

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ

**PREPARATION OF JUTE FIBER REINFORCED
POLYURETHANE FOAM COMPOSITE**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION OF JUTE FIBER REINFORCED
POLYURETHANE FOAM COMPOSITE**

**PIYAPONG BUAHOM
PIYAWUT MASKONG**



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

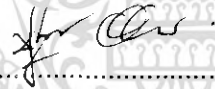
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง
โดย

การเตรียมวัสดุคอมพิวเตอร์ของพอลิยูรีเทนโพลีเมอเสริมแรงเส้นใยปอ
นายปิยพงศ์ บัวโฮม
นายปิยวุฒิ มาศไค้ง
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

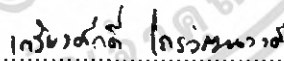
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร



..... ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)



..... กรรมการ
(ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์)



..... กรรมการ
(ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การเตรียมวัสดุคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ
โดย นายปิยพงศ์ บัวโสม
นายปิยวุฒิ มาศโสัง
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยระหว่างการปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีทางเคมีใช้กระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีทางกายภาพจะนำเส้นใยปอไปแช่ในเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอล เพื่อปรับปรุงสมบัติการเปียกและการยึดเกาะทางกลระหว่างเส้นใยและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของไกลคอลที่เปียกอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยกับหมู่ไอโซไซยาเนตของไอโซไซยาเนต ออม โฟสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่เสริมแรงเส้นใยปอในช่วง 0 ถึง 15 phr ผสมกับพอลิเอทิลีนไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต เพื่อขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยาในแม่พิมพ์ที่ความดันต่ำ แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกลและศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ซึ่งจากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยที่แตกต่างกันจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่อินเตอร์เฟซแตกต่างกัน การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพสามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีขึ้น และจากผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต พบว่า คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีอื่น นอกจากนี้เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสียหายจากการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำใคร่ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้ คือ

ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษาแนะนำ รวมทั้งความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำงาน

ดร.วุฒิพงษ์ รัมย์ีสันติวานนท์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการประสานงานกับศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

คุณพงศ์ประภาส ปิยมโนชา เจ้าหน้าที่วิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และนักศึกษาปริญญาโทภายใต้การดูแลของ ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ และเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ปิยพงศ์ บัวโสม

ปิยวุฒิ มาศโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 แนวคิดในการศึกษา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	4
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต.....	6
2.2 พอลิเมอร์โฟม.....	8
2.3 พอลิยูรีเทน โฟม.....	11
2.4 ผนังเซลล์พืช.....	13
2.5 ทฤษฎีการยึดเกาะ.....	16
2.6 การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตของพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใยธรรมชาติ.....	18
2.7 การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	19
2.8 การวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต.....	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 การทดลอง.....	23
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	23
3.3 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ไม่มี การปรับปรุงสมบัติของเส้นใย.....	24
3.4 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง (ต่อ)	
3.5 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยไกลคอล.....	25
3.6 การขึ้นรูปเพื่อเตรียมชิ้นงานคอมโพสิต.....	27
3.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต.....	29
3.8 การทดสอบสมบัติความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ.....	30
3.9 การวัดความหนาแน่นของคอมโพสิต.....	32
3.10 การทดลองเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงกรรมวิธีการปรับสภาพด้วย เอทิลีนไกลคอล.....	33
3.11 การศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ คอมโพสิต.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	35
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมส่วนเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล.....	35
4.1.1 การเปียกของเส้นใยปอหลังชุบด้วยเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีน ไกลคอล.....	35
4.1.2 การคลายตัวของเส้นใยปอในสารละลายไกลคอล.....	36
4.1.3 กรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยไกลคอล.....	37
4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	39
4.2.1 การกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิต.....	39
4.2.2 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ที่ อินเตอร์เฟส.....	40
4.2.3 ผลของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอที่มีต่อขนาดของเซลล์โฟม.....	42
4.2.4 ผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อขนาดของเซลล์โฟม.....	43
4.3 ผลการทดสอบสมบัติของคอมโพสิต.....	44
4.3.1 ความหนาแน่นของคอมโพสิต.....	44
4.3.2 ผลของการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทน คอมโพสิต.....	44
4.3.3 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกล ของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การกระจายตัวแบบต่างๆของส่วนเสริมแรงภายในคอมโพสิต.....	6
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของโฟม.....	8
รูปที่ 2.3 การเกิดยูรีเทน.....	11
รูปที่ 2.4 การเกิดพอลิยูรีเทนจากการปฏิกิริยาของไอโซไซยานต์กับพอลิโออล.....	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิยูรีเทน.....	12
รูปที่ 2.6 เซลล์ฟิช.....	14
รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางของเซลล์ฟิช.....	14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในผนังเซลล์ปฐมภูมิ.....	15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของ เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส.....	15
รูปที่ 2.10 การเกิดยูรีเทนบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิยูรีเทน เมทริกซ์.....	16
รูปที่ 2.11 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ.....	18
รูปที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา รุ่น FANUC Robot R-2000iA 165F.....	24
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาการคลายตัวของเส้นใยปอ เมื่อแช่ในสารละลายไกลคอล.....	26
รูปที่ 3.3 เครื่องกวนสำหรับเตรียมพอลิยูรีเทนเมทริกซ์.....	28
รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปคอมโพสิต.....	28
รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดความร้อนสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อควบคุม อุณหภูมิของแม่พิมพ์.....	29
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	30
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลรุ่น Instron 5500.....	31
รูปที่ 3.8 แรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบความทนแรงโค้งงอ.....	31
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ รุ่น MD-200S.....	32
รูปที่ 4.1 เส้นใยปอที่ ชุบด้วยเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล.....	35
รูปที่ 4.2 ลักษณะการคลายตัวของเส้นใยปอ ในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลาย โพรพิลีนไกลคอล.....	36
รูปที่ 4.6 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอ.....	41
รูปที่ 4.7 ลักษณะของเซลล์โฟมในพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ลักษณะของเซลล์โพลีเมอร์ในพอลิยูรีเทนโพลีคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติ.....	43
รูปที่ 4.9 ผลของการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอต่อความเค้นโค้งงอของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต.....	45
รูปที่ 4.10 ผลของการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอ ต่อค่ามอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต.....	45
รูปที่ 4.11 ผลของการปรับสภาพเส้นใยปอต่อความเค้นโค้งงอต่อความหนาแน่น.....	46
รูปที่ 4.12 ผลของการปรับสภาพเส้นใยปอต่อมอดูลัสโค้งงอต่อความหนาแน่น.....	47
รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณเส้นใยในพอลิยูรีเทนคอมโพสิตต่อความเค้นโค้งงอ.....	48
รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณเส้นใยปอในพอลิยูรีเทนคอมโพสิตต่อค่ามอดูลัสโค้งงอ.....	48
รูปที่ 4.15 ความเค้นโค้งงอต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโพลีคอมโพสิตที่ปริมาณการเสริมแรงเส้นใยในคอมโพสิตต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.16 มอดูลัสโค้งงอต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโพลีคอมโพสิตที่ปริมาณการเสริมแรงเส้นใยในคอมโพสิตต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.17 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอ.....	51
รูปที่ 4.18 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอ.....	52

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นแผลละจำนวนฟองก๊าซของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีต่างๆที่ปริมาณของเส้นใยเสริมแรง 5 phr.....	44
ตารางที่ 4.2 ความเค้นดึงของเส้นใยปอ.....	46
ตารางที่ ก-1 ผลการคำนวณปริมาณของสารตั้งต้นและเส้นใยเสริมแรงในการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ.....	60
ตารางที่ ข-1 ค่าพลังงานการยึดเกาะระหว่างเซลลูโลสกับเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	61
ตารางที่ ค-1 น้ำหนักของเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส.....	62
ตารางที่ ค-2 สัดส่วนปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส.....	62
ตารางที่ ค-3 น้ำหนักของเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส.....	63
ตารางที่ ค-4 สัดส่วนปริมาณของโพรพิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส.....	63
ตารางที่ ง-1 ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการแช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 60 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	64
ตารางที่ ง-2 ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการแช่ในสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ร้อยละ 60 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	64
ตารางที่ ง-3 ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการแช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	65
ตารางที่ จ-1 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใยปอ.....	66
ตารางที่ จ-2 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 5 phr.....	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ จ-3	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 10 phr.....	66
ตารางที่ จ-4	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 15phr.....	67
ตารางที่ จ-5	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย เอทิลีนไกลคอล 5 phr.....	67
ตารางที่ จ-6	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย เอทิลีนไกลคอล 10 phr.....	67
ตารางที่ จ-7	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย เอทิลีนไกลคอล 15 phr.....	68
ตารางที่ จ-8	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย โพรพิลีนไกลคอล 5 phr.....	68
ตารางที่ จ-9	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 phr.....	68
ตารางที่ ข-1	ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใย	70
ตารางที่ ข-2	ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 5 phr.....	70
ตารางที่ ข-3	ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 10 phr.....	70
ตารางที่ ข-4	ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 15 phr.....	71
ตารางที่ ข-5	ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 5 phr.....	71
ตารางที่ ข-6	ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 10 phr.....	71
ตารางที่ ข-7	ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 15 phr.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ซ-8 ความเค้น โค้งงอและมอดุลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอล 5 phr.....	72
ตารางที่ ซ-9 ความเค้น โค้งงอและมอดุลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 phr.....	72
ตารางที่ ซ-1 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ.....	73
ตารางที่ ซ-2 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล.....	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบัน ได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งได้รับความสนใจในการพัฒนาปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1-9] โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ที่มีการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ เช่น พวงมาลัย แผงคอนโซล อุปกรณ์ตกแต่งภายนอก และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ ภายในห้องโดยสาร เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนยานยนต์ ได้แก่ มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีน้ำหนักลดลง มีสมบัติทางกลที่ยอมรับได้ มีสมบัติการคงรูปที่ดี ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและชีวอนามัยของมนุษย์ [2]

พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerisation) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) ในโมเลกุลของพอลิแอลกอฮอล์ (Polyol) กับหมู่ไอโซไซยาเนต (Cyanate group, -NCO) ในโมเลกุลของไอโซไซยาเนต (Isocyanate) เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยยูรีเทน (Urethane linkage) ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง [10] และเหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ มีสมบัติทางกลที่ดี และทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ประกอบกับเส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักคือเซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งภายในประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตของไอโซไซยาเนต เกิดการเชื่อมต่อกันด้วยยูรีเทนที่บริเวณอินเตอร์เฟซ ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ให้ดีขึ้น [3] อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติก็คือการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่ไม่เหมาะสม และไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

โครงการนี้เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ โดยมุ่งเน้นถึงการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอ เพื่อเตรียมเป็นส่วนเสริมแรงให้แก่พอลิยูรีเทนโฟมให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนที่ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีความแข็งแรง ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและชีวอนามัยของผู้ใช้ ซึ่งอาจพัฒนาไปสู่กระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรม และสามารถช่วยลดการใช้เส้นใยสังเคราะห์ที่มีราคาแพงในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 แนวคิดในการศึกษา

โครงการนี้เป็นการศึกษากรรมวิธีการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ โดยศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอที่จะเตรียมเป็นส่วนเสริมแรง โดยปรับปรุงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) สารละลายเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) และสารละลายโพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) ซึ่งจะทำการศึกษากลวิธีกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอที่เหมาะสม เพื่อควบคุมปริมาณของเอทิลีนไกลคอลหรือโพรพิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอให้มีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ให้ดีขึ้น

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์ สมบัติส่วนเสริมแรง ขนาดและรูปร่างของส่วนเสริมแรง การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับส่วนเสริมแรง สัดส่วนปริมาณของส่วนเสริมแรง กระบวนการขึ้นรูป และการกระจายตัวของส่วนเสริมแรง [11] ในการศึกษาในส่วนเสริมแรงที่ใช้คือเส้นใยปอในรูปแบบเส้นเชือก เส้นใยปอที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นเส้นเชือกจะมีการถ่วงกันของกลุ่มเส้นใยปอเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการนำไปใช้งาน เมื่อนำเส้นเชือกดังกล่าวมาเตรียมเป็นส่วนเสริมแรงของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต อาจมีส่วนที่มีความซับซ้อนบนเส้นใยที่เมทริกซ์ไม่สามารถแพร่หรือไหลเข้าไปยึดเกาะกับเส้นใยได้ ทำให้มีพื้นที่ยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ลดลงและเกิดเป็นโพรง ซึ่งอาจส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงในบริเวณดังกล่าวอาจมีการเคลื่อนตัวเมื่อนำไปใช้งาน

จากการรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปแนวทางการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทน โฟมได้ 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

1.2.1 การเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนเส้นใยปอ โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีเพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับเส้นใย หรือการกำจัดองค์ประกอบทางเคมีอื่นของเส้นใย เช่น เซมิเซลลูโลสและลิกนินที่บดบังหรือทำพันธะกับเซลลูโลสบางส่วนออกไปโดยใช้กรดหรือด่าง [7-9] เพื่อทำให้มีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสที่มีโอกาสทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮซยานตเกิดการเชื่อมต่อบางยูรีเทนเทออีเทอร์เฟสเพิ่มขึ้น

1.2.2 การเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะ (Adhesion surface) แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1) การเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ในบริเวณพื้นผิวของเส้นใยที่มีความซับซ้อน โดยการแช่เส้นใยปอในสารที่มีแรงดึงผิวใกล้เคียงกับเส้นใยปอเพื่อให้เส้นใยคลายตัว [12] เพื่อลดพื้นที่ผิวของเส้นใยปอที่ไม่เกิดการยึดเกาะเนื่องจากอยู่ในส่วนที่ซับซ้อน ให้โมเลกุลของไฮโซไซยานตแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยปอ หรือให้พอลิยูรีเทนไหลเข้าไปยึดพื้นผิวของเส้นใยได้อย่างทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ ในบริเวณที่เกิดฟองโฟมบริเวณพื้นผิวของเส้นใยปอ ทำให้เกิดส่วนสัมผัสระหว่างเส้นใยปอและเมทริกซ์ลดลง โดยการกำจัดน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานต เกิดสารผลิตภัณฑ์เป็นยูเรียและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะรวมตัวกันเป็นฟองโฟมระหว่างกลไกการเกิด โฟมก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการคงรูปของโฟม [10]

1.2.3 การปรับปรุงการยึดเกาะเชิงกล (Mechanical Interlocking) โดยการพาสารตั้งต้นของพอลิยูรีเทนส่วนที่เป็นพอลิออลเข้าไปพร้อมกับเส้นใยปอในส่วนที่จับซ้อน อาศัยสมบัติการดูดซับ (Adsorption) และการเปียก (Wetting) ของสารที่มีแรงตึงผิวใกล้เคียงกัน [12-14] เพื่อให้โมเลกุลของไอโซไซยานตที่แพร่เข้าไปหรือพอลิยูรีเทนที่ไหลเข้าไปในมัดเส้นใย ทำปฏิกิริยาเกิดการเชื่อมโยงแบบยูรีเทนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยปอก่อนจะคงรูป

จากการวิเคราะห์แนวทางการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยการผสมในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและ โพรพิลีนไกลคอลเพื่อให้มัดเส้นใยกลายเป็นเส้นใยเดี่ยว และไกลคอลบางส่วนจะถูกดูดซับไว้บนเส้นใยปอ จากนั้นนำไปอบเพื่อให้ไกลคอลบางส่วนระเหยออกไปเพื่อควบคุมปริมาณของไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่เหมาะสม ก่อนนำไปผสมเป็นส่วนเสริมแรงในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต ซึ่งโครงการนี้จะทำการศึกษากรรมวิธีในกระบวนการเตรียมส่วนเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติเส้นใยด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล และศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 โดยมวลเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตามวิธีการของ D. Ray และคณะ [12] ซึ่งชิ้นงานคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้จะนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เพื่อศึกษาการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์โฟมที่อินเทอร์เฟซ ขนาดของฟองโฟมโดยเฉลี่ย และทดสอบสมบัติความต้านแรงโค้งงอ (Flexural strength) และ โมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เปรียบเทียบระหว่างพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใย เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยสารละลายไกลคอล

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.3.1 เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล โดยมุ่งเน้นถึงการเพิ่มสมบัติการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทน โฟม

1.3.2 เพื่อศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่เหมาะสม โดยมุ่งหวังให้ได้คอมโพสิตที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่น้ำหนักเท่ากัน

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

1.4.2 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ ได้แก่ กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล ปริมาณของไกลคอลที่ถูกดูดซับไว้บนเส้นใยปอ และปริมาณของเส้นใยปอที่เป็นส่วนเสริมแรงของคอมโพสิต โดยการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและทดสอบสมบัติทางกล

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอร์ของพอลิยูรีเทน โฟม

1.5.2 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยปอ

1.5.3 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยธรรมชาติ

1.5.4 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทน โฟม

1.5.5 ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดกรรมวิธีในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอล

1.5.6 เตรียมเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติ ปรับปรุงสมบัติด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ และปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล สำหรับใช้เป็นส่วนเสริมแรงของคอมโพสิต

1.5.7 ขึ้นรูปคอมโพสิตเพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เพื่อศึกษาสมบัติการยึดเกาะระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์และเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอลและไฮเดียมไฮดรอกไซด์ และทดสอบสมบัติทางกล

1.5.8 เลือกชนิดของไกลคอล และปรับเปลี่ยนกรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล

1.5.9 ขึ้นรูปเพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยไกลคอล

1.5.10 ศึกษาผลของปริมาณของส่วนเสริมแรง ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับพอลิเมอร์โฟม เส้นใยธรรมชาติ กลไกการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ กระบวนการผลิตและการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต

1.6.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล ที่ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนโฟม ได้ดีขึ้น

1.6.3 สามารถนำความรู้ที่ได้รับจากโครงการไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยธรรมชาติให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

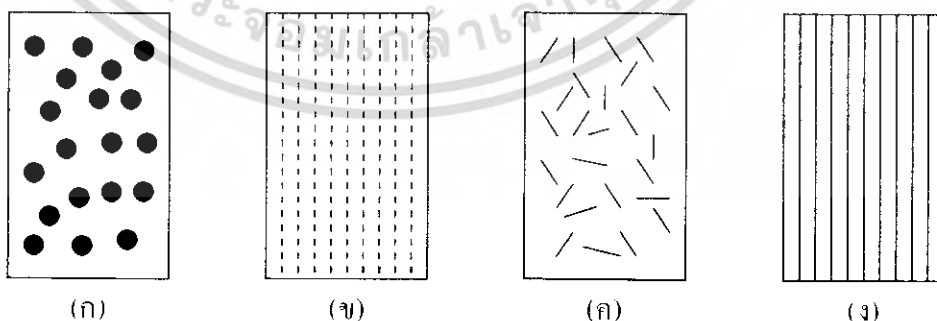
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) [4]

พอลิเมอร์คอมโพสิต หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ประเภทที่มีสมบัติต่างกัน โดยจะแยกกันอยู่ในต่างวิภาค และทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติดีขึ้น โดยทั่วไปเตรียมขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรง โมดูลัส ความหนาแน่น และความไม่เสถียรในรูปร่าง พอลิเมอร์คอมโพสิตประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเมทริกซ์ (Matrix phase) ซึ่งเป็นสารประเภทพอลิเมอร์ และส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหัตถ์นั้น วัสดุส่วนเนื้อหัตถ์จะรองรับการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเนื้อหัตถ์ให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นแผ่น เส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ด แตกกระจายอยู่ในเมทริกซ์ และอาจมีการจัดเรียงตัวแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ผลของการรวมวัสดุต่างประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีสมบัติความแข็งแรงทางกลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของพอลิเมอร์โดยลำพัง

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่

- 1) การยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์และส่วนเสริมแรง
- 2) สมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรง
- 3) ขนาดและรูปร่างของส่วนเสริมแรง
- 4) สัดส่วนปริมาณของเส้นใยเสริมแรงและพอลิเมอร์
- 5) กระบวนการขึ้นรูป
- 6) การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของส่วนเสริมแรง



รูปที่ 2.1 การกระจายตัวแบบต่างๆ ของส่วนเสริมแรงภายในคอมโพสิต [4]

(ก) อนุภาคเสริมแรงแบบกลุ่ม (ข) เส้นใยเสริมแรงไม่ต่อเนื่องทิศทางเดียว

(ค) เส้นใยสั้นเสริมแรงแบบกลุ่ม (ง) เส้นใยเสริมแรงต่อเนื่องทิศทางเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix)

พอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นส่วนที่ห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงไว้ โดยทั่วไปพอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีความเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง

หน้าที่ของเมทริกซ์ ได้แก่

- 1) รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของคอมโพสิต
- 2) รักษาการกระจายตัวของเส้นใย และแยกไม่ให้เส้นใยมารวมกัน
- 3) ทำให้คอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียหายภายใต้อุณหภูมิหรือแรงที่ระดับหนึ่ง
- 4) กระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังส่วนเสริมแรง
- 5) ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

2.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

ส่วนเสริมแรงมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจมีลักษณะเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆ ส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย ซึ่งอาจจะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้น ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในคอมโพสิตพอลิเมอร์ เช่น เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยธรรมชาติต่างๆ

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง ควรมีลักษณะดังนี้

- 1) เส้นใยควรมีมอดูลัสยืดหยุ่นสูง
- 2) เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
- 3) ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
- 4) เส้นใยควรจะเสถียร และรับแรงขณะจัดเก็บและขึ้นรูปได้
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

ปัจจุบันได้มีความสนใจในการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นส่วนเสริมแรงในคอมโพสิต ประเทศไทยมีเส้นใยธรรมชาติมากมาย ทั้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยโปรตีน เป็นต้น

ข้อดีของเส้นใยธรรมชาติ มีดังนี้

- 1) ราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต
- 2) เส้นใยจากพืชและสัตว์สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

ข้อจำกัดของการใช้วัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ต้องการปรับปรุงคือ

- 1) เส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการยึดเกาะกับวัสดุโครงสร้างต่ำ
- 2) เส้นใยธรรมชาติสามารถดูดซับน้ำสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์
- 3) เส้นใยธรรมชาติขาดความสม่ำเสมอของเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. พอลิเมอร์โฟม (Polymer foam) [10]

2.2.1 วัสดุโฟม

“วัสดุโฟม” หมายถึง วัสดุที่มีฟองก๊าซจำนวนมากกระจายตัวแทรกอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ นั้น ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุโฟมจะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัสดุ ได้แก่ วัสดุที่เป็นของแข็งหรือของเหลว และวัฏภาคก๊าซ ซึ่งวัฏภาคก๊าซจะแทรกตัวอยู่ในวัฏภาคของแข็งหรือของเหลว ทำให้สมบัติของวัสดุนั้นเปลี่ยนไป เช่น ความหนาแน่นลดลง ความแข็งแรงเชิงกลลดลงหรือคงที่ เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่เรียกว่า “พอลิเมอร์โฟม” นั้น ส่วนเนื้อโฟมหรือส่วนที่เป็นวัฏภาคของแข็ง อาจประกอบด้วยพอลิเมอร์หนึ่งชนิดหรือมากกว่า เช่น กรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน พอลิเมอร์ โฟมอาจมีลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว องค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตโฟม ระดับของการเกิดผลึก และปริมาณการเชื่อมโยงของ พอลิเมอร์

2.2.2 การแบ่งประเภทของโฟม

การแบ่งประเภทของโฟม สามารถแบ่งตามหลักเกณฑ์ต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

การแบ่งประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) โฟมแบบเซลล์เปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อกันจนทำให้ก๊าซ หรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในสามารถหมุนเวียนถึงกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก)

2) โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ที่ไม่ต่อกัน ทำให้ก๊าซหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในแต่ละเซลล์ไม่สามารถหมุนเวียนถึงกันได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.1 (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างของโฟม [10] (ก) แบบเซลล์เปิด (ข) แบบเซลล์ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งประเภทโฟมตามประเภทของพลาสติก สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) โฟมชนิดเทอร์โมเซตติง (Thermosetting foam) คือ พลาสติกโฟมที่ไม่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โฟมประเภทนี้ที่รู้จักกันดีคือ พอลิยูรีเทนโฟม ทั้งชนิดโฟมคงรูปและโฟมยืดหยุ่น เป็นต้น

2) โฟมชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) คือ พลาสติกโฟมที่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น พอลิเอทิลีนโฟม และพอลิสไตรีนโฟม เป็นต้น

การแบ่งประเภทโฟมตามลักษณะกระบวนการทำให้เกิดฟอง สามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

1) วิธีทางกายภาพ (Physical method) คือ ใช้ก๊าซความดันสูงอัดให้เกิดฟองก๊าซแทรกในเนื้อพอลิเมอร์ที่อ่อนตัวลงเนื่องจากความร้อน เมื่อลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ก๊าซที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์จะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดรูพรุนกระจายในพอลิเมอร์ หรือการใช้กระบวนการเชิงกล เช่นการใช้เครื่องปั่นให้อากาศแทรกเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ ก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการให้พอลิเมอร์คงรูป เพื่อกักก๊าซไว้ในโครงสร้างของเซลล์ ซึ่งเกิดเป็นโฟมในที่สุด

2) วิธีทางเคมี (Chemical method) คือ ใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปทำให้เกิดโฟม วัสดุเคมีที่ใช้มักประกอบด้วยสารเคมีที่ใช้เตรียมเนื้อพอลิเมอร์ และอีกชนิดหนึ่งเป็นสารที่ทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดก๊าซ และก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกกักไว้ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ในขณะที่โครงสร้างของพอลิเมอร์เริ่มอยู่ตัว ตัวอย่างเช่น พอลิยูรีเทนโฟม หรือการใช้สารเคมีที่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนผสมลงในพอลิเมอร์ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนก๊าซซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อพอลิเมอร์

2.2.3 หลักการของการเกิดโฟม

การเกิดโฟมเป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์และทางเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นที่ผสมเข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซ (Bubble nucleation) และการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโฟม ซึ่งการเกิดโฟมมีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์และมีพลังงานเพียงพอสำหรับเอาชนะแรงดันภายนอกเพื่อขยายขนาด จึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟองฟองออกมา

หากพิจารณาเป็นขั้นตอนของการเกิดโฟมแล้ว กระบวนการเกิดโฟม ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) การเริ่มเกิดฟองก๊าซ (Bubble initiation) หรือการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เป็นขั้นตอนที่เริ่มเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กๆ จำนวนมาก กระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์

(2) การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เป็นขั้นตอนที่ฟองก๊าซมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าไปในฟองก๊าซ เมื่อได้รับความร้อนหรือความดันของระบบลดลงและผลจากการรวมตัวกันของฟองก๊าซ

(3) การคงสภาพของโฟม (Stabilization) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟมของฟองก๊าซในขั้นตอนนี้ จะมีการคงสภาพและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด

2.2.4 สมบัติต่างๆ ของโฟม

ความหนาแน่นของโฟมจะแปรผัน โดยตรงกับปริมาตรก๊าซที่เกิดจากสารให้ฟองที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ที่จะทำเป็น โฟม ซึ่งสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงกด ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงดึง สามารถแสดงได้ดังนี้

เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) สมบัติความแข็งแรงต่างๆ เพิ่มขึ้น
- 2) ความสามารถในการดูดกลืนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น
- 3) ความสามารถในการยืดออก ณ จุดสูงสุดเพิ่มขึ้น
- 4) ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง ทำให้สมบัติการเป็นฉนวนความร้อนดีขึ้น
- 5) ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง

เมื่อขนาดเซลล์ของโฟมใหญ่ขึ้น จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

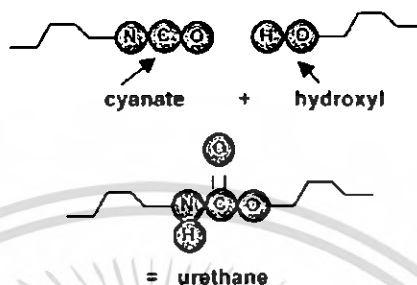
- 1) สมบัติความแข็งแรงต่างๆ จะลดลง
- 2) ความสามารถในการดูดกลืนการกระแทกจะลดลง
- 3) เกิดการโค้งงอในระหว่างการอัด
- 4) มีสมบัติการเป็นฉนวนลดลง
- 5) มีสมบัติการซึมผ่านของน้ำและอากาศเพิ่มขึ้น

เมื่อขนาดเซลล์ของโฟมเล็กลง จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ความแข็งแรงและการยืดออก ณ จุดสูงสุดจะเพิ่มขึ้น
- 2) มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนเพิ่มขึ้น

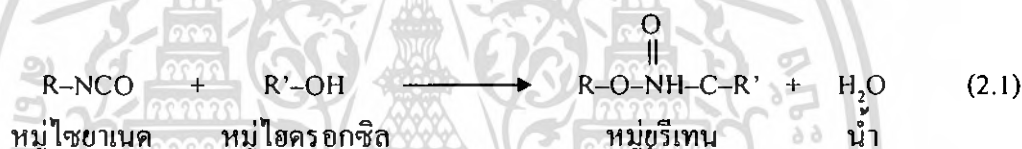
2.3 พอลิยูรีเทนโฟม [10]

พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นพอลิเมอร์ที่ภายในโมเลกุลมีการเชื่อมต่อกันด้วยยูรีเทน (Urethane linkage, -NHCOO-) เกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลหมู่ไซยาเนต (Cyanate group, -OCN) และ โมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) ดังรูปที่ 2.3

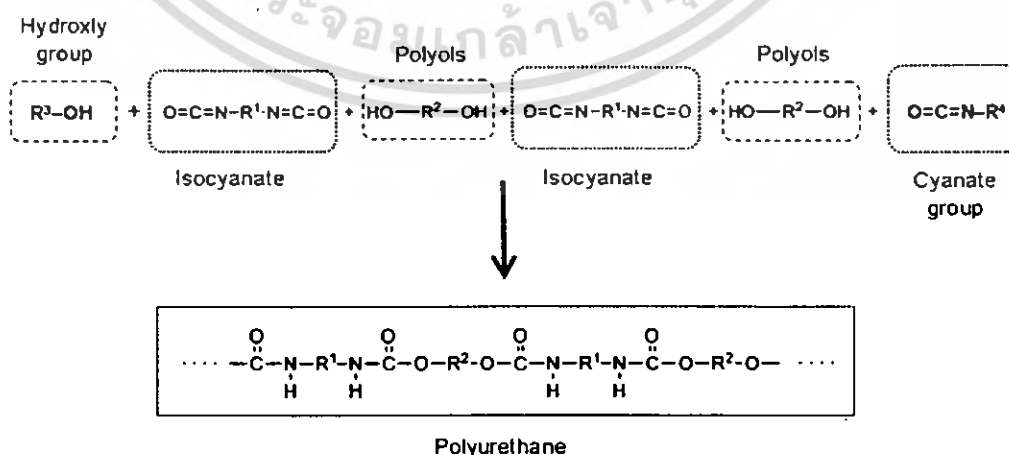


รูปที่ 2.3 การเกิดยูรีเทน [15]

ปฏิกิริยาการเกิดยูรีเทนแสดงดังสมการที่ 2.1



เมื่อหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิโออลและหมู่ไซยาเนตของไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากันจะทำให้โซ่โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดเป็นพอลิยูรีเทน แสดงดังรูปที่ 2.4 อาจเป็น โครงสร้างพอลิยูรีเทน โข่ตรงที่เป็นประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือพอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างเชื่อมขวางที่ซับซ้อนที่เป็นเทอร์โมเซต (Thermoset) ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้นของกระบวนการ



รูปที่ 2.4 การเกิดพอลิยูรีเทนจากปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับพอลิโออล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) ความหนืดต่ำ เพื่อให้เกิดการไหลและการเปียกกับเส้นใยได้ดี
- 2) มีระยะเวลาในการก่อเจล (Gel time) นาน เพื่อถ่ายและสะดวกต่อการเตรียมและหยุดกระบวนการขึ้นรูป
- 3) เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ที่รวดเร็ว
- 4) ต้นทุนการผลิตต่ำ

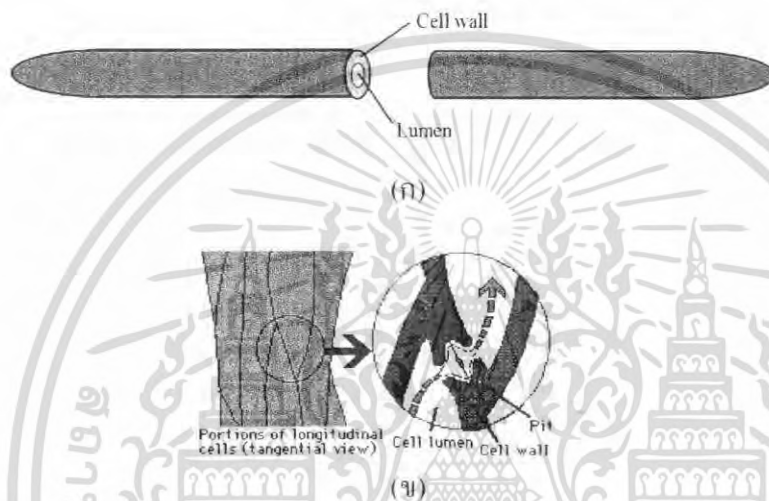
ไอโซไซยาเนตเป็นสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา การเกิดการเชื่อมต่อด้วยยูรีเทน (Urethane linkage) เป็นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบเติม (Addition polymerization) ปฏิกิริยาคายพลังงาน (Exothermic reaction) ในการออกแบบปฏิกิริยาและสภาวะของกระบวนการทำได้โดยการเลือกชนิดของพอลิออล ไอโซไซยาเนต และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เพื่อปรับแต่งสมบัติให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา การคายพลังงาน และสมบัติของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

2.4 ผนังเซลล์พืช (Plant cell wall) [16]

เซลล์พืชมีลักษณะเรียวยาว จัดเรียงตัวต่อกันตามความยาวของลำต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งส่วนประกอบสำคัญที่แสดงถึงความแข็งแรงของผนังเซลล์พืชคือผนังเซลล์ ซึ่งสมบัติความแข็ง (Rigidity) ของผนังเซลล์พืชจะทำให้พืชแต่ละชนิดมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นแตกต่างกัน ผนังเซลล์ทำหน้าที่หลายประการ เช่น ปกป้องส่วนประกอบภายในเซลล์พืช และเป็นส่วนสร้างความแข็งแรงให้กับพืช ผนังเซลล์ประกอบด้วยตัวกลางที่มีความพรุน (Porous medium) สำหรับลำเลียงแร่ธาตุและน้ำ เป็นต้น ความหนาและองค์ประกอบภายในของผนังเซลล์ทำให้พืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน พืชส่วนใหญ่ประกอบด้วยผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) ที่มีการสะสมจำนวนเซลล์มากขึ้นเมื่อเจริญเติบโต และผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) ซึ่งอยู่ถัดจากผนังเซลล์ปฐมภูมิ ผนังเซลล์ปฐมภูมิจะมีความบางและคดงอได้มากกว่า และบางส่วนของผนังเซลล์ทุติยภูมิจะพัฒนาเป็นผนังเซลล์ปฐมภูมิเมื่อหยุดการเจริญเติบโต ภาพตัดขวางของเซลล์พืชแสดงในรูปที่ 2.7

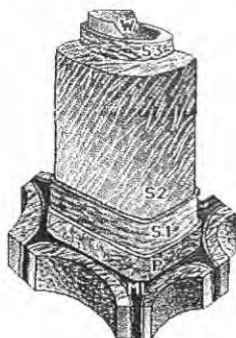
องค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.8 ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ในรูปของการจัดเรียงตัวเป็นไมโครไฟบริล (Microfibril) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีความซับซ้อนประกอบขึ้นจากการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลกลูโคส (Glucose) และจัดเรียงตัวเป็นผลึกไมโครคริสตัลไลน์ (Microcrystalline) อย่างเป็นระเบียบด้วยพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล ในขณะที่โมเลกุลของเซลลูโลสเป็นไมโครไฟบริลที่มีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) สองชนิด คือ เพกทิน (Pectin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าไกลแคนแบบเชื่อมขวาง (Cross-linking glycan) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับเซลลูโลสแต่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ทำให้มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง กระจายตัวอยู่รอบๆ เซลลูโลสไมโครไฟบริล ทำหน้าที่

เกาะเกี่ยวยึดให้เซลล์โลสแต่ละไมโครไฟบริลจัดเรียงตัวในแนวเดียวกันเป็นไฟบริล (Fibril) ซึ่งเพคตินและเฮมิเซลลูโลสจะจัดเรียงตัวกันภายในโครงข่ายของเซลล์โลสไมโครไฟบริล โกลแคนแบบเชื่อมขวางจะช่วยเพิ่มสมบัติความต้านแรงดึง (Tensile strength) ของเซลล์โลส ประกอบกับโครงข่ายโคเอ็กเทนซีฟ (coextensive) ของเพคตินจะช่วยให้เซลล์พืชมีสมบัติความทนแรงกด (Compressive strength) และภายในโครงข่ายนี้ยังพบ โปรตีนจำนวนเล็กน้อย ซึ่งโปรตีนเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกลให้แก่เซลล์พืช



รูปที่ 2.6 เซลล์พืช (ก) รูปร่างของเซลล์พืช [1] (ข) การจัดเรียงตัวของเซลล์พืช [17]

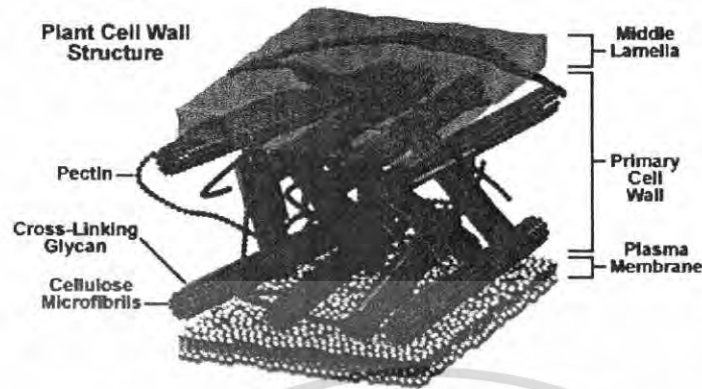
องค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ทุติยภูมิ มีความคล้ายคลึงกันผนังเซลล์ปฐมภูมิ และยังประกอบด้วยส่วนประกอบอื่น โดยเฉพาะลิกนิน (Lignin) ซึ่งเป็นชื่อทั่วไปของกลุ่มพอลิเมอร์ของอะโรมาติกแอลกอฮอล์ (Aromatic alcohol) ที่มีความแข็ง เป็นส่วนหลักที่ช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของพืช เป็นส่วนที่แสดงสมบัติเฉพาะของเซลล์เนื้อไม้ (Wood cell) จนถึงเซลล์เส้นใย (Fiber cell) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยคิวติน (Cutin) ซูเบอร์ริน (Suberin) และแว็กซ์



- ML : Middle Lamella
- P : Primary Layer Cell Wall
- S1,S2,S3 : Secondary Layer Cell Wall
- W : Cell Membrane

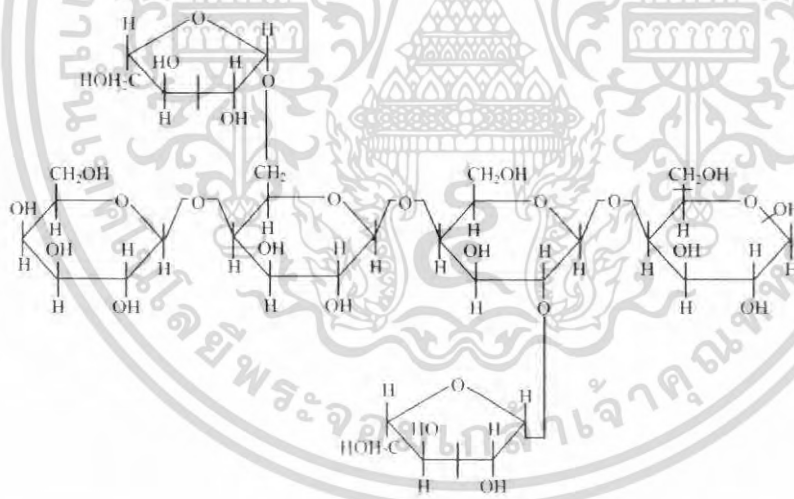
รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางของเซลล์พืช [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการทศภิเษกเท่านั้น มอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

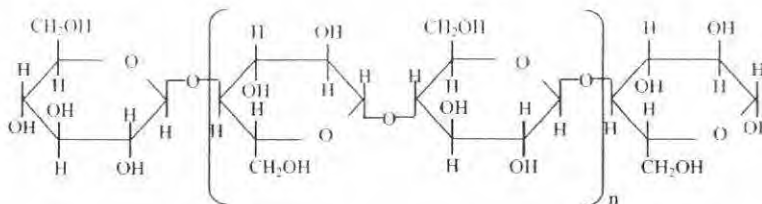


รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในผนังเซลล์ปฐมภูมิ [16]

ส่วนประกอบอื่นที่เกี่ยวข้องกับผนังเซลล์ของพืชคือ ลามิลลาส่วนกลาง (Middle lamella) ซึ่งมีเพคตินเป็นองค์ประกอบหลัก เป็นส่วนประกอบร่วมกับเซลล์รอบข้าง ปกคลุมผนังเซลล์ และยึดแต่ละเซลล์เข้าไว้ด้วยกันอย่างแน่นหนา แสดงดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8



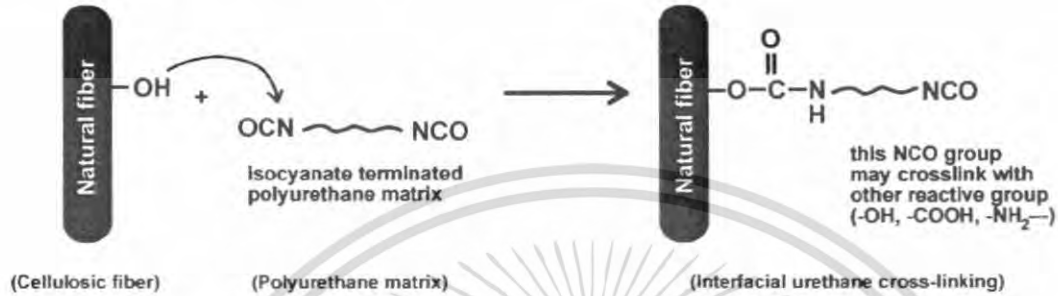
(ก)



(ข)

เอกสารนี้ **รูปที่ 2.9** โครงสร้างโมเลกุล [6] ของ (ก) เฮมิเซลลูโลส และ (ข) เซลลูโลส ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไอซายานเนต (-NCO) เกิดหมู่ยูรีเทนที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติได้ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเกิดยูรีเทนบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ [18]

2.5 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of adhesion) [19]

ในคอมโพสิต เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่อินเทอร์เฟซได้หลายวิธี กลไกการยึดเกาะหลักที่อินเทอร์เฟซของคอมโพสิตมี 5 กลไก ซึ่งอาจเกิดอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดร่วมกัน ดังนี้

1) พันธะเคมี (Chemical bonding)

พันธะเคมีเป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.11 (ก) เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมี (Functional groups) บนพื้นผิวและเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะเคมี ได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสถียรภาพของคอมโพสิตที่อินเทอร์เฟซจะเกี่ยวข้องกับการแตกหักของพันธะเคมีนี้ ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะเคมี ได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารประสานกู่ควบ (Coupling agents) กับฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใย และเมทริกซ์ เป็นต้น

2) การดูดซับและการเปียก (Adsorption and Wetting)

เมื่อพื้นผิวสองพื้นที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ จะเกิด “แรงดึงดูดเชิงกายภาพ” เช่น การเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้กันมากถึงระดับจุลภาคหรือระดับอะตอม แสดงดังรูปที่ 2.11 (ข) ความขรุขระของพื้นผิวจะเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถสัมผัสกัน

ตามทฤษฎีแรงยึดเกาะนี้มีความแข็งแรงสูง แต่ในทางปฏิบัติแรงเชิงกลนี้จะมีค่าต่ำเนื่องจากพื้นผิวเส้นใยมีชั้นของสิ่งสกปรกที่มีค่าพลังงานพื้นผิวอิสระหรือแรงดึงผิวต่ำ ทำให้เกิดการเกาะทางกายภาพกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ลดลง ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตเกิดฟองอากาศของฟองก๊าซถูกขังอยู่บนพื้นผิว เส้นใยทำให้พื้นผิวสัมผัสน้อยลง
- เกิดการหดตัวของเมทริกซ์หลังการเชื่อมโยง ทำให้เกิดแรงเค้น และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์

3) การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking)

การยึดเกาะเชิงกลเกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวเส้นใยในขณะที่เป็นของไหล สามารถที่จะแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่มีความขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอกร่องและช่องว่างอื่นๆ บนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงทำให้เกิดการแข็งตัวของเมทริกซ์ เป็นเหตุให้เมทริกซ์ถูกยึดให้ติดอยู่กับเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.11 (ค) ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เกิดการแทรกตัวของเมทริกซ์ รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถของเมทริกซ์ในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวเส้นใย พื้นผิวเส้นใยที่เรียบจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือไม่เกิดเลย เป็นต้น

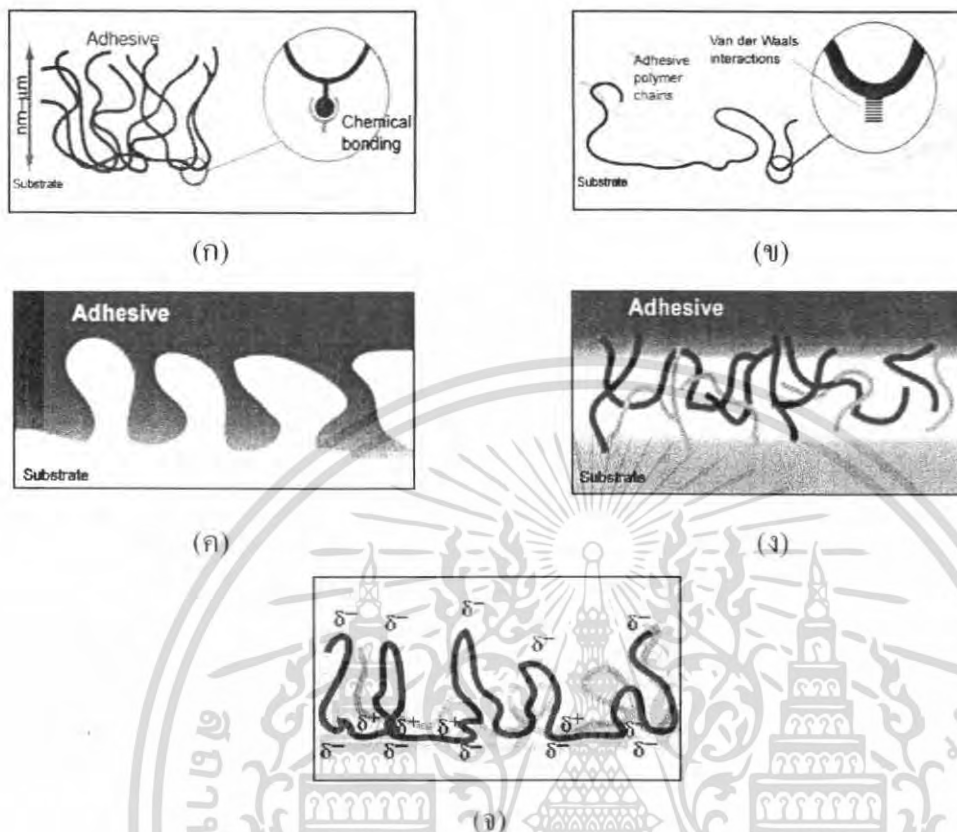
4) การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion)

การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ถ้าโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่ (Diffusion) เข้าหาซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.11 (ง) ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการเกาะเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่พันกัน เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่โมเลกุล ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล

ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเตอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำลายทาที่พื้นผิวของเส้นใย หรือการเติมสารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) เพื่อทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับเส้นใยที่มีการเคลื่อนของพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการสัมผัสเมทริกซ์ แต่ไม่เกิดในคอมโพสิตที่มีพื้นผิวเส้นใยแข็งและไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว ฯลฯ

5) แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction)

แรงดึงดูดทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นบวกและอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ เช่น อันตรกิริยาระหว่างกรดและเบสและพันธะไอออนิก ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ แรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าสถิตย์จะไม่ใช่แรงยึดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิต แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น การยึดเกาะด้วยแรงดึงดูดประจุแสดงดังรูปที่ 2.11 (จ)



รูปที่ 2.11 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ [20] (ก) พันธะเคมี (ข) การดูดซับและการเปื่อย
(ค) การยึดเกาะเชิงกล (ง) การแพร่เข้าหากัน (จ) แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์

2.6 การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตของพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใยธรรมชาติ [2-3]

การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตของพอลิเมอร์เสริมแรงเส้นใยทำได้โดยการปรับปรุงการประสาน ระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยธรรมชาติ ทำได้ 2 ลักษณะ คือ การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ และการปรับปรุงเนื้อหลักพอลิเมอร์

1) การปรับปรุงสมบัติของเนื้อหลักพอลิเมอร์

การปรับปรุงสมบัติของเนื้อหลักพอลิเมอร์ เป็นการผสมสารเติมแต่งเข้าไปในส่วนเมทริกส์ที่เป็นพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกล ให้เกิดการประสานกันกับเส้นใยเสริมแรงได้ดีขึ้น และคอมโพสิตที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น

2) การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ

การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ เป็นการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยบริเวณพื้นผิวที่จะเกิดการประสานกับเนื้อหลักพอลิเมอร์ แบ่งการปรับสภาพพื้นผิวเป็น 2 ประเภท ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1) การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมี

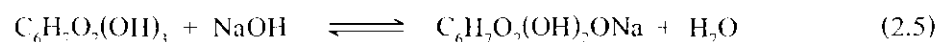
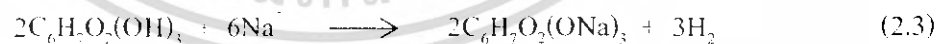
การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมี เช่น การกำจัดไขที่ผิว เส้นใย การกระตุ้นด้วยสารเคมี เป็นการปรับปรุงองค์ประกอบและสมบัติทางเคมีบริเวณพื้นผิวของ เส้นใย โดยการกำจัดสิ่งปลอมปนบนพื้นผิวของเส้นใยหรือเคลือบสารปรับสภาพลงบนพื้นผิวของ เส้นใย โดยพิจารณาผลจากข้อมูลการทดลองของมวลสาร ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น ตลอดจนลดการดูดซับความชื้นในผนังเซลล์ ทั้งนี้เป็นการปรับปรุงหมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิว ของเส้นใย ให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยกับเนื้อหลักพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยการทดสอบ สมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางกล

2.2) การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีทางฟิสิกส์

การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีทางฟิสิกส์ เป็นการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างและสมบัติของเส้นใยบริเวณพื้นผิว โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ เส้นใย เช่น การเติมแป้ง การเคลือบด้วยสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย การปรับสภาพด้วยความร้อน และการปรับสภาพด้วยประจุไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อปรับปรุงการเกิด พันธะทางฟิสิกส์ระหว่างเส้นใยกับเนื้อพอลิเมอร์

2.7 การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยด่าง [7]

การปรับสภาพเส้นใยด้วยด่าง (Alkali treatment) หรือกระบวนการเมอร์เซอร์ไรเซชัน (Mercerization) มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความพรุน (Porosity) และสร้างพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานตเกิดการเชื่อมต่อแบบยูรีเทน โดยการนำเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลสนำไปแช่ ในสารละลายด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น แล้วทำการล้างด้วยน้ำ ซึ่งการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ($C_6H_7O_2(OH)_3$) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ 2.3, 2.4 และ 2.5



การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเซลลูโลสด้วยด่าง เป็นการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยวิธีทางเคมี เพื่อกำจัดองค์ประกอบอื่นของเส้นใยพืช เช่น เฮมิเซลลูโลส เพกติน และลิกนิน ที่ยึดเกาะกับเซลลูโลสไมโครไฟบริลบางส่วน เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลขององค์ประกอบดังกล่าวจะทำพันธะเอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อนำยูนิทเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส โดยไอออนของแอลคาไลจะกระตุ้นให้เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างเซลลูโลสและองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เพื่อกำจัดออกจากเส้นใย เป็นการเพิ่มสัดส่วนปริมาณของเซลลูโลสในเส้นใย และเมื่อนำเส้นใยพีชที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยค่าไปเป็นส่วนเสริมแรงในคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน จะทำให้โอกาสของเซลลูโลสไมโครไฟบริลที่จะทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานเนตมีมากขึ้น ทำให้การยึดเกาะด้วยพันธะเคมีระหว่างพอลิยูรีเทนและเส้นใยด้วยการเชื่อมต่อแบบยูรีเทนมีมากขึ้นด้วย

2.9 การวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต

2.9.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา [19]

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา เป็นการศึกษาลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ โดยวิเคราะห์ภายใต้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ซึ่งเป็นเครื่องมือที่อาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดา ซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่า กล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่า จนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไป

ในการวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิตจะทำการวิเคราะห์การเสีรูปร่างของคอมโพสิต เพื่อพิจารณาการยึดเกาะระหว่างส่วนเสริมแรงและเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟส ซึ่งสามารถแบ่งการเสีรูปร่างได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การเสีรูปร่างบริเวณอินเตอร์เฟส (Adhesive failure) แสดงถึงการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์ และการเสีรูปร่างเนื้อเมทริกซ์หรือส่วนเสริมแรง (Cohesive failure) โดยไม่เกิดการเสีรูปร่างที่อินเตอร์เฟส แสดงถึงการยึดเกาะกันได้ดีของเมทริกซ์และส่วนเสริมแรง หากการยึดเกาะกันเกิดขึ้นได้ดีมาก ส่วนเสริมแรงและเมทริกซ์จะเกิดการเสีรูปร่างในลักษณะการหักไปพร้อมๆ กันโดยไม่มีรอยแยกที่อินเตอร์เฟส

2.9.2 การทดสอบสมบัติทางกล [20]

สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต พิจารณาจากการรับแรงของวัสดุเป็นเกณฑ์ ดังนี้

1) ทดสอบด้วยแรงดึง (Tensile test) เป็นการทดสอบความแข็งแรงในการต้านแรงดึง (Tensile strength) ด้วยแรงดึง 2 แรงที่กระทำต่อวัสดุ

2) ทดสอบด้วยแรงกดอัด (Compression test) ความแข็งแรงของวัสดุที่รับแรงกดจะขึ้นกับสมบัติความแข็งแรง และการยึดเกาะระหว่างของเส้นใยกับเนื้อพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงให้อยู่ในลักษณะเส้นตรงและป้องกันไม่ให้เส้นใยโค้งงอ

3) ทดสอบด้วยแรงเฉือน (Shear strength test) ลักษณะแรงที่กระทำต่อคอมโพสิตเป็นแรงเฉือนมีทิศทางตรงข้ามกัน และแนวแรงอยู่ต่างระดับกัน ภายใต้สภาวะแบบนี้พอลิเมอร์จะมีบทบาทอย่างมากเกี่ยวกับการยึดเกาะกับเส้นใยเสริมแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอมโพสิตที่มีการเรียงเส้นใยเสริมแรงเป็นชั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ทดสอบด้วยแรงคดงอ (Bending test) ลักษณะของแรงที่กระทำกับวัสดุมีลักษณะผสมของแรงดึง แรงเฉือน และแรงกดอัด 3 แรงเข้าด้วยกัน เพื่อใช้ทดสอบสมบัติความแข็งแรงโค้งงอ (flexural strength) ของวัสดุ

5) ทดสอบด้วยแรงกระแทก (Izod impact test) ลักษณะของแรงที่กระทำเป็นแรงกระแทกที่พื้นผิวของวัสดุ จะขึ้นกับสมบัติความแข็งตึง และการยืดเกาะของเส้นใยกับเนื้อพอลิเมอร์

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D. Ray และคณะ[12] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน พบว่า การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

ณรงค์ จิตปัญญาพงศ์ และคณะ[24] ได้ทำการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม พร้อมทั้งผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม พบว่า

- 1) การควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม จัดเป็นกระบวนการหล่อเย็นเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน
- 2) อุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับสภาวะการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม
- 3) การขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม เป็นผลมาจากการเกิดฟองก๊าซขึ้นระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและการขยายตัวของฟองก๊าซภายในเนื้อโฟม เมื่อได้รับความร้อน
- 4) อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซและความหนาแน่นของเนื้อขึ้นรูปอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์

L.M. Matuana และคณะ[25] ทำการวิจัยเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของคอมโพสิตโฟมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ กับเส้นใยเซลลูโลส พบว่าสัดส่วนช่องว่างของไมโครเซลลูลาร์โฟมนั้นถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิการทำโฟมและเวลาในการทำโฟม พบว่าเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนทำโฟมของคอมโพสิตกับไวนิลคลอไรด์ พบว่าคอมโพสิตก่อนโฟมให้ค่ามอดูลัสที่สูงกว่าแต่มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าความต้านทานแรงกระแทก และร้อยละยืดตัว น้อยกว่าวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ และเมื่อผ่านการทำโฟมแล้วนั้น ถึงแม้ว่าคอมโพสิตจะให้ค่าความแข็งแรงดึง และมอดูลัสลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากช่องว่างที่มากขึ้น แต่คอมโพสิตโฟมจะมค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานแรงกระแทกจะเพิ่มตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และถ้าสัดส่วนช่องว่างของคอมโพสิตโฟมมีถึงร้อยละ 56 จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเกือบสามเท่าเมื่อเทียบกับคอมโพสิตก่อนทำโฟม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 เส้นใยปอ

เส้นใยปอในการศึกษาครั้งนี้เป็นผลิตภัณฑ์เชือกปอของบริษัท เอ็นอีพี อสังหาริมทรัพย์ และอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 0.47 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.2 สารเคมีขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

สารเคมีขึ้นรูปพอลิยูรีเทน โฟมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Metal and Materials Technology center. MTEC) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัททีไอเอสเอฟ รุ่น BASF ElastroFlex E 2016 ซึ่งประกอบด้วยสารเคมี 2 ส่วน คือ พอลิโอล และไดไอโซไซยานาต ผสมในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่แม่พิมพ์อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยปอ

1. เอทิลีนไกลคอล
2. โพรพิลีนไกลคอล
3. เอทานอล
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์
5. น้ำ

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

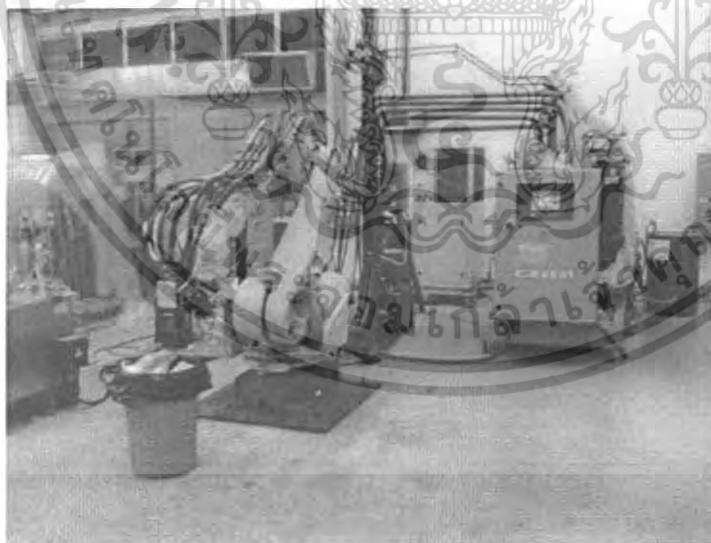
1. อุปกรณ์สำหรับตัดเส้นใยเสริมแรง ของเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (Reaction injection molding: RIM) รุ่น FANUC Robot R-2000iA 165F ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
2. เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Testing Machine) รุ่น Intron 5500
3. เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter) รุ่น MD-200S
4. เครื่องตัดชิ้นงาน (Vertical Bandsaw Machine) รุ่น FUHO-1610
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แม่พิมพ์และชุดแลกเปลี่ยนความร้อนควบคุมอุณหภูมิ สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานคอมโพสิต ที่มีขนาดความกว้าง 298 มิลลิเมตร ยาว 420 มิลลิเมตร และลึก 5 มิลลิเมตร
7. เครื่องชั่งแบบอิเล็กทรอนิกส์
8. เครื่องกวนผสม
9. ถังพลาสติก สำหรับแช่เส้นใยปรับปรุงสมบัติ ขนาดบรรจุ 5 ลิตร
10. กระจกบดวงขนาด 1,000 มิลลิเมตร
11. แก้วพลาสติกขนาดบรรจุ 500 มิลลิเมตร
12. ตู้อบ
13. แผ่นฟอยล์ (Foil) และถาดรอง สำหรับใช้เป็นภาชนะรองเส้นใยในการอบ
14. ถังป้องกันความชื้น
15. กล้องถ่ายรูป

3.3 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใย

ในการศึกษาครั้งนี้เส้นใยที่จะนำมาเป็นส่วนเสริมแรงของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต เตรียมจากการตัดเส้นเชือกปอ ให้มีขนาดความยาว 1 นิ้ว ด้วยอุปกรณ์ตัดเส้นใยเสริมแรงของเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (แสดงในรูปที่ 3.1) และเก็บเส้นใยที่ได้ไว้ในถังป้องกันความชื้น



รูปที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา รุ่น FANUC Robot R-2000iA 165F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีกรรมวิธีการเตรียมดังนี้

- 1) ออมเส้นใยเสริมแรงที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใย (ในข้อ 3.3) ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น
- 2) แช่เส้นใยที่ผ่านการอมแล้วลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 โดยมวล ที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ในมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย 15 ส่วน ต่อเส้นใยปอ 1 ส่วน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 3) นำเส้นใยที่ผ่านการแช่ไปล้างด้วยน้ำเป็นเวลา 5 นาที
- 4) นำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยไกลคอลล

3.5.1 การทดลองเพื่อศึกษาปริมาณของไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยไกลคอลล

การทดลองเพื่อศึกษาปริมาณของไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยที่ผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอลล ร้อยละ 60 มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเส้นใยปอบรรจุบนแผ่นฟอยล์จำนวน 10 กลุ่ม แต่ละกลุ่มมีน้ำหนักประมาณ 5 กรัม บันทึกผล
- 2) นำเส้นใยกลุ่มที่ 1-5 ไปปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลลตามกรรมวิธีในข้อ 3.5.2.1 และเส้นใยกลุ่มที่ 6-10 ไปปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอลลตามกรรมวิธีในข้อ 3.5.2.2
- 3) นำเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติแต่ละกลุ่มมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
- 4) กำหนดปริมาณของเอทิลีนไกลคอลลและโพรพิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่ จากสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละของไกลคอลลที่เหลืออยู่} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.5.2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาการคลายตัวของเส้นใยปอเมื่อแช่ในสารละลายไกลคอลล

การทดลองเพื่อศึกษาการคลายตัวของเส้นใยปอเมื่อแช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอลล และสารละลายโพรพิลีนไกลคอลล โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) เตรียมสารละลายเอทิลีน ไกลคอลและสารละลายโพรพิลีน ไกลคอลในเอทานอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 20 40 60 และ 100 โดยปริมาตร บรรจุในแก้วพลาสติก
- 2) คัดเลือกตัวอย่างเส้นใยปอ (จากข้อ 3.3) ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แช่ลงในสารละลาย ไกลคอลที่เตรียมไว้ อย่างละ 3 เส้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) บันทึกภาพ สังเกต และเปรียบเทียบลักษณะการคลายตัวของเส้นใย



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาการคลายตัวของเส้นใยปอเมื่อแช่ในสารละลายไกลคอล

3.5.3 กรรมวิธีการเตรียมส่วนเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล

จากการทดลองใน 3.5.1 พบว่าเส้นใยปอที่แช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอลมีการคลายตัวมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น และเส้นใยปอที่แช่ในสารละลายโพรพิลีนไกลคอลมีการคลายตัวมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโพรพิลีนไกลคอลลดลง โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 และร้อยละ 60 โดยปริมาตร มีการคลายตัวของเส้นใยทั้งส่วนที่แช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอลที่เหมาะสม ในเบื้องต้นได้เลือกสารละลายไกลคอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยปริมาตร สำหรับใช้ในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเสริมแรง โดยกำหนดกรรมวิธีการเตรียมส่วนเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล ดังนี้

3.5.3.1 กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล

การปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล ทำได้โดยการนำเส้นใยปอที่ยังไม่ปรับปรุงสมบัติ (ในข้อ 3.3) มาแช่ในสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ร้อยละ 60 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3.2 กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอล

การปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยสารละลาย โพรพิลีนไกลคอล ทำได้โดยการนำเส้นใยปอที่ยังไม่ปรับปรุงสมบัติ (ในข้อ 3.3) มาแช่ในสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ร้อยละ 60 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.5.4 การทดลองเพื่อศึกษาปริมาณไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล

- 1) การทดลองเพื่อศึกษาปริมาณของไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ร้อยละ 60 มีขั้นตอนดังนี้
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเส้นใยปอบรรจุบนแผ่นฟอยล์จำนวน 10 กลุ่ม แต่ละกลุ่มมีน้ำหนักประมาณ 5 กรัม บันทึกผล
- 3) นำเส้นใยปอกลุ่มที่ 1-5 ไปปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลตามกรรมวิธีในขั้นตอน ข้อ 3.5.3.1 และเส้นใยปอกลุ่มที่ 6-10 ไปปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอลตามกรรมวิธีในข้อ 3.5.3.2
- 4) นำเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติแต่ละกลุ่มมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
- 5) คำนวณปริมาณของเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ จากสมการ 3.1

3.6 การขึ้นรูปเพื่อเตรียมชิ้นงานคอมโพสิต

การขึ้นรูปคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับใช้ในการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางกล มีขั้นตอนดังนี้

- 1) คำนวณปริมาณของไอโซไซยานตและพอลิออลที่ต้องใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน และน้ำหนักของเส้นใยปอที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรง ดังแสดงในภาคผนวก ก
- 2) เตรียมแม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- 3) ชั่งน้ำหนักไอโซไซยานตและพอลิออล
- 4) ชั่งน้ำหนักเส้นใยเสริมแรง แล้ววางเส้นใยกระจายทั่วแม่พิมพ์
- 5) ผสมไอโซไซยานตและพอลิออลให้ทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 30 วินาที ด้วยเครื่องกวนผสม ที่ความเร็ว 1,200 รอบต่อนาทีจนเข้ากัน แล้วเทลงบนเส้นใยในแม่พิมพ์จนทั่ว
- 6) ปิดแม่พิมพ์ให้แน่นสนิท
- 7) ทิ้งไว้ 20 นาที เพื่อให้กระบวนการขึ้นรูปสมบูรณ์
- 8) เปิดแม่พิมพ์ และแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องกวนผสมสำหรับเตรียมพอลิเอทรีเทนเมทริกซ์

แม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแม่พิมพ์แบบควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำร้อน ซึ่งได้รับการให้ความร้อนจากเครื่องกำเนิดความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดความร้อนสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์

3.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) มีขั้นตอนดังนี้

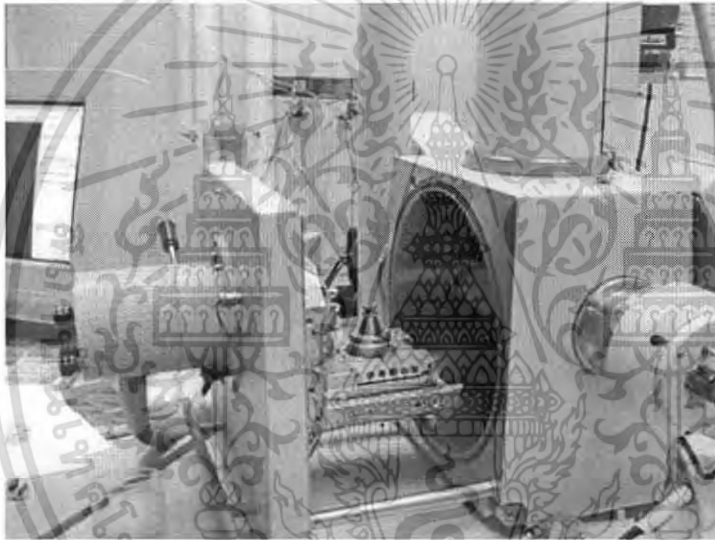
3.7.1 การเตรียมชิ้นงาน

เนื่องจากชิ้นงานคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปนั้นมีความเหนียว การตัดชิ้นส่วนตัวอย่างเพื่อดูภาคตัดขวางของวัสดุผสมจึงต้องใช้วิธีการแช่ลงในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งจะทำให้โพลีเมอร์และเส้นใยเสริมแรงแข็งตัวและเปราะสามารถแตกหักได้ง่าย จนกระทั่งคอมโพสิตมีอุณหภูมิต่ำแล้วทำการหักทันที (Cryogenic fracture) ทำให้พื้นที่ของชิ้นงานตัวอย่างด้านที่แตกหักไม่มีเกิดการยึดตัวของพอลิเมอร์ สามารถสังเกตพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างได้ชัดเจน ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะได้ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างมาเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างมีสมบัติการนำไฟฟ้าสำหรับนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.8) เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอครั้งนี้ จะพิจารณาลักษณะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟส การเสีรูปร่าง ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย และลักษณะของฟอง โฟม เปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีต่างๆ และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองโฟม จากภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยเทียบกับสเกลบอกขนาดที่ระบุในภาพ



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.8 การทดสอบสมบัติความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ

การทดสอบสมบัติความเค้นโค้งงอ (Flexural Strength) และมอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของคอมโพสิต เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790M-92

ทดสอบสมบัติความเค้นโค้งงอและมอดูลัส โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบจากการตัดชิ้นงานคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน ให้มีขนาดความกว้าง 13 มิลลิเมตร และยาว 125 มิลลิเมตร และทดสอบสมบัติด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกล (Universal Testing Machine) รุ่น Intron 5500 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้การดัดโค้งแบบ 3 จุด (3 Point Flexure Test) เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้าม บริเวณปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

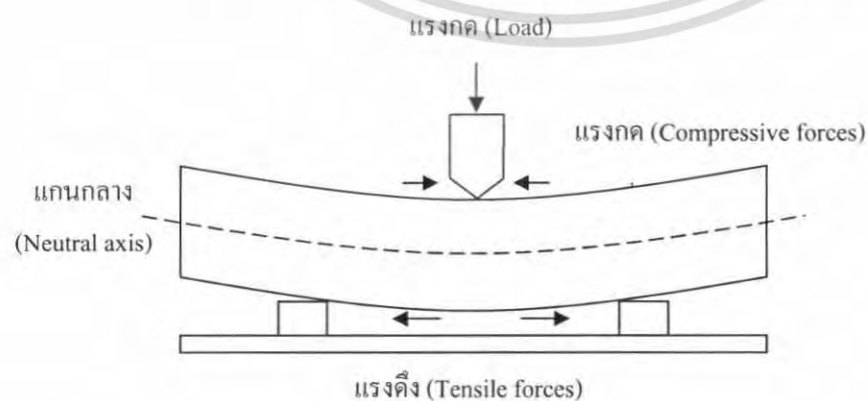
ทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และสภาวะในการทดสอบเป็นดังนี้

- | | |
|------------------------------------------------|----------------------|
| - โหลดเซลล์ (Load cell) | 1 กิโลนิวตัน (kN) |
| - ระยะห่างระหว่างขารองรับชิ้นงาน (Span length) | 96 มิลลิเมตร |
| - ความเร็วในการกด (Compression speed) | 2.6 มิลลิเมตรต่อนาที |

แล้วนำผลการทดสอบ ได้แก่ ค่าความเค้นโค้งงอ (Flexural stress) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของแต่ละชิ้นงานมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกล รุ่น Instron 5500



รูปที่ 3.8 แรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบความทนแรงโค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การวัดความหนาแน่นของคอมโพสิต

นำตัวอย่างชิ้นงานของคอมโพสิตที่ไม่เสริมแรงเส้นใย เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับสภาพ และเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ที่ปริมาณการเสริมแรงต่างๆ ที่ผ่านการทดสอบทางกลแล้วมา วัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter)

เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นรุ่น MD-200S ดังแสดง ในรูปที่ 3.8 ซึ่งใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) เพื่อหาความหนาแน่นและกำหนดความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1.000 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 4 องศาเซลเซียสเป็นค่าอ้างอิง เครื่อง MD-200S สามารถวัดความหนาแน่นของวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ ยกเว้นวัสดุที่เป็นผง และของเหลวที่มีความหนืดสูง วัสดุตัวอย่างที่นำมาทดสอบคือ คอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟม เสริมแรงเส้นใยปอ โดยตัวกลางของเหลวคือน้ำ ก่อที่จะทำการวัดค่าจะต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อยเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการใช้งาน เพื่อเป็นการอุ่นเครื่องและเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ อุณหภูมิห้อง

ขั้นตอนการใช้งาน

- 1) ตั้งค่าน้ำจ่อแสดงผลให้เป็นศูนย์
- 2) ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างในอากาศขณะแห้งแล้วทำการบันทึกค่า
- 3) ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างในน้ำแล้วทำการบันทึกค่า (หากมีฟองอากาศเกาะอยู่ที่วัสดุตัวอย่างให้พยายามกำจัดออกก่อนที่จะบันทึกค่า)
- 4) เครื่องจะแสดงผลหาความหนาแน่นทางจอแสดงผล
- 5) นำวัสดุตัวอย่างออกจากเครื่อง (ในการนำวัสดุตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้ที่ลิบ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำส่นออกมาทำความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอเล็กทรอนิกส์ รุ่น MD-200S

3.10 การทดลองเพื่อศึกษาหาแนวทางในการปรับปรุงกรรมวิธีการปรับสภาพด้วยเอทิลีนไกลคอล

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาของตัวอย่างของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิตพบว่า พอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล ตามกรรมวิธีในข้อ 3.5.2 ที่ใช้สารละลายเอทิลีนไกลคอลมีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟสดีกว่าการปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอล แต่เส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลบางส่วนมีปริมาณของเอทิลีนไกลคอลเหลืออยู่ที่บริเวณอินเตอร์เฟสเป็นจำนวนมาก โดยเปียกอยู่บนผิวของเส้นใย ซึ่งทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์เกิดขึ้นไม่ได้ จึงได้ทำการศึกษาแนวทางการแก้ไข ดังนี้

3.10.1 การปรับปรุงกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอล

การทดลองนี้เป็นการปรับเปลี่ยนกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเสริมแรง มุ่งเน้นถึงการลดปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยให้น้อยลง โดยการลดความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบ คือ นำเส้นใยที่ยังไม่ปรับปรุงสมบัติมาแช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 50 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผสมขึ้นรูป ตามวิธีในข้อ 3.6 ที่ปริมาณเส้นใยเสริมแรงในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5 phr แล้วนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาทดสอบสมบัติทางกล และทดลองเพื่อหาปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ เปรียบเทียบกับการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยเอทิลีนไกลคอลในข้อ 3.5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาวิธีการผสมขึ้นรูปคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล

เนื่องจากเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล ตามข้อ 3.5.2.2 เส้นใยบางส่วนมีปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เปียกบนผิวของเส้นใยปอเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก จึงได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาแนวทางการปรับเปลี่ยนลำดับวิธีการผสมขึ้นรูป โดยมีลำดับการผสมดังนี้

1. ผสมเส้นใยลงในไอโซไซยานเนต เพื่อให้ไอโซไซยานเนตทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยปอเกิดการเชื่อมต่อแบบยูรีเทน และทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลที่เปียกอยู่บนผิวของเส้นใยเพื่อเพิ่มการยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking)
2. เติมพอลิเอทิลีนและกวนผสมให้เข้ากัน เพื่อให้พอลิเอทิลีนทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานเนต ส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับเส้นใยปอและเอทิลีนไกลคอล

ในการทดลองนี้จะทำการผสมขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโพนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5 phr แล้วนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปในข้อ 3.6

3.11 การศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิต

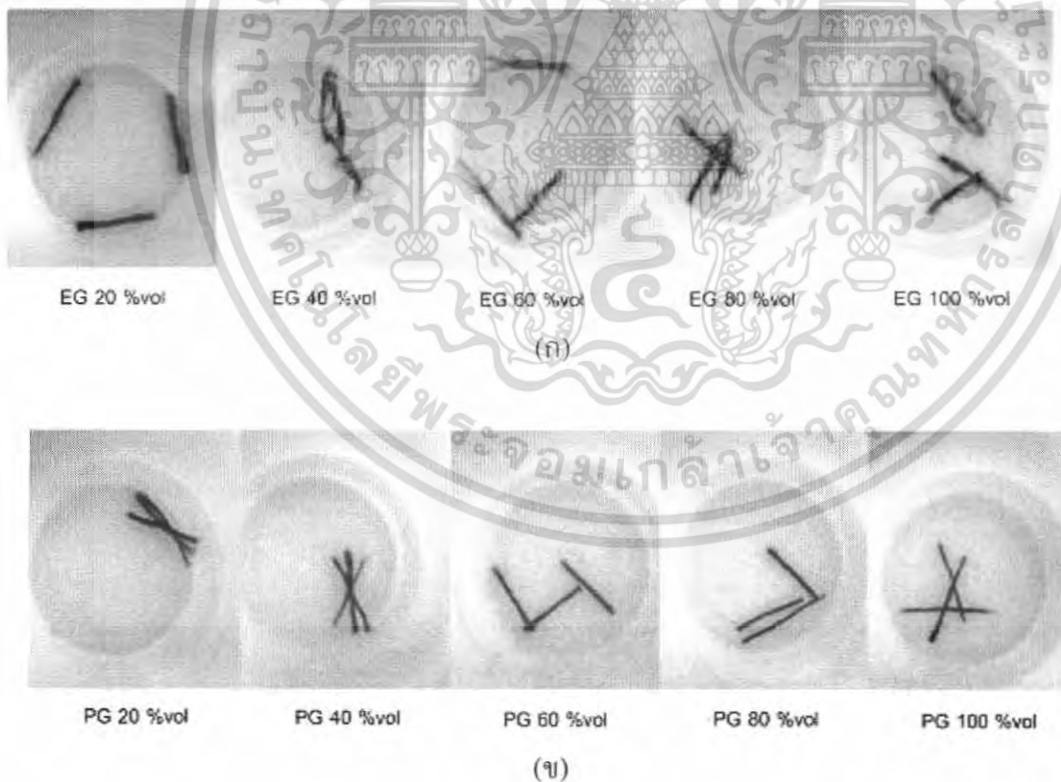
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโพนคอมโพสิตและการทดสอบสมบัติทางกลของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลตามกรรมวิธีในข้อ 3.10.1 และเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอลตามกรรมวิธีในข้อ 3.4.2 ที่ปริมาณส่วนเสริมแรงในอัตราส่วน โดยน้ำหนัก 5 phr พบว่า เส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีกว่าเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอล จึงทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิต ดังนี้

1. เตรียมส่วนเสริมแรงจากเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล ตามกรรมวิธีในข้อ 3.10.1
2. ขึ้นรูปชิ้นงานพอลิยูรีเทนโพนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่มีปริมาณของเส้นใยเสริมแรงในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5 10 และ 15 phr ตามวิธีขึ้นรูปในข้อ 3.6
3. นำชิ้นงานพอลิยูรีเทนโพนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้ไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและทดสอบสมบัติความเค้น โค้งงอและมอดุลัสโก้งงอ

4.1.2 การคลายตัวของเส้นใยปอในสารละลายไกลคอล

จากการทดลองหุบเส้นใยปอด้วยเอทิลีน ไกลคอลและ โพรพิลีน ไกลคอลบริสุทธิ์ พบว่าเอทิลีน ไกลคอลเปียกบนเส้นใยปอได้ดีกว่าโพรพิลีน ไกลคอล ซึ่งหากต้องการควบคุมปริมาณของเอทิลีน ไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอไม่ให้มากเกินไปต้องใช้ระยะเวลาในการอบเป็นเวลานาน จึงมีแนวคิดที่จะทดลองผสมเอทานอลซึ่งมีความหนืดต่ำมาเจือจางเอทิลีน ไกลคอลและ โพรพิลีน ไกลคอลให้มีความหนืดลดลง และทำการศึกษาลักษณะการคลายตัวของเส้นใยปอเมื่อแช่ในสารละลายดังกล่าว อีกทั้งพิจารณาถึงความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีน ไกลคอลและ โพรพิลีน ไกลคอลที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยไกลคอล

จากการทดลองแช่เส้นใยปอในสารละลายเอทิลีน ไกลคอลและสารละลายโพรพิลีน ไกลคอล ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 40 60 80 และ 100 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า เส้นใยปอมีการคลายตัวจากมากไปหาน้อย เมื่อแช่ในสารละลายเอทิลีน ไกลคอลบริสุทธิ์ สารละลายเอทิลีน ไกลคอลที่มีความเข้มข้นลดลง สารละลายโพรพิลีน ไกลคอลที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ลักษณะการคลายตัวของเส้นใยปอ (ก) ในสารละลายเอทิลีน ไกลคอล (EG) และ (ข) ในสารละลายโพรพิลีน ไกลคอล (PG) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการคลายตัวของเส้นใยปอในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วนั้น ในเบื้องต้นได้เลือกใช้สารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยปริมาตร โดยพิจารณาจากการคลายตัวของมัดเส้นใยและสัดส่วนการเจือจางด้วยเอทานอลที่จะช่วยในการลดระยะเวลาในการอบเพื่อควบคุมปริมาณไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยได้ในระยะเวลาสั้นลง

4.1.2 กรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล

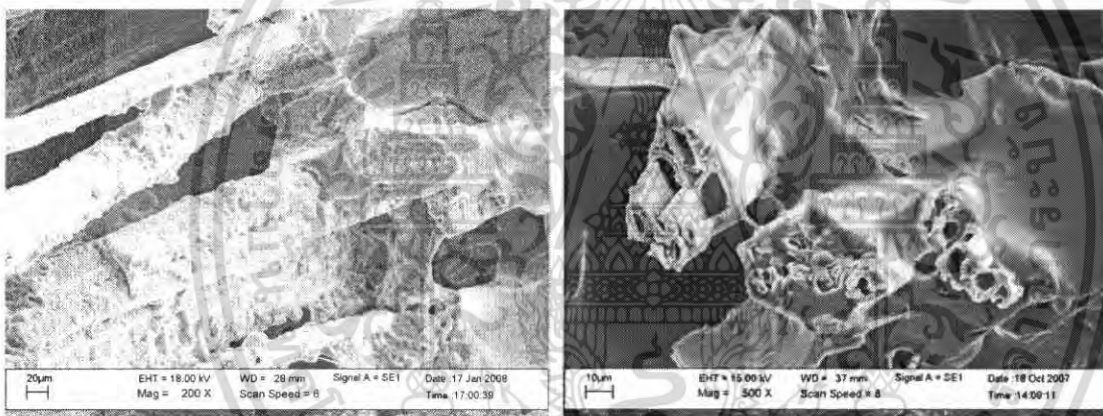
ในเบื้องต้นได้กำหนดกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล โดยแช่เส้นใยปอในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อควบคุมปริมาณของเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอลที่เปียกอยู่บนผิวของเส้นใย และเมื่อทำการทดลองหาปริมาณของไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอ พบว่า เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลเหลืออยู่บนเส้นใยร้อยละ 10.57 ค่อน้ำหนักของเส้นใย และเส้นใยปอที่ปรับปรุงด้วยโพรพิลีนไกลคอล มีปริมาณโพรพิลีนไกลคอลเหลืออยู่ร้อยละ 5.89 ค่อน้ำหนักของเส้นใย ซึ่งการมีปริมาณของเอทิลีนไกลคอลเหลืออยู่ในเส้นใยปอมากกว่าโพรพิลีนไกลคอล เนื่องจากผลของงานของการยึดเกาะที่มากกว่า ดังอธิบายในข้อ 4.1.1

เมื่อนำเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอลไปผสมเป็นส่วนเสริมแรงในพอลิยูรีเทนโฟมที่ 5 phr พบว่า พอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล มีความเปราะ เมื่อตัวอย่างไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานทางวิทยา พบว่า การยึดเกาะระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์และเส้นใยปอเกิดขึ้นไม่ดี เนื่องจากมีเอทิลีนไกลคอลติดอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยปอในปริมาณมากเกินไป จึงทำให้กลายเป็นตัวขัดขวางการยึดติดของเส้นใยปอกับเมทริกซ์พอลิยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) ซึ่งทำให้ชั้นงานคอมโพสิตที่ได้ไม่แข็งแรง จึงได้มีแนวคิดในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวใน 2 ลักษณะ คือ

(1) การลดปริมาณของเอทิลีนไกลคอลบนเส้นใยปอลง โดยปรับเปลี่ยนกรรมวิธีในการปรับปรุง คือ นำเส้นใยปอแช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล ที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งภายหลังได้ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ในเส้นใยปอ พบว่ามีเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ร้อยละ 1.46 ค่อน้ำหนักของเส้นใย ซึ่งเมื่อนำมาเสริมแรงพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิตและศึกษาลักษณะทางสัณฐานทางวิทยา พบว่าสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ส่วนพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอลไม่มีปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นจึงยังใช้กรรมวิธีเดิมในการปรับปรุงสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การทดลองปรับเปลี่ยนลำดับขั้นตอนของการขึ้นรูป โดยผสมเส้นใยปอลงในไอโซไซยานเตก่อนแล้วจึงทำการผสมพอลิออลให้ทำปฏิกิริยากับ ไอโซไซยานเตส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสในเส้นใยปอ เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมโพสิต เพื่อศึกษาการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟสพบว่า สามารถแก้ไขปัญหของเอทิลีนไกลคอลที่เปียกอยู่บนเส้นใยมากเกินไปได้ เนื่องจากการผสมเส้นใยปอกับไอโซไซยานเตก่อนทำให้ไอโซไซยานเตทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยปอเกิดการเชื่อมต่อแบบยูรีเทนและทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลคอลที่เปียกอยู่จำนวนมากอยู่บนผิวของเส้นใย เกิดการยึดเกาะได้ดีกว่าการผสมและขึ้นรูปตามขั้นตอนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) แต่การผสมไอโซไซยานเตกับเส้นใยตามวิธีผสมที่ปรับปรุงดังกล่าวนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการผสมเส้นใยเสริมแรงในปริมาณมาก เนื่องจากการเติมพอลิออลภายหลังอาจผสมกับ ไอโซไซยานเตที่เปียกอยู่บนเส้นใยได้ไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาของพอลิยูรีเทนเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีน ไกลคอล ที่มีปริมาณของเอทิลีนเหลืออยู่บนเส้นใยปอร้อยละ 10.57 ต่อน้ำหนักของเส้นใย

(ก) จากการผสมพอลิออลกับไอโซไซยานเต แล้วจึงเทลงบนเส้นใยปอ

(ข) จากการผสมเส้นใยปอกับไอโซไซยานเต แล้วจึงผสมกับพอลิออล

สำหรับการเตรียมเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีน ไกลคอลเพื่อนำไปเป็นส่วนเสริมแรงของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและทดสอบสมบัติทางกลเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีอื่นๆ จะใช้กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลที่มีปริมาณของเอทิลีน ไกลคอลเหลืออยู่บนเส้นใยร้อยละ 1.46 ต่อน้ำหนักของเส้นใย

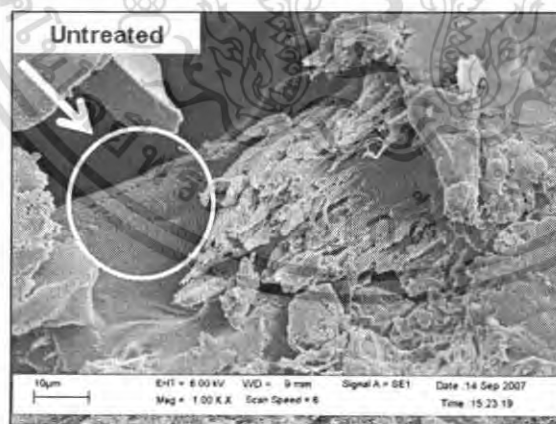
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟส การเสีรูปลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย และลักษณะของฟอง โฟม เปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

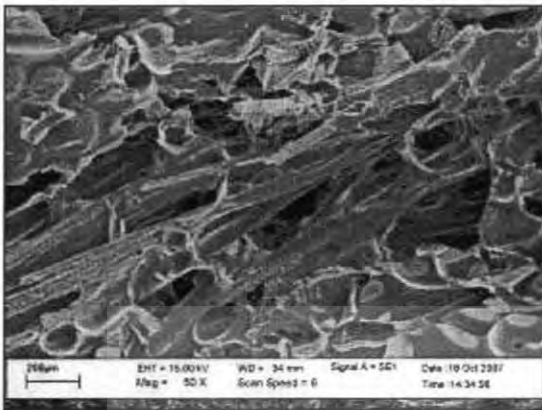
4.2.1 การกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิต

เมื่อนำตัวอย่างชิ้นงานคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอไม่ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีต่างๆ มาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิตพบว่า เส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติไม่มีการคลายตัวของมัดเส้นใยทำให้การประสานของเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทน โฟมเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นผิวด้านนอกของมัดเส้นใยเท่านั้น ทำให้พื้นผิวของเส้นใยบางส่วนไม่เกิดการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และเกิดเป็นโพรงที่ภายในมัดเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) เนื่องจากเส้นใยดังกล่าวไม่มีการปรับปรุงให้มัดเส้นใยคลายตัวออก เพื่อให้เกิดพื้นที่การยึดเกาะอย่างทั่วถึงรอบพื้นผิวของเส้นใย ส่วนเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เอทิลีนไกลคอล และ โพรพิลีน ไกลคอล ทั้ง 3 วิธีมีการคลายตัวของมัดเส้นใย ทำให้เกิดพื้นที่ของการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์เพิ่มขึ้น และเกิดการยึดเกาะทางกล (Mechanical interlocking) ที่บริเวณภายในของมัดเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข-ง)

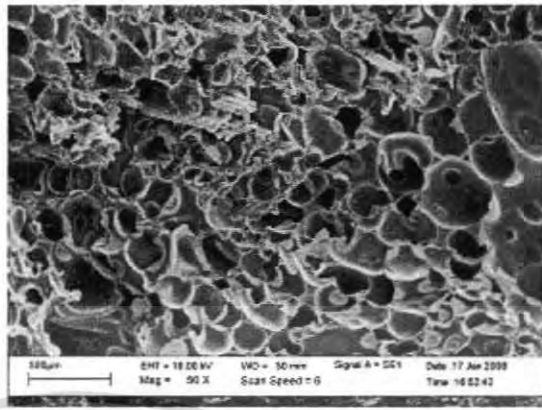


รูปที่ 4.4 พื้นผิวของเส้นใยปอบางส่วนที่ไม่เกิดการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์

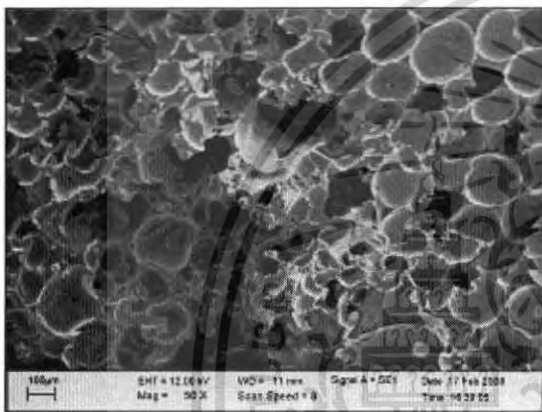
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



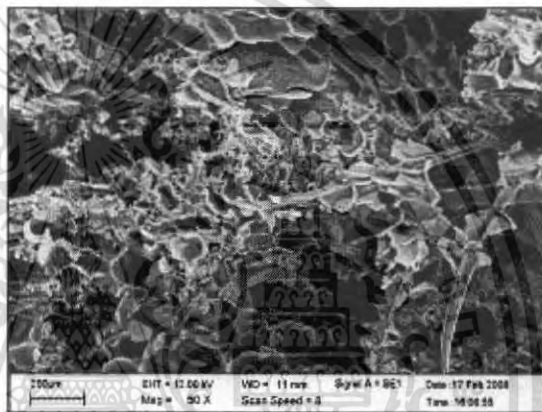
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.5 การคล้ายตัวของเส้นใยพอลิเอทิลีนของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยที่

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

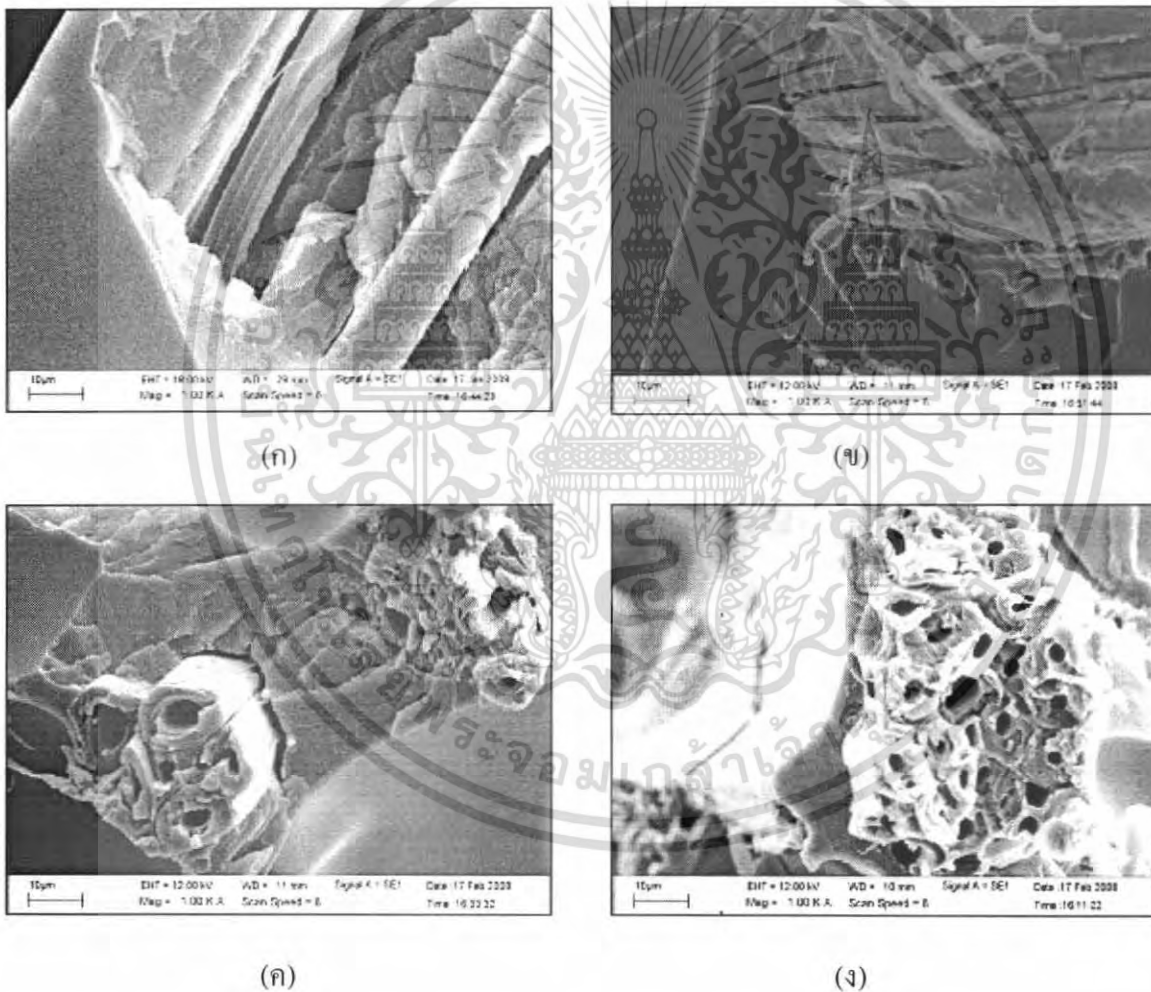
4.2.2 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีนและพอลิยูรีเทนโฟมเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟส

เมื่อพิจารณาถึงการยึดเกาะของเส้นใยพอลิเอทิลีนกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟสและจากการเสียดสภาพของชิ้นงานคอมโพสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่า พอลิยูรีเทน โฟมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ และเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพพริลีน ไกลคอลเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีนและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ เป็นการเสียดสภาพที่บริเวณอินเตอร์เฟส (Adhesive failure) ดังแสดงในรูป 4.6 (ก) และรูปที่ 4.6 (ค) ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีนกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ ส่วนเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอทิลีนไกลคอล มีการยึดเกาะกันที่ดีระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีนกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) และรูปที่ 4.5 (ง) เกิดการยึดเกาะของพอลิยูรีเทนเมทริกซ์รอบเส้นใย โดยเฉพาะพอลิยูรีเทนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเอทิลีนไกลคอลจะมีการเสียดสภาพของชิ้นงานที่อินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ในลักษณะหักไปพร้อมๆ กัน แสดงถึงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่ดีมาก

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจนของวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล คือ การปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำลายโครงสร้างบางส่วน of เส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ในขณะที่การปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอลนั้นไม่มีการทำลายโครงสร้างของเส้นใย



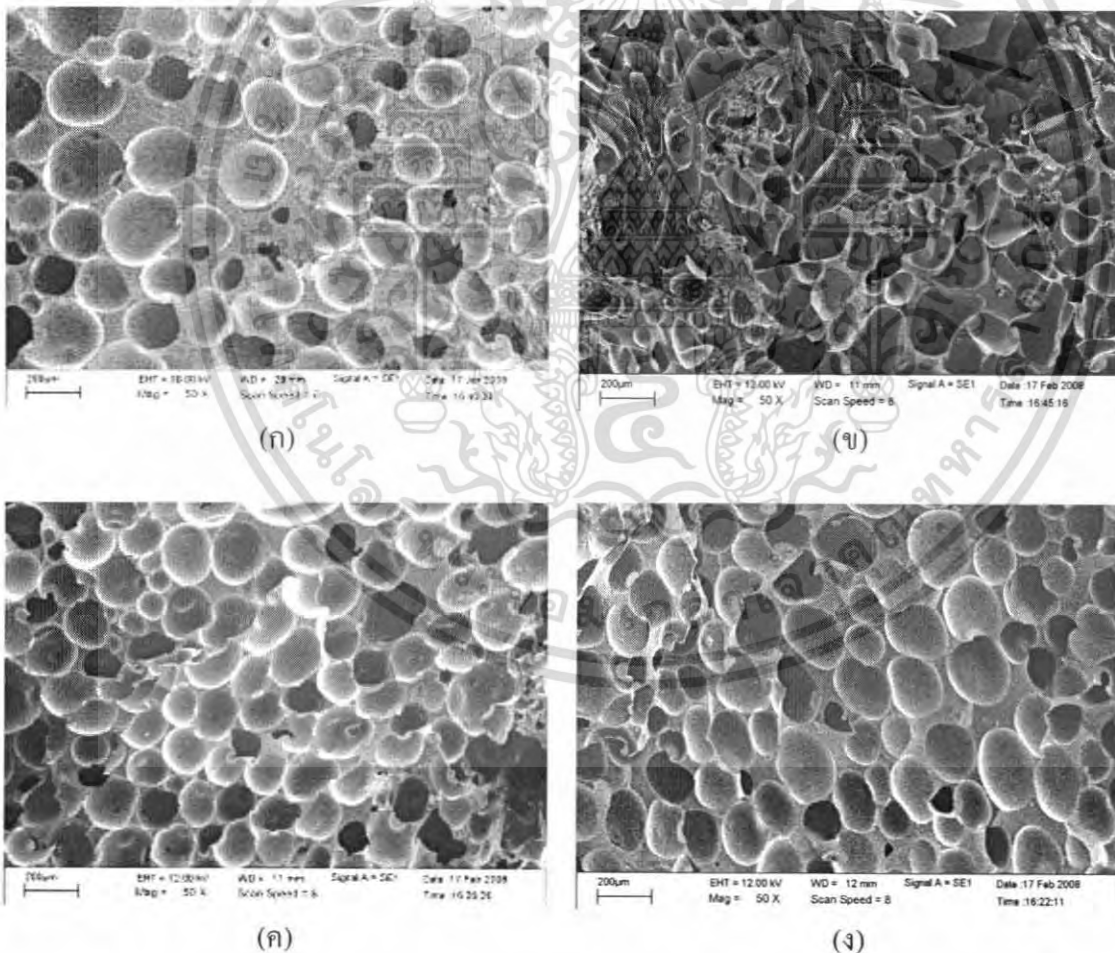
รูปที่ 4.6 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอที่

- (ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ (ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH
(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG (ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอที่มีต่อขนาดของเซลล์โฟม

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อเปรียบเทียบขนาดของเซลล์โฟมในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ และปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีต่างๆ ในอัตราส่วนของเส้นใยเสริมแรง 5 phr ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่า พอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์มีขนาดของเซลล์เฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 193,179,177 และ 181 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอไม่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของเซลล์โฟมในพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์หรือมีผลน้อยมาก เนื่องจากการขยายตัวของพอลิยูรีเทน โฟมเป็นผลมาจากการเกิดฟองก๊าซขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน และการขยายตัวของฟองก๊าซเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ใช้สารตั้งต้น คือ พอลิเอทิลีนไดออกไซด์และไอโซไซยานาตชนิดเดียวกันและใช้แม่พิมพ์อุณหภูมิเท่ากันที่ 60 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป และมีปริมาณของเส้นใยเสริมแรงในอัตราส่วนต่อน้ำหนักของเส้นใยที่ 5 phr เท่ากัน



รูปที่ 4.7 ลักษณะของเซลล์โฟมในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

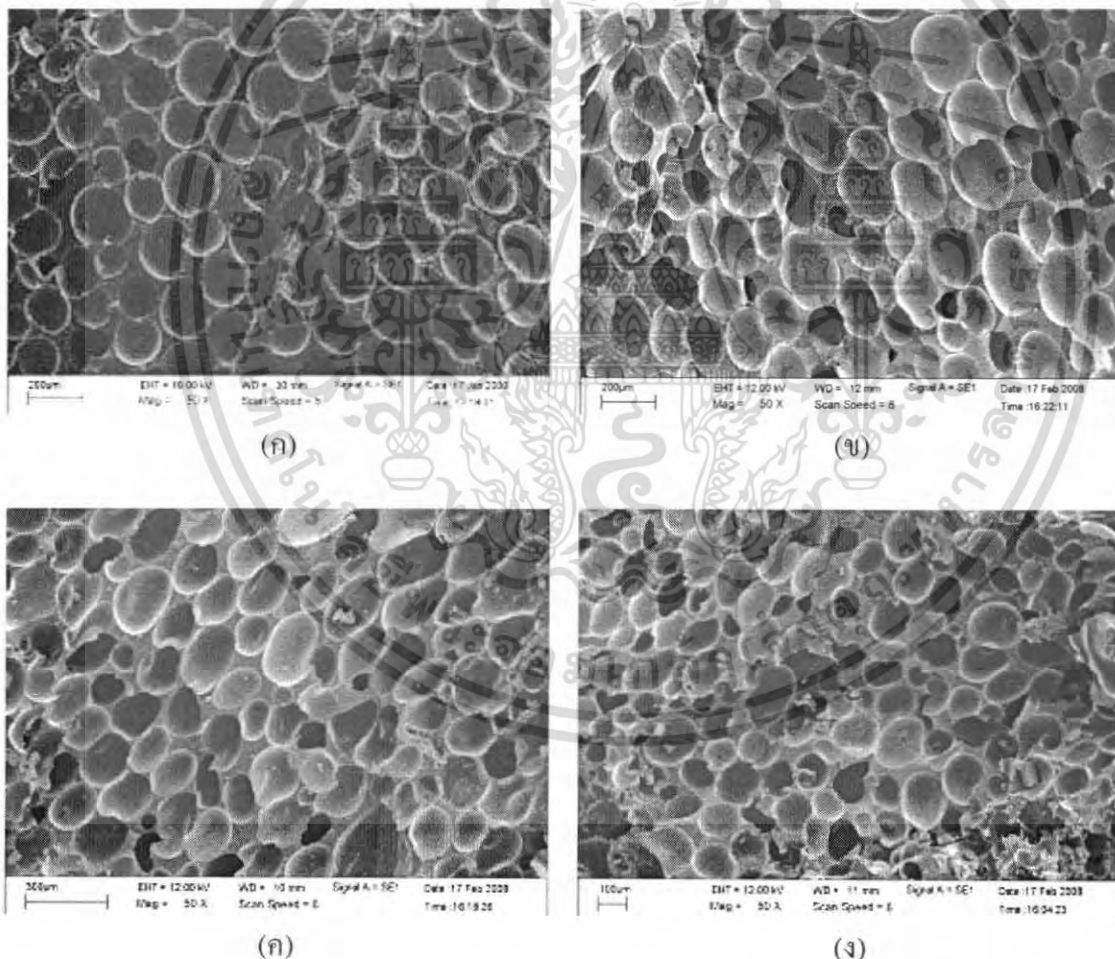
(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานที่ดำเนินการปรับปรุงคุณสมบัติด้วย EG ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อขนาดของเซลล์โฟม

จากการการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตในปริมาณ 0, 5, 10 และ 15 phr ที่มีต่อขนาดเซลล์โฟมของเมทริกซ์พบว่า พอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์มีขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ย 189, 181, 176 และ 150 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการผสมส่วนเสริมแรงในปริมาณที่มากขึ้นทำให้มีปริมาตรในส่วนของพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ (cavity) ลดลง ทำให้พอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์มีการขยายตัวได้น้อยลง ในขณะที่ปริมาณของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์และเนื้อพอลิยูรีเทน โฟมเกิดขึ้นเท่าเดิม ส่งผลให้มีแรงอัดจากภายนอกเซลล์โฟมซึ่งต้านการขยายตัวของฟอง โฟมมีมากขึ้น จึงทำให้เซลล์โฟมขยายตัวได้น้อยลงก่อนจะคงรูป



รูปที่ 4.8 ลักษณะของเซลล์โฟมในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย EG ที่อัตราส่วนของเส้นใยเสริมแรง (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 10 phr (ง) 15 phr เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบสมบัติของคอมโพสิต

4.3.1 ความหนาแน่นของคอมโพสิต

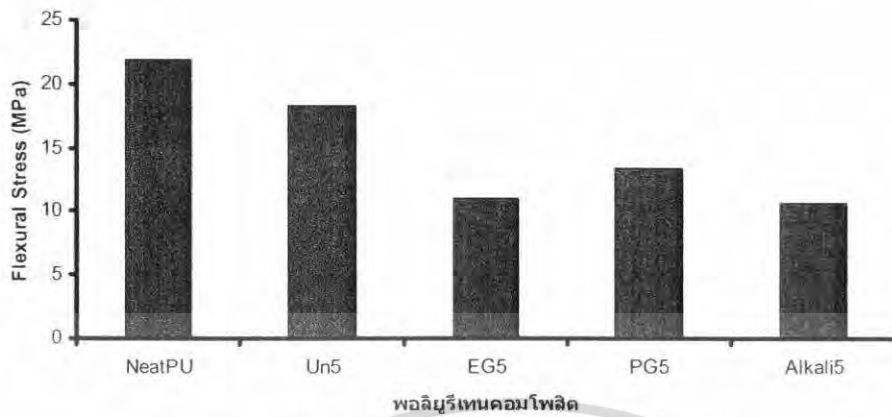
การวัดความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเพื่อศึกษาผลจากการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยและการเติมเส้นใยปอในคอมโพสิต เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของเส้นใยเสริมแรง 5 phr แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต แบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีความหนาแน่นเฉลี่ยในช่วง 0.5 ถึง 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ได้แก่ พอลิยูรีเทน โฟมที่ไม่เสริมแรงพอลิยูรีเทน โฟม และพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ กลุ่มที่สองมีความหนาแน่นเฉลี่ยในช่วง 3.9 ถึง 4.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คือ พอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยแบบต่างๆ ซึ่งความหนาแน่นที่ลดลงของคอมโพสิตกลุ่มนี้ อาจเป็นผลมาจากการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอที่เพิ่มจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อีเธอร์บนพื้นผิวของเส้นใย ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลดังกล่าวจะทำให้ปฏิกิริยากับไอโซไซยานตเกิดเป็นฟองก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์มากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้คอมโพสิตโฟมที่ขึ้นรูปได้มีความหนาแน่นลดลง

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นและจำนวนฟองก๊าซของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีต่างๆ ที่ปริมาณของเส้นใยเสริมแรง 5 phr

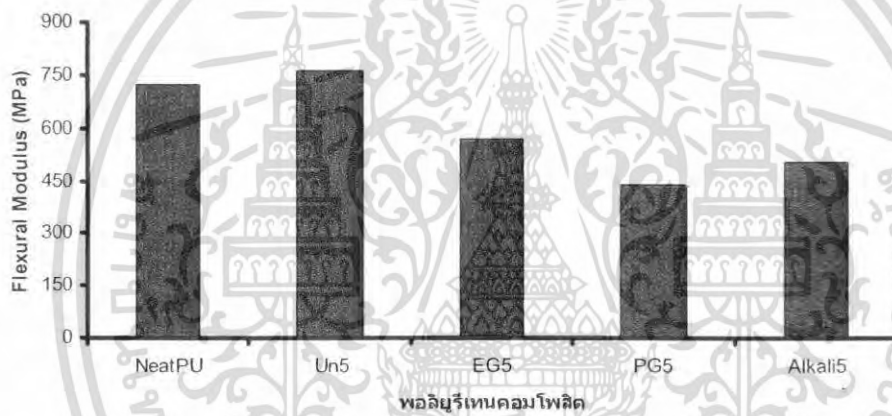
เส้นใยเสริมแรง	ความหนาแน่น (g/cm ³)	จำนวนฟองก๊าซ (cell/cm ³) × 10 ⁵
พอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ไม่เสริมแรง (0 phr)	0.532	3.29
เส้นใยปอไม่ปรับปรุงสมบัติ	0.613	1.85
เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย EG	0.398	3.71
เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย PG	0.452	4.70
เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH	0.449	5.06

4.3.2 ผลของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และไกลคอลที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกล เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และไกลคอลที่มีต่อความเค้นโค้งงอ (Flexural stress) และโมดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต พบว่า การเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติมีสมบัติทางกลดีที่สุด และการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเสริมแรงทำให้ออกสารนี้สมบัติทางกลของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้งนี้อาจเป็นผลไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลของการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอที่มีผลต่อความเค้นโค้งงอของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต



รูปที่ 4.10 ผลของการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอที่มีต่อค่ามอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต

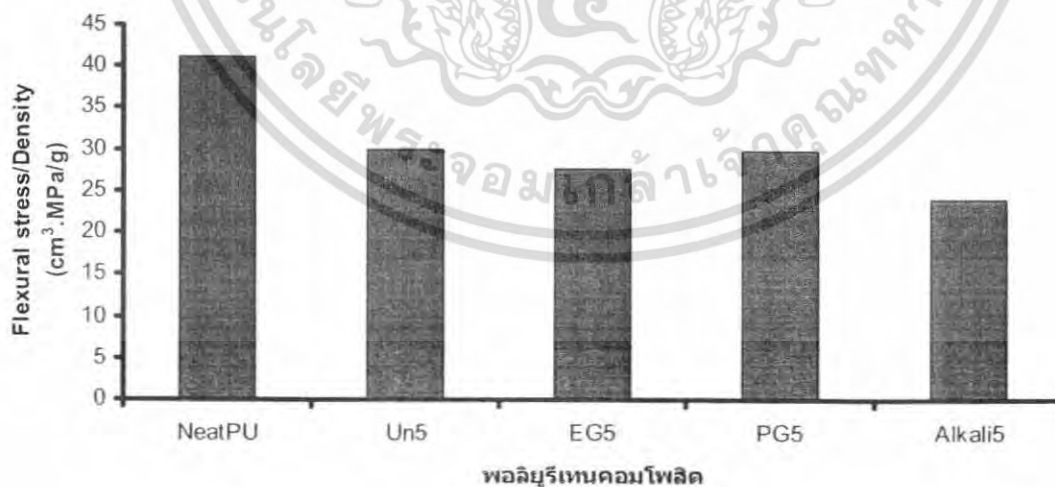
มาจากสมบัติทางกลที่ลดลงของเส้นใยที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูง จากการทดสอบสมบัติความเค้นโค้งงอของเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีน ไกลคอลของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่า การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยเอทิลีน ไกลคอล ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้พอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอลมีสมบัติทางกลลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ส่วนความแข็งแรงทางกลที่ลดลงของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติของโซเดียมไฮดรอกไซด์อาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของเส้นใยปอถูกทำลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของส่วนเสริมแรงลดลง ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยดังกล่าวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความเค้นดึงของเส้นใยปอ

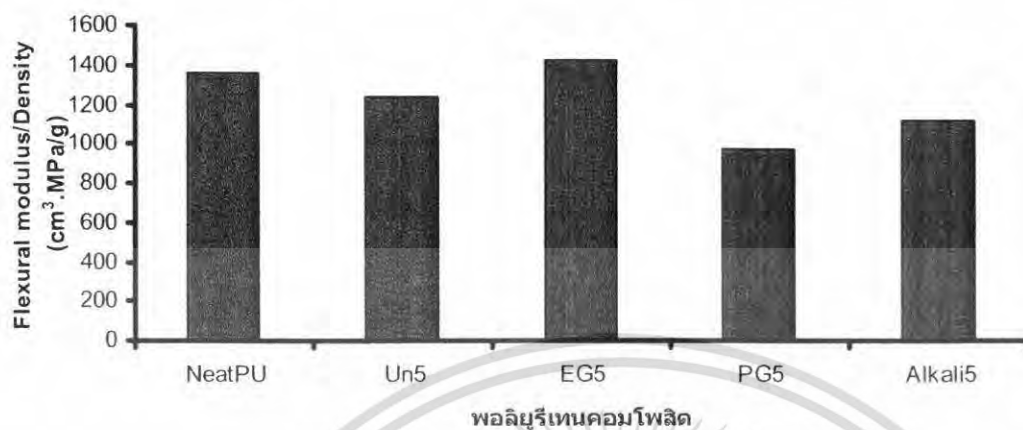
เส้นใยปอ	ความเค้นดึง (MPa)
เส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ	48.80
เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล	33.13

จากผลของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเสริมแรงในข้อ 4.3.1 ที่ทำให้ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตลดลง อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตลดลงด้วย และเมื่อนำผลการทดลองสมบัติทางกลมาพิจารณาเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกลต่อหน่วยน้ำหนักที่เท่ากัน (Strength to weight) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 พบว่า ความเค้นดึงของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ เส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล มีค่าความเค้นดึงต่อความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสได้จึงต่อความหนาแน่น พบว่า พอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีสมบัติที่ดีที่สุด และคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอลมีค่ามอดูลัสต่อความหนาแน่นต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาเพื่อศึกษาลักษณะการยึดเกาะระหว่างพอลิยูรีเทน โฟมกับเส้นใยเสริมแรงที่อินเตอร์เฟสในข้อ 4.2.2



รูปที่ 4.11 ผลของความเค้น โค้่งงต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

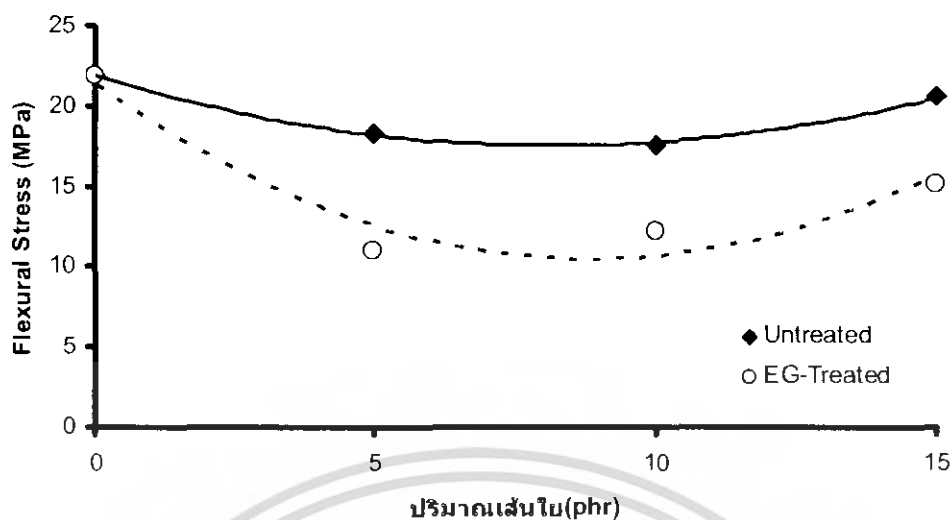


รูปที่ 4.12 ผลของมอดูลัสโค้งงอต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต

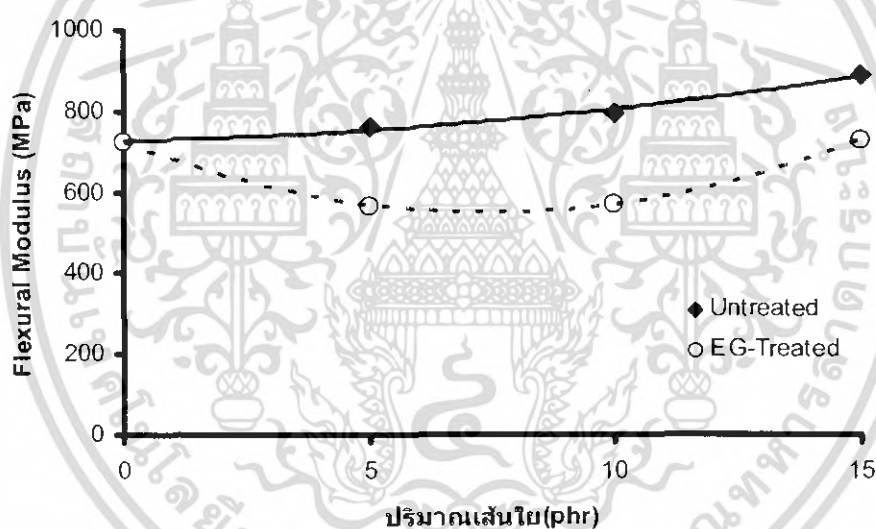
4.3.3 ผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต

จากผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีต่างๆ พบว่าการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอลมีสมบัติการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนโฟมได้ดีที่สุด จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต เปรียบเทียบระหว่างเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล ที่ปริมาณของเส้นใยเสริมแรงในช่วง 0 ถึง 15 phr ซึ่งจากผลการทดสอบสมบัติทางกล พบว่า ค่าความเค้นโค้งงอของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ และปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือในช่วง 0 ถึง 10 phr จะมีค่าลดลงต่ำกว่าความเค้นโค้งงอของพอลิยูรีเทนโฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใย และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเสริมแรงมากกว่า 10 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ส่วนแนวโน้มของค่ามอดูลัสโค้งงอจะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันคือ พอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติจะมีแนวโน้มของมอดูลัสโค้งงอที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเสริมแรง ส่วนการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลจะมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าพอลิยูรีเทนโฟมที่ไม่เสริมแรงในช่วง 0-8 phr และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเสริมแรงมากกว่า 8 phr จนกระทั่งที่ 15 phr จะมีแนวโน้มที่สูงกว่าพอลิยูรีเทนโฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยที่ค่าความเค้นโค้งงอและค่ามอดูลัสโค้งงอของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติจะมีแนวโน้มที่มากกว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล ซึ่งอาจเป็นผลจากความหนาแน่นที่มากกว่าและสมบัติความเค้นดึงของเส้นใยเสริมแรงที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



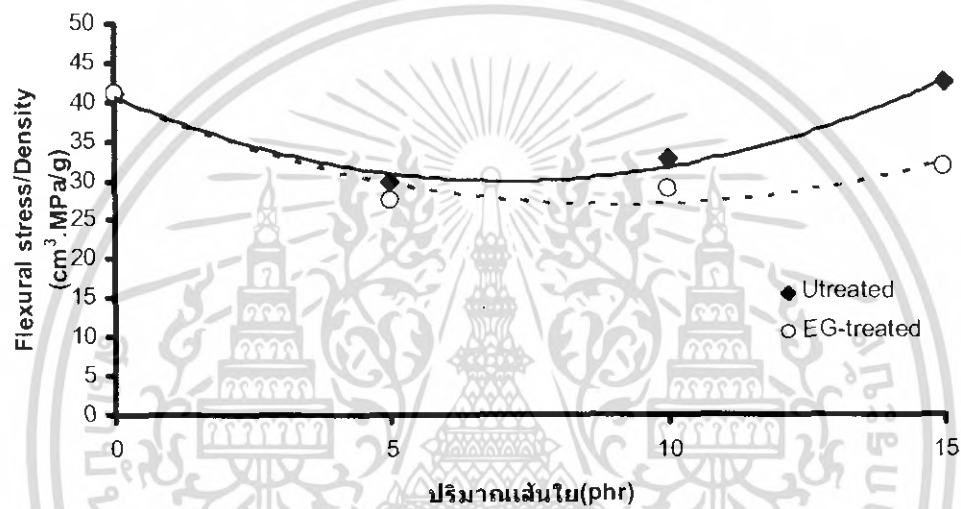
รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณเส้นใยเสริมแรงในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่มีต่อความเค้นโค้งงอ



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณเส้นใยเสริมแรงในพอลิยูรีเทนคอมโพสิตที่มีต่อมอดุลัสโค้งงอ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกลที่น้ำหนักเท่ากัน (Strength to weight) เมื่อพิจารณาถึงค่าความเค้นโค้งงอต่อความหนาแน่น พบว่า จากผลของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยเอทิลีนไกลคอลที่ส่งผลต่อการลดลงของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต ทำให้ทั้งพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสริมการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการเสริมแรงที่น้อยกว่า 5 phr โดยมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าพอลิยูรีเทน โฟมที่ไม่เสริมแรงที่ปริมาณเส้นใยน้อย และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรง โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติจะเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีปริมาณเส้นใยเสริมแรงมากกว่า 7 phr ส่วนการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลจะเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยเสริมแรงมากกว่า 10 phr และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณของเส้นใยเสริมแรงมากขึ้น โดยที่เส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติจะมีค่าที่มากกว่าและแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเสริมแรงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14.15 ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติทางกลของเส้นใยเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลที่มีค่าความเค้นดึงต่ำกว่าเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ จึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นแล้วทำให้พอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตมีสมบัติทางกลที่ความแตกต่างกันมากขึ้น

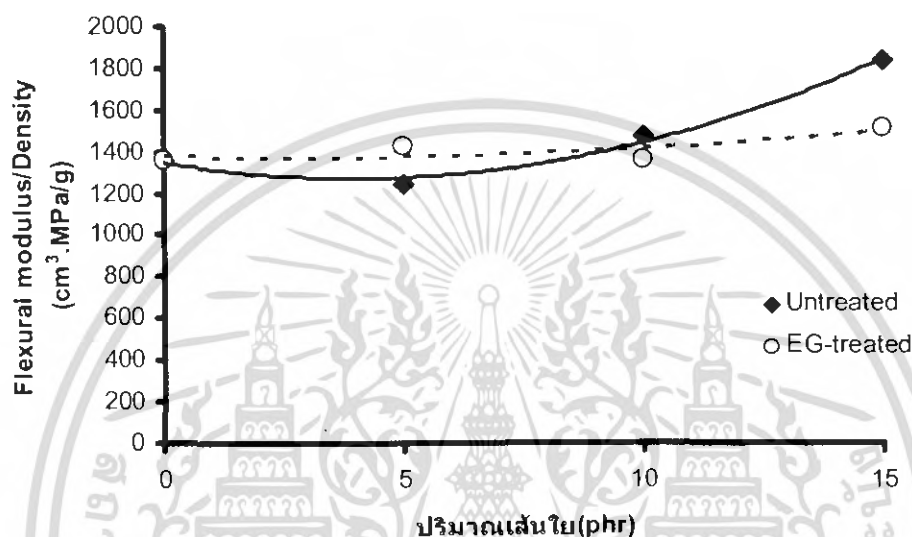


รูปที่ 4.15 ความเค้น ไ้้งงต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต ที่ปริมาณการเสริมแรงเส้นใยในคอมโพสิตต่างๆ

เมื่อพิจารณากำมอดูลัส ไ้้งงต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของคอมโพสิตเมื่อนำหนักที่เท่ากัน แสดงในรูปที่ 14.16 พบว่า ปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่น้อยกว่า 10 phr พอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลจะมีค่ามอดูลัส ไ้้งงต่อความหนาแน่นที่สูงกว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติอย่างชัดเจน แต่เมื่อปริมาณเส้นใยเสริมแรงที่ 5 phr การเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติจะเริ่มมีแนวโน้มของค่ามอดูลัสต่อความหนาแน่นที่สูงขึ้น จนกระทั่งมีค่าเท่ากับที่ 10 phr และเมื่อปริมาณของเส้นใยเสริมแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 phr ค่ามอดูลัสต่อความหนาแน่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยเอทิลีนไกลคอล ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอลทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ แต่เนื่องจากสมบัติทางกลของเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของเส้นใยปอในคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

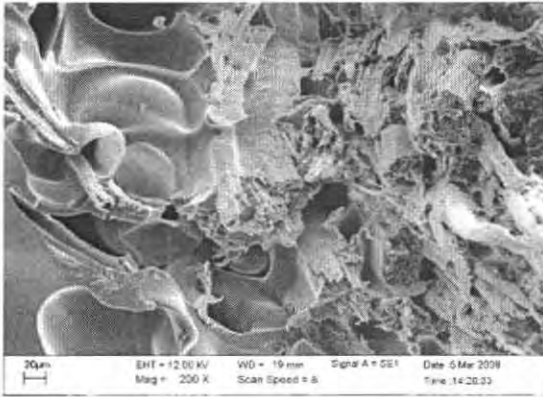
แข็งแรงของส่วนเสริมแรงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต ซึ่งหากสามารถพัฒนากรรมวิธีในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอลให้มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่ดีขึ้น โดยที่สมบัติทางกลของเส้นใยไม่ลดลงจากเดิม อาจเป็นแนวทางในการพัฒนากรรมวิธีการเตรียมพอลิยูรีเทนเสริมแรงเส้นใยปอที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้



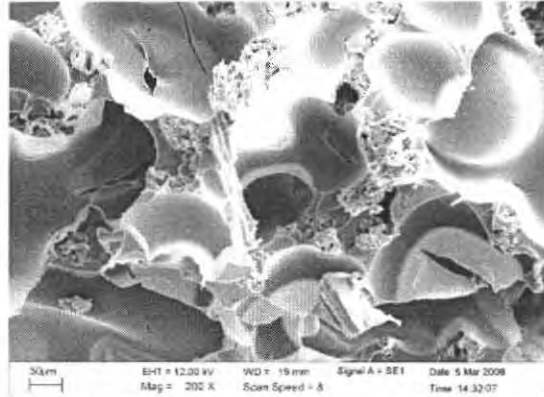
รูปที่ 4.16 มอดูลัสโค้งต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต ที่ปริมาณการเสริมแรงเส้นใยในคอมโพสิตต่างๆ

เมื่อนำชิ้นงานพอลิยูรีเทนคอมโพสิตหลังการทดสอบสมบัติทางกลมาศึกษาลักษณะสัณฐานบริเวณรอยหัก มีผลดังรูปที่ 4.17 ที่กำลังขยาย 50 เท่า พอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยปอไม่ปรับปรุงสมบัติ และเส้นใยปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอล จะพบว่าเส้นใยปอจะไม่หักไปพร้อมกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ เนื่องจากมีเส้นใยปอยื่นออกมาบริเวณรอยหัก ในส่วนพอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยปอปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล และพอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยปอปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีการหักของเส้นใยปอพร้อมกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ ซึ่งหมายถึงการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์

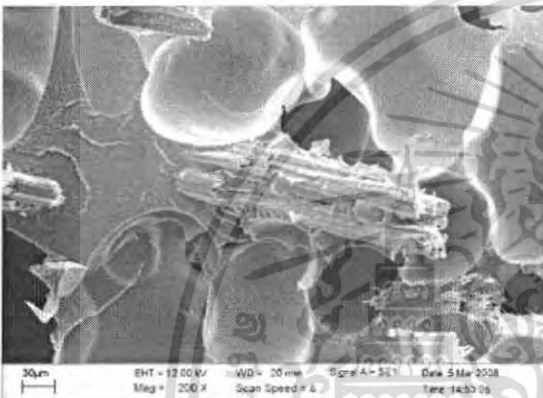
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



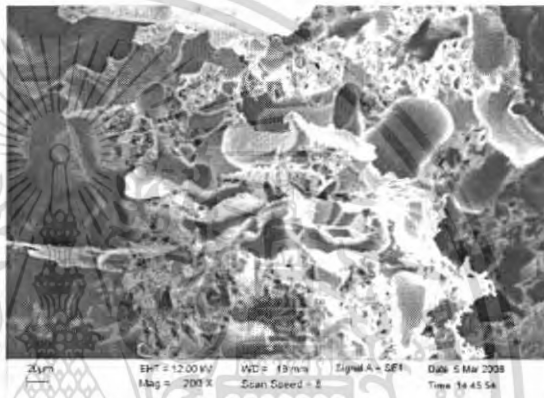
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.17 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซระหว่างพอลิเอทรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยพอลิโพรพิลีน

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

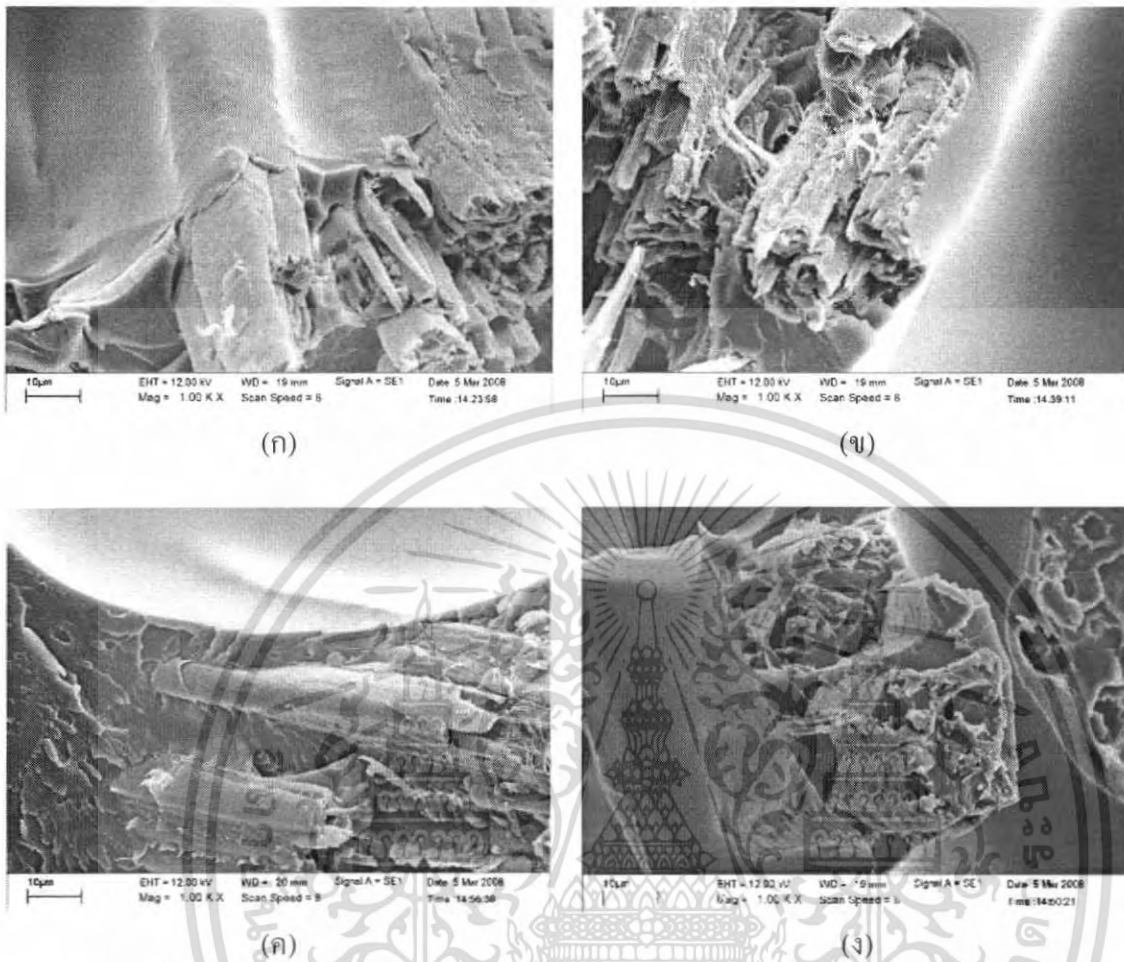
(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

เมื่อพิจารณาบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทรีเทนเมทริกซ์ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ดังรูปที่ 4.18 พบว่า พอลิเอทรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยพอลิโพรพิลีนไม่ปรับปรุงสมบัติจะมีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทรีเทนคอมโพสิต ซึ่งจะส่งผลทำให้การยึดติดไม่ดี แต่ในส่วนของพอลิเอทรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยพอลิโพรพิลีนปรับปรุงสมบัติทั้ง 3 แบบ ไม่มีช่องว่างบริเวณอินเตอร์เฟซ เพราะการปรับปรุงสมบัติเส้นใยพอลิโพรพิลีน ช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทรีเทนเมทริกซ์ หากเปรียบเทียบการปรับปรุงสมบัติเส้นใยพอลิโพรพิลีนทั้ง 3 แบบ พบว่าการปรับปรุงสมบัติเส้นใยพอลิโพรพิลีนด้วยเอทิลีนไกลคอลจะช่วยให้การยึดติดดีที่สุด สังเกตบริเวณรอยหักของเส้นใยพอลิโพรพิลีนเคลือบอยู่ จึงส่งผลให้พอลิเอทรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยพอลิโพรพิลีนด้วยเอทิลีนไกลคอลมีค่ามอดูลัสโค้งงอมากที่สุด ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพอลิเอทรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยโพลีเอทรีเทน

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในการศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยไผ่และพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟสและมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด คือ การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเสริมแรงด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล โดยนำเส้นใยไปแช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอลเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณของเอทิลีนไกลคอลอยู่บนเส้นใยร้อยละ 1.46 โดยมวล ซึ่งจากผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยพบว่า การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยจะช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีที่สุด

2. การเสริมแรงที่ปริมาณเส้นใย 5 phr การปรับปรุงสมบัติเส้นใยด้วยไกลคอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อขนาดของเซลล์โฟม

3. การเพิ่มปริมาณเส้นใยในช่วง 0 ถึง 15 phr ทำให้ขนาดเซลล์โฟมมีขนาดลดลงเล็กน้อย

4. การเสริมแรงที่ปริมาณเส้นใย 5 phr คอมโพสิตที่เสริมแรงเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าความเค้นโค้งต่อความหนาแน่นต่ำกว่าคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ เส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลและเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพพิลีนไกลคอล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีการทำลายโครงสร้างของเส้นใย

5. การเสริมแรงที่ปริมาณเส้นใย 5 phr คอมโพสิตที่เสริมแรงเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล มีค่ามอดูลัสโค้งต่อความหนาแน่นมากที่สุด เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยไปให้ยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีขึ้น โดยไม่ทำลายโครงสร้างของเส้นใย

6. เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรงมากกว่า 10 phr ค่าความเค้นโค้งต่อความหนาแน่นและมอดูลัสโค้งต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติมีค่ามากกว่า พอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติเส้นใยด้วยเอทิลีนไกลคอล ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของปริมาณของเอทิลีน ไกลคอลที่เปียกอยู่บนเส้นใยปอ เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติ ดังนั้น จึงควรทำการศึกษาและปรับปรุงปริมาณการเปียกที่เหมาะสม
2. ศึกษาการเตรียมพอลิยูรีเทนคอมโพสิต จากพอลิเอสเตอร์ และไอโซไซยานาตชนิดอื่นๆ เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและความแข็งแรงของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต
3. พัฒนาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอล โดยไม่ให้สมบัติทางกลของเส้นใยลดลง
4. ศึกษาผลจากอุณหภูมิของการขึ้นรูปต่อคุณสมบัติของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. J. Eichhorn "Review current international research into cellulosic fibres and composites." Journal of materials science, Vol. 36 ,2001. pp. 2107 – 2131
- [2] Thi-Thu-Loan Doan. "Investigation on jute fibers and their composites based on polypropylene and epoxy matrices." Doctoral Thesis, Erangung des akademischen Grades Doktoringenieur, Technical University of Dresden. 2006.
- [3] A.K. Bledzki and J. Gassan. "Composites reinforced with cellulose based fibres." Prog. Polym. Sci. Vol. 24, 1999. pp. 221-274.
- [4] B. Madsen. Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites. Technological University of Denmark. 2004.
- [5] F. Corrales. "Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites." Journal of Hazardous Materials. Vol. 144, 2007. pp. 730-735.
- [6] T. M. Gowdaa, A.C.B. Naidua and R. Chhaya. "Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites." Composites: Part A. Vol. 30, 1999. pp. 277-284.
- [7] A.K. Mohanty, M.A. Khan and G. Hinrichsen. "Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics—polyester amide composites." Composite: Part A. Vol. 31, 2000. pp. 143-150.
- [8] J. Gassan and A. K. Bledzki. "Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of Fibres." Composite Science and Technology. Vol. 59, 1999. pp.1303-1309.
- [9] Y. Cao, S. Shibata and I. Fukumoto. "Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments." Composites: Part A. Vol. 37, 2006. pp. 423-429.
- [10] พงศ์ประภาส ปิยะมโนชา. "การทำนายการขยายตัวของฟองก๊าซในพอลิยูรีเทนโฟม." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [11] M. Patel, B. K. Padhi. "Production of alumina fibre through jute fibre substrate." Journal of materials science. Vol. 25, 1990. pp. 1335-1343.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] D. Ray, B.K. Sarkar, A.K. Rana and N.R. Bose. "The mechanical properties of vinyl ester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres." *Composites: Part A*. Vol. 32, 2001, pp. 119–127.
- [13] Carel Jan van Oss. "Development and applications of the interfacial tension between water and organic or biological surfaces." *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. Vol. 54, 2007, pp. 2–9
- [14] อมรรัตน์ สุนทรพงศ์. "การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนและเศษผงหนังเพื่อใช้แทนไม้แบบก่อสร้าง." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2549.
- [15] D.Y. Kwok and A.W. Neumann. "Contact angle measurement and contact angle interpretation." *Advances in Colloid and Interface Science*. Vol. 81, 1999, pp.167-249
- [16] Michael W. Davidson, "Plant Cell Wall."
[Online]. Available: <http://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/cellwall.html>. 2008.
- [17] วันดี ท้วมทอง. "การศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างหญ้าแฝกและพอลิโพรพิลีน." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*. 2547.
- [18] ณัฐธิยา ปัญญาบุษ. "การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อย." *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. 2547.
- [19] อธิธิพล แจ่มชัด. พอลิเมอร์คอมโพสิต. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [20] SpecialChem S.A. "Adhesion Guide."
[Online]. Available: <http://www.specialchem4adhesive.com/resources/adhesionguide>. 2008.
- [21] Environment Australia. "Biodegradable Plastics – Developments and Environmental Impacts." 2002.
- [22] P. E. Luner and Euichaul Oh. "Characterization of the surface free energy of cellulose ether films." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 181, 2001, pp. 31–48.
- [23] J.F. Pinto, G. Buckton and J.M. Newton. "A relationship between surface free energy and polarity data and some physical properties of spheroids." *International Journal of Pharmaceutics*. Vol. 118, 1995, pp. 95-101.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยวารสารที่จัดทำขึ้นโดยคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] ณรงค์ จิตรปัญญาพงศ์ ปิยวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ และ มาลิน มุ่งมาตร. “การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการผลิตขึ้นรูปพอลิยูรีเทน โฟม.” ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [25] L.M. Matuana, C.B. Park. et. al. “Characterization of Microcellular Foamed Plastic/Cellulosic Fiber Composite.” Antec. 1998.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาปริมาณของสารตั้งต้นและส่วนเสริมแรง ที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ

การคำนวณหาปริมาณของสารตั้งต้นและเส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ที่ไม่เสริมแรงเส้นใย (ρ_{pu}) หลังการขยายตัวเต็มแม่พิมพ์

$$\rho_{pu} = 0.8 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

2. คำนวณปริมาตรของแม่พิมพ์ (V) จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} V &= (\text{ความกว้าง}) \times (\text{ความยาว}) \times (\text{ความลึก}) \\ &= (298 \text{ มิลลิเมตร}) \times (420 \text{ มิลลิเมตร}) \times (5 \text{ มิลลิเมตร}) \\ &= (29.8 \text{ เซนติเมตร}) \times (42.0 \text{ เซนติเมตร}) \times (0.5 \text{ เซนติเมตร}) \\ &= 625.8 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

3. คำนวณน้ำหนักของพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ที่ไม่เสริมแรงเส้นใย (m_{pu})

$$\begin{aligned} m_{pu} &= \rho_{pu} \times V \\ &= (0.8 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}) \times (625.8 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}) \\ &= 501 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

4. คำนวณน้ำหนักของพอลิออล (m_A) และไดไอโซไซยานเนต (m_B) ดังนี้

เนื่องจากอัตราส่วนของ พอลิออล:ไดไอโซไซยานเนต เท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก นั่นคือ อัตราส่วนของ พอลิออล:พอลิยูรีเทนเมทริกซ์ เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ดังนั้น น้ำหนักของพอลิออลที่ใช้คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} m_A &= (1/3) \times m_{pu} \\ &= (1/3) \times (501 \text{ กรัม}) \\ &= 167 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

และ น้ำหนักของไดไอโซไซยานเนตคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} m_B &= 2 \times m_A \\ &= 2 \times 167 \text{ กรัม} \\ &= 334 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คำนวณหาปริมาณของเส้นใยเสริมแรง (m_{Fiber}) เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (phr) จากความสัมพันธ์

$$m_{\text{Fiber}} = \text{phr} \times m_{\text{PU}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่ 5 phr

จาก $m_{\text{PU}} = 504$ กรัม

และ $\text{phr} = 5$ พีเอชเอ

ดังนั้น $m_{\text{Fiber}} = (5) \times (504 \text{ กรัม}) \times 100$
 $= 25.05$ กรัม

ผลการคำนวณปริมาณของสารตั้งต้นและเส้นใยเสริมแรงในการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยไอโอสไตรีนแสดงดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 ผลการคำนวณปริมาณของสารตั้งต้นและเส้นใยเสริมแรงในการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยไอโอสไตรีน

ปริมาณของ ส่วนเสริมแรง (พีเอชเอ)	น้ำหนักของพอลิออล (กรัม)	น้ำหนักของไอโซไซยานต (กรัม)	น้ำหนักของเส้นใยไอโอสไตรีน (กรัม)
0	168	336	0
5	168	336	25.05
10	168	336	50.10
15	168	336	75.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การคำนวณพลังงานการยึดเกาะ
ของเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอลกับเส้นใยปอ

ความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างของแข็งและของเหลว พิจารณาจากงานของการยึดเกาะ (Work of adhesion) คือ งานที่ต้องการสำหรับการแยกพื้นผิวของแข็งและของเหลวออกจากกันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวสัมผัสที่อินเตอร์เฟซ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Berthelot's rule ดังแสดงในสมการที่ ข-1 [21]

$$W_{sl} = 2\sqrt{\gamma_{lv}\gamma_{sv}} \quad (\text{ข-1})$$

เมื่อ W_{sl} = งานของการยึดเกาะระหว่างของแข็ง S และของเหลว L (mJ/m^2)
 γ_{lv} = แรงตึงผิวของของเหลว L (mN/m)
 γ_{sv} = พลังงานพื้นผิวอิสระของของแข็ง S (mJ/m^2)

จากข้อมูลค่าพลังงานพื้นผิวอิสระจากตารางที่ ข-1 สามารถคำนวณค่าพลังงานการยึดเกาะของเซลลูโลสกับเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเซลลูโลสมีค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ $56.7 \text{ mJ}/\text{m}^2$ [22] ดังแสดงในตารางที่ ข-2

ตารางที่ ข-2 ค่าพลังงานการยึดเกาะระหว่างเซลลูโลสกับเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ไกลคอล	แรงตึงผิว (mN/m)	พลังงานการยึดเกาะ (mJ/m^2)
เอทิลีนไกลคอล [22]	48.0	104.34
1,2-โพรพิลีนไกลคอล [23]	43.5	99.33
1,3-โพรพิลีนไกลคอล [24]	38.0	92.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ปริมาณของไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอ
จากการทดลองชุบเส้นใยปอด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลล

ตารางที่ ค-1 น้ำหนักของเส้นใยปอที่ชุบด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

การทดลองที่	น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง (กรัม)	น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง (กรัม)
1	0.0071	0.0525	0.0223
2	0.0099	0.0517	0.0228
3	0.0128	0.0733	0.0375
4	0.0100	0.0578	0.0224
5	0.0078	0.0499	0.0230

ตารางที่ ค-2 สัดส่วนปริมาณของเอทิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ชุบด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

การทดลองที่	ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่ (ร้อยละต่อน้ำหนักของเส้นใย)	ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่ (ร้อยละต่อน้ำหนักของเส้นใย)
1	635.85	212.89
2	424.11	130.80
3	472.79	192.89
4	475.90	123.01
5	540.69	195.25
เฉลี่ย	509.87	170.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 น้ำหนักของเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายโพรพิลีน ไกลคอลบริสุทธ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

การทดลองที่	น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง (กรัม)	น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง (กรัม)
1	0.0085	0.0324	0.0094
2	0.0061	0.0408	0.0070
3	0.0065	0.0205	0.0098
4	0.0083	0.0315	0.0088
5	0.0073	0.0352	0.0097

ตารางที่ ก-4 สัดส่วนปริมาณของ โพรพิลีน ไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายโพรพิลีน ไกลคอลบริสุทธ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

การทดลองที่	ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ (ร้อยละต่อน้ำหนักของเส้นใย)	ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ (ร้อยละต่อน้ำหนักของเส้นใย)
1	281.60	10.50
2	572.77	15.02
3	215.59	50.77
4	280.22	5.67
5	384.59	33.70
เฉลี่ย	346.95	23.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ปริมาณของไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอ ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยไกลคอลล

ตารางที่ ง-1 ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการแช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอลล ร้อยละ 60 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การทดลองที่	น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักของตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติ (กรัม)	ปริมาณของโพรพิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่ (ร้อยละ)
1	5.004	5.489	9.69
2	5.012	5.750	14.72
3	5.073	5.328	5.03
4	5.028	5.683	13.03
5	5.049	5.574	10.40
เฉลี่ย	-	-	10.57

ตารางที่ ง-2 ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการแช่ในสารละลายโพรพิลีนไกลคอลล ร้อยละ 60 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การทดลองที่	น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักของตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติ (กรัม)	ปริมาณของโพรพิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่ (ร้อยละ)
1	5.097	5.343	6.77
2	5.034	5.536	10.45
3	5.008	5.368	5.82
4	5.076	5.132	2.07
5	5.057	5.267	4.32
เฉลี่ย	-	-	5.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ปริมาณของเอทีลินไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการแช่ในสารละลายเอทีลินไกลคอลล ร้อยละ 50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

การทดสอบที่	น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักของตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติ (กรัม)	ปริมาณของโพรพิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่ (ร้อยละ)
1	5.027	5.075	0.95
2	5.016	5.084	1.36
3	5.069	5.218	2.94
4	5.076	5.116	0.79
5	5.083	5.147	1.26
เฉลี่ย	-	-	1.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต

ตารางที่ จ-1 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใย

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.537
2	0.531
3	0.532
4	0.529
5	0.531
6	0.534
เฉลี่ย	0.532

ตารางที่ จ-2 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 5 phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.582
2	0.651
3	0.562
4	0.637
5	0.633
6	0.611
เฉลี่ย	0.613

ตารางที่ จ-3 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 10 phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.528
2	0.536
3	0.540
4	0.559
5	0.489
6	0.582
เฉลี่ย	0.539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-4 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 15phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.508
2	0.516
3	0.462
4	0.461
5	0.487
6	0.473
เฉลี่ย	0.485

ตารางที่ จ-5 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 5 phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.475
2	0.476
3	0.469
4	0.496
5	0.491
6	0.473
เฉลี่ย	0.480

ตารางที่ จ-6 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 10 phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.440
2	0.456
3	0.463
4	0.450
5	0.446
6	0.456
เฉลี่ย	0.452

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-7 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีน
ไกลคอล 15 phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.432
2	0.462
3	0.456
4	0.438
5	0.482
6	0.426
เฉลี่ย	0.449

ตารางที่ จ-8 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีน
ไกลคอล 5 phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.410
2	0.413
3	0.421
4	0.419
5	0.435
6	0.413
เฉลี่ย	0.419

ตารางที่ จ-9 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไซเดียม
ไฮดรอกไซด์ 5 phr

การทดลองที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.385
2	0.376
3	0.437
4	0.382
5	0.392
6	0.413
เฉลี่ย	0.398

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณจำนวนเซลล์และอัตราการขยายตัวของโพลีเมอร์

จำนวนเซลล์ของโพลีเมอร์คำนวณได้จากสมการที่ จ-1 [10]

$$n = \left(\frac{n_b}{l^2} \right)^3 \times 10^3 \times \varphi \quad (\text{จ-1})$$

โดยที่
$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (\text{จ-2})$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนเซลล์โพลีเมอร์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร
	n_b	คือ	จำนวนเซลล์โพลีเมอร์ในพื้นที่ $l \times l$
	l	คือ	ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร
	φ	คือ	อัตราการขยายตัวของโพลีเมอร์ (Expansion ratio)
	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโพลีเมอร์ก่อนการขยายตัว (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	ρ_f	คือ	ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโพลีเมอร์หลังการขยายตัว (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณจำนวนเซลล์และอัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโพลีเมอร์ของพอลิยูรีเทนโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ที่ 5 phr

- อัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโพลีเมอร์
ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิยูรีเทนโพลีเมอร์

$$\varphi = \frac{\left(\frac{1}{3} \times 1.10 \right) + \left(\frac{2}{3} \times 1.23 \right)}{0.613}$$

$$\varphi = 1.94$$

- จำนวนเซลล์โพลีเมอร์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร

$$n = \left(\frac{21.5}{1^2} \right)^3 \times 10^3 \times 1.94$$

$$n = 1.91 \times 10^5 \text{ เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ

ตารางที่ ข-1 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนโฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใย

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกกะปาสคาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกกะปาสคาล)
1	21.63	711.84
2	22.68	763.10
3	21.42	714.93
4	22.40	711.27
5	21.08	716.75
เฉลี่ย	21.84	723.58

ตารางที่ ข-2 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 5 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกกะปาสคาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกกะปาสคาล)
1	18.50	831.17
2	16.04	691.84
3	20.42	763.33
เฉลี่ย	18.32	762.11

ตารางที่ ข-3 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 10 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกกะปาสคาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกกะปาสคาล)
1	18.19	830.39
2	15.05	764.10
3	17.08	758.60
เฉลี่ย	16.77	784.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 15 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกะปาสกาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกะปาสกาล)
1	23.44	955.42
2	21.32	874.10
3	17.75	905.72
4	23.16	919.22
5	17.50	789.88
เฉลี่ย	20.63	888.87

ตารางที่ ข-5 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 5 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกะปาสกาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกะปาสกาล)
1	12.42	630.78
2	14.54	599.90
3	10.01	568.48
	11.46	633.23
เฉลี่ย	12.11	608.10

ตารางที่ ข-6 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 10 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกะปาสกาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกะปาสกาล)
1	11.58	558.28
2	12.64	520.96
3	12.79	576.50
4	11.63	563.44
5	12.17	631.56
เฉลี่ย	12.16	570.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 15 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกกะปาสกาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกกะปาสกาล)
1	15.39	686.77
2	17.41	724.04
3	14.50	741.76
5	13.65	754.79
เฉลี่ย	15.25	726.84

ตารางที่ ข-8 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีน ไกลคอล 5 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกกะปาสกาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกกะปาสกาล)
1	13.63	432.28
2	13.48	432.06
3	14.18	459.89
4	14.70	462.17
5	11.24	410.83
เฉลี่ย	13.45	439.45

ตารางที่ ข-9 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 phr

การทดลองที่	ความเค้นโค้งงอ (เมกกะปาสกาล)	มอดูลัสโค้งงอ (เมกกะปาสกาล)
1	10.83	474.74
2	9.15	470.95
3	7.56	375.40
4	11.63	510.91
5	6.80	415.15
เฉลี่ย	9.19	449.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ความแข็งแรงดึงของเส้นใย

ตารางที่ ข-1 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (เมกะปาสกาล)
1	45.95
2	51.48
3	45.00
4	51.04
5	50.52
เฉลี่ย	48.80

ตารางที่ ข-2 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (เมกะปาสกาล)
1	29.61
2	26.80
3	39.78
4	36.64
5	32.82
เฉลี่ย	33.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้