สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคอมโพสิตจำลองจากพอลิเอทิลีนที่เสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน

วัชรา จันทร์เพียร

วิชัย กิจเจริญวงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43929
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545

.b.....
.i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Polyethylene Self – Reinforced Model Composite

Miss Watchara Junpien

Mr. Wichai Kijjareanwong

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

For the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาคอมโพสิตจำลองจากพอลิเอทิลีนที่เสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน
นักศึกษา	นางสาววัชรา จันทร์เพียร
	นายวิชัย กิจเจริญวงศ์
ภาควิชา	เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

_____ หัวหน้าภาควิชา

(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

_____ ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด)

_____ กรรมการ

(ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์)

_____ กรรมการ

(ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษาพอลิเอทิลีนคอมโพสิตจำลองที่เสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน
นักศึกษา นางสาว วัชรา จันทร์เพียร
นาย วิชัย กิจเจริญวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคอมโพสิตจำลองที่มีการเสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน เมตริกซ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เส้นใยจะถูกอัดรีดจากการหลอมเหลวและปั่นเก็บที่อัตราเร็วต่าง ๆ ในการเตรียมคอมโพสิตนั้นเส้นใยเส้นเดียวจะถูกประกบด้วยแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 2 แผ่น คอมโพสิตที่ได้และเส้นใยทั้งสองชนิดจะถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เส้นใยทั้งสองชนิดจะมีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 5 % เพิ่มขึ้น แต่มีค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย แต่สำหรับคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิดจะมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 5 % และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกันทุกอัตราเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย นอกจากนี้ความแข็งแรงยึดเกาะของคอมโพสิตจากการทดสอบด้วยวิธีการดึงเส้นใยออก พบว่ามีค่ามากกว่าความแข็งแรงดึงของเส้นใยเอง จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC พบว่า เส้นใยที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวประมาณ 133 และ 135 องศาเซลเซียส ตามลำดับและเมตริกซ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวประมาณ 112 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยมีรูปร่างเป็นวงกลม เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดหัวอัดเส้นใยที่ใช้ในการอัดรีด แต่พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยในคอมโพสิตเป็นรูปวงรีซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study of Polyethylene Self – Reinforced Composites
Name	Miss Watchara Junpien
	Mr. Wichai Kijjarernwong
Special Project Advisor	Dr. Jutarat Prachayawarakorn
Department	Chemistry
Academic year	2001

Abstract

This special project had studied polyethylene self-reinforced model composites. Low-density polyethylene matrix was reinforced by either a virgin high-density polyethylene fiber or a recycled high-density polyethylene fiber. Fibers were extruded by melt spinning with varying spinning speeds. In preparation of the composites, a single fiber was sandwiched between two low-density polyethylene sheets, then mechanical properties , physical properties , thermal properties and morphology of extruded fibers and the single-fiber composite were investigated. For both fibers, it was found that tensile strength and modulus 5% for both fibers increased but elongation at break decreased with increasing spinning speeds. Furthermore, interfacial shear strength from the fiber pull-out test of the composite was found to be higher than that of the tensile strength of the fibers. For thermal properties, a virgin high-density polyethylene fiber and a recycled high-density polyethylene fiber showed melting temperatures at about 133 ^{o}C and 135 ^{o}C, respectively and low-density plolyethylene matrix represented a melting temperature at about 112 ^{o}C. Moreover, the fiber cross section was circle due to the die cross section, however the fiber cross section in the composites were oval because of the composite processing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษฉบับนี้ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจทานแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การศึกษา ให้คำแนะนำพร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ในภาควิชาเคมีทุกท่าน เพื่อน ๆ และรุ่นพี่ทุก ๆ ท่านที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุก ๆ คนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ ให้ความสนับสนุนทางการศึกษาและคอยช่วยเหลือมาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ
นางสาววัชรา จันทร์เพียร
นายวิชัย กิจเจริญวงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 คอมโพสิต	3
2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต	4
2.2.1.1 ชนิดของคอมโพสิตที่แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	4
2.2.1.2 ชนิดของคอมโพสิตที่แบ่งตามลักษณะของการเกิดคอมโพสิต	4
2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต	5
2.2.2.1 ข้อดีของคอมโพสิต	5
2.2.2.2 ข้อเสียของคอมโพสิต	5
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต	5
2.3 เส้นใยและเมตริกซ์	6
2.3.1 เส้นใย	6
2.3.2 วัสดุเมตริกซ์	11
2.4 การขึ้นรูป	12
2.5 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ (Pull-out test)	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 พอลิเอทิลีน	**14**
2.6.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	14
2.6.1.1 การเตรียมวัตถุดิบหรือมอนอเมอร์	15
2.6.1.2 พอลิเมอไรเซชัน	15
2.6.1.3 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์	15
2.6.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	16
2.6.2.1 พอลิเมอไรเซชัน	16
ก. กระบวนการซีกเลอร์ (Ziegler process)	16
ข. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)	16
ค. กระบวนการแสตนดาร์ด ออยล์ (Standard oil process)	17
2.6.2.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	**21**
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 อุปกรณ์	21
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	22
3.4 วิธีทดลอง	22
3.4.1 การเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	22
3.4.2 การเตรียมเส้นใยจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	22
3.4.3 การเตรียมแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	23
3.4.4 การเตรียมพอลิเอทิลีนคอมโพสิต	23
3.5 การทดสอบเส้นใย	23
3.5.1 การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล	23
3.5.2 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	24
3.5.3 สมบัติเชิงกล	24
3.5.4 สมบัติทางความร้อน	24
3.5.5 สัณฐานวิทยา	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การทดสอบพอลิเอทิลีนคอมโพสิต	25
3.6.1 สมบัติเชิงกล	25
3.6.2 สมบัติทางความร้อน	27
3.6.3 สัณฐานวิทยา	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	**28**
4.1 การทดสอบเส้นใย	28
4.1.1 การวัดดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว	28
4.1.2 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	29
4.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล	29
4.1.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	34
4.1.5 สัณฐานวิทยา	36
4.2 การทดสอบพอลิเอทิลีนคอมโพสิต	38
4.2.1 การหาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนคอมโพสิต	38
4.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล	41
4.2.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	47
4.2.4 สัณฐานวิทยา	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	**51**
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.1.1 เส้นใย	51
5.1.2 พอลิเอทิลีนคอมโพสิต	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	**54**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง	10
ตารางที่ 2.2	สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	14
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติของส่วนเสริมแรงและเมตริกซ์	21
ตารางที่ 4.1	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว	28
ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่างกัน	29
ตารางที่ 4.3	สมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	35
ตารางที่ 4.4	สภาวะที่ใช้ในการเตรียมแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	39
ตารางที่ 4.5	สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนคอมโพสิต	40
ตารางที่ 4.6	สมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การผลิตเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความแข็งแรงสูง โดยวิธีการปั่นแบบหลอมเหลว (Melt spinning)	8
รูปที่ 2.2	การผลิตเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความแข็งแรงสูง โดยวิธีการปั่นเส้นใยจากเจล	9
รูปที่ 3.1	การทดสอบการโค้งงอสามจุด	26
รูปที่ 3.2	ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการหาค่าแรงเฉือนระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์	27
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน	30
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วที่ความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน	30
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเส้นใยและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	31
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเส้นใยและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	31
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	32
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	32
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 10 % และความร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	33
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 10 % และความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	33
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	34
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ที่ได้จากเครื่อง DSC	36
รูปที่ 4.12	พื้นผิวของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	37
รูปที่ 4.13	พื้นผิวของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	37
รูปที่ 4.14	พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	37
รูปที่ 4.15	พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	37
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน	42
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน	42
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงและความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เปรียบเทียบกับความแข็งแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	43
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงและความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับความแข็งแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	43
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	44
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	44
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับชนิดของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับชนิดของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	45
รูปที่ 4.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % และคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	46
รูปที่ 4.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % และคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	46
รูปที่ 4.26	กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้จากเครื่อง DSC	49
รูปที่ 4.27	พื้นที่หน้าตัดของคอมโพสิตจากเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	50
รูปที่ 4.28	พื้นที่หน้าตัดของคอมโพสิตจากเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการนำพลาสติกมาใช้งานแทนวัสดุต่าง ๆ เช่น ไม้ เหล็ก ฯลฯ เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย และยังผลิตเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้แต่ข้อเสียของพลาสติก คือ มีความแข็งไม่มากพอสำหรับการใช้งานบางประเภทที่ต้องการความแข็งแรงมาก ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงให้พลาสติกมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยการเติมวัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นแผ่นอนุภาคเล็ก ๆ หรือเส้นใยลงไป เรียกวัสดุนี้ว่า วัสดุคอมโพสิต ซึ่งต่อมาได้มีการนำวัสดุคอมโพสิตไปใช้กันอย่างแพร่หลาย และจากความต้องการในการใช้พลาสติกชนิดต่าง ๆ ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ขยะพลาสติกมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดขยะพลาสติกซึ่งย่อยสลายได้ยาก จึงได้มีการเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหา โดยการนำพลาสติกที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาอีก คือ การแยกพลาสติกแต่ละชนิดที่ผสมกันอยู่ออกจากกันนั้นทำได้ยาก และต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาเป็นส่วนเสริมแรงในพลาสติกประเภทเดียวกัน จะเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นและง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของโครงงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้เป็นการนำพลาสติกชนิดเดียวกัน คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มาผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิต ซึ่งจะนำขวดน้ำดื่มที่ผลิตมาจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกลับมาใช้ใหม่ โดยนำไปทำให้เป็นเส้นใยขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นส่วนเสริมแรงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้พอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าพลาสติกพอลิเอทิลีน ในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิดกัน คือ เส้นใยที่ได้จากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว และเส้นใยที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน
2. ศึกษากระบวนการผลิตและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน
3. เพื่อเสนอแนะแนวทางในการลดปัญหาขยะพลาสติก โดยการนำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของความเร็วที่ใช้ในการปั่นเก็บเส้นใย
2. ศึกษาขั้นตอนการเตรียมคอมโพสิต
3. ศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนคอมโพสิต ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา
4. ศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่มีเส้นใยที่ได้จากขวดน้ำดื่มเป็นส่วนเสริมแรงและพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่มีเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นส่วนเสริมแรง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตวัสดุคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันได้
2. เพื่อเป็นการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่
3. สามารถทราบกระบวนการผลิตและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันให้มีสมบัติตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

คอมโพสิต (Composites) หรือ "วัสดุประกอบ" เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานกันอย่างมาก ในปัจจุบันมีปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมากกว่า 10 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นปีละประมาณ 5-10 % คอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering material) ที่สำคัญชนิดหนึ่งปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ ทั้งนี้เนื่องจากคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการที่สำคัญที่สุด คือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ ดังนั้นคอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ซึ่งนิยามเท่ากับความแข็งแรงต่อความหนาแน่นสูงและมีค่ามอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) สูง ดังนั้นเมื่อใช้คอมโพสิตเป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง เช่น ยานพาหนะจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงและมีน้ำหนักเบา จึงสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น มีประสิทธิภาพในการขนส่งมากขึ้นและประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่หลากหลายเนื่องจากคอมโพสิตมีหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ ออกแบบและสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ ทำให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตอย่างกว้างขวาง

ในการใช้งานปัจจุบันมีการเรียกวัสดุคอมโพสิตในชื่อต่าง ๆ เช่น พลาสติกเสริมแรง (Reinforced plastics : RP) พลาสติกเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Fiberglass reinforced plastic : FRP) แผ่นลามิเนตเสริมแรง (Reinforced plastic laminate) หรือไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) เป็นต้น

2.2 คอมโพสิต [1]

คอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดอยู่ด้วยกัน องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิต คือ

ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมีค่ามอดุลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใย (Fiber) ชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fibers) ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (Continuous fibers) หรือเส้นใยสั้น (Discontinuous or Chopped short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ ได้ ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้นสูง เป็นต้น เมตริกซ์มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Polymer Composites" สามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซท (Thermosets)
- โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Metal Composites"
- เซรามิกส์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Ceramic Composites"

2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต [1]

การแบ่งชนิดของวัสดุคอมโพสิตมีได้หลายแบบ อาจแบ่งชนิดของคอมโพสิตตามลักษณะของส่วนเสริมแรง หรือแบ่งตามลักษณะของการเกิดคอมโพสิต โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

2.2.1.1 ชนิดของคอมโพสิตที่แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง มีดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็กมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่น (Laminate composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ คล้ายแผ่นประกบหรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็กซึ่งมักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน

2.2.1.2 ชนิดของคอมโพสิตที่แบ่งตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต มีดังนี้

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ ฟัน และกระดูก โดยไม้เป็นคอมโพสิตที่ประกอบด้วยส่วนเสริมแรง คือ เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) และมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมตริกซ์ยึดเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกของแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีอพาไทต์ (Hydroxyapatite) ซึ่งอยู่ในเมตริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต [1]

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติเด่นหลายประการ การเลือกวัสดุคอมโพสิตมาใช้งานขึ้นอยู่กับสมบัติที่เป็นจุดเด่นและจุดด้อยของวัสดุคอมโพสิตนั้น ๆ

2.2.2.1 ข้อดีของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่นสูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) มอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) ความเหนียวจำเพาะ (Specific toughness) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำและมีน้ำหนักเบา ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง
- มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติการรับแรงและแดมปิ้ง (Damping) ดี
- มีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimentional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion : CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น โลหะ

2.2.2.2 ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

สำหรับข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต มีดังนี้

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิตสูง
- มักมีสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากันหรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic properties) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงไม่เหมือนกันในทุกทิศทางเป็นเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse direction)
- ยากในการต่อหรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
- ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต
- ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต [1]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต นอกจากจะต้องพิจารณาจากข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิตแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิด การออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิต ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศและอุปกรณ์กีฬา ฯลฯ วัสดุคอมโพสิตสามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุอื่น ๆ ได้ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้น ไม่ต้องการการประกอบมากและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

2.3 เส้นใยและเมตริกซ์ [1]

2.3.1 เส้นใย (Fibers)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่งของวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง อาจอยู่ในรูปเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers or Filament) เส้นใยสั้น (Short or Chopped fibers) หรือวิสเกอร์ (Whiskers)

โดยทั่วไปเส้นใยที่นิยมใช้ในวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยอะรามิดหรือเคฟลาร์ (Aramid or Kevlar fibers) เส้นโบรอน (Boron fibers) และเส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene fibers) เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันตั้งแต่ไม่กี่ไมครอนจนถึงร้อยไมครอน อาจมีความยาวต่อเนื่องหรือเป็นเส้นใยถูกตัดสั้นเหลือเพียงไม่กี่เซนติเมตร สำหรับเส้นใยพอลิโอเลฟินส์ชนิดความแข็งแรงสูง (High strength polyolefins fibers) เส้นใยชนิดนี้มีสมบัติที่ดีและเป็นที่สนใจในการพัฒนาเป็นเส้นใยเสริมแรงสำหรับคอมโพสิตประสิทธิภาพสูง (High efficiency composite) เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวสูงต่อกันด้วยพันธะโควาเลนท์ที่แข็งแรง ทำให้สามารถพัฒนาเส้นใยพอลิโอเลฟินส์ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ตัวอย่างของเส้นใยพอลิโอเลฟินส์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เส้นใยพอลิเอทิลีน สมบัติเด่นของเส้นใยชนิดนี้ คือ มีความแข็งแรงจำเพาะสูง ร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูง (3-5%) ความหนาแน่นต่ำ (0.97 g/cm^3) สามารถรับพลังงาน (Energy absorption) ได้มาก ดูดซับน้ำน้อย (Water absorption) (ประมาณ 1 %) และเฉื่อยต่อสารเคมี (Chemical inertness)

การอัดเส้นใยพอลิเอทิลีน สามารถทำได้ 2 วิธีหลัก ๆ คือ

1. การปั่นเส้นใยจากพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt spinning)

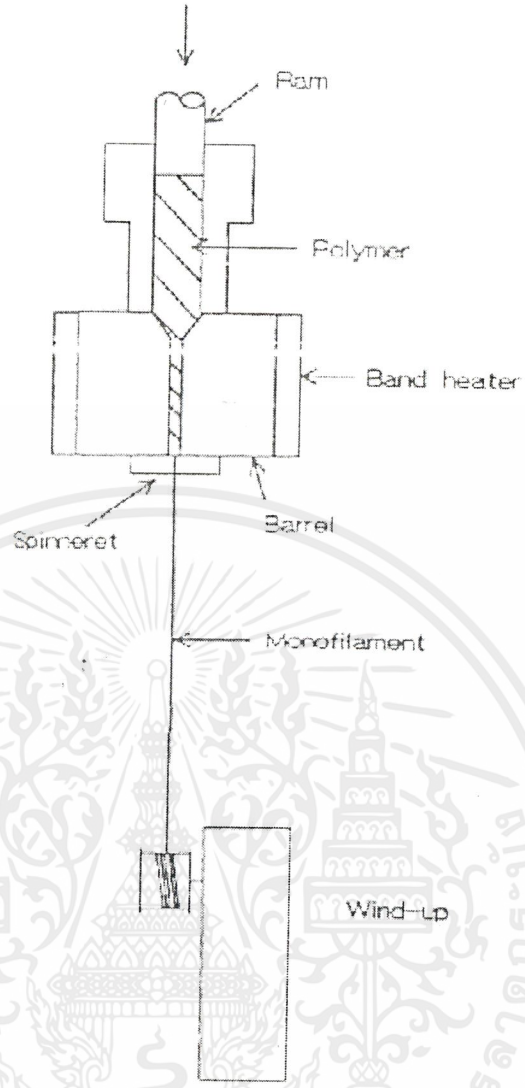
เป็นการดึงเส้นใยในสถานะของแข็ง (Solid–state drawing) (รูปที่2.1) สามารถใช้ในการผลิตเส้นใยพอลิเอทิลีนมอดุลัสสูง (High–modulus polyethylene : HMPE) จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene : HDPE) เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มีสายโซ่ตรงและมีองศาความเป็นผลึกสูงจึงสามารถดึงเป็นเส้นใยที่มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบสูง และทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีการจัดโครงสร้างแบบยืดยาว (High - extended chains) ตามแนวเส้นใย การเพิ่มองศาการจัดเรียงตัวและความเป็นระเบียบของโครงสร้าง สามารถทำได้โดยการดึงเส้นใยอีกครั้งภายหลังขบวนการผลิตเส้นใย ซึ่งสมบัติเชิงกลของเส้นใยจะขึ้นกับอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) หรืออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยก่อนดึงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยหลังดึง การดึงด้วยอัตราส่วนการดึงสูงจะใช้ในขบวนการผลิตเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การปั่นเส้นใยจากเจลของพอลิเมอร์ (Gel spinning)

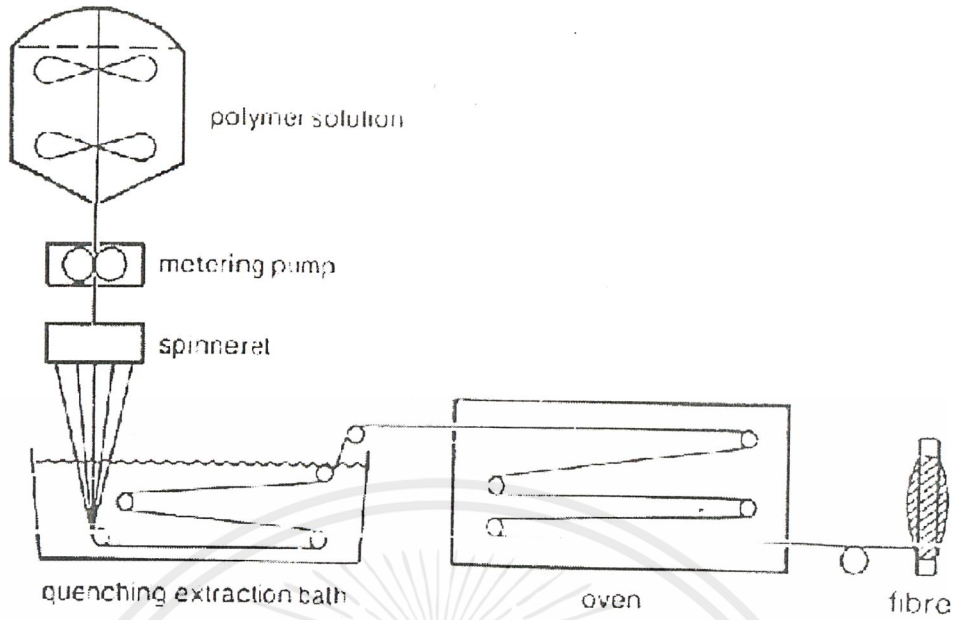
นิยมใช้ในการผลิตเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก (Ultra High Molecular Weight Polyethylene : UHMWPE) (รูปที่2.2) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณหนึ่งล้าน (10^6g/mol) โดยปกติจะมีอัตราส่วนการดึงเท่ากับ 5:1 เนื่องจากการดึงที่อัตราส่วนมากกว่านี้ไม่ทำให้เกิดการเรียงตัวของสายโซ่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ความยาวสายโซ่มาก ทำให้เกิดการพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) มาก อย่างไรก็ดีการดึงด้วยอัตราการดึงที่สูงมาก (50:1หรือ 70:1) มีความจำเป็นในการผลิตเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง อัตราการดึงสูงมากนี้สามารถทำได้โดยการละลาย UHMWPE ในตัวทำละลาย เช่น เดคคาลิน (Decalin) หรือน้ำมันพาราฟิน (Parafin oil) เพื่อลดการพันกันของสายโซ่ ทำให้สามารถดึงยืดให้มีการเรียงตัวของสายโซ่มาก ขึ้นได้ ปกติจะเตรียมเส้นใยได้จากสารละลายพอลิเมอร์ 5 - 10 % ที่ 150°C สารละลายพอลิเมอร์เจือจางนี้จะทำให้สายโซ่คลายตัวออกจากกัน จากนั้นจะทำให้สารละลายเย็นตัวที่ประมาณ 135°C เพื่อทำให้เกิด “ เจล ” (Gel) ซึ่งเป็นของแข็งที่เป็นผลึกมีรูพรุน แต่มีความหนาแน่นและการพันกันของสายโซ่ต่ำ เจลนี้จะถูกปั่น (Spin) ให้เป็นเส้นใย แล้วทำการดึงยืดที่อุณหภูมิ 120°C ที่อัตราการดึงสูงมากเพื่อให้ได้เส้นใยที่มีขนาดและความแข็งแรงตามที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การผลิตเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความแข็งแรงสูงโดยวิธีการปั่นแบบหลอมเหลว (Melt spinning) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การผลิตเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความแข็งแรงสูงโดยวิธีการปั่นเส้นใยจากเจล [2]

เส้นใยพอลิเอทิลีนมีข้อด้อยคล้ายกับเส้นใยพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น เส้นใยอะรามิด (Aramid fibers) กล่าวคือ มีความแข็งแรงกดอัด (Compressive strength) ต่ำ เนื่องจากเส้นใยมีความเป็นผลึกสูง นอกจากนี้พื้นผิวเส้นใยยังมีความเฉื่อย มีการยึดเกาะกับเมตริกซ์ต่ำ แต่ความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค (Phase) สามารถเพิ่มได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยภายหลังขบวนการผลิต เช่น การใช้พลาสมา (Plasma treatment) ข้อด้อยอีกประการหนึ่งของเส้นใยพอลิเอทิลีน คือ ไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง เส้นใยมีอุณหภูมิอ่อนตัว(Softening point) ต่ำ ไม่สามารถรับแรงได้ถ้าอุณหภูมิสูงประมาณ 145°C ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ได้กับขบวนการผลิตคอมโพสิตที่มีอุณหภูมิสูง เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) นอกจากนี้เส้นใยพอลิเอทิลีนยังมีสมบัติความทนทานต่อการคราก (Creep resistance) ต่ำ เส้นใยจะเปลี่ยนขนาดได้เมื่อได้รับแรงสูงและใช้งานเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงเป็นอุปสรรคสำหรับการประยุกต์ใช้งาน การเพิ่มสมบัติความทนทานต่อการครากสามารถทำได้โดยการฉายรังสี (Irradiation) แก่เส้นใยด้วยลำอิเลคตรอนหรือรังสีแกมมา (γ-rays) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงซึ่งจะต้านทานการเปลี่ยนขนาดของเส้นใยเมื่อเวลาผ่านไป เส้นใย UHMWPE ที่ได้จากการปั่นจากเจล มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูงและมีความหนาแน่นต่ำมาก (0.97 g/cm^3) ทำให้เส้นใย UHMWPE มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือสมบัติจำเพาะเด่นที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยเส้นใยเสริมแรงชนิดอื่น ๆ (ดังแสดงใน ตาราง ที่ 2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง [2]

สมบัติ (Properties)	หน่วย (Unit)	วิธีทดสอบ (Test method)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ (Typical value)
ดรรชนีการไหล (Melt flow index)	g/10 min	ASTM D 1238	18
ความหนาแน่น (Density)	g/cm^3	ASTM D 1505	0.958
ความต้านแรงดึงยืด (Tensile strength at yield)	MPa	ASTM D 638	280
ความต้านแรงดึงฉีกขาด (Tensile strength at break)	MPa	ASTM D 638	200
ความยืดที่จุดขาด (Elongation at break)	%	ASTM D 638	>500
ความสามารถในการคงรูป (Stiffness)	kg/cm	ASTM D 638	10000
ความต้านทานแรงกระแทก (Izod impact strength)	kg.cm/cm	ASTM D 256	2
ความแข็ง (Hardness)	D scale	ASTM D 2240	65
ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (Environment stress cracking resistance)	Hour	ASTM D 1693	2
จุดหลอมเหลว (Melting point)	^{o}C	ASTM D 2117	131
จุดอ่อนตัว (Softening point)	^{o}C	ASTM D 1525	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 วัสดุเมตริกซ์ (Matrix Materials)

หน้าที่ของเมตริกซ์ในวัสดุคอมโพสิต ได้แก่

1. ทำหน้าที่ถ่ายเทแรง (Transfer stresses) ที่ได้รับไปยังเส้นใยเสริมแรงและถ่ายเทแรงระหว่างเส้นใย
2. ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกัน (Barrier) จากสภาวะแวดล้อมใด ๆ
3. ทำหน้าที่ป้องกันเส้นใยจากการขัดถูเสียดสี (Abrasion) เมตริกซ์จะทำหน้าที่เพียงเล็กน้อยในการรับแรง (Load-carrying) เมื่อเทียบกับเส้นใยซึ่งเป็นส่วนเสริมแรงเสริมแรง

เมตริกซ์ที่ดีจะมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับเส้นใยเพื่อช่วยปกป้องการเสียสภาพของคอมโพสิตจากแรงเฉือน (Shear strength) และแรงกดอัด (Compressive strength) ที่รอยต่อของเส้นใยกับเมตริกซ์หรืออินเตอร์เฟส (Interphase) หรือช่วยป้องกันการเสียสภาพเนื่องจากการย่น (Buckling) ของเส้นใย อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์มีความสำคัญมากเช่นกัน คอมโพสิตที่มีแรงเฉือนระหว่างพื้นผิว (Interfacial shear strength) สูง กล่าวคือ มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ได้ดี มีผลทำให้การถ่ายเทแรงระหว่างเส้นใยและเส้นใยหรือเส้นใยและเมตริกซ์เป็นไปได้ด้วยดี จึงมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต นอกจากนี้ความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) และรอยตำหนิ (Defects) ของคอมโพสิตยังขึ้นกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเมตริกซ์ เช่น ความหนืด (Viscosity) จุดหลอมเหลวผลึก (Melting point) และอุณหภูมิเชื่อมโยง (Curing temperature) เป็นต้น

วัสดุเมตริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย โดยชนิดของวัสดุเมตริกซ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตนี้ว่า Polymer Matrix Composites : PMC
2. โลหะ เรียกคอมโพสิตนี้ว่า Metal Matrix Composites : MMC
3. เซรามิกส์ เรียกคอมโพสิตนี้ว่า Ceramic Matrix Composites : CMC

พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับเส้นใยส่วนเสริมแรงขึ้นรูปเป็นคอมโพสิตได้ง่าย โดยจะใช้สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents) ทำให้เกิดพันธะเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นโครงสร้างสามมิติ (3-Dimensional network) ที่มีความแข็งแรงสูงและไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ หรือไม่หลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกใช้เป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิตได้รับความนิยมน้อยกว่า แม้ว่าจะมีแนวโน้มการประยุกต์ใช้เป็นคอมโพสิตมากขึ้น เนื่องจากคอมโพสิตจากเทอร์โมพลาสติกที่ผลิตได้มีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าทนอุณหภูมิต่ำกว่า แต่ข้อดีคือสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง

การใช้วัสดุโลหะเป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิต นิยมใช้กับกรณีที่มีเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรงซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักของวัสดุเมตริกซ์ โลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม ไททาเนียม แมกนีเซียมและทองแดง เป็นต้น การใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมตริกซ์นิยมใช้กับคอมโพสิตที่ใช้งานที่ต้องทนอุณหภูมิสูงและทนทานต่อสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การขึ้นรูป

การอัดแบบขึ้นรูป (Hot press molding) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องอัดร้อน (Hot press machine) สามารถใช้ผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย เนื่องจากเครื่องมือราคาไม่แพง ไม่มีเศษเหลือจากขบวนการผลิตมากเหมือนการฉีดขึ้นรูป สามารถใช้เส้นใยขนาดยาวกว่าและในปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูป ดังนั้นชิ้นส่วนคอมโพสิตที่ได้จากการอัดแบบขึ้นรูปจะมีสมบัติเชิงกลดีกว่าคอมโพสิตจากการฉีดขึ้นรูป เนื่องจากแรงกดอัด (Molding pressure) ของเครื่องอัดแบบขึ้นรูปต่ำกว่าเครื่องฉีดขึ้นรูป ดังนั้นเทคนิคการอัดแบบขึ้นรูปจึงนิยมใช้ผลิตคอมโพสิตที่มีพื้นที่ผิวกว้าง มากกว่าเทคนิคการฉีดขึ้นรูป

ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดแบบขึ้นรูปมี 3 ขั้นตอนหลักคือ

1. การเตรียมวัสดุและการใส่ (Charge preparation and placement) ขั้นแรกนี้เป็นขั้นการเตรียมชั้น (Plies) ของวัสดุหล่อแบบที่อยู่ในรูปแผ่น (Sheet Molding Compound :SMC) หรือ Prepregs ที่เรียกว่า "Charge" โดยการตัดให้มีขนาด รูปร่างและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยตามที่ต้องการและเหมาะสมกับแม่แบบ จากนั้นทำการลอกแผ่นฟิล์มรองของแผ่น SMC ออกแล้ววางซ้อนในแม่แบบในทิศทางที่กำหนด

2. การปิดแม่แบบ (Molding closing) เมื่อใส่วัสดุในแม่แบบแล้วจะทำการปิดแม่แบบ แรงกดจะทำให้อากาศภายในแม่แบบเคลื่อนที่ออกทางด้านข้างรอยต่อของแม่แบบพร้อมวัสดุ SMC ส่วนเกิน อุณหภูมิของแม่แบบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของวัสดุน้อยลงและไหลเต็มแม่แบบ อย่างไรก็ดีความเร็วในการไหลของวัสดุจะน้อยกว่าการไหลในเทคนิคการฉีดขึ้นรูปมาก

3. การเชื่อมโยง (Curing) หลังจากช่องว่างภายในแม่แบบเต็มจากการบรรจุพอลิเมอร์ลงไปแม่แบบจะถูกปิดเป็นระยะเวลาที่กำหนดเพื่อให้เกิดการเชื่อมอย่างสมบูรณ์เกิดเป็นของแข็ง เวลาที่ใช้เชื่อมโยงขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดและปริมาณของสารเชื่อมโยง อุณหภูมิเชื่อมโยง ความหนาของผลิตภัณฑ์ ฯลฯ เมื่อครบเวลาที่กำหนดจะทำการเปิดแม่แบบและนำชิ้นงานคอมโพสิตออก จากนั้นจะทิ้งให้ชิ้นงานคอมโพสิตเย็นตัวภายนอกแม่แบบ ก่อนทำการตัดตกแต่งชิ้นงานขณะเย็น คอมโพสิตอาจเกิดการเชื่อมโยงต่อและมีการหดตัวการ ออกแบบรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ดีจะช่วยทำให้มีการกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานไม่เกิดความเค้นตกค้าง (Residual stresses) ที่ทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยว

การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) [10] เป็นกระบวนการที่รวดเร็ว ทำงานได้โดยอัตโนมัติสามารถใช้ผลิตชิ้นงานพลาสติกที่มีรูปร่างซับซ้อน ผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และใช้วัสดุพลาสติกได้หลากหลายชนิด โดยเป็นกระบวนการที่รวมขั้นตอนแบบอนุกรมเข้าไว้ด้วยกัน คือ ขั้นการเติมแบบ (Mold filling phase) ขั้นการบรรจุ (Packing phase) ขั้นการย้ำ (Holding phase) ขั้นการหล่อเย็น (Cooling phase) และขั้นการปลดชิ้นงาน (Part ejection) ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการอัดแบบชนิดฉีดขึ้นรูปที่กล่าวมาจัดว่าอิทธิพลต่อชิ้นงานพลาสติก จึงควรพิจารณาถึงความสำคัญของกลไกการทำงาน ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและโดยเฉพาะหลักการของการอัดแบบชนิดฉีดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ (Pull-out test) [1]

ความแข็งแรงยึดเกาะที่พื้นผิวระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ที่ล้อมรอบมีความสำคัญมากต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและสมบัติอื่น ๆ ของคอมโพสิต รอยแตกที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคจะนำไปสู่การเสียสภาพโดยรวมของวัสดุจนไม่สามารถนำมาใช้งานได้ต่อไป

การหาค่าความแข็งแรงการยึดเกาะที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคมีความสำคัญต่อการประเมินคุณภาพและการพัฒนาของวัสดุคอมโพสิต ความยากของการทดสอบความแข็งแรงที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคเกิดเนื่องจากเส้นใยส่วนใหญ่มีขนาดเล็กมาก (ประมาณ 5-20 ไมครอน) จึงยากที่จะทดสอบการยึดเกาะของเส้นใยขนาดเล็กโดยการทดสอบหาค่าความแข็งแรงโดยตรง (Direct method) ต้องใช้เครื่องมือขนาดเล็กซึ่งยุ่งยาก ใช้เวลานานและไม่สะดวกในการทดสอบ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการทดสอบแบบมหภาค (Macro scale) ที่ง่ายต่อการทดสอบวัสดุคอมโพสิตขนาดใหญ่ เป็นการทดสอบโดยอ้อม (Indirect method) ที่ให้ข้อมูลที่สัมพันธ์กับสมบัติของพื้นผิวระหว่างวัฏภาค ซึ่งไม่ใช่การทดสอบที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงยึดเกาะที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่แท้จริง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเทคนิคการทดสอบโดยตรง ซึ่งก็คือการทดสอบแบบดึงเส้นใยออก (Fiber pull-out test)

การทดสอบโดยตรง (Direct test method)

การทดสอบโดยตรงทำได้โดยการเตรียมตัวอย่างคอมโพสิตในลักษณะคอมโพสิตแบบจำลอง (Model composites) ซึ่งไม่ใช่คอมโพสิตที่ใช้งานจริง ตัวอย่างการทดสอบจะเป็นเส้นใยเส้นเดียวเสริมแรงในเมตริกซ์ ข้อจำกัดของการทดสอบประเภทนี้คือ การทดสอบเส้นใยเส้นเดียวที่เตรียมเพื่อใช้ทดสอบอาจไม่เหมือนกับคอมโพสิตเสริมแรงที่ใช้งานจริง แต่การทดสอบประเภทนี้ทำให้ได้ความแข็งแรงที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่แท้จริง

การทดสอบแบบดึงเส้นใยออก (Fiber pull-out test)

ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 เส้นใยเส้นเดียวจะถูกฝังอยู่ในเมตริกซ์ที่ต้องการทดสอบความแข็งแรงยึดเกาะ แรงดึงเส้นใยให้หลุดออกจากเมตริกซ์จะสัมพันธ์กับความแข็งแรงยึดเกาะที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค ในการทดสอบนี้ต้องทำการฝังเมตริกซ์ในเส้นใยไม่ลึกเกินไป และเส้นใยจะต้องมีความแข็งแรงสูง มิฉะนั้นจะเกิดการแตกหักก่อนถูกดึงหลุด ในการทดสอบจะวัดแรงดึงสุงสุดที่ใช้ในการดึงเส้นใยให้หลุดออกเทียบกับความลึกของการฝังเส้นใย (Embedded length) ความชันของเส้นกราฟนิยามเท่ากับความแข็งแรงการดึงหลุด (Shear debonding strength)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [2]

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชั่นของเอทิลีนมอนอเมอร์ เราสามารถแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนได้ดังนี้

2.6.1 พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)

พอลิเมอร์ชนิดนี้อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนที่มีสาขาโซ่ (Branched polyethylene) เพราะโครงสร้างประกอบด้วยโซ่ยาวของ $-CH_2-$ ที่มีการแตกกิ่งก้านสาขาออกไปหรืออาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันสูง (High pressure polyethylene) เพราะกระบวนการผลิตใช้ความดันสูงมาก พอลิเมอร์ชนิดนี้เตรียมขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1933 โดยเฟาเซตต์และยิบสัน (Fawcett and Gibson) ซึ่งขณะนั้นทำงานให้กับ Imperial Chemical Industries Ltd., (ICI) ประเทศอังกฤษ งานวิจัยของเขาทั้งสองคือการศึกษาผลของการใช้ความดันสูงมากที่มีต่อปฏิกิริยาบางชนิดและทั้งสองก็ได้ค้นพบพอลิเอทิลีนโดยบังเอิญขณะศึกษาปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนและเบนซัลดีไฮด์ (ϕ-CHO) ภายใต้ความดันหลายพันบรรยากาศ พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำนี้ผลิตขึ้นใช้ในทางการค้าในปี ค.ศ.1939 เป็นพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญและใช้ประโยชน์กันตั้งแต่นั้นมา สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [2]

สมบัติ	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ(g/cm^3)	0.91 - 0.93
เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%)	50 - 70
อุณหภูมิหลอมเหลว (^oC)	98 - 120
ความแข็งแรงดึง (MPa)	4.1 - 16
ค่ามอดุลัส (MPa)	0.1 - 0.26
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	90 - 80
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	ไม่มีการแตกหักจากแรงกระแทก
อุณหภูมิการเสียสภาพ (^oC)	38 - 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.1 การเตรียมวัตถุดิบหรือมอนอเมอร์

เอทิลีนมอนอเมอร์และไวนิลมอนอเมอร์อื่น ๆ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เกือบทั้งหมดมีแหล่งมาจากน้ำมันดิบหรือปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ

2.6.1.2 พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

อุตสาหกรรมการเตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำทำได้หลายวิธี โดยที่แต่ละวิธีต้องใช้ความดันสูงมาก ๆ เช่น 1000-3000 บรรยากาศและอุณหภูมิตั้งแต่ 80-360°C โดยมีสารที่แตกตัวเป็นฟรีแรดิคัลได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นพวกก๊าซออกซิเจนที่มีปะปนอยู่แล้วในปริมาณเล็กน้อยหรือเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) หรือเอโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile) ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความร้อนคายออกมาเป็นจำนวนมาก ถ้าควบคุมไม่ดีอาจเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงได้ ถ้าต้องการให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ๆ ต้องใช้มอนอเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง เพราะสารปนเปื้อน เช่น ไฮโดรเจนและอะเซทิลีน (C_2H_2) ทำหน้าที่เป็นตัวย้ายลูกโซ่ (Chain transfer agent) ได้ พอลิเอทิลีนอาจเตรียมในสารละลายโดยใช้เบนซีนหรือคลอโรเบนซีนเป็นตัวทำละลายภายใต้สภาวะของปฏิกิริยา (ความดันและอุณหภูมิ) เดียวกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย

2.6.1.3 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแตกต่างออกไปบ้างเล็กน้อยขึ้นกับองศาหรือปริมาณของสาขาโซ่ (Degree of branching) โดยทั่วไปถ้าโมเลกุลมีสาขาโซ่มาก พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกต่ำ เพราะโอกาสที่อะตอมต่าง ๆ ในโมเลกุลจะจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบเพื่อเกิดลักษณะเป็นผลึกมีน้อยกว่า สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น จุดหลอมตัว ความแข็งก็ต่ำลงด้วย เพราะความหนาแน่นที่ต่ำกว่านี้เอง การแพร่ของก๊าซและความชื้นผ่านพอลิเมอร์สูงกว่า อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยกระบวนการใช้ความดันสูงมีความเป็นผลึกปานกลาง (โดยทั่วไปมีร้อยละของความเป็นผลึกประมาณ 50-60) มีจุดหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 115°C มีความหนาแน่น 0.91-0.94 g/cm^3 ไม่ละลายในตัวทำละลายจำพวกไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรจีเนเตทไฮโดรคาร์บอน เช่น โทลูอีน (Toluene) ไซลีน (Xylene) และไดคลอโรเอทิลีน (Dichloroethylene) นอกจากนี้แล้วพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำนี้มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยมและเฉื่อยเป็นพิเศษต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป สามารถทนทานต่อกรดและเบสเป็นอย่างดี เช่น เมื่อแช่พอลิเอทิลีนในกรดซัลฟูริกหรือกรดไฮโดรคลอริกที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นเลย แต่กับกรดไนตริก ณ ภาวะเดียวกันจะเปลี่ยนเป็นสีดำที่ผิวพอลิเอทิลีนจึงนิยมนำมาใช้ทำเป็นภาชนะบรรจุกรดแก่รวมทั้งกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เมื่อให้พอลิเมอร์นี้สัมผัสกับแสงแดดและออกซิเจนเป็นเวลานาน ๆ พอลิเมอร์นี้จะเสื่อมคุณภาพลงได้ เช่น จะสูญเสียความสามารถในการคงรูป (Stiffness) ความสามารถในการยืดหยุ่นได้และความสามารถในการต่อต้านการสึกหรอและฉีกขาด ทั้งนี้เป็นเพราะเกิดการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมจากคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon) ที่เป็นคาร์บอนที่เกิดสาขาโซ่ การเติมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) อาจช่วยถ่วงหรือหน่วงเหนี่ยวการเสื่อมคุณภาพได้ แต่โดยทั่วไปก็ไม่สามารถช่วยได้มากเพราะมีสารเพิ่มเสถียรภาพน้อยมากที่สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ชนิดนี้ เกือบครึ่งหนึ่งของพอลิเอทิลีนที่ผลิตขึ้นทั้งหมดนำไปผลิตเป็นแผ่นฟิล์มใช้สำหรับห่อของ อาหาร ทำถุงพลาสติก ผ้าพลาสติกกันน้ำ ผ้าปูโต๊ะ พอลิเอทิลีนที่เหลือใช้ทำของใช้ในบ้าน ในครัว ของเด็กเล่น ใช้หุ้มลวดไฟฟ้า และใช้ในงานก่อสร้าง เป็นต้น

2.6.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)

พอลิเมอร์ชนิดนี้อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนเชิงเส้นตรง เพราะพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด กล่าวคือมีสาขาโซ่บ้างแต่น้อยมาก หรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำเพราะกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์นี้โดยทั่วไปใช้ความดันต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำดังได้กล่าวมาแล้ว พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนี้ผลิตขึ้นใช้ในทางการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1955

2.6.2.1 พอลิเมอไรเซชัน

สารตั้งต้นหรือวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจะเหมือนกับในกรณีของการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันก็คือเอทิลีนมอนอเมอร์ (Ethylene monomer)

วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดนี้ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ที่สำคัญได้แก่

ก. กระบวนการซีกเลอร์ (Ziegler process) กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งของซีกเลอร์-แนตตา (Ziegler - Natta Catalysts) ซึ่งโดยทั่วไปตัวเร่งที่ใช้ ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์-อะลูมิเนียมอัลคิล ($TiCl_4$ - R_3Al) ณ ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเพียงเล็กน้อย (2-4 บรรยากาศ) และอุณหภูมิ 50 - 75°C ในตัวกลางที่เฉื่อย เช่น น้ำมันดีเซล (Diesel Oil) เฮปเทน หรือโทลูอีน และในบรรยากาศที่เฉื่อย เช่น บรรยากาศของไนโตรเจนเนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวกลางที่เฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้ว จะตกตะกอนออกมา หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสิ้นสุดลงแล้ว ตัวเร่งซีกเลอร์-แนตตาจะถูกทำลายลงโดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เอทานอลหรือโพรพานอลสารทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ยกเว้นพอลิเมอร์) สามารถถูกสกัดออกไปโดยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์ แล้วนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปกรองและทำให้แห้ง

พอลิเมอร์ที่ได้จะต่างกับพอลิเมอร์ที่เตรียมจากวิธีการที่ใช้ความดันสูงมาก คือมีสาขาโซ่เล็กน้อยเท่านั้น

ข. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) กระบวนการนี้ใช้โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่มีตัวพยุง (Supporter) เช่น ซิลิกาหรืออะลูมินา เป็นตัวเร่งในตัวกลางเฉื่อย เช่น ไซโคลเฮกเซน สภาวะของปฏิกิริยาอยู่ระหว่างกลางของกระบวนการความดันสูงที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ และกระบวนการซีกเลอร์ความดันที่ใช้ทั่วไปประมาณ 30–40 บรรยากาศและอุณหภูมิประมาณ 90–160°C พอลิเอทิลีนที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ค. กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard oil process) กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดินัมไตรออกไซด์ (MoO_3) บนตัวพยุง เช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ความดันที่ใช้ประมาณ 40-100 บรรยากาศและอุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 200–300°C พอลิเมอร์ที่ได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ คือ มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

2.6.2.2 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอด โซ่พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมาก ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกสูงมาก (มากกว่า 90%) ความหนาแน่นและจุดหลอมตัวก็สูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่น 0.95 - 0.97 g/cm^3 และจุดหลอมตัว 135°C ความเหนียว ความแข็งและความทนต่อแรงดึงก็สูงกว่าด้วย ปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุของอื่น ๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรดและเบสเคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของใช้ในครัวและของเด็กเล่น ส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อห่อหุ้มของและอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) สายหุ้มสายไฟฟ้า สายยาง และอื่น ๆ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

***W. Shalaby และคณะ* [3]** ได้ทำการสังเคราะห์คอมโพสิตจากเมตริกซ์พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก (Ultra High Molecular Weight Polyethylene : UHMWPE) ที่มีส่วนเสริมแรงเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกับเมตริกซ์และมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (Anisotropic material) คอมโพสิตที่สังเคราะห์ขึ้นบางส่วนจะถูกเชื่อมโยง โดยการฉายรังสีแกมมาพลังงานสูงเข้าไปในสภาวะที่มีก๊าซอะเซทิลีน คอมโพสิตที่ได้จะมีสมบัติที่ดีกว่าเมตริกซ์พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงมากที่ไม่มีส่วนเสริมแรง ดังนี้

1. ความแข็งแรง (Strength) สูงกว่า
2. ความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) สูงกว่า
3. ความต้านทานการคืบ (Creep resistance) สูงกว่า
4. ค่ามอดุลัส (Modulus) สูงกว่า

จากการวิเคราะห์ โครงสร้างของคอมโพสิตจะแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ คือ

1. ส่วนของเมตริกซ์ที่ไม่มีการเสริมแรงและมีการเชื่อมโยงบางส่วน
2. ส่วนของเมตริกซ์ ที่มีการแพร่กระจายและเกิดพันธะของส่วนเสริมแรง UHMWPE โดยส่วนเสริมแรง UHMWPE จะมีปริมาณ 12 % ของน้ำหนักคอมโพสิตทั้งหมด
3. ส่วนของเมตริกซ์ที่มีการเสริมแรงด้วยส่วนเสริมแรง UHMWPE แบบทิศทางเดียวกันหมด

คอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้ขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ใช้ในงานด้านยาชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
43929

K. Sheldon และคณะ [4] ได้ทำการผลิตคอมโพสิตจากเมตริกซ์ที่แข็งและมีมอดุลัสสูง ได้แก่เทอร์โมพลาสติกเรซิน เช่น พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) พอลิฟีนิลซัลไฟด์ (Polyphenylenesulphide) พอลิฟีนิลีนออกไซด์ (Polyphenyleneoxide) พอลิเอสเทอร์คาร์บอเนต (Polyester carbonate) พอลิเอสเทอร์อิมไมด์ (Polyesterimides) และพอลิอิไมด์ (Polyimides) ซึ่งมีการเสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีน เส้นใยพอลิเอทิลีนจะถูกสังเคราะห์ขึ้นจากสารละลายโดยการดึงให้มีลักษณะเป็นเจล จากนั้นจะนำไปทำให้เป็นรูปแบบของโครงสร้างร่างแห (Network) โดยการถัก (Knitting) หรือ ทอ (Weaving)

คอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) สูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยที่นำมาทำคอมโพสิตจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสที่สูง นิยมนำคอมโพสิตชนิดนี้ไปใช้ในงานที่ต้องรับแรงกระแทกมาก เช่น นำไปใช้ทำเป็นเสื้อเกราะกันกระสุน เป็นต้น

F.V. Lacroix และคณะ [5] ได้ทำการผลิตคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene) เพื่อปรับปรุงสมบัติในการยึดเกาะระหว่างสองวัฏภาค ในการสังเคราะห์นั้นขั้นแรกจะนำผงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE) มาละลายในตัวทำละลายไซลีน (Xylene) ได้เป็นสารละลายของ LDPE ในตัวทำละลายไซลีนที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ กัน จากนั้นจะให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิประมาณ 70°C โดยจุ่มเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene : UHMWPE) ลงไปในสารละลายเป็นเวลาต่าง ๆ กัน และนำเส้นใยที่อิ่มตัวด้วยสารละลาย LDPE ในตัวทำละลายไซลีนมาทำการอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 50°C เส้นใย UHMWPE ที่อิ่มตัวจะถูกจัดวางลงบนกรอบ (Frame) และนำไปจุ่มลงในสารละลาย LDPE ในตัวทำละลายไซลีนอีกครั้ง จากนั้นก็นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 50°C จนแห้ง เรียกชิ้นงานที่ได้นี้ว่า "Prepregs" ซึ่ง prepregs นี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการอัดแบบ (Compression molding) ที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกันต่อไป

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต พบว่าคอมโพสิตที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นจะมีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และมอดุลัส (Modulus) สูงมาก แต่จะมีความแข็งแรงกดอัด (Compressive strength) ต่ำเนื่องจากเส้นใย UHMWPE โดยปกติจะมีความแข็งแรงกดต่ำ

M. K. Loultcheva และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำภาชนะบรรจุของเหลวที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกลับมาใช้ใหม่ สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled high density polyethylene : recycled HDPE) จะขึ้นกับเครื่องมือและสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิ เวลา (Residence time) แรงที่ให้ (Applied stress) อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากแรงเฉือน (Shear rate) และจำนวนครั้ง (Number of recycling steps) เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอัตราการเฉือน (Shear rate) และจำนวนครั้งในการขึ้นรูปใหม่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงทั้งในกรณีที่ใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนครั้งในการขึ้นรูปใหม่จะทำให้แรงที่ใช้ ณ จุดคราก (Stress at yield) ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงความยาว ณ จุดคราก (Strain at yield) และการเปลี่ยนแปลงความยาว ณ จุดขาด (Elongation at break) ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการทำการขึ้นรูปหลายครั้งจะทำให้ความเป็นผลึก (Crystallinity) เพิ่มมากขึ้นในขณะที่น้ำหนักโมเลกุลลดลง จะสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวจะเกิดอย่างรวดเร็วมากเมื่อผ่านพ้นการขึ้นรูปครั้งที่สองไปแล้ว แต่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่จะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการขึ้นรูปครั้งที่ห้าไปแล้ว

A. Telshev และคณะ [7] ได้ทำการสังเคราะห์จากเมตริกซ์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE) และเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene :UHMWPE) เพื่อให้เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างพื้นผิวของสองวัฏภาคเนื่องจากเป็นสารชนิดเดียวกัน คอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้นั้นจะนำไปทดสอบสมบัติ โดยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงกล (Thermomechanical analysis :TMA) เทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Differiantial Scanning Calorimetry : DSC) และการทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นต้น

จากการศึกษาด้วยเทคนิค TMA พบว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion) จะมีค่าเป็นลบในแกนของสายโซ่โมเลกุล (Chain axis) ของเส้นใยซึ่งหมายความว่าเกิดการหดตัวในทิศทางขนานกับการจัดเรียงตัว ยิ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงขึ้นจะยิ่งเกิดการหดตัวมากขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัว (Relaxation) มากขึ้นและจากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) ของเส้นใยมีค่าประมาณ 150°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าของเมตริกซ์ทำให้ไม่เกิดปัญหาในการขึ้นรูปคอมโพสิตเพราะเส้นใยต้องไม่หลอมเหลวรวมกับเมตริกซ์ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปต้องไม่เกิน 150°C ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ 135°C เพราะจะทำให้ความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของคอมโพสิตมีค่าสูงสุด นอกจากนี้ชนิดของเมตริกซ์ก็มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตด้วย

T. Sogura และคณะ [8] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติในการยึดเกาะของเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene : UHMWPE) โดยการปรับปรุงพื้นผิว การจัดเรียงเส้นใยและเชื่อมโยงเส้นใยด้วยสารประกอบไซเลน (Silane)

การปรับปรุงคุณภาพเส้นใย เริ่มจากการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยโดยการต่อกิ่ง (Grafting) สารประกอบไซเลนลงไปในพอลิเอทิลีน จากนั้นทำการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนที่ต่อกิ่งแล้วให้เป็นเส้นใยและทำการดึง สุดท้ายจะทำการเชื่อมโยงเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ถูกดึงและต่อกิ่งด้วยไซเลนเพื่อส่งต่อไปยังระบบพลาสมาและโคโรนาดิสชาร์จ (Plasma and Corona discharge) ในบรรยากาศที่ประกอบด้วยอากาศ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซฮีเลียม ก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) พบว่าเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีการเชื่อมโยงจะมีพีกการหลอมเหลวของผลึก (Crystal melting peak) สองพีกเป็นอย่างน้อย และเส้นใยที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจะมีพื้นผิวที่ราบเรียบมีปริมาณออกซิเจนอะตอม (O atoms) 10 อะตอมต่อปริมาณคาร์บอนอะตอม (C atoms) 100 อะตอม

เส้นใยที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสที่สูง มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกประมาณ 150°C และมีความต้านทานต่อการคืบ (Creep resistance) สูง

J. Loas และคณะ **[9]** ได้ทำการผลิตคอมโพสิตจากเมตริกซ์ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic polypropylene : iPP) ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน โดยเส้นใยนั้นจะได้มาจากพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งสมบัติของเส้นใยที่ถูกผลิตขึ้นกับอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ถ้าอัตราการดึงยิ่งมาก ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) จะลดลง พบว่าที่อัตราการดึงสูงสุดเท่ากับ 10 จะทำให้เส้นใยมีค่ามอดุลัสและความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 12 GPa และ 730 MPa ตามลำดับและร้อยละการยืด ณ จุดขาดต่ำสุด เท่ากับ 8 %

คอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้นั้นจะนำไปตรวจสอบสัณฐาณทางวิทยา (Morphology) โดยเทคนิค Low voltage scanning electron microscopy (LVSEM) จากการตรวจสอบพบว่า คอมโพสิตประกอบด้วยส่วนของเมตริกซ์ที่เป็นผลึกสเฟียรูไลต์ (Spherulite crystals) ล้อมรอบเส้นใยที่ฝังอยู่ในชั้นระหว่างผลึก (Transcrystalline layers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene)
   เกรด GA 3750 ผลิตโดยบริษัททีพีไอ โพลีน (MFI = 1.2 g/10 min) (10 kg/190°C)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene)
   เกรด D 2024 ผลิตโดยบริษัททีพีไอ โพลีน (MFI = 0.7 g/10 min) (10 kg/190°C)
3. ขวดน้ำดื่มใช้แล้ว (Recycle HDPE) ตราคีน (KENE) (MFI = 6.4 g/10 min)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของส่วนเสริมแรงและเมตริกซ์ [13]

Properties	HDPE (ส่วน เสริมแรง) เกรด GA3750	LDPE (เมตริกซ์) เกรด D2024
MFI (2.16 kg/190°C) (g/10 min)	0.06	0.70
Density (g/cm^3)	0.95	0.92
Tensile strength @ yield (MPa)	0.27	10
Tensile strength @ break (Mpa)	40	14
Ultimate elongation (%)	1700	600
Processing Temperature (°C)	190	170-210

3.2 อุปกรณ์

1. ถุงมือกันความร้อน
2. แม่พิมพ์เหล็กขนาด 15 × 15 × 2 เซนติเมตร
3. แผ่นเหล็กขนาด 15 × 15 เซนติเมตร
4. แผ่นไมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดร้อน (Hot press machine)รุ่น 6052 : Ceast
2. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม รุ่น LP 20 : Lab Tech Engineering Company LTD.
3. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing machine) รุ่น LR30K : Lloyd Instrument
4. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) รุ่น Axon ab Plasimaskiner : Sew-Eurodrive
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope :SEM) รุ่น S260 : Leica Cambridge LTD.
6. Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC 822^e TS0801R0: METTLER Toledo
7. เครื่องบดตัดพลาสติก(grinder) : Bosco Engineering
8. เครื่องวัดดัชนีการไหลของหลอมเหลว (Melt Flow Indexer):รุ่น D 4003 HV: Kayeeness
9. เครื่องวัดความหนา (Micrometer) รุ่น IP 54 0-25 mm , 0.001 mm : Mitutoyo
10. กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope)

3.4 วิธีทดลอง

3.4.1 การเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

1. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงใส่ลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 170°C 180°C 190°C และ 200°C ตามลำดับ โดยใช้หัวอัดเส้นใย (Spineret) ในการอัดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร
2. นำเส้นใยที่ได้มาดึงให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องดึงเส้นใย โดยใช้ความเร็วในการปั่นเก็บ (Spinning speed) เท่ากับระดับ 5.0 เมตร/นาที และใช้ความเร็วสกรู (Screw speed) เท่ากับ 60 รอบต่อนาที
3. ตัดเส้นใยให้มีความยาวเส้นละประมาณ 15 เซนติเมตร
4. ปรับระดับความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยเป็นระดับ 6.8 , 7.6 , 9.5 และ 14.1 เมตร/นาที ตามลำดับ
5. นำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบหาค่าดัชนีการไหล เส้นผ่าศูนย์กลาง สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

3.4.2 การเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

1. นำขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วมาตัดส่วนที่มีสีออก และนำไปบดด้วยเครื่องบดตัดพลาสติก
2. นำขวดน้ำดื่มที่บดแล้วใส่ในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยใช้สภาวะเดียวกับการเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเตรียมแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

1. นำเม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำใส่ลงในแม่พิมพ์ที่รองด้านล่างด้วยแผ่นเหล็กและแผ่นไมลาร์จนเต็ม เกลี่ยให้เรียบเสมอกัน
2. ปิดทับด้านบนด้วยแผ่นไมลาร์และแผ่นเหล็กที่เหลืออีกแผ่น
3. นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อน (Hot press machine) ซึ่งหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นชีทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ โดยการทดลองใช้อุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้แผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีฟองอากาศและมีความเรียบสม่ำเสมอกันตลอดทั้งแผ่น

3.4.4 การเตรียมพอลิเอทิลีนคอมโพสิต

1. นำแผ่นชีทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.4.3 จำนวน 2 แผ่น มาประกบทับเส้นใยจำนวน 3 เส้นที่วางเรียงขนานกัน และใช้แผ่นไมลาร์และแผ่นเหล็กประกบทับทั้งสองด้านอีกครั้ง
2. นำไปเข้าเครื่องอัดร้อน ซึ่งหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเอทิลีนคอมโพสิตได้โดยการทดลองใช้อุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้พอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่มีการยึดติดกันระหว่างแผ่นชีททั้งสองแผ่นและเส้นใย โดยไม่มีฟองอากาศและมีความเรียบสม่ำเสมอกันตลอดทั้งแผ่น
3. นำคอมโพสิตที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และ

สัณฐานวิทยา

หมายเหตุ นำเส้นใยทั้งสองชนิดที่ได้จากการอัดรีดที่ความเร็วในการปั่นเก็บ 5.0 7.6 และ 14.1 เมตร/นาที มาผลิตเป็นคอมโพสิต

3.5 การทดสอบเส้นใย

3.5.1 การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล

การทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ทำได้โดยการนำเม็ดพอลิเอทิลีนหรือขวดน้ำดื่มที่ตัดให้มีขนาดเล็ก ๆ มาใส่ลงในเครื่องวัดดัชนีการไหลของของหลอมเหลว (Melt Flow Indexer: D 4003 HV, Kayeenes) โดยใช้น้ำหนักกด 10 กิโลกรัม เพื่อทำการกดอัดให้พอลิเมอร์ที่ได้รับความร้อนจนเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 190°C ไหลออกมา จากนั้นตัดพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกมา โดยกำหนดให้ระยะเวลาที่พอลิเมอร์ไหลออกมาเท่ากันในทุกครั้งที่ทำการตัดตัวอย่าง โดยทำการตัดทั้งหมด 5 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเวลาที่ปล่อยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกมา จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย ค่าที่คำนวณได้จะเป็นค่าของดัชนีการไหลของของหลอมเหลว มีหน่วยเป็น g/10 min

3.5.2 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีขนาดเล็กมากทำได้โดยการใช้ไมโครมิเตอร์ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.001 mm ในการวัด โดยจะทำการวัด 3 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้และใช้เส้นใย 10 เส้นในแต่ละตัวอย่าง

3.5.3 สมบัติเชิงกล

การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (ASTM D3822)

การทดสอบแรงดึงของเส้นใยเดี่ยวใช้การทดสอบโดยให้การดึงยืดเป็นไปด้วยอัตราคงที่ (Constant–Rate–of –Extension) โดยนำตัวอย่างเส้นใยจำนวน 1 ตัวอย่าง มายึดติดกับที่จับ (Grip) ทั้งสองข้าง โดยมีความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตรและทำการทดสอบจำนวน 10 ชิ้นงานต่อหนึ่งตัวอย่าง

อัตราเร็วที่ใช้ในการดึง (Crosshead speed) 240 มิลลิเมตรต่อนาที

Load cell 100 N

3.5.4 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนทำได้โดยใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งสามารถหาอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting temperature, T_m) เอนทาลปี (ΔH) และอุณหภูมิเริ่มต้นในการหลอมเหลวได้ ทำการทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างอย่างละเอียดประมาณ 5-10 มิลลิกรัม ใส่ในจานอลูมิเนียมที่ต่ออยู่กับเทอร์โมคัพเปิล (Thermocouple) เปรียบเทียบกับสารอ้างอิงที่วางอยู่ในจานอลูมิเนียมอีกใบ จากนั้นให้ความร้อนกับจานอลูมิเนียมทั้งสองใบเท่า ๆ กัน ความร้อนจะไปทำให้เกิดการหลอมผลึกของสาร โดยสารที่มีผลึกขนาดเล็กจะหลอมเหลวก่อน และวัดการไหลผ่านของอัตราความร้อนที่เกิดขึ้น โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.5.5 สัณฐานวิทยา

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope :SEM) ในการตรวจสอบดูพื้นผิวของเส้นใยที่นำไปเคลือบด้วยทอง และใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope :OM) ในการตรวจสอบดูพื้นที่หน้าตัดของเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การทดสอบพอลิเอทิลีนคอมโพสิต

3.6.1 สมบัติเชิงกล

1. การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Test) (ASTM D638)

การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumb-bell) และใช้ที่จับ (Grip) 2 ชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง วัดระยะการยืดออกของชิ้นงานตัวอย่างโดยการวัดระยะห่างระหว่างสองเส้นบนชิ้นงานตัวอย่างที่ห่างกันเป็นระยะความยาวเกจ (Gauge length) ตามมาตรฐานคือ 25 มิลลิเมตร

จำนวนชิ้นงานตามแนวเส้นใย	10 ชิ้น
อัตราเร็วที่ใช้ในการดึง (Crosshead speed)	500 มิลลิเมตรต่อนาที
Load cell	100 N

2. การทดสอบความโค้งงอ (Flexural Test) (ASTM D790)

ตัดชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปร้อนเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามแนวเส้นใยให้มีขนาด 25 × 60 mm จำนวน 10 ชิ้น และทำการทดสอบแบบให้แรงกด 3 จุด (Three- point loads) โดยการให้แรงกดลงไปที่ตรงกลางชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในรูป 3.1 เมื่อให้แรงกด เครื่องจะบันทึกแรงที่ใช้เทียบกับระยะการกด

Span length	40 mm
Rate of Cross – Head Motion	1.0 mm/min

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{Flexural stress} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

$$\text{Flexural modulus} = (L^3/4bh^3)*(\Delta F/\Delta d)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

F = แรงกด (N)

L = Span length (mm)

B = ความกว้างของตัวอย่าง (mm)

h = ความหนาของตัวอย่าง (mm)

ΔF = ผลต่างของแรงดึง (N/mm^2)

Δd = ระยะกดโค้งงอ (mm)

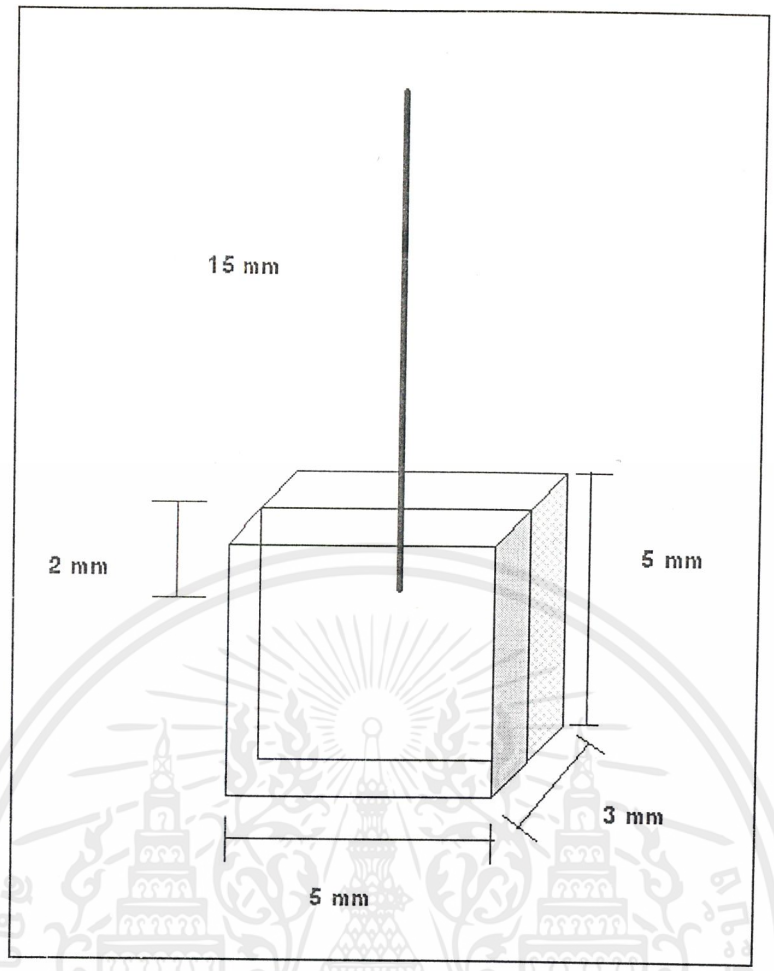
รูปที่ 3.1 การทดสอบการโค้งงอสามจุด

3. การทดสอบหาแรงเฉือนระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ (Single-fibre pull-out test) [11]

การทดสอบหาแรงเฉือนระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าแรงเฉือนระหว่างสองวัฏภาค คือ เส้นใยและเมตริกซ์ โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงดึง (Tensile testing machine) แบบสัมผัสหนีบชิ้นงานตัวอย่างด้านที่มีเมตริกซ์และเส้นใยอยู่และใช้ที่จับอีกด้านหนีบชิ้นงานด้านที่เป็นเส้นใยที่ยื่นออกมาจากเมตริกซ์ไว้ แล้วให้แรงดึงเพื่อให้เส้นใยเกิดการเลื่อนหลุดออกมาจากเมตริกซ์ ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นแรงเฉือน จึงสามารถหาค่าความแข็งแรงเฉือนระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ได้

การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง ทำได้โดยการตัดเมตริกซ์ที่เป็นแผ่นให้มีขนาดประมาณ $5 \times 5 \times 3$ mm จำนวน 2 แผ่น จากนั้นนำมาประกบทับเส้นใยและนำไปอัดร้อน จะได้ชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาค่าแรงเฉือนระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์

3.6.2 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนคอมโพสิต สามารถทำได้โดยใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC) ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อน โดยสามารถตรวจสอบได้ตามวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.4

3.6.3 สัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่เตรียมได้ สามารถตรวจสอบได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM) ในการตรวจสอบดูรอยต่อระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ โดยเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดบางมาก ๆ ซึ่งจะทำให้แสงที่เป็นแหล่งพลังงานสามารถส่องผ่านและตกกระทบลงบนชิ้นงาน ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมคอมโพสิตที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันในระบบคอมโพสิตจำลอง โดยมีเมตริกซ์เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและมีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคที่เป็นเมตริกซ์และส่วนเสริมแรงซึ่งมักมีค่าต่ำสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตทั่ว ๆ ไป ส่วนขั้นตอนการทดลองจะประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมและการทดสอบสมบัติของเส้นใย และการเตรียมและการทดสอบสมบัติของคอมโพสิต ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

4.1 การทดสอบสมบัติของเส้นใย

การทดสอบเริ่มต้นจากการหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวจากเส้นใยสองชนิดที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน โดยจะนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาต่อไป

4.1.1 การวัดดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

การหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Flow Index) ทำได้โดยการทดสอบที่อุณหภูมิ 190°C โดยใช้ Load cell = 10 kg โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

ชนิดของตัวอย่าง	HDPE*	RHDPE*
ค่าเฉลี่ยดัชนีการไหลของหลอมเหลว (MFI) (g/10 min)	1.18	6.22

* HDPE = พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

* RHDPE = พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าดัชนีในการไหลของตัวอย่างทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่าชนิดที่มาจากขวดน้ำดื่ม ซึ่งแสดงว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ดังนั้นสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยทั้งสองชนิดจึงไม่สามารถนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกันได้

4.1.2 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทำได้โดยใช้การวัดด้วยไมโครมิเตอร์ ตามหัวข้อที่ 3.5.2 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่างกัน

ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	
	HDPE	RHDPE
5.0	0.39 ± 0.02	0.38 ± 0.03
6.8	0.36 ± 0.04	0.36 ± 0.05
7.6	0.32 ± 0.03	0.30 ± 0.04
9.5	0.26 ± 0.02	0.25 ± 0.03
14.1	0.25 ± 0.02	0.24 ± 0.04

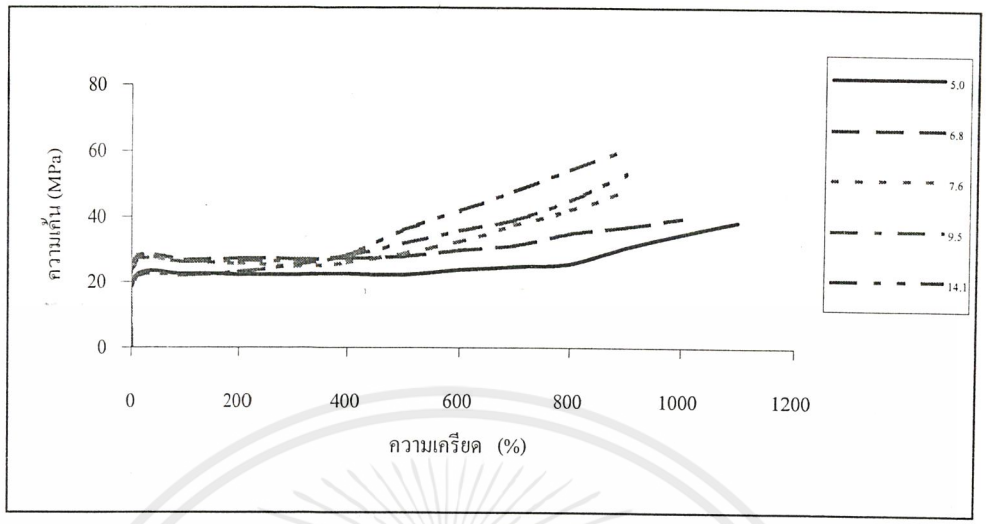
จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะมีค่าลดลง เนื่องจากพอลิเอทิลีนที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวได้รับแรงดึงจากการปั่นเก็บมากขึ้น จึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลง นอกจากนี้เส้นใยทั้งสองชนิด มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกันที่ความเร็วในการปั่นเก็บเดียวกัน

4.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

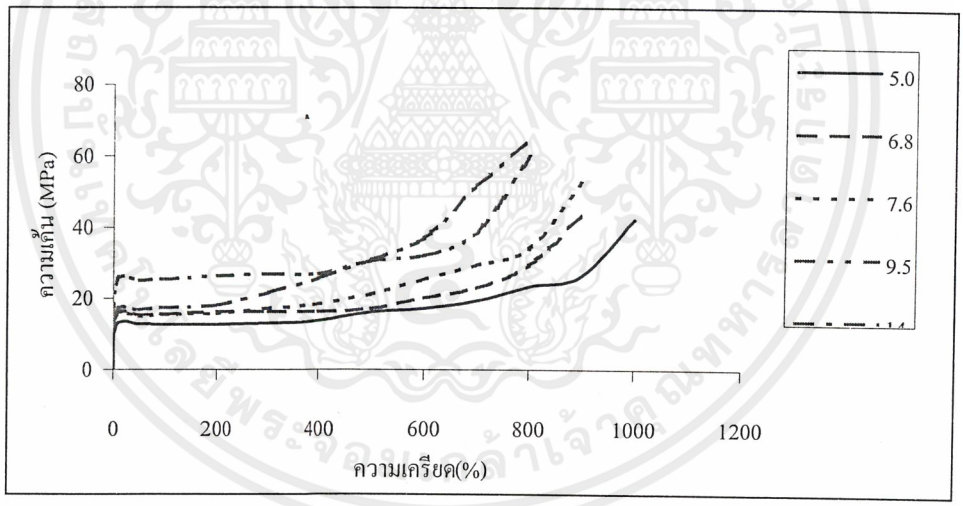
สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยนั้น จะเป็นการทดสอบความแข็งแรงดึง มอดุลัสและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย โดยใช้เส้นใยในการทดสอบอย่างน้อย 10 เส้นต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บ ค่าความเค้นที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกความเค้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกันความเครียด ค่ามอดุลัสซึ่งเท่ากับความชันของกราฟจะมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's law) เมื่อความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น โดยความชันของเส้นกราฟจะลดลง จนกระทั่งถึงจุดสูงสุด ที่เรียกว่า "Yield point" ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเสียสภาพอย่างถาวร [12] โดยเกิดที่ความเครียดต่ำมาก ๆ จนไม่สามารถบอกเป็นค่าที่แน่นอนได้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน

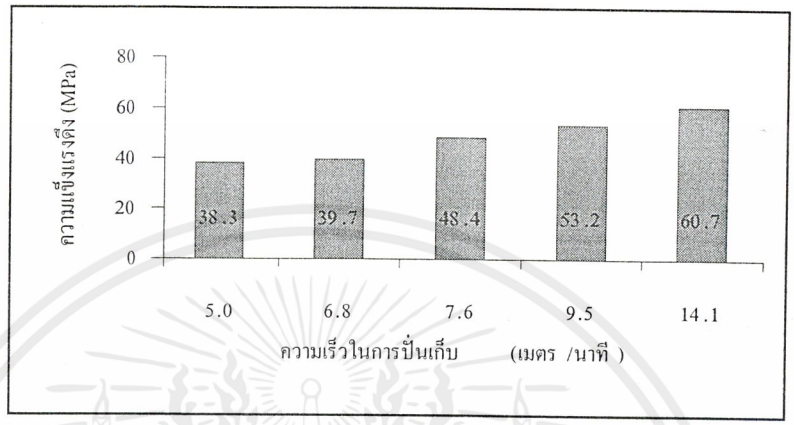


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วที่ความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน

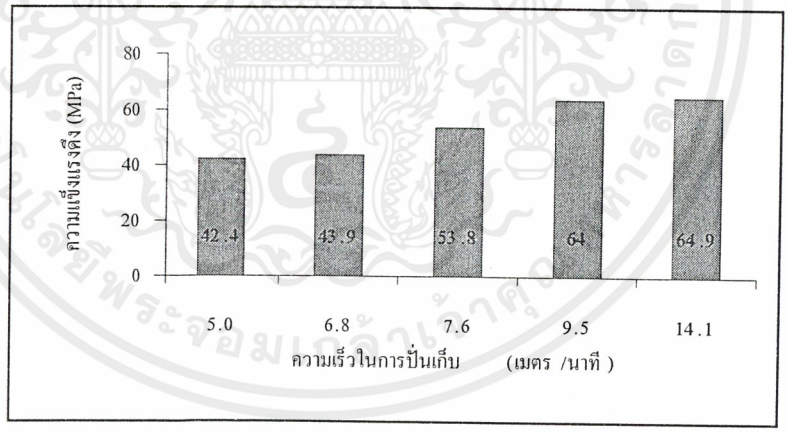
จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของเส้นใยทั้งสองชนิด พบว่า เมื่อความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บจะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นเพราะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลตามแนวการปั่นเก็บมีมากกว่า ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงดึงของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงดึงแก่เส้นใยตามแนวการจัดเรียงตัวเส้นใยขนาดเล็กซึ่งมีการจัดเรียงตัวดีจะใช้แรงดึงมากในการดึงยืดเพื่อให้เส้นใยขาด [12] โดยค่าความแข็งแรงดึงของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วมีค่าเพิ่มขึ้น 36.9 % และ 34.7% ตามลำดับเมื่อความเร็วในการปั่นเก็บเพิ่มขึ้นจากความเร็ว 5.0 เมตร/นาที ไปเป็นความเร็ว 14.1 เมตร/นาที



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเส้นใยและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

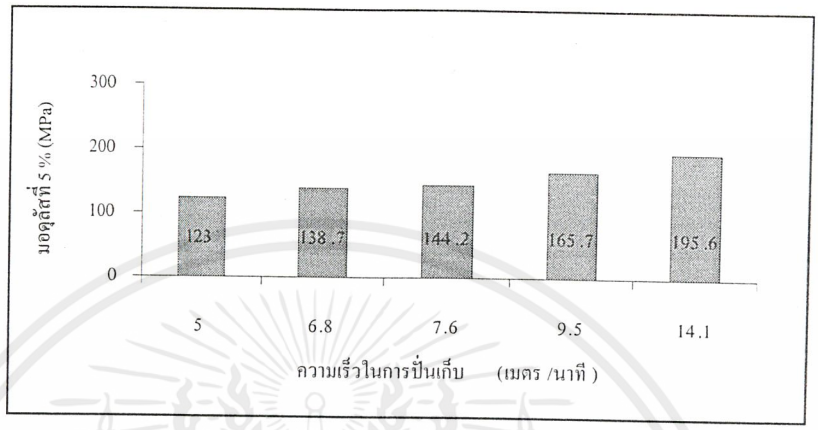


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเส้นใยและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

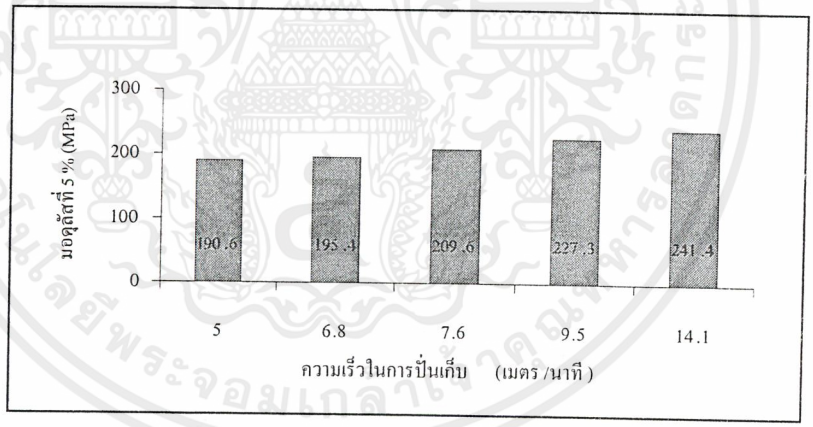
จากกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย จะทำให้เส้นใยทั้งสองชนิดมีค่ามอดุลัสที่ 5 % เพิ่มขึ้น (มอดุลัสที่ 5 % คือ ค่ามอดุลัสที่ความยาวที่เปลี่ยนไปจากเดิม 5 %) เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บจะทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีการจัดเรียงตัวมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่ามอดุลัสที่ 5 % ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้น 37.1 % และ 32.3 % ตามลำดับ เมื่อความเร็วในการปั่นเก็บเพิ่มขึ้นจาก 5.0 เมตร/นาที ไปเป็นความเร็ว 14.1 เมตร/นาที และค่ามอดุลัสที่ 10 % ของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้น 35.9 % และ 35.5 % โดยลำดับ

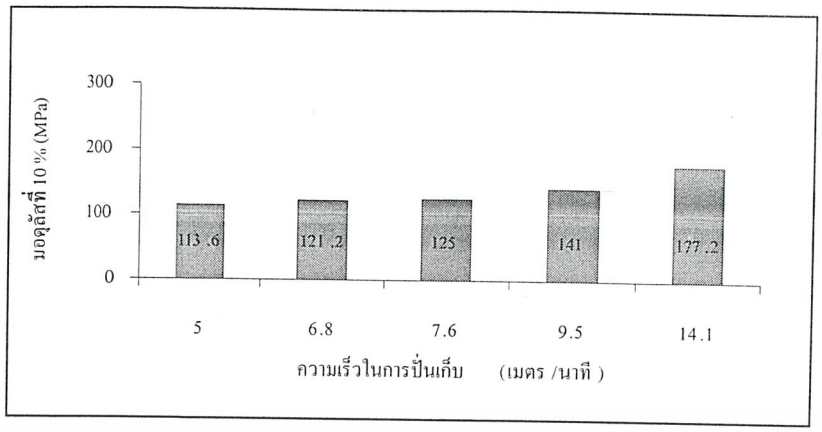


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

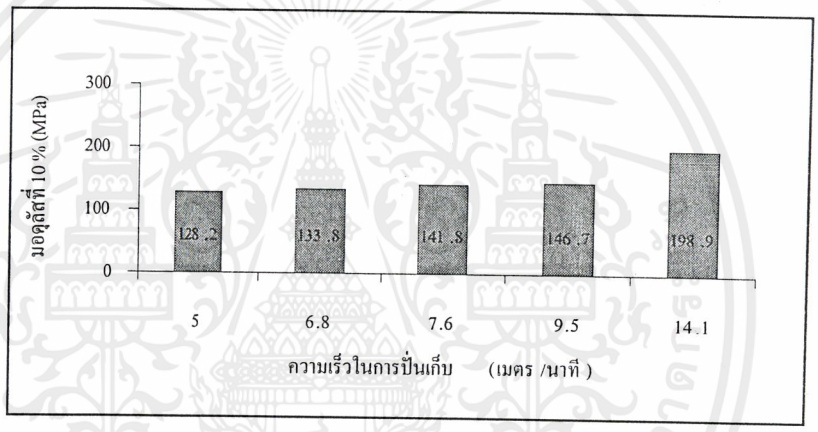


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



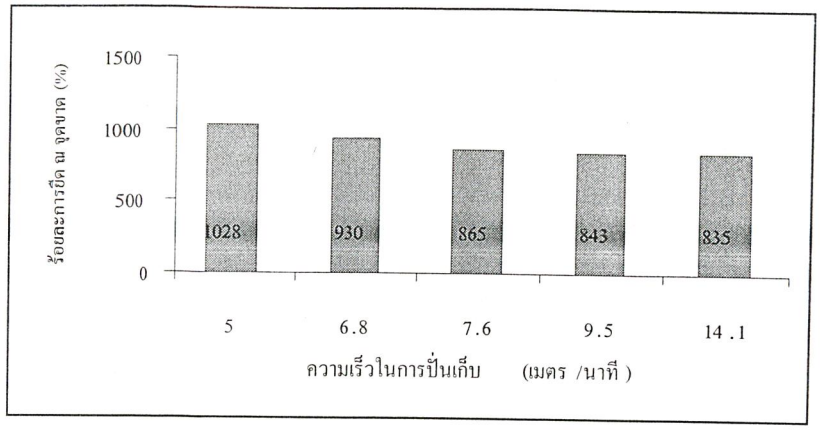
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 10 % และความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง



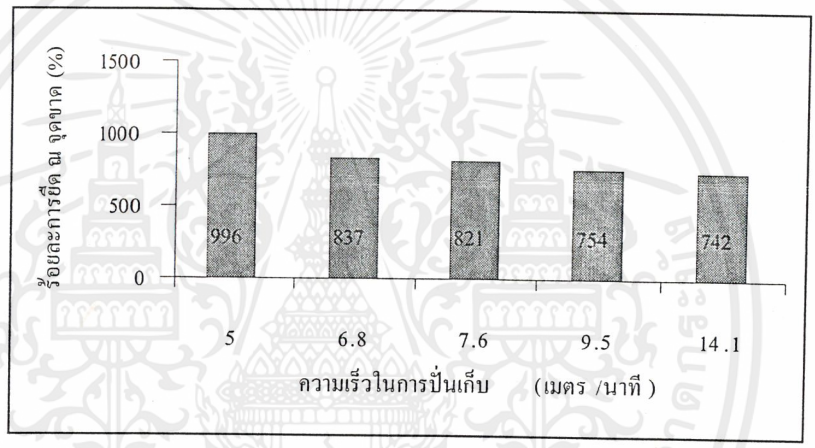
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 10 % และความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

จากกราฟรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า การเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยจะทำให้เส้นใยทั้งสองชนิดมีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บ โดยโมเลกุลที่จัดเรียงตัวดีกว่าเมื่อทำการดึงโมเลกุลจะเลื่อนออกจากกันจนขาด แต่โมเลกุลที่ยังมีการจัดเรียงตัวน้อยกว่าเนื่องจากใช้ความเร็วในการปั่นเก็บต่ำ เมื่อให้แรงจะเกิดการจัดเรียงตัวก่อน จากนั้นโมเลกุลจึงค่อย ๆ เลื่อนออกจากกันจนขาด ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดจึงมีค่ามากกว่าที่ความเร็วในการปั่นเก็บต่ำกว่า [11] โดยค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วจะมีค่าลดลง 18.8 % และ 25.5 % ตามลำดับ เมื่อความเร็วในการปั่นเก็บเพิ่มขึ้นจาก 5.0 เมตร/นาที ไปเป็นความเร็ว 14.1 เมตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดและความเร็วในการปั่นเก็บของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

จากผลของความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการยืด ณ จุดขาด สมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสที่ 5 % ค่ามอดุลัสที่ 10 % จะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด จะมีค่าลดลง

4.1.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว โดยใช้เทคนิค Differrential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่า เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจาก

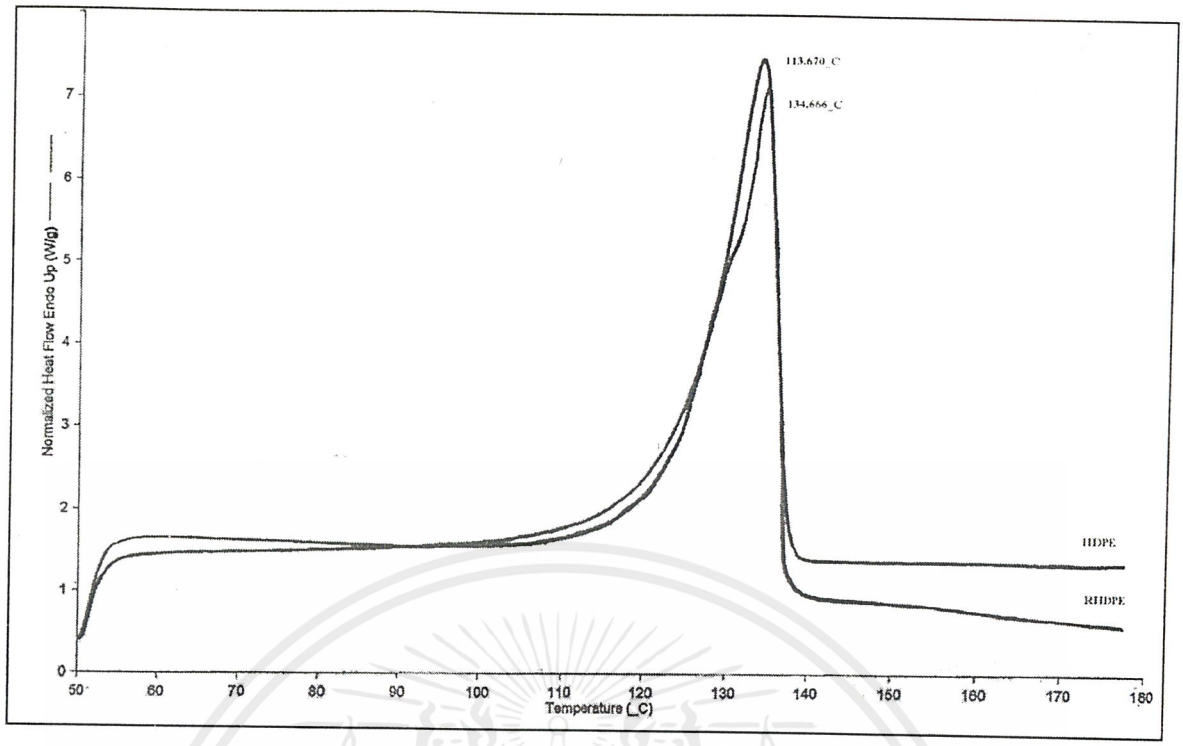
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting temperature, T_m) ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.3) คือ 134 °C และ 135°C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีค่าเอนทาลปี (ΔH) และอุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

ชนิดของเส้นใย	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) (°C)	ΔH (J/g)	อุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการหลอมเหลว (°C)
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	134	175	125
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	135	175	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

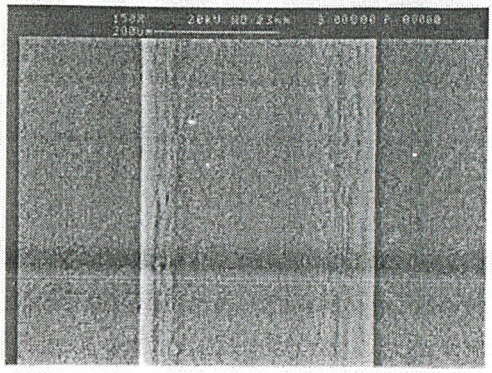


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)และเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว (RHDPE) ที่ได้จากเครื่อง DSC

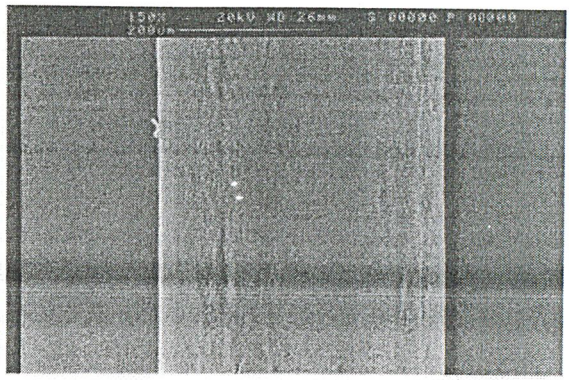
4.1.5 สัณฐานวิทยา

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วทั้งสองชนิด มีลักษณะคล้ายกัน เมื่อตรวจสอบพื้นผิวของเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าพื้นผิวของเส้นใยจะเรียบตลอดความยาวของเส้นใย ดังรูปที่ 4.12-4.13 ซึ่งได้จากการใช้กำลังขยาย 150 เท่าและจากการใช้กล้องจุลทรรศน์ (OM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า ในการตรวจสอบพื้นที่หน้าตัด พบว่า พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.14-4.15 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากรูปร่างของหัวอัดเส้นใยที่ใช้ในการอัดรีดเส้นใย

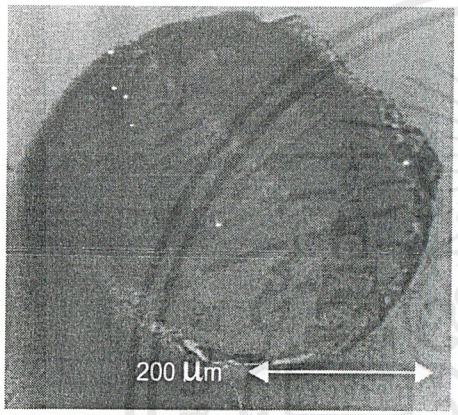
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



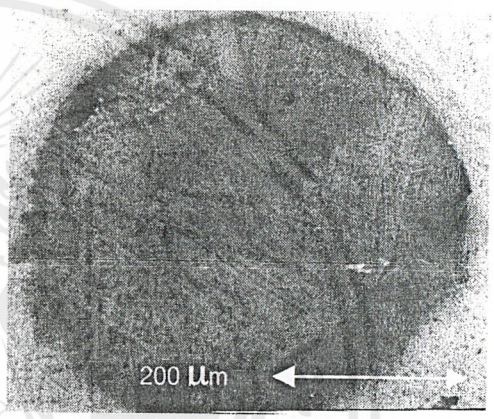
รูปที่ 4.12 พื้นผิวของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง



รูปที่ 4.13 พื้นผิวของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว



รูปที่ 4.14 พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง



รูปที่ 4.15 พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบสมบัติของพอลิเอทิลีนคอมโพสิต

พอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันในระบบคอมโพสิตจำลองที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยเพียงเส้นเดียว โดยใช้เส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว และมีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นเมตริกซ์ ที่นำมาผลิตเป็นด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบอัดร้อน (Hot press) ซึ่งหาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปได้จากการทดลองที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน โดยจะนำคอมโพสิตที่ได้มาทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 5 % ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มอดุลัสโค้งงอ ความแข็งแรงเฉือน สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

4.2.1 การหาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนคอมโพสิต

ในการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนคอมโพสิต ต้องมีการหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป ซึ่งสามารถทำได้โดยการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความเรียบสม่ำเสมอกันและไม่มีฟองอากาศในแผ่นชีทพอลิเอทิลีน และมีการยึดติดกันระหว่างแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทั้งสองแผ่นและเส้นใยดี โดยไม่มีฟองอากาศระหว่างแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทั้งสองแผ่น ที่นำมาเตรียมเป็นคอมโพสิต

จากผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนคอมโพสิตมีค่าเท่ากัน โดยทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 3 นาที จะได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

สภาวะที่ใช้		ลักษณะของชิ้นงานที่ได้
อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	เวลา (นาที)	
110	5	เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวบางส่วนเท่านั้นและมี ฟองอากาศเกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นงาน
120	5	เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวดีขึ้นเล็กน้อยและยังมี ฟองอากาศอยู่ในชิ้นงาน
130	5	เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวได้ดีขึ้น แต่ก็ยังหลอมเหลวไม่หมดและยังมีฟองอากาศเหลืออยู่เล็กน้อย
135	3	เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวได้ดีขึ้น แต่ก็ยังหลอมเหลวไม่หมดและมีฟองอากาศเหลืออยู่เล็กน้อย
135	5	เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวได้ดีขึ้น แต่ยังหลอมเหลวไม่หมด และไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ในชิ้นงานแล้ว
140	3	เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวหมดอย่างสมบูรณ์ และไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ในชิ้นงาน
140	5	แผ่นชิ้นงานที่ได้มีการไหม้บางส่วนเกิดเป็นรอยอย่างเห็นได้ชัด แต่ไม่มีฟองอากาศในชิ้นงานเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนคอมโพสิต

สภาวะที่ใช้		ลักษณะของชิ้นงานที่ได้
อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	เวลา (นาที)	
120	5	แผ่นชีทยึดติดกันไม่แน่น สามารถแยกออกจากกันได้เมื่อให้แรงดึง
130	5	แผ่นชีทยึดติดกันแน่นขึ้น แต่ยังสามารถแยกออกจากกันได้ เมื่อให้แรงดึง
135	5	แผ่นชีทยึดติดกันแน่นขึ้น แต่ยังสามารถแยกออกจากกันได้ เมื่อให้แรงดึง
140	3	แผ่นชีทยึดติดกันแน่นขึ้น ไม่สามารถแยกออกจากกันได้เมื่อให้แรงดึง
140	5	แผ่นชีทยึดติดกันแน่น แต่มีรอยไหม้เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน

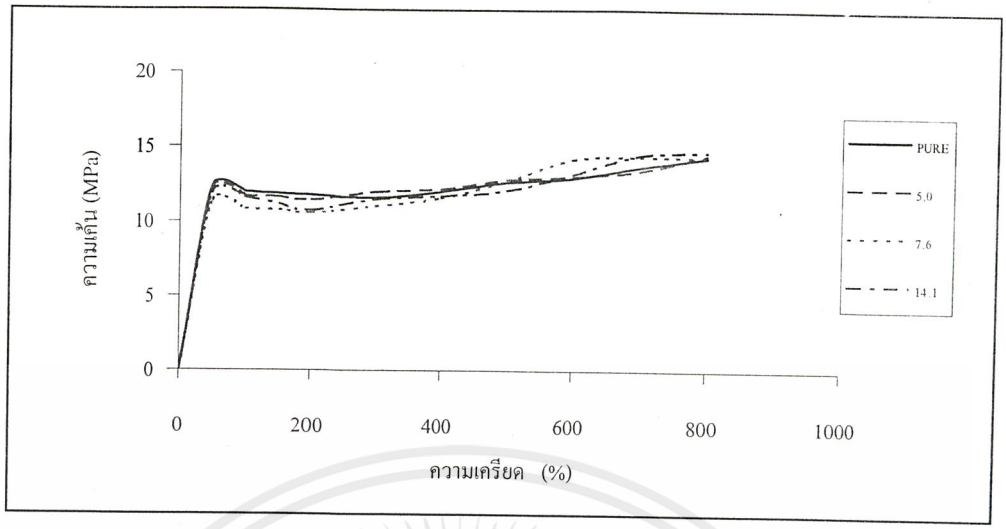
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

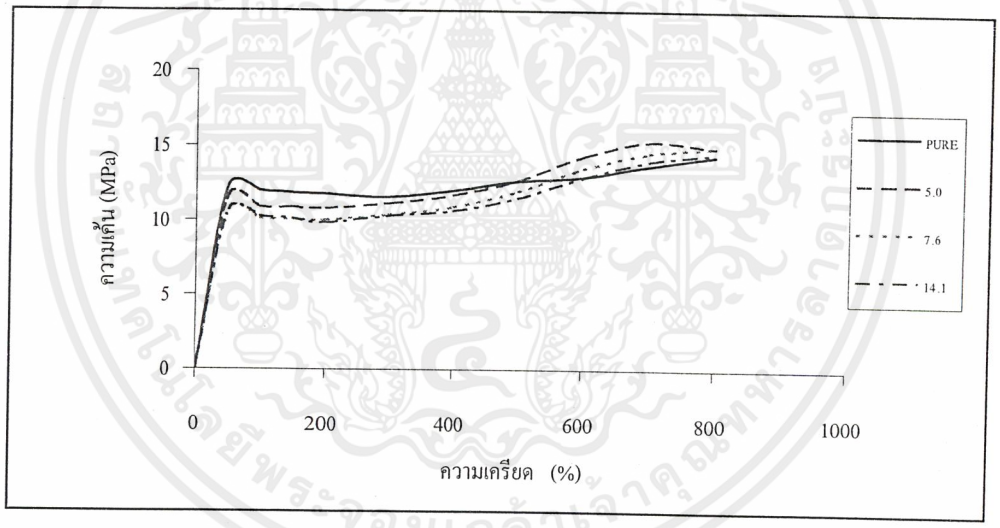
คอมโพสิตที่นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่างกัน คือ ที่ความเร็ว 5.0 7.6 และ 14.1 เมตร/นาที โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ใช้สัญลักษณ์ PURE) ที่ไม่มีส่วนเสริมแรง

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่า พอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิดจะให้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ค่าความเค้นและความเครียดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งการเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยจะไม่มีผลต่อพอลิเอทิลีนคอมโพสิต ทั้งนี้เนื่องจากมีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเพียงเส้นเดียว ค่าที่ได้จึงเป็นผลเนื่องมาจากเมตริกซ์มากกว่าที่จะเป็นผลมาจากเส้นใย โดยในช่วงแรกความเค้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกันความเครียด ค่ามอดุลัสซึ่งเท่ากับความชันของกราฟจะมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's law) เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น โดยความชันของเส้นกราฟจะลดลง จนกระทั่งถึงจุดสูงสุด ที่เรียกว่า "Yield point" ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเสียสภาพอย่างถาวร [12] โดยเกิดที่ความเครียดประมาณ 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน

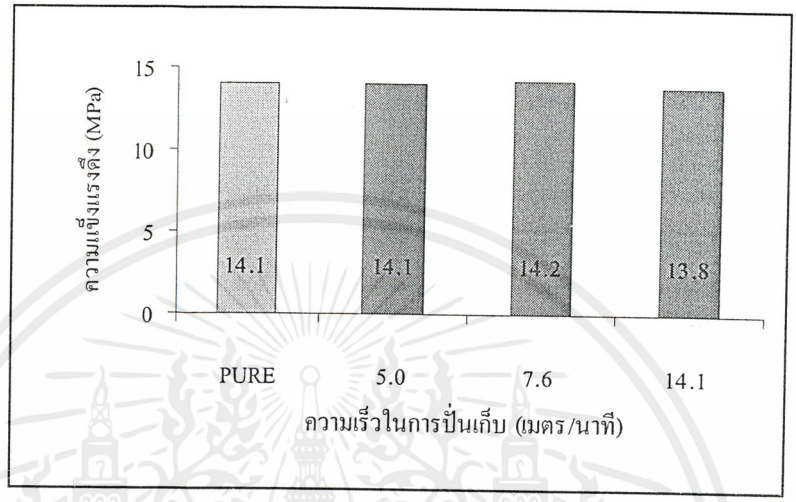


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่าง ๆ กัน

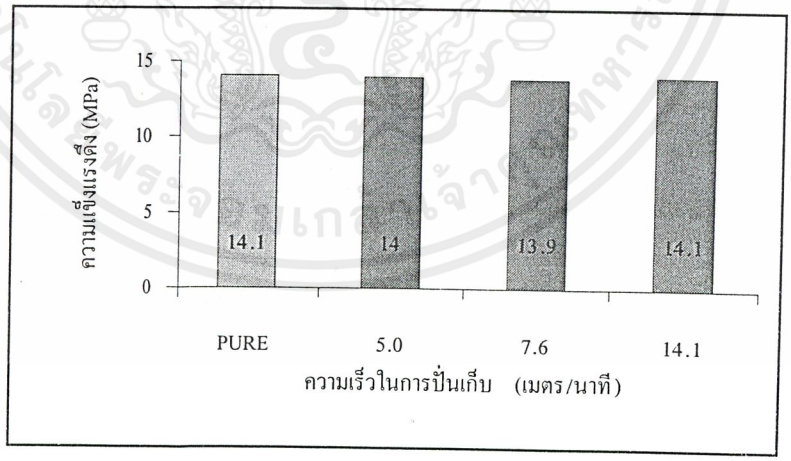
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การทดสอบความแข็งแรงดึง

จากกราฟรูปที่ 4.18 และ 4.19 จะพบว่าพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยเส้นเดียวมีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีส่วนเสริมแรง ทั้งนี้เนื่องมาจากคอมโพสิตมีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเพียงเส้นเดียว ค่าความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตคาดว่าเป็นผลมาจากเมตริกซ์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในคอมโพสิตมากกว่าที่จะเป็นผลจากเส้นใย จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

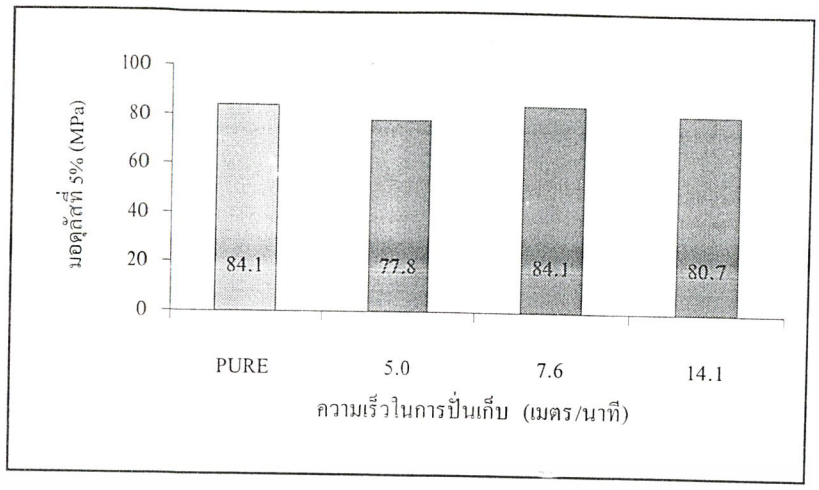


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงและความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เปรียบเทียบกับความแข็งแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

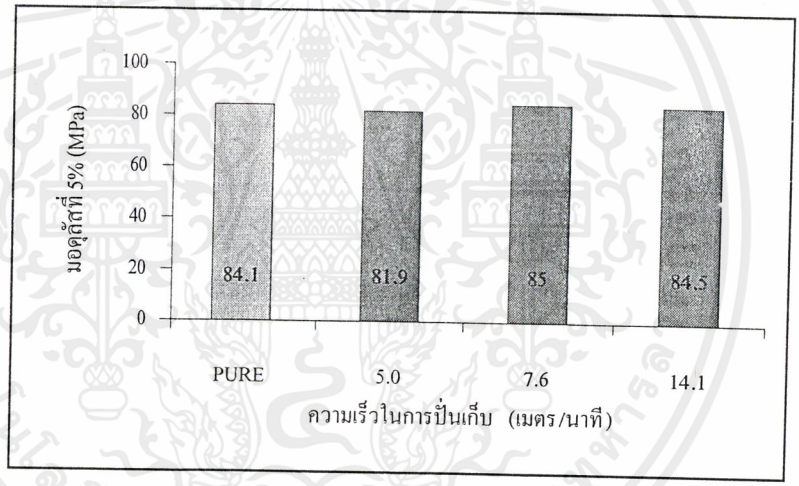


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงและความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับความแข็งแรงดึงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



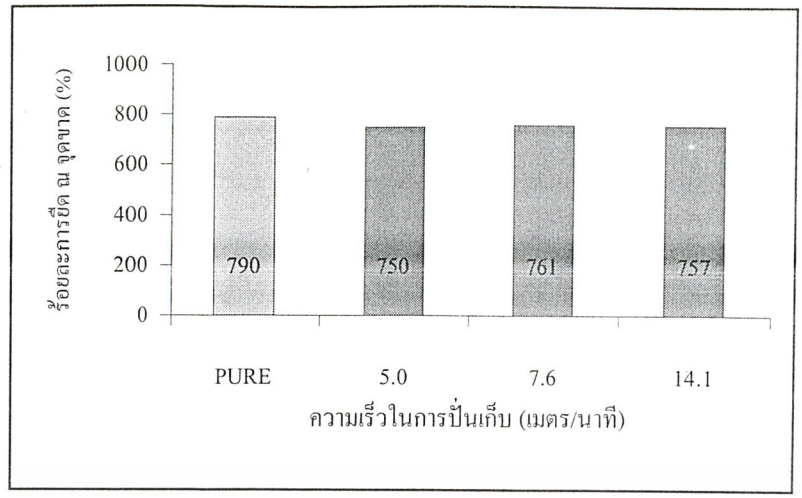
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



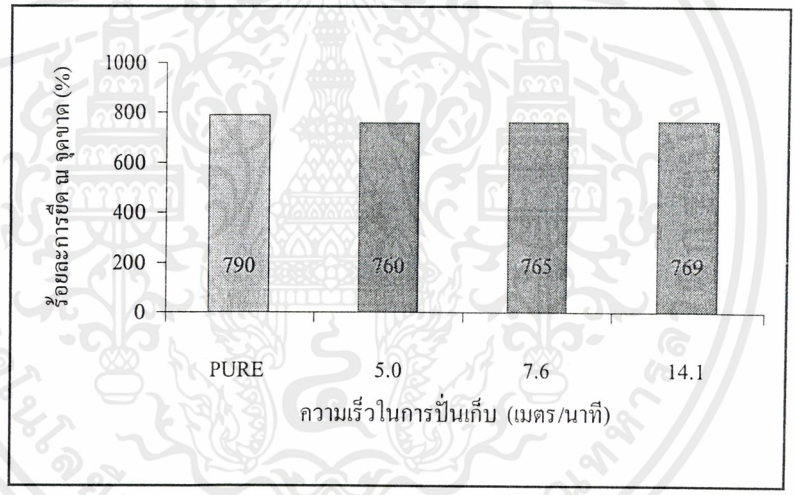
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 5 % และความเร็วในการปั่นเก็บของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จากกราฟรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่าพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเส้นเดียวทั้งสองชนิดมีค่ามอดุลัสที่ 5 % ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเมตริกซ์ที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยเส้นเดียวจะไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสของคอมโพสิตในทำนองเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดกับชนิดของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เปรียบเทียบกับค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



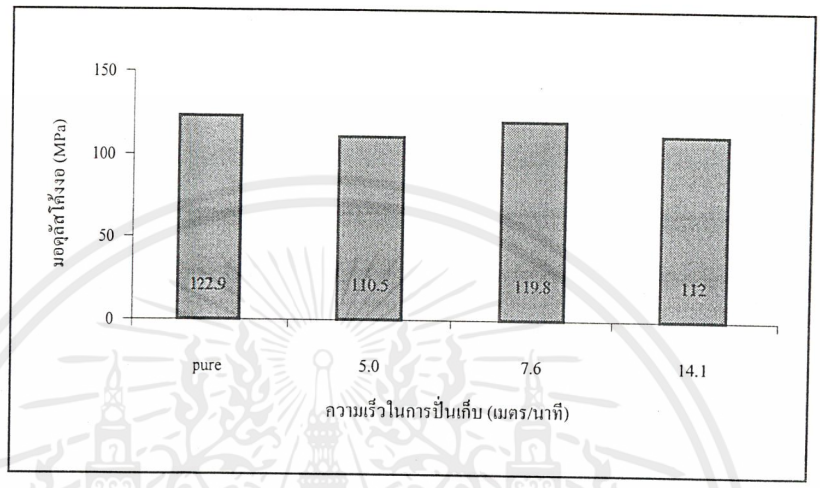
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดกับชนิดของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จากกราฟที่ 4.22 และ 4.23 พบว่าพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเส้นเดียวทั้งสองชนิดมีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเมตริกซ์ที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยเส้นเดียวจึงไม่มีผลต่อค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตในทำนองเดียวกับค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ 5 %

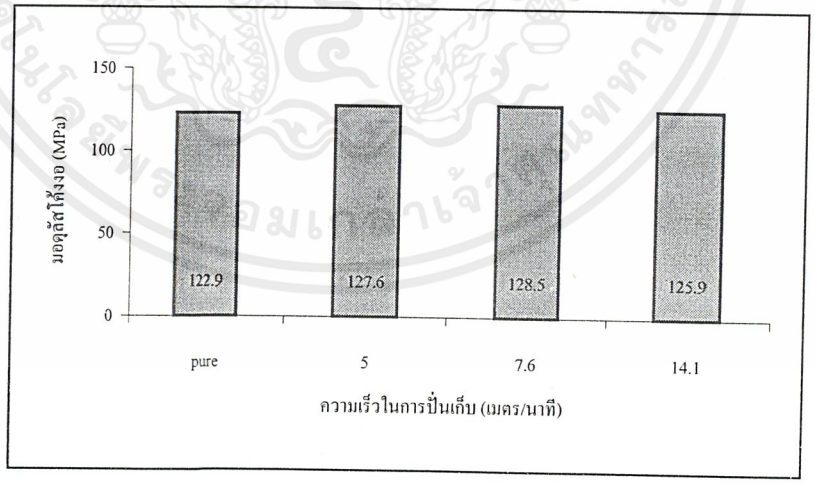
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบความโค้งงอ

จากการทดสอบสมบัติความโค้งงอของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว พบว่าค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 เนื่องจากมีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเดี่ยว ผลการทดลองที่ได้จึงเป็นผลเนื่องมาจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงโค้งงอและสมบัติเชิงกลอื่น ๆ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % และคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % และคอมโพสิตที่เสริมแรงและด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสโค้งงอที่ 5 % ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบหาแรงเฉือนที่อินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์โดยวิธีการดึงเส้นใยออก

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ต้องการแก้ปัญหาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเมตริกซ์และส่วนเสริมแรงที่มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงได้ทำการผลิตคอมโพสิตที่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน คือ พอลิเอทิลีน ซึ่งคาดว่าคอมโพสิตที่ได้จะมีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคสูง จากการทดลองหาค่าความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) ระหว่างวัฏภาค โดยใช้วิธีการดึงเส้นใยเส้นเดียวออก (Single-fiber pull-out test) นั้น พบว่าทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบเกิดการขาดที่ตัวเส้นใยเอง โดยเส้นใยจะเกิดการยืดตัวออกจนกระทั่งขาด แต่ไม่เกิดการหลุดออกของเส้นใยออกจากเมตริกซ์ดังที่คาดไว้ ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคทั้งสองได้ แต่สามารถคาดคะเนได้ว่าแรงเฉือนระหว่างวัฏภาคนั้นมีค่ามากกว่าความแข็งแรงดึงของเส้นใยเอง ซึ่งมีค่ามากกว่า 40 MPa (หัวข้อ 4.1.3) ส่วนสาเหตุที่ไม่สามารถหาค่าแรงเฉือนระหว่างวัฏภาคได้นั้นอาจเกิดเนื่องมาจากความแข็งแรงของเส้นใยนั้นยังมีค่าต่ำเกินไป หรืออีกส่วนหนึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิตคอมโพสิตที่ต้องใช้วิธีการอัดร้อน อาจทำให้เกิดการหลอมเหลวส่วนของพื้นผิวระหว่างวัฏภาคทั้งสองเข้าด้วยกันได้ ซึ่งจากสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่ผลิตได้จะได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.2.3 ต่อไป

4.2.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยต่างชนิดกัน คือ เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์ โดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ดังหัวข้อ 3.6.2 ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.6

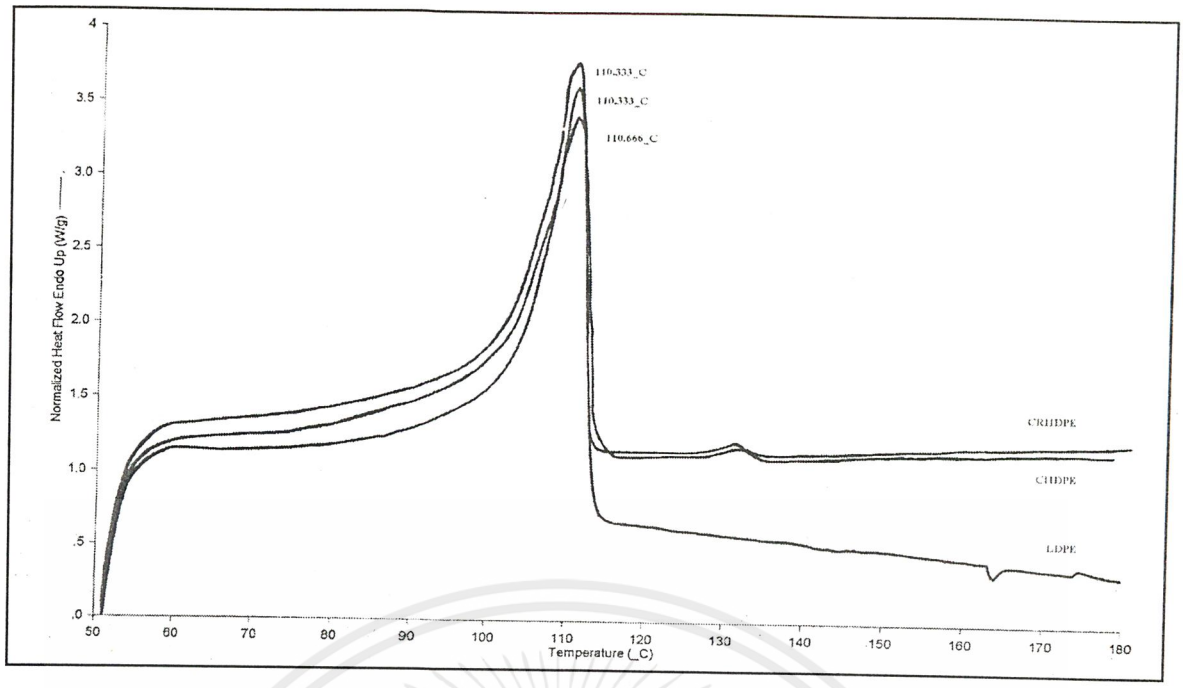
จากผลการทดลองที่ได้ พบว่า พอลิเอทิลีนคอมโพสิตจะแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวสองค่า คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของเมตริกซ์ ซึ่งก็คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และอุณหภูมิหลอมเหลวของเส้นใยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิดกันจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกันทั้งสองค่า เนื่องจากมีเมตริกซ์ชนิดเดียวกัน และอุณหภูมิของเส้นใยทั้งสองชนิดก็มีค่าใกล้เคียงกัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.4 และนอกจากนี้ค่าเอนทาลปีและอุณหภูมิเริ่มต้นในการหลอมผลึกยังมีค่าใกล้เคียงกันในคอมโพสิตทั้งสองชนิดอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ชนิดของเส้นใย	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ($^{\circ}C$)	ΔH (J/g)	อุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการหลอมเหลว ($^{\circ}C$)
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	110	74.4	104
คอมโพสิตจากเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	110 131	78.8 1.1	103
คอมโพสิตจากเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	111 132	78.2 0.7	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

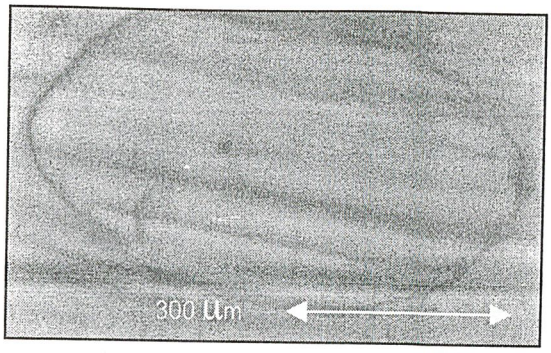


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (CHDPE) และเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว (CRHDPE) เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ได้จากเครื่อง DSC

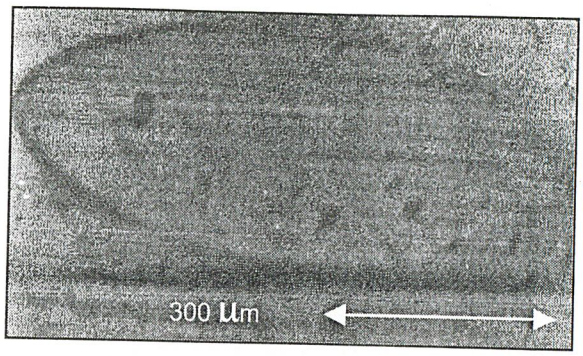
4.2.4 สัณฐานวิทยา

การดูสัณฐานวิทยาของรอยต่อระหว่างวัฏภาคทั้งสอง คือ เส้นใยและเมตริกซ์ของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่ผลิตได้ ทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ (หัวข้อ 3.6.3) ซึ่งเส้นใยที่อัดออกมาได้นั้นมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม เนื่องมาจากรูปร่างของหัวอัดเส้นใย ดังแสดงใน รูปที่ 4.14 และ 4.15 แต่เส้นใยที่พบในคอมโพสิตนั้น พบว่ามีภาคตัดขวางเปลี่ยนจากวงกลมเป็นวงรี ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีการอัดร้อน และบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคจะเห็นได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากวัฏภาคทั้งสองอาจเกิดการหลอมติดกันเพราะได้รับความร้อนในระหว่างการกดอัด ซึ่งอาจเป็นผลทำให้ไม่สามารถหาค่าแรงเฉือนระหว่างวัฏภาคได้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 พื้นที่หน้าตัดของคอมโพสิตจากเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง



รูปที่ 4.28 พื้นที่หน้าตัดของคอมโพสิตจากเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาคอมโพสิตจำลอง (Model study) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่มาทำจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน ซึ่งพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการทำเส้นใย คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว โดยทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวและอัดรีดผ่านหัวอัดเส้นใยในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและนำเส้นใยไปเสริมแรงในแผ่นชีทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เป็นเมตริกซ์ โดยใช้เครื่องอัดร้อนในการขึ้นรูปเป็นคอมโพสิต และในการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การทดสอบเส้นใยและการทดสอบพอลิเอทิลีนคอมโพสิต โดยจะทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา

5.1.1 เส้นใย

จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยทั้งสองชนิด คือ เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการไหลของขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วซึ่งแสดงว่าขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งสองชนิดลดลง
3. เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสที่ 5 % ค่ามอดุลัสที่ 10 % มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง
4. อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีค่าต่ำใกล้เคียงกับ เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว
5. ลักษณะพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยทั้งสองชนิดคล้ายกัน โดยมีพื้นผิวที่เรียบและมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 พอลิเอทิลีนคอมโพสิต

จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิดกัน เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีส่วนเสริมแรง สามารถสรุปได้ว่า

1. การเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีความเร็วในการปั่นเก็บต่างกัน จะมีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงโค้งงอ และค่ามอดุลัสโค้งงอที่มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีส่วนเสริมแรง โดยเส้นใยทั้งสองชนิดที่เสริมแรงในจะมีค่าที่ได้จากการทดสอบใกล้เคียงกัน
2. ค่าความแข็งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์มีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงดึงของเส้นใย ซึ่งไม่สามารถหาค่าได้
3. พอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิดกันจะมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก สองค่า คือ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของเมตริกซ์และของเส้นใย โดยค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของเส้นใยทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน
4. พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยที่พบในคอมโพสิตจะมีลักษณะเป็นวงรี ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตโดยการอัดร้อนและเกิดการหลอมเหลวบางส่วนระหว่างบริเวณผิวสัมผัสของเส้นใยและเมตริกซ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย เพื่อให้เส้นใยที่ได้มีความแข็งแรงดึงมากขึ้น
2. เพิ่มจำนวนเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงให้มากขึ้น
3. หาค่าแรงเฉือนระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์ โดยการเปลี่ยนวิธีการเตรียมตัวอย่างหรือเปลี่ยนวิธีการทดสอบเป็นวิธีอื่น ๆ เช่น ควบคุมอุณหภูมิขึ้นรูปไม่ให้เกิดการหลอมของเส้นใย หรือ fiber push-out test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. อิทธิพล แจ้งชัด ***พอลิเมอร์คอมโพสิต*** เอกสารประกอบการสอน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2544
2. ชัยวัตน์ ศิริวงศ์วานิชย์ ***เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน*** มหาวิทยาลัยมหิดล พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2542
3. W. Shalaby and D. Meng, "Self-reinforced ultra high molecular weight polyethylene composites", ***Poly-Med,***Oct.20 (1998)
4. K. Sheldon, K. Kwang, K. Young, D. Prevorsek and C. Dusan, "Rigid polyethylene reinforced composites having improved short beam shear strength", ***Allied-Signal,***April 9,1991
5. F. V. Lacroix, M. Werwert and K. Schulte, "Solution impregnation of polyethylene fiber/polyethylene matrix composites", *Composite.*,**29A** (1998) 371-376
6. M. K. Loultcheva, M. Proietto, N. Jilov and F. P. La Manita, "Recycling of high density polyethylene", *Polymer Degradation and Stability.*,**57** (1997) 77-81
7. A. Teishev, S. Incardona, C. Migliaresi and G. Marom, "Polyethylene fibers-Polyethylene matrix composites:Preparation and Physical Properties", *J. Appl. Poly. Sci.*,**50** (1993) 503-512
8. T. Suguru and I. Hajime , "Reinforcing fibrous material", ***Mitsui Petrochemical Industries,Ltd.,*** March 19(1999)
9. J. loos, T. Schimanski, J. Hofman, T. Peijs and P. J. Lemstra, "Morphological investigations of polypropylene single-fibre reinforced polypropylene model composites", *Polymer,***42** (2000) 3827-3834
10. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ***เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 2*** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2543
11. A.K. Patrikis, M.C. Andrews and R.J. Young, "Analysis of the single-fiber pull-out test by the use of Raman spectroscopy.Part I:Pull-out of Aramid fibres from an epoxy resin", *Comp. Sci.&Tech.*, **52** (1994) 387-396
11. อิทธิพล แจ้งชัด ***ฟิสิกส์พอลิเมอร์*** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2543
13. ข้อมูลจากบริษัท Thai Petrochemical Industry Public Co.,LTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ก. ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

1. การทดสอบสมบัติเส้นใย

ตาราง 1-1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดึง

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	5.0	38.3	3.0
	6.8	39.7	4.6
	7.6	48.4	3.9
	9.5	53.2	5.8
	14.1	60.7	8.5
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	5.0	42.4	2.9
	6.8	43.9	2.5
	7.6	53.8	8.0
	9.5	64.0	5.8
	14.1	64.9	7.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1-2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดุลัสที่ 5 %

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่ามอดุลัสที่ 5 % (MPa)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	5.0	113.6	33.5
	6.8	121.2	37.8
	7.6	125.0	32.2
	9.5	141.0	37.2
	14.1	177.2	41.3
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	5.0	128.2	38.2
	6.8	133.8	32.2
	7.6	141.8	36.6
	9.5	146.7	36.32
	14.1	198.9	36.33

ตาราง 1-3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดุลัสที่ 10 %

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่ามอดุลัสที่ 10 % (MPa)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	5.0	123.0	64.5
	6.8	138.7	50.7
	7.6	144.2	56.9
	9.5	165.7	55.5
	14.1	195.6	58.6
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	5.0	135.2	56.9
	6.8	149.7	43.7
	7.6	172.0	66.6
	9.5	183.5	50.5
	14.1	199.6	59.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1-4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	5.0	1028	124.1
	6.8	930	56.7
	7.6	865	72.8
	9.5	843	102.4
	14.1	835	94.8
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	5.0	210	30.3
	6.8	181	40.4
	7.6	163	48.3
	9.5	154	45.1
	14.1	142	61.3

2. การทดสอบสมบัติพอลิเอทิลีนคอมโพสิต

ตาราง 2-1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงดึง

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	PURE	14.1	0.58
	5.0	14.1	0.59
	7.6	14.2	0.44
	14.1	13.8	0.32
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	PURE	14.1	0.58
	5.0	14.0	0.38
	7.6	13.9	0.68
	14.1	14.1	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2-2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดุลัสที่ 5 %

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่ามอดุลัสที่ 5 % (MPa)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	PURE	84.1	5.3
	5.0	77.8	3.4
	7.6	84.1	3.0
	14.1	80.7	4.1
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	PURE	84.1	5.3
	5.0	81.9	2.1
	7.6	85.0	6.4
	14.1	84.5	4.6

ตาราง 2-3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	PURE	790	35.9
	5.0	750	53.4
	7.6	761	126.4
	14.1	757	74.5
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	PURE	790	35.9
	5.0	760	37.5
	7.6	765	14.8
	14.1	769	38.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

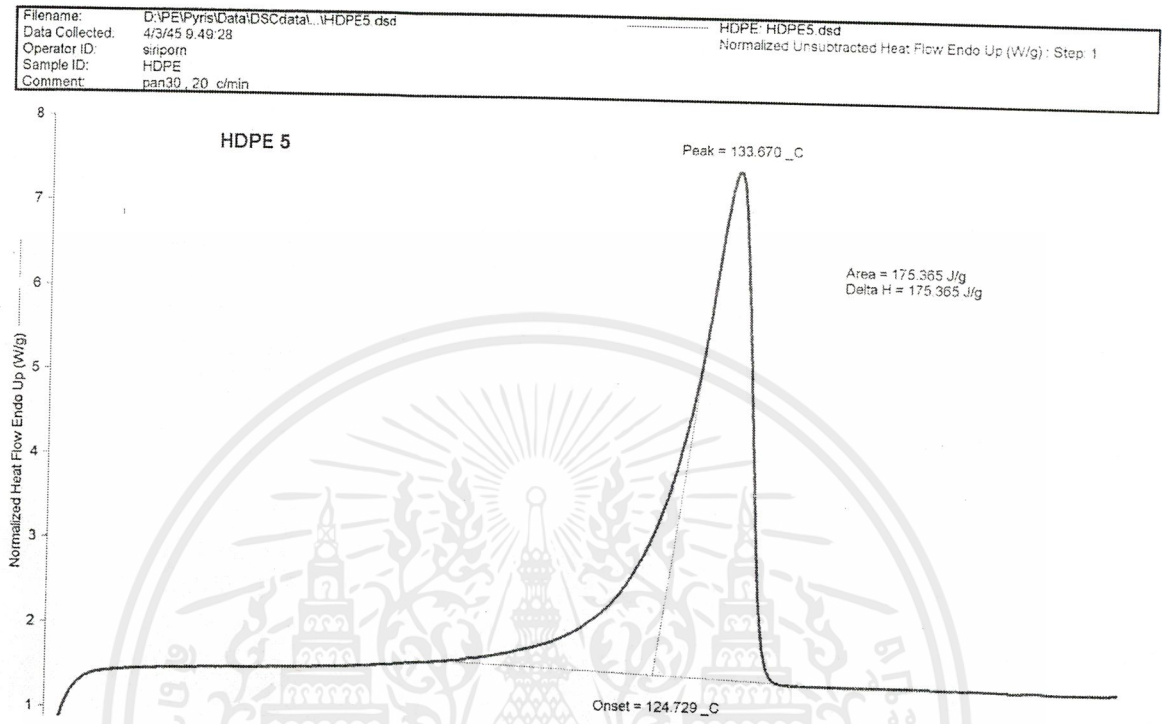
ตาราง 2-4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดุลัสโค้งงอ

ชนิดของเส้นใย	ความเร็วในการปั่นเก็บ (เมตร/นาที)	ค่ามอดุลัสโค้งงอ (MPa)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	PURE	122.9	25.28
	5.0	110.5	12.27
	7.6	119.8	8.15
	14.1	112.0	17.60
เส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว	PURE	122.9	25.28
	5.0	127.6	20.01
	7.6	128.5	14.36
	14.1	125.9	22.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

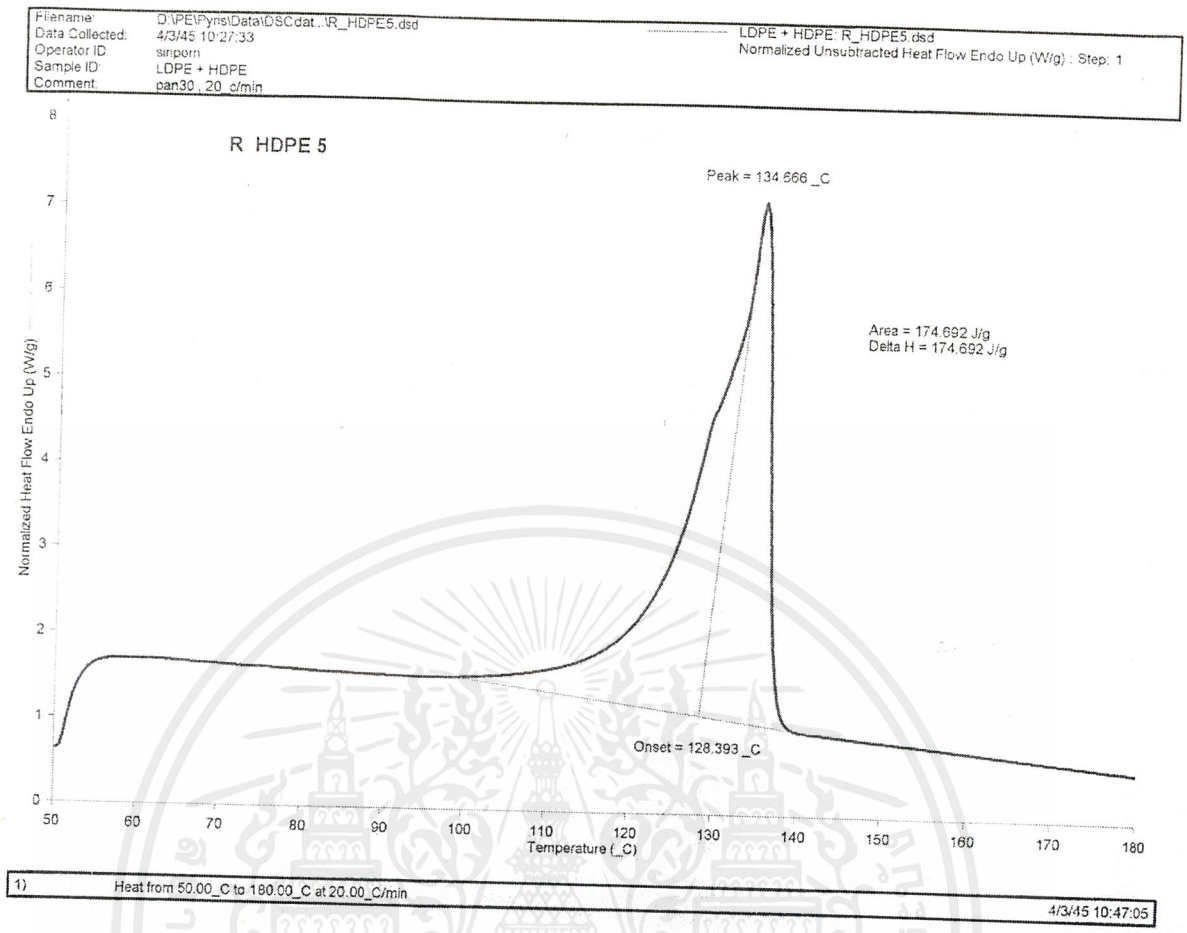
ข. กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนที่ได้จากเครื่อง DSC

1. การทดสอบเส้นใย



รูปที่ 1-1 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ได้จากเครื่อง DSC

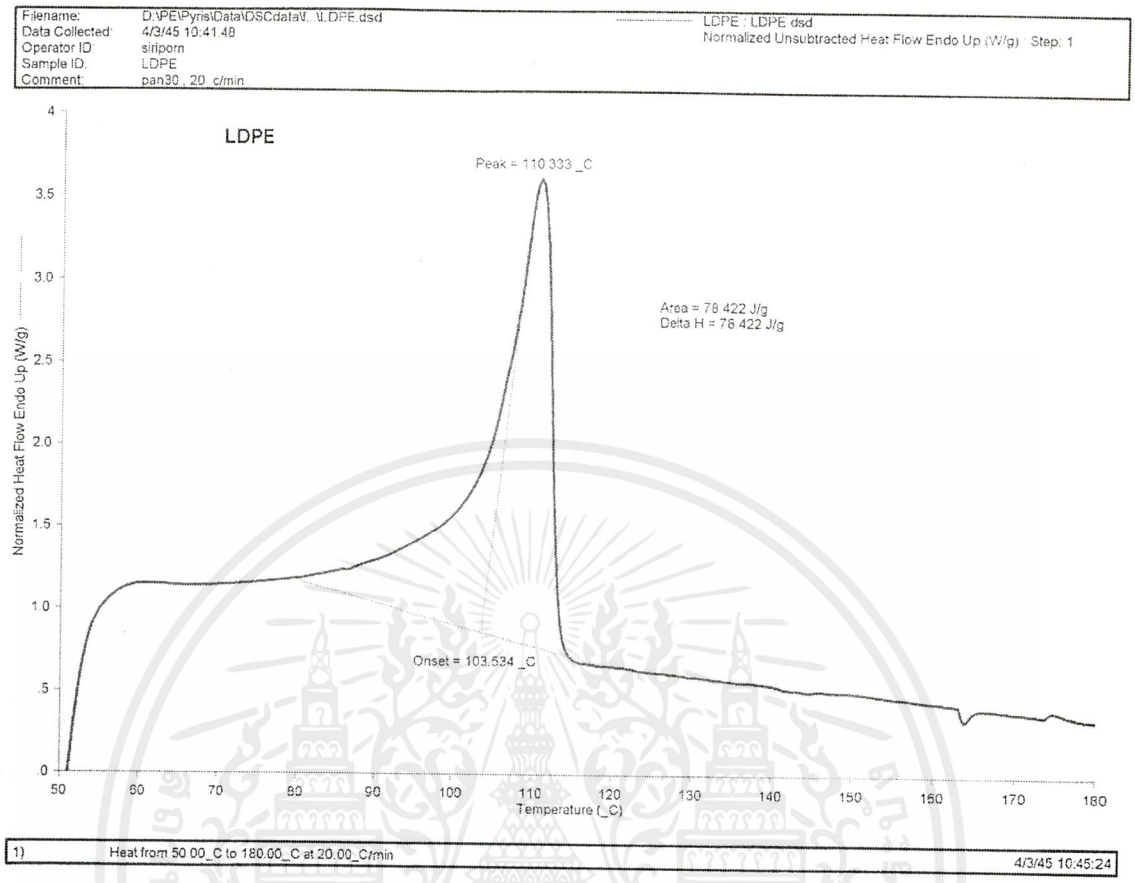
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-2 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ที่ได้จากเครื่องDSC

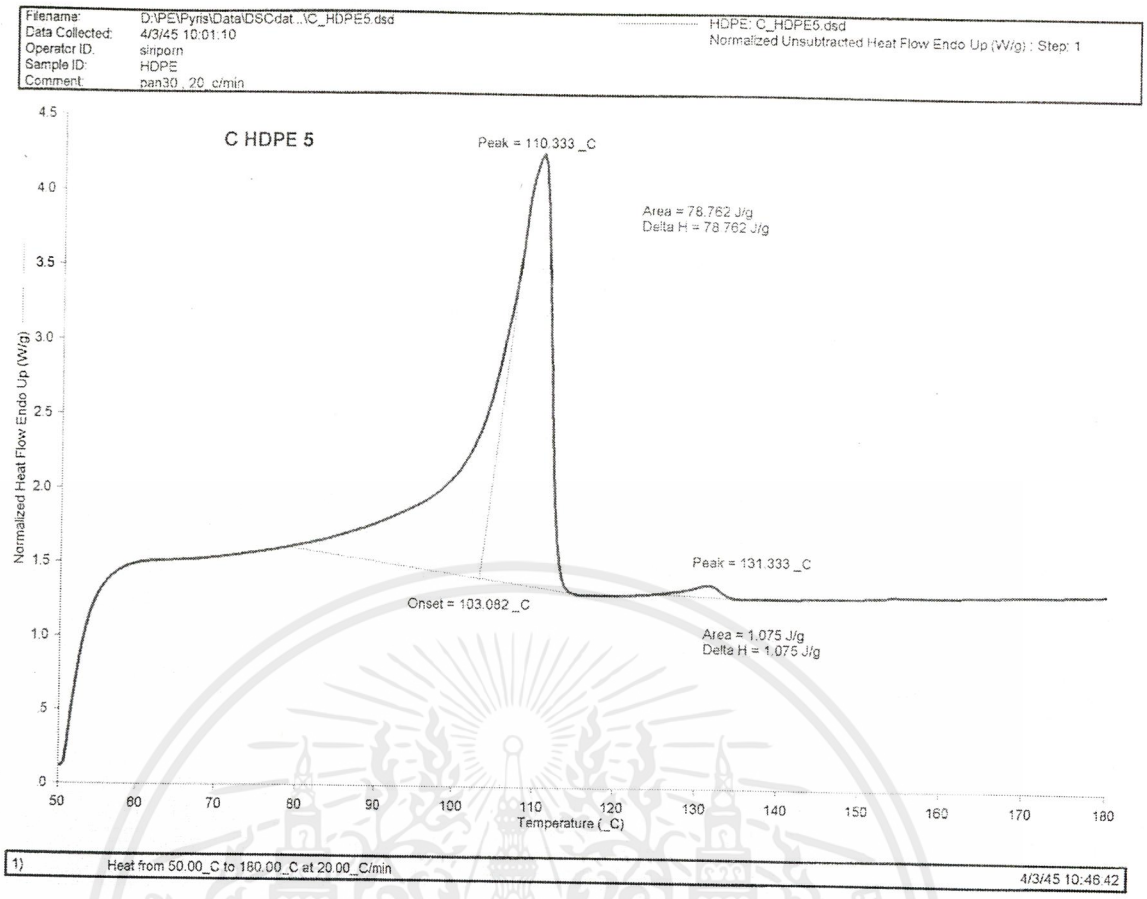
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบสมบัติเส้นใย



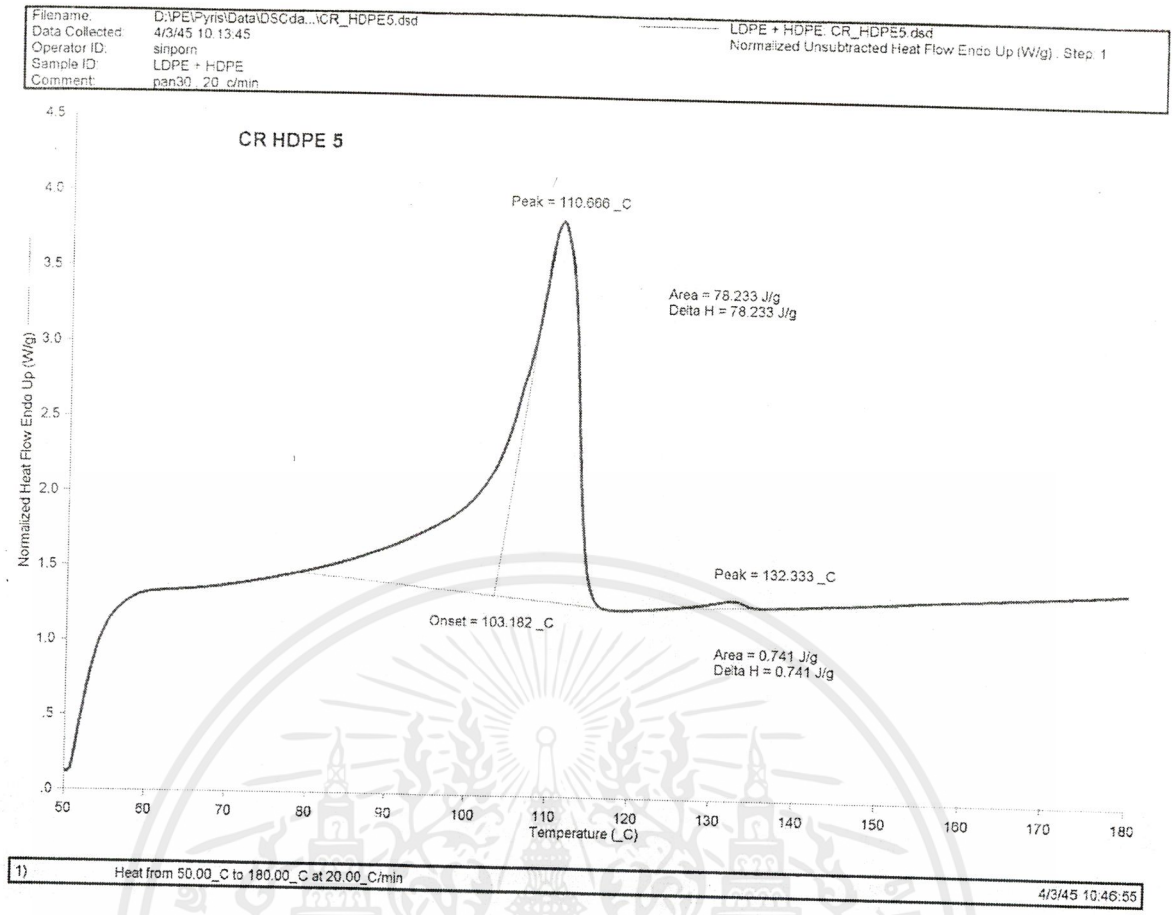
รูปที่ 2-1 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-2 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ได้จากเครื่อง DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-3 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้ว ที่ได้จากเครื่อง DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้