

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ

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

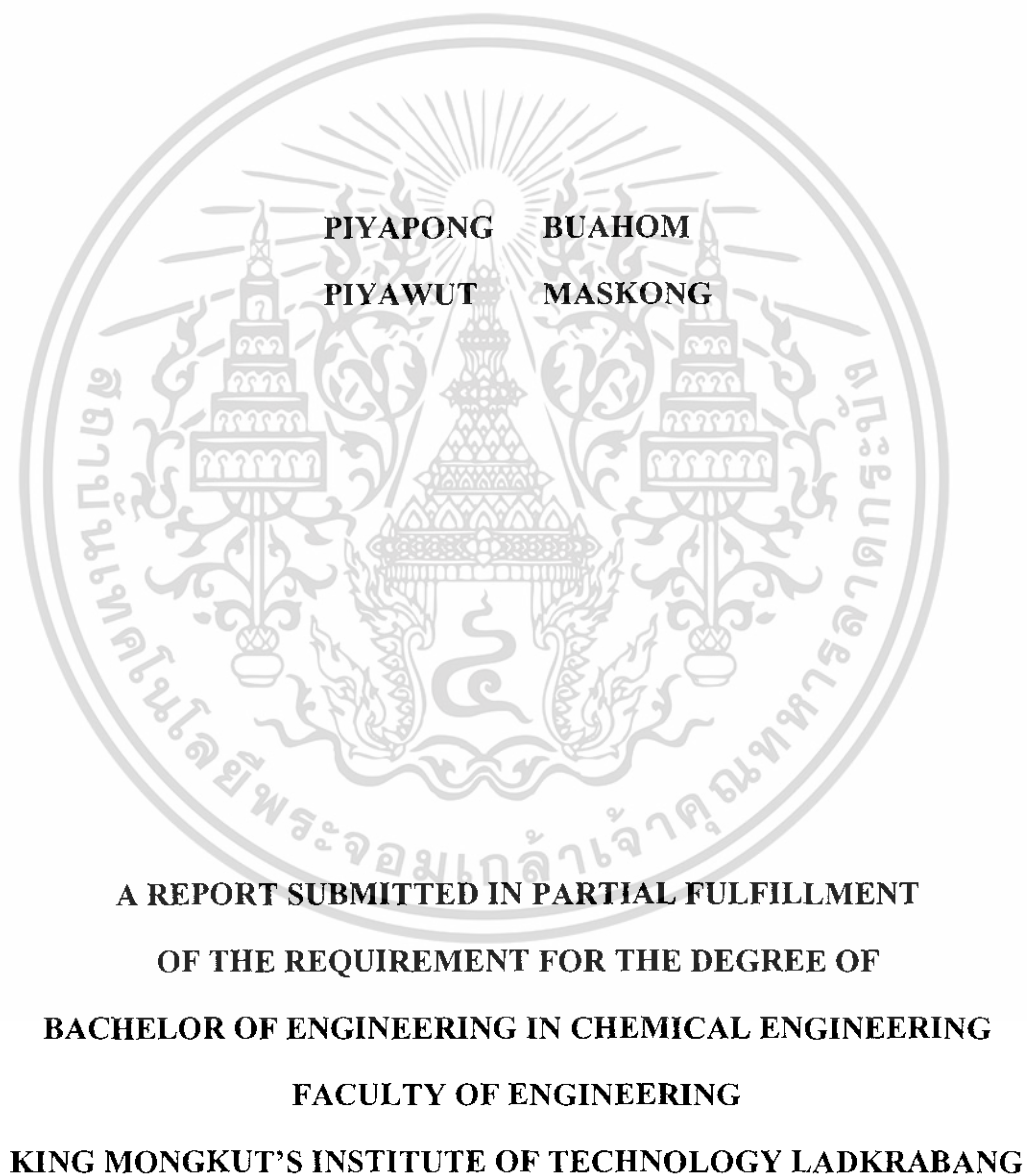


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง  
โดย

การเตรียมวัสดุคอมพิวเตอร์ของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ  
นายปิยพงศ์ บัวโฮม  
นายปิยวุฒิ มาศโค้ง

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร



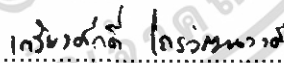
(ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

ประธานกรรมการ



กรรมการ

(ผศ.ดร. อภินันท์ นัมศนิสรณ์)



กรรมการ

(ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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

การศึกษานี้เป็นการเปรียบเทียบการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยระหว่างการปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีทางเคมีใช้กระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีทางกายภาพจะนำเส้นใยปอไปแช่ในเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอล เพื่อปรับปรุงสมบัติการเปียกและการยึดเกาะทางกลระหว่างเส้นใยและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของไกลคอลที่เปียกอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยกับหมู่ไอโซไซยาเนตของไอโซไซยาเนต คอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่เสริมแรงเส้นใยปอในช่วง 0 ถึง 15 phr ผสมกับพอลิโอดและไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต เพื่อขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยาในแม่พิมพ์ที่มีความดันต่ำ แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกลและศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ซึ่งจากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยที่แตกต่างกันจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่อินเตอร์เฟซแตกต่างกัน การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพสามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีขึ้น และจากผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต พบว่า คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีอื่น นอกจากนี้เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสียสภาพจากการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลมีการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำใครขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้ คือ

ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษาแนะนำ รวมทั้งความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำงาน

ดร.วุฒิพงษ์ รังมีสันติวานนท์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการประสานงานกับศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

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

ปิยพงศ์ บัวโสม

ปิยวุฒิ มาศโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ III ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใย.....              | 24   |
| 3.4 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์..... | 25   |

## 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<br>เอทิลีนไกลคอล.....            | 33   |
| 3.11 การศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ<br>คอมโพสิต.....              | 34   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....   | 35   |
| 4.1 ผลการศึกษาการเตรียมส่วนเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล.....                             | 35   |
| 4.1.1 การเปียกของเส้นใยปอหลังชุบด้วยเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีน<br>ไกลคอล.....                     | 35   |
| 4.1.2 การคลายตัวของเส้นใยปอในสารละลายไกลคอล.....  | 36   |
| 4.1.3 กรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติ<br>ด้วยไกลคอล.....             | 37   |
| 4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....   | 39   |
| 4.2.1 การกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิต.....  | 39   |
| 4.2.2 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ที่<br>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<br>คอมโพสิต.....               | 44   |
| 4.3.3 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกล<br>ของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต..... | 47   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 การกระจายตัวแบบต่างๆของส่วนเสริมแรงภายในคอมโพสิต.....  | 6    |
| รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของโฟม.....   | 8    |
| รูปที่ 2.3 การเกิดยูรีเทน.....  | 11   |
| รูปที่ 2.4 การเกิดพอลิยูรีเทนจากการปฏิกิริยาของไอโซไซยานาตกับพอลิโออล.....                                      | 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<br>เมทริกซ์.....                 | 16   |
| รูปที่ 2.11 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ.....  | 18   |
| รูปที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา รุ่น FANUC Robot R-2000iA 165F.....                                  | 24   |
| รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาการคลายตัวของเส้นใยปอ<br>เมื่อแช่ในสารละลายไกลคอล..... | 26   |
| รูปที่ 3.3 เครื่องกวนสำหรับเตรียมพอลิยูรีเทนเมทริกซ์.....   | 28   |
| รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปคอมโพสิต.....  | 28   |
| รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดความร้อนสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อควบคุม<br>อุณหภูมิของแม่พิมพ์.....                 | 29   |
| รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....   | 30   |
| รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกล รุ่น Intron 5500.....   | 31   |
| รูปที่ 3.8 แรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบความทนแรงโค้งงอ.....   | 31   |
| รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ รุ่น MD-200S.....   | 32   |
| รูปที่ 4.1 เส้นใยปอที่ ชุบด้วยเอทิลีน ไกลคอล และ โพรพิลีน ไกลคอล.....   | 35   |
| รูปที่ 4.2 ลักษณะการคลายตัวของเส้นใยปอ ในสารละลายเอทิลีน ไกลคอลและสารละลาย<br>โพรพิลีน ไกลคอล.....              | 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 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอ.....                                   | 51   |
| รูปที่ 4.18 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอ.....                                   | 52   |

# สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นเฉลี่ยต่อจำนวนฟองก๊าซของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีต่างๆที่ปริมาณของเส้นใยเสริมแรง 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 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใยปอ.....   | 66   |
| ตารางที่ จ-2 ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 5 phr.....   | 66   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ ช-8 ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ<br>ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอล 5 phr.....    | 72   |
| ตารางที่ ช-9 ความเค้น โค้งงอและมอดูลัส โค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอ<br>ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 phr..... | 72   |
| ตารางที่ ช-1 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ.....  | 73   |
| ตารางที่ ช-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) กับหมู่ไซยาเนต (Cyanate group, -NCO) ในโมเลกุลของไอโซไซยาเนต (Isocyanate) เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบยูรีเทน (Urethane linkage) ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง [10] และเหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ มีสมบัติทางกลที่ดี และทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ประกอบกับเส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักคือเซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งภายในประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซยาเนตของไอโซไซยาเนต เกิดการเชื่อมต่อนานยูรีเทนที่บริเวณอินเตอร์เฟส ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ให้ดีขึ้น [3] อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติก็คือการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่ไม่เหมาะสม และไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

โครงการนี้เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ โดยมุ่งเน้นถึงการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอ เพื่อเตรียมเป็นส่วนเสริมแรงให้แก่พอลิยูรีเทนโฟม ให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนที่ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีความแข็งแรง ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและชีวอนามัยของผู้ใช้ ซึ่งอาจพัฒนาไปสู่กระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรม และสามารถช่วยลดการใช้เส้นใยสังเคราะห์ที่มีราคาแพง ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 แนวคิดในการศึกษา

โครงการนี้เป็นการศึกษากรรมวิธีการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโพลีเมอริซึมแรงเส้นใยปอ โดยศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอที่จะเตรียมเป็นส่วนเสริมแรง โดยปรับปรุงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) สารละลายเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) และสารละลายโพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) ซึ่งจะทำการศึกษากกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอที่เหมาะสม เพื่อควบคุมปริมาณของเอทิลีนไกลคอลหรือโพรพิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอให้มีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนโพลีเมอริซึมให้ดีขึ้น

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์ สมบัติส่วนเสริมแรง ขนาดและรูปร่างของส่วนเสริมแรง การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับส่วนเสริมแรง สัดส่วนปริมาณของส่วนเสริมแรง กระบวนการขึ้นรูป และการกระจายตัวของส่วนเสริมแรง [11] ในการศึกษาในส่วนเสริมแรงที่ใช้คือเส้นใยปอในรูปแบบเส้นเชือก เส้นใยปอที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นเส้นเชือกจะมีการกวนกันของกลุ่มเส้นใยปอเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการนำไปใช้งาน เมื่อนำเส้นเชือกดังกล่าวมาเตรียมเป็นส่วนเสริมแรงของพอลิยูรีเทนโพลีเมอริซึม อาจมีส่วนที่มีความซับซ้อนบนเส้นใยที่เมทริกซ์ไม่สามารถแพร่หรือไหลเข้าไปยึดเกาะกับเส้นใยได้ ทำให้มีพื้นที่ยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ลดลงและเกิดเป็นโพรง ซึ่งอาจส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงในบริเวณดังกล่าวอาจมีการเคลื่อนตัวเมื่อนำไปใช้งาน

จากการรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปแนวทางการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนโพลีเมอริซึมได้ 3 ประเด็นหลัก ดังนี้

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

1.2.2 การเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะ (Adhesion surface) แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1) การเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนโพลีเมอริซึมในบริเวณพื้นผิวของเส้นใยที่มีความซับซ้อน โดยการแช่เส้นใยปอในสารที่มีแรงตึงผิวใกล้เคียงกับเส้นใยปอเพื่อให้เส้นใยคลายตัว [12] เพื่อลดพื้นที่ผิวของเส้นใยปอที่ไม่เกิดการยึดเกาะเนื่องจากอยู่ในส่วนที่ซับซ้อน ให้โมเลกุลของไอโซไซยาเนตแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยปอ หรือให้พอลิยูรีเทนไหลเข้าไปยึดพื้นผิวของเส้นใยได้อย่างทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

1.2.3 การปรับปรุงการยึดเกาะเชิงกล (Mechanical Interlocking) โดยการพาสารตั้งต้นของพอลิยูรีเทนส่วนที่เป็นพอลิออกไซด์ไปพร้อมกับเส้นใยปอในส่วนที่จับซ้อน อาศัยสมบัติการดูดซับ (Adsorption) และการเปียก (Wetting) ของสารที่มีแรงตึงผิวใกล้เคียงกัน [12-14] เพื่อให้โมเลกุลของไอโซไซยานตที่แพร่เข้าไปหรือพอลิยูรีเทนที่ไหลเข้าไปในมัดเส้นใย ทำปฏิกิริยาเกิดการเชื่อม โยงแบบยูรีเทนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยปอก่อนจะคงรูป

จากการวิเคราะห์แนวทางการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยการผสมในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและ โพรพิลีนไกลคอลเพื่อให้มัดเส้นใยกลายเป็นเส้นใยเดี่ยว และไกลคอลบางส่วนจะถูกดูดซับไว้บนเส้นใยปอ จากนั้นนำไปอบเพื่อให้ไกลคอลบางส่วนระเหยออกไปเพื่อควบคุมปริมาณของไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่เหมาะสม ก่อนนำไปผสมเป็นส่วนเสริมแรงในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต ซึ่งโครงการนี้จะทำการศึกษากรรมวิธีในกระบวนการเตรียมส่วนเสริมแรงที่ปรับปรุงสมบัติเส้นใยด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล และศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของเส้นใยด้วยสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ 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 เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ 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 เตรียมเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับพอลิเมอร์ โฟม เส้นใยธรรมชาติ กลไกการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ กระบวนการผลิตและการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต

1.6.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอล ที่ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทน โฟม ได้ดีขึ้น

1.6.3 สามารถนำความรู้ที่ได้รับจากโครงการไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยธรรมชาติให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

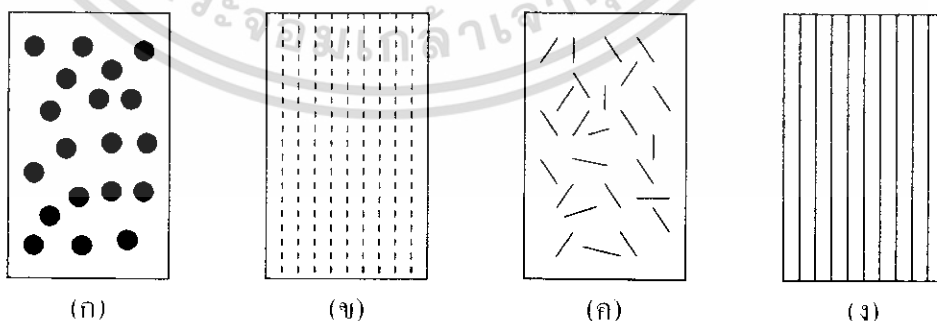
## ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) [4]

พอลิเมอร์คอมโพสิต หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ประเภทที่มีสมบัติต่างกัน โดยจะแยกกันอยู่ในต่างวัสดุ 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) เส้นใยสั้นเสริมแรงแบบสุ่ม (ง) เส้นใยเสริมแรงต่อเนื่องทิศทางเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix)

พอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นส่วนที่ห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงไว้ โดยทั่วไปพอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีความเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง

หน้าที่ของเมทริกซ์ ได้แก่

- 1) รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของคอมโพสิต
- 2) รักษาการกระจายตัวของเส้นใย และแยกไม่ให้เส้นใยมารวมกัน
- 3) ทำให้คอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียดสีภายใต้อุณหภูมิหรือแรงที่ระดับหนึ่ง
- 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 และพื้นที่ผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

ปัจจุบันได้มีความสนใจในการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นส่วนเสริมแรงในคอมโพสิต ประเทศไทยมีเส้นใยธรรมชาติมากมาย ทั้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยโปรตีน เป็นต้น

ข้อดีของเส้นใยธรรมชาติ มีดังนี้

- 1) ราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต
- 2) เส้นใยจากพืชและสัตว์สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

ข้อจำกัดของการใช้วัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ต้องการปรับปรุงคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2. พอลิเมอร์โฟม (Polymer foam) [10]

### 2.2.1 วัสดุโฟม

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

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

### 2.2.2 การแบ่งประเภทของโฟม

การแบ่งประเภทของโฟม สามารถแบ่งตามหลักเกณฑ์ต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

การแบ่งประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) โฟมแบบเซลล์เปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อกันจนทำให้ก๊าซหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในสามารถหมุนเวียนถึงกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก)

2) โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ที่ไม่ต่อกัน ทำให้ก๊าซหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในแต่ละเซลล์ไม่สามารถหมุนเวียนถึงกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข)



(ก)

(ข)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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

(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 โดยตรงกับปริมาณก๊าซที่เกิดจากสารให้ฟองที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ที่จะทำเป็น 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

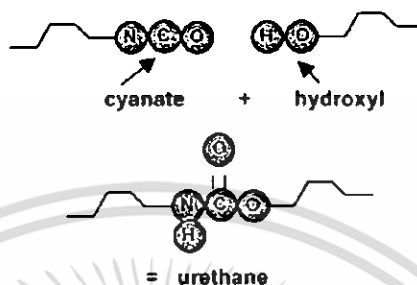
- 1) สมบัติความแข็งแรงต่างๆ จะลดลง
- 2) ความสามารถในการดูดกลืนการกระแทกจะลดลง
- 3) เกิดการโค้งงอในระหว่างการอัด
- 4) มีสมบัติการเป็นฉนวนลดลง
- 5) มีสมบัติการซึมผ่านของน้ำและอากาศเพิ่มขึ้น

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

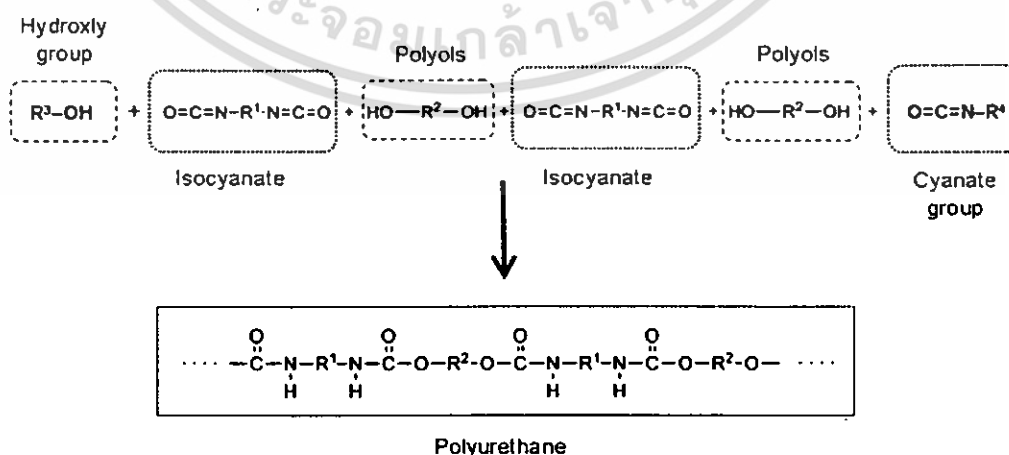


รูปที่ 2.3 การเกิดยูรีเทน [15]

ปฏิกิริยาการเกิดยูรีเทนแสดงดังสมการที่ 2.1



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



รูปที่ 2.4 การเกิดพอลิยูรีเทนจากปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับพอลิโออล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

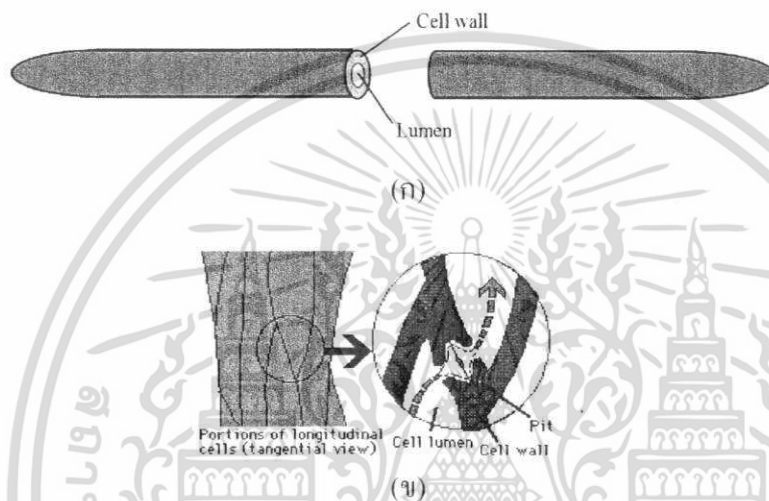
ไอโซไซยาเนตเป็นสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา การเกิดการเชื่อมต่อด้วยยูรีเทน (Urethane linkage) เป็นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบเติม (Addition polymerization) ปฏิกิริยาคายพลังงาน (Exothermic reaction) ในการออกแบบปฏิกิริยาและสภาวะของกระบวนการทำได้โดยการเลือกชนิดของพอลิออล ไอโซไซยาเนต และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม 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 ผนังเซลล์ปฐมภูมิจะมีความบางและตัดงอได้มากกว่า และบางส่วนของผนังเซลล์ทุติยภูมิจะพัฒนาเป็นผนังเซลล์ปฐมภูมิเมื่อหยุดการเจริญเติบโต ภาพตัดขวางของเซลล์พืชแสดงในรูปที่ 2.7

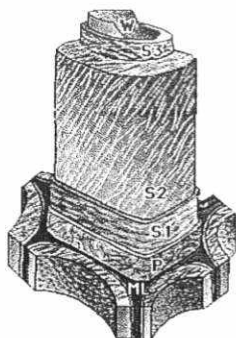
องค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.8 ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ในรูปของการจัดเรียงตัวเป็นไมโครไฟบริล (Microfibril) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีความซับซ้อนประกอบขึ้นจากการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลกลูโคส (Glucose) และจัดเรียงตัวเป็นผลึกไมโครคริสตัลไลน์ (Microcrystalline) อย่างเป็นระเบียบด้วยพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล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

เกาะเกี่ยวยึดให้เซลล์โลสแต่ละไมโครไฟบริลจัดเรียงตัวในแนวเดียวกันเป็นไฟบริล (Fibril) ซึ่งเพกตินและเฮมิเซลลูโลสจะจัดเรียงตัวกันภายในโครงข่ายของเซลล์โลสไมโครไฟบริล ไกลแคนแบบเชื่อมขวางจะช่วยเพิ่มสมบัติความต้านแรงดึง (Tensile strength) ของเซลล์โลส ประกอบกับโครงข่ายโคเอ็กทีนซีฟ (coextensive) ของเพกตินจะช่วยให้เซลล์พืชมีสมบัติความทนแรงกด (Compressive strength) และภายในโครงข่ายนี้ยังพบ โปรตีนจำนวนเล็กน้อย ซึ่งโปรตีนเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกลให้แก่เซลล์พืช



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

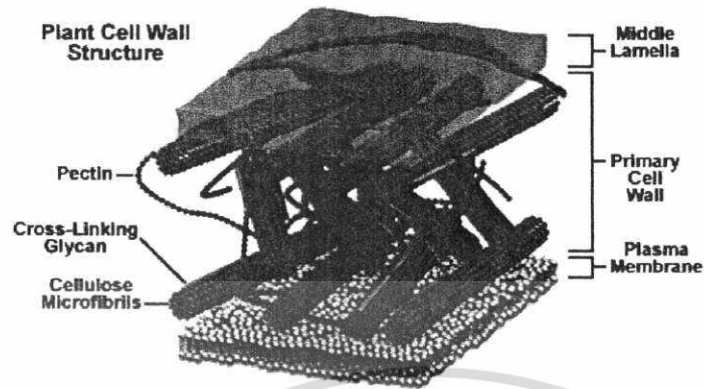
องค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ทุติยภูมิ มีความคล้ายคลึงกันผนังเซลล์ปฐมภูมิ และยังประกอบด้วยส่วนประกอบอื่น โดยเฉพาะลิกนิน (Lignin) ซึ่งเป็นชื่อทั่วไปของกลุ่มพอลิเมอร์ของอะโรมาติกแอลกอฮอล์ (Aromatic alcohol) ที่มีความแข็ง เป็นส่วนหลักที่ช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของพืช เป็นส่วนที่แสดงสมบัติเฉพาะของเซลล์เนื้อไม้ (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

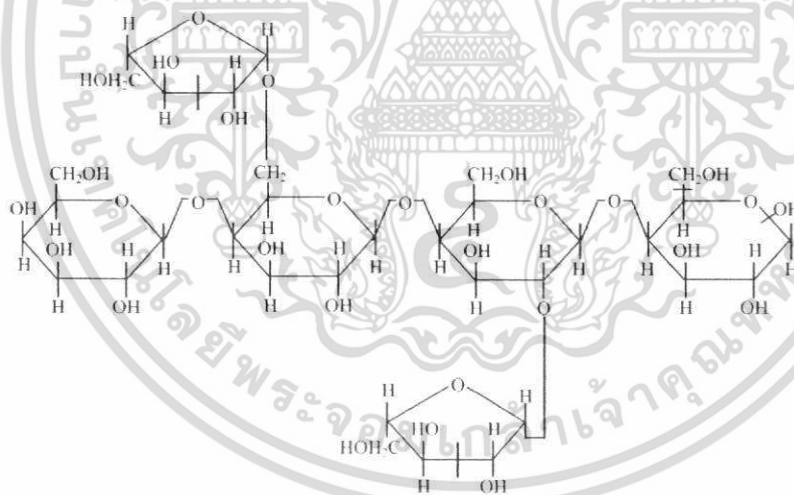
รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางของเซลล์พืช [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

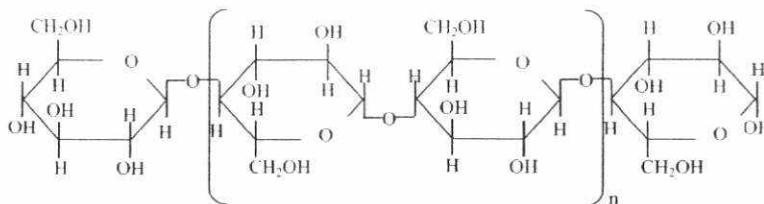


รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในผนังเซลล์ปฐมภูมิ [16]

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



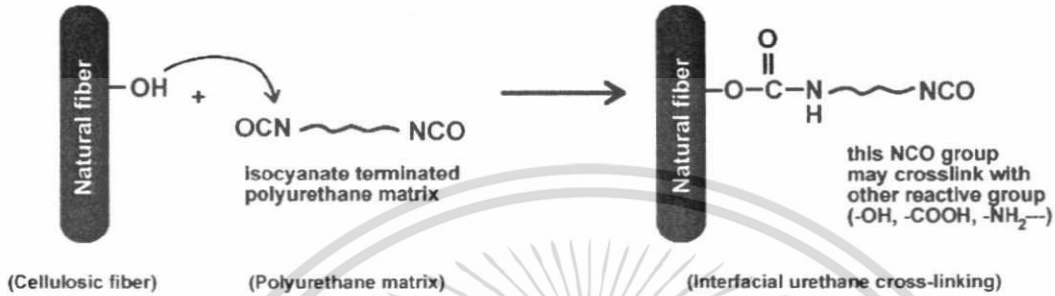
(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางสัตวศาสตร์และประมง มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต (-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 การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารประสานกุ่มวบ (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 ทำให้อึดเกาะทางกายภาพกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ลดลง ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตเกิดฟองอากาศของฟองก๊าซถูกขังอยู่บนพื้นผิว เส้นใยทำให้พื้นผิวสัมผัสน้อยลง
- เกิดการหดตัวของเมทริกซ์หลังการเชื่อมโยง ทำให้เกิดแรงเค้น และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์

### 3) การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking)

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

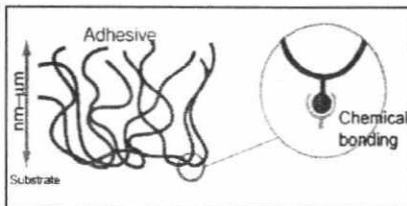
### 4) การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion)

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

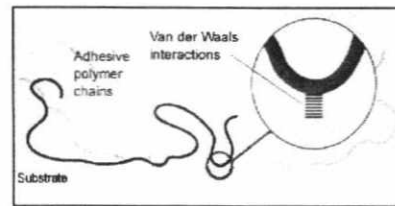
ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเตอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำลายทาที่พื้นผิวของเส้นใย หรือการเติมสารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับเส้นใยที่มีการเคลื่อนของพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการสัมผัสเมทริกซ์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

### 5) แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction)

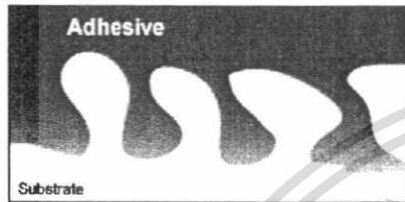
แรงดึงดูดทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นบวกและอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ เช่น อันตรกิริยาระหว่างกรดและเบสและพันธะไอออนิก ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ แรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าสถิตย์จะไม่ใช่แรงยึดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิต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



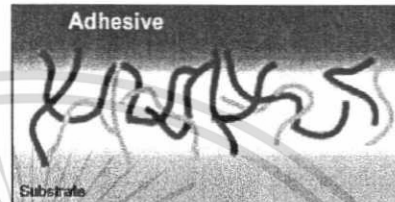
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.11 กลไกการยึดเกาะชนิดต่างๆ [20] (ก) พันธะเคมี (ข) การดูดซับและการเปียก (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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1) การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมี

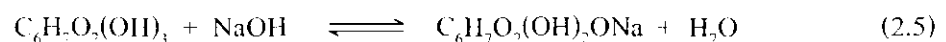
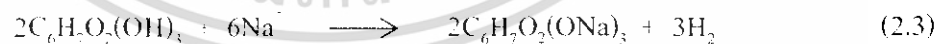
การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมี เช่น การกำจัดไขมันที่ผิว เส้นใย การกระตุ้นด้วยสารเคมี เป็นการปรับปรุงองค์ประกอบและสมบัติทางเคมีบริเวณพื้นผิวของ เส้นใย โดยการกำจัดสิ่งปลอมปนบนพื้นผิวของเส้นใยหรือเคลือบสารปรับสภาพลงบนพื้นผิวของ เส้นใย โดยพิจารณาผลจากข้อมูลการทดลองของมวลสาร ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น 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) และสร้างพื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานนตเกิดการเชื่อมต่อแบบยูรีเทน โดยการนำเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลสนำไปแช่ในสารละลายด่าง 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 เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลขององค์ประกอบดังกล่าวจะทำพันธะเอกสารนี้เป็นเอกลักษณ์ลงบนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส โดยไฮดรอกซิลของแอลคาไลจะกระตุ้นให้เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างเซลลูโลสและองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เพื่อกำจัดออกจากเส้นใย เป็นการเพิ่มสัดส่วนปริมาณของเซลลูโลสในเส้นใย และเมื่อนำเส้นใยพีชที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยค่าไปเป็นส่วนเสริมแรงในคอมโพสิตของพอลิยูรีเทน จะทำให้โอกาสของเซลลูโลสไมโครไฟบริลที่จะทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานเนตมีมากขึ้น ทำให้การยึดเกาะด้วยพันธะเคมีระหว่างพอลิยูรีเทนและเส้นใยด้วยการเชื่อมต่อบางยูรีเทนมีมากขึ้นด้วย

## 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 และการเสีรูปร่างของเนื้อเมทริกซ์หรือส่วนเสริมแรง (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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

5) ทดสอบด้วยแรงกระแทก (Izod impact test) ลักษณะของแรงที่กระทำเป็นแรงกระแทกที่พื้นผิวของวัสดุ จะขึ้นกับสมบัติความแข็งแรงดึง และการยึดเกาะของเส้นใยกับเนื้อพอลิเมอร์

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D. Ray และคณะ[12] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ในเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินพบว่า การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากช่องว่างที่มากขึ้น แต่คอมโพสิตโฟมจะมค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานแรงกระแทกจะเพิ่มตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และถ้าสัดส่วนช่องว่างของคอมโพสิตโฟมมีถึงร้อยละ 56 จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเกือบสามเท่าเมื่อเทียบกับคอมโพสิตก่อนทำโฟม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 และไดไอโซไซยานเนต ผสมในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่แม่พิมพ์อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

##### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยปอ

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

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

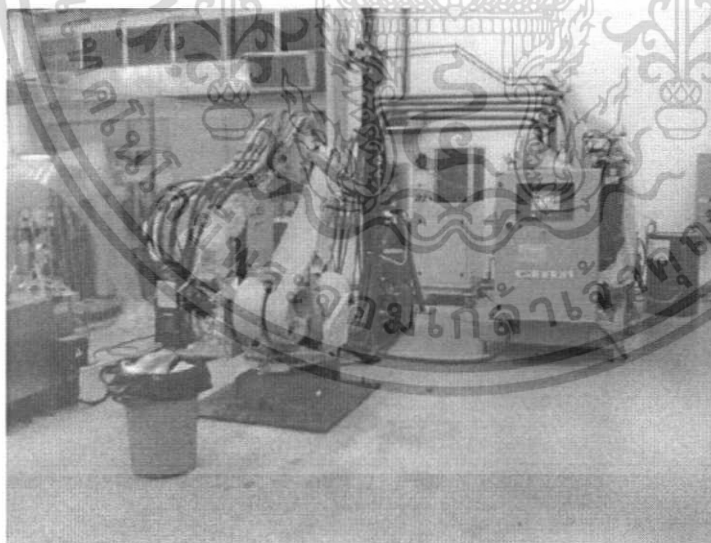
1. อุปกรณ์สำหรับตัดเส้นใยเสริมแรง ของเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (Reaction injection molding: RIM) รุ่น FANUC Robot R-2000iA 165F ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
2. เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Testing Machine) รุ่น Intron 5500
3. เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 3.3 การเตรียมเส้นใยเสริมแรงที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใย

ในการศึกษาครั้งนี้เส้นใยที่จะนำมาเป็นส่วนเสริมแรงของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเตรียมจากการตัดเส้นเชือกปอ ให้มีขนาดความยาว 1 นิ้ว ด้วยอุปกรณ์ตัดเส้นใยเสริมแรงของเครื่องฉีดยาแบบทำปฏิกิริยา (แสดงในรูปที่ 3.1) และเก็บเส้นใยที่ได้ไว้ในถังป้องกันความชื้น



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 โดยมีการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) เตรียมสารละลายเอทิลีน ไกลคอลและสารละลายโพรพิลีน ไกลคอลในเอทานอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 20 40 60 และ 100 โดยปริมาตร บรรจุในแก้วพลาสติก
- 2) คัดเลือกตัวอย่างเส้นใยปอ (จากข้อ 3.3) ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แच्छงในสารละลาย 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 มีการคลายตัวของเส้นใยทั้งส่วนที่แช่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล และสารละลายโพรพิลีนไกลคอลที่เหมาะสม 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3.2 กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอล

การปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอล 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

การขึ้นรูปคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับใช้ในการทดสอบลักษณะทางสัจฐานวิทยาและสมบัติทางกล มีขั้นตอนดังนี้

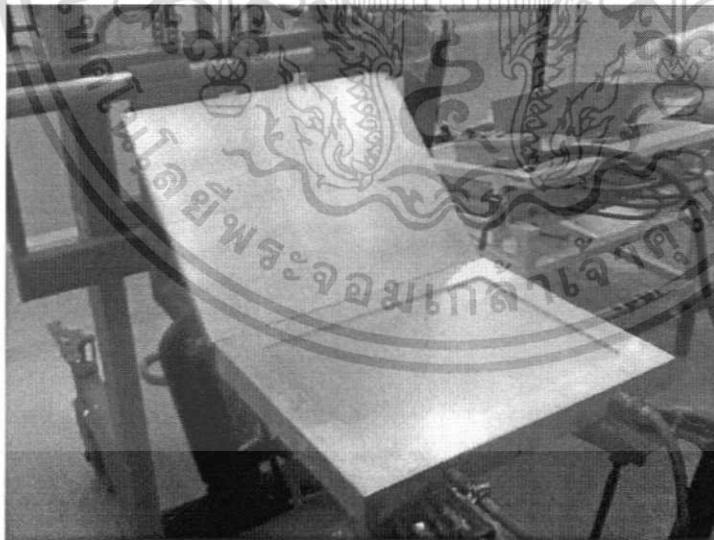
- 1) คำนวณปริมาณของไอโซไซยานตและพอลิออลที่ต้องใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนและน้ำหนักของเส้นใยปอที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรง ดังแสดงในภาคผนวก ก
- 2) เตรียมแม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- 3) ชั่งน้ำหนักไอโซไซยานตและพอลิออล
- 4) ชั่งน้ำหนักเส้นใยเสริมแรง แล้ววางเส้นใยกระจายทั่วแม่พิมพ์
- 5) ผสมไอโซไซยานตและพอลิออลให้ทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



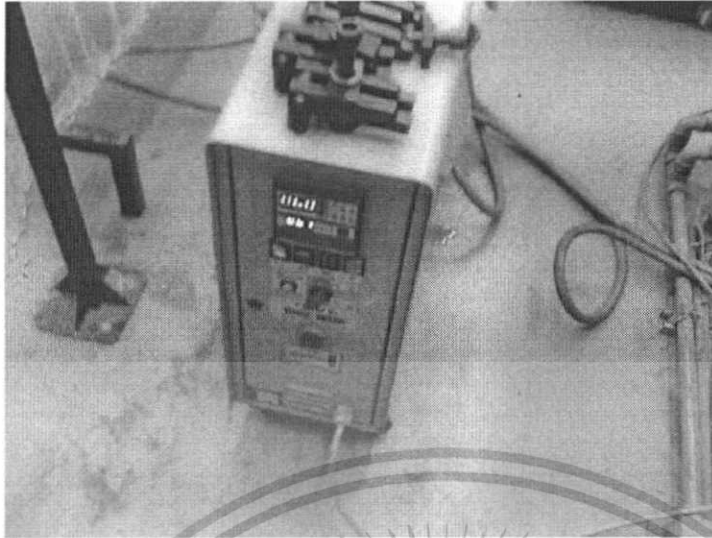
รูปที่ 3.3 เครื่องกวนผสมสำหรับเตรียมพอลิเอทรีเทนเมทริกซ์

แม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแม่พิมพ์แบบควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำร้อน ซึ่งได้รับการให้ความร้อนจากเครื่องกำเนิดความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดความร้อนสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์

### 3.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) มีขั้นตอนดังนี้

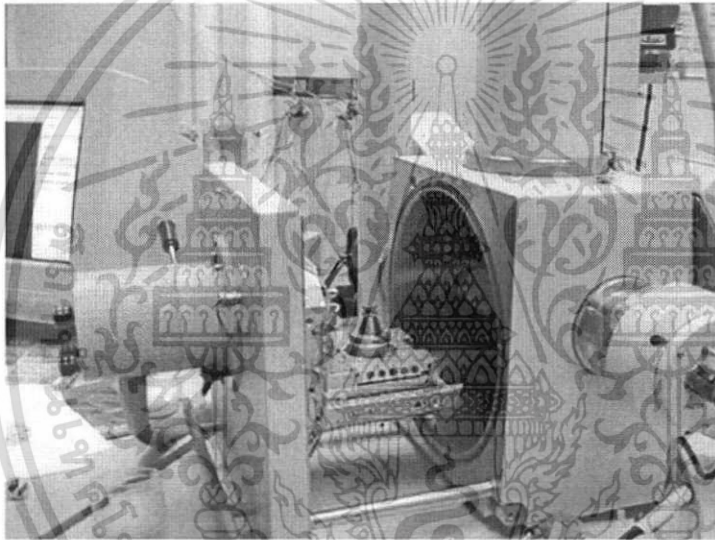
#### 3.7.1 การเตรียมชิ้นงาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

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



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

### 3.8 การทดสอบสมบัติความความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

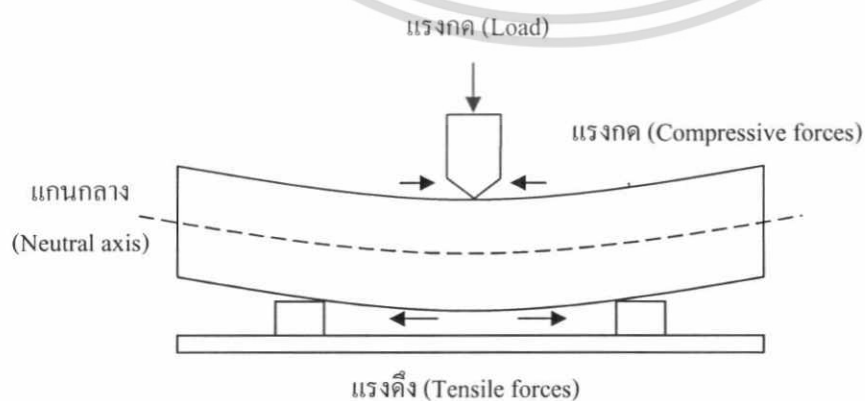
ทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และสภาวะในการทดสอบเป็นดังนี้

- |  |                      |
|--|----------------------|
| - 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9 การวัดความหนาแน่นของคอมโพสิต

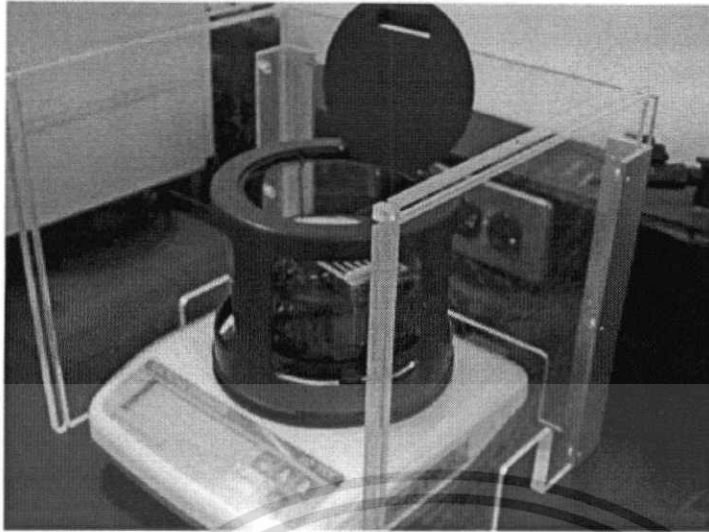
นำตัวอย่างชิ้นงานของคอมโพสิตที่ไม่เสริมแรงเส้นใย เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับสภาพ และเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ที่ปริมาณการเสริมแรงต่างๆ ที่ผ่านการทดสอบทางกลแล้วมาวัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter)

เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นรุ่น MD-200S ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) เพื่อหาความหนาแน่นและกำหนดความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1.000 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 4 องศาเซลเซียสเป็นค่าอ้างอิง เครื่อง MD-200S สามารถวัดความหนาแน่นของวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ ยกเว้นวัสดุที่เป็นผงและของเหลวที่มีความหนืดสูง วัสดุตัวอย่างที่นำมาทดสอบคือ คอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ โดยตัวกลางของเหลวคือน้ำ ก่อที่จะทำการวัดค่าจะต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อยเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการใช้งาน เพื่อเป็นการอุ่นเครื่องและเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง

#### ขั้นตอนการใช้งาน

- 1) ตั้งค่าน้ำจ่อแสดงผลให้เป็นศูนย์
- 2) ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างในอากาศขณะแห้งแล้วทำการบันทึกค่า
- 3) ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างในน้ำแล้วทำการบันทึกค่า (หากมีฟองอากาศเกาะอยู่ที่วัสดุตัวอย่างให้พยายามกำจัดออกก่อนที่จะบันทึกค่า)
- 4) เครื่องจะแสดงผลหาความหนาแน่นทางจอแสดงผล
- 5) นำวัสดุตัวอย่างออกจากเครื่อง (ในการนำวัสดุตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้ที่ลึง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำส่นออกมาทำความสะอาดแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10.2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาวิธีการผสมขึ้นรูปคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล

เนื่องจากเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล ตามข้อ 3.5.2.2 เส้นใยบางส่วนมีปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เปียกบนผิวของเส้นใยปอเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก จึงได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาแนวทางการปรับเปลี่ยนลำดับวิธีการผสมขึ้นรูป โดยมีลำดับการผสมดังนี้

1. ผสมเส้นใยลงในไอโซไซยานเนต เพื่อให้ไอโซไซยานเนตทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยปอเกิดการเชื่อมต่อแบบยูรีเทน และทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลที่เปียกอยู่บนผิวของเส้นใยเพื่อเพิ่มการยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking)
2. เติมพอลิเอทิลีนและกวนผสมให้เข้ากัน เพื่อให้พอลิเอทิลีนทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานเนตส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับเส้นใยปอและเอทิลีนไกลคอล

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

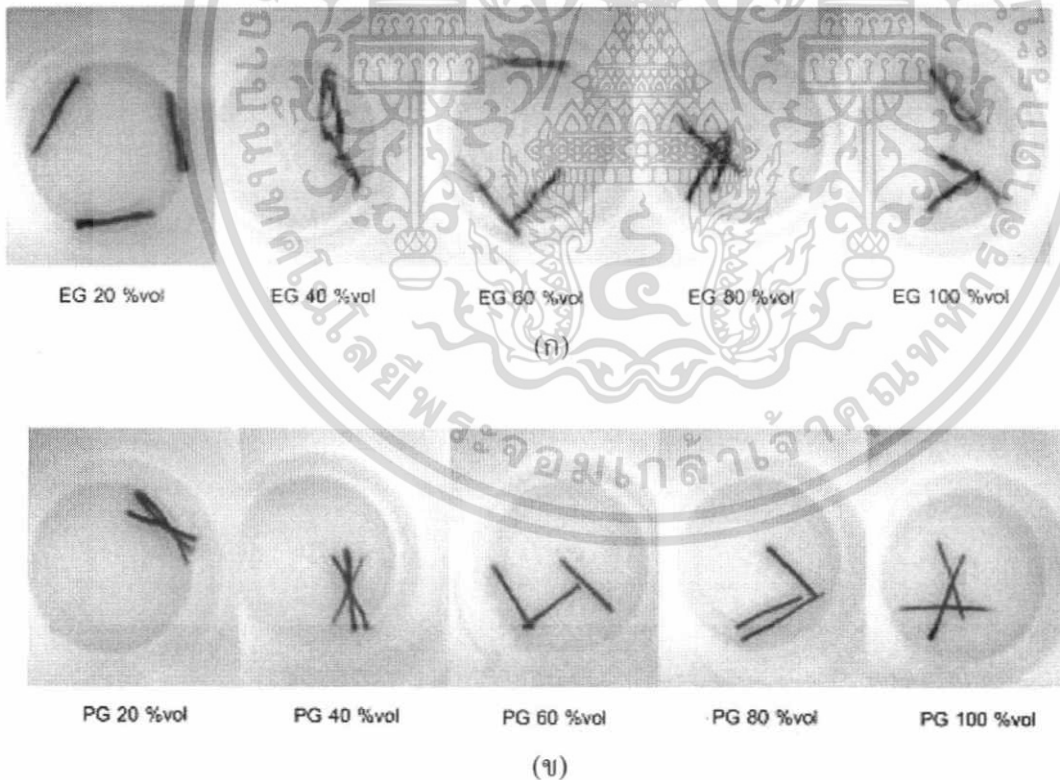
1. เตรียมส่วนเสริมแรงจากเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล ตามกรรมวิธีในข้อ 3.10.1
2. ขึ้นรูปชิ้นงานพอลิยูรีเทนโพนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่มีปริมาณของเส้นใยเสริมแรงในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5 10 และ 15 phr ตามวิธีขึ้นรูปในข้อ 3.6
3. นำชิ้นงานพอลิยูรีเทนโพนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้ไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและทดสอบสมบัติความเค้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



#### 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการคลายตัวของเส้นใยปอในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วนั้น ในเบื้องต้นได้เลือกใช้สารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยปริมาตร โดยพิจารณาจากการคลายตัวของมัดเส้นใยและสัดส่วนการเจือจางด้วยเอทานอลที่จะช่วยในการลดระยะเวลาในการอบเพื่อควบคุมปริมาณไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยได้ในระยะเวลานั้น

#### 4.1.2 กรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล

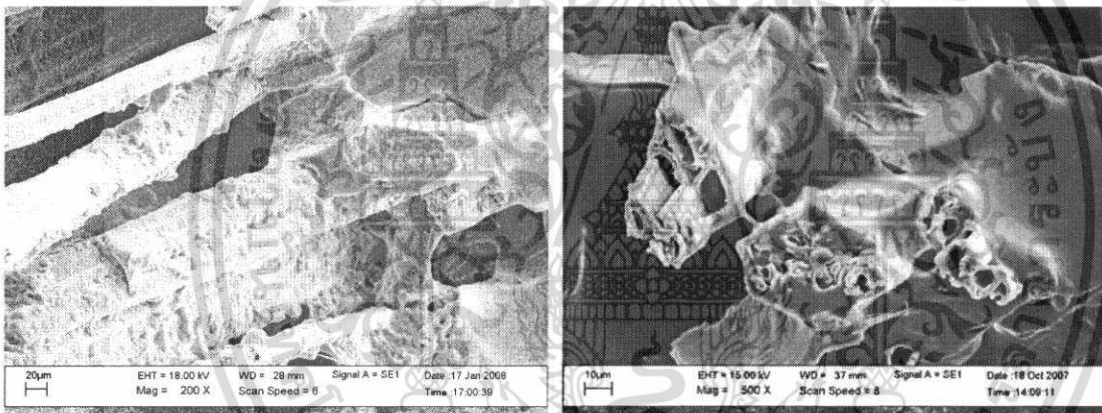
ในเบื้องต้นได้กำหนดกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล โดยแช่เส้นใยปอในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อควบคุมปริมาณของเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอลที่เปียกอยู่บนผิวของเส้นใย 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) ซึ่งทำให้ชิ้นงานคอมโพสิตที่ได้ไม่แข็งแรง จึงได้มีแนวคิดในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวใน 2 ลักษณะ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและทดสอบสมบัติทางกลเปรียบเทียบกับวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีอื่นๆ จะใช้กรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลที่มีปริมาณของเอทิลีน ไกลคอลเหลืออยู่บนเส้นใยร้อยละ 1.46 ต่อน้ำหนักของเส้นใย

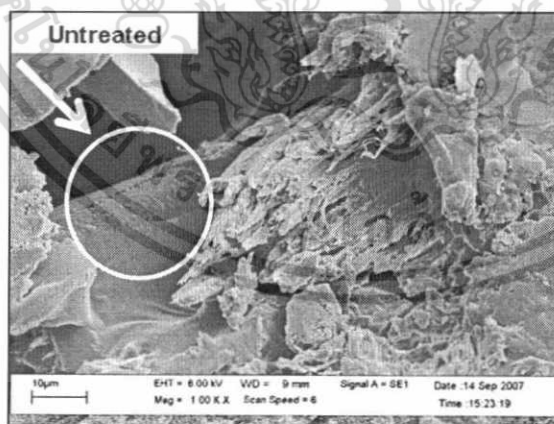
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟส การเสีรูปลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย และลักษณะของฟอง โฟม เปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

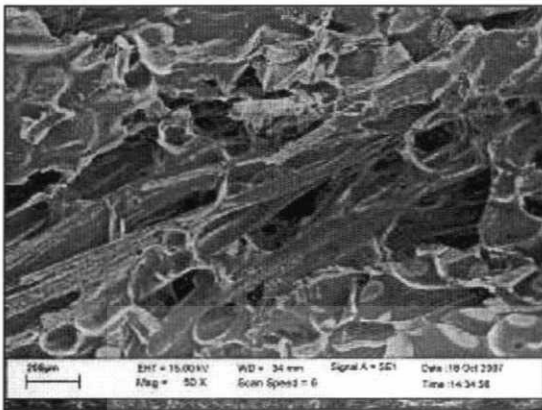
### 4.2.1 การกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิต

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)

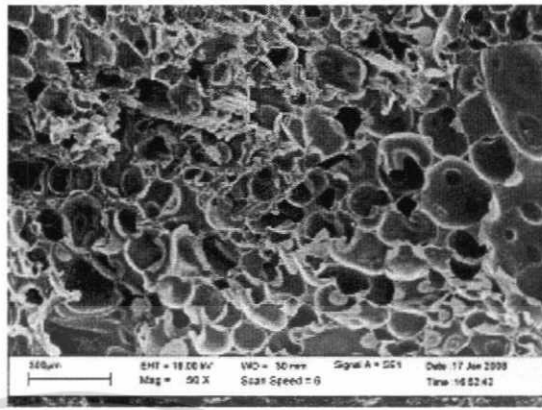


รูปที่ 4.4 พื้นผิวของเส้นใยปอบางส่วนที่ไม่เกิดการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์

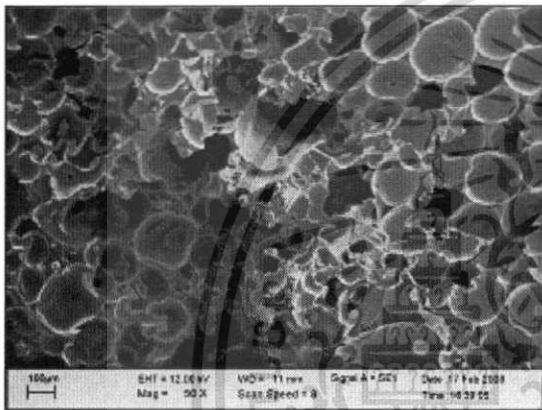
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



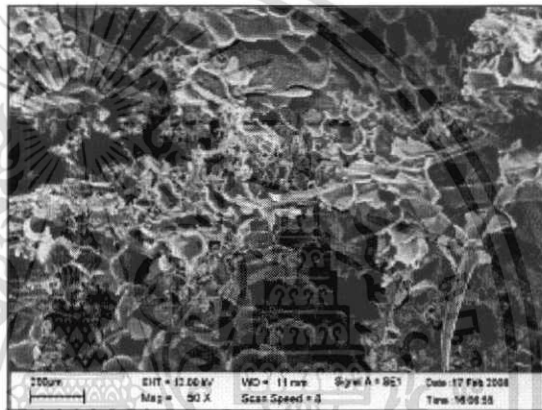
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

#### รูปที่ 4.5 การคล้ายตัวของเส้นใยปอในคอม โพลีเอทของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

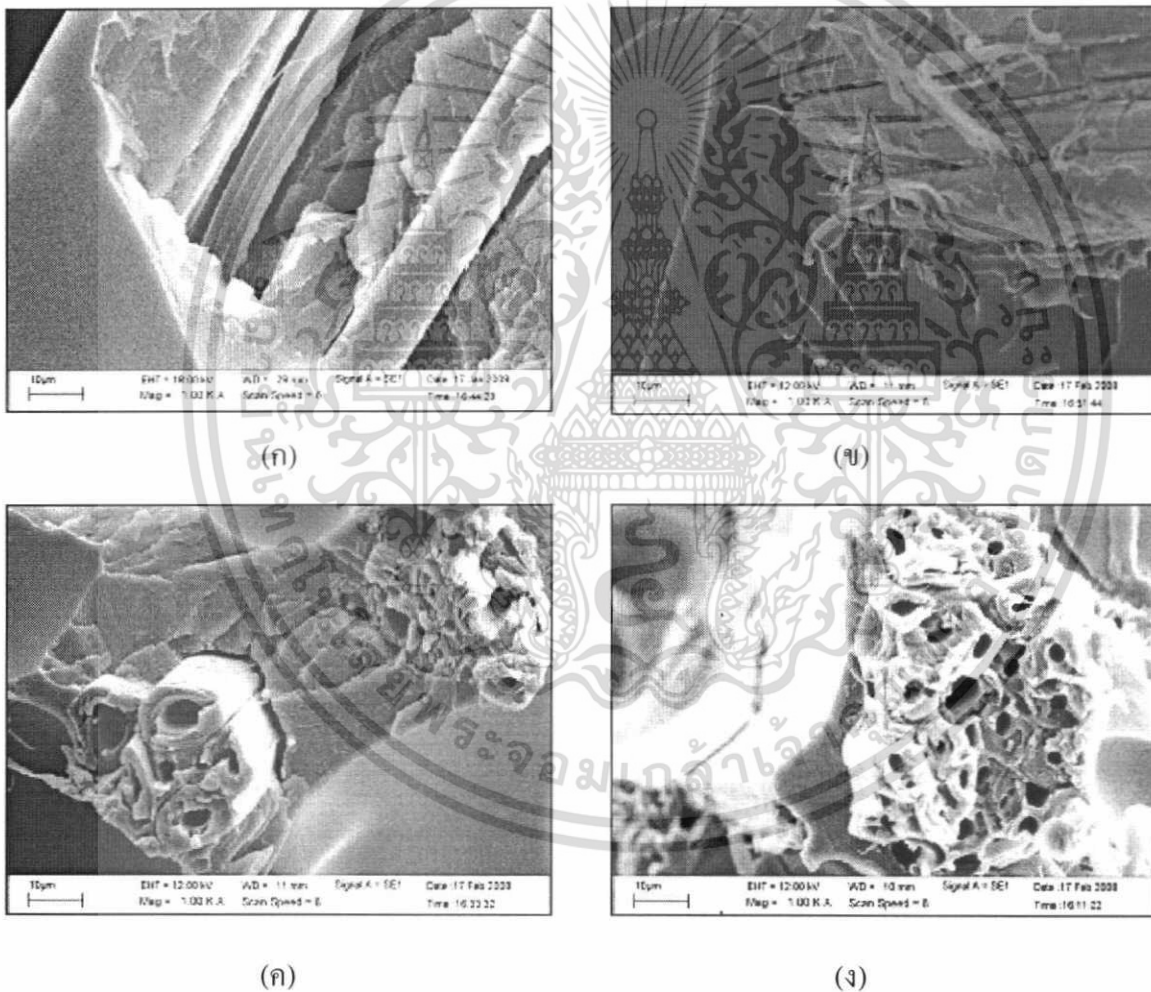
#### 4.2.2 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนโฟมเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟส

เมื่อพิจารณาถึงการยึดเกาะของเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่อินเตอร์เฟสและจากการเสียดสภาพของชิ้นงานคอม โพลีเอท ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่า พอลิยูรีเทน โฟมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ และเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีน ไกลคอลเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ เป็นการเสียดสภาพที่บริเวณอินเตอร์เฟส (Adhesive failure) ดังแสดงในรูป 4.6 (ก) และรูปที่ 4.6 (ค) ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ ส่วนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอทิลีน ไกลคอล มีการยึดเกาะกันที่ดีระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) และรูปที่ 4.5 (ง) เกิดการยึดเกาะของพอลิยูรีเทนเมทริกซ์รอบเส้นใย โดยเฉพาะพอลิยูรีเทนคอม โพลีเอทที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเอทิลีนไกลคอลจะมีการเสียดสภาพของชิ้นงานที่อินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ในลักษณะหักไปพร้อมๆ กัน แสดงถึงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอและพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่ดีมาก

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจนของวิธีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอล คือ การปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำลายโครงสร้างบางส่วนของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ในขณะที่การปรับปรุงสมบัติด้วยไกลคอลนั้นไม่มีการทำลายโครงสร้างของเส้นใย



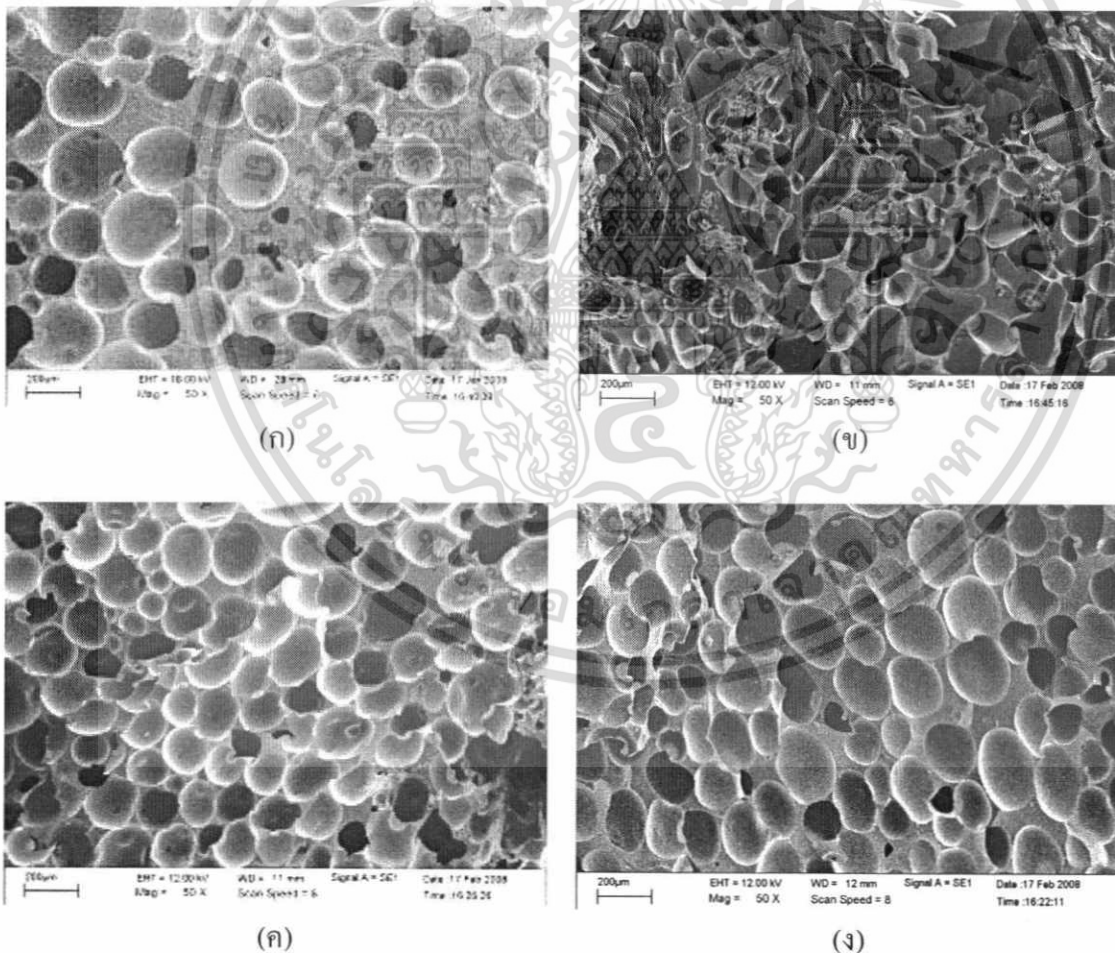
รูปที่ 4.6 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอที่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 พอลิโอด และ ไอโซไซนาเนตชนิดเดียวกันและใช้แม่พิมพ์อุณหภูมิเท่ากันที่ 60 องศาเซลเซียส ในการขึ้นรูป และมีปริมาณของเส้นใยเสริมแรงในอัตราส่วนต่อน้ำหนักของเส้นใยที่ 5 phr เท่ากัน



รูปที่ 4.7 ลักษณะของเซลล์โฟมในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

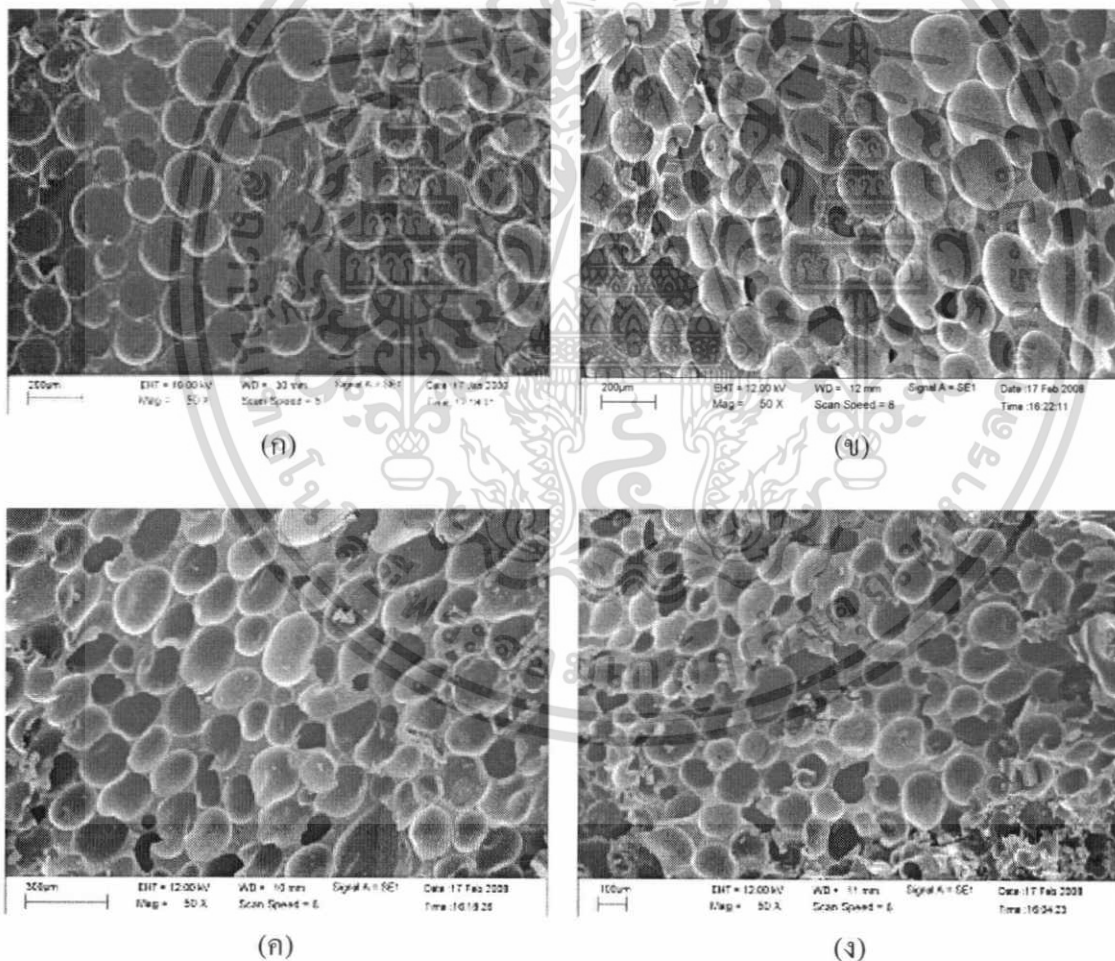
(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานที่อาจารย์ประพนธ์ วัฒนคุณอดิ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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 โฟมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุง

สมบัติด้วย EG ที่อัตราส่วนของเส้นใยเสริมแรง (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 10 phr (ง) 15 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติของคอมโพสิต

#### 4.3.1 ความหนาแน่นของคอมโพสิต

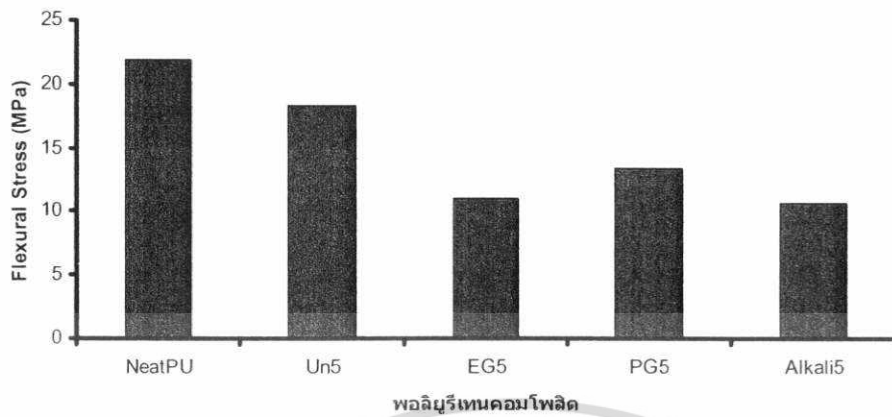
การวัดความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเพื่อศึกษาผลจากการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยและการเติมเส้นใยปอในคอมโพสิต เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของเส้นใยเสริมแรง 5 phr แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต แบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีความหนาแน่นเฉลี่ยในช่วง 0.5 ถึง 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร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

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นและจำนวนฟองก๊าซของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีต่างๆ ที่ปริมาณของเส้นใยเสริมแรง 5 phr

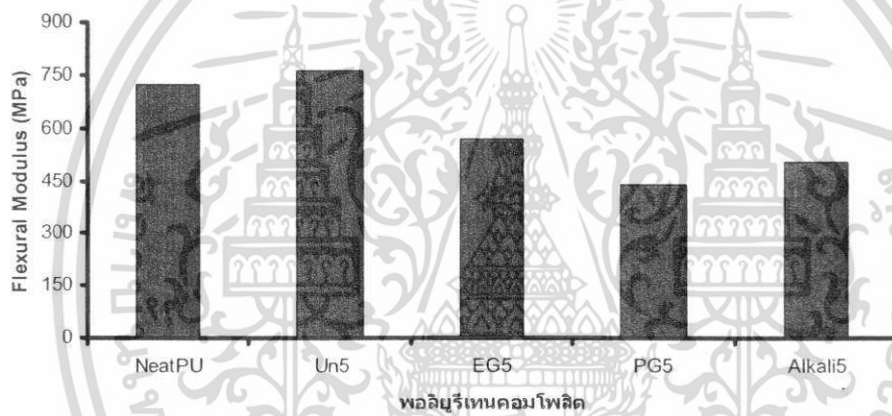
| เส้นใยเสริมแรง                             | ความหนาแน่น<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | จำนวนฟองก๊าซ<br>(cell/cm <sup>3</sup> ) × 10 <sup>5</sup> |
|--|-------------------------------------|---|
| พอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ไม่เสริมแรง (0 phr) | 0.532                               | 3.29  |
| เส้นใยปอไม่ปรับปรุงสมบัติ                  | 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 และการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเสริมแรงทำให้อิทธิพลของเส้นใยปอที่มีต่อสมบัติทางกลลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความหนาแน่นที่ลดลงของคอมโพสิต ซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นโค้งงอและโมดูลัสโค้งงอลดลง อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และไกลคอลอาจมีผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิตในลักษณะที่ต่างออกไปได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป



รูปที่ 4.9 ผลของการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอที่มีผลต่อความเค้นโค้งงอของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต



รูปที่ 4.10 ผลของการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอที่มีต่อค่ามอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต

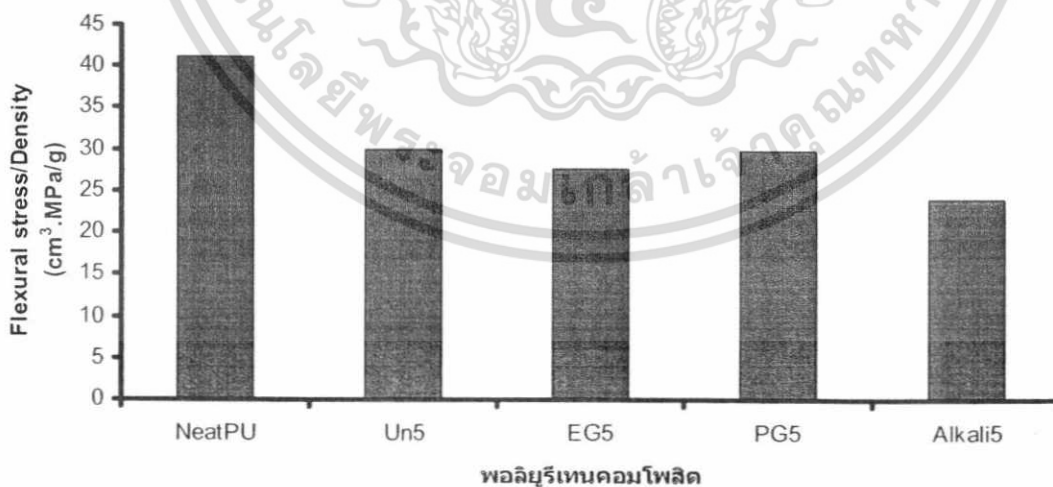
มาจากสมบัติทางกลที่ลดลงของเส้นใยที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูง จากการทดสอบสมบัติความเค้นดึงของเส้นเชือกปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและผ่านกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีน ไกลคอลของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยเอทิลีน ไกลคอล ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้พอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยไกลคอลมีสมบัติทางกลลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ส่วนความแข็งแรงทางกลที่ลดลงของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติของโซเดียมไฮดรอกไซด์อาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของเส้นใยปอถูกทำลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของส่วนเสริมแรงลดลง ส่งผลต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยดังกล่าวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความเค้นดึงของเส้นใยปอ

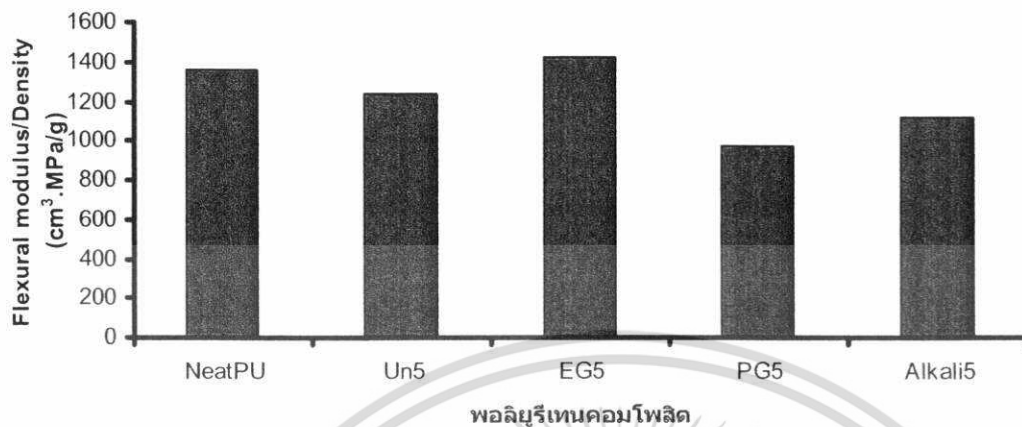
| เส้นใยปอ                                   | ความเค้นดึง (MPa) |
|--|-------------------|
| เส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ               | 48.80             |
| เส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล | 33.13             |

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 และคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีน ไกลคอลมีค่ามอดูลัสต่อความหนาแน่นต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาเพื่อศึกษาลักษณะการยึดเกาะระหว่างพอลิยูรีเทน โฟมกับเส้นใยเสริมแรงที่อินเตอร์เฟสในข้อ 4.2.2



รูปที่ 4.11 ผลของความเค้น โค้่งงต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

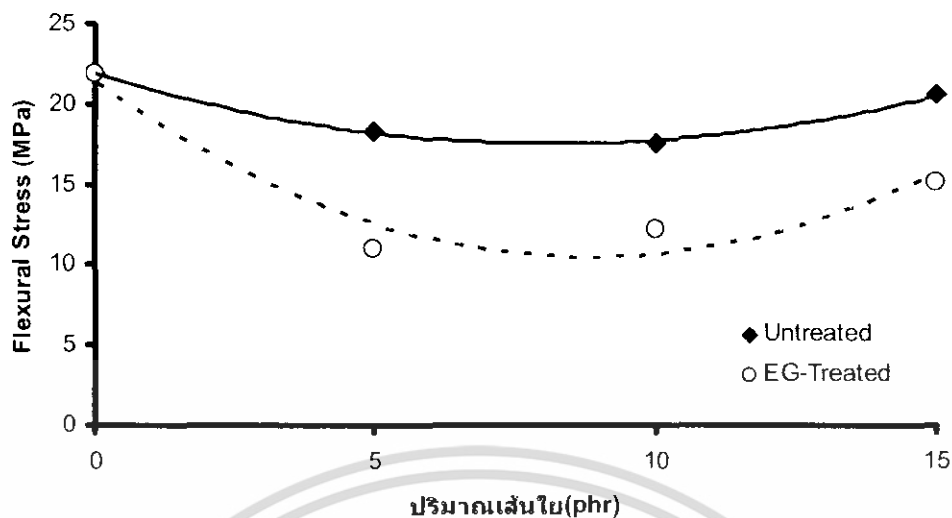


รูปที่ 4.12 ผลของมอดูลัสโค้งงอต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต

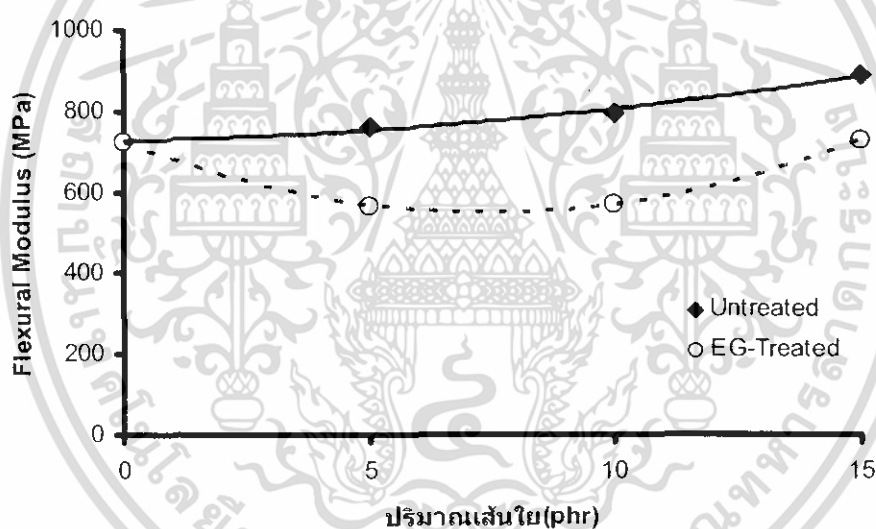
#### 4.3.3 ผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนคอมโพสิต

จากผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีต่างๆ พบว่าการปรับปรุงสมบัติเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอลมีสมบัติการยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนโฟมได้ดีที่สุด จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนคอมโพสิตคอมโพสิต 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



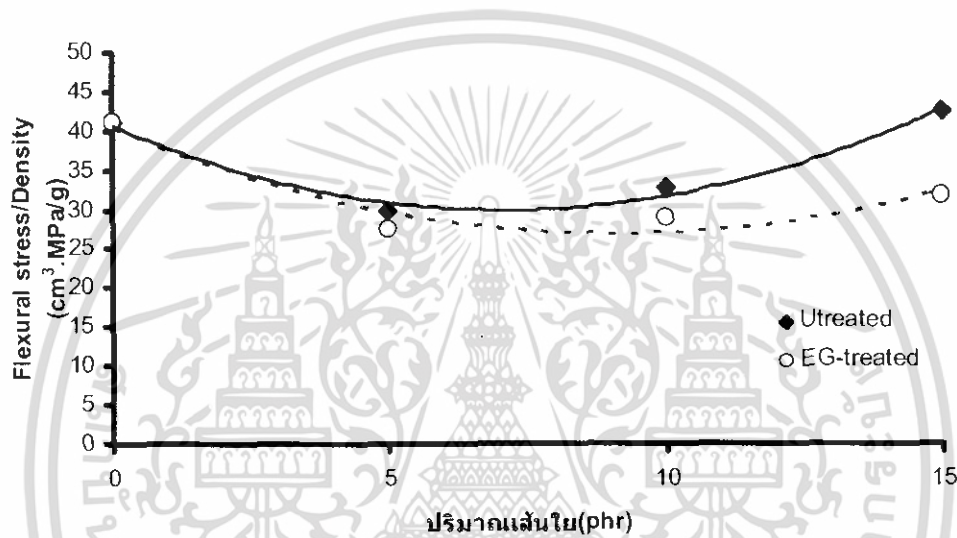
รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณเส้นใยเสริมแรงในพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่มีต่อความเค้นโค้งงอ



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณเส้นใยเสริมแรงในพอลิยูรีเทนคอมโพสิตที่มีต่อมอดูลัสโค้งงอ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกลที่น้ำหนักเท่ากัน (Strength to weight) เมื่อพิจารณาถึงค่าความเค้นโค้งงอต่อความหนาแน่น พบว่า จากผลของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยเอทิลีนไกลคอลที่ส่งผลต่อการลดลงของลพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต ทำให้ทั้งพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตที่เสริมการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการเสริมแรงที่น้อยกว่า 5 phr โดยมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าพอลิยูรีเทน โฟมที่ไม่เสริมแรงที่ปริมาณเส้นใยน้อย และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรง โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติจะเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

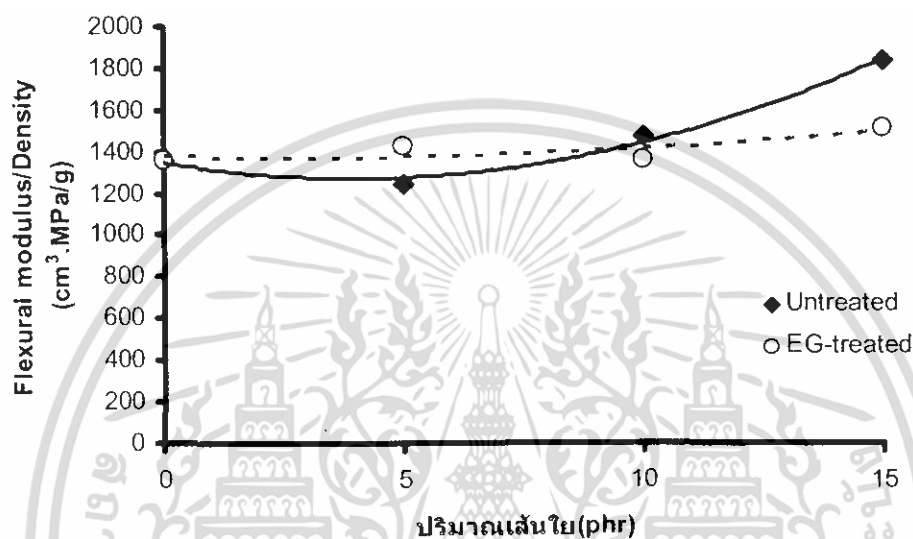


รูปที่ 4.15 ความเค้น ไ้้งงต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิต ที่ปริมาณการเสริมแรงเส้นใยในคอมโพสิตต่างๆ

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

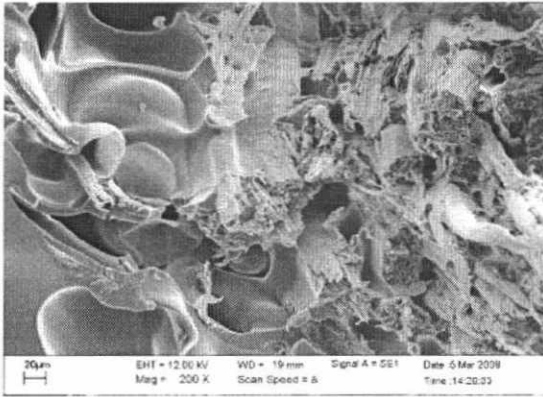
แข็งแรงของส่วนเสริมแรงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต ซึ่งหากสามารถพัฒนากรรมวิธีในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอด้วยเอทิลีนไกลคอลให้มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ที่ดีขึ้น โดยที่สมบัติทางกลของเส้นใยไม่ลดลงจากเดิม อาจเป็นแนวทางในการพัฒนากรรมวิธีการเตรียมพอลิยูรีเทนเสริมแรงเส้นใยปอที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้



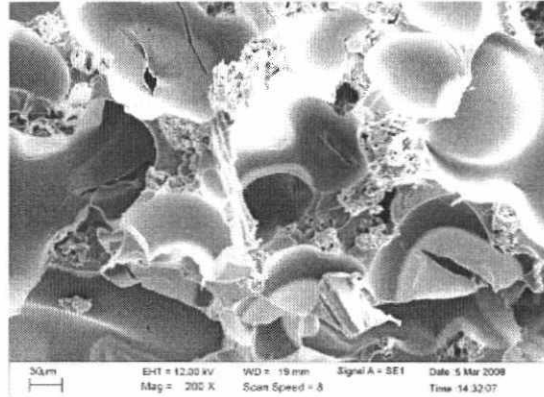
รูปที่ 4.16 มอดูลัสโค้งงอต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมคอมโพสิต ที่ปริมาณการเสริมแรงเส้นใยในคอมโพสิตต่างๆ

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

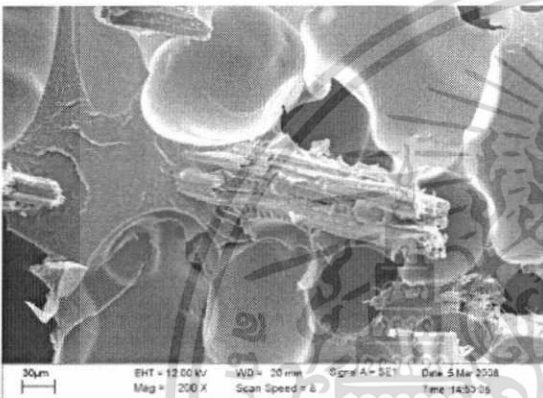
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



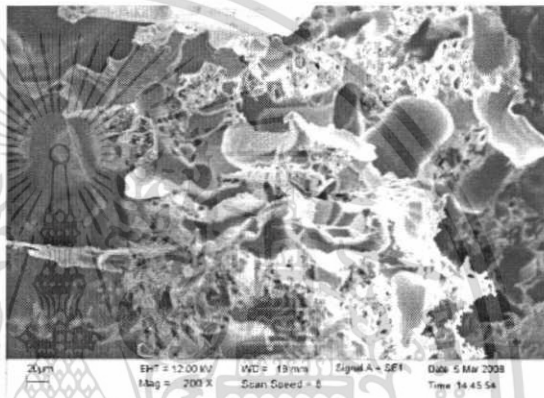
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

#### รูปที่ 4.17 การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาตกับเส้นใยโพลีโพรพิลีน

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

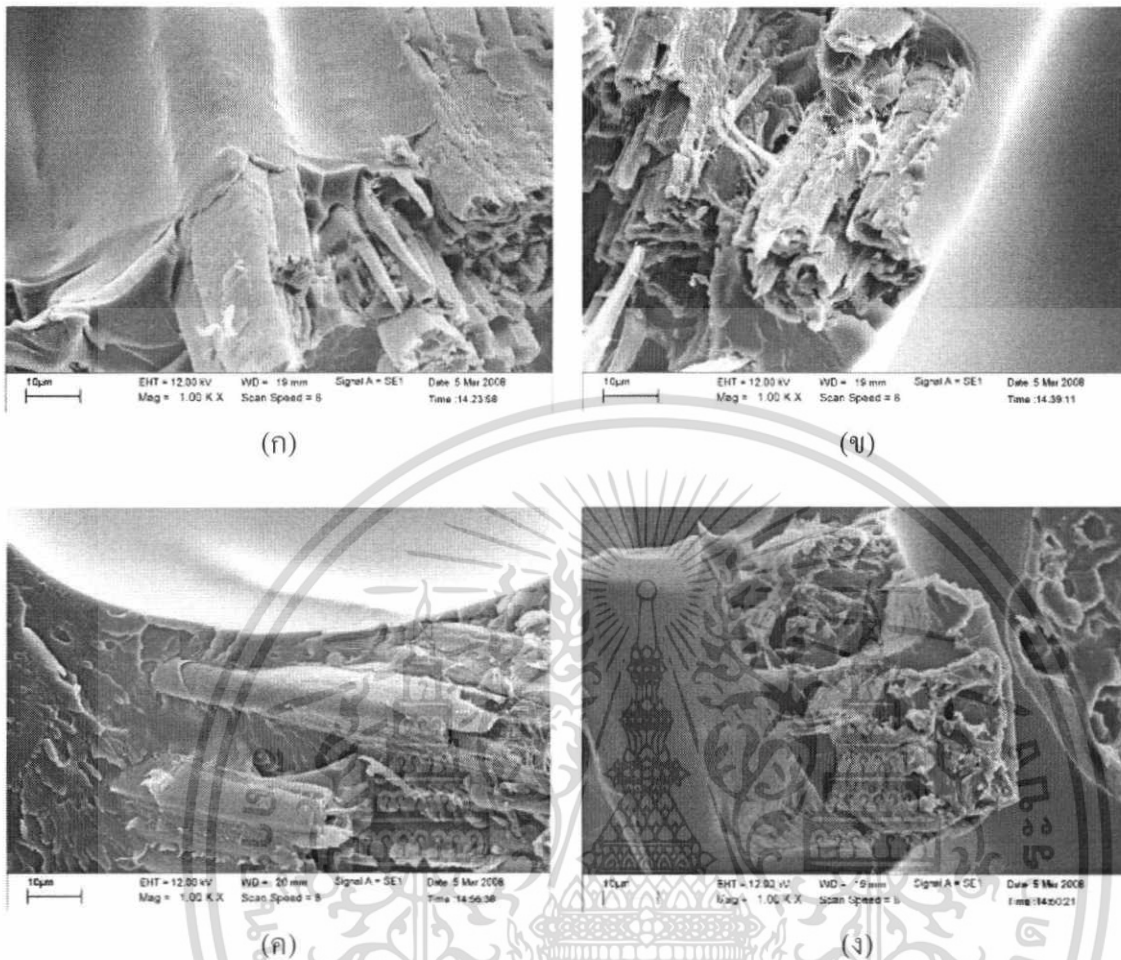
(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

เมื่อพิจารณาบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตและพอลิโพรพิลีน ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ดังรูปที่ 4.18 พบว่า พอลิเอทิลีนเทเรฟทาตเสริมแรงเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตที่ไม่ปรับปรุงสมบัติจะมีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตและพอลิโพรพิลีน ซึ่งจะส่งผลทำให้การยึดติดไม่ดี แต่ในส่วนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาตเสริมแรงเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตที่ปรับปรุงสมบัติทั้ง 3 แบบ ไม่มีช่องว่างบริเวณอินเตอร์เฟซ เพราะการปรับปรุงสมบัติเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาต ช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตและพอลิโพรพิลีน หากเปรียบเทียบการปรับปรุงสมบัติเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตทั้ง 3 แบบ พบว่าการปรับปรุงสมบัติเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตด้วยเอทิลีนไกลคอลจะช่วยให้การยึดติดดีที่สุด สังเกตบริเวณรอยต่อของเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตเคลือบอยู่ จึงส่งผลให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาตเสริมแรงเส้นใยโพลีเอทิลีนเทเรฟทาตด้วยเอทิลีนไกลคอลมีค่ามอดูลัสที่แข็งแรงมากที่สุด ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การสกัดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพอลิยูรีเทนเมทริกซ์กับเส้นใยปอ

(ก) ไม่ปรับปรุงสมบัติ

(ข) ปรับปรุงสมบัติด้วย NaOH

(ค) ปรับปรุงสมบัติด้วย PG

(ง) ปรับปรุงสมบัติด้วย EG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 โฟมเสริมแรงเส้นใย พบว่า การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยจะช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีที่สุด
2. การเสริมแรงที่ปริมาณเส้นใย 5 phr การปรับปรุงสมบัติเส้นใยด้วยไกลคอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อขนาดของเซลล์โฟม
3. การเพิ่มปริมาณเส้นใยในช่วง 0 ถึง 15 phr ทำให้ขนาดเซลล์โฟมมีขนาดลดลงเล็กน้อย
4. การเสริมแรงที่ปริมาณเส้นใย 5 phr คอมโพสิตที่เสริมแรงเส้นใยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าความเค้นโค้งงอต่อความหนาแน่นต่ำกว่าคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ เส้นใยปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอลและเส้นใยปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีนไกลคอล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีการทำลายโครงสร้างของเส้นใย
5. การเสริมแรงที่ปริมาณเส้นใย 5 phr คอมโพสิตที่เสริมแรงเส้นใยปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล มีค่ามอดูลัสโค้งงอต่อความหนาแน่นมากที่สุด เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยให้ยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีขึ้น โดยไม่ทำลายโครงสร้างของเส้นใย
6. เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเสริมแรงมากกว่า 10 phr ค่าความเค้นโค้งงอต่อความหนาแน่นและมอดูลัสโค้งงอต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยที่ไม่ปรับปรุงสมบัติมีค่ามากกว่า พอลิยูรีเทน โฟมคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติเส้นใยด้วยเอทิลีนไกลคอล ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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] อมรัตน์ 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] ณัฐฐิยา ปัญญาบุษ. "การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อย." *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. 2547.
- [19] อธิพิล แจ้งชัด. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คัดลอกมาโดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] ณรงค์ จิตรปัญญาพงศ์ ปิยวัฒน์ สุขศรีรุ่งเจริญ 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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

# การคำนวณหาปริมาณของสารตั้งต้นและส่วนเสริมแรง ที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ

การคำนวณหาปริมาณของสารตั้งต้นและเส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอ มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน โฟมเมทริกซ์ที่ไม่เสริมแรงเส้นใย ( $\rho_{pu}$ ) 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คำนวณหาปริมาณของเส้นใยเสริมแรง ( $m_{\text{Fiber}}$ ) 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 โฟมเสริมแรงเส้นใยไอ

| ปริมาณของ<br>ส่วนเสริมแรง<br>(พีเอชเอ) | น้ำหนักของพอลิออล<br>(กรัม) | น้ำหนักของไอโซไซยานต<br>(กรัม) | น้ำหนักของเส้นใยไอ<br>(กรัม) |
|--|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 0                                      | 168                         | 336                            | 0                            |
| 5                                      | 168                         | 336                            | 25.05                        |
| 10                                     | 168                         | 336                            | 50.10                        |
| 15                                     | 168                         | 336                            | 75.15                        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )  
 $\gamma_{lv}$  = แรงตึงผิวของของเหลว L ( $\text{mN}/\text{m}$ )  
 $\gamma_{sv}$  = พลังงานพื้นผิวอิสระของของแข็ง S ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )

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<br>( $\text{mN}/\text{m}$ ) | พลังงานการยึดเกาะ<br>( $\text{mJ}/\text{m}^2$ ) |
|-------------------------|---------------------------------------|---|
| เอทิลีนไกลคอล [22]      | 48.0                                  | 104.34  |
| 1,2-โพรพิลีนไกลคอล [23] | 43.5                                  | 99.33   |
| 1,3-โพรพิลีนไกลคอล [24] | 38.0                                  | 92.84   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค**  
**ปริมาณของไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอ**  
**จากการทดลองชุบเส้นใยปอด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอล**

ตารางที่ ค-1 น้ำหนักของเส้นใยปอที่ชุบด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

| การทดลองที่ | น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น<br>(กรัม) | น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง<br>(กรัม) | น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง<br>(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 สัดส่วนปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ชุบด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

| การทดลองที่   | ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่<br>(ร้อยละต่อน้ำหนักของเส้นใย) | ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่<br>(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  |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>509.87</b>   | <b>170.97</b>   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 น้ำหนักของเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

| การทดลองที่ | น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น<br>(กรัม) | น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง<br>(กรัม) | น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ 2 ชั่วโมง<br>(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 โพรพิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอที่ซบด้วยสารละลายโพรพิลีนไกลคอลบริสุทธิ์และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

| การทดลองที่ | ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่<br>(ร้อยละต่อน้ำหนักของเส้นใย) | ปริมาณของเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่<br>(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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

**ปริมาณของไกลคอลลที่เหลืออยู่บนเส้นใยปอ**  
**ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยไกลคอลล**

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

| การทดลองที่   | น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น<br>(กรัม) | น้ำหนักของตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติ<br>(กรัม) | ปริมาณของโพรพิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่<br>(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  |
| <b>เฉลี่ย</b> | -                                    | -  | <b>10.57</b>                                     |

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

| การทดลองที่   | น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น<br>(กรัม) | น้ำหนักของตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติ<br>(กรัม) | ปริมาณของโพรพิลีนไกลคอลลที่เหลืออยู่<br>(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   |
| <b>เฉลี่ย</b> | -                                    | -  | <b>5.89</b>                                      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

| การทดลองที่ | น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น<br>(กรัม) | น้ำหนักของตัวอย่างหลังปรับปรุงสมบัติ<br>(กรัม) | ปริมาณของโพรพิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่<br>(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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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      | <b>0.532</b>                           |

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      | <b>0.613</b>                           |

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      | <b>0.539</b>                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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                                  |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>0.485</b>                           |

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                                  |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>0.480</b>                           |

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                                  |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>0.452</b>                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควรไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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      | <b>0.449</b>                           |

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      | <b>0.419</b>                           |

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      | <b>0.398</b>                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

## การคำนวณจำนวนเซลล์และอัตราการขยายตัวของโฝม

จำนวนเซลล์ของโฝมคำนวณได้จากสมการที่ 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 | จำนวนเซลล์โฝมต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร                                |
|       | $n_b$     | คือ | จำนวนเซลล์โฝมในพื้นที่ $l \times l$                                   |
|       | $l$       | คือ | ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร                                |
|       | $\varphi$ | คือ | อัตราการขยายตัวของโฝม (Expansion ratio)                               |
|       | $\rho_p$  | คือ | ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฝมก่อนการขยายตัว (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) |
|       | $\rho_f$  | คือ | ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฝมหลังการขยายตัว (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) |

ตัวอย่างการคำนวณจำนวนเซลล์และอัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฝมของพอลิยูรีเทนโฝมคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ที่ 5 phr

- อัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฝม  
ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิยูรีเทนโฝม

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

$$\varphi = 1.94$$

- จำนวนเซลล์โฝมต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ

ตารางที่ ข-1 ความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนโฟมที่ไม่เสริมแรงเส้นใย

| การทดลองที่ | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) | มอดุลัสโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) |
|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 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 ความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทนโฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 5 phr

| การทดลองที่ | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) | มอดุลัสโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) |
|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1           | 18.50                           | 831.17                         |
| 2           | 16.04                           | 691.84                         |
| 3           | 20.42                           | 763.33                         |
| เฉลี่ย      | 18.32                           | 762.11                         |

ตารางที่ ข-3 ความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 10 phr

| การทดลองที่ | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) | มอดุลัสโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) |
|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1           | 18.19                           | 830.39                         |
| 2           | 15.05                           | 764.10                         |
| 3           | 17.08                           | 758.60                         |
| เฉลี่ย      | 16.77                           | 784.36                         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ 15 phr

| การทดลองที่   | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกะปาสกาล) | มอดูลัสโค้งงอ<br>(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                        |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>20.63</b>                   | <b>888.87</b>                 |

ตารางที่ ข-5 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 5 phr

| การทดลองที่   | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกะปาสกาล) | มอดูลัสโค้งงอ<br>(เมกะปาสกาล) |
|---------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1             | 12.42                          | 630.78                        |
| 2             | 14.54                          | 599.90                        |
| 3             | 10.01                          | 568.48                        |
|               | 11.46                          | 633.23                        |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>12.11</b>                   | <b>608.10</b>                 |

ตารางที่ ข-6 ความเค้นโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 10 phr

| การทดลองที่   | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกะปาสกาล) | มอดูลัสโค้งงอ<br>(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                        |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>12.16</b>                   | <b>570.15</b>                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 ความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล 15 phr

| การทดลองที่   | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) | มอดุลัสโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) |
|---------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1             | 15.39                           | 686.77                         |
| 2             | 17.41                           | 724.04                         |
| 3             | 14.50                           | 741.76                         |
| 5             | 13.65                           | 754.79                         |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>15.25</b>                    | <b>726.84</b>                  |

ตารางที่ ข-8 ความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโพรพิลีน ไกลคอล 5 phr

| การทดลองที่   | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) | มอดุลัสโค้งงอ<br>(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                         |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>13.45</b>                    | <b>439.45</b>                  |

ตารางที่ ข-9 ความเค้นโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของพอลิยูรีเทน โฟมเสริมแรงเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 phr

| การทดลองที่   | ความเค้นโค้งงอ<br>(เมกกะปาสกาล) | มอดุลัสโค้งงอ<br>(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                         |
| <b>เฉลี่ย</b> | <b>9.19</b>                     | <b>449.43</b>                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
ความแข็งแรงดึงของเส้นใย

ตารางที่ ข-1 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ

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

ตารางที่ ข-2 ความแข็งแรงดึงของเส้นใยปอที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลีนไกลคอล

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้