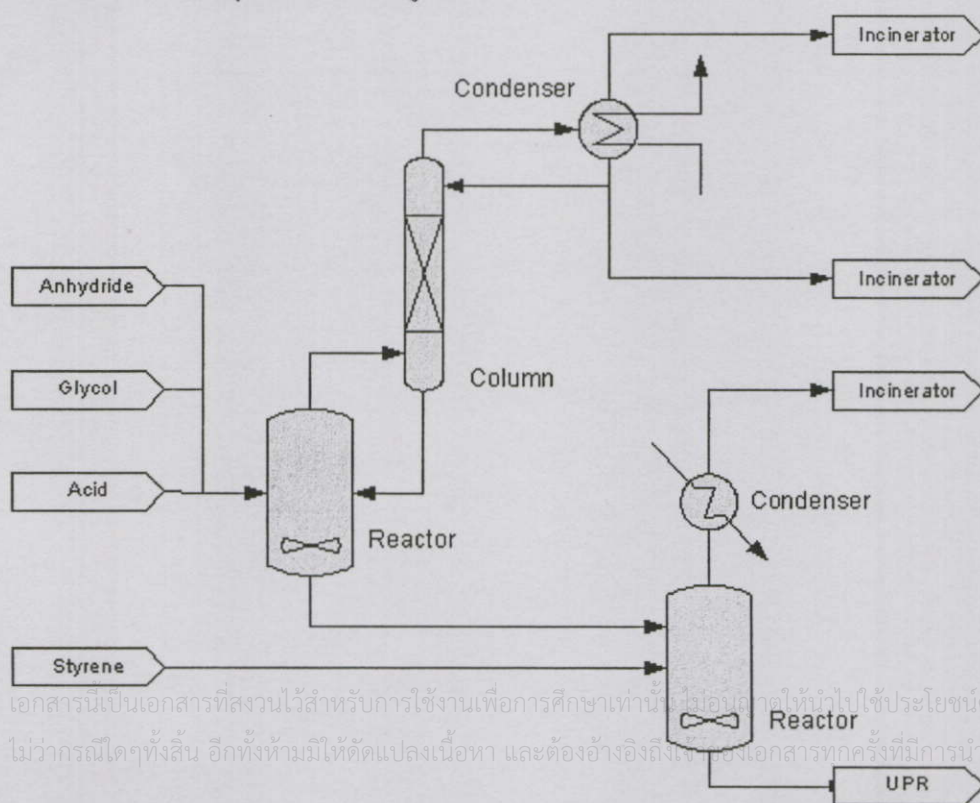
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลาย PET ด้วยไกลคอล (Glycol) หรือ พอลิโออล (Polyol) สามารถ
นำไปทำปฏิกิริยาต่อกับแอนไฮไดรด์ (Anhydride) หรือกรดไดคาร์บอกซิลิก (Dicarboxylic acid)
เพื่อสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ซึ่งกระบวนการไกล-
โคไลซิสนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มากและมีประสิทธิภาพในการสลาย PET เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและไม่
ซับซ้อน สามารถสลาย PET ได้โดยไม่ต้องใช้ความดันและอุณหภูมิที่สูง ไม่มีสารที่ก่อให้เกิดการ
กัดกร่อนในระบบและให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปสังเคราะห์สารชนิดอื่นได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resins, UPRs) [8]

พอลิเอสเทอร์เรซิน (UPRs) หมายถึง พอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ ตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป เกิดจากการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymerization) ของสารประกอบจำพวกไกลคอลและกรดไดเบสิก โดยทั่วไปพอลิเอสเทอร์เรซินแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว แต่พอลิเอสเทอร์เรซินที่จะกล่าวต่อไปเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินที่ไม่อิ่มตัว อยู่ในสภาวะของเหลวซึ่งภายหลังจากการผสมตัวเร่งหรือตัวทำให้แข็งแล้ว จะได้เป็นพอลิเมอร์แข็งไม่สามารถแปรสภาพเป็นพอลิเมอร์เหลวหรือคืนรูปได้อีก เกิดการเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-D Network) เรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resins) เป็นของผสมระหว่างพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเรซินเหลวใสสีเหลืองอ่อนและมีองศาของการเกิดพอลิเมอร์ต่ำ คือมีค่าประมาณ 8-10 พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เนื่องจากมีสมบัติที่หลากหลาย มีราคาถูก มีความสมดุลของสมบัติเชิงกล ทนต่อสารเคมีและอุณหภูมิในการใช้งานได้ค่อนข้างสูง แต่ก็มีข้อเสียคือ การหดตัวค่อนข้างสูงเมื่อทำการเชื่อมโยง ไม่ทนต่อตัวทำละลายและสารเคมีบางชนิด โดยเฉพาะด่างแก่ ไม่ทนทานต่อแรงกระแทก อายุการเก็บค่อนข้างสั้น และมีการดูดซึมน้ำสูง ทำให้ไม่นิยมใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงและเปียกชื้น ซึ่งมีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในอุตสาหกรรม [23]

2.4.1 สมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซิน

พอลิเอสเทอร์เรซินมีสมบัติ แข็ง ใส เงาม และสามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก แต่เมื่อเทียบกับโลหะ ความเหนียว ความยืดหยุ่น ความแข็งแรงของพอลิเอสเทอร์จะเทียบกับโลหะไม่ได้ และในปัจจุบันมีการเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเมอร์ชนิดนี้โดยการเสริมใยแก้วหรือไฟเบอร์กลาสลงไป เรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเสริมแรงระหว่างพอลิเอสเทอร์เรซินกับใยแก้วว่า พอลิเมอร์เสริมแรงใยแก้ว หรือผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส ซึ่งมีสมบัติเบา เหนียวไม่เปราะ และแข็งแรง เมื่อเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนักจะเห็นว่า ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสจะแข็งแรงกว่าพอลิเอสเทอร์เรซิน สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ สามารถทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี

2.4.2 การใช้งาน

จากสมบัติต่างๆของพอลิเอสเทอร์เรซิน ทำให้ลักษณะการใช้งานกว้างขวางมากถึง 3 ใน 4 ส่วนของพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติงทั้งหมด ลักษณะการใช้งานของพอลิเอสเทอร์เรซินแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

การหล่อ (Casting) เช่นผลิตภัณฑ์ชนิดหล่อชนิดต่างๆ เช่น กระจก หินอ่อนเทียม แก้วเทียม เป็นต้น

การเคลือบ (Laminate) เช่นผลิตภัณฑ์เคลือบรูปวิทยาศาสตร์

การขึ้นรูปแบบ (Molding) เช่นผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสโดยมีการใช้เส้นใยในการเสริมแรงให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้นซึ่งเส้นใยไฟเบอร์กลาสมีอยู่หลายชนิดเช่น [9]

1. เส้นใย (Roving) สำหรับใช้กับเครื่องพ่น (Spray up), ใช้กับวิธีการพัน (Filament winding) และสำหรับวิธีการดึง (Pultrusion)
2. ผ้าตาสาน (Woven roving) ใช้สำหรับเสริมแรงในผลิตภัณฑ์เพื่อรับน้ำหนักได้มากขึ้นมีขนาด 400, 600 และ 800 กรัม/ตารางเมตร
3. ใยเส้นสั้น (Chopped strand) ใช้สำหรับผสมกับเรซินเพื่อใช้ในงานที่เป็นส่วนเล็กซึ่งใยแก้วชนิดอื่นไม่สามารถเข้าไปได้ถึงมีขนาดความยาว 3 มม. และ 6 มม.
4. ใยแก้วผืน (Chopped strand mat) ใช้สำหรับงานทั่วๆ ไปขนาดที่นิยมใช้ ได้แก่ 300, 450 และ 600 กรัม/ตารางเมตร
5. ใยแก้วผ้าทอ (Fabrics) ใช้สำหรับงานที่ต้องทนต่อแรงสูง หรือรับน้ำหนักมากๆ มีด้วยกันหลายขนาด ได้แก่ 100, 120, 145, 160 และ 200 กรัม/ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

6. ใยแก้วผืนชนิดเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous strand mat) สำหรับใช้กับเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection) ในระบบ Resin Transfer Mold (RTM) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะรับแรงได้สูงกว่าแบบ Chopped Strand Mat (CSM)

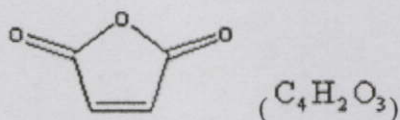
7. โยผิว (Surfacing mat) ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเนียนของผิวสูงช่วยยึดเกาะผิวเจลโคนที่ให้แข็งแรงขึ้น
8. โยสานแบบเย็บติด (Stitch mat) ใช้สำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงมากๆ
9. เทปไฟเบอร์ (Glass tape) ใช้เสริมช่วงรอยต่อของแผ่นใยแก้ว

2.5 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

2.5.1 กรดไม่อิ่มตัวและแอนไฮไดรด์

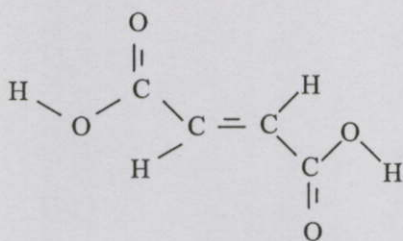
มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) [11]

มาเลอิกแอนไฮไดรด์ สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน โดยผ่านไอเบนซีนกับอากาศเข้าไปในตัวเร่งวานาเดียมเพนทอกไซด์ (Vanadium pentoxide) บนอะลูมินา อุณหภูมิประมาณ 350-450 °C แล้วแยกมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยการกลั่นที่ความดันต่ำ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ได้จะเป็นของแข็งผลึก สีขาว มีกลิ่นฉุนรุนแรง น้ำหนักโมเลกุล 98.06 จุดเดือด 202 °C จุดหลอมเหลว 52-53 °C สาเหตุที่นิยมใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพราะความว่องไวต่อปฏิกิริยาดี และให้น้ำออกมาน้อยขณะที่เกิดปฏิกิริยาให้เอสเตอร์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์นี้จะใช้เป็นมอโนเมอร์แทนกรดไม่อิ่มตัว



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

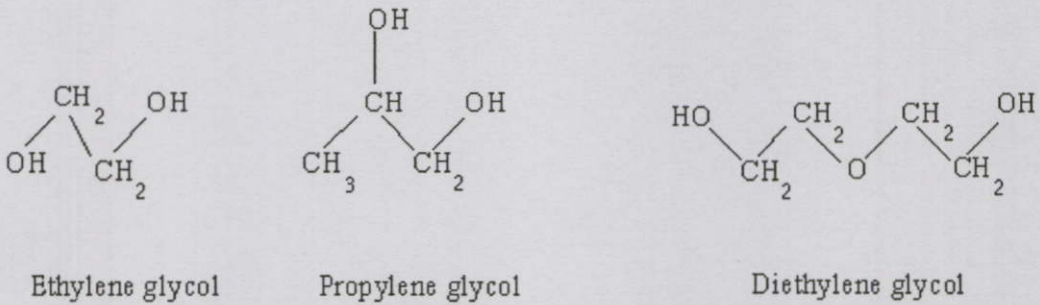
กรดฟูมาริก (Fumaric acid) เป็น trans-isomer ของกรดมาเลอิก (Maleic acid) ซึ่งพอลิเมอร์ที่เกิดจากกรดฟูมาริก จะมีความต้านทานต่อความร้อน



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของกรดฟูมาริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) เป็นของเหลวใสไม่มีสี น้ำหนักโมเลกุล 106.12 จุดเดือด 125-126 °C จุดหลอมเหลว -10 °C



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไกลคอล, พรอพิลีนไกลคอล และ ไดเอทิลีน ไกลคอล

นอกจากนี้ยังพบว่า bis (2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลาย PET สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินแทนไกลคอลได้

2.5.4 มอนอเมอร์ (Monomer)

มอนอเมอร์เป็นตัวทำละลายของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีความหนืดสูงในช่วงก่อนการแข็งตัว และเมื่อได้รับความร้อนหรือภายหลังที่มีการเติมสารช่วยเร่งให้แข็งตัวลงไปแล้ว มอนอเมอร์จะเป็นตัวกลางทำให้เกิดการเชื่อม โยงระหว่าง โมเลกุลของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ซึ่งมอนอเมอร์ที่นิยมนำมาใช้คือ สไตรีน (Styrene) เนื่องจากมีราคาถูก เป็นตัวทำละลายที่ดี และสามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเอสเตอร์เรซินขณะแข็งตัวได้ดี ส่วนมอนอเมอร์อื่นๆ ได้แก่ เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate) ซึ่งมีสมบัติทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี แต่เนื่องจากสมบัติในการแข็งตัวไม่ดีพอนิยมนำมอนอเมอร์ตัวนี้ผสมกับสไตรีน มอนอเมอร์ไวนิลโทลูอีน (Vinyl toluene) คลอโรสไตรีน (Chlorostyrene) ไดอัลลิลฟทาเลต (Diallylphthalate) ใช้เพื่อสมบัติเฉพาะอื่นๆ แต่ไม่นิยมเพราะราคาแพง ปริมาณมอนอเมอร์ต่อปริมาณเนื้อพอลิเอสเตอร์เรซิน ประมาณ 40/60 โดยน้ำหนัก

2.5.5 สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor)

สารยับยั้งปฏิกิริยาเป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเรซิน เป็นตัวยืดอายุเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การเก็บของพอลิเอสเตอร์เรซิน ทำให้เก็บเรซินไว้ได้นานโดยไม่เกิดการแข็งตัว และช่วยในการปรับเวลาการแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์เรซิน นอกจากนี้ยังช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที

เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน สารยับยั้งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นสารจำพวกควิโนน (Quinone) เช่น เบนโซควิโนน (Benzoquinone) หรือไฮโดรควิโนน (Hydroquinone)

2.5.6 ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator)

ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้เรซินแข็งตัว ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นสารจำพวกเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) และ เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl ethyl ketone peroxide, MEKPO)

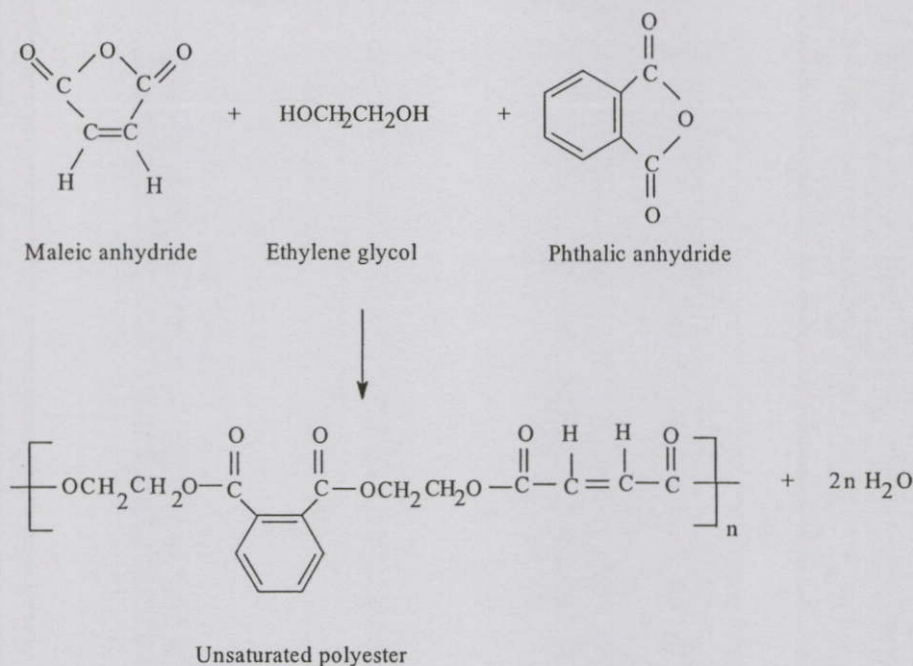
2.5.7 ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Accelerator)

ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีความจำเพาะเจาะจงในการใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นสารจำพวกเกลือของโลหะ เช่น โคบอลต์ออกโตเอต (Cobalt octoate) โคบอลต์แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate) หรือสารจำพวกเอมีน เช่น ไดเมทิลอะนิลีน (Dimethyl aniline) หรือไดเอทิลอะนิลีน (Diethyl aniline) ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาที่มักจะนิยมใช้กันโดยทั่วไปคือ โคบอลต์แนฟทีเนต หรือ โคบอลต์ออกโตเอต ใช้ได้กับตัวเร่งพวก เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ ส่วนพวกเอมีน นิยมใช้กับตัวเร่งพวก เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

2.6 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างไกลคอล กับกรดผสมระหว่างกรดอิมตัวและกรดไม่อิ่มตัวโดยมีน้ำเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ตัวอย่างปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวแสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว [8]

เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาพอลิเอสเทอร์ที่ได้มีความหนืดสูงมาก ขั้นตอนต่อไปจึงนำไปละลายในมอนอเมอร์เพื่อให้อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจมีการเกิดการทำปฏิกิริยาของพันธะคู่บางส่วนของพอลิเอสเทอร์เรซินกับพันธะคู่ของมอนอเมอร์ และพันธะคู่ที่เหลือจะทำปฏิกิริยาในขั้นการแข็งตัว

2.7 การเชื่อมโยงของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว [8]

พอลิเอสเทอร์เรซินสามารถเชื่อมโยงได้หลายวิธี ดังนี้

1. โดยตัวทำให้แข็ง และความร้อน
2. โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Accelerator หรือ Promoter) ที่อุณหภูมิห้อง
3. โดยใช้แสงอุตราไวโอเลต (Ultraviolet light)
4. โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam)

วิธีที่ง่าย สะดวก และนิยมมาก คือการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) ที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะพอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัวคือปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่าง สไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene monomer) และพันธะไม่อิ่มตัวของ พอลิเอสเทอร์ สำหรับตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ที่อุณหภูมิห้องจะไม่ทำปฏิกิริยาต้องอาศัยความร้อนหรือตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) เป็นตัวกระตุ้นให้ทำงาน

2.7.1 ระยะเวลาการแข็งตัวของเรซิน

โดยทั่วไปแล้วการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ

1. ระยะเวลาหลังจากเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) จนพอลิเอสเทอร์เรซินเริ่มแข็งตัวเป็นวุ้นหรือเจลลี่ เรียกช่วงเวลานี้ว่า “เวลาเกิดเจล” (Gel time)
2. ระยะเวลาตั้งแต่พอลิเอสเทอร์เริ่มแข็งตัวเป็นวุ้นจนแข็งตัว เรียกช่วงเวลานี้ว่า “เวลาบ่มตัว” (Cure time)

ในช่วงที่พอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัว ความแข็งของพอลิเอสเทอร์เรซินจะแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่ง พอลิเอสเทอร์เรซินจะแข็งตัวถึง 95% หลังจากแข็งตัวเพื่อป้องกันการเสีรูปร่างหลังจากถอดออกจากแม่แบบเนื่องจากการแข็งไม่เต็มที่จึงมีการนำมาโพสเคียว (Post cure) ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 30 นาที ล้างด้วยไอน้ำ หรือนำมาอบที่อุณหภูมิ 100-200 °C นาน 3-6 ชั่วโมง

องค์ประกอบที่มีผลต่อการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซิน

1. อุณหภูมิ อุณหภูมิสูงพอลิเอสเทอร์เรซินจะแข็งตัวได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ เพราะอุณหภูมิสูงขึ้นการเกิดปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น
2. ปริมาณตัวริเริ่ม (Initiator) และตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) ถ้าใช้ในปริมาณมากการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปมีการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาในช่วง 0.15% - 2% และใช้ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา 0.2% แต่ถ้ามีการใช้ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยงเร็วขึ้น
3. ปริมาณออกซิเจน ถ้าปริมาณออกซิเจนสูงเรซินจะแข็งตัวได้ช้า เพราะออกซิเจนเป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G.P.Karayannidis และคณะ [12] ศึกษาปริมาณของ DEG/PET ที่ใช้ในขั้นการทำปฏิกิริยา โกลโคไลซิส ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้ DEG ในปริมาณที่ต่างกันคือ DEG/PET ที่ 1.20, 1.60 และ 2.20 ใช้ Manganese acetate เป็นตั้งเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นเติม พทาติกแอนไฮไดรต์, มาเลอิกแอนไฮไดรต์และพรอพิลีนไกลคอล เพื่อสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้สภาวะก้ำขารก่อน 9 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงประมาณ 90-100 °C แล้วเติมสไตรีนมอนอเมอร์ และตัวยับยั้งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลง และค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D.J.Suh และ คณะ [13] ศึกษาสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยไกลโคไลซิส ขวดน้ำดื่ม PET ด้วยพรอพิลีนไกลคอล (PG) และไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) ซึ่งทดลองโดยนำ PET มา 70 กรัม (0.365 mol/repeating unit) ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ PET:Glycol เท่ากับ 1:5.04 โดยมีการใช้ PG และ DEG ในปริมาณที่แตกต่างกัน ใช้ซิงค์อะซิเตต 0.5% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 195 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วปรับอุณหภูมิเป็น 225 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส นำมาเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในอัตราส่วน 1.1:1 ที่อุณหภูมิ 150 °C ทำปฏิกิริยาต่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว จากนั้นเติมสไตรีนมอนอเมอร์ 35 % โดยน้ำหนักของเรซิน เพื่อให้เรซินเหลวขึ้น แล้วขึ้นรูปโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) 1% เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา เมื่อขึ้นรูปแล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งพบว่าค่ามอดูลัสของยังลดลง เมื่อ DEG เพิ่มขึ้น

G. Xi, M. Lu and C. Sun [14] ทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน PET ด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส ที่อุณหภูมิ 196 °C โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ เอทิลีนไกลคอล (EG) กับ PET ในช่วง 0.5-6 และใช้ซิงค์อะซิเตต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาณ 0-1.5% และใช้เวลา 1-5 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ 3 ชั่วโมง อัตราส่วน EG:PET คือ 5 และปริมาณซิงค์อะซิเตตที่เหมาะสมที่สุดคือ 1%

U.R. Vaidya และ V.M. Nadkarni [15] ได้มีการนำ PET ที่ใช้แล้วมาทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้ปริมาณพรอพิลีนไกลคอล (PG) ที่ต่างกัน แล้วนำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้มาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ แล้วเติมสไตรีนมอนอเมอร์เพื่อให้ได้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว คุณสมบัติของ ความหนืด เวลาในการเกิดเจล และความร้อนที่คายออกมาซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณของสไตรีนมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อปริมาณสไตรีนมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น ความหนืดน้อยลง และเวลาในการเกิดเจลมีแนวโน้มลดลง และการคายความร้อนเพิ่มขึ้น

J.Y.Chen และคณะ [16] ได้ศึกษาปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน PET โดยการไกลโคไลซิสด้วย EG โดยใช้ความดันพบว่าอัตราการดีพอลิเมอไรเซชันขึ้นกับอุณหภูมิ, ความดันและความเข้มข้นของอัตราส่วนของ EG : PET ซึ่งอัตราการดีพอลิเมอไรเซชัน PET โดยใช้ความดันเกิดเร็วกว่าการดีพอลิเมอไรเซชันในสภาวะบรรยากาศและในกรณีที่อัตราส่วนของ EG : PET สูงได้ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โกลโคไลซิสที่ประกอบด้วย มอนอเมอร์ของ PET, BHET และ โอลิโกเมอร์ในปริมาณเท่าๆ กัน ซึ่งโอลิโกเมอร์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ โอลิโกเมอร์ส่วนใหญ่เป็นพวก ไคเมอร์และ ไตรเมอร์ส่วนกรณีที่อัตราส่วนของ EG : PET ต่ำได้

ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ประกอบด้วยพวกโพลิโกลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่ามอโนเมอร์ ไคเมอร์ และ ไตรเมอร์

ปิยะฉัตร ภวนันท์ และ สกฤตต์ ชัยสกุล [5] ได้ศึกษาการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขบวนการพอลิเมอไรเซชันที่เรซินที่ใช้แล้ว โดยดีพอลิเมอร์เรซินด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยไกลคอลผสมระหว่าง EG กับ PG ที่ 190-200 °C โดยใช้ซิงค์อะซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้ทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งถูกเชื่อมโยงด้วยสไตรีน ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนโดยนำน้ำหนักระหว่างไกลคอลกับ PET และเวลาในการดีพอลิเมอร์เรซิน พบว่าเมื่อปริมาณไกลคอลเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจะลดลง และเมื่อเวลาในการดีพอลิเมอร์เรซินมากขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจะลดลง ความแข็งแรงดึงกับความแข็งแรงของพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณไกลคอลในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงกระแทกลดลงเล็กน้อย ส่วนความแข็งแรงดึง, ความแข็งและความแข็งแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยกับเวลาในการดีพอลิเมอร์เรซิน

ปณิศา การสมวรรณ และคณะ [4] ได้นำ PET ที่ใช้แล้วมาดีพอลิเมอร์เรซินด้วย PG และ EG ในโครงการนี้ได้นำ DEG มาปรับปรุงสมบัติของเรซิน โดยใช้อัตราส่วน EG:PG:DEG เท่ากับ 1:1:0, 1:1:0.5 และ 1:1:1 โดยโมล โดยเติม DEG ลงในผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากการดีพอลิเมอร์เรซิน PET ด้วย EG และ PG แล้วนำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้มาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในอัตราส่วน Hydroxyl:Carboxyl เป็น 1.1:1 และเติมสไตรีนมอโนเมอร์ ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยง ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มและใช้ไดเอทิลอะนิลีน เป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาการเชื่อมโยง แล้วนำไปทดสอบเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสแรงดึง มอดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกมมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ปริมาณ DEG ที่เติมลงไปทำให้เรซินที่ได้ขุ่นขึ้น

S. Ballga and W.T Wong [17] ได้ศึกษาปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เรซิน PET จากขบวนการนำคัมที่ใช้แล้ว โดยใช้ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาพวก Metal acetates แตกต่างกัน 4 ตัว คือ lead, zinc, cobalt และ manganese โดยทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เรซิน PET โดยใช้ EG ที่อุณหภูมิ 190 °C ภายใต้สภาวะเอดสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ ในโครงการนี้ให้ปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่า zinc acetate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการดีพอลิเมอร์เรซิน และสารสีเขียวในขบวนการนี้มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เรซิน

Ph.Radenkov และคณะ [18] ได้รายงานถึงความเป็นไปได้ในการนำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสของ PET , bis (2-hydroxyethyl) terephthalate และ EG ในกระบวนการทำไฟเบอร์กลาส โดยมี การเติมโทลูอิน ไดไอโซไซยานต ลงไปเพื่อเป็นสารเชื่อมโยง ในการเติมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส จะเติมในเรซินที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส โดยวิธี Lay-up ทั้งหมด 4 ชั้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ผลปรากฏว่า ชิ้นงานไฟเบอร์กลาสที่เติมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสลงไปมากกว่า 15% โดยน้ำหนัก ให้ผลในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ดีที่สุด

U.R. Vaidya and V.M. Nadkarni [19] ได้ทำการศึกษาจลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์เรซินที่ทำจาก PET ที่ใช้แล้วเปรียบเทียบกับเรซินทั่วไปโดยศึกษาจากการไกลโคไลซิส PET เมื่อใช้อัตราส่วน น้ำหนักของพรอพิลีน ไกลคอล (PG) แตกต่างกันและนำไปวิเคราะห์หาค่าไฮดรอกซีเพื่อคำนวณหา น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวนและใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในการเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวพบว่าปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันของ PET กับ PG ขึ้นอยู่กับปริมาณของ PG ที่ใช้ซึ่ง ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดเป็น พอลิเอสเทอร์เรซินที่สามารถเข้ากันได้กับสไตรีนและสามารถเกิดการเชื่อมโยงในสภาวะปกติได้ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบจลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ PET เรซินกับเรซินทั่วไปพบว่า PET ที่ใช้แล้ว สามารถดีพอลิเมอร์ไรซ์ด้วย PG ให้น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 276–480 และจลศาสตร์อันดับสามของ ปฏิกิริยาพอลิเอสเทอร์เรซินมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเอสเทอร์เรซินของ PET ที่ใช้แล้วสูงกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเอสเทอร์เรซินทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) ยี่ห้อสิงห์
ที่ใช้แล้ว นำมาทำความสะอาดแล้วตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ
2. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) เกรด Ramapet N1
(General Purpose) บริษัทอินโดรามา จำกัด Melting point 247 ± 2 °C ขึ้นรูปด้วย
เทคนิค Extrusion และ Blow molding ได้
3. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
REAGENTS
4. พรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
REAGENTS
5. ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO
ERBA REAGENTS
6. ซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS
7. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP) เกรดวิเคราะห์
บริษัท CARLO ERBA REAGENTS
8. ฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS
9. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท
CARLO ERBA REAGENTS
10. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
11. เอทานอล (95% Ethanol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS
12. อะซิโตน (Acetone) เกรดการค้า บริษัท FLUKA
13. ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA
14. สไตรีน (Styrene) เกรดการค้า บริษัทโมเดินเคมีคอล จำกัด
15. ไดเมทิลแอนนิลีน (Dimethyl aniline) เกรดการค้า บริษัทเจริญวัฒนาไฟเบอร์ แอนด์
เคมีเคิล จำกัด
16. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เกรดการค้า บริษัทเจริญวัฒนาไฟเบอร์
แอนด์เคมีเคิล จำกัด
17. เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl ethyl ketone peroxide, MEKP) เกรดการค้า
บริษัทโกเว็นเจอร์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. โคบอลต์แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate) เกรดการค้า บริษัท โกวีนเจอร์ จำกัด

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ขวดก้นกลม 3 คอ ขนาด 500 มิลลิตร และ 1000 มิลลิตร
2. เครื่องควบแน่นแบบปริฟลักซ์
3. เทอร์โมสแตต
4. เทอร์โมมิเตอร์ 100 °C และ 300 °C
5. เครื่องกวนเชิงกล
6. อุปกรณ์เครื่องแก้ว เช่น บีกเกอร์, ขวดก้นกลม, กระจกดวง, ขวดวัดปริมาตร, บิวเรตปิเปต, ขวดรูปชมพู่ และ แท่งแก้ว เป็นต้น
7. ไมโครปิเปต
8. ถังก๊าซไนโตรเจน
9. แม่พิมพ์กระจก
10. เครื่องชั่ง
11. แท่นให้ความร้อน
12. เครื่อง Ultrasonic bath
13. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR 30K บริษัท LLOYD INSTRUMENT
14. เครื่องทดสอบความหนืดแบบบรู๊คฟิลด์ (Brookfield viscometer) รุ่น LV 2000 บริษัท เคมิคัลแฮตส์แอนด์แล็บอินสตรูमेंท์ จำกัด
15. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer hardness) รุ่น GS-719N บริษัท INTRO ENTERPRISE
16. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์รุ่น Miniscan™ XE Plus บริษัท HUNTER ASSOCIATES LABORATORY, INC
17. เครื่องวัดแรงกระแทก (Impact tester) รุ่น 7697 บริษัท YASUDA SEIKI ENGINEERING
18. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR 5K บริษัท LLOYD INSTRUMENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมเคมีในการไทเทรต

1. การเตรียมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 0.5 N
 1. ชั่ง KOH 7.0125 กรัม ละลายด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร
 2. ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ให้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร
2. การเตรียมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 0.1 N
 1. ชั่ง KOH 1.4025 กรัม ละลายด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร
 2. ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล ให้ได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
3. การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (KHP) ความเข้มข้น 0.5 N
 1. นำ KHP อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง
 2. นำออกมาใส่เคซิเคเตอร์ทิ้งไว้ให้เย็น นำมาชั่ง 5.1058 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น
 3. ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.4 ขั้นตอนในการทดลอง

การเตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน PET

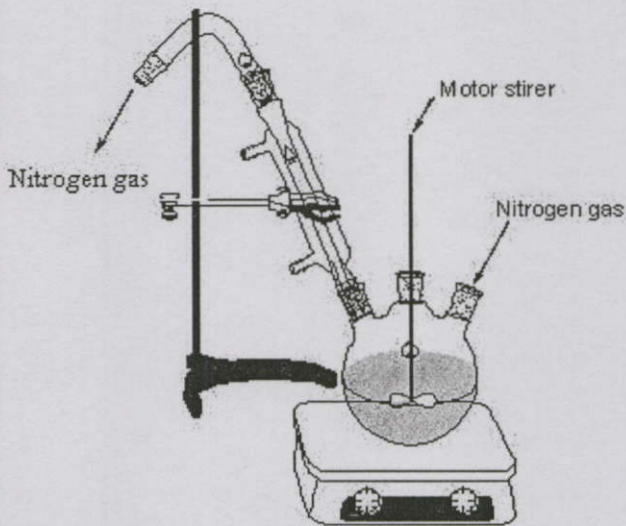
3.4.1 ปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน PET

1. นำขวดน้ำ PET ที่ใช้แล้วเช็ดให้แห้ง แล้วตัดเป็นชิ้นเล็กๆ
2. ชั่ง PET ที่ตัดแล้วและไกลคอลผสมให้ได้อัตราส่วน 1:5.04 โดยโมล ซึ่งไกลคอลผสมประกอบด้วย เอทิลีนไกลคอล, พรอพิลีนไกลคอล และ ไดเอทิลีนไกลคอล ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 นำมาใส่รวมกันในขวด 3 คอ ขนาด 1000 มิลลิลิตร
3. ต่อชุดอุปกรณ์ กับ เทอร์โมสแตต เครื่องควบคุมแบบรีฟลักซ์ และเครื่องปั่นเชิงกล ดังรูปที่ 3.1
4. ชั่งซิงค์อะซีเตต 0.5% โดยน้ำหนักของ PET เติมลงในขวด 3 คอ
5. ปั่นกวนให้สารเข้ากันภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน โดยไม่ต้องให้ความร้อน
6. เมื่อสารเข้ากันแล้วเริ่มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 190-200 °C
7. เมื่อครบ 8 ชั่วโมง นำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสที่ได้มาหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value) เพื่อคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแบบจำนวน (Number average molecular weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่เตรียมผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส

สูตร	สารตั้งต้น	อัตราส่วนโดยโมล ของ PET : Glycol	อัตราส่วนโดยโมล ของ EG:PG:DEG
1	PET virgin	1:5.04	2.52:2.52:0
2	PET virgin	1:5.04	2.016:2.016:1.008
3	PET virgin	1:5.04	1.68:1.68:1.68
4	ขวด PET	1:5.04	2.52:2.52:0
5	ขวด PET	1:5.04	2.016:2.016:1.008
6	ขวด PET	1:5.04	1.68:1.68:1.68



รูปที่ 3.1 การจัดเตรียมชุดการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน PET

3.4.2 การหาค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value) ตามมาตรฐาน ASTM D4662

- นำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส มา 1 กรัม ใส่ในขวดก้นกลม ขนาด 100 มิลลิลิตร
- เตรียมสารละลายผสมระหว่าง ฟталิกแอนไฮไดรด์และ ไพรีดีน โดยชั่งฟталิกแอนไฮไดรด์ มา 15.71 กรัม ผสมกับ ไพรีดีน 100 มิลลิลิตร คนให้สารละลายเข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 2. เตรียมสารละลายผสมระหว่าง ฟталิกแอนไฮไดรด์และ ไพรีดีน โดยชั่งฟталิกแอนไฮไดรด์ มา 15.71 กรัม ผสมกับ ไพรีดีน 100 มิลลิลิตร คนให้สารละลายเข้ากัน

3. นำสารละลายผสมระหว่างฟทาสิกแอนไฮไดรด์กับไพรีดีนที่เตรียมได้มา 25 มิลลิลิตร เติมลงในขวดก้นกลม เขย่าให้ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสละลาย
4. ทำการรีฟลักซ์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. เมื่อครบ 1 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างคอนเดนเซอร์ด้วยไพรีดีน 50 มิลลิลิตร
6. นำสารที่ได้ใส่ขวดรูปชมพู่ หยดฟีนอล์ฟทาลินลงไป 3 หยด
7. ไทเทรตกับ 0.5 N โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สังเกตจุดยุติ เปลี่ยนเป็นสีชมพู
8. ทำ Blank เหมือนกับสารตัวอย่าง
9. นำค่าที่ได้จากการไทเทรตมาคำนวณหาค่า Hydroxyl value โดยมีหน่วยเป็น mgKOH/g
10. เมื่อได้ค่า Hydroxyl value แล้วนำมาคำนวณ หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแบบจำนวน (Mn)

สมการคำนวณค่า Hydroxyl value

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

W

- โดยที่
- A = ปริมาณของสารละลาย KOH ที่ใช้ในการไทเทรตกับสารตัวอย่าง (ml.)
 - B = ปริมาณของสารละลาย KOH ที่ใช้ในการไทเทรตกับ Blank (ml.)
 - N = ความเข้มข้นของสารละลาย KOH (N)
 - W = น้ำหนักสารตัวอย่าง (g.)

การคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแบบจำนวน (Number Average Molecular Weight)

$$M_n = \frac{112200}{\text{OH value}} \quad \text{กรัม/โมล}$$

3.4.3 การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

1. นำผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสมารวม 100 กรัม ใส่ในขวด 3 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. จัดชุดอุปกรณ์ต่อคอนเดนเซอร์ เทอร์โมสแตต และชุดปั่นกวน ทำการปั่นกวนให้เข้ากัน พร้อมให้ความร้อนที่ 150 °C ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน
3. เมื่อผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสละลายเป็นของเหลวใสแล้วจึงเติม มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แล้วให้ปฏิกิริยาดำเนินไปเรื่อยๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
4. เมื่ออุณหภูมิ ถึง 150 °C จากนั้นสุ่มตัวอย่างมาไทเทรตเพื่อหาค่าปริมาณกรด (Acid - value) ทุกๆ 1 ชั่วโมง

3.4.4 การวิเคราะห์หาค่าปริมาณกรด (Acid value)

1. แบ่งสารมาและชั่งน้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมอะซิโตน (Acetone) ลงไป 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เรซินละลายเข้ากัน
3. หยดฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) ลงไป 3 หยด เขย่าให้เข้ากัน
4. นำมาไทเทรตกับ 0.1 N ของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล สังเกตจุดยุติ จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน
5. ทำ Blank เหมือนกับสารตัวอย่าง
6. คำนวณหาค่าปริมาณกรด (Acid value)
7. เมื่อได้ค่าปริมาณกรด (Acid value) อยู่ในช่วงที่กำหนด ให้หยุดปฏิบัติการ

การคำนวณค่าปริมาณกรด (Acid value)

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

- เมื่อ
- A = ปริมาตรของสารละลาย KOH ที่ใช้ในการไทเทรตกับสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - B = ปริมาตรของสารละลาย KOH ที่ใช้ในการไทเทรตกับ Blank (มิลลิลิตร)
 - N = ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (N)
 - W = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

3.4.5 การเติมสารเชื่อมโยง

เมื่อได้พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวแล้วนำมาละลายในสไตรีนมอนอเมอร์ ใช้สไตรีน 35 % ของน้ำหนักสุทธิของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวและใช้ไฮโดรควิโนน 0.2% ของน้ำหนักพอลิเอสเทอร์เรซิน ซึ่งเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิ 60 °C ผสมเป็นเวลา 30 นาที

3.4.6 การวัดความหนืด

ในการทดลองเมื่อผสมสไตรีนมอนอเมอร์แล้วนำไปวัดความหนืดด้วยเครื่องทดสอบแบบบรูคฟิลด์โดยใช้สปินเนอร์ 3 ความเร็ว 6 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิห้อง

3.4.7 การขึ้นรูปเรซิน

นำเรซินมาผสมกับตัวริเริ่มปฏิกิริยา คนให้เข้ากันแล้วนำไปวางใน Ultrasonic bath เพื่อไล่เอาอากาศ เป็นเวลา 30 นาที แล้วเติมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาแล้วเทลงในแม่แบบที่เตรียมไว้ซึ่งมีไมวากรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีหยดแปลงเนื้อหา และต้องอ้อมถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งก่อนนำไปใช้ แผ่นใสประกบบนล่างของแม่แบบแล้วนำแผ่นเหล็กวางทับด้านบนอีกครั้งเพื่อให้ชิ้นงานเรียบและความหนาของชิ้นงานเท่ากัน ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง และมีการจับเวลาการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์-

เรซินโดยแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ เวลา Set to touch time เป็นช่วงที่ตะบองขึ้นงานแล้วเรซินไม่ติดมือ และเวลา Dry hard time เป็นเวลาที่เรซินแข็งตัวค่อนข้างเต็มที่ เมื่อตะบองขึ้นงานแล้วไม่มีลายนิ้วมือปรากฏบนชิ้นงานเรซิน จึงแกะออกจากแม่แบบ โดยมีการใช้สารเชื่อมโยง 2 ชนิดคือเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) กับ ไดเมทิลอะนิลีน (Dimethyl aniline, DMA) และ -เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl ethyl ketone peroxide, MEKP) กับ โคบอลต์เนฟทีเนต (Cobalt naphthenate, Co)

3.4.8 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ

หาค่าความถ่วงจำเพาะโดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) ขนาด 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ เริ่มจากชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของขวดพิคโนมิเตอร์ จดค่าไว้ จากนั้นเติมเรซินให้เต็มขวดพิคโนมิเตอร์ ปิดฝาและเช็ดขวดให้สะอาด ชั่งเพื่อหาน้ำหนักเรซิน แล้วนำมาคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะตามสูตรการคำนวณข้างล่าง

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{ความหนาแน่นของวัตถุ}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$$

3.4.9 การหาค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัว

ทำการขึ้นรูปชิ้นงาน 5x15x2 มิลลิเมตร แล้วนำมาชั่งจมน้ำหนักที่แน่นอน 4 ตำแหน่ง แล้วนำไปแช่ในอะซิโตน โดยเทอะซิโตนใส่ให้ท่วมชิ้นงานแล้วปิดบีกเกอร์ด้วยฟิล์มป้องกันมิให้อะซิโตนระเหยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานมาชั่งเบาๆ ให้แห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนัก จดค่าไว้ และนำชิ้นงานไปแช่ต่ออีก 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งจนแน่ใจว่าน้ำหนักชิ้นงานคงที่แล้ว แล้วนำมาคำนวณดังสูตรข้างล่าง

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบวมตัว} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานดูดซับ} \times 100}{\text{น้ำหนักชิ้นงานแห้งเริ่มต้น}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบสมบัติ

3.5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. สมบัติความแข็งแรงดึง

ชิ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์โดยมีความยาวแกน 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D638 อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ Load cell 30 kN เพื่อทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

2. สมบัติความแข็งกด (Hardness)

นำตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240

3. สมบัติความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength)

เตรียมตัวอย่างแบบ Notch Izod ตามมาตรฐาน ASTM D265 ชิ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แม่แบบที่มีขนาด 3.2 x 12.7 x 60 มิลลิเมตร และมีรอยบากลึก 2.54 มิลลิเมตร มาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ในหน่วย kJ/m^2 ที่อุณหภูมิห้อง

4. สมบัติความโค้งงอ (Flexural strength)

ชิ้นรูปชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2.5 x 25 x 60 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างระหว่างฐานกดเท่ากับ 40 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการกดชิ้นงาน 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ Load cell 5 kN ตามมาตรฐาน ASTM D790

ความเค้นโค้งงอ (Flexural stress, σ_f) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus in flexure behavior, E_b) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_f = 3/2 \times FL/bh^2$$

$$E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

3.5.2 สมบัติทางความร้อน

เอกสิทธิ์ เอ็นเอ็ลทีทรี จำกัด รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ใช้ 1. สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวโดยใช้เทคนิค Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) เป็นการทดสอบทางความร้อนเพื่อหา

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ของเรซิน โดยเตรียมชิ้นงานให้มีขนาด 2 x 10 x 40 มิลลิเมตร ใช้โหมกดทดสอบแบบ Tension ความเร็ว 2 °C/นาที ความถี่ 1 Hz โดยที่ชิ้นงานจะสันที่ปลายด้านเดียวและยึดชิ้นงานที่ปลายอีกด้านไว้โดยวางชิ้นงานในแนวตั้ง

2. อุณหภูมิด้านการบิดงอของชิ้นงานเรซิน ทดสอบด้วยเทคนิค Heat Deflection Temperature (HDT) ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 648-01 Method B

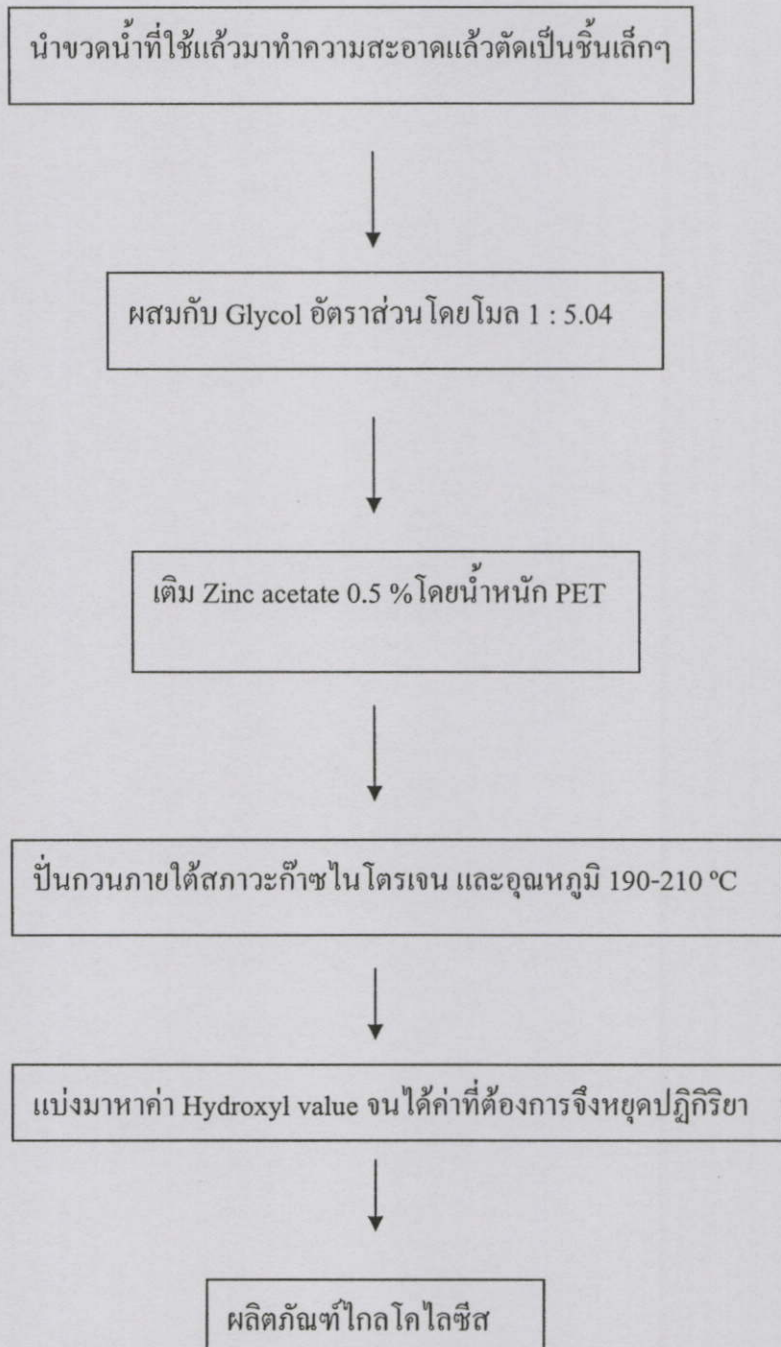
3.5.3 สมบัติทางแสง

การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีและดัชนีการเกิดสีเหลืองของชิ้นงานทำการวัดสีของเรซินที่ได้ในแต่ละสูตรโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น Miniscan™ XE Plus การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานใช้ระบบของ CIE L* a* b* และดัชนีการเกิดสีเหลืองของชิ้นงานใช้ระบบซีไอไอไตรสตี-มิลลิส (X, Y, Z) ชิ้นงานมีขนาด 44 x 70 x 2 มิลลิเมตร

3.6 สรุปปัจจัยที่ศึกษา

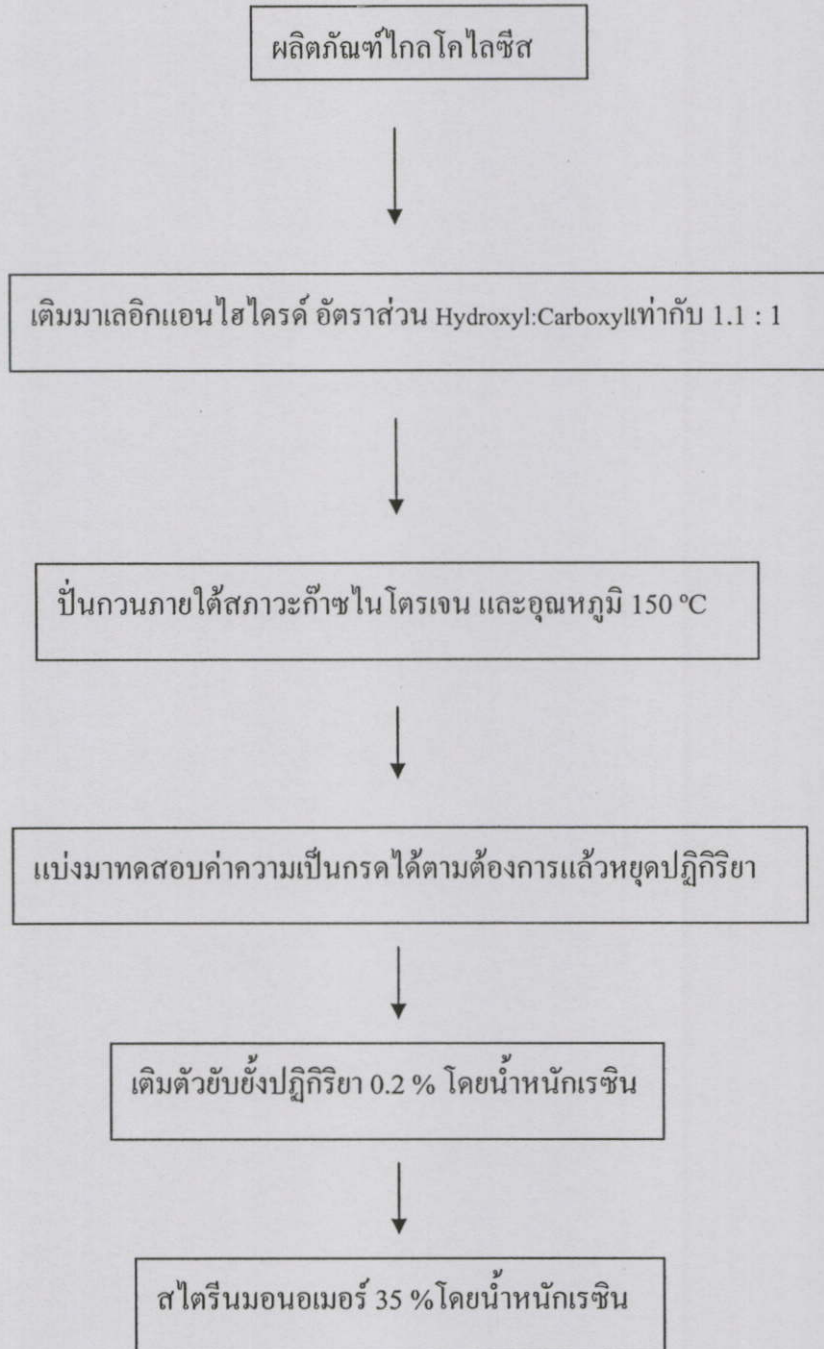
1. ศึกษาการตีพอลิเมอร์เรซิน PET จากขบวนการใช้น้ำแล้วเปรียบเทียบกับ PET บริสุทธิ์โดยใช้อัตราส่วนในการตีพอลิเมอร์เรซินโดยโมลของ EG : PG : DEG คือ 1:1:0, 1:1:0.5 และ 1:1:1 เพื่อให้ได้ค่า Hydroxy Value ใกล้เคียงกันในแต่ละสูตร
2. ศึกษาชนิดและปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาและตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงในพอลิเอสเทอร์เรซิน ชนิดไม่อิ่มตัวเพื่อให้แข็งตัวในช่วงเวลาที่ต้องการ
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเรซินที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



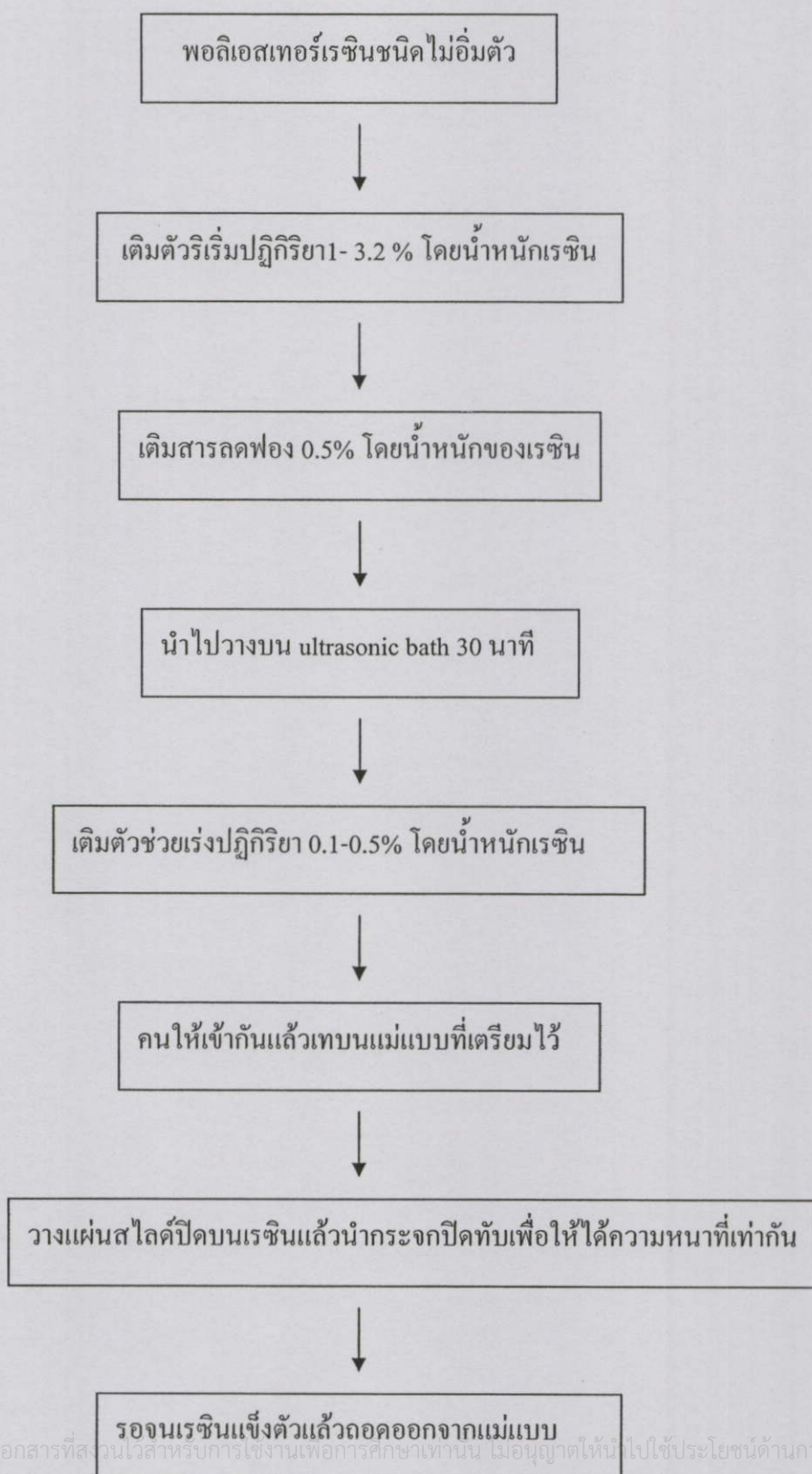
รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์โกลโคไลซีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนผังสรุปขั้นตอนการเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

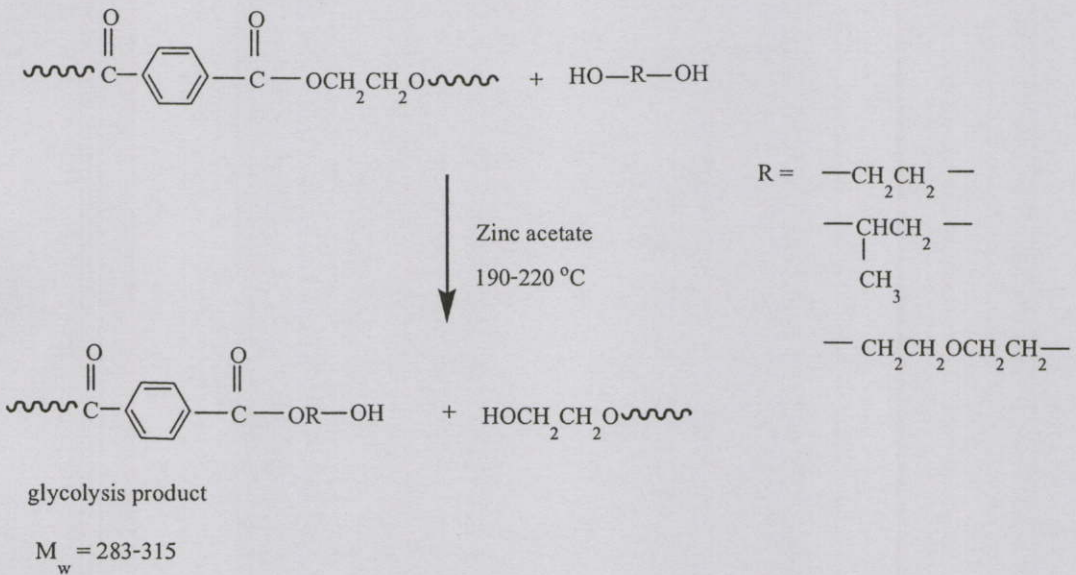
รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปขั้นตอนการขึ้นรูปเรซิน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ปฏิกริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันของ PET

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถูกนำมาทำให้เป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินด้วยปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันกับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) พรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) และไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) โดยใช้ซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 190-220 °C ภายใต้สภาวะไนโตรเจน อัตราส่วนโดยโมลของ PET:Glycol ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 1:5.04 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ปฏิกริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันของ PET ด้วยไกลคอล

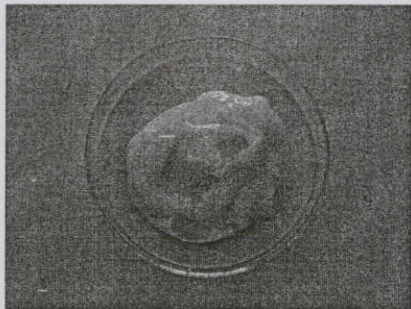
ในการทดลองนี้ทำการปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin, UPRs) โดยใช้ปริมาณไดเอทิลีนไกลคอลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้ระยะระหว่างจุดที่เกิดการเชื่อมโยงหรือความหนาแน่นการเชื่อมโยงแตกต่างกัน

หลังจากเกิดปฏิกิริยาประมาณ 8 ชั่วโมงทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาคำนวณค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value) ซึ่งในแต่ละสูตรจะควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 356-397 mgKOH/g ไม่มีการเติมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ซึ่งคำนวณเป็นน้ำหนักโมเลกุลได้เท่ากับ $300 \pm 15\text{ g/mole}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด (Paste) สีขาวขุ่นเรียกผลึกภัณฑ์ที่ได้นี้ว่าผลึกภัณฑ์ไกล โกล ไลซีส

(Glycolysis product) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยสัญลักษณ์ “V” แสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ PET เกรดบริสุทธิ์ (Virgin PET) และสัญลักษณ์ “R” แสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ขวด PET ที่ใช้แล้ว (Recycle PET)

ตารางที่ 4.1 ค่า Hydroxyl value, Acid value และค่า Molecular weight ของพอลิเอสเตอร์เรซินแต่ละสูตร

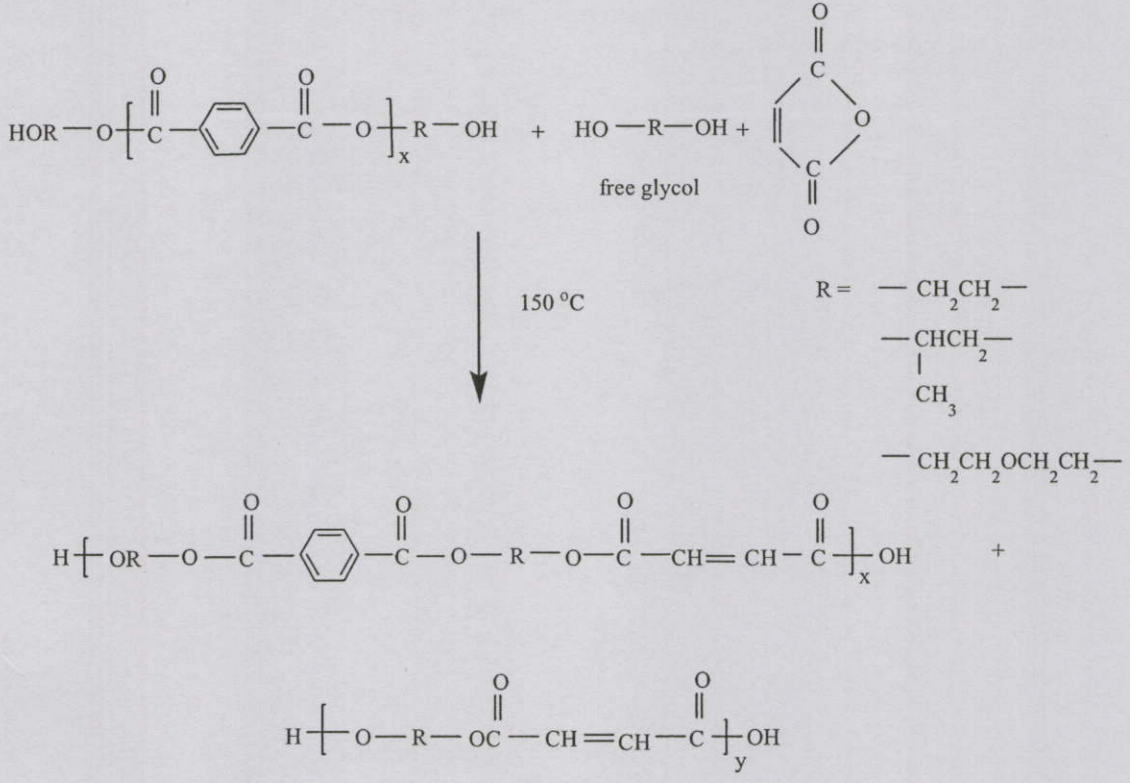
สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	Hydroxyl value (mgKOH/g)	Acid value (mgKOH/g)	Molecular weight (g/mole)
V1 (1:1:0)	364 ± 10	73.05 ± 5	308
V2 (1:1:0.5)	390 ± 10	77.00 ± 5	288
V3 (1:1:1)	397 ± 10	75.01 ± 5	283
R1 (1:1:0)	360 ± 10	72.84 ± 5	312
R2 (1:1:0.5)	356 ± 10	76.13 ± 5	315
R3 (1:1:1)	365 ± 10	73.20 ± 5	307



รูปที่ 4.2 ผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสที่ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน

4.2 การสังเคราะห์ UPRs

การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซิน โดยใช้ผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซี (Hydroxy group) มาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซี (Carboxyl group) ด้วยอัตราส่วน 1:1:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 150 °C ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจนและวิเคราะห์หาค่าปริมาณกรด (Acid value) ซึ่งจะต้องมีค่าใกล้เคียงกัน โดยควบคุมให้อยู่ในช่วง 72-77 mgKOH/g ก่อนหยุดปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4.1 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาระหว่างผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนในระหว่างการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินเนื่องจากมีผู้ทำโครงการพิเศษเรื่องการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว สำหรับงานคอมโพสิต [4] ซึ่งในขั้นตอนการสังเคราะห์ จะมีการเติม DEG ภายหลังจากที่ได้ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสออกมาแล้ว ซึ่งส่งผลให้โครงการพิเศษนี้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ขุ่น ไม่ใส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับเปลี่ยนโดยจะเติม DEG ในระหว่างการทำปฏิกิริยาดิพอลิเมอร์ไรเซชัน จากการทดลองพบว่า พอลิเอสเตอร์เรซินที่ได้ใส ซึ่ง DEG ที่เติมเข้าไปภายหลังนั้นอาจทำให้ไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสได้ทั้งหมด จึงส่งผลให้เรซินที่ได้ขุ่นขาว

จากนั้นเติมสไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene monomer) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายและสารเชื่อมโยงในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของพอลิเอสเตอร์เรซินและมีไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) 0.2% ของน้ำหนัก UPRs ทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา ทำการผสมพอลิเอสเตอร์เรซินและสไตรีนมอนอเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยพอลิเอสเตอร์เรซินที่ผสมเสร็จพร้อมใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.4

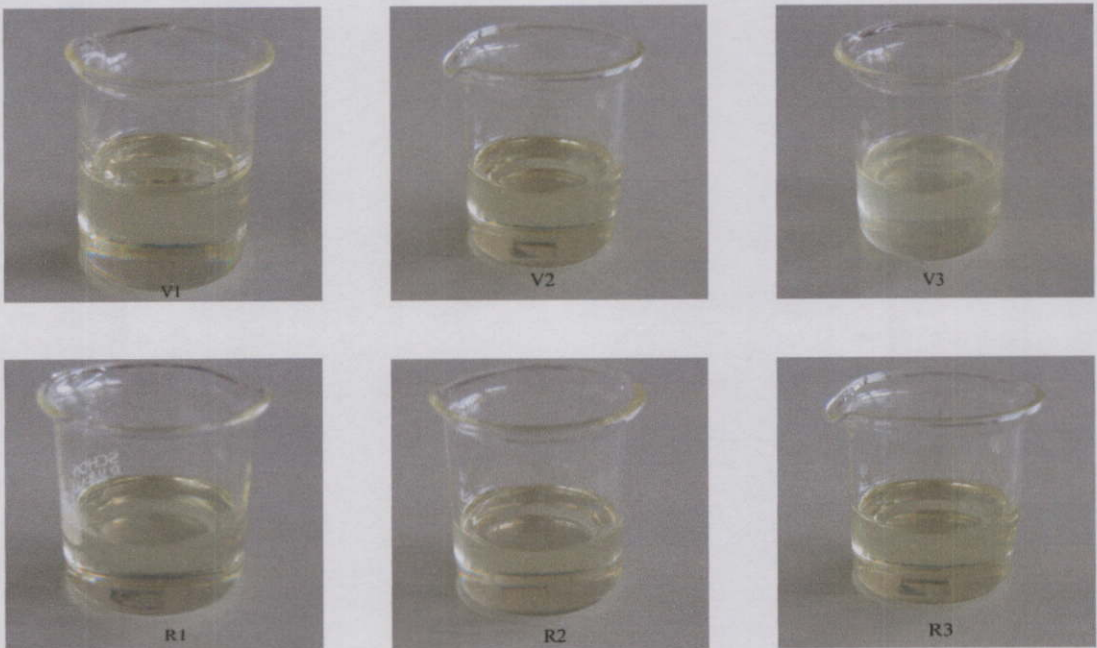
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของปริมาณ DEG และเกรดของ PET ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ UPRs

4.3.1 ผลต่อความใสของเรซิน

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า UPRs ที่สังเคราะห์ได้ทั้งจาก PET เกรดบริสุทธิ์ และจากขวด PET ที่ใช้แล้วในแต่ละสูตรมีความใสใกล้เคียงกัน จากตารางที่ 4.2 เป็นค่าการวัดสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงออกจากวัตถุในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่นและอ่านค่าผ่านระบบ CIE LAB โดยพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างระบบนี้คือระบบสีคู่ตรงข้าม (Opponent color system) ที่เรียกว่า L a b ซึ่งแสดงค่าเป็น L^* a^* และ b^* โดยค่า L^* หมายถึงค่าความสว่าง มีค่าเริ่มที่ 0 (ดำ) ไปจนถึง 100 (ขาว) ส่วน a^* และ b^* แสดงถึงสีซึ่งใช้หลักการที่ว่าสีไม่สามารถเป็นทั้งสีแดงและสีเขียวหรือเป็นทั้งสีเหลืองและสีน้ำเงินพร้อมๆ กัน โดย a^* มีค่าเป็นบวกหมายถึงปริมาณของสีแดงในขณะที่ a^* มีค่าเป็นลบหมายถึงปริมาณของสีเขียว และ b^* มีค่าเป็นบวกหมายถึงค่าปริมาณของสีเหลือง และ b^* มีค่าเป็นลบหมายถึงปริมาณของสีน้ำเงิน พบว่าพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ได้ทั้งจาก PET เกรดบริสุทธิ์ และจากขวด PET ในแต่ละสูตรมีค่า L^* a^* และ b^* ใกล้เคียงกัน โดยพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะใสอมเหลืองในระดับที่ใกล้เคียงกันในแต่ละสูตร (สังเกตจากค่า b^* ที่เป็นบวกในตารางที่ 4.2) จากผลที่ได้กล่าวได้ว่าปริมาณ DEG ที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความใสของพอลิเอสเตอร์เรซิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความใสของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวในแต่ละสูตร

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดสีของเรซิน

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	L*	a*	b*
V1 (1:1:0)	5.17	-0.02	4.97
V2 (1:1:0.5)	5.73	-0.03	7.32
V3 (1:1:1)	1.91	-0.12	5.18
R1 (1:1:0)	2.79	-0.18	5.42
R2 (1:1:0.5)	11.13	-0.55	8.66
R3 (1 :1:1)	7.45	-0.05	5.21

4.3.2 ความหนืดของ UPRs

สมบัติสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของเหลว คือ ความหนืด (Viscosity) ในการทดลองนี้วัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ จากการทดลองแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.3 พบว่าความหนืดในแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในขั้นตอนการดีพอลิเมอไรเซชัน PET มีการควบคุมให้ค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value) มีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าไฮดรอกซิลนี้มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของพอลิเอสเตอร์เรซิน ดังนั้นความหนืดของพอลิเอสเตอร์เรซินที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 1020-1130 cP

ตารางที่ 4.3 ความหนืดของเรซิน

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	ความหนืด (cP)
V1 (1:1:0)	1120
V2 (1:1:0.5)	1020
V3 (1:1:1)	1020
R1 (1:1:0)	1120
R2 (1:1:0.5)	1130
R3 (1 :1:1)	1115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของปริมาณ DEG และเกรดของ PET ที่ต่างกัน (PET บริสุทธิ์ และ ขวด PET ที่ใช้แล้ว) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ UPRs

4.4.1 สีของชิ้นงาน UPRs

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าชิ้นงานที่ได้หลังจากการเชื่อมโยงด้วย BPO/DMA จะมีสีแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งชิ้นงานเรซินในแต่ละสูตรจะมีโทนสีน้ำตาลแต่ความเข้มต่างกัน โดยที่ชิ้นงานสูตร V1 และ R3 สีใกล้เคียงกัน และ R1 กับ R2 มีสีใกล้เคียงกัน และสูตร V2 ชิ้นงานมีสีเข้มเล็กน้อย และจากการอ่านค่าผ่านระบบ CIE LAB จากเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าสีของเรซินที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละสูตรมีโทนสีน้ำตาลสังเกตจากค่า a^* และ b^* ทั้งสองค่ามีค่าเป็นบวก หมายถึงปริมาณของสีแดงและสีเหลืองตามลำดับแตกต่างกันเล็กน้อยที่ระดับความเข้มของสี และสูตร V2 สีของชิ้นงานเรซินจะมีสีค่อนข้างจะเป็นสีเข้มเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากผลของตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาในการเชื่อมโยงคือ DMA ซึ่ง DMA มีลักษณะสีเหลืองเข้ม เมื่อเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจส่งผลต่อสีของชิ้นงาน และการเตรียมเรซินจะใช้เรซินในปริมาณน้อย อาจเป็นไปได้ที่จะเกิดความปลอดภัยเนื่องจากการซังสารเชื่อมโยง



V1 V2 V3 R1 R2 R3

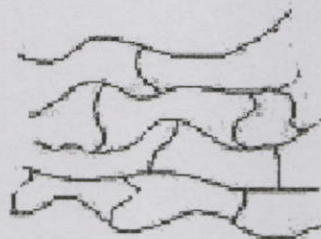
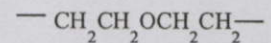
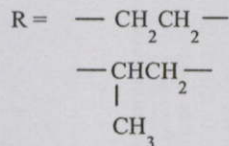
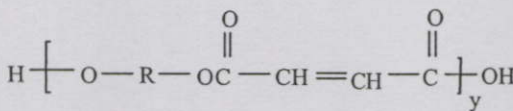
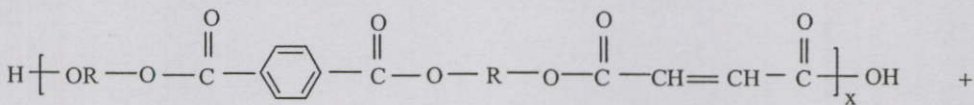
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบสีของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดสีของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	L^*	a^*	b^*
V1 (1:1:0)	27.72	4.24	16.96
V2 (1:1:0.5)	32.22	10.41	15.76
V3 (1:1:1)	25.77	0.98	8.19
R1 (1:1:0)	20.43	3.19	15.24
R2 (1:1:0.5)	28.84	0.59	16.14
R3 (1:1:1)	26.55	0.98	11.26

4.4.2 การหาความถ่วงจำเพาะและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของขึ้นงานเรซิน

โดยทั่วไปเรซินที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีการหดตัวเมื่อนำมาทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงขณะขึ้นรูป นับเป็นปัญหาที่พบบ่อยมาก ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่ทำมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การหดตัวเกิดเนื่องจากการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน ในการทดลองจึงทำการหาค่าถ่วงจำเพาะของขึ้นงานเรซินที่เตรียมได้โดยจะเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของขึ้นงานเรซินก่อนและหลังเกิดการเชื่อมโยงซึ่งผลที่ได้พบว่าเรซินมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถ่วงจำเพาะจากประมาณ 1.23 เป็น 1.6-1.8 ขึ้นกับสูตรของเรซิน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอสเตอร์เรซินที่ตำแหน่งพันธะคู่กับสไตรีนมอนอเมอร์ ทำให้โมเลกุลอยู่ชิดกันมากขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของพอลิเอสเตอร์เรซินกับสไตรีนขึ้นงานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานเรซินก่อนและหลังเกิดการเชื่อม โยง
ด้วยระบบ BPO/DMA

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	ความถ่วงจำเพาะก่อนเชื่อม โยง	ความถ่วงจำเพาะหลังเชื่อม โยง
V1 (1:1:0)	1.230 ± 0.009	1.774 ± 0.018
V2 (1:1:0.5)	1.232 ± 0.007	1.711 ± 0.008
V3 (1:1:1)	1.227 ± 0.007	1.723 ± 0.025
R1 (1:1:0)	1.227 ± 0.008	1.724 ± 0.017
R2 (1:1:0.5)	1.231 ± 0.008	1.671 ± 0.009
R3 (1:1:1)	1.228 ± 0.007	1.565 ± 0.026

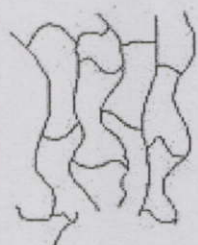
การหดตัวของชิ้นงานเรซินเกิดเนื่องจากการเชื่อม โยงของสายโซ่โมเลกุลซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นเชื่อม โยง แต่การหาความหนาแน่นเชื่อม โยงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นจึงทำการทดลองหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัว ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นเชื่อม โยงของเรซิน พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวค่อนข้างใกล้เคียงกันยกเว้นสูตร V3 ที่มีค่ามากกว่าสูตรอื่นๆ เล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะสูตรนี้มีปริมาณ DEG มากกว่าสูตรอื่น เนื่องจากโครงสร้างของ DEG ที่เป็นสายโซ่ตรงและยาวกว่า EG และ PG ดังได้กล่าวมาแล้ว จึงทำให้ระยะห่างของพันธะคู่ ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเชื่อม โยงอยู่ห่างกันเมื่อสไตรีนมอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งดังกล่าวจะส่งผลให้ความหนาแน่นเชื่อม โยงลดน้อยลง เมื่อเทียบกับสูตร V1 และ V2 โดยค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อม โยง BPO/DMA

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัว
V1 (1:1:0)	113 ± 0.5
V2 (1:1:0.5)	114 ± 0.5
V3 (1:1:1)	125 ± 0.5
R1 (1:1:0)	115 ± 0.5
R2 (1:1:0.5)	115 ± 0.5
R3 (1:1:1)	116 ± 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด R3 (1:1:1) ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึง R3 (1:1:1) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลของ DEG พบว่าปริมาณ DEG มีผลทำให้การหดตัวของชิ้นงานเรซินน้อยลง เนื่องจาก DEG มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่า EG และ PG เมื่อเกิดการเชื่อมโยงจุดที่เกิดการเชื่อมโยง ไม่ได้อยู่ใกล้ชิดกันมากเมื่อเทียบกับเรซินที่มี EG และ PG จึงส่งผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงของเรซินต่ำลง การหดตัวของชิ้นงานก็ลดลง ดังรูปที่ 4.7



มี DEG น้อย



มี DEG มาก

รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างร่างแหข่ายของเรซินที่มี DEG น้อย และมี DEG มาก

4.4.3 เวลาการแข็งตัวของเรซิน

ในด้านการใช้งานในอุตสาหกรรม สิ่งที่สำคัญถึงในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานคือเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน เพราะถ้าชิ้นงานแข็งตัวเร็วเกินไปจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทำงานจำกัดนำไปสู่ข้อบกพร่องของชิ้นงานได้ง่าย แต่ถ้าชิ้นงานแข็งตัวช้าเกินไปก็ส่งผลเสียด้านกำลังการผลิตในแต่ละวัน ดังนั้นเวลาในการแข็งตัวของเรซินจึงค่อนข้างมีความสำคัญซึ่งเวลาในการแข็งตัวของเรซินในอุตสาหกรรมส่วนมากแล้วจะอยู่ในช่วง 30-45 นาที

จากตารางที่ 4.7 พบว่าปริมาณ DEG ในเรซินที่แตกต่างกันมีผลต่อเวลาการแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เรซินเกิดการเชื่อมโยงจนชิ้นงานเกิดการแข็งตัวได้ช้าลง เนื่องมาจากผลของโครงสร้างของ DEG ที่ระยะของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดการเชื่อมโยงอยู่ห่างกัน เมื่อเปรียบเทียบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เรซินที่มี DEG มากกว่าจะมีความหนาแน่นของจุดเชื่อมโยงน้อยกว่า เรซินที่มี DEG น้อย เมื่อสไตรีนมอนอเมอร์เข้าทำปฏิกิริยาจะเกิดโครงสร้างร่างแหที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงต่ำกว่าจึงต้องการการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงมากกว่าเพื่อให้เรซินเกิดการแข็งตัวเท่ากัน ทำให้การแข็งตัวของเรซินสูตรที่มี DEG มากกว่าต้องใช้นานกว่า อย่างไรก็ตามระยะเวลาการแข็งตัวของเรซินทุกสูตรที่ทำการทดลองอยู่ในช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ PET บริสุทธิ์กับขวด PET ที่ใช้แล้วพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า นักเมื่อเทียบในสูตรที่มีปริมาณ DEG เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 4.7

เมื่อก่อนหน้านี้ ออกพิมพ์ห้ามมีเหตุขัดแย้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

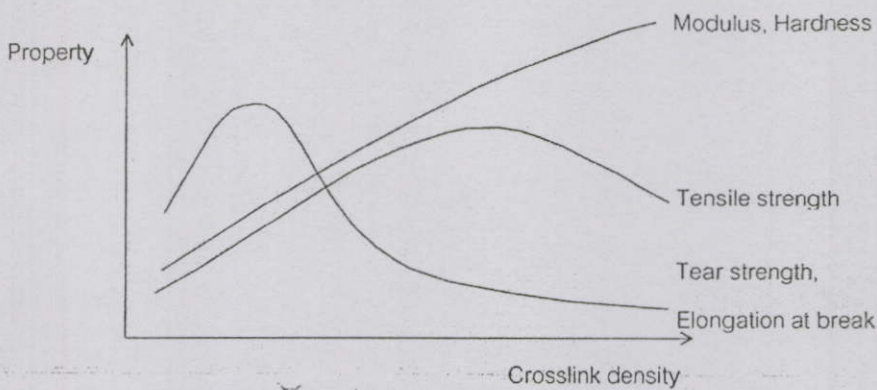
ตารางที่ 4.7 เวลาการแข็งตัวของเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	Set to touch time (min)	Dry hard time (min)
V1 (1:1:0)	35	55
V2 (1:1:0.5)	40	65
V3 (1:1:1)	45	75
R1 (1:1:0)	30	40
R2 (1:1:0.5)	40	65
R3 (1:1:1)	55	70

4.5 ผลของปริมาณ DEG และเกรดของ PET ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ UPRs

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเมื่อเกิดการเชื่อมโยง จะทำให้โครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [20] พบว่าสมบัติเชิงกลต่างๆของพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมเซตจะสัมพันธ์กับปริมาณการเชื่อมโยง หรือความหนาแน่นเชื่อมโยงของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า สมบัติความแข็งของวัสดุ เช่น โมดูลัส (Modulus) และความแข็งกด (Hardness) จะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากจำนวนพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น น้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยงลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ยากขึ้น ถูกพันธะเชื่อมโยงยึดเหนี่ยวไว้แต่สมบัติเชิงกลบางประการโดยเฉพาะสมบัติที่เกิดการแตกหัก (Fracture properties) เช่นความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) เพลอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง จากนั้นสมบัติเหล่านั้นจะลดลง เมื่อความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากก่อนถึงจุดสูงสุดพอลิเมอร์ยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นสายโซ่ตรงยังไม่เป็นร่างแหสามมิติ เมื่อให้แรงกับวัสดุ สายโซ่พอลิเมอร์ยังเคลื่อนที่ผ่านกันและหลุดออกจากกันได้ (Disentangle) โดยไม่เกิดการขาดของพันธะหรือสายโซ่โมเลกุลแต่เมื่อพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น เกิดจุดเชื่อมโยงกลายเป็นสายโซ่กิ่ง (Branches) มากขึ้น ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่หลุดออกจากกันยากขึ้นเมื่อได้รับแรง เป็นผลให้ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุสูงขึ้น และที่จุดสูงสุดเรียกว่า “จุดเกิดเจล” (Gel point) โครงสร้างโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-D Network) สมบูรณ์ วัสดุกลายเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่ได้อีกแล้ว หลังจุดสูงสุดสายโซ่ยึดเข้าด้วยกันในสามมิติด้วยพันธะเชื่อมโยง เมื่อวัสดุได้รับแรงสายโซ่โมเลกุลจะขาดออกเนื่องจากการทำลายพันธะเคมีโควาเลนต์ (Covalent bonds) ความแข็งแรงอันเนื่องจากการแตกหักของวัสดุหรือ Fracture strength จะ

ขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุในการ “เก็บ” (Store) และการ “กระจาย” (Dissipate) พลังงานที่ได้รับจากจากแรงกระทำภายนอก ผ่านออกในรูปการเคลื่อนไหวโมเลกุล (Molecular motions) เช่น การสั่น (Vibration) และการหมุน (Rotation) การกระจายพลังงานที่ได้รับ เปลี่ยนให้เป็นพลังงานในรูปอื่น เช่นพลังงานความร้อน (Heat) พลังงานเสียง (Sound) ฯลฯ และที่ความหนาแน่นเชื่อมโยงสูง สายโซ่เคลื่อนไหวอย่างจำกัด เนื่องจากเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น (Tight network) ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับเป็นผลให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำลง ทำให้แข็งแต่เปราะ (Brittle) แตกหักง่าย จะเห็นได้ว่า วัสดุต้องการความหนาแน่นเชื่อมโยงที่เหมาะสม (Optimum crosslink density) ไม่สูงหรือต่ำเกินไป นั่นคือ ต้องการความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงมากพอ เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ วัสดุมีเสถียรภาพของรูปร่าง ไม่เกิดการไหลเสียรูปร่าง และต้องการความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ไม่สูงเกินไปจนวัสดุเปราะ (Brittle) แตกหักง่าย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลกับความหนาแน่นเชื่อมโยง [19]

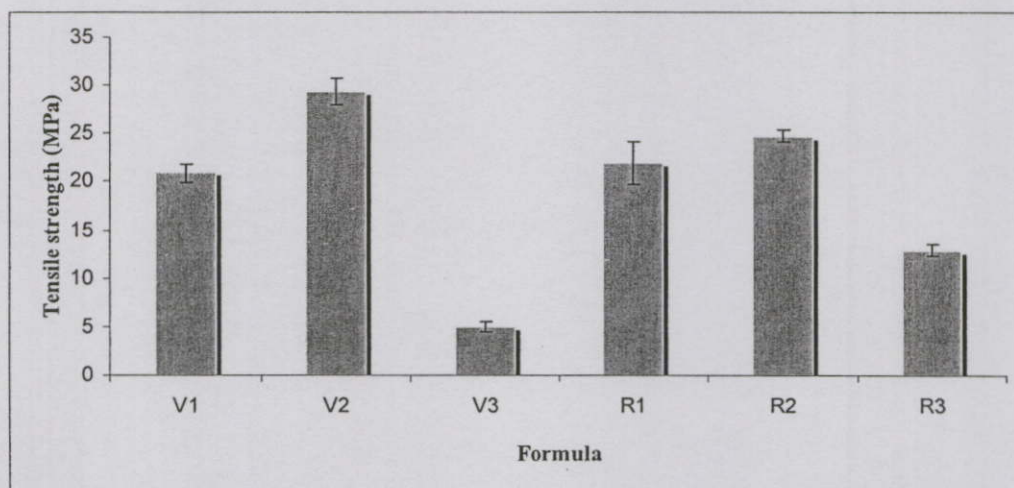
4.5.1 สมบัติความแข็งแรงดึง

จากรูปที่ 4.9 พบว่า เรซินที่มีการเติม DEG ค่า ความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าสูตรที่ไม่มี DEG ทั้งนี้เพราะ โครงสร้างของเรซินที่มี DEG มีจุดเชื่อมโยงห่างกัน โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อได้รับแรงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่มี DEG ที่จุดเชื่อมโยงอยู่ชิดกันมากกว่า ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ยากเมื่อได้รับแรง และอาจเป็นไปได้ที่สูตรที่ V2 และ R2 อาจเป็นจุดที่โครงสร้างโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-D Network) อย่างสมบูรณ์ หรือใกล้เคียง จึงส่งผลให้ ความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าสูตรที่ไม่มี DEG

เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้นในสูตร V3 และ R3 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสูตร V2 และ R2 เนื่องจากปริมาณ DEG ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เรซินเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ได้น้อยลง และสายโซ่ถูกยึดเข้าด้วยกันในสามมิติด้วยพันธะเชื่อมโยง เมื่อได้รับแรงกระทำทำให้สาย

โซ่หลุดออกจากกันได้ง่ายกว่าเนื่องจากการทำลายพันธะเคมี จึงทำให้ความแข็งแรงดิ่งน้อยลง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.8

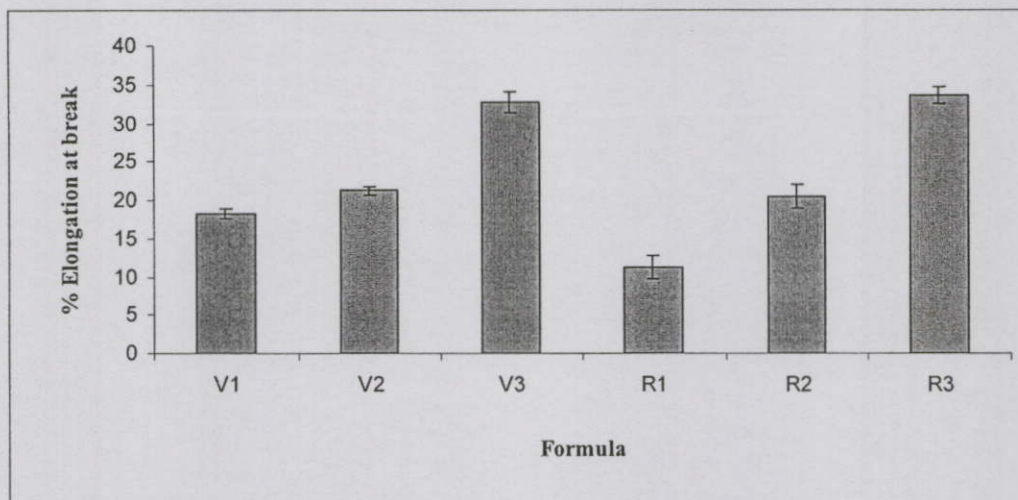
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชนิดของเรซินที่แตกต่างกันระหว่าง PET เกรดบริสุทธิ์ (V) และ เรซินที่ได้จากขวด PET ที่ใช้แล้ว (R) พบว่าค่าความแข็งแรงดิ่ง โดยรวมมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นในสูตร V3 และ R3 ที่ค่าความแข็งแรงดิ่งของสูตร R3 มีค่ามากกว่า V3 ซึ่งทั้งสองสูตรนี้เป็นสูตรที่มีปริมาณ DEG มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงคือความหนาแน่นเชื่อมโยงค่อนข้างต่ำ จึงมีความยากที่จะควบคุมในเรื่องของสมบัติบางประการของพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมได้



รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงดิ่งของเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อปริมาณของ DEG เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของ DEG ที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ตรงและยาว เมื่อเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่จึงทำให้ระยะห่างระหว่างพันธะคู่ ซึ่งเป็นจุดที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงนั้นระยะห่างมากกว่า EG และ PG ส่งผลให้โมเลกุลมีอิสระในการเคลื่อนที่ที่สูง จึงเคลื่อนที่ได้ง่าย ส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้นเมื่อปริมาณของ DEG เพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

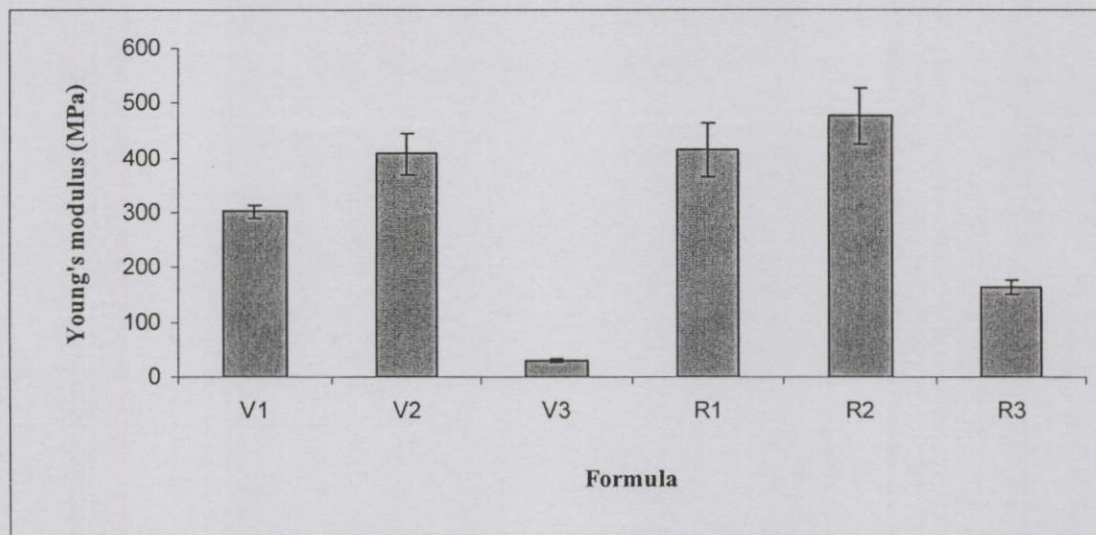


รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

จากรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาปริมาณ DEG ในสูตรต่างๆพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ DEG (สูตร V2 และ R2) ค่ามอดูลัสของยังจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งสูตรนี้อาจเกิดการเชื่อมโยงที่ตึกกว่าสูตร V1 และ R1 จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มมากขึ้นอีกจะทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง เนื่องจากโครงสร้างของ DEG ที่ระยะห่างของพันธะคู่ห่างกันมากจึงมีความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยลงจึงส่งผลให้โมเลกุลภายในสายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เมื่อได้รับแรงเพียงเล็กน้อยก็ทำให้ชิ้นงานสามารถเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ง่าย จึงทำให้มีค่ามอดูลัสของยังลดลง

เมื่อเปรียบเทียบ PET เกรดบริสุทธิ์ และ PET จากขวดที่ใช้แล้วพบว่าเรซินจากขวด PET ที่ใช้แล้วให้ค่ามอดูลัสของยังโดยรวมไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นในสูตร V3 และ R3 ที่ค่ามอดูลัสของยังสูตร R3 มีค่ามากกว่า V3 ซึ่งทั้งสองสูตรนี้เป็นสูตรที่มีปริมาณ DEG มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงคือความหนาแน่นเชื่อมโยงค่อนข้างต่ำ จึงมีความยากที่จะควบคุมในเรื่องของสมบัติบางประการของพอลิเอสเทอร์เรซินที่เตรียมได้เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

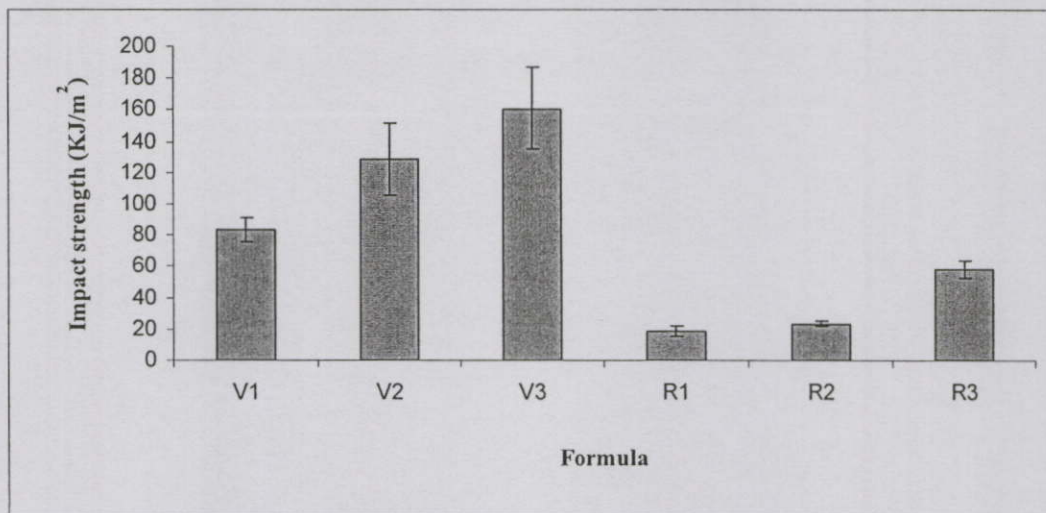


รูปที่ 4.11 มอดุลัสของยังของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

จากรูปที่ 4.12 เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำ จึงสามารถที่จะรับแรงได้มากขึ้น บ่งบอกว่าชิ้นงานมีความเหนียวและแข็งแรงมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานเรซินที่สังเคราะห์จาก PET เกรดบริสุทธิ์ และขวด PET ที่ใช้แล้ว พบว่าชิ้นงานเรซินจาก PET เกรดบริสุทธิ์ มีค่าความแข็งแรงกระแทกมากกว่า ขวด PET ที่ใช้แล้ว อาจเนื่องจากขวด PET ที่ใช้แล้วมีสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า PET เกรดบริสุทธิ์ เพราะมีการผ่านความร้อนในการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันอาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างตามไปด้วยการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลไม่สม่ำเสมอส่งผลถึงรูปแบบที่เกิดจากการเชื่อมโยงค่อนข้างหลากหลายกว่า และอาจเป็นสาเหตุให้มีจุดอ่อนในชิ้นงานทำให้ชิ้นงานที่เตรียมได้มีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงตรงจุดนี้ส่งผลให้ด้านทานแรงกระทำได้น้อยลงเมื่อเทียบกับเรซินที่สังเคราะห์จาก PET เกรดบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

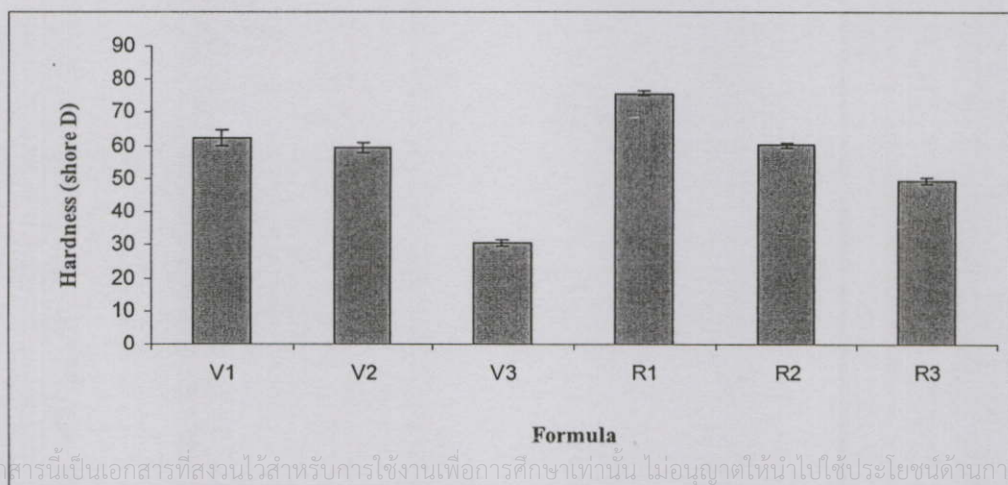


รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงกระแทกของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อม โยง BPO/DMA

4.5.2 สมบัติความแข็งกด (Hardness)

สมบัติความแข็งกด คือ ความต้านทานของวัสดุหนึ่งๆ ในการให้แรงกดบนผิวของวัสดุให้ยุบตัวแต่ไม่ทะลุ ภายใต้สภาวะการทดสอบหนึ่งๆ พบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของ DEG ทำให้จุดที่เกิดการเชื่อมโยงอยู่ห่างกันและความหนาแน่นของการเชื่อม โยงลดลง จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความนิ่มมากขึ้น เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.13

เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้นความแข็งกดมีค่าลดลงเพราะชิ้นงานมีความนิ่มเพิ่มขึ้น เหตุผลจากการเชื่อม โยงดังกล่าวข้างต้น และเมื่อเปรียบเทียบกับเกรด PET พบว่าเรซินที่สังเคราะห์จากขวด PET ที่ใช้แล้วมีค่าความแข็งกดมากกว่าเรซินที่สังเคราะห์จาก PET เกรดบริสุทธิ์เล็กน้อย



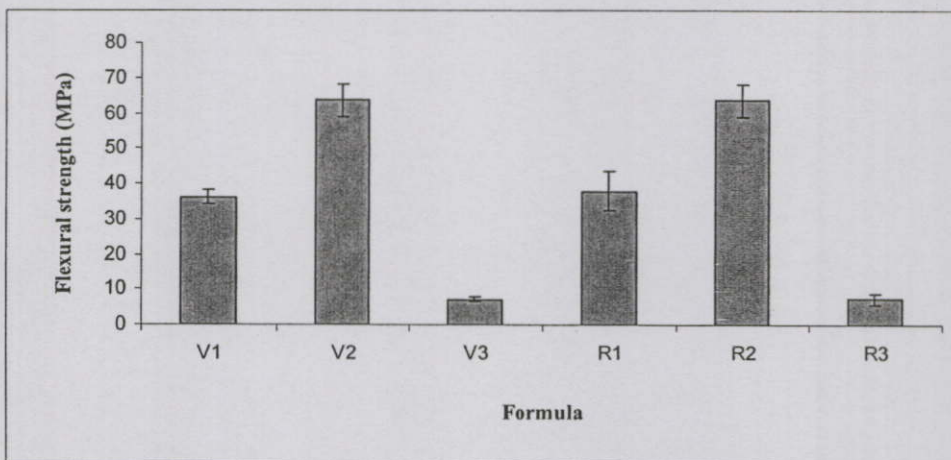
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 ความแข็งกดของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อม โยง BPO/DMA

4.5.3 สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ

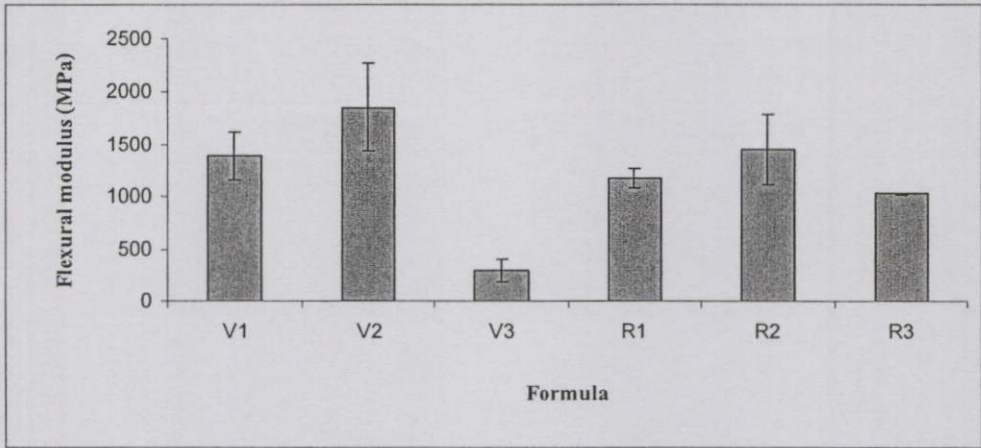
สมบัติความแข็งแรงโค้งงอนับว่าเป็นค่าที่จำเป็นมากที่จะได้ทราบว่าวัสดุสามารถรับแรงได้มากน้อยเพียงใด เพราะในการใช้งานวัสดุจะถูกทำให้โค้งงอ ในการทดลองนี้ใช้เทคนิคการโค้งงอ 3 จุด (Three-point bending) จากการทดลองพบว่าเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกด ชิ้นงานที่มีปริมาณ DEG จะสามารถรับแรงกดได้มากขึ้นเหมือนกับสมบัติความแข็งแรงดึงคือ เมื่อพิจารณาสูตรที่มี DEG (V2 และ R2) อาจเป็นจุดที่โครงสร้างโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติอย่างสมบูรณ์ หรือใกล้เคียง จึงทำให้ความแข็งแรงโค้งงอมีค่ามากขึ้น และเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น (V3 และ R3) เรซินเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ได้น้อยลง เมื่อได้รับแรงกดทำให้สายโซ่เคลื่อนไหว และหลุดออกจากกันได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ซึ่งมีความสอดคล้องกับความแข็งแรงดึง

เมื่อเปรียบเทียบเกรดของ PET พบว่าเรซินที่สังเคราะห์จากขวด PET และเรซินที่สังเคราะห์จาก PET บริสุทธิ์ให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นมอดูลัสโค้งงอสูตร R3 มีค่ามากกว่า V3 ซึ่งทั้งสองสูตรนี้เป็นสูตรที่มีปริมาณ DEG มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาแน่นเชื่อมโยงคือความหนาแน่นเชื่อมโยงค่อนข้างต่ำ จึงมีความยากที่จะควบคุมในเรื่องของสมบัติบางประการของพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมได้ ซึ่งผลจะสอดคล้องกับสมบัติความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4.14 ความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 มอดุลัส โค้งงอของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อม โยง BPO/DMA

4.5.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเรซินที่เตรียมได้กับเรซินเกรดการค้า

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติบางประการของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ได้กับเรซินเกรดการค้าจึงนำสมบัติเชิงกลบางประการของเรซินเกรดการค้าของบริษัท Dow chemical เกรดการค้า A ที่มีการเชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA เหมือนกันมาแสดงดังตารางที่ 4.8 ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสูตร R2 มาเปรียบเทียบกับเรซินเกรดการค้าเพราะในสูตรที่ R2 เป็นสูตรที่ใช้ขวดน้ำดีมี PET ในการสังเคราะห์ และมีปริมาณ DEG ในสูตรซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ในงานวิจัยที่ต้องการพิจารณาผลของ DEG และ ผลของขวดน้ำดีมี PET และจากสมบัติเชิงกลข้างต้น สูตรที่มีอัตราส่วน EG: PG:DEG ที่ 1:1:0.5 น่าจะเป็นจุดที่เกิดการเชื่อม โยงสมบูรณ์ที่สุดหรือใกล้เคียงจึงเลือกสูตรนี้มาเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงดึง, ความแข็งกด, มอดุลัส โค้งงอ และ ความแข็งแรง โค้งงอของเรซินทางการค้ามีค่ามากกว่าเรซินสูตร R2 ซึ่งอาจเกิดจากผลของ DEG ที่ใช้ในสูตรนี้ ซึ่งเมื่อมีปริมาณ DEG จะมีผลต่อความหนาแน่นเชื่อม โยงดังที่กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้ค่าต่างๆเหล่านี้ลดลงต่ำกว่าเรซินเกรดการค้าและอาจกล่าวได้ว่าเรซินสูตร R2 นี้มีนิ่มขึ้นและมีความแข็งแรงน้อยกว่าเรซินเกรดการค้า ส่วนค่า เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัสของยัง และ ความแข็งแรงกระแทก ของเรซินสูตร R2 มีค่ามากกว่าเรซินเกรดการค้าก็น่าจะเป็นผลจากปริมาณ DEG เช่นกันที่ระยะเกิดการเชื่อม โยงห่างกัน ทำให้มีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น บ่งบอกว่าชิ้นงานมีความเหนียวและแข็งแรงมากกว่าเรซินเกรดการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 สมบัติของ UPRs ทางการค้าเทียบกับเรซินสูตร R2

สมบัติเชิงกล	เรซินทางการค้า	เรซินสูตร R2
Tensile strength (MPa)	51	34
%Elongation at break	14	20
Modulus (MPa)	190	477
Hardness (Shore D)	78	60
Impact strength (KJ/m ²)	2	23
Flexural modulus (MPa)	2100	1500
Flexural strength (MPa)	95	43

4.6 ผลของปริมาณ DEG ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน

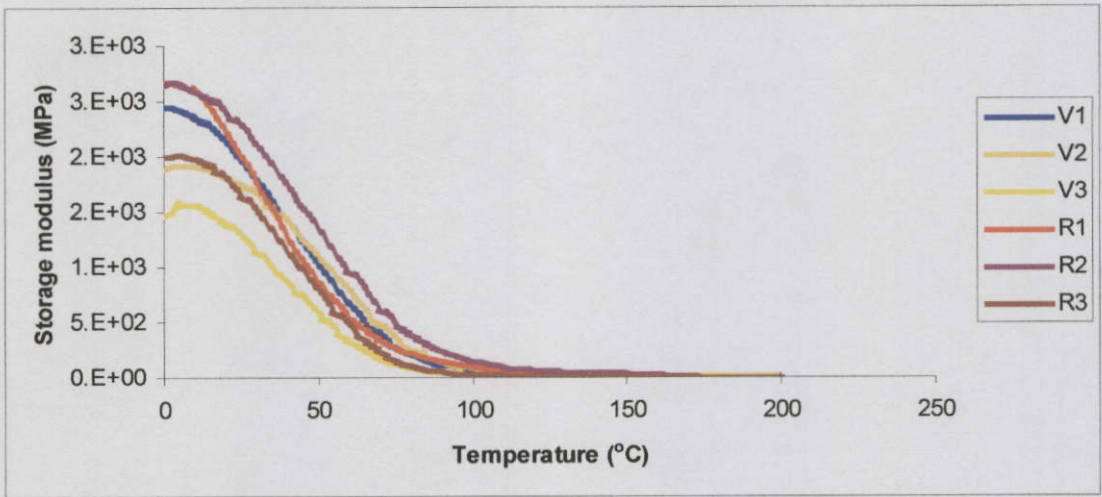
สมบัติของพอลิเมอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จึงทำการทดสอบโดยให้แรงและอุณหภูมิในเวลาเดียวกัน ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)

4.6.1 ค่ามอดุลัสสะสมของชิ้นงาน

ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) หรือ (E') เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานที่เก็บสะสมไว้เมื่อมีการให้แรงสั่นเป็นจังหวะ หรือแรงแบบไดนามิกส์ เมื่อได้รับแรงหน่วยนี้จะเก็บพลังงานที่ได้รับเอาไว้และจะปล่อยพลังงานออกมาเมื่อไม่ได้รับแรง ซึ่งมอดุลัสสะสมเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าค่า มอดุลัสสะสม มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิเอสเทอร์เรซินมีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ต่ำกว่าสูตรที่ไม่มี DEG สายโซ่โมเลกุลจะหลุดออกจากกันได้ง่ายกว่า จึงทำให้สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ

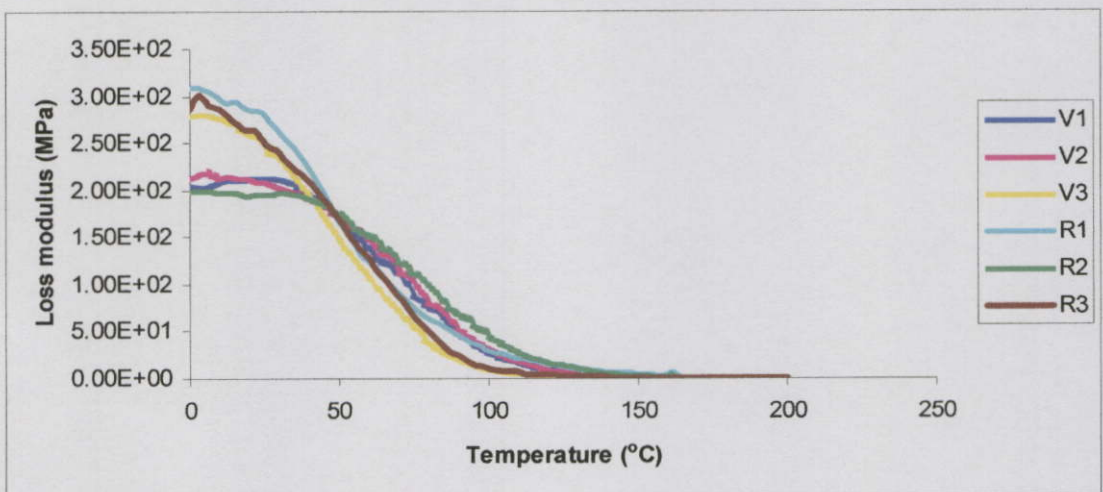
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 มอดุลัสสะสมของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

4.6.2 มอดุลัสสูญเสียของชิ้นงาน

มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) หรือ (E'') เปรียบเสมือนหน่วยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อน เสียง จากรูปที่ 4.17 เห็นได้ว่าค่า มอดุลัสสูญเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น เพราะ DEG ทำให้ชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินที่เตรียมได้เกิดการเชื่อมโยงที่ค่อนข้างต่ำ สายโซ่โมเลกุลไม่ได้เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติอย่างสมบูรณ์จึงสามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ จึงส่งผลให้มีค่ามอดุลัสสูญเสียที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งแรงกระแทกในสมบัติเชิงกลข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ทำการตีพิมพ์ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และตั้งชื่อเชิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 มอดุลัสสูญเสียของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

4.6.3 tan_delta

tan_delta เป็นอัตราส่วนของมอดูลัสสูญเสียกับมอดูลัสสะสม (E''/E') โดยที่อุณหภูมิสูงสุดจะบอกถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มมากขึ้นค่า T_g จะลดลง แสดงว่าชิ้นงานในสูตรที่ V1, V2, R1 และ R2 มีการเชื่อมโยงได้ดีเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหตาข่ายที่มีความแข็งแรง และจากโครงสร้างที่มีพันธะคู่อยู่ใกล้กันส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลมีความใกล้ชิดกันมาก ทำให้สายโซ่มีการเคลื่อนที่ได้ยาก จึงต้องใช้อุณหภูมิก่อนข้างสูงในการทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้ส่วนในสูตร V3 และ R3 ชิ้นงานมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงก่อนข้างต่ำส่งผลให้โมเลกุลมีความหนาแน่นของสายโซ่ลดลง เมื่อได้รับแรงก็สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าจึงมีค่า T_g ต่ำกว่า สูตรที่ V1, V2, R1 และ R2

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชนิดของเรซินที่แตกต่างกันระหว่าง PET เกรดบริสุทธิ์ กับเรซินที่ได้จากขวด PET ที่ใช้แล้ว พบว่าชิ้นงานเรซินที่ได้จากขวด PET ที่ใช้แล้วมีค่า T_g ต่ำกว่าเล็กน้อยดังตารางที่ 4.9 อาจมีผลเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ค่อนข้างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอของ PET เกรดบริสุทธิ์ เมื่อเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ทำให้ความหนาแน่นของสายโซ่พอลิเมอร์มีมากกว่า ขวด PET ที่ใช้แล้ว จึงทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น หรือการเคลื่อนที่ได้ยากกว่า ส่วนขวด PET ที่มีการกระจายตัวของโมเลกุลที่หลากหลายไม่ค่อยสม่ำเสมอ จึงมีความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อย สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าจึงส่งผลให้ T_g มีค่าต่ำกว่าเรซินที่สังเคราะห์จาก PET เกรดบริสุทธิ์

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า T_g ของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	T_g (°C)
V1 (1:1:0)	98
V2 (1:1:0.5)	98
V3 (1:1:1)	66
R1 (1:1:0)	84
R2 (1:1:0.5)	84
R3 (1:1:1)	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.4 อุณหภูมิด้านการบิดงอของชิ้นงานเรซิน

การนำพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวไปใช้งาน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างคืออุณหภูมิด้านการบิดงอของชิ้นงาน ในการทดลองนี้จึงมีการวัดอุณหภูมิด้านการบิดงอของชิ้นงานเรซิน โดยใช้เทคนิค Heat Deflection Temperature (HDT) ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.10 จะเห็นว่า เมื่อมีการปรับเติม DEG เข้าไป เรซินที่ได้มีอุณหภูมิด้านการบิดงอได้ดีขึ้นกว่าสูตรที่ไม่มี DEG เล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณ DEG มากขึ้น ไม่สามารถตรวจวัดได้เพราะชิ้นงานนึ้มนเกินไป

เมื่อเปรียบเทียบเกรดของ PET ที่ใช้สังเคราะห์เรซินพบว่า PET เกรดบริสุทธิ์มีอุณหภูมิด้านการบิดงอมากกว่าขวด PET ที่ใช้แล้วเล็กน้อย เพราะเรซินจากขวด PET ที่ใช้แล้วอาจมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง ทำให้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้รูปแบบที่เกิดจากการเชื่อมโยงค่อนข้างหลากหลาย อาจเป็นสาเหตุเกิดจุดอ่อนในชิ้นงาน เมื่อมีแรงกดตรงจุดนี้จึงทำให้มีค่าต่ำ

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิด้านการบิดงอของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	HDT (°C)
V1 (1:1:0)	44.5 ± 0.7
V2 (1:1:0.5)	48.0 ± 0.7
V3 (1:1:1)	-
R1 (1:1:0)	43.5 ± 0.0
R2 (1:1:0.5)	45.0 ± 0.0
R3 (1:1:1)	-

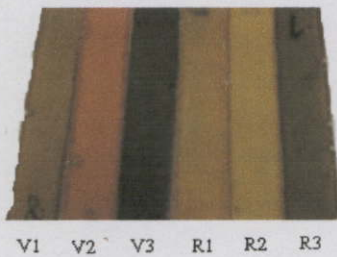
4.7 การเชื่อมโยง

ในการใช้งานเรซินในเชิงอุตสาหกรรม มีการใช้ระบบระบบเชื่อมโยงเป็นแบบรีดอกซ์ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) กับไดเมทิลแอนนิลีน (Dimethyl aniline, DMA) และเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl ethyl ketone peroxide, MEKP) กับโคบอลต์แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate, Co) ดังนั้นในการทดลองจึงนำระบบเชื่อมโยงทั้ง 2 กลุ่มมาใช้ในการขึ้นรูป เรซินโดยไม่ได้เปรียบเทียบความสามารถของระบบทั้งสองระบบเชื่อมโยง แต่เพื่อเป็นแนวทางที่จะได้เลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานในด้านอุตสาหกรรม เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และไดเมทิลแอนนิลีน เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการให้มีโลหะหนักตกค้างในชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับร่างกาย เช่น ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส แต่ถ้าเป็นชิ้นงานที่ต้องการความใส

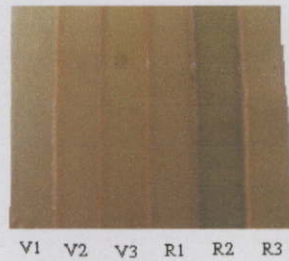
ของชิ้นงานก็เลือกใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์และโคบอลต์แนฟทีเนท เป็นระบบเชื่อมโยง เช่น กรอบรูปวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

4.7.1 สีของชิ้นงานเรซิน

สีของชิ้นงานที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปด้วย MEKP/Co เป็นชิ้นงานที่ค่อนข้างโปร่งใสมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย BPO/DMA และมีสีน้ำตาลในระดับสีที่ใกล้เคียงกันมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย BPO/DMA และสามารถอ่านค่าสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ได้ผลดังตารางที่ 4.11 พบว่าชิ้นงานเรซินมีสีเหลืองปนแดงซึ่งก็คือสีน้ำตาลในขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย BPO/DMA อ่านค่าสีออกไปทางสีเหลืองเป็นผลเนื่องมาจากสีของตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาซึ่ง DMA มีสีเหลืองเข้มเมื่อใส่ในเรซินจึงทำให้เรซินมีโทนสีเหลืองและ BPO มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีขาวจึงทำให้เรซินที่บ่มแสงไม่โปร่งใส ในขณะที่เรซินที่ขึ้นรูปด้วย MEKP/Co จะโปร่งใสเพราะ MEKP ใสจึงไม่มีผลต่อสีของชิ้นงานเรซิน



BPO กับ DMA



MEKP กับ Cobalt naphthenate

รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบสีของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วย BPO กับ DMA และ MEKP กับ Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบการวัดสีของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบ BPO/DMA และ ระบบ MEKP/Co

สูตรการ สังเคราะห์	L*		a*		b*	
	BPO/DMA	MEKP/Co	BPO/DMA	MEKP/Co	BPO/DMA	MEKP/Co
V1 (1:1:0)	27.72	27.26	4.24	2.05	16.96	9.75
V2 (1:1:0.5)	32.22	27.8	10.41	3.13	15.76	11.41
V3 (1:1:1)	25.77	29.72	0.98	2.45	8.19	14.72
R1 (1:1:0)	20.43	26.74	3.19	3.77	15.24	13.17
R2 (1:1:0.5)	28.84	25.8	0.59	2.93	16.14	13.12
R3 (1:1:1)	26.55	25.47	0.98	3.09	11.26	13.27

4.7.2 เวลาการแข็งตัวของเรซิน

จากตารางที่ 4.12 แสดงเวลาในการแข็งตัวของเรซิน โดยเปรียบเทียบระบบเชื่อมโยงระหว่าง BPO/DMA และ MEKP/Co จะเห็นว่าระบบเชื่อมโยง BPO/DMA จะใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยกว่า ที่ใช้ระบบเชื่อมโยง MEKP/Co อยู่เล็กน้อย อย่างไรก็ตามทั้งสองระบบเชื่อมโยง (BPO/DMA และ MEKP/Co) สามารถใช้เป็นระบบเชื่อมโยงในการขึ้นรูปเรซินได้ในเวลาที่ต้องการทั้งคู่และสามารถใช้งานจริงในด้านอุตสาหกรรมได้ทั้งคู่เช่นกัน

ตารางที่ 4.12 เวลาการแข็งตัวของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	Set to touch time (min)		Dry hard time (min)	
	BPO/DMA	MEKP/Co	BPO/DMA	MEKP/Co
V1 (1:1:0)	35	50	55	60
V2 (1:1:0.5)	40	55	65	70
V3 (1:1:1)	45	65	75	75
R1 (1:1:0)	30	50	40	65
R2 (1:1:0.5)	40	60	65	70
R3 (1:1:1)	55	60	70	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3 การหดตัวของชิ้นงานเรซิน

จากการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วย BPO/DMA และเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วย MEKP/Co แสดงดังตารางที่ 4.13 ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน คือ ไม่ว่าจะเลือกใช้ระบบเชื่อมโยงไหนก็ให้ผลไม่ต่างกัน

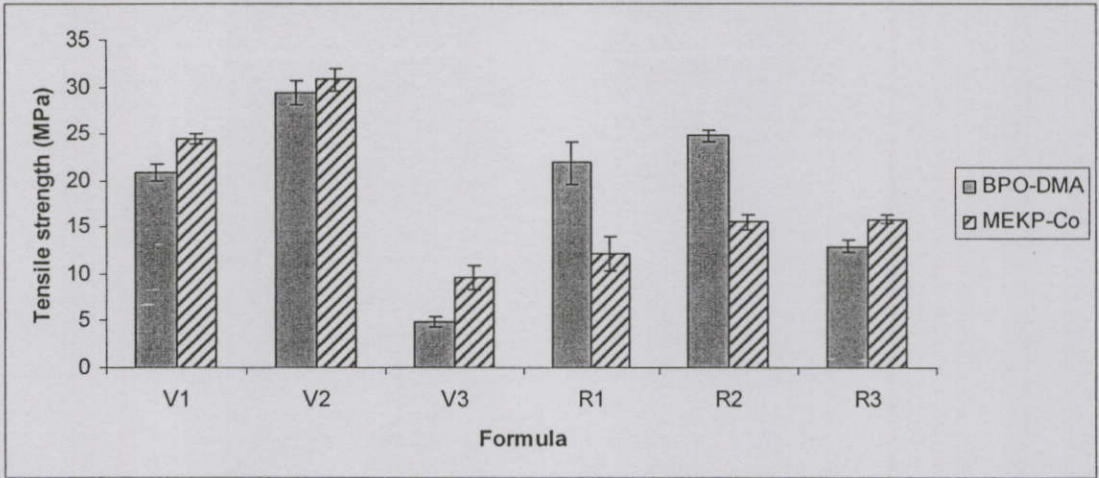
ตารางที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

สูตรการสังเคราะห์ (EG:PG:DEG)	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานที่ ขึ้นรูปด้วย BPO/DMA	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานที่ ขึ้นรูปด้วย MEKP/Co
V1 (1:1:0)	113 ± 0.5	114 ± 0.5
V2 (1:1:0.5)	114 ± 0.5	114 ± 0.5
V3 (1:1:1)	125 ± 0.5	117 ± 0.4
R1 (1:1:0)	115 ± 0.5	115 ± 0.5
R2 (1:1:0.5)	115 ± 0.5	115 ± 0.5
R3 (1:1:1)	116 ± 0.5	116 ± 0.5

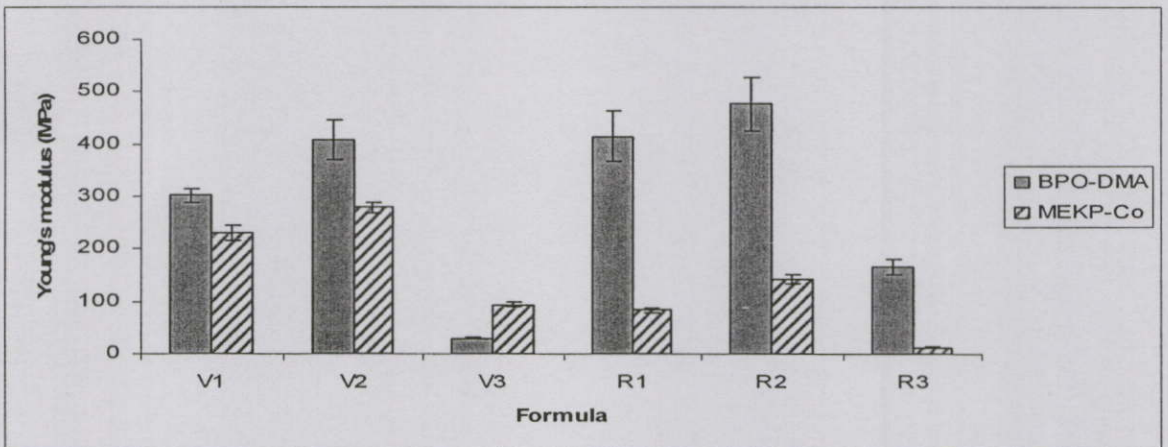
4.7.4 ผลของระบบเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติเชิงกล

ในการเปรียบเทียบนี้เนื่องจากระบบเชื่อมโยงทั้ง 2 ชนิดจะไม่สามารถควบคุมในห้องปฏิบัติการเชื่อมโยงเทียบเท่ากันได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเรซินที่เชื่อมโยงทั้ง 2 ชนิดได้โดยตรง แต่ในงานวิจัยนี้ทำการเชื่อมโยงเรซินด้วยระบบเชื่อมโยงทั้ง 2 ชนิด เพื่อที่จะดูแนวโน้มและความเป็นไปได้ในการใช้ระบบเชื่อมโยงทั้ง 2 ชนิดกับเรซินที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ MEKP/Co ในการเชื่อมโยงเรซิน สมบัติเชิงกลบางประการมีค่าเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับการใช้ BPO/DMA เป็นระบบเชื่อมโยงกล่าวคือ ความแข็งแรงดึง, โมดูลัสของยัง, โมดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มขึ้นในอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:0.5 แต่จะลดลงในอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:1 เหมือนกัน และเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดและความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงลดลงเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น และมีสมบัติบางประการที่ค่อนข้างชัดเจนคือค่าโมดูลัสของยัง และเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ระบบเชื่อมโยงเป็น BPO/DMA จะมีค่าที่ค่อนข้างสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย MEKP/Co แต่ค่าความแข็งแรง, ความแข็งแรงกระแทกและโมดูลัสโค้งงอของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ระบบเชื่อมโยงเป็น BPO/DMA จะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย MEKP/Co แสดงในรูปที่ 4.19-4.25

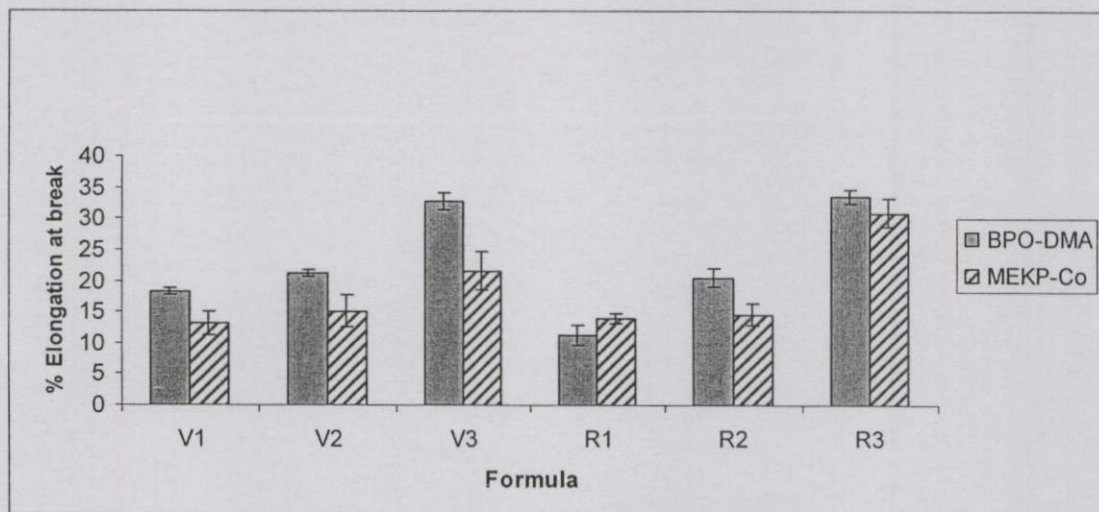


รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

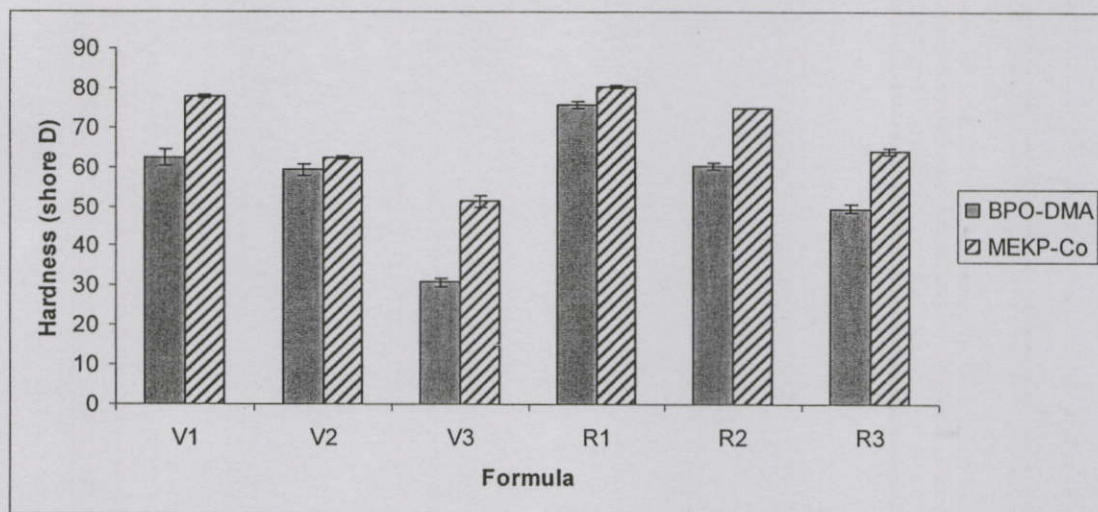


รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

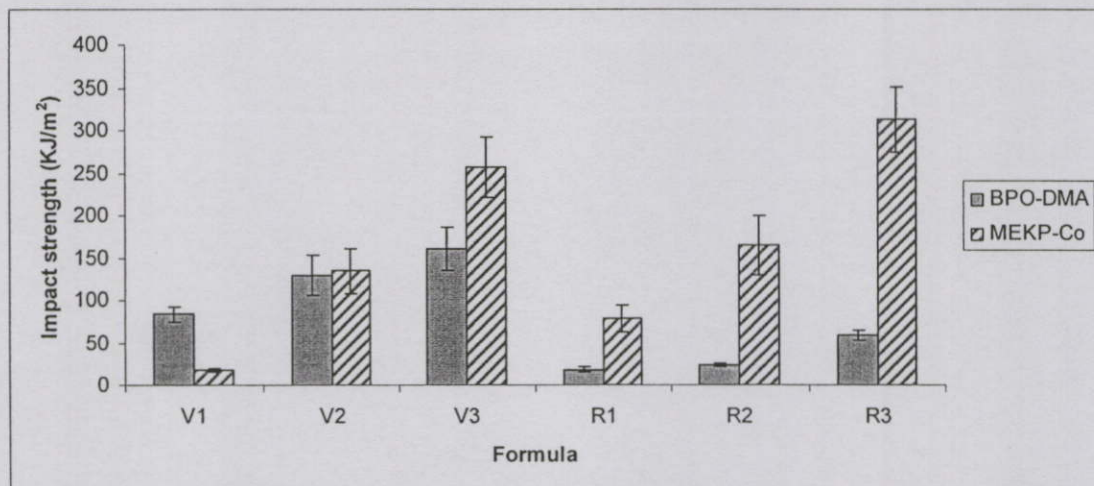


รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

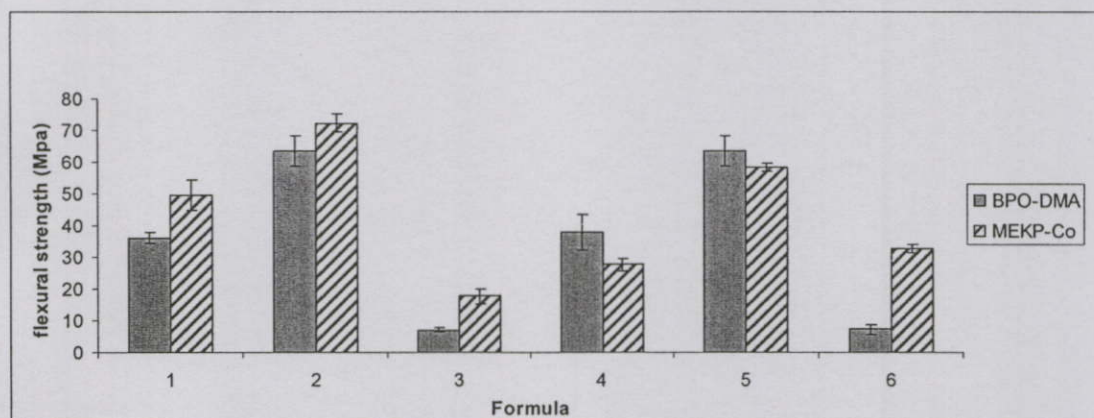


รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าความแข็งกดของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

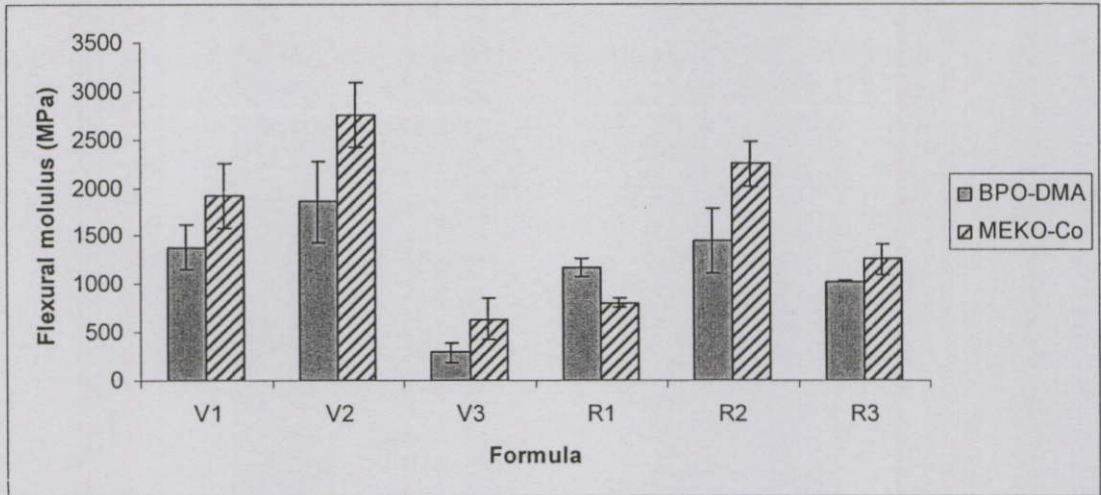


รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกระแทกของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบมอดุลัสโค้งงอของชิ้นงานเรซินที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

4.7.5 สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานเรซิน

ค่า T_g ของชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปโดยใช้ MEKP/Co เป็นระบบเชื่อมโยงมีค่าเป็นไปในแนวเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเรซินที่ขึ้นรูปด้วย BPO/DMA กล่าวคือสูตรที่มีอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:0.5 จะมีค่า T_g ที่เท่ากัน แต่จะลดลงในอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:1 แต่เมื่อเทียบเกรดของ PET พบว่า ชิ้นงานที่ใช้ MEKP/Co เป็นระบบเชื่อมโยงเรซินที่สังเคราะห์จาก PET เกรดบริสุทธิ์ มีค่า T_g ใกล้เคียงกันกับเรซินที่สังเคราะห์จากขวด PET ที่ใช้แล้ว

ตารางที่ 4.14 ค่า T_g ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA และระบบ MEKP/Co

สูตรการสังเคราะห์	T_g (°C)	
	BPO/DMA	MEKP/Co
V1 (1:1:0)	98	94
V2 (1:1:0.5)	98	94
V3 (1:1:1)	66	82
R1 (1:1:0)	84	97
R2 (1:1:0.5)	84	97
R3 (1:1:1)	66	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบอุณหภูมิด้านการบิดงอด้วยเทคนิค HDT มีค่า HDT เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณ DEG เพิ่มมากขึ้นชิ้นงานมีความนิ่มเกินไป จึงไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ ซึ่งผลเป็นไปในแนวกันทั้งการใช้ระบบเชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA และระบบ MEKP/ Co

ตารางที่ 4.15 ค่า HDT ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบเชื่อมโยง BPO/DMA และระบบ MEKP/ Co

สูตรการสังเคราะห์	HDT (°C)	
	BPO/DMA	MEKP/Co
V1 (1:1:0)	44.5 ± 0.7	51.2 ± 1.8
V2 (1:1:0.5)	48.0 ± 0.7	54.5 ± 0.7
V3 (1:1:1)	-	-
R1 (1:1:0)	43.5 ± 0.0	45.5 ± 0.7
R2 (1:1:0.5)	45.0 ± 0.0	53.5 ± 0.7
R3 (1:1:1)	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การดีพอลิเมอไรซ์ PET ด้วย EG, PG และ DEG โดยใช้ซิงค์อะซิเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทำการทดลองนี้มีการใช้ปริมาณ DEG ที่แตกต่างกันและใช้ PET สองเกรดคือ PET เกรดบริสุทธิ์ และ PET จากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว โดยควบคุมให้มีค่า Hydroxyl value ใกล้เคียงกัน (356-397 mgKOH/g) จะได้ผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด (Paste) สีขาวขุ่นและเมื่อนำผลิตภัณฑ์โกลโคไลซิสที่ได้นี้มาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะได้พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใส มีความหนืดใกล้เคียงกันทุกสูตร เมื่อนำพอลิเอสเตอร์เรซินที่ได้มาขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเวลาการเกิดเจล (Gel-time) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น และอยู่ในช่วง 30-70 นาที จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลบางประการของเรซิน ได้แก่ ความแข็งแรงดึง, โมดูลัสของยัง, โมดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มขึ้นในอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:0.5 แต่จะลดลงในอัตราส่วน EG:PG:DEG ที่ 1:1:1 ส่วนเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงลดลง ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า T_g มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ DEG เพิ่มขึ้น อุณหภูมิด้านทานการบิดงอ (HDT) ของเรซินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ DEG เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง PET เกรดบริสุทธิ์ และ PET จากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วพบว่าเวลาในการขึ้นรูปมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความโค้งงอ และเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาด โดยรวมมีค่าไม่ต่างกัน แต่ค่าความแข็งแรงกระแทกของชิ้นงานเรซินที่ได้จาก PET เกรดบริสุทธิ์มีค่ามากกว่า เรซินจากขวด PET ที่ใช้แล้ว ส่วนค่าความแข็งแรง ค่าโมดูลัสของยังของชิ้นงานเรซินที่สังเคราะห์จากขวด PET ที่ใช้แล้วมีค่ามากกว่าเรซินที่สังเคราะห์จาก PET เกรดบริสุทธิ์เล็กน้อย เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนพบว่า ค่า T_g และค่า HDT ของเรซินที่สังเคราะห์จาก PET เกรดบริสุทธิ์มีค่ามากกว่าเรซินที่สังเคราะห์จากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

เมื่อใช้ MEKP กับ Cobalt naphthenate ในการเชื่อมโยงเรซิน สมบัติเชิงกลที่ได้จะมีแนวโน้มดีขึ้นกับการใช้ BPO กับ DMA เป็นสารเชื่อมโยง และเมื่อเปรียบเทียบสีของชิ้นงานที่ใช้ MEKP กับ Cobalt naphthenate ในการเชื่อมโยงสีของชิ้นงานค่อนข้างโปร่งใสกว่าการใช้ BPO กับ DMA เป็นสารเชื่อมโยง ส่วนเวลาในการเชื่อมโยงชิ้นงานที่ใช้ MEKP กับ Cobalt naphthenate ใช้เวลานานกว่าที่ใช้ BPO กับ DMA เป็นสารเชื่อมโยง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BPO กับ DMA เป็นสารเชื่อมโยงเล็กน้อย จึงเป็นไปได้ที่จะเลือกใช้สารเชื่อมโยงทั้ง 2 ชนิดในการขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินให้เหมาะกับงาน และเลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละสูตรให้เหมาะสมกับลักษณะงานด้านต่างๆ เช่น งานด้านวัสดุคอมโพสิต วัสดุเคลือบผิว เป็นต้น และสามารถใช้ได้จริงในเชิงอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สังเคราะห์เรซินให้ได้ปริมาณมากและทำการทดสอบการใช้งานจริง เช่น คอมโพสิตเส้นใยแก้วหรือกรอบรูปวิทยาศาสตร์ ฯลฯ
2. ทดสอบสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความเป็นฉนวนไฟฟ้า ความสามารถในการเปียก (Wettability) ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Oxinet.Ltd. **Plastic water bottles should no longer be a wasted resource**, 2006
[online]. Available : <http://www.earthscan.co.uk/?tabid=3269>.
- [2] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **ขวด PET คืออะไร**, 2548 [online]. Available:
<http://funscience.gistda.or.th/. 2548>.
- [3] นฤมล เครื่ององอาจนุกูล การเตรียมเรซินหน่วงการติดไฟจากขวด poly(ethylene terephthalate) ที่ใช้แล้ว งานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2545
- [4] ปณิศา การสมวรรณ และคณะ การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินจากขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้แล้วสำหรับงานคอมโพสิต โครงการพิเศษปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547
- [5] ปิยะฉัตร กวานันท์ และสกุลรัตน์ ชัยสกุล การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้แล้ว โครงการพิเศษปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543
- [6] D. Paszun and T. Spychaj “Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate)”
Journals of Industrial & Engineering Chemistry Research vol.36, 1997.
pp. 1373-1383
- [7] Nexant, Inc. **Polyethylene Terephthalate (PET)**, 2008. [online]. Available:
http://nexant.ecnext.com/coms2/summary_0255-809_ITM.
- [8] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์ เครื่องประดับ หจก. ป. สัมพันธ์พาณิชย์. กรุงเทพฯ. 2540
- [9] Siam fiberglass co.,Ltd. **ไฟเบอร์กลาส**. [online]. Available:
<http://members.thai.net/futurefiber/product/fiberglass.html>
- [10] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ. **เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS) glycol**, 2549 [online]. Available
http://msds.pcd.go.th/view_search_name.asp?vName=glycol.
- [11] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ. **เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS) Maleic anhydride**, 2549 [online]. Available :

เอกสารนี้เป็น <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=159>. อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] G.P.Karayannidis, D.S. Achilias, I.D. Sideridou and D.N. Bikiaris, "Alkyd resins derived from glycolized waste poly(ethylene terephthalate)", **European Polymer Journal**, vol.41, 2005. pp. 201-210
- [13] D.J. Suh, O.O. Park and K.H. Yoon, "The properties of unsaturated polyester based on the glycolized poly(ethylene terephthalate) with various glycol compositions", **Polymer**, vol. 41, 2000. pp. 461-466
- [14] G. Xi, M. Lu and C. Sun, "Study on depolymerization of waste polyethylene terephthalate into monomer of bis(2-hydroxyethyl terephthalate)", **Polymer Degradation and Stability**, vol.87, 2005. pp. 117-120
- [15] U.R. Vaidya and V.M. Nadkarni, "Unsaturated Polyester Resins from Poly(ethylene terephthalate) Waste. 1. Synthesis and Characterization", **Journals of Industrial & Engineering Chemistry Research**, vol.26, 1987. pp. 194-198
- [16] J.Y. Chen, C.F. Ou, Y.C. Hu and C.C. Lin, "Depolymerization of Poly (Ethylene Terephthalate) Resin Under Pressure", **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 42, 1991. pp. 1501-1507
- [17] S. Ballga and W.T. Wong, "Depolymerization of Poly(ethyleneTerephthalate)Rycycled form Post-Consumer Soft-Drink Bottles" **Journal of Polymer Science:Part A:Polymer chemistry**, vol.27, 1989. pp. 2071-2082
- [18] Ph. Radenkov, M. Radenkov, G. Grancharov and K. Troev, "Direct usage of products of poly(ethylene terephthalate) glycolysis for manufacturing of glass-fiber-reinforced plastics" **European Polymer Journal**, vol.39, 2003. pp. 1223-1228
- [19] U.R. Vaidya and V.M. Nadkarni, "Unsaturated Polyesters from PET Waste: Kinetics of Polycondensation" **Journal of Applied Polymer Science**, vol.34, 1987. pp. 235-245
- [20] อธิพิศ แจ่มชัด เอกสารประกอบการเรียนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ. 2544
- [21] Nexant, Inc. **Developments in PET Recycling**, 2008. [online]. Available: http://nexant.ecnext.com/coms2/gi_0255-167/Developments-in-PET-Recycling.html.

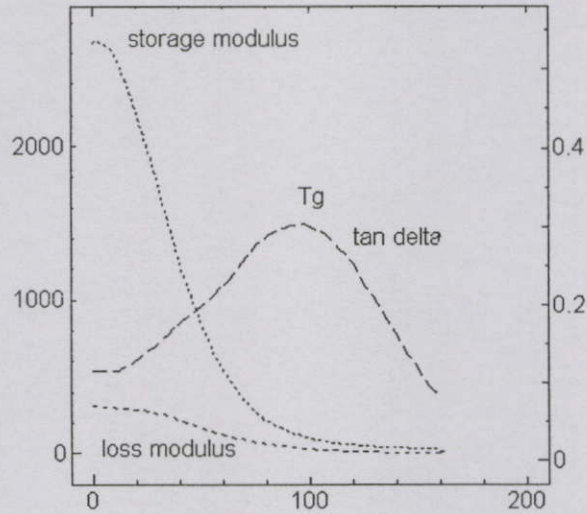
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 [22] D. Feldman and A. Barbalata **Synthetic Polymers**. Chapman & hall. London. 1996
 ไม่ควรกรณแต่เพียงกลน ยกพิศ แจ่มชัด เทคโนโลยีพอลิเมอร์คอมโพสิต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

- [23] Stamicarbon. **Licensing Unsaturated Polyester Resins**, 2008. [online]. Available:
http://www.stamicarbon.com/technology/_en/upr.htm.

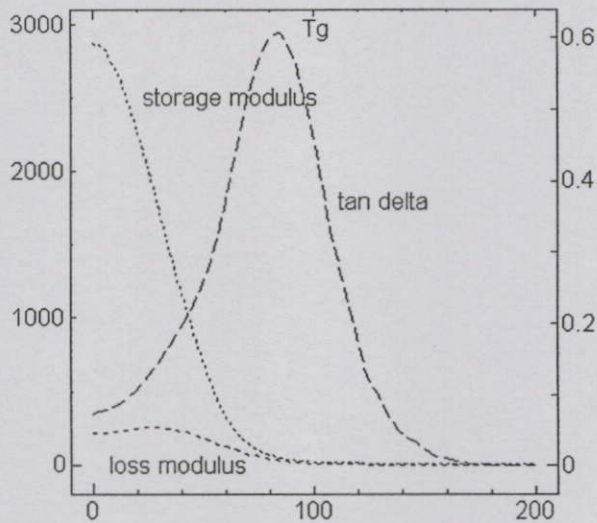
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA

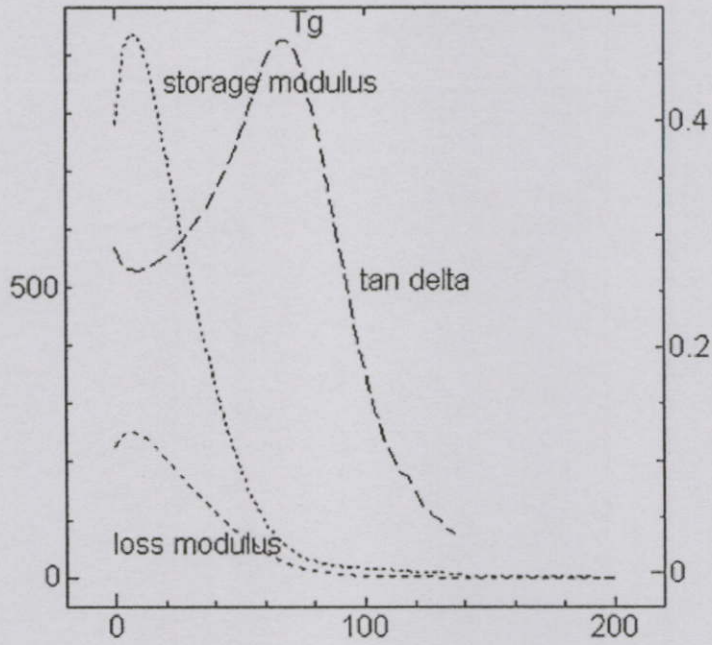


รูปที่ ก-1 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V1 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA

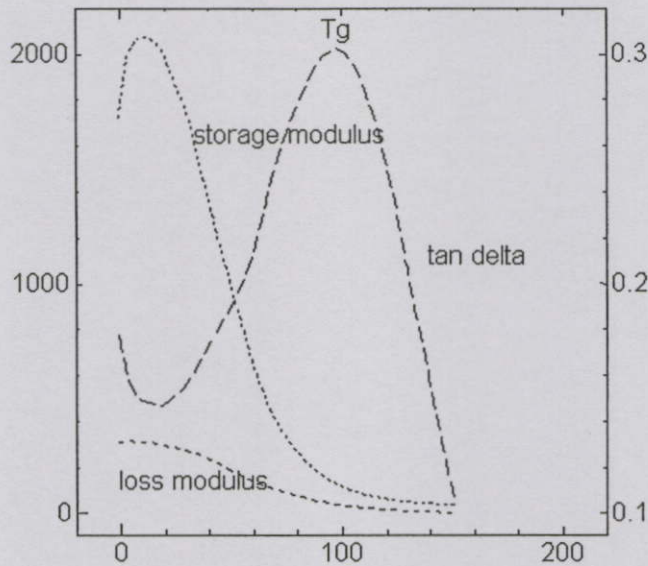


รูปที่ ก-2 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V2 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

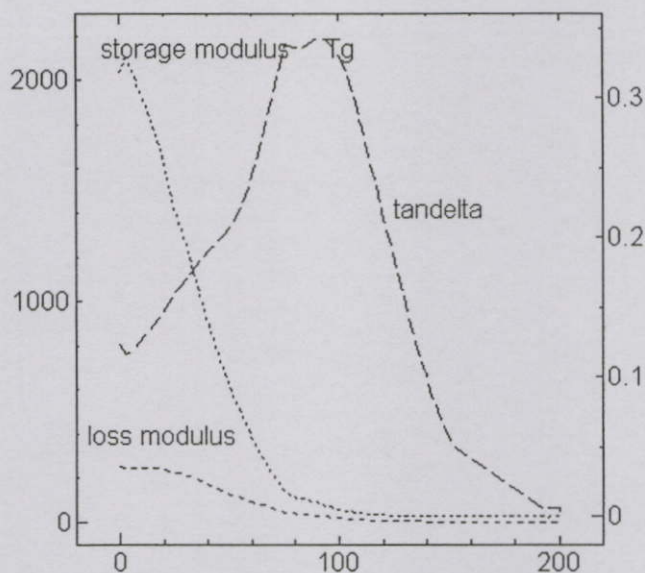
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



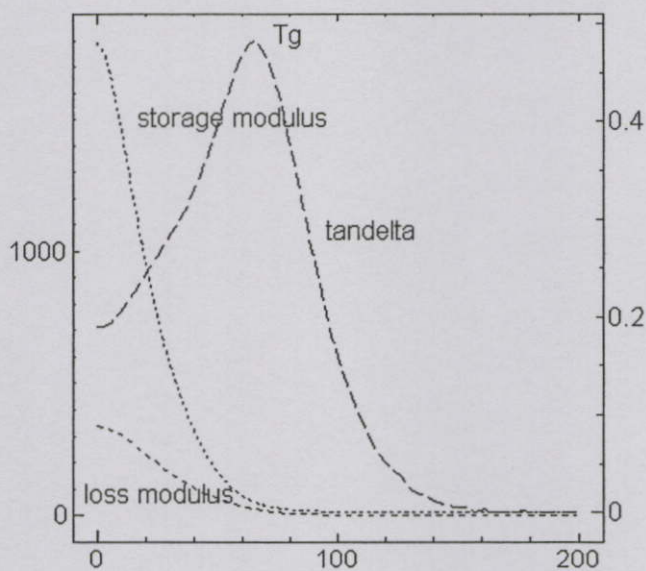
รูปที่ ก-3 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V3 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA



รูปที่ ก-4 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R1 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
 เมื่วารณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

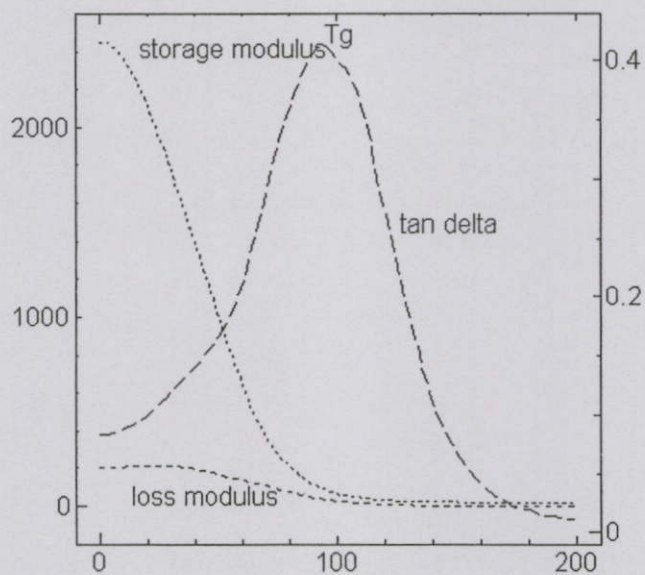


รูปที่ ก-5 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R2 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA

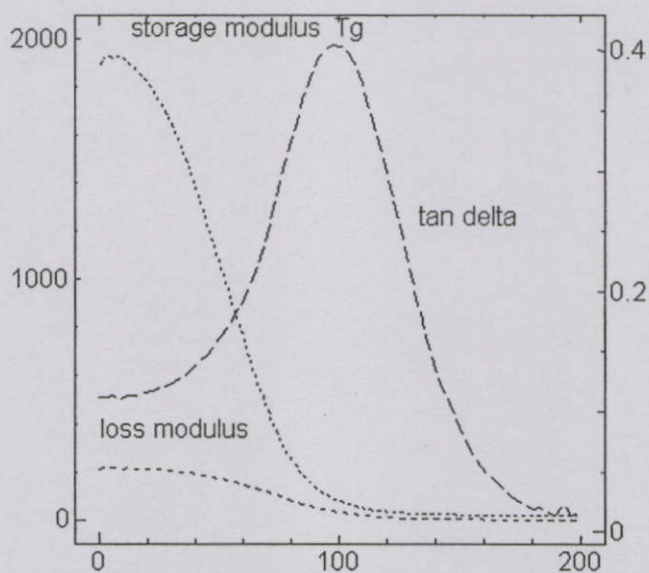


รูปที่ ก-6 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R3 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ BPO/DMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

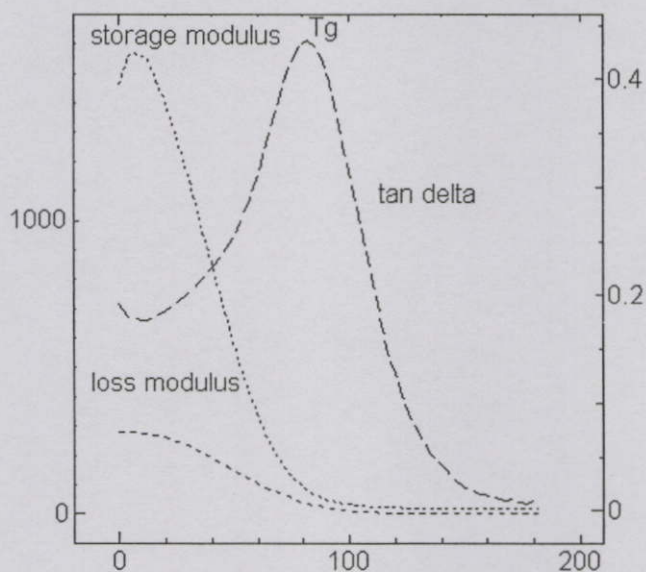


รูปที่ ก-7 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V1 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ MEKP/Co

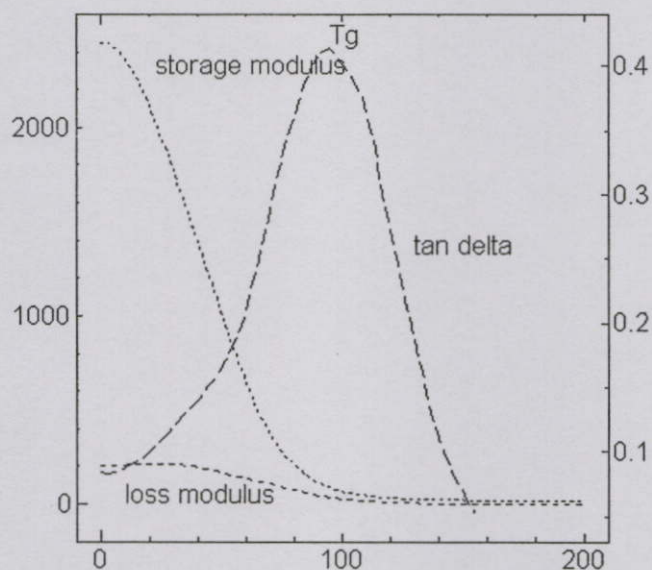


รูปที่ ก-8 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V2 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ MEKP/Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

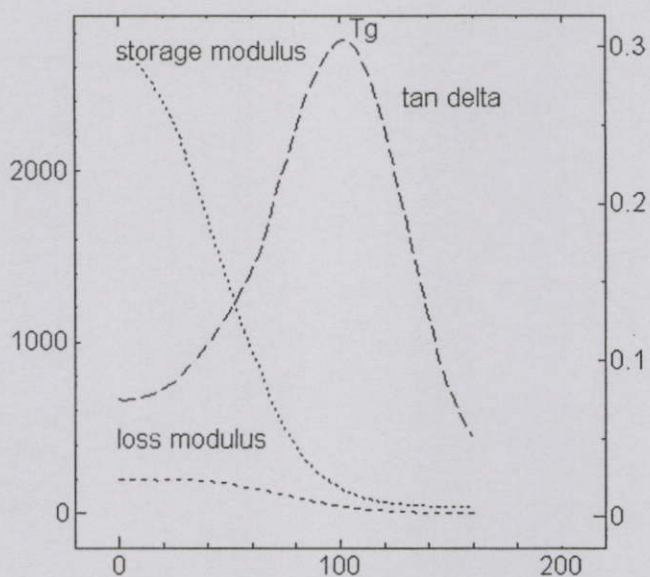


รูปที่ ก-9 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร V3 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ MEKP/Co

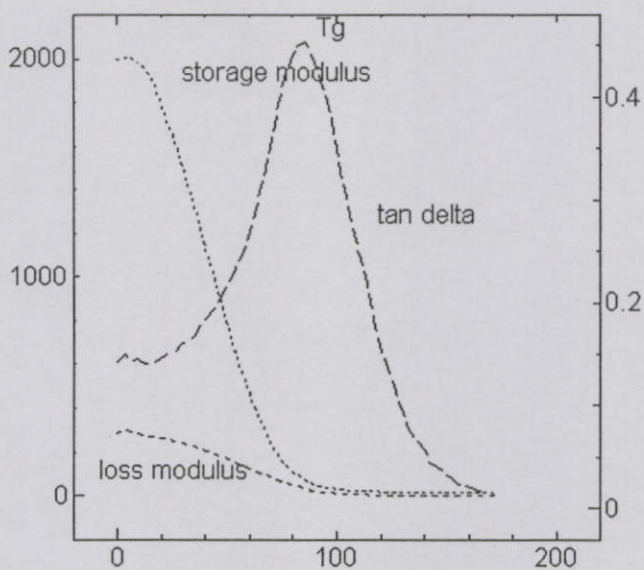


รูปที่ ก-10 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R1 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ MEKP/Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R2 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ MEKP/Co



รูปที่ ก-12 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DMTA ของชิ้นงานสูตร R3 ที่เชื่อมโยงด้วยระบบ MEKP/Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 วิธีหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสจากค่า Hydroxyl value

กำหนดให้น้ำหนักผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส	=	W	กรัม
ปริมาตร KOH ที่ใช้ในการไทเทรต	=	V	มิลลิลิตร
เพราะฉะนั้น จำนวนโมลของหมู่ -COOH	=	$\frac{NV}{1000}$	โมล

ถ้าผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิสเป็นเส้นตรง 1 โมเลกุลมีหมู่ -COOH 2 หมู่

ดังนั้น จำนวน โมลของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส	=	$\frac{NV}{2(1000)}$	โมล
---	---	----------------------	-----

ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส $\frac{NV}{1000}$ โมลหนัก $\frac{2W(1000)}{NV}$ กรัม			(1)
--	--	--	-----

เนื่องจาก Hydroxyl value (OH Value)	=	$\frac{VxNx56.1}{W}$	mgKOH/g
-------------------------------------	---	----------------------	---------

หรือ	NV =	$\frac{OH Value}{56.1}$	(2)
------	------	-------------------------	-----

แทนสมการ (2) ใน (1) จะได้

ผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส 1 โมลหนัก	$\frac{2 \times 56.1(1000)}{OH Value}$		กรัม
-------------------------------	--	--	------

ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ไกลโคไลซิส (Mn)	=	$\frac{112200}{OH Value}$	กรัม/โมล
--	---	---------------------------	----------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวปานฤทัย แก้วบริสุทธิ
ภูมิลำเนา	ชุมพร
ที่อยู่	21 ซ.2 ถ.เพชรเกษม ต.ชั้นเงิน อ.หลังสวน จ.ชุมพร 86110
การศึกษา	-ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนวัดประสาธนิกร -ระดับปริญญาตรี (วท.บ.เคมี-ชีวะ) ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้