

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ทุนวิจัย รัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวด เพทที่ใช้แล้ว

โดย

เสาวรจน์ ชำบจุลจิตร

อมร เพชรสม

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตุลาคม 2537



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๖๖๘, 4๒๒๕

๙ ๑๔๓ ๗



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง "การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว จากขวดพลาสติกใช้แล้ว" ได้สำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี ก็โดยได้รับการสนับสนุน และช่วยเหลือจากหลายฝ่ายด้วยกัน คณะผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ช่วยจัดสรรเงินทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2536 เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเอื้อ เพื่อและให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้สถานที่ อุปกรณ์เครื่องมือและเครื่องทดสอบต่างๆในการวิจัย

ท้ายสุดนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและวัตถุดิบต่างๆ งานวิจัยนี้สำเร็จจุล่งมาได้ ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย การสังเคราะห์พอลิ เอสเตอร์ เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากขวด เพท
ที่ใช้แล้ว

ชื่อผู้วิจัย เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร และ อมร เพชรสม

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ ตุลาคม 2537

บทคัดย่อ

ขวดเพทที่ใช้แล้ว สามารถนำกลับมารีไซเคิล ด้วยการย่อยสลายทางเคมี โดยการไกลโคไลสในไกลคอลปริมาณมากเกินพอ เช่น เอทิลีนไกลคอล, โพรพิลีนไกลคอล และไดเอทิลีนไกลคอล โดยมีซิงก์อะซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ผลที่ได้จากปฏิกิริยา ส่วนใหญ่จะเป็นบิสไฮดรอกซีเอทิล เทเรพธาล (BHET) ซึ่งเป็นโมโนเมอร์ของเพท และเมื่อนำผลที่ได้นี้ ไปทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และผสมกับสไตรีนโมโนเมอร์จะได้พอลิ เอสเตอร์ เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถทำให้แข็งตัว โดยการใส่เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKPO) เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา และโคบอลต์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล ระหว่างพอลิเอสเตอร์เรซินที่สังเคราะห์ได้จากขวดเพทที่ใช้แล้ว กับพอลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป พบว่าสมบัติด้านความแข็ง ความทนการตัดโค้ง และจุดอ่อนตัวของเรซินที่สังเคราะห์ได้จะสูงกว่าเรซินที่ใช้กันอยู่ทั่วไป เรซินที่ได้จากขวดเพทที่ใช้แล้วนี้ จึงสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ด้วยกรรมวิธีการหล่อ เช่นเดียวกับพอลิเอสเตอร์เรซินทั่วไป นอกจากนี้ ยังใช้ทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส และหินอ่อนเทียม ได้อีกด้วย

๒๑๔๒๙๖๓๔๒
๘๑๑๕๗๗๒๓

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
สารบัญ	v
รายการตารางประกอบ	vii
รายการภาพประกอบ	viii
รายการอักษรย่อ	ix
1 บทนำ	1
2 การสำรวจแนวความคิดและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
๕๐๕๒๒๑๐ 2.1 พอลิเอสเตอร์เรซิน (POLYESTER RESIN) - -	4
2.2 เพท (PET, POLYETHYLENE TEREPHTHALATE) - -	5
2.3 พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (UNSATURATED POLYESTER) - -	9
2.4 การย่อยสลายทางเคมีของเพท (DEPOLYMERIZATION OF PET) - -	17
2.5 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว จากเพทที่ใช้แล้ว - -	20
2.6 ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส (GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC, GRP)	21
2.7 ผลิตภัณฑ์หินอ่อนเทียม (CULTURED MARBLE) - -	22
3 วิธีการวิจัย	
3.1 การย่อยสลายขวดเพททางเคมี	23
3.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดที่ไม่อิ่มตัว	25
3.3 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	26
3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ	27
3.5 การทำหินทดสอบไฟเบอร์กลาสจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดที่ไม่อิ่มตัว	29
3.6 การทำหินอ่อนเทียม (CULTURE MARBLE)	31

✓ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการย่อยสลายขวด เพททาง เคมี --	32
4.2 ผลการสังเคราะห์พอลิ เอสเตอร์ เรซินชนิดที่ไม่อิ่มตัว --	34
4.3 ลักษณะของพอลิ เอสเตอร์แข็ง --	35
4.4 ผลการทดสอบสมบัติของขึ้นทดสอบ --	36
4.5 ผลการทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส --	39
4.6 ผลการทำหินอ่อนเทียม --	43

✓ 5 การอภิปรายผล

5.1 ผลจากการย่อยสลายขวด เพททาง เคมี	45
5.2 ผลจากการสังเคราะห์พอลิ เอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว	46
5.3 ผลจากการขึ้นรูปและทดสอบสมบัติ	47
5.4 ผลจากการทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสและหินอ่อนเทียม	48

6 ข้อสรุป 50

7 ข้อเสนอแนะ 52

8 ส่วนผนวก

8.1 การหาค่าไฮดรอกซิล (HYDROXYL VALUE) 53

เอกสารอ้างอิง 55

สถาบันวิทยบริการ
 าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

		หน้า
ตารางที่ 2.1	การยอมให้ก๊าซ CO ₂ ซึมผ่านของพลาสติกชนิดต่างๆ	7
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการย่อยสลายขวด เพทด้วยไกลคอล	32
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการสังเคราะห์พอลิ เอส เทอร์ เรซินชนิดไม่อิ่มตัว	34
ตารางที่ 4.3	แสดงลักษณะของพอลิ เอส เทอร์ แฉิ่งซึ่งขึ้นรูปโดยการหล่อ	35
ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบหาค่าความแข็งของพอลิ เอส เทอร์ แฉิ่ง	36
ตารางที่ 4.5	จุดอ่อนตัวของพอลิ เอส เทอร์ แฉิ่ง	37
ตารางที่ 4.6	ค่าความคดโค้งของพอลิ เอส เทอร์ แฉิ่ง	38
ตารางที่ 4.7	สมบัติของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส	42
ตารางที่ 4.8	สมบัติของผลิตภัณฑ์หินอ่อนเทียม	43



รายการภาพประกอบ

หน้า

รูปที่	2.1 สไตรีนโมโนเมอร์แทรกอยู่ระหว่างพอลิเอสเทอร์เรซินที่ไม่อิ่มตัว	10
รูปที่	2.2 โครงสร้างร่างแหของพอลิเอสเทอร์ภายหลังการแข็งตัว	10
รูปที่	2.3 ขั้นตอนการทำพอลิเอสเทอร์แข็ง	14
รูปที่	2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและ เวลาขณะ เรซินแข็งตัว	16
รูปที่	3.1 อุปกรณ์การย่อยสลายขวด เพทที่ใช้ในการทดลอง	24
รูปที่	3.2 เครื่องคูโรมีเตอร์ ชนิด Shore D	27
รูปที่	3.3 เครื่องทดสอบหาจุดอ่อนตัวของพลาสติก (Vicat tester)	28
รูปที่	3.4 เครื่องทดสอบ LLOYD	29
รูปที่	4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและ เวลาขณะ เรซินแข็งตัว	39
รูปที่	4.2 ผลการวิเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวด้วย เครื่อง IR Spectrophotometer	40
	(ก) เรซินที่สังเคราะห์ได้ (ข) เรซินจากโรงงาน	
รูปที่	4.3 ผลการวิเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวด้วย เครื่อง DSC	41
	(ก) เรซินที่สังเคราะห์ได้ (ข) เรซินจากโรงงาน	
รูปที่	4.4 ตัวอย่างชิ้นงานซึ่งขึ้นรูปด้วย เรซินที่สังเคราะห์ได้	44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอักษรย่อ

ASTM	American Society for Testing and Materials
BHET	Bis(hydroxyethyl) terephthalate
DEG	Diethylene Glycol
DMT	Dimethyl Terephthalate
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EG	Ethylene Glycol
FDA	Food and Drug Administration
GRP	Glass Fiber Reinforced Plastics
HDPE	High Density Polyethylene
ICI	Imperial Chemical Industries
IR	Infrared
KJ/m ²	kilojoule per Square metre
LDPE	Low Density Polyethylene
MEKPO	Methyl Ethyl Ketone Peroxide
MOR	Modulus of Rupture
MPa	Megapascal
N/mm ²	Newton per Square Millimetre
PBT	Polybutylene terephthalate
PET	Polyethylene terephthalate
PG	Propylene Glycol
PP	Polypropylene
PVC	Polyvinyl chloride
TA	Terephthalic Acid

1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก โดยมีการนำไปผลิต เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย ได้แก่ ภาชนะบรรจุอาหารและ เครื่องดื่ม ของเด็กเล่น ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้ เพราะพลาสติกมีสมบัติ เหนือกว่าวัสดุประเภทอื่นหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศธรรมชาติได้ดีกว่าโลหะ มีความทนทานต่อแรง กระทบได้ดีกว่าแก้วและ เซรามิก ลี้นสวยงาม น้ำหนักเบา และสามารถดัดแปลงให้มีรูปร่างต่างๆได้ง่าย เป็นต้น ประกอบกับพลาสติกมีมากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่ดี เฉพาะตัว เหมาะกับการใช้งานในแต่ละด้าน นอกจากนี้ ในการผลิตพลาสติก ยังสามารถเติมสารเติมแต่งต่างๆเข้าไป เพื่อปรับปรุงสมบัติ ของพลาสติกให้เป็นไปตามต้องการ เช่น สารเพิ่มความเงามัน สารเพิ่มความ แข็งแรง สารเพิ่มความคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผล ให้พลาสติก เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

แม้ว่าพลาสติกจะมีข้อดีหลายประการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่พลาสติก มีข้อเสียที่สำคัญมากประการหนึ่ง คือ จะถูกทำลายหรือย่อยสลายได้ยาก ต้องใช้ เวลานานเป็นสัปดาห์หรืออาจถึงร้อยปีจึงจะถูกทำลายลงได้ แต่เนื่องจากการใช้ พลาสติกในปัจจุบันเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ "ขยะพลาสติก" มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ตามไปด้วย และเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะตาม เมืองใหญ่ๆซึ่งมีจำนวนประชากรสูง การแก้ไขปัญหaxyขยะพลาสติก จึงยังคงเป็น ปัญหาของอีกหลายๆประเทศในโลก แต่ถึงกระนั้น กระบวนการคิดค้นเพื่อผลิต พลาสติกชนิดใหม่ๆในรูปแบบต่างๆ ก็ยังทยอยแข่งขันกันออกสู่ตลาดอย่างต่อเนื่อง มาจนกระทั่งทุกวันนี้

วิธีการแก้ไขปัญหaxที่ที่ดีที่สุดวิธีหนึ่ง คือการนำขยะพลาสติกเหล่านี้กลับมา ใช้ใหม่ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า "รีไซเคิล" (recycle) ซึ่งหมายถึงกระบวนการ ผลิตอัน เกิดจากการนำ เศษวัสดุหรือสิ่งของใช้แล้ว หรือ เศษของชิ้นส่วนที่ เสียหายและใช้งานไม่ได้ กลับมาผ่านกรรมวิธีผลิตเป็นวัตถุดิบ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate) หรือ เพท (PET) เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งซึ่งถูกนำมาใช้งาน และมีบทบาทมากในด้าน ภาชนะบรรจุ ที่เห็นได้ชัดเจน ได้แก่ นำมาทำเป็นขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม และ ขวดน้ำมันพืช เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจาก ขวดเพทมีความสามารถในการทนต่อแรง กระแทกได้ดี เมื่อตกลงพื้นหรือกระทบสิ่งอื่นจะไม่แตกง่าย ประกอบกับขวดเพท จะมีความใสมาก และน้ำหนักเบาเพียง 1 ใน 10 ของขวดแก้วเท่านั้น จึงทำ ให้ประหยัดค่าขนส่งและลดภาระการเคลื่อนย้าย ตกแล้วไม่แตกกระจายเหมือน ขวดแก้ว ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้รถใช้ถนน นอกจากนี้ ขวดเพทยังสามารถ เก็บก๊าซต่างๆได้ดี จึงถูกใช้บรรจุน้ำอัดลม ซึ่งภายในมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงได้อย่างปลอดภัย โดยไม่รั่วและไม่ระเบิด

ผลิตภัณฑ์ซึ่งทำจากเพท สามารถใช้บรรจุอาหารได้โดยองค์การอาหาร และยา (Food and Drug Administration, FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกา รับรอง โรงงานผู้ผลิตน้ำดื่มหรือน้ำอัดลม จะไม่นำขวดที่ใช้แล้วกลับมาบรรจุใหม่ อีก เนื่องจากต้องการสมบัติด้านความใสและความสะอาด ด้วยเหตุนี้ ขวดเพท กำลังจะกลายเป็นภัยสำคัญของสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพราะขวดพลาสติกบรรจุน้ำดื่ม และน้ำอัดลมนั้น จะสะดวกในการนำติดตัวไปขณะเดินทางท่องเที่ยว ดังนั้น จึง มักถูกทิ้งให้เข้าสู่ระบบธรรมชาติ โดยเฉพาะในแหล่งท่องเที่ยวที่มีนักท่องเที่ยว นิยมเข้าไปพักผ่อนเป็นหมู่คณะ อีกทั้งขวดเพทนี้เป็นประเภท "one way" (ใช้ แล้วทิ้ง) จึงไม่มีผู้นำกลับมาแลกคืนใหม่ ที่ผ่านมามีปัญหาขยะพลาสติกเป็นปัญหา ซึ่งเกิดในชุมชนเมือง แต่ในขณะนี้ ผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆได้แพร่กระจายจาก ชุมชนเมือง เข้าสู่ชนบทเกือบทุกแห่ง ทั้งที่ขวดพลาสติกนั้นมีราคาแพงเมื่อเทียบกับ ราคาน้ำดื่มและน้ำอัดลมที่บรรจุอยู่ จะเห็นว่า เรากำลังใช้พลาสติกกันอย่าง พุ่มเฟิอ่ย พร้อมๆกับการทำลายธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากขยะ พลาสติกด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา

ปัจจุบันนี้ ประเทศไทยได้มีการนำพลาสติกที่ใช้แล้วบางประเภทกลับมา หลอมใช้งานใหม่อีกครั้ง แต่เป็นการนำกลับมาในรูปของพลาสติกชนิดเดิม เพื่อ นำมาผลิตเป็นถุง หรือฟิล์ม อย่างง่ายๆ หรือทำเป็นภาชนะชนิดต่างๆที่มีคุณภาพ

ค้อยลง ดังนั้น งานวิจัยนี้จะมีรูปแบบและลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิม โดยจะพยายามหาแนวทางในการนำขวด เพทที่ใช้แล้วกลับเข้าสู่ระบบการผลิตใหม่ เพื่อที่จะนำมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง โดยไม่จำเป็นต้องนำกลับมาหลอมทำเป็นขวดหรือภาชนะบรรจุ แต่จะนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นที่ต่างออกไป เพื่อการใช้งานที่ไม่เกี่ยวข้องกับอาหาร โดยการนำขวดเพทที่ใช้แล้วนี้ไปย่อยสลายโดยวิธีทางเคมี ให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง แล้วจึงนำผลที่ได้จากการย่อยสลายนี้ ไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นเรซินที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น การทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส การทำหินอ่อนเทียม กระจกเทียม และ ทำอัลคีดเรซิน (alkyd resin) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสี เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การสำรวจแนวความคิด และการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอสเทอร์เรซิน (POLYESTER RESIN)

พอลิเอสเทอร์เรซิน จัดเป็นพอลิเมอร์กลุ่มใหญ่ที่สุดกลุ่มหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้หลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นลามิเนตเรซิน, เรซินหล่อแบบ, เส้นใย, ฟิล์ม, เรซินเคลือบผิว, ยาง, และ พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ดังนั้นคำว่าพอลิเอสเทอร์ จึงมีลักษณะคล้ายคำว่าเหล็กกล้า (steel) กล่าวคือจะมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด อีกทั้งยังมีสมบัติที่หลากหลาย จึงจัดว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญยิ่ง สามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม พอลิเอสเทอร์เหล่านี้ต้องมีหมู่เอสเทอร์ ($-COO-$) อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุลส่วนที่เป็นสายโซ่หลัก (main chain) ดังนั้น พอลิไวนิลอะซีเตต และพอลิเมทิลเมทาคริเลตจึงไม่ถูกจัดว่าเป็นพอลิเอสเทอร์ ถึงแม้ว่าจะมีหมู่เอสเทอร์อยู่ในโมเลกุลก็ตาม หากไม่ได้อยู่ในส่วนของสายโซ่หลัก แต่อยู่ในส่วนของสายโซ่ข้างเคียง (side chain)

การผลิต หรือสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ สามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งส่วนใหญ่จะได้มาจาก ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างพอลิเบสิกแอซิด (polybasic acids) ที่มีหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) อย่างน้อย 2 หมู่ กับพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohols) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) อย่างน้อย 2 หมู่ เช่น ปฏิกิริยาของไกลคอลกับไดคาร์บอกซิลิกแอซิด ซึ่งจะได้พอลิเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ปฏิกิริยานี้เรียกว่า เอสเตอริฟิเคชัน (esterification) โดยจะได้น้ำออกมาจากปฏิกิริยาดังกล่าว ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกไปให้หมด เพื่อป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับที่เรียกว่า ซาปอนิฟิเคชัน (saponification) นอกจากนี้ พอลิเอสเทอร์อาจเป็นได้ทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก โดยเทอร์โมเซตพอลิเอสเทอร์จะมีโครงสร้างแบบร่างแห และเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์จะมีความเป็นผลึกและจุดหลอมตัวสูง แต่โดยทั่วไปจะแบ่งพอลิเอสเทอร์ออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1 พอลิเอสเตอรัชนิดอิ่มตัว (saturated polyester) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอรั ได้แก่ เพทหรือพอลิเอทิลีนเทเรพธาลेट (PET, polyethylene terephthalate) และ พอลิบิวทิลีนเทเรพธาลेट (PBT, polybutylene terephthalate) เป็นต้น

2.1.2 พอลิเอสเตอรัชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester) มีโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว (มีพันธะคู่ในโมเลกุล) สามารถเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking) ได้โครงสร้างเป็นแบบร่างแห จึงจัดเป็นเทอร์โมเซตพอลิเอสเตอรั ใช้ทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส , งานด้านการเคลือบผิว (coating) และงานหล่อแบบ (casting) เป็นต้น

2.2 เพท (PET , POLYETHYLENE TEREPHTHALATE)

คนส่วนใหญ่รู้จัก "เพท" ครั้งแรกในลักษณะของเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งเรียกว่า "เส้นใยพอลิเอสเตอรั" ถูกค้นพบโดยวินฟิลด์และดิกสัน (Whinfield & Dickson) แห่งบริษัท Calico Printer Association ประเทศอังกฤษ เขาพบว่าการนำไดเบสิกแอซิด (dibasic acid) ที่เป็นอะโรมาติกมาใช้แทนพวกอะลิฟาติก จะทำให้พอลิเอสเตอรัที่ได้มีจุดหลอมตัวสูงขึ้น และละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ยาก จึงเหมาะสำหรับงานทางด้านเส้นใยและฟิล์ม เขาได้ขายลิขสิทธิ์ให้กับบริษัทไอซีไอ (ICI, Imperial Chemical Industries) แห่งประเทศอังกฤษ และ บริษัทดูปองต์ (Dupont) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งทั้งสองได้พัฒนากันต่อมาอย่างจริงจัง จนสามารถผลิตเส้นใยสังเคราะห์ออกสู่ท้องตลาดในชื่อของแดครอน (Dacron) และเทอริลีน (Terylene) ซึ่งในเวลาต่อมาบริษัทเทจิน (Teijin) แห่งประเทศญี่ปุ่น ได้ซื้อลิขสิทธิ์เทคนิคการผลิตจากบริษัทไอซีไอ และทำการผลิตออกสู่ตลาดภายใต้ชื่อว่า โทเรเทโอรอน (Toray Teton) จนกลายเป็นมหาอำนาจทางด้านสิ่งทอในปัจจุบันนี้

ในช่วงแรกๆ เพทยังไม่มีสมบัติเหมาะสมที่จะใช้ในงานฉีด (injection moulding) และงานเป่า (blow moulding) เนื่องจากเพทมีจุดหลอมตัวและความหนืดค่อนข้างสูง การใช้งานจึงมุ่งไปทางด้านเส้นใยสังเคราะห์เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ ยังถูกนำไปใช้งานด้านเทปบันทึกเสียง วีดีโอเทป และ ฟิล์มถ่ายรูป

จนกระทั่งบริษัท Eastman Chemical Products หรือ บริษัทโกดัก (Kodak) ได้พัฒนาเพทจนมีความเหมาะสมกับงานเป่าภายใต้ชื่อ Kodak PET Polyester ออกสู่ตลาดด้วยสมบัติที่เหมาะสมกับการทำขวด

การพัฒนาเพทเพื่อใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ เริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1970 ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยถูกกระตุ้นจากนโยบายการตลาดของบริษัทผู้ผลิตน้ำอัดลม ซึ่งต้องการที่จะเพิ่มขนาดบรรจุภัณฑ์จาก 1 ลิตร ไปเป็น 2 ลิตร แต่การใช้แก้วเป็นบรรจุภัณฑ์นั้น จะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งขวดจะมีอัตราการแตกสูงมาก ทำให้ผลกำไรลดลง และในปี ค.ศ. 1973 ซึ่งเป็นช่วงวิกฤตการณ์น้ำมันขาดแคลน การใช้จ่ายทางด้านพลังงานสูงขึ้นมาก จึงมีผลกระทบต่อการใช้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้ว และอลูมิเนียม ซึ่งต้องใช้พลังงานในการผลิตสูงด้วยเหตุนี้ จึงเป็นจุดเริ่มต้นให้อุตสาหกรรมน้ำอัดลมหันมาแก้ปัญหาด้วยการใช้ขวดพลาสติก เนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า ได้มีการนำเอาเพท และ พอลิอะคริโลไนไตรล์ (polyacrylonitrile) มาทดลองใช้ แต่ปรากฏว่าองค์การอาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกาไม่ยอมรับในพอลิอะคริโลไนไตรล์ เพราะเป็นต้นเหตุให้เกิดโรคมะเร็ง และในปี ค.ศ. 1976 เพทมีโอกาสดำเนินตลาดบรรจุภัณฑ์น้ำอัดลม โดยการทำเป็นขวดด้วยกระบวนการผลิตแบบเป่าแล้วบิด (stretch blow moulding) บรรจุภัณฑ์ได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็ว และมีอัตราการใช้งานสูงขึ้นเรื่อยๆ สมบัติซึ่งทำให้เพทเหมาะที่จะนำมาทำขวดบรรจุน้ำอัดลม ได้แก่

2.2.1 สมบัติเชิงกล เพทมีความทนต่อแรงกระแทก และการตกกระทบ (drop impact) ได้ดี จึงมีความปลอดภัยในการใช้งาน การรับน้ำหนักด้านบนสำหรับการเก็บ, การบรรจุ และการปิดฝา

2.2.2 ขวดเพทสามารถเก็บน้ำอัดลมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้ความดันสูงได้อย่างปลอดภัย โดยไม่รั่วและไม่ระเบิด ขวดเพทจะกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าพลาสติกชนิดอื่น⁽¹⁾ ดังแสดงค่า เปรียบเทียบกับพลาสติกบางชนิดไว้ในตารางที่ 2.1

2.2.3 ขวดเพทมีน้ำหนักเบาเพียงหนึ่งในสิบของขวดแก้ว ทำให้ประหยัดค่าขนส่ง ลดภาระการเคลื่อนย้าย

2.2.4 มีความใส

2.2.5 ไม่ทำให้รสชาติของเครื่องดื่มเสียไป

2.2.6 ปลอดภัยต่ออาหารที่สัมผัส

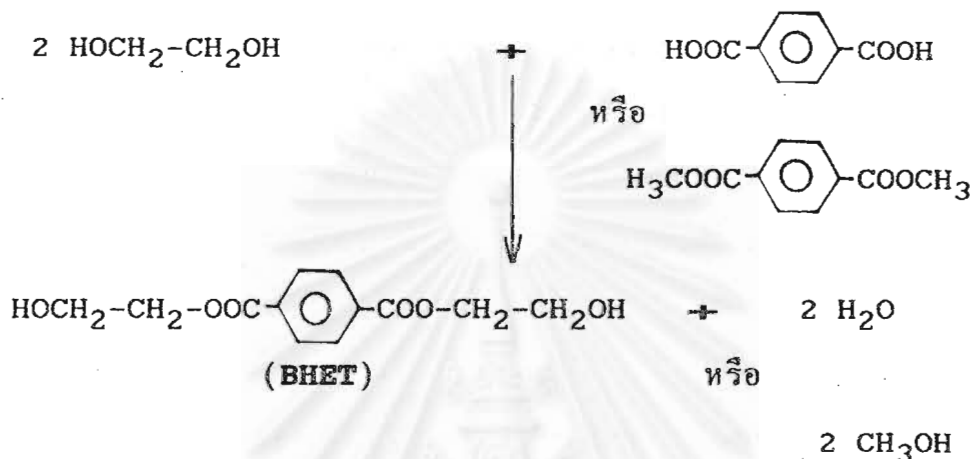
ตารางที่ 2.1 การยอมให้ก๊าซ CO₂ ซึมผ่านของพลาสติกชนิดต่างๆ

Polymer	Relative permeability
PET	1
PVC	2
HDPE	52
PP (oriented)	57
LDPE	114

ถึงแม้ว่าตลาดของขวด เพทจะ เริ่มต้นจากน้ำอัดลม แต่จากสมบัติของ เพท ที่เหนือกว่าพลาสติกชนิดอื่น ทำให้มีการนำไปใช้งานในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้บรรจุน้ำมันพืช น้ำแร่ เครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ อาหาร ยา และสารเคมี ที่ใช้ในบ้าน เป็นต้น สำหรับการใช้น้ำขวดเพทในประเทศไทย เริ่มต้นจากการนำมา เป็นขวดบรรจุน้ำมันพืชแทนการใช้ขวดพีวีซี จนกระทั่งผู้ผลิตน้ำอัดลมรายใหญ่ได้ นำขวดเพทมาเป็นบรรจุภัณฑ์ขนาดบรรจุ 2 ลิตร และขนาด 1.25 ลิตร ในเวลา ต่อมา นอกจากนี้ ยังมีการนำขวดเพทมาใช้บรรจุน้ำดื่มบริสุทธิ์ และน้ำแร่ ทำให้ การใช้น้ำขวดเพทในประเทศไทยแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สินค้ามีการพัฒนารูปแบบ มากขึ้น พัฒนาการส่งออกโดยมีมาตรฐานของบรรจุภัณฑ์ดีขึ้น ช่วยลดค่าขนส่ง ลดอัตราการสูญเสีย และประการสำคัญคือความปลอดภัยของผู้บริโภค จึงเห็นได้ ชัดว่า อุตสาหกรรมด้านบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มที่ดีขึ้นมาก เมื่อตลาดเพทถูกพัฒนาขึ้นมา

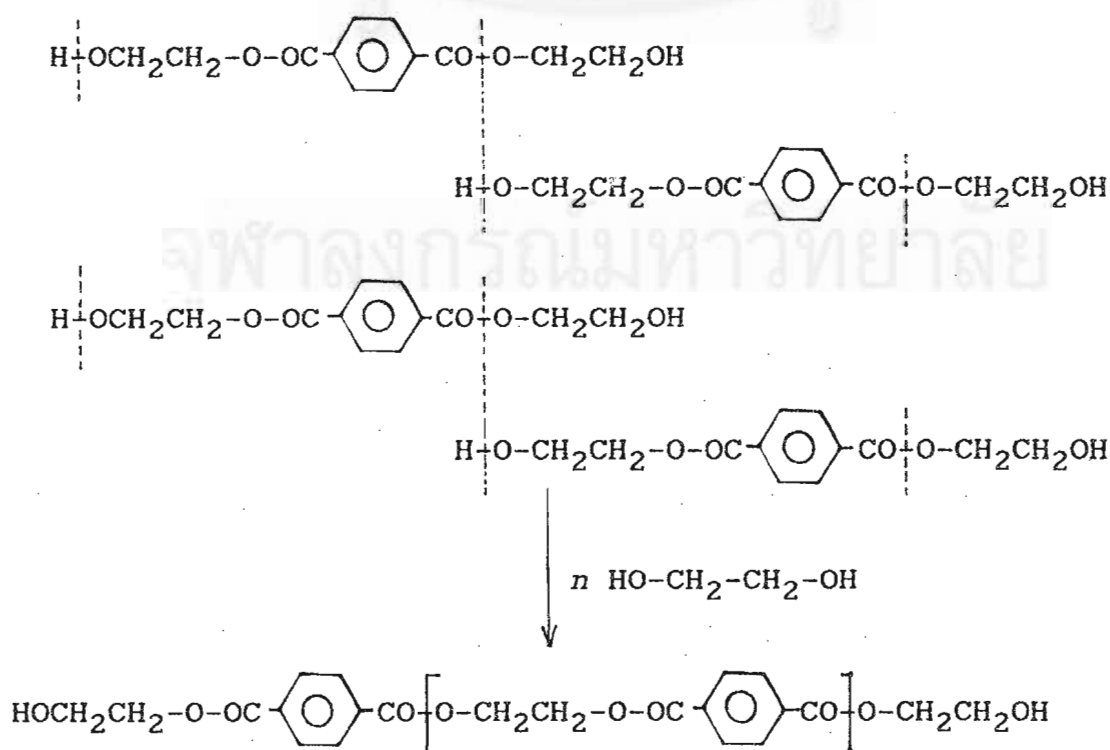
เพทถูกสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol,EG) และเทเรพธาลิกแอซิด (terephthalic acid) ด้วยอัตราส่วน 1:2 หรือใช้อนุพันธ์ของเทเรพธาลิกแอซิด เช่น ไดเมทิลเทเรพธาลेट (dime- thyl terephthalate) อัตราส่วน 1:2.5 ปฏิกิริยาแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

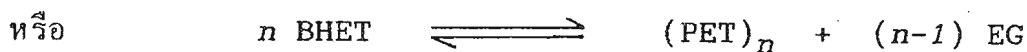
ขั้นที่ 1 เป็นขั้นผสมเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป กับ เทเรพธาลิกแอซิด แล้วให้ความร้อน 150-210 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ คือ BHET [bis (2-hydroxyethyl) terephthalate)] และ น้ำ (หรือ เมทานอล ถ้าใช้ไดเมทิลเทเรพธาลेट) ดังสมการต่อไปนี้



น้ำหรือ เมทานอลที่ได้จะถูกแยกออกไป เพื่อป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับ

ขั้นที่ 2 เป็นขั้นตอนที่ให้ความร้อนต่อจากขั้นตอนที่ 1 โดยเพิ่มอุณหภูมิ เป็น 270-285 องศาเซลเซียสและลดความดันเหลือประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท โดย BHET จะเป็นทั้ง เอสเตอร์และแอลกอฮอล์ ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยา คือ เพท และเอทิลีนไกลคอล ดังสมการต่อไปนี้





เอทิลีนไกลคอลจะถูกกำจัดออกไปจากระบบอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 20,000 จากนั้นผ่านเพทที่หลอมเหลวไปอัดรีดออกมาแล้วตัดให้เป็นเม็ดเล็กๆ หรืออาจผ่านเข้าไปในกระบวนการปั่นเป็นเส้นใย หรือรีดออกมาเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วแต่ว่าจะนำไปใช้งานในด้านไหน

เพทจะมีสภาพความเป็นผลึกสูงได้ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นตรง (linear polymer) การจัดโมเลกุลค่อนข้างเป็นระเบียบมาก และมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง ได้แก่ เพทที่อยู่ในรูปของเส้นใย จะมีจุดหลอมตัวสูงมากกว่าไนลอน คือ อยู่ในระดับ 250-265 องศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมิเรียงตัวดีมาก คือ 140-190 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 80 องศาเซลเซียส จึงสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงระดับ 120 องศาเซลเซียสได้ นอกจากนี้ ยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อุณหภูมิห้อง แต่เพทที่มีสภาพความเป็นผลึกสูงจะมีค่าอุณหภูมิลอมตัว และความหนืดไม่เหมาะสมกับงานฉีดและงานเป่า ซึ่งต้องใช้เพทที่มีสภาพเป็นอสัณฐาน โดยทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว จนไม่มีเวลาพอที่จะจัดระเบียบของโมเลกุล เพทที่ได้จึงมีลักษณะใส แต่ทนความร้อนได้ในระดับ 80-90 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำตามไปด้วย ช่วยให้ประหยัดและรวดเร็ว

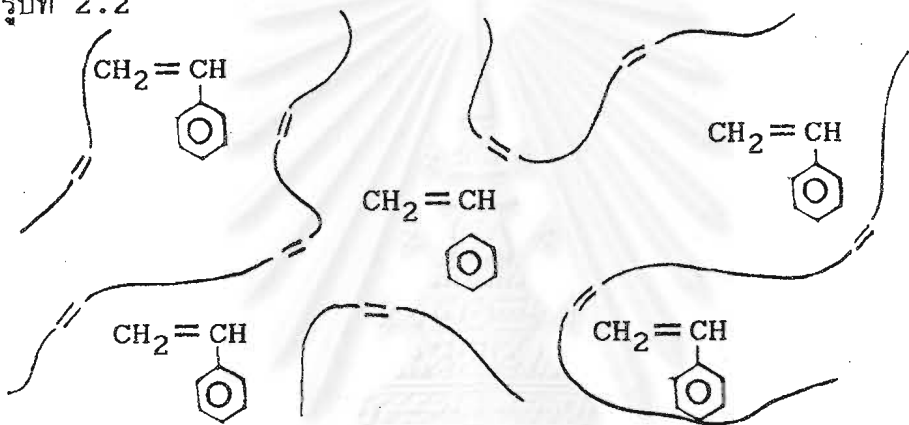
2.3 พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (UNSATURATED POLYESTER)

พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเรซินเหลว มีสีเหลืองอ่อน และจะมีดีกรีของการพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization) ที่ต่ำประมาณ 8-10 (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2000) ภายหลังจากการผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา หรือได้รับการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงเป็นพลาสติกแข็ง ซึ่งไม่สามารถแปรสภาพเป็นพลาสติกเหลวหรือคืนรูปได้อีก จึงจัดเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง

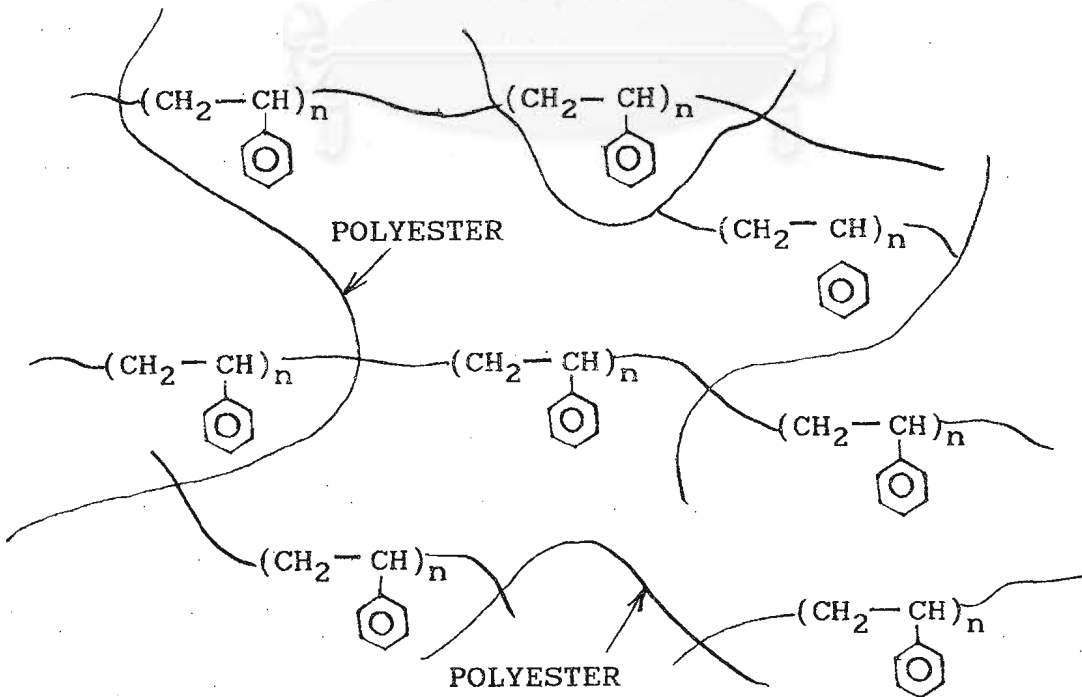
พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว โดยทั่วไปสังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างไกลคอลและไดเบสิกแอซิด (สารผสมของกรดอินทรีย์ที่อิ่มตัว และไม่อิ่มตัว) เมื่อ



ปฏิกิริยาลีนสุดลง พอลิ เอสเตอร์ที่ได้สามารถละลายในตัวทำละลายไม่อิมตัว เช่น สไตรีนโมโนเมอร์ (styrene monomer) เพื่อให้คงอยู่ในสภาพของเหลว โดย โมเลกุลของสไตรีนโมโนเมอร์จะแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิ เอสเตอร์ที่ไม่อิมตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พันธะที่ไม่อิมตัวของพอลิ เอสเตอร์จะทำปฏิกิริยากับ พันธะที่ไม่อิมตัวของโมโนเมอร์ได้เป็นบางส่วน แต่จะสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ เต็มที่เมื่อได้รับความร้อนหรือเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ดังนั้นสไตรีนโมโนเมอร์ จะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking agent) อีกด้วย ดัง แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 สไตรีนโมโนเมอร์แทรกอยู่ระหว่างพอลิ เอสเตอร์ที่ไม่อิมตัว

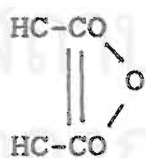


รูปที่ 2.2 โครงสร้างร่างแหของพอลิ เอสเตอร์ภายหลังการแข็งตัว

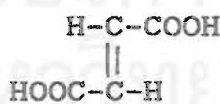
สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว และสารที่ทำให้พอลิเอสเตอร์เรซินแข็งตัว ได้แก่

2.3.1 ไกลคอล (glycol) การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวจะใช้ไกลคอลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเพียง 2 หมู่ (ไดออล) และใช้แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ในการหยุดปฏิกิริยา สำหรับไกลคอลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า 2 หมู่ จะทำให้โมเลกุลของพอลิเอสเตอร์ที่ได้มีกิ่งก้านสาขา ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลจะเพิ่มอย่างรวดเร็วจนยากแก่การควบคุม ไกลคอลที่นิยมใช้คือ เอทิลีนไกลคอล (EG) , โพรพิลีนไกลคอล (PG) , ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) , และ ไดโพรพิลีนไกลคอล (DPG) เป็นต้น ไกลคอลแต่ละชนิดที่ใช้จะมีผลต่อสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินต่างกัน เช่น ความเหนียว ความหยุ่นตัว ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น สำหรับ EG จะให้พอลิเมอร์ที่ขุ่น และเกิดเป็นผลึกได้ดี ส่วน PG จะให้พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกเล็กน้อย และเรซินที่ได้จะสามารถละลายเข้ากับสไตรีนโมโนเมอร์ได้ดี

2.3.2 กรดไม่อิ่มตัว (unsaturated acid) ในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินนั้นกรดไม่อิ่มตัวที่นิยมใช้ คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) และฟูมาริกแอซิด (fumaric acid) หากมีส่วนผสมของกรดไม่อิ่มตัวต่ำจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อย จึงมีความยืดหยุ่นมาก โมดูลัสต่ำ ร่องไวต่อความร้อนและสารละลายมากขึ้น การแข็งตัว (cure) เกิดได้ช้ากว่า

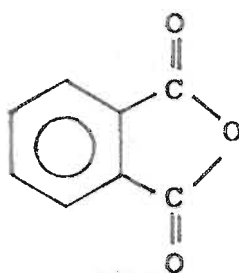


มาเลอิกแอนไฮไดรด์



ฟูมาริกแอซิด

2.3.3 กรดอิ่มตัว (saturated acid) ที่นิยมใช้ในเรซินทางการค้า คือ ฟธาลิกแอซิด (phthalic acid) ซึ่งอยู่ในรูปฟธาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) เนื่องจากหาง่ายกว่าในรูปของกรด และจะใช้มากในการทำพอลิเอสเตอร์แข็งเพื่อช่วยให้พอลิเอสเตอร์ที่ได้มีสมบัติดีขึ้น ไม่แข็งหรือเปราะมากเกินไป



ฟธาลิกแอนไฮไดรด์

2.3.4 โมโนเมอร์ (monomer) ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายของ พอลิเอสเทอร์ที่มีความหนืดสูงในช่วงก่อนการแข็งตัว และเมื่อได้รับความร้อนหรือ ภายหลังการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปแล้ว โมโนเมอร์จะถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการ เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ ทำให้มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห พอลิเอสเทอร์ก็จะแข็งตัว แม้ว่าพอลิเอสเทอร์สายโซ่ตรงชนิดไม่อิ่มตัว อาจเกิด การเชื่อมโยงกันเองระหว่างสายโซ่ได้ แต่จะเกิดอย่างช้าๆและได้ค้กรีของการ เชื่อมโยงต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค้กรีของการเชื่อมโยงสูงและรวดเร็วขึ้น จึงนิยมเติมสารซึ่งมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาลงไป ได้แก่ สไตรีนโมโนเมอร์ หรือพวกไวนิลโมโนเมอร์อื่นๆ ปกตินิยมใช้สไตรีนโมโนเมอร์ เนื่องจากราคาถูก เป็นตัวทำละลายที่ดี และสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเอสเทอร์ในขณะที่แข็งตัวได้คือ ส่วนสารอื่นๆที่นิยมใช้ก็มีบ้างเหมือนกัน เช่น เมทิลเมธาคริเลต

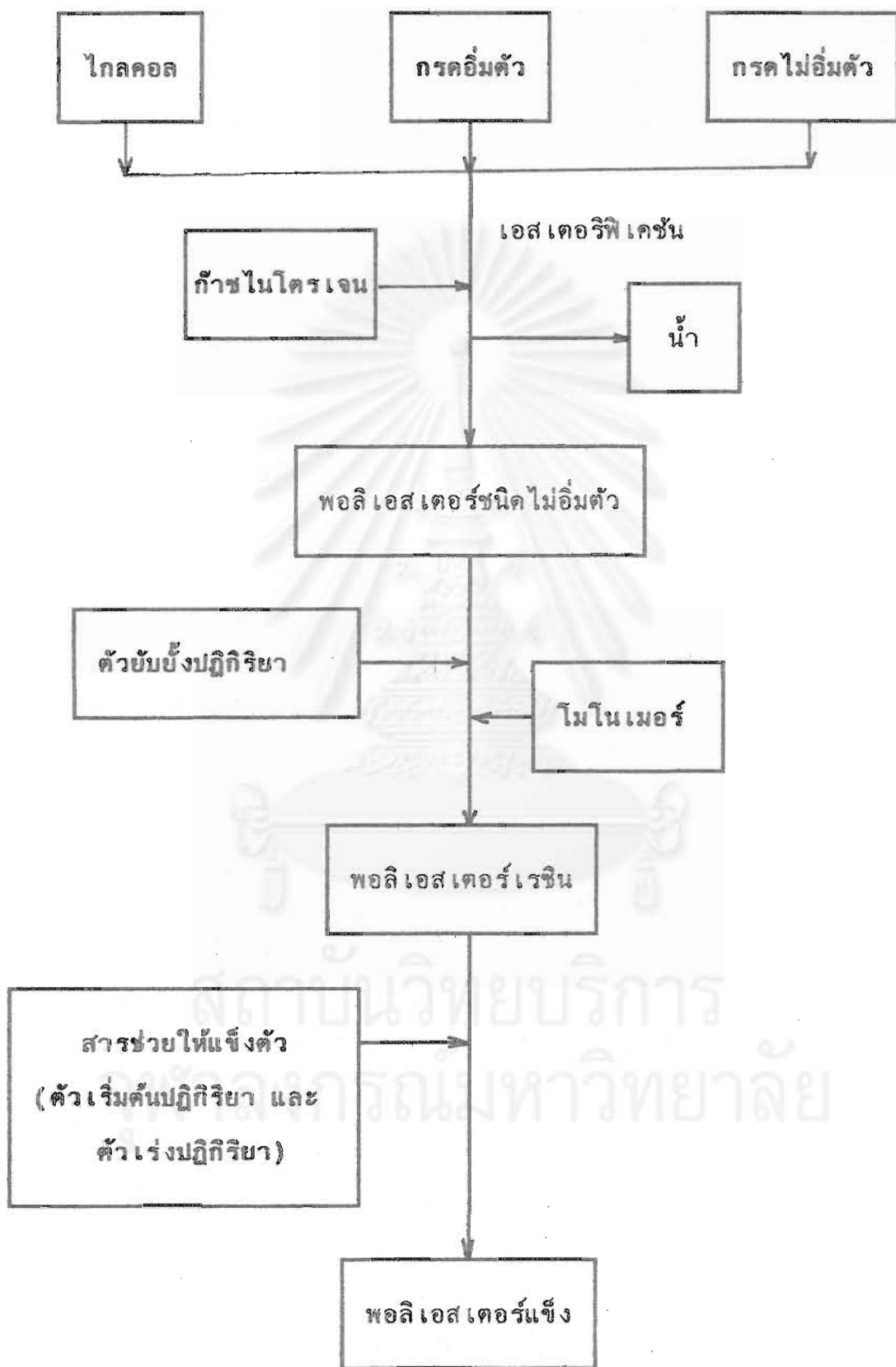
2.3.5 สารยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) เนื่องจากสารละลาย ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง ซึ่งเมื่อ ได้รับความร้อน แสง หรือตัวแปรอื่นๆ สามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) และทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นเจล (gel) ดังนั้น จึงต้องใช้สารยับ ยั้งปฏิกิริยา เพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเอสเทอร์เรซินแข็งตัว และจะช่วยยืดอายุของ พอลิเอสเทอร์เรซินให้สามารถเก็บไว้ได้นาน ช่วยปรับเวลาการแข็งตัว และลด ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะพอลิเอสเทอร์แข็งตัวอีกด้วย ซึ่งสารยับยั้งปฏิกิริยาที่ใช้จะ เป็นสารจำพวกควิโนน (quinone) ได้แก่ เบนโซควิโนน (benzoquinone) หรือไฮโดรควิโนน (hydroquinone)

2.3.6 **ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator)** ช่วยให้พอลิเอสเตอร์แข็งตัวเร็วขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นพวกเปอร์ออกไซด์ ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKPO , methyl ethyl ketone peroxide) และ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide)

2.3.7 **ตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator)** เป็นสารที่ช่วยเร่งให้ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ส่วนใหญ่เป็นสารพวกเกลือของโลหะ เช่น โคบอลต์ออกโตเอต (Co-octoate) โคบอลต์แนฟทีเนต (Co-naphthenate) หรือสารจำพวกเอมีน ได้แก่ ไดเอทิลแอนิลีน (di-ethyl aniline) ไดเมทิลแอนิลีน (dimethyl aniline) เป็นต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาพวกเกลือของโลหะจะใช้กับตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาจำพวก MEKPO แต่สำหรับเอมีนจะใช้ได้กับพวกเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ในกรณีที่ต้องการให้แข็งตัวเร็ว

ขั้นตอนการใช้สารเคมีต่างๆที่กล่าวมาแล้ว ในการเตรียมพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว และทำให้พอลิเอสเตอร์แข็งตัวแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

วัตถุประสงค์ที่เป็นกรดส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของแข็ง ส่วนไกลคอลส่วนใหญ่อยู่ในสภาพของเหลว เติมวัตถุประสงค์ทั้งสองชนิดลงในถังทำปฏิกิริยา (reactor) ที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 200-220 องศาเซลเซียส ขณะเกิดปฏิกิริยาจะมีน้ำเกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาจะมีก๊าซออกซิเจนไม่ได้ มิฉะนั้น จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เรซินที่ได้มีสีเข้ม ดังนั้น จึงมีการเติมก๊าซเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไนโตรเจนลงในถัง ซึ่งนอกจากจะเข้าไปแทนที่ก๊าซออกซิเจนแล้ว ยังช่วยพา น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันออกจากถังอีกด้วย ทำให้เกิดพอลิเอสเตอร์เร็วขึ้น นอกจากนี้ อัตราการวน และความเร็วก๊าซเฉื่อยที่เข้าไป จะมีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นเช่นกัน ในขณะที่ปฏิกิริยาคำเนินไป จะมีการวัดขนาดของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อได้ขนาดตามต้องการก็จะหยุดปฏิกิริยาโดยเติมสารยับยั้งปฏิกิริยา และลดอุณหภูมิลง จะได้พอลิเอสเตอร์ที่มีลักษณะแข็งหรือเกือบแข็ง จากนั้นจะถูกล้างลงในถังซึ่งมีสไตรีนโมโนเมอร์เตรียมเอาไว้แล้ว ในขณะละลายพอลิเอสเตอร์ด้วยสไตรีนโมโนเมอร์ ต้องไม่ให้อุณหภูมิภายในถังเกิน 60 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันพอลิเอสเตอร์เรซินแข็งตัวก่อนที่จะนำไปแปรรูป



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทำพอลิ เอสเทอร์แข็ง

พอลิ เอส เทอร์ เรซินสามารถแข็งตัว เป็นพอลิ เอส เทอร์ แข็งได้หลายวิธีคือ

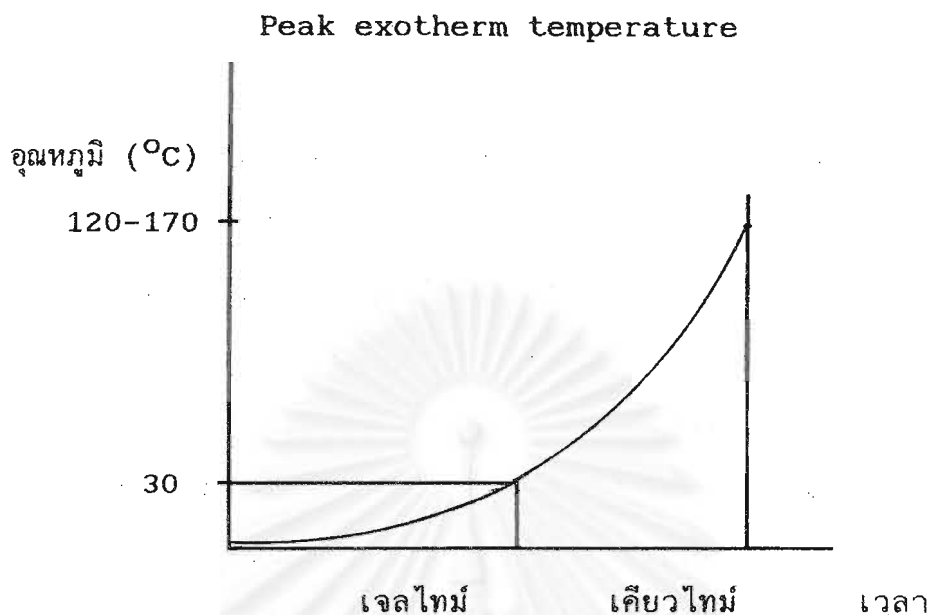
1. โดยอาศัยตัว เริ่มต้นปฏิกิริยา และความร้อน
2. โดยอาศัยตัว เริ่มต้นปฏิกิริยา และตัว เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง
3. โดยอาศัยแสงอุลตราไวโอเลต
4. โดยอาศัยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam)

วิธีที่ง่าย สะดวก และนิยมใช้กันมาก ได้แก่ การใช้ตัว เริ่มต้นปฏิกิริยา และตัว เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะที่พอลิ เอส เทอร์ แข็งตัว คือ ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลระหว่างสไตรีนโมโนเมอร์ และพันธะที่ไม่อิ่มตัวของพอลิ เอส เทอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) โดยมีตัว เริ่มต้นปฏิกิริยา และตัว เร่งปฏิกิริยา คอยกระตุ้นและ เร่งให้เกิดปฏิกิริยา สำหรับตัว เริ่มต้นปฏิกิริยา เพียงอย่างเดียว ณ อุณหภูมิห้อง จะไม่เกิดปฏิกิริยา ต้องอาศัยความร้อนกระตุ้นการทำงาน โดยทั่วไปการแข็งตัวของพอลิ เอส เทอร์จะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงแรก เป็นช่วงที่ได้เติมตัว เริ่มต้นปฏิกิริยา และตัว เร่งปฏิกิริยา จนกระทั่งเรซินเริ่มแข็งตัวเป็นวุ้น เรียกเวลานี้ว่าเจลไทม์ (gel time)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงหลังจากที่เรซินเริ่มแข็งตัวเป็นวุ้น จนกระทั่งเรซินแข็งตัวเต็มที่ เรียกเวลานี้ว่าเคียวไทม์ (cure time)

ปฏิกิริยาการแข็งตัวของพอลิ เอส เทอร์เรซินนี้ จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาภายหลังการเติมตัว เร่งปฏิกิริยาลงไปแล้ว แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ขณะที่ปฏิกิริยาการแข็งตัวดำเนินไป ความแข็งของพอลิ เอส เทอร์เรซินจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยา ซึ่งเรซินแข็งตัวได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเรซินจะแข็งตัวต่อไปเรื่อยๆ และเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องจากแข็งตัวไม่เต็มที่ ในกระบวนการผลิตจึงมักจะนำผลิตภัณฑ์ไปทำ post cure เสียก่อน โดยการอบที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-6 ชั่วโมง



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาขณะ เรซินแข็งตัว

องค์ประกอบที่มีผลต่อการแข็งตัวของพอลิ เอสเตอร์ เรซิน คือ

1. อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูง เรซินจะแข็งตัวเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ
 2. ปริมาณตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าปริมาณมาก จะแข็งตัวเร็วกว่า
 3. ปริมาณเรซิน ถ้ามีปริมาณมากจะแข็งตัวเร็วกว่าปริมาณน้อย
 4. ความชื้น หรือน้ำ ถ้าความชื้นสูง การแข็งตัวของเรซินจะช้า โดยปกติปริมาณน้ำที่มีอยู่ในพอลิ เอสเตอร์ต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 %
 5. ปริมาณออกซิเจน เนื่องจากออกซิเจนเป็นสารยับยั้งปฏิกิริยา ดังนั้น ถ้าปริมาณออกซิเจนสูง เช่น การกวนมากๆ จะทำให้ออกซิเจนเข้าสู่เรซิน ได้มาก การแข็งตัวจะช้าลง
- ขณะพอลิ เอสเตอร์แข็งตัวนั้น จะเกิดการหดตัว (shrinkage) โดย ปริมาตรประมาณ 6-8 %

พอลิ เอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว จะมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง คือ

1. การหล่อ (casting) นิยมใช้หล่อกระจกเทียม หล่อพระ หล่อหินอ่อนเทียม หล่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ทำกระดุม และอื่นๆ

2. การลามีเนตหรือการเคลือบ (laminating) นิยมใช้เคลือบรูป, เคลือบหน้าไม้อัด และอื่นๆ

3. การขึ้นรูปด้วยแม่แบบ (molding) ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส เช่น การทำถังบรรจุขนาดใหญ่, ส่วนประกอบของเครื่องบิน, ตัวถังรถยนต์, ฐานวางของ, เรือ, อ่างอาบน้ำ, และอื่นๆ

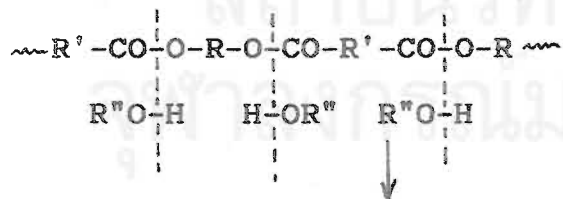
โดยทั่วไปแล้ว 80 % ของเรซินทั้งหมด จะถูกใช้งานในด้านผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส ส่วนที่เหลือใช้งานด้านการหล่อ และการลามีเนต

2.4 การย่อยสลายทางเคมีของเพท (DEPOLYMERIZATION OF PET)

เพทสามารถถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางเคมีได้หลายวิธี ดังนี้

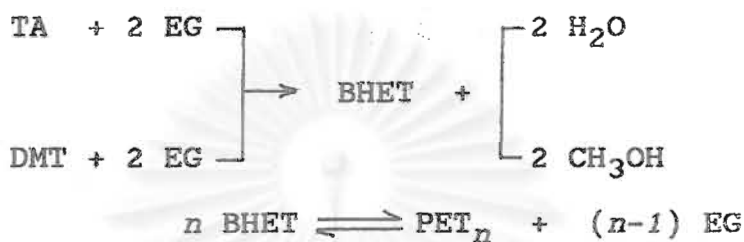
2.4.1 ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ผลที่ได้จากการย่อยสลายคือ ไดแอซิด และไดออล (คาร์บอกซิลิกแอซิด และแอลกอฮอล์) ซึ่งสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเตอร์ได้ใหม่ แต่ต้องผ่านกระบวนการแยกหรือทำให้บริสุทธิ์เสียก่อน การไฮโดรลิซิสเพทต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่นานมาก และยังไม่พบวิธีที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม(2)

2.4.2 แอลกอฮอล์ลิซิส (alcoholysis) ผลที่ได้จากปฏิกิริยาคือ ไดออล (HO-R-OH) และไดคาร์บอกซิเลต (R"OOC-R'-COOR") บริษัท Eastman Chemicals ได้ใช้เมทานอล ภายใต้ความร้อนและความดันสูงในการย่อยสลายเพทตั้งแต่ปี ค.ศ. 1977(3) ซึ่งวิธีนี้จะประสบผลสำเร็จมากกว่าวิธีแรก ผลที่ได้คือ ไดเมทิลเทเรฟธาเลต (DMT) และ EG



เมื่อ DMT ถูกทำให้เย็นลงจะเกิดเป็นผลึก ภายหลังจากการกรอง ล้างด้วยเมทานอล และกลั่น จะได้ DMT ที่มีความบริสุทธิ์มาก ซึ่งจะถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งในการสังเคราะห์เพทต่อไป ส่วน EG ที่ได้จะถูกนำไปกลั่นและทำให้บริสุทธิ์เพื่อใช้งานต่อไป

2.4.3 ไกลโคไลซิส (Glycolysis) โดยทั่วไปเพทถูกสังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างกรดเทเรพธาลิก (TA) กับ EG หรือ DMT กับ EG โดยในขั้นแรกจะเกิดเป็น BHET ขึ้นก่อน แล้วจึงพอลิเมอไรซ์เป็นเพท โดยการควบแน่นพร้อมทั้งได้ EG ออกมาดังนี้



ปฏิกิริยาควบแน่นสามารถเกิดได้ง่ายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะอะซีเตต (metal acetate) ชนิดต่างๆ หรือแอนติโมนีออกไซด์ และในทางกลับกัน ปฏิกิริยาย้อนกลับสามารถเกิดได้โดยการละลายเพทใน EG ที่มากเกินไป การศึกษาถึงการย่อยสลายเพทโดยปฏิกิริยาทางเคมีได้กระทำกันมานานหลายปีแล้ว(4-7) โดยการใช้ไดออลจำนวนมากเกินไป และไดออลที่นิยมใช้ได้แก่ EG, PG และ DEG เป็นต้น โดยมีโลหะอะซีเตตชนิดต่างๆเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Fujita, Sato และ Murakami(4) ได้นำเศษพอลิเอสเทอร์ต่างๆ ทั้งที่เป็นเส้นใย พิล์ม และพลาสติก (ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเพท) มาย่อยสลายโดยวิธีทางเคมีร่วมกันเพื่อให้ได้ BHET ที่มีคุณภาพสูง เพื่อนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเทอร์ใหม่ โดยใช้ EG ที่อุณหภูมิ 215-250 องศาเซลเซียส และถ้าหากนำเศษพอลิเอสเทอร์ทั้งหมดใส่เข้าไปพร้อมๆกัน จะเกิดปัญหาตามมาเนื่องจากเกิดการแข็งตัวของสารไม่สามารถทำการกวนต่อไปได้ เกิดความไม่สม่ำเสมอภายในระบบ ดังนั้น ต้องใช้เวลาในการย่อยสลาย และปริมาณ EG ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อที่ไม่ดีในทางปฏิบัติ และจะทำให้พอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติทางกายภาพ โดยเฉพาะจุดอ่อนตัว (softening point) ลดลง

Baliga และ Wong(8) ทดลองทำการย่อยสลายขวดเครื่องคีมที่ทำจากเพท โดยการไกลโคไลซ์ด้วย EG ปริมาณมากเกินไป ที่อุณหภูมิ 190 องศา-

เซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชนิด คือ ซิงก์อะซีเตต, เลดอะซีเตต, โคบอลต์อะซีเตต และแมงกานีสอะซีเตต เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการย่อยสลาย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย BHET ($> 75\%$) และไดเมอร์ (dimers) จากการตรวจสอบจะไม่พบโอลิโกเมอร์ (oligomer) ขนาดใหญ่ของเพออยู่เลย นอกจากนี้ ยังพบว่าซิงก์อะซีเตตจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงสุด เพราะจะให้ BHET ออกมามากที่สุด และพบว่าฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในขวดเครื่องต้มบางชนิดไม่มีผลใดๆต่อปฏิกิริยาไกลโคไลซิส

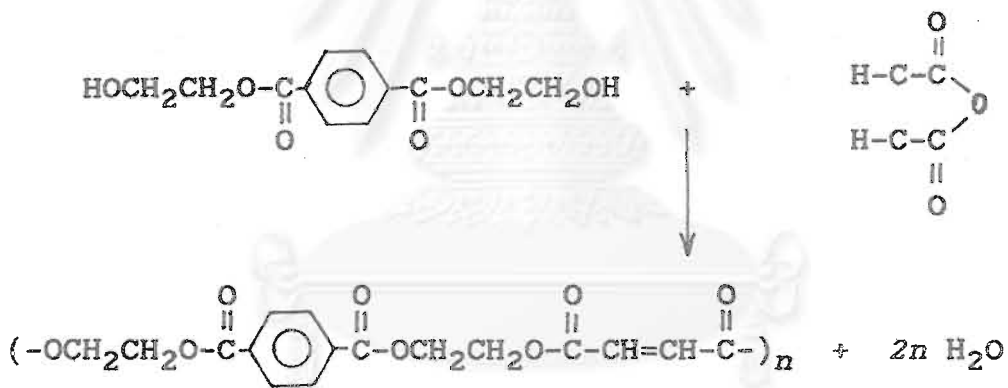
Vaidya และ Nadkarni⁽⁹⁾ ได้ทำการย่อยสลายเส้นใยเพทโดยการไกลโคไลซ์ด้วย PG อัตราส่วนต่างๆกัน (62.5% , 50% และ 32.5% โดยน้ำหนัก) และซิงก์อะซีเตต 0.5% (โดยน้ำหนักเทียบกับเพท) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน เพื่อนำไปใช้สังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวต่อไป ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายส่วนใหญ่ประกอบด้วย BHET , ไดเมอร์ และไตรเมอร์ (trimers) ซึ่งประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PG ที่ใช้เพิ่มขึ้น เขาได้ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ EG แทน PG ผลปรากฏว่าการใช้ EG ปริมาณมากเกินไป (อัตราส่วน 37.5:62.5 โดยน้ำหนักของเพทต่อ EG) จะได้ BHET ออกมาเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกัน

Thayer⁽¹⁰⁾ ได้กล่าวถึงการนำเพทกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีทางเคมี เพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยบริษัท Eastman Chemical และ Freeman Chemical ได้ทำการวิจัยพบว่ามี 3 วิธีด้วยกัน คือ นำผลที่ได้มาใช้ในการผลิตพอลิออล (polyols) สำหรับทำพอลิยูรีเทนโฟม, นำมาทำเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว หรือทำให้เป็นสารตั้งต้น แล้วนำพอลิเออร์เป็นเพทอีกครั้งหนึ่ง ในการทำโฟม จะได้จากการนำขวดเพทมาย่อยสลายด้วย DEG โดยใช้แมงกานีสอะซีเตตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้เป็นพอลิออลโมเลกุลสั้นๆ แล้วนำไปผสมกับพอลิออลในทางการค้าและสารเคมีอื่นๆ เพื่อผลิตเป็นโฟมแข็ง (rigid foam) สำหรับการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว จะใช้ PG ในการไกลโคไลซ์ ซึ่งผลที่ได้จากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ จะประกอบด้วย BHET และ bis-

(hydroxypropyl) terephthalate ซึ่งสารเหล่านี้ จะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ ส่วนปลายของโมเลกุล จึงสามารถทำปฏิกิริยากับพวกโค เบลิกแอซิดได้ เป็นพอลิ- เอสเตอร์เรซินชนิดที่ไม่อิมตัว

2.5 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวจากเพทที่ใช่แล้ว

Vaidya และ Nadkarni (9,11,12) ได้นำเส้นใยเพทมาย่อยสลาย ด้วย PG ปริมาณต่าง ๆ กัน แล้วนำผลที่ได้มาทำปฏิกิริยากับมาลีอิกแอนไฮไดรด์ให้ มีอัตราส่วนของหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่คาร์บอกซิลคงที่ 1.1 : 1 และให้ความร้อน กับสารจากอุณหภูมิห้องจนถึง 180 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1 1/2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และให้คงอุณหภูมินี้ไว้ 3 ชั่วโมง หลังจากนั้น ให้เพิ่มเป็น 200 องศาเซลเซียส จนครบ 10 ชั่วโมง และจำเป็นต้องกำจัดน้ำ ออกจากปฏิกิริยาตลอดการทดลอง การเกิดปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



แล้วจึงนำพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวที่ได้จากปฏิกิริยาไปละลายใน สไตรีนโมโนเมอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้สไตรีน 36 % โดยน้ำหนักของเรซิน พอลิเอสเตอร์เรซินที่ได้สามารถทำให้แข็งตัว โดยการใส่ MEKPO 1.5 % และโคบอลต์แนฟทีเนต 0.5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะที่จะนำไป ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยการหล่อ หรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลอง เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเรซินที่สังเคราะห์ได้จากเพทที่ ใช่แล้วนี้กับเรซินที่ใช้อยู่ทั่วไป ผลปรากฏว่าสมบัติด้านความทนแรงดึง (tensile strength) จะมีค่าประมาณ 24 N/mm² , ความทนแรงโค้งงอ (flexural strength) มีค่าระหว่าง 20 ถึง 40 N/mm² , ความทนทานต่อแรงกระแทก

(impact strength) มีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 kJ/m² , และความแข็ง (hardness) มีค่า 80 Shore D durometer และเรซินเหล่านี้มีอุณหภูมิของการบิดงอ (heat distortion temperature) ประมาณ 80 - 85 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าของเรซินทั่วไป (65 องศาเซลเซียส)

2.6 ผลิตภัณฑไฟเบอร์กลาส (GLASS FIBER REINFORCING PLASTIC, GRP)

ผลิตภัณฑไฟเบอร์กลาส เป็นผลิตภัณฑพลาสติกเสริมใยแก้ว เพื่อให้มีสมบัติที่เหนือกว่าวัสดุอื่นในหลายๆด้าน ได้แก่ ความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ความแข็งแรงในอัตราส่วนของน้ำหนักที่เท่าๆกัน สามารถประดิษฐ์ชิ้นงานซึ่งมีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย มีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าและฉนวนความร้อนที่ดีมาก และราคาถูก เป็นต้น ผลิตภัณฑไฟเบอร์กลาสที่ทำออกสู่ท้องตลาดมีหลายประเภท คือ ประเภทเฟอร์นิเจอร์ เช่น เก้าอี้ ม้านั่ง โต๊ะ ฯลฯ ประเภทสุขภัณฑ เช่น อ่างอาบน้ำ ห้องน้ำสำเร็จรูป อ่างล้างหน้า ฯลฯ ประเภทก่อสร้าง เช่น โคมแสงสว่าง กระเบื้องหลังคา ไม้แบบ ฯลฯ ประเภทอาหรัยรถยนต์ เช่น บังโคลน แผงหลังของรถยนต์ ฯลฯ ประเภทใช้สอยทั่วไป เช่น ข้อต่อท่อน้ำทั้งขนาดต่างๆ เป็นต้น ผลิตภัณฑไฟเบอร์กลาสมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ

2.6.1 พลาสติกหรือเรซิน ทำหน้าที่เป็นตัวยึดเหนี่ยวใยแก้ว ที่นิยมใช้คือ พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว สามารถทำให้แข็งตัว (cure) ได้ที่อุณหภูมิห้อง หรือที่อุณหภูมิสูง เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและโปรโมเตอร์ที่เหมาะสม จะได้เป็นพลาสติกแข็งซึ่งไม่หลอมละลาย พอลิเอสเตอร์เรซินจึงเป็นวัสดุคิบัหลักในการทำผลิตภัณฑไฟเบอร์กลาส เนื่องจาก ราคาถูก ทำงานได้ง่าย และมีความแข็งเป็นพิเศษ ง่ายต่อการนำมาหล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ เมื่ออยู่ในสภาพที่ยังไม่ได้ใช้งาน จะมีสภาพเป็นของเหลวชั้นใสคล้ายน้ำมันเครื่อง และเมื่อใส่สารเคมีลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น และเปลี่ยนสภาพเป็นพลาสติกแข็ง เรซินชนิดอื่นที่ใช้แทนกันได้แต่ไม่นิยม เพราะมีราคาแพงมาก เช่น อีพอกซี (epoxy) และพอลิยูรีเทน (polyurethane) เป็นต้น

2.6.2 ใยแก้ว (glass fiber) เป็นตัวเสริมกำลังให้กับพอลิเอสเตอร์เรซินในด้านการรับแรง (mechanical strength) ซึ่งจะมีหลาย

ลักษณะให้เลือกใช้แล้วแต่ความเหมาะสมของงาน เช่น แบบเส้นยาว (roving) แบบเส้นสั้น (chopped strand) แบบรีดเป็นผืน (mat) และแบบถักเป็นผืน (fabrics) เส้นใยแก้วนี้จะมีน้ำยาอาบผิวหลายชนิด เช่น silane finish หรือ chrome finish เป็นต้น ทำให้มีสมบัติยึดเกาะระหว่างเส้นใยแก้วกับเรซินดียิ่งขึ้น

2.7 ผลิตภัณฑ์หินอ่อนเทียม (CULTURE MARBLE)

ผลิตภัณฑ์หินอ่อนเทียม เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกหล่อประเภทหนึ่ง ที่ทำมาจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว แต่จะมีส่วนผสมที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นไปบ้าง และใช้เทคนิคพิเศษเล็กน้อยในการขึ้นรูป ในขณะนี้อุตสาหกรรมทำหินอ่อนเทียมกำลังได้รับความสนใจจากประชาชนมาก จึงมีโรงงานทำหินอ่อนเทียมเกิดขึ้นหลายโรง ส่วนมากจะมุ่งทำกระเบื้องปูพื้นและผนัง แผ่นบุโต๊ะและอ่างน้ำพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเหมาะสำหรับการทำหินอ่อนเทียม เพราะใช้งานสะดวก ทำให้มีสีต่างๆ ได้ อีกทั้งยังมีความคงทน และความต้านทานต่อการขูดขีด (abrasion resistance) สูง การทำผลิตภัณฑ์หินอ่อนเทียมนั้น ทุกชิ้นงานจะมีลวดลายที่ไม่เหมือนกัน ด้วยลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทางด้านศิลปะมากขึ้น นอกจากจะทำหินอ่อนเทียมแล้ว ยังสามารถทำหยกเทียม งาช้างเทียม หรือเซรามิคเทียมได้อีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการวิจัย

หมวดวัสดุและสารเคมี

1. ขวดเพท 4 ประเภท
 - ขวดน้ำอัดลม
 - ขวดน้ำดื่ม
 - ขวดน้ำมันพืช
 - ขวดน้ำอัดลมผสมขวดน้ำดื่ม (1:1 โดยน้ำหนัก)
2. ไกลคอล 3 ชนิด
 - เอทิลีนไกลคอล (EG)
 - โพรพิลีนไกลคอล (PG)
 - ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG)
3. ซิงก์อะซีเตต (ตัวเร่งปฏิกิริยา)
4. ก๊าซไนโตรเจน
5. มาเลอิกแอนไฮไดรด์
6. ไฮโดรควิโนน
7. สไตรีนโมโนเมอร์
8. พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว จากบริษัทสยามเคมีคอล-อินคัสตรี จำกัด (POLYLITE PC-600-S) เกรดงานหล่อ
9. 50 % เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKPO)
10. 6 % โคบอลต์ออกโตเอต (Co-octoate)
11. Accelerator RP-51 (ตัวเร่งปฏิกิริยาของ POLYLITE PC-600-S)
12. ไบแก้ว

หมวดเครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องบดหยาบ
2. ขวดแก้วกันกลม 4 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร

3. เครื่องกวน
4. ภาชนะให้ความร้อน (heating mantle)
5. เทอร์โมมิเตอร์
6. เครื่องควบแน่น (condenser) พร้อมข้อต่อ
7. บีกเกอร์
8. แม่แบบ
9. เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D
10. เครื่อง Vicat tester
11. เครื่องทดสอบ bending strength ของ LLOYD
12. เครื่อง IR Spectrophotometer
13. เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimetry)

3.1 การย่อยสลายขวดพลาสติกเคมี

1. บรรจุพอลิเมอร์ผ่านการบดด้วยเครื่องบดหยาบแล้ว ลงในขวดแก้ว ก้านกลม 4 คอ

2. เติมไกลคอล (ด้วยอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ : ไกลคอล เท่ากับ 35:65, 40:60 และ 60:40) และซิงก์อะซีเตต 0.5 % ของน้ำหนักพอลิเมอร์ที่ใช้ ลงในขวดแก้วก้านกลม 4 คอ ซึ่งต่อกับเครื่องกวน, เครื่องควบแน่น, เทอร์โมมิเตอร์, และท่อนำก๊าซไนโตรเจน

3. ปล่อยให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายดำเนินไปภายใต้บรรยากาศของ ก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส (โดยต้องเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 190 องศาเซลเซียส ภายในเวลาครึ่งชั่วโมง) และกวนสารตลอดเวลาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง พร้อมทั้ง reflux ตลอดการทดลอง อุปกรณ์การย่อยสลายแสดงไว้ใน รูปที่ 3.1

4. เมื่อครบ 8 ชั่วโมง ปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เย็นลงมา ณ อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยไม่ต้องกวน แล้วแบ่งสารส่วนหนึ่ง ไปหาค่าไฮดรอกซิล (hydroxyl value) (วิธีการหาแสดงไว้ในภาคผนวก)



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การย่อยสลายขบวนการที่ใช้ในการทดลอง

5. นำผลิตภัณฑ์ที่เย็นแล้วมาเติมน้ำกลั่นประมาณ 1 ลิตร หรือมั้งกวนโดยแรง เพื่อทำการล้างไกลคอลอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาออกไป กรองเอาส่วนตะกอนมาทำให้แห้งและเก็บไว้ ส่วนนี้เรียกว่า glycolized product ซึ่งจะถูกนำไปใช้สังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวต่อไป

3.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว⁽⁹⁾

1. นำ glycolized product ที่ได้จากการย่อยสลายขบวนการทางเคมี ในข้อ 3.1 มาผสมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (อัตราส่วนระหว่างค่าไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลเท่ากับ 1.1 : 1) ในขวดก้นกลม 4 คอ ที่ต่ออยู่กับเครื่องกวน, เครื่องควบคุมแรงดัน, เทอร์โมมิเตอร์, และท่อนำก๊าซไนโตรเจน ซึ่งในการศึกษานี้ จะใช้เฉพาะมาเลอิกแอนไฮไดรด์เท่านั้น เพราะฟูมาริกเป็นของแข็งที่ไม่หลอมเหลว ณ อุณหภูมิของการทดลอง

2. ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะดำเนินไปภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึง 180 องศาเซลเซียส

ภายในเวลา $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง และให้คงอุณหภูมิไว้ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้เพิ่มเป็น 200 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้จนครบ 2 ชั่วโมง (รวมเวลาทั้งหมด 6 ชั่วโมง) สำหรับ glycolyzed product ที่ได้จาก EG แต่ที่ได้จาก PG และ DEG จะคงอุณหภูมิไว้ 6 ชั่วโมง (รวมเวลาทั้งหมด 10 ชั่วโมง) และให้ทำการกวนสารตลอดเวลา พร้อมทั้ง reflux และแยกน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาออกตลอดการทดลอง

3. ภายหลังจากปฏิกิริยาเสร็จสิ้นลงแล้ว เติมไฮโดรควิโนนประมาณ 0.45 % ของน้ำหนักเพท ลงในเรซินเหลวร้อนที่ได้ เพื่อป้องกันการแข็งตัวของพอลิเอสเทอร์เรซินก่อนนำไปใช้งาน

4. ปล่อบให้เรซินเป็นตัว ภายใต้อากาศของก๊าซไนโตรเจน และนำไปละลายในสไตรีนโมโนเมอร์ 30% โดยน้ำหนักของเรซิน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

5. ปล่อบให้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปขึ้นรูป เป็นชิ้นทดสอบและผลิตภัณฑ์ต่อไป

3.3 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

1. นำพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว ซึ่งได้จากการข้อ 3.2 มาผสมกับโคบอลต์ออกไซด์ และ MEKPO ในอัตราส่วน 100 : 0.5 : 0.5 ตามลำดับ โดยผสมเรซินให้เข้ากับโคบอลต์ออกไซด์เสียก่อนในบีกเกอร์ โดยใช้แท่งแก้วกวนเบาๆ แล้วเติม MEKPO ภายหลังจากกวนของผสมทั้งหมดให้เข้ากัน และต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ (ข้อควรระวัง: อย่าให้โคบอลต์ออกไซด์สัมผัสกับ MEKPO เพราะจะเกิดความร้อนสูงมาก และจะเติม MEKPO ก็ต่อเมื่อต้องการเทแบบเท่านั้น) (13)

2. หลังจากของผสมเข้ากันดีแล้ว ให้เทลงในแม่แบบ

3. ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนผลิตภัณฑ์แข็งตัว จึงถอดจากแม่แบบ

4. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตัดด้วยเครื่องตัด เพื่อทำเป็นชิ้นทดสอบให้มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบสมบัติต่างๆ

5. นำ POLYLITE PC-600-S ผสมกับ Accelerator RP-51 และ MEKPO ในอัตราส่วน 100 : 0.5 : 0.5 ตามลำดับ โดยผสมเรซินให้เข้ากับ Accelerator RP-51 เสียก่อนในบีกเกอร์โดยใช้แท่งแก้วกวนเบาๆ แล้วจึงเติม MEKPO ภายหลัง กวนให้เข้ากัน และต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เป็นชิ้นทดสอบ เช่นเดียวกับวิธีในข้อ 2-4

3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.4.1 การทดสอบหาค่าความแข็ง (hardness) โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240⁽¹⁴⁾ ด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore D (รูปที่ 3.2) ซึ่งเป็นเครื่องวัดความแข็งของแผ่นพลาสติกที่มีความหนา มากกว่า 3 มม. ชิ้นทดสอบควรมีพื้นที่มากพอที่จะให้หัวกด (indenter) กดห่างจากขอบทุกด้านอย่างน้อย 12 มม. และต้องวัดความแข็งอย่างน้อย 6 ตำแหน่ง โดยที่แต่ละตำแหน่งควรห่างกันอย่างน้อย 6 มม. แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.2 เครื่องคูโรมิเตอร์ ชนิด Shore D

3.4.2 การหาค่าจุดอ่อนตัวไวแคท (Vicat softening point) โดยวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1525⁽¹⁵⁾ ด้วยเครื่อง Vicat tester ขึ้นทดสอบจะมีลักษณะเป็นแผ่นแบนเรียบ ขนาดความกว้างต้องมากกว่า 13 มม. ความหนาอยู่ระหว่าง 3 - 6.5 มม. ให้นำชิ้นทดสอบวางในภาชนะบรรจุน้ำมัน ซิลิโคน แล้วจึงวัดอุณหภูมิที่ทำให้หัวเข็มซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 1 มม.² และน้ำหนักกดมาตรฐาน (5000 กรัม) ให้สามารถกดคลึกลงไปในชิ้นทดสอบเป็นระยะ 1 มม. ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิกงที่ (50 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง) เครื่องทดสอบ แสดงไว้ในรูปแบบที่ 3.3

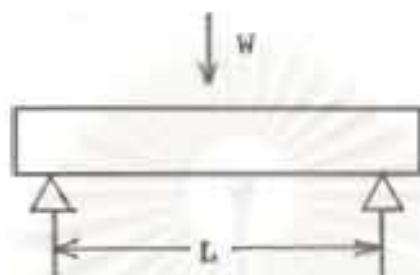


รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบหาจุดอ่อนตัวของพลาสติก (Vicat tester)

3.4.3 การทดสอบค่าการคดโค้ง (bending test) เป็นการหาค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of rupture, M.O.R.) ซึ่งมีหน่วยเป็น N/mm² หรือ MPa คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{M.O.R.} = \frac{3 W L}{2 b d^2} = \frac{1.5 W L}{b d^2}$$

- โอบที่ W = แรงที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตกหัก , นิวตัน (N)
 L = ความยาว (span length) , มิลลิเมตร (mm)
 b = ความกว้าง , มิลลิเมตร (mm)
 d = ความหนา , มิลลิเมตร (mm)



ตัดชิ้นทดสอบไม้มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร และ หนา 4 มิลลิเมตร แล้วนำไปวางบนคานรองรับของเครื่องทดสอบ LLOYD 500 (รูปที่ 3.4) ให้แรงกดแก่ชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างคานทั้งสอง ซึ่งรองอยู่ด้านล่าง แล้วนำค่าแรงกดซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบแตกหัก มาคำนวณหาค่า M.O.R. (วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 790M⁽¹⁶⁾)



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบ LLOYD 500

3.5 การทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสจากพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดที่ไม่อิมตัว

3.5.1 การย่อยสลายขวดเพท

นำขวดเพททั้งประเภทขวดน้ำดื่ม และน้ำอัดลม มาบดคละกันไป โดยไม่แยกประเภท แล้วทำการโกลโคไลซ์ด้วย PG โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง เพท : โกลคอลล เท่ากับ 40 : 60 เช่นเดียวกับวิธีในหัวข้อ 3.1

3.5.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

นำผลที่ได้จากข้อ 3.5.1 ไปทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพื่อสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว ด้วยวิธีเดียวกับข้อ 3.2 แล้วนำ เรซินที่สังเคราะห์ได้ ไปตรวจสอบด้วยเครื่อง IR Spectrophotometer และ เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimetry) แล้วนำไปเปรียบ เทียบกับเรซิน จากบริษัทสยามเคมีคอล อินดัสตรี จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานผู้ผลิต พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวรายใหญ่ของประเทศไทย และผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์- กลาสในท้องตลาดขณะนี้ จะใช้เรซินที่ผลิตได้จากบริษัทนี้เป็นส่วนใหญ่

3.5.3 การหา GEL TIME และ CURE TIME เพื่อหาเวลาในการ แข็งตัวและความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยา โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่ผสมเรซินเข้าเป็น เนื้อเดียวกับโอบอลต์ออกโตเอต และ MEKPO แล้วตั้งทิ้งไว้ ให้ใช้แท่งแก้วจุ่ม ลงในของผสม ยกเรซินให้ติดปลายแท่งแก้วขึ้นมา จนกระทั่งเรซินไม่ไหลกลับลง ไปในบีกเกอร์ ก็จะเป็น gel time ในขณะที่เดียวกันก็จุ่มเทอร์โมมิเตอร์ไว้ใน เรซิน แล้วบันทึกอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิสูงสุด เวลาที่ได้เป็น cure time

3.5.4 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

1. นำใบแก้ววางลงในแม่แบบ (30% โดยน้ำหนัก)
2. นำพอลิเอสเทอร์เรซิน ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ใน ข้อ 3.5.2 มาผสมเข้ากับโอบอลต์ออกโตเอต และ MEKPO เช่นเดียวกับวิธีใน ข้อ 3.3(13)
3. หลังจากของผสมเข้ากันได้ดีแล้ว ให้เทลงในแม่แบบ ซึ่งทาน้ำยาถอดแบบ และมีเส้นใบแก้ววางอยู่แล้ว
4. ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนผลิตภัณฑ์แข็งตัว จึงถอดออกจาก แม่แบบ

5. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตัดด้วยเครื่องตัด เพื่อทำเป็นชิ้นทดสอบขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบสมบัติต่างๆ

6. นำเรซิน POLYLITE PC-600-S ผสมกับ accelerator RP-51 และ MEKPO แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบเช่นเดียวกัน

3.6 การทำหินอ่อนเทียม (CULTURED MARBLE)

ใช้เรซินที่ได้จากข้อ 3.5.2 มาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายหินอ่อนธรรมชาติ โดยใช้วิธีการขึ้นรูปเหมือนข้อ 3.3 เพียงแต่ใช้ส่วนผสม และเทคนิคพิเศษเล็กน้อย โดยการเติมผงแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปในเรซินประมาณ 1 เท่าเรซิน พร้อมทั้งใช้ผงสีควนให้เป็นลวดลาย⁽¹³⁾ แล้วจึงเทลงในแม่แบบที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ประมาณครึ่งชั่วโมง เรซินจะแข็งตัว ถอดออกจากแม่แบบ แล้วนำไปขัดตบแต่งด้านหลังด้วยกระดาษทราย (เทคนิคการผสม และการทำให้เกิดลวดลาย แล้วแต่ความชำนาญของผู้ผลิต)

ผลการวิจัย

4.1 ผลการย่อยสลายขวดพลาสติกทางเคมี

ผลการย่อยสลายพลาสติกจากขวดน้ำมันพืช ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำดื่ม และขวดน้ำดื่มผสมขวดน้ำอัดลม แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการย่อยสลายขวดพลาสติกด้วยไกลคอล

สูตรที่	พหุ: ไกลคอล	น้ำหนักที่ได้ (กรัม)*	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ที่ได้	ค่าไฮดรอกซิล mg of KOH/g
1	ขวดน้ำมันพืช <u>พหุ: EG</u> 35:65	--	ไหม้เกรียมเป็นสี น้ำตาลเข้ม	--
	40:60	--	ไหม้เกรียมเป็นสี น้ำตาลเข้ม	--
3	ขวดน้ำดื่ม <u>พหุ: EG</u> 35:65	107.93	ผงสีขาว	703.49
	40:60	119.10	ผงสีขาว	665.12
	<u>พหุ: PG</u> 40:60	248.60	ของเหลวใสสีฟ้า	765.21
	60:40	171.20	ของเหลวใสสีฟ้า	540.31
	<u>พหุ: DEG</u> 40:60	242.20	ของเหลวใสสีเขียว	850.25
	60:40	172.40	ของเหลวใสสีเขียว	539.64

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สูตรที่	เพท: ไกลคอล	น้ำหนักที่ได้ (กรัม)*	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ที่ได้	ค่าไฮดรอกซิล mg of KOH/g
	ขวดน้ำอัลคม			
	<u>เพท:EG</u>			
9	35:65	121.23	ผงสีครีม	464.73
10	40:60	115.5	ผงสีขาว	550.00
	<u>เพท:PG</u>			
11	40:60	230.50	ของเหลวใสสีเขียว	811.05
	<u>เพท:DEG</u>			
12	40:60	241.50	ของเหลวใสสีเขียว	791.21
	น้ำคั้น+น้ำอัลคม			
	<u>เพท:EG</u>			
13	35:65	114.01	ผงสีขาว	622.49
14	40:60	109.21	ผงสีขาว	511.63
	<u>เพท:PG</u>			
15	40:60	241.64	ของเหลวใสสีเขียว	810.27
	<u>เพท:DEG</u>			
16	40:60	246.23	ของเหลวใสสีเขียว	865.38

* น้ำหนักขวดเพท เริ่มต้น 96 กรัม

4.2 ผลการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ชนิดที่ไม่อิมตัว

ผลการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวจากขวดเพทที่ใช้แล้ว ประเภทต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

สูตรที่	น้ำหนักที่ได้ (กรัม)	ลักษณะของพอลิเอสเทอร์เรซิน
ขวดน้ำดื่ม		
3	153.72	ของแข็งสีขาวขุ่น มีความอ่อนตัว นิ่ม
4	180.51	ของแข็งสีขาวขุ่น มีความอ่อนตัว นิ่ม
5	347.25	ของเหลวขุ่นสีครีม มีความหนืดสูง
6	208.23	ของเหลวขุ่นสีครีม มีความหนืดสูง
7	345.31	ของเหลวขุ่นสีครีม มีความหนืดสูง
8	204.57	ของเหลวขุ่นสีครีม มีความหนืดสูง
ขวดน้ำอัดลม		
9	162.47	ของแข็งสีน้ำตาล มีความอ่อนตัว นิ่ม
10	177.89	ของแข็งสีขาวขุ่น มีความอ่อนตัว นิ่ม
11	351.35	ของเหลวขุ่นสี เขียวอ่อน มีความหนืดสูง
12	348.42	ของเหลวขุ่นสี เขียวอ่อน มีความหนืดสูง
ขวดน้ำดื่ม+น้ำอัดลม		
13	161.48	ของแข็งสีขาวขุ่น มีความอ่อนตัว นิ่ม
14	157.32	ของแข็งสีครีม มีความอ่อนตัว นิ่ม
15	367.52	ของเหลวขุ่นสี เขียวอมเหลือง มีความหนืดสูง
16	351.31	ของเหลวขุ่นสี เขียวอมเหลือง มีความหนืดสูง

4.3 ลักษณะของพอลิเอสเทอร์แข็ง

เมื่อนำพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ทั้งที่ได้จากโรงงานและทำการสังเคราะห์ได้มาผสมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยา และโพรมิเตอร์ ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปหล่อในแม่แบบ จะได้พอลิเอสเทอร์แข็ง ที่มีลักษณะแตกต่างกัน ในด้านของสี ความเงามัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะของพอลิเอสเทอร์แข็งซึ่งขึ้นรูปโดยการหล่อ

สูตรที่	ลักษณะของพอลิเอสเทอร์แข็ง
เรซินจากโรงงาน ขวดน้ำดื่ม	ใสไม่มีสี โปร่งใส ไม่มีลวดลาย มีความเงามากที่สุด
3	มีสีครีม ทึบแสง ไม่มีลวดลาย มีความเงาเล็กน้อย
4	มีสีครีม ทึบแสง ไม่มีลวดลาย มีความเงาเล็กน้อย
5	มีสีเหลือง โปร่งแสง ไม่มีลวดลาย มีความเงามากกว่า
6	มีสีส้มออกน้ำตาล โปร่งแสง มีความเงามากกว่า EG
7	มีสีครีมออกเหลือง โปร่งแสงเล็กน้อย ไม่มีลวดลาย ความเงาน้อยกว่าของ PG แต่มากกว่าของ EG
8	มีสีครีมออกเหลือง โปร่งแสงเล็กน้อย ไม่มีลวดลาย ความเงาน้อยกว่าของ PG แต่มากกว่าของ EG
ขวดน้ำอัดลม	
9	มีสีน้ำตาล ทึบแสง ไม่มีลวดลาย ผิวด้าน ไม่เงา
10	มีสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ไม่มีลวดลาย มีความเงาเล็กน้อย
11	มีสีครีม โปร่งแสง ไม่มีลวดลาย มีความเงามากกว่า EG
12	มีสีเหลือง โปร่งแสงเล็กน้อย มีความเงาเล็กน้อย
น้ำดื่ม+น้ำอัดลม	
13	มีสีครีมออกเหลือง ทึบแสง ผิวหน้าด้าน ไม่เงา
14	มีสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ไม่มีลวดลาย มีความเงาเล็กน้อย
15	สีเหลืองอ่อน โปร่งแสงมากที่สุด มีความเงามากกว่า EG
16	มีสีเหลือง โปร่งแสงเล็กน้อย มีความเงาเล็กน้อย

4.4 ผลการทดสอบสมบัติของฉันทดสอบ

4.4.1 ความแข็ง (hardness) ผลการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องคูโรมีเตอร์ ชนิด Shore D แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งของพอลิเอสเตอร์แข็ง

สูตรที่	ความแข็ง (shore D)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
เรซินจากโรงงาน	75	75	90	60	35	50	64.2
ขวดน้ำส้ม							
3	50	52	50	65	46	55	53.0
4	65	60	70	65	80	70	68.3
5	55	55	70	60	60	55	59.2
6	32	30	31	47	80	41	43.5
7	70	70	70	85	90	85	78.3
8	50	60	40	53	60	52	52.5
ขวดน้ำอัดลม							
9	80	50	52	50	47	50	54.8
10	55	65	65	50	60	58	58.8
11	80	75	75	80	80	75	77.5
12	80	80	80	60	70	70	73.3
น้ำส้ม+น้ำอัดลม							
13	46	35	65	60	50	55	51.8
14	46	65	70	45	65	55	57.6
15	85	75	70	85	85	85	80.8
16	60	62	82	70	72	70	69.3

4.4.2 จุดอ่อนตัว (softening point) ผลการหาจุดอ่อนตัวของ
พอลิเอสเทอร์แข็ง ด้วยเครื่อง Vicat Tester แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 จุดอ่อนตัวของพอลิเอสเทอร์แข็ง

สูตรที่	จุดอ่อนตัว (องศาเซลเซียส)
เรซินจากโรงงาน	91.2
ขาค้ำ	
3,4	> 150
5,6	> 150
7,8	> 150
ขาค้ำ	
9	> 150
10	> 150
11	120.0
12	> 150
น้ำค้ำ+น้ำค้ำ	
13	135.5
14	135.0
15	138.0
16	> 150

4.4.3. **BENDING STRENGTH** ผลการทดสอบค่าความดัดโค้งแสดง
ไว้ในตารางที่ 4.6

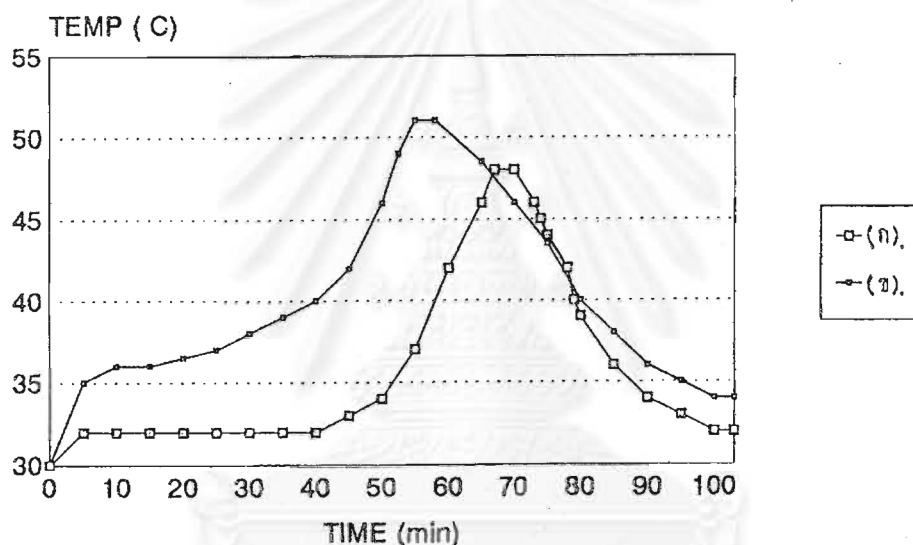
ตารางที่ 4.6 ค่าความดัดโค้งของพอลิ เอสเตอร์แข็ง

ชนิดของรีนทดสอบ (ชนิดขวด: ไกลคอล)	bending strength (N/mm ²)
น้ำคีม:EG 40:60	25.21
อัดลม:EG 40:60	30.51
ผสม:EG 40:60	21.80
น้ำคีม:PG 40:60	21.61
อัดลม:PG 40:60	38.40
ผสม:PG 40:60	25.15
น้ำคีม:DEG 40:60	38.40
อัดลม:DEG 40:60	22.33
ผสม:DEG 40:60	38.40
เรซินจากโรงงาน	17.20

4.5 ผลการทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส

4.5.1 ลักษณะและสมบัติของเรซินที่สังเคราะห์ได้

1. เป็นของเหลวหนืดสีเหลืองอมน้ำตาล โปร่งแสง
2. ความหนืดของเรซินเท่ากับ 992 เซนติพอยส์ (วัดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer) เท่ากับเรซินของโรงงาน
3. gel time และ cure time ของเรซินที่สังเคราะห์ได้เทียบกับเรซินจากโรงงาน แสดงไว้ในรูปที่ 4.1



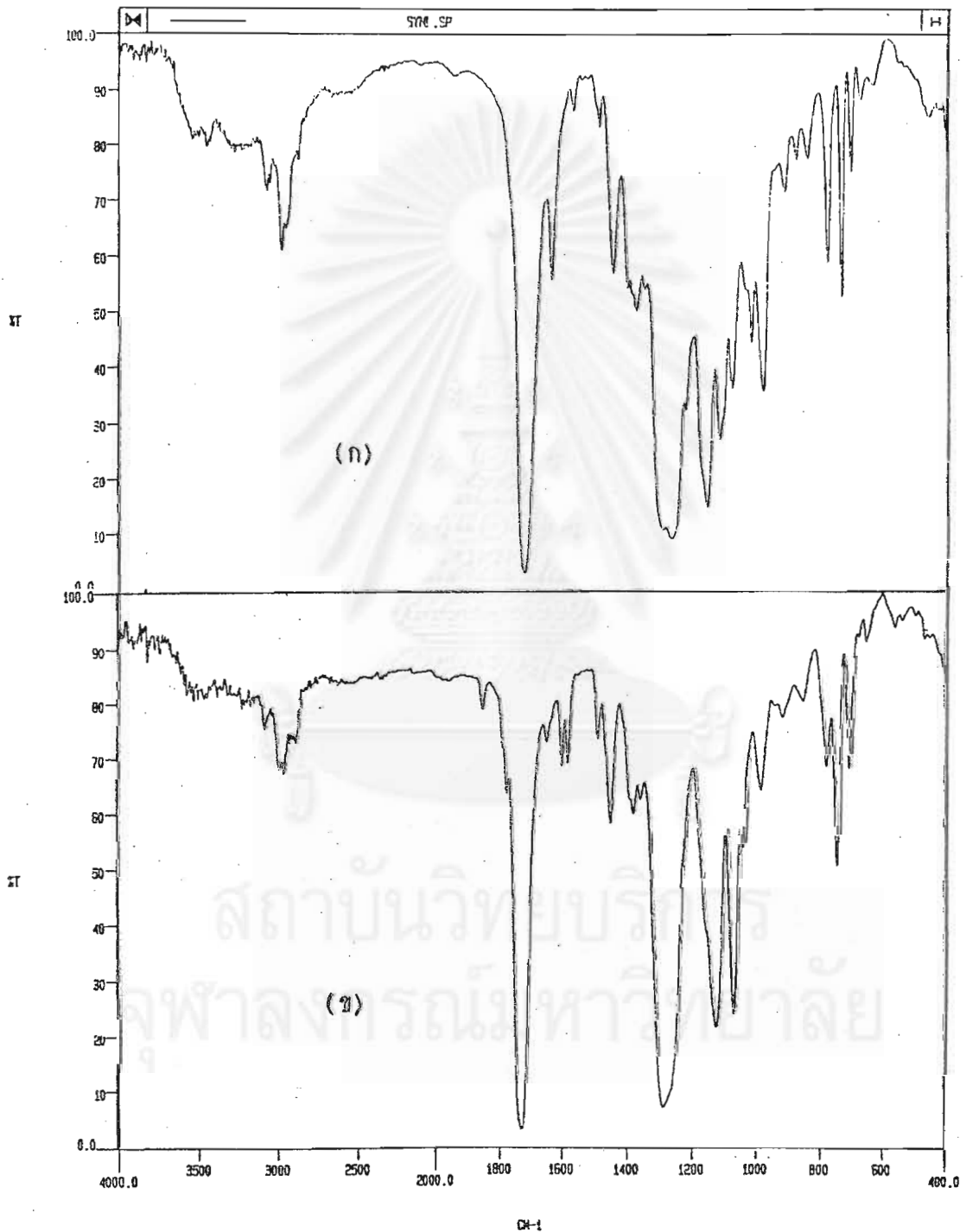
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาขณะเรซินแข็งตัว

4. เรซินที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IR และ DSC เปรียบเทียบกับเรซินของโรงงาน แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 จะเห็น peak ที่ตำแหน่ง 1725 ซึ่งเป็นของ C=O และ 1269 เป็นของ C-O ที่อยู่ในหมู่เอสเตอร์ ส่วนตำแหน่งที่ 1646 เป็นของ C=C ในอะโรมาติกของสไตรีน และตำแหน่ง 2700-3994 เป็นของหมู่ OH ซึ่งมีอยู่ในน้ำหรือไกลคอล ถ้านำกราฟทั้ง 2 ซ้อนกัน ก็จะได้ peak ที่ใกล้เคียงกัน

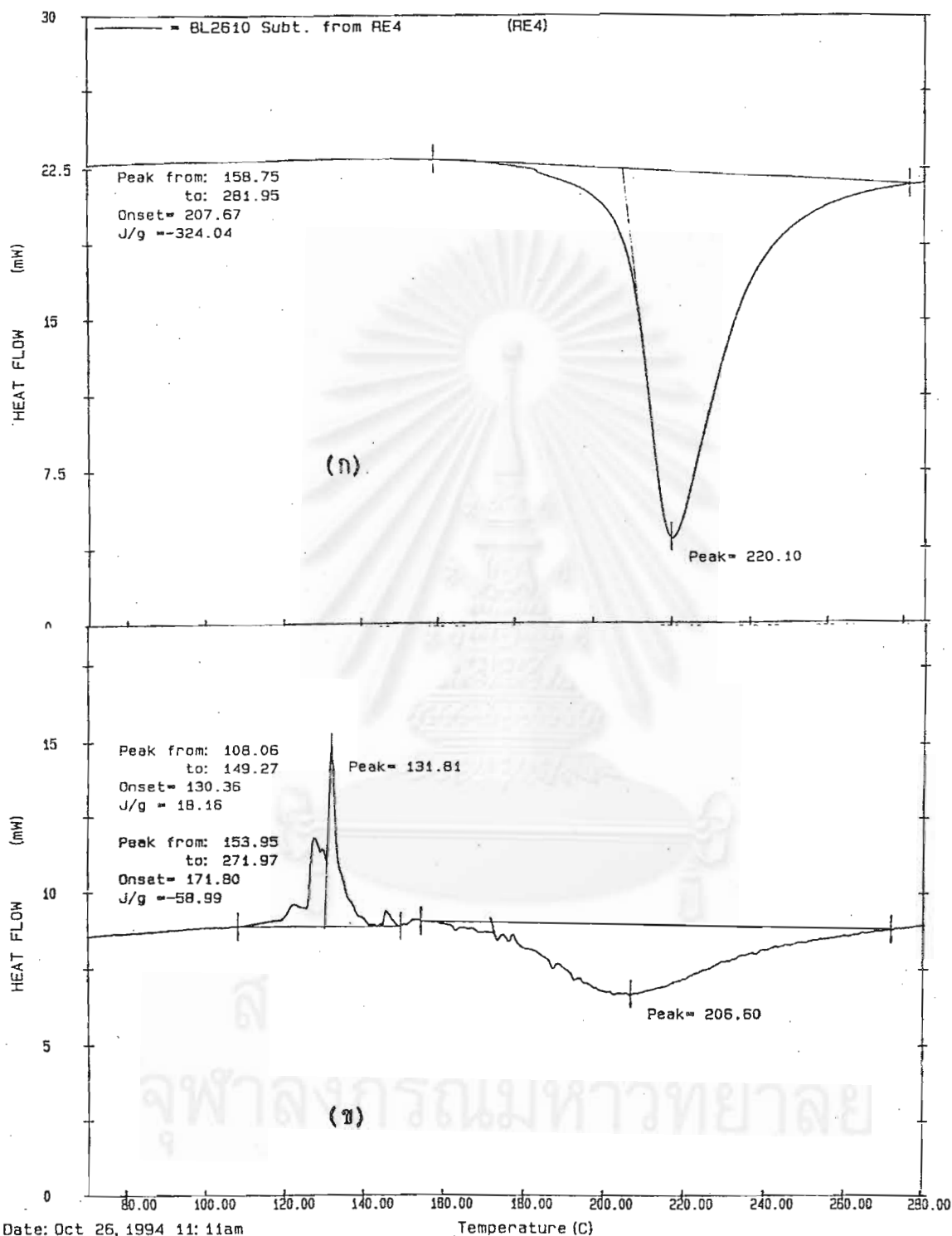
จากรูปที่ 4.3 (ก) จะแสดง T_m ของเรซินที่สังเคราะห์ได้ เท่ากับ 220.10 องศาเซลเซียส สำหรับรูป 4.3 (ข) จะแสดงการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 131.81 องศาเซลเซียส และ T_m ที่อุณหภูมิ 206.60 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำ

กว่าของเรซินที่สังเคราะห์ได้ และ peak จะกว้างกว่า เนื่องจากการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลมากนั่นเอง



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมิตัวด้วยเครื่อง IR Spectrophotometer

(ก) เรซินที่สังเคราะห์ได้ (ข) เรซินจากโรงงาน



Date: Oct 26, 1994 11: 11am
 Scanning Rate: 20.0 C/min
 Sample Wt: 5.800 mg Path: a:\
 File 1: RE5

PERKIN-ELMER DSC7

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวด้วยเครื่อง DSC
 (ก) เรซินที่สังเคราะห์ได้ (ข) เรซินจากโรงงาน

4.5.2 สมบัติของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส

สมบัติความแข็ง (hardness), bending strength และ จุดอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening point) ของเรซินที่สังเคราะห์ได้ เมื่อนำไปขึ้นรูปโดยไม่เสริมใยแก้วและเสริมใยแก้ว 30 % เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ได้จากเรซินของโรงงานทั้งที่ไม่เสริมใยแก้วและเสริมใยแก้ว 30 % แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส

สมบัติ	เรซินโรงงาน	เรซินโรงงาน +30% ใยแก้ว	เรซินสังเคราะห์	เรซินสังเคราะห์ +30% ใยแก้ว
ความแข็ง (Shore D)	64.2	81.6	82.5	92
bending strength (N/mm ²)	17.2	35.9	26.3	42.8
จุดอ่อนตัวไวแคต (°C)	91.2	125	135	> 150

4.6 ผลการทำหินอ่อนเทียม

เรซินที่ใช้ทำหินอ่อนเทียม เป็นชนิดเดียวกับที่ทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสจากการใส่แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อ และน้ำหนักมากขึ้น เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงหินอ่อนธรรมชาติ สมบัติต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 และตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.8 สมบัติของผลิตภัณฑ์หินอ่อนเทียม

สมบัติ	เรซินโรงงาน	เรซินโรงงาน + CaCO_3	เรซินสังเคราะห์	เรซินสังเคราะห์ + CaCO_3
ความแข็ง (Shore D)	64.2	75.8	82.5	86.3
bending strength (N/mm^2)	17.2	14.6	26.3	19.4
จุดอ่อนตัว ไวแคต ($^{\circ}\text{C}$)	91.2	> 150	135	> 150



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างชิ้นงานซึ่งขึ้นรูปด้วย เรซินที่สังเคราะห์ได้

การอภิปรายผล

5.1 ผลจากการย่อยสลายขวดพลาสติกทางเคมี

5.1.1 การย่อยสลายขวดพลาสติกประเภทขวดน้ำมันพืช ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากเกิดการไหม้ขึ้นเสียก่อน อาจเนื่องจากพลาสติกที่ใช้ทำขวดน้ำมันพืช เป็นคนละเกรดกับที่ใช้ทำขวดน้ำอัดลมหรือขวดน้ำดื่ม หรือมีฉนวน ผู้ผลิตน้ำมันพืชอาจใช้ขวดพีวีซีมาบรรจุน้ำมันพืช ซึ่งจะเป็นการยากในการคัดเลือกหรือแบ่งประเภทของขวดอย่างถูกต้องถ้าต้องทำในปริมาณมาก ดังนั้น จึงจะไม่ใช้ขวดน้ำมันพืชในการย่อยสลายเพื่อนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว เพราะจะทำให้ยุ่งยากในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

5.1.2 ผลที่ได้จากการไกลโคไลซ์พลาสติกด้วย EG จะเป็นตะกอนแข็งสีขาวที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถกรอง และล้างด้วยน้ำเอทิลไกลคอลอิสระ (free glycol) และสารอื่นๆที่เหลือจากปฏิกิริยาออกไปได้ ดังนั้นสารที่ได้จึงค่อนข้างบริสุทธิ์ เพื่อใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวต่อไป ซึ่งต่างจากการไกลโคไลซ์ด้วย PG และ DEG จะได้เป็นของเหลวใส เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำก็ไม่มีตะกอนเกิดขึ้น และเมื่อสกัดด้วยน้ำ (water extraction) จะได้ตะกอนที่มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถทำการกรองได้ ดังนั้น จึงลดขั้นตอนการล้างไกลคอลอิสระออกไป และใช้สารที่ได้จากปฏิกิริยาไกลโคไลซิสไปทำการพอลิเมอไรส์ เป็นพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวต่อไปได้เลย

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าไฮดรอกซิลของ glycolyzed products ที่ได้ ทุกค่าสูงกว่าค่าไฮดรอกซิลของ BHET (441.5) และ dimer (251.3) (8) ทั้งนี้เนื่องจากยังมีไกลคอลอิสระเหลืออยู่นั่นเอง นอกจากนี้ ค่าไฮดรอกซิลที่ได้ จะต่างจากที่ Vaidya และ Nadkarni (9) ทำให้ เพราะเขาทั้งสองได้ใช้พลาสติกที่เป็นเกรดสำหรับทำเส้นใยในการวิจัย และอัตราส่วนของการใช้ไกลคอลก็แตกต่างกัน (62.5 %, 50 % และ 32.5 % โดยน้ำหนัก) ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการย่อยสลายแตกต่างกัน

การที่ตะกอนของ glycolyzed products ซึ่งได้จากการย่อยสลายด้วย PG และ DEG มีขนาดเล็กมาก อาจเนื่องจากทั้ง PG และ DEG สามารถ

ย่อยสลายโมเลกุลของเพทได้ดีมาก จนขนาดลดลงเป็นโมโนเมอร์ หรือไดเมอร์ จึงไม่สามารถกรองเอาไว้ได้ และบางส่วนอาจจะละลายน้ำได้ ในขณะที่ EG จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพทได้น้อยกว่าในเวลาเท่าๆกัน และสารที่ได้อาจยังมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ (oligomers)

5.1.3 Glycolyzed products ซึ่งได้จากการย่อยสลายด้วย PG และ DEG จะเป็นของเหลวใส อาจมีสีฟ้าอ่อน หรือเขียวอ่อน ทั้งนี้เพราะขบวนการที่สังเคราะห์ได้มีสีแตกต่างกันไปเล็กน้อย จึงเหมาะจะนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ไม่เข้มงวดด้านสีมากนัก หรือใส่ผงสีเข้าไปเพื่อช่วยให้มีสีสวยงามขึ้น

5.2 ผลจากการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว

5.2.1 กรดไม่อิ่มตัวที่นำมาทำปฏิกิริยากับ glycolyzed products ได้แก่ มาลีอิกแอนไฮไดรด์ และพุมาริกแอซิด ผลปรากฏว่า พุมาริกแอซิดซึ่งเป็นของแข็ง จะไม่หลอมละลาย ณ อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ (180 องศาเซลเซียส) ทำให้ลำบากในการกวนสาร และไม่เกิดปฏิกิริยาแม้เวลาผ่านไป จึงใช้เฉพาะมาลีอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งสามารถควบคุมปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า

5.2.2 พอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้จาก glycolyzed products ของ EG จะใช้เวลาในการสังเคราะห์น้อยที่สุดคือ 5-6 ชั่วโมง เนื่องจากเรซินที่ได้มีความหนืดสูงมาก จนไม่สามารถกวนต่อไปได้ ซึ่งถ้าปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อ เรซินจะแข็งติดขวดแก้ว จึงต้องรีบเทออกจากขวดเสียก่อนที่เรซินจะเย็นลง และเมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เรซินที่ได้จะมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวขุ่นนึ่มๆ ไม่สามารถละลายในสไตรีนโมโนเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง เพราะพอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้จาก EG จะมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างมากกว่าที่ได้จาก PG และ DEG จึงสามารถเกิดผลึกได้ ถ้าต้องการให้ละลายในสไตรีนโมโนเมอร์ต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น (100 องศาเซลเซียส) แต่เมื่อเรซินเย็นตัวลงก็จะแข็งติดบีดเกอร์อีก ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ เพราะก่อนใช้งานต้องนำไปทำให้ร้อนก่อนจึงจะเทลงในแม่แบบได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ยุ่งยากและสิ้นเปลือง ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน การทดลองนี้จะสอดคล้องกับที่ Vaidya และ Nadkarni ได้

ทำให้ ส่วนพอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้จาก glycolyzed product ของ PG และ DEG จะมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงที่อุณหภูมิห้อง และเนื่องจากใน glycolyzed product ยังมีไกลคอลอิสระปนอยู่ด้วยซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับมาลีอิกแอนไฮโดรด์ได้เช่นกัน แต่จะได้พอลิเอสเทอร์ที่โมเลกุลมีขนาดเล็กกว่า จึงเป็นของเหลวไหลได้ ณ อุณหภูมิห้อง และสามารถละลายในสไตรีนโมโนเมอร์ได้ง่ายกว่า เหมาะที่จะนำไปใช้งานด้านการหล่อ

5.2.3 พอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้จาก PG และ DEG จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่จะพบว่าอัตราส่วนระหว่างเพทและไกลคอลที่เหมาะสมคือ 40:60 (ไกลคอลมากเกินไป) เพราะจะทำให้ปริมาณเรซินออกมามากกว่าการใช้ในอัตรา 60:40 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และไม่ว่าจะใช้ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม หรือ ขวดทั้งสองชนิดผสมกัน ผลที่ได้ก็จะไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในทางปฏิบัติหน้าที่ใช้ขวดทั้งสองชนิดปะปนกันไปโดยไม่ต้องคัดแยก

5.3 ผลจากการขึ้นรูปและทดสอบสมบัติ

5.3.1 เมื่อพิจารณาสมบัติในด้านสี และความใสของชิ้นงาน จะพบว่าเรซินที่ได้จาก PG จะดีที่สุดเพราะให้ชิ้นงานที่โปร่งแสงมากที่สุด สำหรับเรซินที่ได้จาก DEG จะโปร่งแสงน้อยกว่า และจาก EG จะทึบแสง ส่วนสีของชิ้นงานจะออกไปในโทนสีเหลือง ซึ่งจะแตกต่างจากเรซินที่ได้จากโรงงาน ซึ่งมีลักษณะใสและไม่มีสี ทั้งนี้เนื่องจากเรซินที่สังเคราะห์ได้มาจากขวดเพทซึ่งได้มีการเติมสารเติมแต่ง (additives) ลงไปในระหว่างกระบวนการผลิต

5.3.2 เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความแข็ง (hardness) ของชิ้นทดสอบพบว่าชิ้นทดสอบที่ได้จากเพท : ไกลคอล (EG, PG และ DEG) เท่ากับ 40:60 จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าอัตราส่วนอื่น และที่ให้ค่าความแข็งมากที่สุดจะได้จากขวดน้ำดื่มผสมกับขวดน้ำอัดลม โดยการใส่ PG ซึ่งจะมีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ได้จากเรซินของโรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

5.3.3 เมื่อพิจารณาสมบัติด้านจุดอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening point) จะได้ว่าจุดอ่อนตัวไวแคตของเรซินจากโรงงานมีค่า 91.2 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าของเรซินที่สังเคราะห์ได้ทุกสูตร และบางสูตรจะสูงกว่า 150

องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทนความร้อนได้มากขึ้น

5.3.4 เมื่อพิจารณาสมบัติด้าน bending strength จะพบว่าเรซินของโรงงานจะมีค่าต่ำกว่าเรซินที่สังเคราะห์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งจะทดสอบกับเรซินที่ได้จากเพท : โกลคอลลินอัตราส่วน 40:60 เท่านั้น จะเห็นว่าการขึ้นทดสอบที่ได้จากขวดน้ำดื่ม : PG , ขวดน้ำดื่ม : DEG และ ขวดผสม : DEG จะให้ค่าสูงที่สุดและเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากขึ้นทดสอบไม่แตกหักแต่จะโค้งงอไปตามแรงกดจนกระทั่งขึ้นทดสอบงอไปแต่ละพื้น ทำให้ไม่สามารถกดต่อไปได้อีก จึงเป็นขึ้นทดสอบที่มีความเหนียวมากกว่าขึ้นทดสอบอื่น

5.4 ผลจากการทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสและหินอ่อนเทียม

5.4.1 จากการทดสอบที่ผ่านมา พบว่าเรซินที่สังเคราะห์ได้จากขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำดื่ม และขวดน้ำอัดลมผสมขวดน้ำดื่ม จะให้สมบัติที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้น จึงไม่จำเป็นที่จะต้องแยกประเภทขวด เพื่อความสะดวกในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม และเลือกใช้ PG ในการโกลโคไลซ์เพท เนื่องจากให้สมบัติที่ดี และราคาถูกกว่าโกลคอลลินชนิดอื่น

5.4.2 รูปที่ 4.1 แสดงถึง gel time และ cure time ของเรซิน จะเห็นว่าเรซินของโรงงานแข็งตัวได้เร็วกว่าเรซินที่สังเคราะห์ได้ ทั้งนี้ อาจเนื่องจากปริมาณที่แตกต่างกันของไฮโดรควิโนน ซึ่งใช้เป็นสารยับยั้งปฏิกิริยา แต่ความแตกต่างของเวลาในการแข็งตัวของเรซินทั้งสอง ก็ไม่ต่างกันมากนัก เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวช้ากว่า อาจเป็นผลดีในกรณีของการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อน เพราะเรซินจะได้มีเวลาไหลเข้าไปจนเต็มแม่แบบ โดยไม่เกิดการแข็งตัวก่อนที่เรซินจะเต็มแม่แบบ

5.4.3 รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์เรซินด้วยเครื่อง IR จะเห็นว่าตำแหน่งของการเกิด peak สำคัญๆ นั้นอยู่ที่เดียวกัน จะแตกต่างกันที่ความสูงของ peak แสดงว่าเรซินทั้งสองมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณต่างกัน จะเห็นว่า เรซินที่สังเคราะห์ได้จะมีปริมาณสไตรีนมากกว่า (ดูได้จาก peak ที่ตำแหน่ง 1646) ซึ่งอาจมีผลทำให้การเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่า ดังนั้น ความแข็งของผลิตภัณฑ์จึงสูงกว่า (จากตารางที่ 4.7)

รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์เรซินด้วยเครื่อง DSC จะเห็นได้ว่าเรซินจากโรงงานมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าเรซินที่สังเคราะห์ได้ ทำให้มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ จะเห็นว่าจุดหลอมเหลวของเรซินที่สังเคราะห์ได้จะสูงกว่าเรซินของโรงงานอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเรซินที่สังเคราะห์ได้จะมีการเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่านั่นเอง.

5.4.4 ชั้นทดสอบไฟเบอร์กลาสที่ทำจากเรซินสังเคราะห์ จะให้สมบัติทางกายภาพและเชิงกลเหนือกว่าเรซินที่ได้จากโรงงาน เพราะให้ค่าความแข็ง, bending strength และจุดอ่อนตัวที่สูงกว่า (ตารางที่ 4.7) แต่ชั้นทดสอบที่ได้จะไม่ใสเหมือนจากเรซินของโรงงาน อีกทั้งยังมีสีเหลืองอมน้ำตาล จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่คำนึงถึงสีเป็นสำคัญ แต่อาจใช้ผงสีเพียงเล็กน้อยปิดบังสีเดิมของเรซินได้

5.4.5 การทำหินอ่อนเทียม สามารถทำได้จากเรซินสังเคราะห์ เช่นเดียวกับเรซินของโรงงาน เนื่องจากสามารถใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปและแข็งตัวเหมือนกัน แต่จำเป็นต้องใส่แคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไป เป็นการเพิ่มเนื้อและน้ำหนัก เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงหินอ่อนธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังทำให้ผงสีกระจายตัวในเรซินได้ดีขึ้น และช่วยให้มีสีสดใสขึ้น เนื่องจาก แคลเซียมคาร์บอเนตช่วยให้เรซินมีเนื้อที่ทึบแสง จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเรซินที่ได้จากการสังเคราะห์ จะให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ดีกว่าเรซินที่ได้จากโรงงาน สำหรับตลาดขายของหินอ่อนเทียม ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ผลิตเป็นสำคัญ

ข้อสรุป

ขวด PET ที่ใช้แล้ว เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกโดยกระบวนการทางเคมี การไกลโคไลซ์ขวด PET ด้วยไกลคอลชนิดต่างๆ ปริมาณมากเกินพอ สามารถย่อยสลาย PET ได้เป็นโมโนเมอร์ของ PET (BHET) และไดเมอร์ จากการทดลองพบว่า ขวดน้ำมันพืชไม่เหมาะที่จะนำมาไกลโคไลซ์ เนื่องจากเกิดการไหม้เกรียมเสียก่อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงเลือกใช้เฉพาะขวดน้ำดื่ม และขวดน้ำอัดลมเท่านั้น ไกลคอลสามชนิดที่นำมาใช้ ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล และไดเอทิลีนไกลคอล จะสามารถไกลโคไลซ์ขวด PET ได้ดีภายใต้สภาวะของไกลคอลที่มากเกินพอ (PET : ไกลคอล เท่ากับ 40 : 60) เพื่อให้ผลของการสลายตัวทางเคมีส่วนใหญ่ ได้เป็น BHET และไดเมอร์ ซึ่งถ้าใช้ไกลคอลน้อยเกินไป ปฏิริยาสลายตัวจะเกิดได้ไม่ดีพอ และอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 180 - 200 องศาเซลเซียส ถ้าต่ำกว่านี้ ปฏิริยาจะไม่เกิดขึ้น และถ้าสูงเกินไป จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และอาจเกิดการไหม้เกรียมได้เช่นเดียวกับขวดน้ำมันพืช ส่วนเวลาที่ใช้ไม่ควรต่ำกว่า 8 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิริยาเกิดได้สมบูรณ์ มิฉะนั้นผลที่ได้จะยังคงเป็นโอลิโกเมอร์อยู่ และถึงแม้จะใช้เวลานานกว่านี้ ก็ไม่มีผลต่อสารที่เกิดขึ้น เนื่องจากเกิดสมดุลของปฏิริยา ระหว่าง BHET ไดเมอร์ และไกลคอล ($2 \text{ BHET} \rightleftharpoons \text{ไดเมอร์} + \text{ไกลคอล}$)

ผลที่ได้จากการไกลโคไลซ์ขวด PET เมื่อนำไปสังเคราะห์เป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว จะให้เรซินที่มีคุณภาพและสมบัติต่างกัน เรซินที่ได้จากเอทิลีนไกลคอลจะเป็นของแข็งนิ่มๆ ไม่สามารถเข้าร่วมตัวกับสไตรีนโมโนเมอร์ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง จะละลายได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทิ้งให้เย็นก็จะกลับเป็นของแข็งอีกครั้ง จึงไม่สะดวกในการใช้งาน ส่วนเรซินที่ได้จากโพรพิลีนไกลคอล และไดเอทิลีนไกลคอล จะเป็นของเหลวหนืด สามารถละลายในสไตรีนโมโนเมอร์ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง เรซินนี้สามารถทำให้แข็งตัว (cure) โดยการใส่สารพวกรเปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรม และเมื่อนำเรซินที่สังเคราะห์ได้จากขวด PET ไปขึ้นรูปเป็น

ผลิตภัณฑ์ พบว่าเรซินที่ได้จากไกลคอลทั้งสองชนิด มีลักษณะและสมบัติใกล้เคียงกัน แต่โพรพิลีนไกลคอลจะหาง่าย และราคาถูกกว่าไดเอทิลีนไกลคอล การทดลองทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส และหินอ่อนเทียม จึงเลือกใช้เฉพาะเรซินซึ่งได้จากโพรพิลีนไกลคอลเท่านั้น และใช้ขวดเพทจากขวดน้ำดื่ม และขวดน้ำอัดลมผสมคละกันโดยไม่แยกประเภทของขวด เนื่องจาก ขวดทั้งสองชนิดให้เรซินที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน อีกทั้งผงสีสีเขียวที่มีในขวดเพทจะไม่มีผลใดๆต่อการไกลโคไลซ์ เรซินที่ได้จะค่อนข้างหนืดเหมาะกับการขึ้นรูปที่ใช้แม่พิมพ์ร้อน (hot moulding)

จากการทดลองพบว่าพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ได้นี้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยการหล่อได้ เช่นเดียวกับเรซินที่ใช้กันอยู่ทั่วไป อีกทั้งยังมีสมบัติบางอย่างที่เหนือกว่า ยกเว้นความใส จึงควรได้รับความสนใจที่จะพัฒนาไปสู่การใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

ข้อ เสนอแนะ

พอลิ เอส เตอร์ เรซินชนิดไม่อิมตัว ซึ่งสังเคราะห์จากขวด PET ที่ใช้แล้วนี้ สามารถนำไปใช้งานได้ เช่นเดียวกับเรซินที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป แต่คุณภาพอาจไม่สม่ำเสมอเนื่องจากความหลากหลายของขวด PET ที่นำมาใช้ ดังนั้นควรต้องมีการศึกษาหาวิธีที่จะควบคุมคุณภาพให้สม่ำเสมอในทุกๆ batch ก่อนนำไปใช้งานต่อไป ในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ พอลิ เอส เตอร์ เรซินชนิดไม่อิมตัวมีการใช้งานได้มากมาย นอกจากการทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสหรือหินอ่อนเทียมแล้ว ยังสามารถทำผลิตภัณฑ์งานหล่อต่างๆ การทำเซรามิกเทียม หยกเทียม งาช้างเทียม เป็นต้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความใส จึงเหมาะที่จะใช้เรซินที่สังเคราะห์ได้นี้

นอกจากนี้ อาจนำเรซินที่สังเคราะห์ได้มาใช้ผสมกับเรซินที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เพื่อเป็นการประหยัดและเพิ่มสมบัติที่ต้องการอีกด้วย ซึ่งควรมีการศึกษาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนผนวก

8.1 การหาค่าไฮดรอกซิล (HYDROXYL VALUE)

8.1.1 การเตรียม standardize KOH 0.5 N

1. นำ KHP (99.99 %) มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเก็บและทิ้งให้เย็นในเดสิเกเตอร์
2. ชั่ง KHP อย่างละเอียด 3 ส่วน แต่ละส่วนหนัก 3.000 กรัม ใส่ใน Erlenmeyer flask 3 ใบ
3. เติมน้ำกลั่น 375 ml ลงในขวดแต่ละใบ เขย่าจน KHP ละลายหมด
4. ไตเตรตสารละลาย KHP นี้ กับ KOH โดยมี phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์
5. การคำนวณ

$$N = \frac{S \times 1000}{204.33 \times V}$$

โดย N = Normality ของ KOH

S = น้ำหนักเป็นกรัมของ KHP

V = ปริมาตรเป็น ml ของ KOH ที่ใช้ในการไตเตรต

8.1.2 การหา Hydroxyl Value

1. เตรียม pyridine/acetic anhydride = 88/12 (V/V) ซึ่งจะเรียกว่า acetylating solution
2. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม เติม acetylating solution 10 ml ในขวดก้นกลมขนาด 50 ml
3. ต่อ reflux condenser และเครื่องกวนใน boiling water bath เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปใส่ใน flask อีกรูปหนึ่งซึ่งมีน้ำอยู่ 100 ml กวนอย่างรวดเร็ว

5. เติม benzene 20 ml กวนให้เข้ากัน
6. นำสารละลายนี้ไปไตเตรตกับ 0.5 N KOH โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์
7. ทำ blank test โดยไม่ใส่สารตัวอย่าง
8. การคำนวณ

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

- โดย
- A = ml ของ KOH ที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง
 - B = ml ของ KOH ที่ใช้ในการไตเตรต blank
 - N = Normality ของ KOH
 - W = จำนวนกรัมของสารตัวอย่างที่ใช้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. John R. Lawrence, Polyester Resins, Plastics application series, Reinhold Publishing Corporation, 1960.
2. A. Mustafa, Plastics Waste Management, Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong, p.p 252-253 ,1993.
3. P. Bauer , "Alcoholysis - a process for chemically recycling PUR and mixed plastics waste,"Kunststoffe German Plastics 91:4, 1991.
4. A. Fujita, M. Sato and M Murakami, U.S. Pat. 4,609,680, 1986.
5. M. Matsuura, T. Habara and Y. Katagiri, Japan Kobai Pat. 7,571,639, 1975.
6. H.S. Ostroski, U.S. Pat. 3,884,850, 1975.
7. K. Miura, Y. Kagiya, and T. Ichikawa, Japan Pat. 6,823, 449, 1968.
8. Satish Baliga and T. Wong, "Depolymerization of Poly-(ethylene terephthalate) Recycled from Post-Consumer Soft-Drink Bottles ," J. of Polymer Science : Part A: Polymer Chemistry, John Wiley & Sons, Vol.27,2071-2082, 1989.
9. Utpal R. Vaidya and Vikas M. Nadkarni , "Unsaturated Polyester Resins from Polyethylene terephthalate Waste. 1. Synthesis and Characterization"Ind. Eng. Chem. Res., 26, 194-198, 1987.
10. Ann M. Thayer, "Solid Waste Concerns Spur Plastics Recycling Efforts", C&EN Northeast News Bureau , January 30, 7-15, 1989.

11. Utpal R. Vaidya and Vikas M. Nadkarni , "Unsaturated Polyesters From PET Waste : Kinetics of Polycondensation", J. of Applied Polymer Science, Vol.34, 235-245, 1987.
- 12 Utpal R. Vaidya and Vikas M. Nadkarni , "Unsaturated Polyester Resins from Polyethylene terephthalate Waste 2. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties", Ind. Eng.Chem. Res.27, 2056-2060, 1988.
13. พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์ และ ส. จิว มานะศิลป์ , "พลาสติกหล่อ" กองบริการอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, 2521.
14. ASTM D 2240, Annual Book of ASTM Standards, Section 9, Volume 08.02, Plastics (II) D 1601-D 3099, 1984.
15. ASTM D 1525, Annual Book of ASTM Standards, Section 8, Volume 08.01, Plastics (I) C 177-D 1600, 1984.
16. ASTM D 790M, Annual Book of ASTM Standards, Section 8, Volume 08.01, Plastics (I) C 177-D 1600, 1984.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

