

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้ประโยชน์จากเศษใยแก้วสำหรับฉนวนความร้อน  
ชนิดวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง

UTILIZATION OF GLASS FIBER SCRAP FOR HEAT INSULATIVE  
RUBBER FOAM



ฉัตรดาววรรณ ดุชนีย์  
LUDDAWAN DUCHANEEE

ฉพ.  
ล 245ก  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 65470  
วัน,เดือน,ปี..... 11 ต.ค. 2549

b. 116๕๑๐๗๐  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2765-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**UTILIZATION OF GLASS FIBER SCRAP FOR HEAT INSULATIVE  
RUBBER FOAM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

**ISBN 974-15-2765-9**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ประโยชน์จากเศษใยแก้วสำหรับฉนวนความร้อนชนิดวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง
นักศึกษา	นางสาวลัดดาวรรณม์ คัชณิย์
รหัสประจำตัว	46069005
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนใยแก้ว สำหรับการผลิตฉนวนกันความร้อนชนิดวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง โดยนำเศษฉนวนใยแก้วที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตจากโรงงาน นำมาบดย่อยขนาด ก่อนที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตฉนวนกันความร้อนชนิดวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง โดยในงานวิจัยนี้จัดเตรียมเส้นใยแก้วจากเศษฉนวนใยแก้วให้ได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่เป็นเส้นสั้นขนาดประมาณ 820 ไมโครเมตร และชนิดผงดขนาดประมาณ 64 ไมโครเมตร ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางเตรียมได้โดย การผสมสูตรยางธรรมชาติกับสารเติมแต่ง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารให้ฟอง ในช่วง 0 ถึง 30 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยแก้ว ตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr ตามลำดับ โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 35-45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปอัดขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (hot compression molding machine) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30 phr ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง อยู่ในช่วง 0.37 ถึง 1.50 g/cm<sup>3</sup> และร้อยละอัตราการขยายตัวของโฟมอยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง 280 ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง มีค่าอยู่ในช่วง 0.07 ถึง 0.16 W/m.K จากการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าที่ปริมาณสารให้ฟอง 20 phr เกิดเซลล์ที่มีขนาดประมาณ 450 ไมโครเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นเซลล์ปิด ประมาณ 4 x 10<sup>6</sup> เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งแสดงลักษณะของการเกิด โฟมที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนปริมาตรสารให้ฟองอื่นๆ ค่าการนำความร้อนที่วัดได้ประมาณ 0.07 W/m.K ซึ่งใกล้เคียงกับวัสดุฉนวนกันความร้อนที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์โดยทั่วไป

เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณในการกำจัดเศษฉนวนใยแก้วให้มากขึ้น ทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr แล้วทำการวัดคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้ว ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบโฟมยาง มีค่าอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.80 g/cm<sup>3</sup> และร้อยละอัตราการขยายตัวของโฟมอยู่ในช่วงประมาณ 150 ถึง 300 โดยร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผงมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น ส่วนค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงแต่ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการดูดซับน้ำและค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราการลามไฟมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้ว จากผลการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์พบว่า การประมาณค่าการนำความร้อน โดยการใช้สมการความสัมพันธ์แบบขนานจะสามารถอธิบายพฤติกรรมกการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผงได้ดี

จากการศึกษาวิจัยพบว่า สามารถใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนใยแก้วในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อนอีกประเภทหนึ่งได้ และเป็นการช่วยกำจัดขยะที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตฉนวนใยแก้ว เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมไปพร้อม ๆ กับการเพิ่มมูลค่าให้ขยะอุตสาหกรรมอีกทางหนึ่ง



<b>Thesis Title</b>	Utilization of glass fiber scrap for heat insulative rubber foam
<b>Student</b>	Miss. Luddawan Duchanee
<b>Student ID</b>	46069005
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Surat Areerat

### ABSTRACT

This research studied the use of fiber glass scrap for the rubber foam composite insulator production. The waste off-spec fiber glass was crushed before using as raw materials for rubber foam composite insulator production. Fiber glass was prepared from fiber glass scrap in two types as short fiber glass type with size of 820  $\mu\text{m}$  and powder type approximately size of 64  $\mu\text{m}$ . Rubber foam composite was prepared by mixing natural rubber with additives in varying of blowing agent of 0 to 30 phr and varying of fiber glass of 0 to 100 phr respectively. The two roll mill was operated at temperature around 35-45  $^{\circ}\text{C}$  for 30 min per batch. Then, the rubber composite foam was set using hot compression molding at constant temperature 150 $^{\circ}\text{C}$  for 10 min. The result showed that when the blowing agent increases rubber foam composite density were 0.37 to 1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$  and percent of the expansion was around 0 to 280, thermal conductivity value were 0.07 to 0.16  $\text{W}/\text{m.K}$ . The morphology of rubber foam composite was observed by SEM. The result showed that in the blowing agent of 20 phr produced close cell with size of 450  $\mu\text{m}$  approximately  $4 \times 10^6 \text{ cell}/\text{cm}^3$ . The result included that was the best foaming with respect to other quantities of blowing agent. The thermal conductivity approximately was 0.07  $\text{W}/\text{mK}$  that was close to the insulator in commercial grade.

The mechanical properties and thermal properties of rubber composite with varying fiber glass of 0 to 100 phr were investigated. When the quantity of fiber glass increasing, the density were change from 0.4 to 0.8  $\text{g}/\text{cm}^3$  and percent of the expansion was around 150 to 300, the expansion of powder fiber glass rubber foam composite was higher than the short fiber glass rubber foam composite. The tensile strength tended to decrease but hardness tended to increase while quantity fiber glass increase. Unless, the result shows that the water absorption and thermal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

conductivity tended to increase, but flaming rate tends to decrease while quantity fiber glass increases. The experimental results of thermal conductivity and mathematical result were compared. The comparison result indicates that estimation of thermal conductivity using parallel relationship equation can be well explain the behavior of thermal conductivity of powder fiber glass rubber foam composite.

The research showed that can use fiber glass scraps in one kind of insulation product. Se to eliminate the waste from fiber glass insulation industries, and reduced the environmental problem and increasing value of waste industrial



# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และความช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณ คุณ พิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและการอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์

ขอบคุณ คุณ พิมพ์ใจ ภูษนะกิจ เจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการขอใช้เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรมและพอลิเมอร์เทคโนโลยี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ

ขอบคุณ บริษัท ไมโครไฟเบอร์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เสนอฉนวนใยแก้วกันความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยเงินสนับสนุนบางส่วนจาก งบประมาณ 2546-2547 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวอันเป็นที่รัก ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องตลอดมา

กัตติวารรณม์ คัชเนย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
ศัพท์เทคนิค.....	XIII
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การถ่ายเทความร้อน.....	4
2.1.1 การนำความร้อน.....	4
2.1.2 การพาความร้อน.....	6
2.1.3 การแผ่รังสี.....	7
2.2 ฉนวนกันความร้อน.....	8
2.2.1 ประเภทฉนวนกันความร้อน.....	8
2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์.....	12
2.5.1 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบ.....	13
2.5.2 คุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์.....	13
2.5.3 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 โฟมพอลิเมอร์.....	14
2.4.1 กระบวนการการเกิดโฟม.....	16
2.4.2 โครงสร้างเซลล์ลูลาร์.....	19
2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของ โฟมพอลิเมอร์.....	20
2.4.4 สมบัติการนำความร้อนของ โฟมพอลิเมอร์.....	22
2.5 วัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	24
2.5.1 ยางธรรมชาติ.....	25
2.5.2 สารให้ฟอง.....	26
2.5.3 สารวัลคาไนซ์.....	29
2.5.4 สารเร่งวัลคาไนซ์.....	30
2.5.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยา.....	31
2.5.6 สารหน่วงการลुकติดไฟ.....	31
2.5.7 สารเสริมแรง.....	31
2.5.8 สารกระตุ้นปฏิกิริยา.....	31
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	37
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	37
3.3 วิธีการทดลอง.....	38
3.3.1 การเตรียมเส้นใยแก้ว.....	38
3.3.2 การเตรียมยางคอมปาวด์.....	39
3.3.3 การขึ้นรูปโฟมยาง.....	41
3.4 การทดสอบสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง.....	43
3.4.1 การวิเคราะห์การกระจายขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเส้นใยแก้ว.....	43
3.4.2 การวัดค่าความหนาของเส้นใยแก้ว.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว.....	43
3.5.1 การวิเคราะห์อัตราการขยายตัวของโฟม.....	43
3.5.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟม.....	44
3.5.3 การวิเคราะห์หาขนาดและจำนวนเซลล์.....	45
3.5.4 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง.....	46
3.5.5 การทดสอบสมบัติความแข็ง.....	47
3.5.6 การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ.....	48
3.5.7 การทดสอบสมบัติการลามไฟ.....	49
3.5.8 การทดสอบการนำความร้อนไฟ.....	50
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>51</b>
4.1 ผลการศึกษาสมบัติเส้นใยแก้ว.....	51
4.2 ผลการศึกษาปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โมยาง.....	54
4.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	55
4.2.2 สมบัติความหนาแน่นและอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	57
4.2.3 สมบัติการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	58
4.3 ผลการศึกษาขนาดและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	60
4.3.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์ในวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	60
4.3.2 ขนาดและความหนาแน่นเซลล์ในวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	62
4.3.3 ผลการศึกษาความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	64
4.3.4 ผลการศึกษาสัดส่วน โดยปริมาตรของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	66
4.3.5 ผลการศึกษาความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	68
4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	70
4.3.7 ผลการศึกษาการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	71
4.3.8 ผลการศึกษาอัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	72
4.3.9 ผลการศึกษาการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางกับฉนวน โฟม แบบยืดหยุ่น.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก สมบัติของเส้นใยแก้ว.....	80
ภาคผนวก ข สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr.....	85
ภาคผนวก ค สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไป ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของฉนวน	9
2.2 สารให้ฟองที่ใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุเชิงโฟม	28
2.3 ส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติของใยแก้ว	33
3.1 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ที่ปริมาณสารให้ฟอง ตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr	39
3.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ที่ปริมาณใยแก้วตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr	40
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง	54
4.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางที่ปริมาณสารให้ฟอง ตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr	55
4.3 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว ตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr	60
4.4 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางกับฉนวน โฟมยางแบบยืดหยุ่น	75
ก.1.1 การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น	81
ก.1.2 การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแก้วชนิดผง	81
ก.2 ความหนาแน่นของอนุภาคแบบกลุ่ม (bulk density) ของเส้นใยแก้ว	82
ก.3 ความหนาแน่นของของวัสดุแก้ว (glass density)	82
ข.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและจำนวนเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr	85
ข.2 ความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง	86
ข.3 ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr	86
ค.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและจำนวนเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว	87
ค.2 ความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น	88
ค.3 ความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผง	89
ค.4 สัดส่วน โดยปริมาตรของยาง ใยแก้วและแก๊สในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง	89
ค.5 ความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง	90
ค.6 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง	90
ค.7 ร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง	91
ค.8 อัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง	91
ค.9 ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อนของสารต่างๆ กับอุณหภูมิ.....	6
2.2 สัณฐานวิทยาโครงสร้างเซลล์ .....	15
2.3 แผนภาพขั้นตอนต่างในกระบวนการการเกิดโฟม .....	19
2.4 การขยายตัวของ dodecahedral cell ในทิศทางตั้งฉากและขนานกับทิศทางการเกิดโฟม .....	21
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับการจัดเรียงตัวของเซลล์ ในโครงสร้างโฟมโพลียูรีเทน .....	23
2.6 ค่าการนำความร้อนของแก๊สชนิดต่างๆ .....	24
2.7 สูตรโครงสร้างทางธรรมชาติ.....	25
2.8 ผลของคิกเกอร์ต่ออุณหภูมิสลายตัวของสารประกอบ อะโซไดคาร์โบนาไมด์.....	29
2.10 กลไกปฏิกิริยาการเชื่อมโยงอย่างด้วยกำมะถัน .....	30
3.1 แผนภาพขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผสมวัสดุเชิงประกอบยาง.....	41
3.2 อุปกรณ์ขึ้นรูปโฟมยาง.....	42
3.3 เครื่องทดสอบสัณฐานวิทยา .....	45
3.4 ชิ้นงานที่ทดสอบรูปคัมเบลล์.....	46
3.5 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง.....	47
3.6 แผนภาพแสดงหัวเจาะทดสอบความแข็ง.....	48
3.7 แผนภาพแสดงการทดสอบการลามไฟ.....	49
3.8 เครื่องวัดค่าการนำความร้อน รุ่น fox 304.....	50
4.1 รูปร่างและขนาดของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง.....	51
4.2 การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแก้ว .....	52
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยแก้ว .....	53
4.4 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ที่ปริมาณสารให้ฟอง ในช่วง 5 ถึง 20 phr ขนาดกำลังขยาย 20 เท่า.....	55
4.5 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาณสารให้ฟอง ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr .....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ของจำนวนเซลล์กับปริมาณสารให้ฟอง ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว ชนิดเส้นสั้น 10 phr .....	57
4.7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับปริมาณสารให้ฟองที่เส้นใยแก้ว ชนิดเส้นสั้น 10 phr.....	58
4.8 ความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับปริมาณสารให้ฟองที่ปริมาณเส้นใยแก้ว ชนิดเส้นสั้น 10 phr .....	59
4.9 สัมฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น ที่ปริมาณ เส้นใยแก้ว 30, 50, 70 และ 100 ที่กำลังขยาย 40 เท่า .....	61
4.10 สัมฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผ่ง ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 30, 50, 70 และ 100 ที่กำลังขยาย 40 เท่า .....	61
4.11 ผลของเส้นใยแก้วต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ ที่สารให้ฟอง 20 phr .....	62
4.12 ผลของเส้นใยแก้วต่อความหนาแน่นเซลล์ ที่สารให้ฟอง 20 phr.....	63
4.13 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับปริมาณเส้นใยแก้วที่สารให้ฟอง 20 phr .....	64
4.14 อัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น และชนิดผ่งที่ปริมาณสารให้ฟอง 20 phr.....	65
4.15 สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส ยางธรรมชาติและเส้นใยแก้ว ของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น.....	67
4.16 สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส ยางธรรมชาติและเส้นใยแก้ว ของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผ่ง.....	67
4.17 ผลของเส้นใยแก้วต่อความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	68
4.18 สัมฐานวิทยาการยึดเกาะของยางธรรมชาติกับเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว ชนิดผ่ง 70 phr กำลังขยาย 500 เท่า .....	69
4.19 ผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	70
4.20 ผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง.....	71
4.21 ความสัมพันธ์ของอัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางกับปริมาณเส้นใยแก้ว.....	72
4.22 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางที่ได้จากการทดลอง กับการคำนวณจากสมการเชิงคณิตศาสตร์.....	74
ก.1 การสลายตัวทางความร้อนของใยแก้ว.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ศัพท์เทคนิค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	scanning electron microscope (SEM)
การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	particle size distribution
การจัดเรียงตัว	orientation
การหดตัวลดลง	shrinkage
การขยายตัวของแก๊ส	gas expansion
กระบวนการการเกิด โฟม	foam formation
กระบวนการทอดให้ยางสุก	vulcanization
การเกิดฟอง	bubble formation of initiation
การเพิ่มขนาดฟอง	bubble growth
การยืดตัว	strain induced crystallization
การยุบตัว	collapses
การเชื่อม โยง	crosslinking
การแตก	rupture
การซึมผ่าน	permeability
การนำความร้อน	heat conduction
การพาความร้อน	heat convection
การถ่ายเทความร้อน	heat transfer
การพาโดยบังคับ	force convection
การพาโดยธรรมชาติ	free convection
กำลังงานการแผ่รังสี	emissive power
การแผ่รังสีความร้อน	emissivity
กระบวนการปั่นเหวี่ยง	centrifuge
การสลายตัวด้วยความร้อน	thermal decomposition
การแตกของผนังเซลล์	breaking the wall separating cells
กึ่งยืดหยุ่น	semiflexible
กึ่งแข็ง	semirigid
ขนาดของอนุภาค	particle size
แข็ง	rigid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ความทนแรงอัด	compressive strength
ความทนแรงอัด โค้ง	flexural strength
ความหนาแน่น	density
ความหนาแน่นกลุ่ม	bulk density
ความแข็ง	hardness
ความเสถียรของฟอง	bubble stability
ความทนทานต่อการฉีกขาด	tear resistance
ความยืดหยุ่น	elasticity
ความทนทานต่อการขัดสี	abrasion resistance
ค่าการนำความร้อน	thermal conductivity
เซลล์	cell
เซลล์เปิด	open-cell
เซลล์ปิด	closed-cell
ตัวเติม	fillers
เชิงซ้อน	complexes
ปริมาณผลึก	degree of crystallinity
ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง	liquid-solid interphase
ผลึก	crystallize
พันธะคู่	double bond
พื้นที่ผิวหน้าจำเพาะ	specific surface area
ฟองน้ำ	sponge
น้ำยางข้น	concentrated latex
เนื้อเดียวกัน	homogeneous
ทางเคมีกายภาพ	physicochemical
ย้อนกลับไม่ได้	irreversible
ยางสุกหรือยางคงรูป	vulcanzate
ยืดหยุ่น	flexible
ใยสั้น	discontinuousหรือchopped short fibers
รังผึ้ง	honeycomb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ระดับการเชื่อมขวาง	degree of crosslinking
รูปหลายเหลี่ยม	polygons
แรงตึงผิว	surface tension
วงรี	ellipse
วัสดุประกอบพอลิเมอร์แบบก้อน	particulate composites
วัสดุประกอบพอลิเมอร์	polymer composites
สมบัติความร้อนเชิงกายภาพ	thermophysical
ส่วนเสริมแรง	reinforcement
สารเร่งปฐมภูมิ	primary accelerators
สารเร่งทุติยภูมิ	secondary accelerators
สารหน่วงไฟ	fire retards
สารให้ฟอง	blowing agents
สารให้ฟองเชิงกายภาพ	physical blowing agents
สารให้ฟองเคมี	chemical blowing agents
สารต้านการเกิดโฟม	antifoaming agents
สารเชื่อม โยง	vulcanization agents
สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อม โยง	accelerator
สารกระตุ้น	activator
เส้นใยเดี่ยวยาว	continuous fibers
สมบัติเชิงพลวัต	dynamic properties
เหนียวติดกัน	tack
อสัณฐาน	amorphous
องค์ประกอบทางเคมี	chemical composition
อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยง	rate of vulcanization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$Q_x$	อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในทิศทางของ X
$k$	ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของสาร
$A$	พื้นที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน
$\frac{dT}{dx}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระยะทาง
$h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) ( $W/m^2K$ )
$T_h$	อุณหภูมิที่ร้อนกว่า
$T_c$	อุณหภูมิที่เย็นกว่า
$E$	กำลังงานการแผ่รังสี (emissive power) ของวัตถุดำ
$\sigma$	ค่าคงที่ของสตีเฟนและ โบลซ์แมนแมน คือ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$T$	อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุดำ (K)
$E_b$	กำลังงานการแผ่รังสี (emissive power) ของวัตถุ
$\epsilon$	สภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (emissivity)
$\rho$	ความหนาแน่น
$\Gamma_b$	ค่าการนำความร้อน (k) หรือความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของวัสดุเชิงประกอบ
$\Gamma_1$	ค่าการนำความร้อน (k) หรือความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของเมตริกซ์
$\Gamma_2$	ค่าการนำความร้อน (k) หรือความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของส่วนเสริมแรง
$\phi_1$	สัดส่วนโดยปริมาตรของเมตริก
$\phi_2$	สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนเสริมแรง
$\gamma$	แรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์
$\Delta P_{1,2}$	ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง
$d''$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ในแนวขนาน
$d^\perp$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ในแนวตั้งฉาก
$n$	จำนวนเซลล์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรของโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$n_b$	จำนวนเซลล์ในพื้นที่
$\ell$	ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร
$\varphi$	อัตราการขยายตัว ( <i>expansion ratio</i> )
$k_c$	ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ ( <i>W/mK</i> )
$k_n$	ค่าการนำความร้อนของแก๊ส ( <i>W/mK</i> )
$k_r$	ค่าการนำความร้อนของยางธรรมชาติ ( <i>W/mK</i> )
$k_f$	ค่าการนำความร้อนของเส้นใยแก้ว ( <i>W/mK</i> )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการติดตั้งฉนวนกันความร้อนกำลังเป็นที่นิยมมากในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน เพราะประเทศไทยเป็นประเทศที่มีลักษณะภูมิอากาศค่อนข้างร้อนถึงร้อนมาตลอดทั้งปี การใช้เครื่องปรับอากาศจึงเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตของคนไทย เพื่อให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างเต็มประสิทธิภาพจึงต้องมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนในอาคารนั้น ๆ แนวโน้มของการใช้ฉนวนจะเพิ่มขึ้นทุกปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งฉนวนใยแก้วกันความร้อน พิจารณาจากปริมาณการขายฉนวนกันความร้อนภายในประเทศ ประเภทฉนวนใยแก้ว เมื่อปี พ.ศ. 2538 จนถึงปี พ.ศ. 2540 พบว่ามีปริมาณการขายเพิ่มขึ้นจาก 5,600 เป็น 7,800 ตันต่อปี ทำให้ปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามไปด้วย และการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นนั้นมักจะทำในรูปของการกองทิ้งหรือการฝังกลบ ทำให้เกิดการสูญเสียของพื้นที่ใช้สอย เนื่องจากเศษฉนวนใยแก้วเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ยาก

จากการตรวจประเมินของคณะผู้ทำการวิจัยในโรงงานผลิตฉนวนใยแก้วกันความร้อนรายใหญ่ของประเทศไทย ที่มีกำลังการผลิตประมาณ 400 ตันต่อเดือน เบื้องต้นพบว่า ในกระบวนการผลิตของทางโรงงานจะเกิดของเสียที่เป็นฉนวนใยแก้วที่ไม่ได้มาตรฐานเป็นจำนวนมากในแต่ละเดือน โดยประมาณ 7 ตันต่อเดือน ซึ่งปัจจุบันทางโรงงานยังไม่มีวิธีการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากฉนวนใยแก้วที่ผลิตขึ้นนอกจากจะมีใยแก้วเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังประกอบด้วยสารเคมีอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานเส้นใยแก้วให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนได้ ดังนั้นการนำฉนวนใยแก้วที่ไม่ได้มาตรฐานกลับมาใช้ใหม่ จะต้องหาวิธีการกำจัดตัวประสานออกมาให้หมดก่อนจะนำใยแก้วกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้ง ซึ่งขั้นตอนนี้จะก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและต้องใช้งบลงทุนสูง เนื่องจากสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานเส้นใยแก้ว มีองค์ประกอบหลัก คือ ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีฟอร์มาลีน (formalin) และฟีนอล (phenol) เป็นสารตั้งต้นในการผลิต ซึ่งสารประกอบเหล่านี้เป็นสารเคมีอันตราย นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย อาทิเช่น สารกลุ่มแอม โมเนียและสารประเภทซิลเลน (silane) ซึ่งล้วนแต่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และการกำจัดสารพิษเหล่านี้ในกระบวนการนำเส้นใยแก้วกลับมาใช้ใหม่ต้องใช้งบลงทุนสูงมาก ดังนั้นแนวทางการกำจัดเศษขยะฉนวนใยแก้วที่เกิดขึ้นของทางโรงงาน คือ การนำของเสียที่เกิดขึ้นมาเก็บรวมกันและทำการกำจัดโดยวิธีฝังกลบ (land fill method) ซึ่งแม้ว่าการกำจัดของเสียโดยวิธีฝังกลบจะช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันมลพิษทางอากาศได้ แต่เนื่องจากปริมาณของเสียที่มีเป็นจำนวนมากในแต่ละเดือน ทำให้สถานที่ในการใช้ฝังกลบไม่เพียงพอ ดังนั้นแนวทางการใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนใยแก้ว ด้วยการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ จึงเป็นการกำจัดขยะ เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมไปพร้อม ๆ กับการเพิ่มมูลค่าให้กับขยะอุตสาหกรรมอีกทางหนึ่ง

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยต้องการนำเสนอการใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนใยแก้วด้วยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อนประเภทวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ซึ่งมีเศษฉนวนใยแก้วเป็นองค์ประกอบเพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงเชิงกลและทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนภายในเนื้อโฟม

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อนประเภทวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเศษฉนวนใยแก้ว ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานผลิตฉนวนใยแก้วกันความร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตฉนวนกันความร้อนแบบวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง เช่น คุณลักษณะของเส้นใยแก้ว อัตราส่วนการผสม

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของฉนวนกันความร้อนชนิดวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้ว

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ฉนวนพอลิเมอร์โฟมยังมีความหนาแน่นต่ำเท่าใดสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โฟมก็จะลดลงตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้จึงเสนอการใช้เศษฉนวนใยแก้วเป็นเส้นใยเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โฟมให้ดียิ่งขึ้น และด้วยสมบัติของใยแก้วที่ไม่ติดไฟ พอลิเมอร์โฟมที่ได้จะลุกติดหรือลามไฟได้ยากขึ้นและนอกจากนี้เส้นใยแก้วเสริมแรงที่เติมเข้าไปในเนื้อโฟมยังช่วยทำให้ทิศทางการนำความร้อนในเนื้อของแข็งเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างและลักษณะของเส้นใย ส่งผลต่อสมบัติการนำความร้อนของฉนวนพอลิเมอร์โฟม

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแก้วทั้งชนิดเส้นสั้นและชนิดผงที่ได้จากเศษฉนวนใยแก้วกันความร้อน

1.4.2 หาอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารให้ฟอง ตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr โดยพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์ ความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง

1.4.3 ศึกษาผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยแก้วทั้งชนิดเส้นสั้นและชนิดผก ที่อัตราส่วนผสม 0, 30, 50, 70 และ 100 phr

1.4.4 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ทำการวิจัยกับผลิตภัณฑ์จนวนกันความร้อนที่มีขายอยู่ในท้องตลาด

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เป็นการเพิ่มมูลค่าและกำจัดของเสียประเภทจนวนใยแก้วซึ่งเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อม

1.5.2 พัฒนาผลิตภัณฑ์จนวนกันความร้อนแบบใหม่ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการประหยัดพลังงาน

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย หลักการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) จนวนกันความร้อน (insulator) ที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์ นิยามของวัสดุเชิงประกอบ พื้นฐานของโฟมพลาสติก ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการเกิดโฟม (foam formation) โครงสร้างเซลล์ (cellular structure) ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติก (structure properties relationship) วัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง (rubber composite foam) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการเตรียมเศษจนวนใยแก้วเส้นสั้นและชนิดผก วิธีการผลิตและวิธีการทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลของปริมาณสารให้ฟองต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์ ความหนาแน่น ร้อยละ อัตราการขยายตัวและการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง รวมไปถึงผลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย หลักการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ฉนวนกันความร้อน (insulator) ที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer composite) พื้นฐานของโฟมพลาสติก ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการเกิดโฟม (foam formation) โครงสร้างเซลล์ (cellular structure) ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติก (structure properties relationship) วัสดุเชิงประกอบโฟมยาง (rubber composite foam) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature reviews)

### 2.1 การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) [1-2]

การถ่ายเทความร้อน คือ การเคลื่อนที่ของพลังงานจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ วิธีการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลัก ๆ [1] คือ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) การนำความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัสดุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัสดุที่สัมผัสกัน ส่วนการพาความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทพลังงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของมวลสารของของไหลหรือแก๊สที่มีพลังงานบรรจุอยู่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง สำหรับการแผ่รังสีความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยสเปกตรัมการแผ่รังสี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวของวัสดุที่ถูกกระตุ้นทางความร้อน รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะกระจายออกทุกทิศทาง และเมื่อรังสีนี้ไปกระทบอีกวัตถุหนึ่ง บางส่วนอาจสะท้อนกลับ บางส่วนอาจจะทะลุไป และบางส่วนอาจถูกดูดกลืนไว้ ถ้ารังสีที่ตกกระทบ คือ รังสีความร้อน รังสีที่ถูกดูดกลืนไว้จะปรากฏเป็นความร้อนภายในวัตถุที่ดูดกลืนรังสีนั้นไว้ [2]

จากคำจำกัดความข้างต้น การนำความร้อนและการพาความร้อนต้องมีตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน แต่การแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน

#### 2.1.1 การนำความร้อน (conduction) [2]

การนำความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่อุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่อยู่ติดกัน โดยที่โมเลกุลของตัวกลางอยู่หนึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การนำความร้อนในของแข็งจะเกิดขึ้นในระดับอะตอมโดยการเคลื่อนที่ของ

อิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำและการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็งในลักษณะของพลังงานของความสั่นสะเทือน (vibrational energy)

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อน ได้ถูกนำเสนอไว้โดย โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) ดังสมการที่ 2.1 [2]

$$Q_x = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (2.1)$$

โดย

$Q_x$	อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในทิศทางของ X
$k$	ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของสาร
$A$	พื้นที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน
$\frac{dT}{dx}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระยะทาง

สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะจะมีค่า  $k$  สูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารจำพวกอโลหะก็จะมีค่า  $k$  ต่ำ ดังนั้นค่า  $k$  จึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมากในการที่จะศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้น ค่า  $k$  ของสารต่าง ๆ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1

การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำ เกิดขึ้นบ้างในของเหลวและแก๊ส แต่มักจะแยกไม่ออกจากเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพาความร้อน



เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น นิวตัน (Newton) ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ดังสมการที่ 2.2 [2]

$$Q_x = hA(T_h - T_c) \quad (2.2)$$

โดย

- h สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
- $Q_x$  อัตราการถ่ายเทความร้อนของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล
- $T_h$  อุณหภูมิที่ร้อนกว่า
- $T_c$  อุณหภูมิที่เย็นกว่า

### 2.1.3 การแผ่รังสี (radiation) [2,4]

การแผ่รังสี คือ การเคลื่อนที่ของความร้อน โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง การแผ่รังสี ความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ การแผ่รังสี ความร้อนเคลื่อนที่โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถูกนำเสนอโดยไอส์ไตน์ (Einstein)

สติเฟิน และ โบลซ์แมน ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุด โดยการแผ่รังสีจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และ อุณหภูมิ T ดังสมการที่ 2.3 [2]

$$E = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

โดย

- E กำลังงานการแผ่รังสี (emissive power) ของวัตถุต่อหน่วยพื้นที่ ( $\text{W/m}^2$ )
- $\sigma$  ค่าคงที่ของสติเฟินและโบลซ์แมนแมน คือ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
- T อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ( $\text{K}$ )

วัตถุที่จะให้ค่าการแผ่รังสีสูงสุดตามสมการที่ 2.3 เรียกว่า วัตถุอุดมคติ (ideal body) หรือ วัตถุดำ (black body) วัตถุที่มีอยู่ทั่ว ๆ ไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุอุดมคติ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุโดยทั่ว ๆ ไปที่พื้นที่ A และอุณหภูมิ T จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 [2]

$$\frac{E}{E_b} = \varepsilon \quad (2.4)$$

$$E = \sigma \varepsilon T^4 \quad (2.5)$$

โดย

$E_b$  กำลังงานการแผ่รังสี (emissive power) ของวัตถุ

$\varepsilon$  สภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (emissivity)

ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ (emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุด  $\varepsilon$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนมักไม่ปรากฏว่าเป็นวิธีใดวิธีหนึ่งโดยเฉพาะ แต่จะเป็นรูปแบบผสมของวิธีดังกล่าวข้างต้นรวมกัน เพียงแต่รูปแบบไหนจะสำคัญมากกว่าเป็นกรณี ๆ ไป เท่านั้น

## 2.2 ฉนวนกันความร้อน (thermal insulation) [2, 5]

ฉนวนกันความร้อน หมายถึง วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยที่อุณหภูมิทั้ง 2 ด้านจะต้องแตกต่างกัน

### 2.2.1 ประเภทฉนวนกันความร้อน

การจำแนกประเภทของฉนวนกันความร้อนตามโครงสร้างและหลักการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ดังนี้

2.2.1.1 ฉนวนชั้นอากาศหรือฟิล์มอากาศ (air) เป็นฉนวนที่ประกอบเป็นพื้นผิวเดียวหรือพื้นผิวหลายชั้นซึ่งมีอากาศอยู่ระหว่างชั้นของพื้นผิว ความต้านทานความร้อนจะเกิดจากชั้นของอากาศในลักษณะนำความร้อนหรือพาความร้อนคร่อมระหว่างชั้นอากาศ

2.2.1.2 ฉนวนแบบแผ่น (flake material) เป็นฉนวนที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคหรือเกล็ดเหล่านี้อาจถูกเทเข้าไปในช่องอากาศหรือทำให้เกาะตัวเข้าด้วยกันเพื่อทำเป็นรูปทรงฉนวนที่แข็ง ฉนวนแบบเกล็ดที่มีรูปทรงแข็งแรงสามารถใช้งานเป็นฉนวนท่อ หรือการใช้งานด้านอื่น ๆ ในลักษณะเป็นบล็อกหรือแผ่นอัด ฉนวนแบบเกล็ดที่รู้จักกันทั่วไป คือ เพอร์ไลต์ และเวอร์มิคูไลต์

2.2.1.3 ฉนวนแบบเม็ด (granular material) เป็นฉนวนที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเป็นโพรงหรือกลวง ซึ่งช่องกลวงเหล่านี้สามารถถ่ายเทอากาศระหว่างกันและกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงทำให้แตกต่างจากฉนวนแบบเซลล์ วัสดุที่ใช้ทำฉนวนชนิดนี้อาจเป็น แมกนีเซียม แคลเซียม ซิลิเกต ดินไดอะตอม (diatomaceous earth) หรือไม้ก๊อกพืช (vegetable cork) วัสดุ 3 ชนิดแรก ส่วนใหญ่จะใช้เป็นฉนวนในระบบท่อทางด้านอุตสาหกรรม ส่วนไม้ก๊อกจะใช้งานกับการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ

2.2.1.4 ฉนวนแผ่นบางผิวสะท้อนรังสี (reflective foils) เป็นฉนวนที่ประกอบด้วยแผ่นบางขนานที่มีสภาพการสะท้อนรังสีความร้อนสูง หรือสภาพการแผ่รังสีต่ำ โดยแผ่นบางเหล่านี้จะเป็นช่องเพื่อสะท้อนรังสีความร้อนกลับ เนื่องจากผลของการนำความร้อนและการพาความร้อนลดลง การประยุกต์ใช้ฉนวนแผ่นบางส่วนใหญ่จะใช้เป็นระบบมากกว่าใช้วัสดุชนิดเดียว โดยจะใช้งานกับวัตถุที่อุณหภูมิสูงเมื่อการถ่ายเทความร้อนชนิดแผ่รังสีความร้อนมีปริมาณมากกว่าการถ่ายเทความร้อนอีก 2 แบบ คือ การนำความร้อนและการพาความร้อน

2.2.1.5 ฉนวนแบบเซลล์ (cellular material) เป็นฉนวนที่ประกอบด้วยเซลล์เล็ก ๆ ที่ผลิตติดกับเซลล์อื่น ๆ ฉนวนแบบเซลล์ผลิตขึ้นจากแก้ว พลาสติก และยาง ตัวอย่างของฉนวนชนิดนี้ เช่น เซลลูลาร์กลาส (cellular glass) ยางยืดหยุ่น (elastomer) แบบขยายตัว โฟมโพลีไธรีน โฟมโพลีไอโซไซยานูเรต โพลียูรีเทน และ โฟมยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์

2.2.1.6 ฉนวนแบบเส้นใย (fibrous material) เป็นฉนวนที่ประกอบด้วยเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ จำนวนมาก เส้นใยเหล่านี้อาจทำมาจากวัสดุอินทรีย์ อย่างเช่น เส้นผม ใยพืชต่าง ๆ หรืออาจทำมาจากวัสดุสังเคราะห์ เช่น ใยแก้ว ใยหิน ใยจีโอโลหะ ใยลูมินาซิลิกา ใยแร่ใยหิน (asbestos) หรือใยคาร์บอน

การจำแนกข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของฉนวนแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1 [2, 5]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไป ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของฉนวน [2, 5]

ประเภทฉนวน	ค่าการนำความร้อน (k), W/m.K	ความหนาแน่นของวัสดุ ( $\rho$ ), Kg/m <sup>3</sup>	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อจำกัด
แคลเซียมซิลิเกต	0.054	208	ไม่ติดไฟ อุณหภูมิใช้งานสูง มีเสถียรภาพเมื่อแห้ง	สภาพการนำความร้อนปานกลาง สภาพการซึมผ่านของไอน้ำและการดูดซับน้ำสูง ราคาแพง ความหนาแน่นสูง	ไม่สามารถใช้น้ำได้ อย่างเช่นฝัງโดยตรง ใช้เป็นฉนวนไม่ได้ดีเมื่อเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเภท ฉนวน	ค่าการนำความร้อน (k), W/m.K	ความหนาแน่น ของวัสดุ ( $\rho$ ), Kg/m <sup>3</sup>	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อจำกัด
เซลดูลาร์ กลาส	0.054	136	ไม่ติดไฟ ความชื้นไม่ สามารถแทรกซึม ผ่านได้ มี เสถียรภาพ ทน แรงกดคั้นได้สูง ไม่เป็นพิษเมื่อใช้ งานที่อุณหภูมิสูง	สภาพนำความร้อน ปานกลาง ราคา แพง	อาจแตกเมื่อเกิดการ แข็งตัวแล้วมีการ ละลายของน้ำใน ช่องฉนวน
เซลดูโลส	0.054	136	สภาพนำความร้อนต่ำ ราคาค่า ถึงปานกลาง ไม่ เป็นพิษ	ติดไฟได้ แต่ ความสามารถใน การสันดาปลดลง เมื่อใช้สารหน่วง ไฟไหม้ สภาพซึม เข้าไปได้ของน้ำ และการดูดซึมน้ำ สูง	สารหน่วงไฟไหม้ที่ ใช้อาจเร่งการกัด กร่อนเหล็กกล้า อะลูมิเนียม ทองแดงและไม้
โฟมแบบ ซีกหุ่่น (ยาง)	0.037	72.10	สภาพนำความร้อนต่ำ ราคาค่า ติดตั้งและหมัก ง่าย สภาพซึมเข้า ไปได้ของไอน้ำ เสถียรภาพไม่เป็น พิษ	ติดไฟได้ ระดับ การเกิดควันสูงเมื่อ เกิดการลุกไหม้ ไวต่อแสงอัลตรา ไวโอเล็ต	อุณหภูมิใช้งาน สูงสุดจำกัดเพียง 104 °C ผลจากการ ที่เป็นวัสดุติดไฟ ทำให้มีข้อบังคับใน การใช้งานภายใน อาคาร
ใยแก้ว	0.036-0.045	9.6-78	สภาพนำความร้อนต่ำ ราคาค่า ในรูปของเส้นใย อัดแผ่นแบบคลุม แบบลูตฟิลล์ ถ้า ไม่มีวัตถุฉนวนไม่ ติดไฟ ไม่เป็นพิษ	วัตถุสำหรับฉาบ ของแบบเส้นใยอัด แผ่นอาจติดไฟ และตัวประสาน อาจลุกไหม้ อากาศที่เคลื่อนที่ อาจลดสมรรถนะ	ต้องการเปลือกหุ้ม กันไอน้ำเนื่องจาก สภาพซึมผ่านของ ไอน้ำสูง เมื่อใช้กับ ตัวประสานหรือ วัตถุสำหรับฉาบ จำกัดอุณหภูมิเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น มิใช่เผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเภท ฉนวน	ค่าการนำความร้อน (k), W/m.K	ความ หนาแน่น ของวัสดุ ( $\rho$ ), Kg/m <sup>3</sup>	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อจำกัด
			การดูดซึมน้ำต่ำ เสถียรภาพดี	ทางความร้อนถ้า ไม่ใช่เปลือกหุ้มกัน การแทรกซึมของ อากาศ ราคาปาน กลางถึงสูง	ปานกลาง
ใยแร่	0.04-0.046	24-176	สภาพนำความร้อนต่ำ ราคาค่า ในรูปของเส้นใย อัดแผ่นแบบคลุม และแบบลูสฟิลต์ ถ้าไม่มีวัตถุฉนวน ไม่ติดไฟ เสถียรภาพไม่เป็น พิษ	วัตถุสำหรับฉนวนของ แบบเส้นใยอัดแผ่น อาจติดไฟ และตัว ประสานอาจถูกไหม้ อากาศที่เคลื่อนที่ อาจลดสมรรถนะ ทางความร้อน ราคา ปานกลางถึงสูง	ต้องการเปลือกหุ้ม กันไอน้ำ เนื่องจาก สภาพซึมผ่านของ ไอน้ำสูง เมื่อใช้กับ ตัวประสานหรือ วัตถุสำหรับฉนวน จำกัดอุณหภูมิเพียง ปานกลาง
เพอร์ไลต์	0.039-0.058	32-176	สภาพนำความร้อนต่ำ ไม่ติดไฟ เสถียรภาพ ไม่ เป็นพิษ	สภาพซึมเข้าไปได้ ของไอน้ำและการ ดูดซึมน้ำสูง ราคา ปานกลาง	ต้องการเปลือกหุ้ม กันไอน้ำ และ อุปกรณ์ทาง กายภาพในกรณี แบบลูสฟิลต์
ฟิโน ลิก โฟม	0.033	32-48	สภาพนำความร้อนต่ำ ไม่ติดไฟ เสถียรภาพ ไม่ เป็นพิษ	ไวต่อแสงอัลตรา ไวโอเล็ต สภาพ ซึมเข้าไปได้ของ น้ำสูง	อุณหภูมิใช้งาน สูงสุดจำกัดเพียง 135 °C
โฟมโพลี ไธรีน	0.029-0.037	24-41.60	สภาพนำความร้อนต่ำ สภาพซึม เข้าไปได้ของน้ำ และการดูดซึมน้ำ ต่ำ	ราคาปานกลาง ติดไฟ อุณหภูมิที่ ใช้งานต่ำ	อุณหภูมิใช้งาน สูงสุดจำกัดเพียง 82 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่แนะนำให้ใช้เชิงพาณิชย์หากำไร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเภท ฉนวน	ค่าการนำความร้อน (k), W/m.K	ความหนาแน่น ของวัสดุ ( $\rho$ ), Kg/m <sup>3</sup>	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อจำกัด
โพลียูรีเทน/ โพลีไอโซไซยานูเรทโฟม	0.023-0.024	32	สภาพนำความร้อนต่ำ สภาพซึมเข้าได้ของน้ำและการดูดซึมน้ำต่ำ	ราคาปานกลางถึงสูง ติดไฟ ต้องการเปลือกหุ้มกันไฟ เมื่อติดตั้งในอาคารที่บังคับ	จะเกิดควันที่เป็นพิษขณะลุกไหม้
เวอร์มิคูไลท์	0.063-0.068	64.1-192	อุณหภูมิใช้งานสูงสุดไม่ติดไฟ	สภาพการนำความร้อนสูง การดูดซึมน้ำสูง	ต้องการอุปกรณ์บรรจุทางกายภาพ

ในปัจจุบันการนำวัสดุประเภทพอลิเมอร์หรือพลาสติกไปใช้งานนั้นเป็นที่นิยมนกันมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน วัสดุประเภทพอลิเมอร์นั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและอัตราส่วนผสมของวัสดุ อาทิเช่น ยางธรรมชาติมีสมบัติในด้านการทนแรงดึงและความยืดหยุ่นสูง จึงนิยมนำไปใช้ผลิตยางรถยนต์ แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสีย คือ ไวต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตและมีความแข็งต่ำ เป็นต้น

ดังนั้น การปรับปรุงสมบัติของวัสดุประเภทพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงในอัตราส่วนผสม โดยเรียกวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรงนี้ว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer composites) [6] หรือการทำให้โครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นโฟม ซึ่งเป็นทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์

### 2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer composites) [6-9]

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์คอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันเห็นได้ชัด (distinct components) อยู่ด้วยกัน องค์ประกอบ 2 ส่วนหลักของวัสดุเชิงประกอบ [7] คือ

ก) ส่วนเสริมแรง (reinforcement) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุเชิงประกอบ วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใย (fiber) ชนิดต่าง ๆ อาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (continuous fibers) หรือเส้นใยสั้น

(discontinuous หรือ chopped short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียงตัว (orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ โดยส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุเชิงประกอบ

ข) เมตริกซ์ (matrix) คือ ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการจัดเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเป็นเมตริกซ์

### 2.3.1 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบ (classification of polymer composites) [7]

ชนิดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.3.1.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์แบบเส้นใย (fiberous composites) คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย อาจเป็นเส้นใยสั้นหรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง

2.3.1.2 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์แบบแผ่นหรือลามิเนต (laminar composites) คือ วัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วย ชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆคล้ายแซนวิช (sandwich) หรือเป็น โครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (honeycomb)

2.3.1.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์แบบก้อน (particulate composites) คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (beads) แผ่น (flake) หรือผง (powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)

### 2.3.2 คุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer composites properties) [8, 9]

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ จะมีเส้นใยเสริมแรงหรือสารเติมแต่งที่มีลักษณะเป็นอนุภาคกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์ ซึ่งโครงสร้างจะแตกต่างกับพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) หรือ โลหะผสม (alloys) ที่มีลักษณะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน พอลิเมอร์จะมีสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำให้พอลิเมอร์นั้นกลายเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ โดยสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง[7] ส่วนสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ สามารถอธิบายได้จากสมการความสัมพันธ์แบบขนาน (parallel model) หรือแบบอนุกรม (series model) ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 [9]

$$\text{สมการความสัมพันธ์แบบขนาน} \quad \Gamma_b = \phi_1 \Gamma_1 + \phi_2 \Gamma_2 \quad (2.6)$$

$$\text{สมการความสัมพันธ์แบบอนุกรม} \quad 1/\Gamma_b = \phi_1 / \Gamma_1 + \phi_2 / \Gamma_2 \quad (2.7)$$

โดย

- $\Gamma_b$     ค่าการนำความร้อน (k) หรือความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของวัสดุเชิงประกอบ
- $\Gamma_1$     ค่าการนำความร้อน (k) หรือความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของเมตริกซ์
- $\Gamma_2$     ค่าการนำความร้อน (k) หรือความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของส่วนเสริมแรง
- $\phi_1$     สัดส่วนโดยปริมาตรของเมตริกซ์
- $\phi_2$     สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนเสริมแรง

### 2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ [7,10]

#### 2.3.3.1 ข้อดีของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ มีดังนี้

- ก. ความหนาแน่น (density) เพิ่มขึ้น
- ข. ความยืดหยุ่นมอดูลัส (elastic modulus) เพิ่มขึ้น
- ค. ความทนแรงอัด (compressive strength) เพิ่มขึ้น
- ง. ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) เพิ่มขึ้น
- จ. การหดตัว (shrinkage) ลดลง
- ฉ. ความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้น
- ช. สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพขึ้นกับอุณหภูมิที่ลดลง

#### 2.3.3.2 ข้อเสียของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ มีดังนี้

- ก. มีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน เนื่องจากการจัดเรียงตัว (orientation) ของส่วนเสริมแรง
- ข. ยากในการต่อ (attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
- ค. ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบ
- ง. ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่

## 2.4 โฟมพอลิเมอร์ (polymeric foam) [11-20]

โฟมพอลิเมอร์ (polymeric foam) หรือโฟมพลาสติก (plastic foam) หรือเซลลูลาร์พลาสติก (cellular plastic) หรือพลาสติกแบบหืดหยุ่น (expanded plastic) หมายถึง พอลิเมอร์ที่ถูกทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายตัวหรือพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge) โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้ประกอบด้วย วัฏภาค (phase) ตั้งแต่สองวัฏภาคขึ้นไป คือ วัฏภาคที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็งหรือของเหลว (solid or liquid polymer matrix phase) และวัฏภาคที่เป็นแก๊สซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารให้ฟอง (blowing agent) [11] กระจายตัวในวัฏภาคพอลิเมอร์ในรูปของช่องว่าง (void) เรียกว่าเซลล์ (cell) [12] สำหรับวัฏภาคที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็งหรือของเหลวอาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว หรือพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) นอกจากนี้อาจมีวัฏภาคที่เป็นของแข็งชนิดอื่นอยู่ด้วย ได้แก่ ตัวเติม (fillers) หรือเส้นใยเสริมแรง ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แก้ว เซรามิก โลหะ หรือ สารประกอบอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

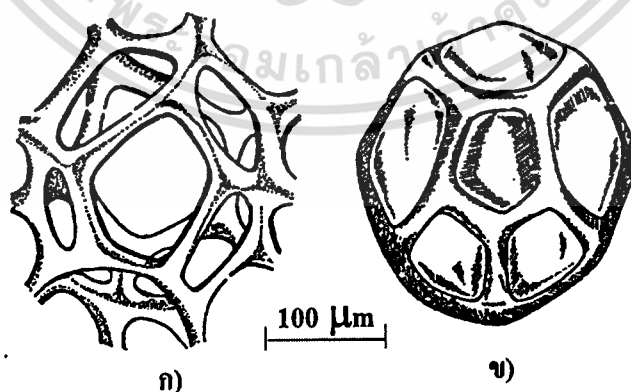
โฟมพลาสติกอาจยืดหยุ่น (flexible) หรือแข็ง (rigid) ขึ้นกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ปริมาณผลึก (degree of crystallinity) และระดับการเชื่อมโยง (degree of crosslinking) ของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ โฟมพอลิเมอร์อาจมีสมบัติกึ่งยืดหยุ่น (semiflexible) หรือกึ่งแข็ง (semirigid) ก็ได้

โฟมพลาสติกมีสัณฐาน โครงสร้าง (structural configurations) 2 แบบ [11] คือ

ก) แบบเซลล์เปิด (open-cell type) เป็น โครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ซึ่ง แก๊สสามารถผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่นๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ก) โดยทั่วไปโฟมที่มี สัณฐาน โครงสร้างแบบนี้จะยืดหยุ่นเหมาะกับการนำไปใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ เฟอ์นเจอร์ ที่นอน และฉนวนเสียง

ข) แบบเซลล์ปิด (closed-cell type) สัณฐาน โครงสร้างแบบนี้ เซลล์จะประกอบด้วยเยื่อ บางๆ เรียกว่าหน้าต่งเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ข)

โฟมแบบนี้จะแข็งและเหมาะในการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 2.2 สัณฐานวิทยาโครงสร้างเซลล์ โดย ก)เซลล์เปิด ข)เซลล์ปิด [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้พอลิเมอร์เกิดโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน [14] ได้แก่

ก) การสลายตัวของสารให้ฟองจากการให้ความร้อนหรือผลจากปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

ข) การทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์หรือสารแขวนลอยพอลิเมอร์ แล้วทำให้แข็งตัวโดยตัวเร่งและหรือความร้อนทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก

ค) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือให้ความร้อน ตัวอย่างของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) เมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) เป็นต้น

ง) การกลายเป็นไอของแก๊สซึ่งเป็นผลจากกระบวนการคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนต (isocyanate) กับน้ำ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์

จ) การขยายตัวของแก๊ส (gas expansion) ในเนื้อพอลิเมอร์โดยการลดความดันในระบบพอลิเมอร์

ฉ) การเติมทรงกลมขนาดเล็กที่มีลักษณะกลวง (hollow microspheres) ในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งทรงกลมขนาดเล็กนี้อาจจะมีองค์ประกอบเป็นเม็ดแก้ว หรือเม็ดพลาสติก

ช) การขยายตัวของทรงกลมขนาดเล็กที่มีลักษณะกลวงในเนื้อพอลิเมอร์โดยใช้ความร้อนหรือความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี เช่น การขยายตัวของเม็ดพอลิस्टาไทรินในพอลิยูทิลเทน หรือ อีพ็อกซีเรซิน

#### 2.4.1 กระบวนการการเกิดโฟม (foam formation)

โฟมพอลิเมอร์สามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการการขยาย (expansion process) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มการเกิดฟอง (bubble formation of initiation) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตโฟม โดยทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว กระบวนการการเกิดฟองนี้จะเรียกว่า นิวเคลียสชัน (nucleation) [14] ซึ่งมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ .

ก) กระบวนการเกิดนิวเคลียสขึ้นเอง (self nucleation) ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

ข) กระบวนการเกิดนิวเคลียส (nucleation process) ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (liquid-solid interphase) ซึ่งของแข็งนี้เรียกว่า สารช่วยในการเกิดนิวเคลียส (nucleating agent)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และความชื้น ความเรียบของผิวหน้าวัสดุ คุณลักษณะของผิวของอนุภาคตัวเติม ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวหรือขนาดของสาร ทำให้เกิดนิวเคลียส (nucleator) ขนาดและปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดแก๊ส และแรงตึงผิว (surface tension) ในขั้นตอนการเกิดฟอง สารละลายพอลิเมอร์ต้องการพลังงานอิสระ (F) ของระบบที่เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 2.8 [11]

$$\Delta F = \gamma A \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ แรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ (surface tension of polymer solution) และ A คือ พื้นที่ผิวสัมผัสรวมทั้งหมด (total interfacial area) โดยที่ค่าแรงตึงผิวดำจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย

ขั้นตอนที่ 2 การเติบโตของฟอง (bubble growth) การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สจากวัฏภาคของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (sphere) ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้สภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ ( $\Delta P$ ) แรงตึงผิวที่ผิวสัมผัส ( $\gamma$ ) และรัศมีของฟอง ( $r$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.9 [11]

$$\Delta P = 2\gamma/r \quad (2.9)$$

ค่าความแตกต่างของความดันจะมีค่ามากในฟองที่มีขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวดำหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัว หรือเพิ่มขนาดขึ้น (growing) การแตกของผนังเซลล์ (breaking the wall separating cells) หรือการแพร่ของสารให้ฟองจากฟองที่มีขนาดเล็กไปยังฟองที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.10 [11]

$$\Delta P_{1,2} = 2\gamma(1/r_1 - 1/r_2) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\Delta P_{1,2}$  คือ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง ซึ่งมีขนาดรัศมีของฟอง

เท่ากับ  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับ

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่เกิดการขยายตัวของฟองในโฟมพอลิเมอร์ สมบัติต่างๆของวัสดุจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองจะขึ้นกับ สมบัติความหนืดของการยืดหยุ่น (viscoelastic) ของพอลิเมอร์วิภาค ความดันที่เกิดเนื่องจากสารให้ฟอง ความดันภายนอกที่เกิดบน โฟมพอลิเมอร์ ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารให้ฟองในวิภาคพอลิเมอร์และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการขยายตัวของเซลล์และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณเชื่อมต่อกันของเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การยุบตัว (collapses) ของโฟมพอลิเมอร์

ขั้นตอนที่ 3 การเกิดเสถียรภาพของฟอง (bubble stability) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและสำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในวิภาคพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งปัจจัยหนึ่งคือ การถ่ายเท (drainage) ของของเหลวจากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (cell junction) โดยขณะที่ฟองกำลังขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันของเซลล์ทำให้เกิดผนังเซลล์และสัน (ribs) ของเซลล์ขึ้น เมื่อการขยายตัวเกิดต่อไปอีก ของเหลวจะเกิดการถ่ายเท ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์มากขึ้น ถ้าการถ่ายเทของเหลวในลักษณะนี้ยังคงเกิดต่อไป จะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ และถ้าทำให้ระบบ โฟมขณะนี้เสถียร จะทำให้ได้โฟมพอลิเมอร์แบบเซลล์เปิด

การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ ทำได้โดยทำให้ระบบ โฟมเกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบ โฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของวิภาคพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม [11] การเพิ่มความหนืดจะเป็นการลดผลของการถ่ายเทของของเหลวไปรอยต่อระหว่างเซลล์ (drainage effect) ซึ่งการทำให้ความหนืดของวิภาคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน หรือการเชื่อมโยง (crosslinking) หรือการลดอุณหภูมิ

นอกจากนี้มีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อความเสถียรของโฟม [11] ได้แก่

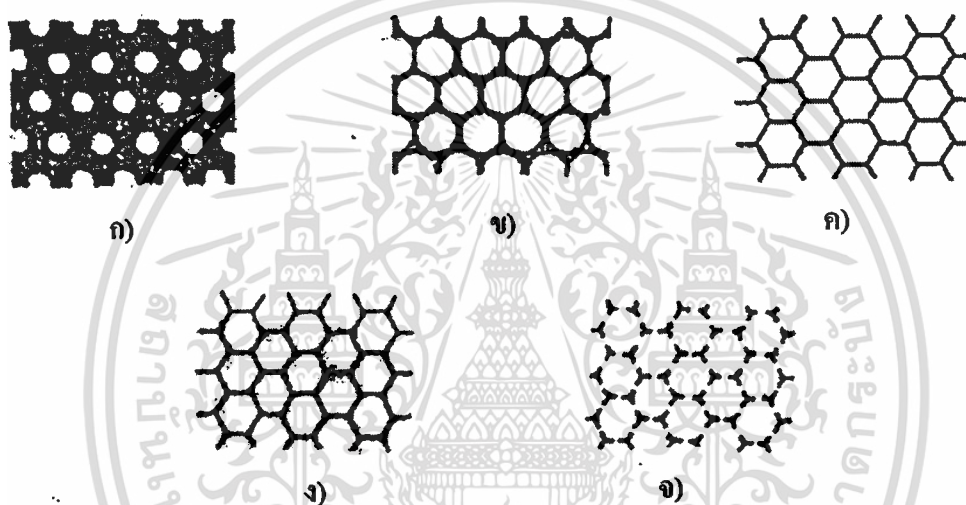
ก) การขยายตัวของฟองที่มากเกินไป (excessive expansion) ทำให้เกิดสัณฐานโครงสร้างแบบเซลล์เปิดที่มากเกินไปจนเกิดความดัน ซึ่งแก้ไขได้โดยการจำกัดระดับการขยายตัวของโฟม

ข) การเกิดแรง แวน เดอร์ วาลส์ ระหว่างผิวหน้าของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์มีความหนาแน่นลง นำไปสู่การเกิดรอยแตกบนผนังเซลล์

ค) การลดลงของแรงตึงผิวที่บางจุดในพอลิเมอร์เหลว อันเนื่องมาจากความร้อนในระบบพอลิเมอร์เหลวมักเกินไป หรือมีสารต้านการเกิดโฟม (antifoaming agents) ปนอยู่

ง) วิธีทำให้สภาวะโฟมเสถียรมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้พอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์ [16]

ขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการการเกิดโฟม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดนิวเคลียส (nucleation) การเติบโต (growth) ของฟองแก๊สและการขยายตัวของแก๊สในระบบพอลิเมอร์เหลว สามารถแสดงขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังรูปภาพที่ 2.2. โดยรูป 2.2 ก) แสดงการเกิดฟองในระบบพอลิเมอร์เหลว ฟองจะมีรูปร่างทรงกลม ข) แสดงการเติบโตของฟองแก๊ส ค) ฟองแก๊สขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้รูปร่างของฟองเปลี่ยนเป็นทรง pentagonal dodecahedron ง) ขั้นตอนนี้โฟมพลาสติกจะมีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิดซึ่งอาจจะเกิดการแตก (rupture) ของผนังเซลล์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความหนืด พลังงานอิสระ เป็นต้น จ) ผลจากการขาดของผนังเซลล์ของฟองทำให้สัณฐานโครงสร้างโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด [17]



รูปที่ 2.3 แผนภาพขั้นตอนต่างในกระบวนการการเกิดโฟม โดย ก) การเกิดฟองในระบบ ข) การเติบโตของฟอง ค) ฟองแก๊สขยายตัวและรูปร่างของฟองเปลี่ยน ง) โฟมพลาสติกจะมีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิด จ) ผนังเซลล์ขาด โครงสร้างโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด [17]

#### 2.4.2 โครงสร้างของเซลล์ (cellular structure)

ในการศึกษาโครงสร้างเซลล์ของโฟมพอลิเมอร์ สามารถศึกษาได้ 2 วิธี [11] คือ

ก) การศึกษาจากรูปภาพ (graphical approach) วิธีนี้เป็นการพิจารณาหาเหตุผลเพื่ออธิบายสมบัติมหภาค (macroscopic properties) ของโฟมพอลิเมอร์จากตัวแปรต่างๆ ทางด้านรูปร่างและโครงสร้างของเซลล์

ข) การศึกษาทางเคมีกายภาพ (physicochemical) วิธีนี้เป็นการอธิบายและทำนายรูปร่างลักษณะของโฟมพอลิเมอร์จากองค์ประกอบทางเคมีของพอลิเมอร์และกลไกในการเกิดโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์รูปร่างของเซลล์ในระบบโพลีเมอร์ จะอาศัยรูปแบบทางเรขาคณิตในการอธิบายโดยใช้การวัดขนาดเซลล์และการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยวิธีที่เหมาะสมเข้าช่วย หรือใช้การประเมินรูปร่าง (shape) เซลล์ส่วนใหญ่ด้วยการคาดคะเนทางสายตา สำหรับวิธีวิเคราะห์วิธีแรกรูปร่างของเซลล์จะสรุปได้ในเชิงปริมาณ (รูปร่างส่วนใหญ่) ในขณะที่วิธีทั้งสองนั้นจะได้ข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น รูปร่างเซลล์ทรงกลม วงรี (ellipse) หรือรูปหลายเหลี่ยม เป็นต้น ในระบบโพลีเมอร์โครงสร้างเซลล์จะประกอบด้วยเซลล์หลายรูปร่างและขนาด ซึ่งมีความซับซ้อนเกินกว่าจะสามารถคำนวณค่าการกระจายตัวของรูปร่าง (cell size distribution) ออกมาได้ ในขณะที่การคำนวณขนาดของเซลล์มีได้หลายวิธี ดังนั้นการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างการนำไปใช้งานของโพลีเมอร์จากขนาดเซลล์ จะใช้ขนาดเซลล์เฉลี่ยจากข้อมูลทางสถิติ หรือจากรูปร่างทางอุดมคติอย่างง่าย ซึ่งจำลองมาจากโครงสร้างเซลล์ในระบบจริง (ข้อมูลได้มาจากการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์พื้นฐานวิทยาของโพลีพลาสติกนั้น)

#### 2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโพลีเมอร์ (structure properties relationship)

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโพลีเมอร์ สามารถประเมินได้ในเชิงปริมาณ โดยปัจจัยพื้นฐานทางโครงสร้างมหภาค (macrostructural) ของโพลีเมอร์จะถูกนำมาใช้อธิบายสมบัติของโพลีเมอร์ ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ปริมาณเซลล์แบบเปิดและแบบปิด ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ขนาดของเซลล์ รูปร่างของเซลล์ ความหนาของผนังเซลล์ (wall thickness) ค่าการกระจายตัวของขนาดและรูปร่างของเซลล์ภายใต้ปริมาตรที่กำหนด และพื้นที่ผิวหน้าจำเพาะ (specific surface area) ของวัสดุ

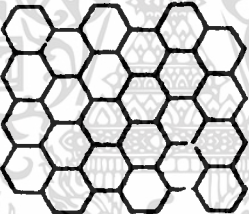
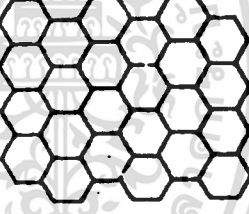
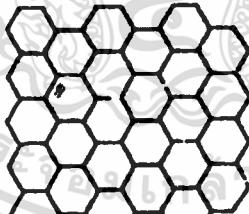
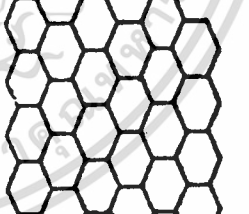
โดยทั่วไปโพลีเมอร์มีพื้นฐานโครงสร้าง 2 แบบ คือ แบบเซลล์เปิดและแบบเซลล์ปิดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโพลีเมอร์และสภาวะการเกิดโพลีเมอร์ ความแตกต่างทางโครงสร้างทางกายภาพนี้ทำให้โพลีเมอร์มีสมบัติแตกต่างกันไป โดยสมบัติจะแปรผันไปตามสัดส่วนของเซลล์แบบเปิด เมื่อเปรียบเทียบโพลีเมอร์แบบเซลล์เปิดกับโพลีเมอร์แบบเซลล์ปิด พบว่าโพลีเมอร์แบบเซลล์เปิดมีสมบัติการดูดซับน้ำและความชื้น การซึมผ่าน (permeability) ของแก๊สและไอน้ำ และความสามารถในการดูดซับเสียงได้ดีกว่า แต่จะมีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนและไฟฟ้าที่ด้อยกว่าโพลีเมอร์แบบเซลล์ปิด โดยทั่วไปโพลีเมอร์ที่มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์เปิด ได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resins) และคาร์บาไมด์ (carbamide) เป็นต้น สำหรับโพลีเมอร์ที่มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์ปิด ได้แก่ พอลิยูรีเทน อีพ็อกซีเรซิน ซิลิโคน พีวีซี พอลีสไตรีน เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและสัดส่วนของเซลล์แบบเปิดและเซลล์แบบปิด เป็นดังนี้ คือ เมื่อสัดส่วนของเซลล์แบบเปิดเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโพลีเมอร์จะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้างเซลล์แบบเปิดจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อค่าเฉลี่ยของขนาดเซลล์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งทำให้เกิดรอยแตกที่ผนังเซลล์ในขั้นสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม นอกจากนี้โครงสร้างเซลล์แบบเปิดสามารถทำให้เกิดได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างเซลล์แบบปิดด้วยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) การเพิ่มหรือลดความดันในระบบโฟม การใช้ความร้อนหรือวิธีปฏิบัติทางกล (mechanical treatment)

สมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง (anisotropy) ของรูปร่างเซลล์จะสัมพันธ์กับทิศทางการยืดหรือขยายตัวของเซลล์ฟองในวัสดุพอลิเมอร์ โดยเซลล์จะขยายตัวในทิศทางที่มีความเค้นเชิงกลต่ำ ความเค้นเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งจะกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดทั่วทั้งปริมาตรของพอลิเมอร์ โดยทิศทางของการขยายตัวของเซลล์สามารถขยายได้หลายทิศทางและทำมุมต่างๆกันกับแนวระนาบ ตัวอย่าง การขยายตัวของ dodecahedral cell ดังแสดงในรูปที่ 2.4

Cell Section plane	Shape of cells	
	Ideal	Real
Perpendicular to direction of foaming		
Parallel to direction of foaming		

รูปที่ 2.4 การขยายตัวของ dodecahedral cell ในทิศทางตั้งฉากและขนานกับทิศทางเกิดโฟม

[11]

สมบัติที่ขึ้นกับทิศทางของรูปร่างเซลล์ของโฟมพอลิเมอร์จะมีผลต่อความแข็งแรง ความเป็นฉนวน สมบัติความร้อนเชิงกายภาพ (thermophysical) และสมบัติอื่นๆ ซึ่งสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางนี้จะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟมพอลิเมอร์มากกว่าปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ ธรรมชาติเคมีของพอลิเมอร์ ความหนาแน่นหรือปริมาณเซลล์แบบเปิดในโฟมพอลิเมอร์ ภายใต้อุณหภูมิใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดโฟมที่คล้ายคลึงกัน (องค์ประกอบทางเคมี ความหนาแน่น การจัดตัวของเซลล์ เป็นต้น) ขนาดของเซลล์จะมีอิทธิพลต่อสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโฟมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นเพราะเมื่อเซลล์มีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นทั้งในโฟมแบบยืดหยุ่นและโฟมแบบแข็ง

#### 2.4.4 สมบัติการนำความร้อนปรากฏของโฟมพอลิเมอร์

การนำความร้อนปรากฏของโฟมพอลิเมอร์ คือ ผลรวมของค่าการนำความร้อนในส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นแก๊สรวมกับค่าการพาความร้อนและค่าการถ่ายเทรังสีความร้อน ดังสมการ 2.11 [11]

$$k = k_s + k_g + k_c + k_r \quad (2.11)$$

โดย

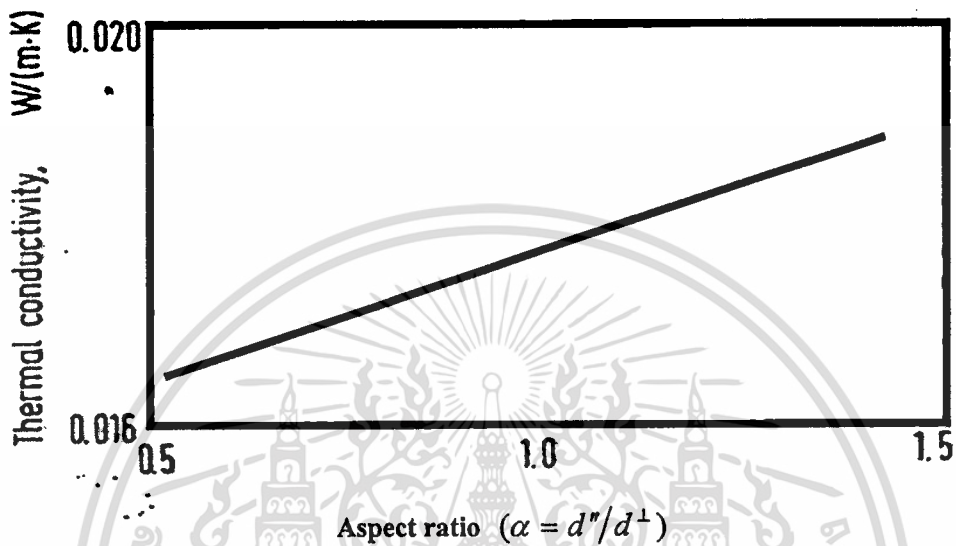
- $k$     ค่าการนำความร้อนปรากฏของโฟมพอลิเมอร์
- $k_s$     ค่าการนำความร้อนของส่วนที่เป็นพอลิเมอร์
- $k_g$     ค่าการนำความร้อนของส่วนที่เป็นแก๊ส
- $k_c$     ค่าการพาความร้อน
- $k_r$     ค่าการถ่ายเทรังสีความร้อน

หากต้องการนำโฟมพอลิเมอร์ไปใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อน ต้องเลือกพอลิเมอร์โฟมที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสุด หรือตัวแปรทุกตัวในสมการต้องมีค่าต่ำที่สุด [11, 19-20]

ก) ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง (thermal conductivity of the polymer phase) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของวัสดุที่เป็นแก๊ส เพราะวัสดุที่เป็นของแข็งมีค่าการนำความร้อนไม่สูงมากนัก ประมาณ 0.12 - 0.35 W/m.K (0.1-0.3 kcal/(m.h.C)) และมีสัดส่วนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปริมาตรแก๊สในหนึ่งหน่วยปริมาตรของโฟมพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น โฟมพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนาแน่น 32 Kg/m<sup>3</sup> ประกอบไปด้วยวัสดุที่เป็นของแข็งเพียงร้อยละ 3 และวัสดุที่เป็นแก๊สถึงร้อยละ 97 ของปริมาตรทั้งหมด อย่างไรก็ตาม การผลิตโฟมให้มีความหนาแน่นต่ำ สามารถทำได้กับพอลิเมอร์เพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้น ซึ่งต้องใช้เทคนิคในการผลิตที่ซับซ้อนและต้นทุนการผลิตสูง นอกจากนี้โฟม

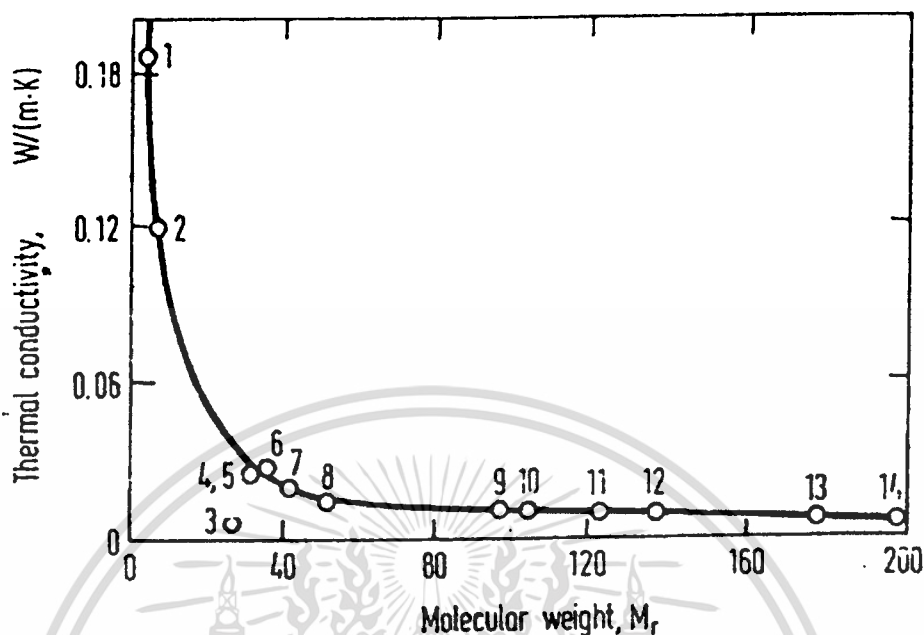
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ที่ผลิตได้ที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีความแข็งแรงเชิงกลลดลงอีกด้วย สำหรับโฟมพอลิเมอร์ค่าการถ่ายเทความร้อนในเนื้อวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า Aspect ratio ( $\alpha = d''/d^\perp$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น โดย  $d''$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ในแนวขนาน และ  $d^\perp$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ในแนวตั้งฉาก [11] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับการจัดเรียงตัวของเซลล์ในโครงสร้างโฟม โพลียูรีเทน  $\alpha = d''/d^\perp$  [11]

ข) ค่าการนำความร้อนของวัฏภาคที่เป็นแก๊ส (thermal conductivity of the gas phase) แก๊สที่บรรจุอยู่ในเซลล์เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากในเรื่องการถ่ายเทความร้อนของวัสดุโฟมพอลิเมอร์ ซึ่งโดยปกติแล้ววัสดุโฟม ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแก๊สมากกว่าร้อยละ 90 โดยปริมาตร ค่าการนำความร้อนในวัฏภาคที่เป็นแก๊ส ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง อาทิเช่น ปริมาณแก๊สในเนื้อวัสดุ กระบวนการขึ้นรูป เทคโนโลยีในการผลิตโฟมพอลิเมอร์ และชนิดของแก๊สที่บรรจุอยู่ในเนื้อวัสดุ โดยแก๊สที่บรรจุมีมวลโมเลกุลมากยิ่งมีผลให้ค่า  $k_g$  ลดลง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ค่าการนำความร้อนของแก๊สชนิดต่างๆ โดย 1. H<sub>2</sub> 2. He 3. H<sub>2</sub>O 4. N<sub>2</sub> 5. air 6. O<sub>2</sub> 7. CO<sub>2</sub> 8. CH<sub>3</sub>Cl 9. Freon 22 10. Freon 21 11. Freon 12 12. Freon 11 13. Freon 114 และ 14. Freon 115 [11]

ค) ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนมีผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนปรากฏในโพลีเมอร์อย่างมาก ในกรณีที่โพลีเมอร์มีความหนาแน่นน้อย แต่จะไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของโพลีเมอร์มีค่าค่อนข้างสูง

ง) ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนในวัสดุโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่ความร้อนเริ่มต้นของวัสดุ ตัวแปรที่มีความสำคัญในการแผ่รังสีความร้อน คือ  $\nabla T$  ระหว่างผิวของชิ้นงานตัวอย่างตามหลักของสตีฟานและโบลทซ์แมน (Stefan and Boltzmann) สำหรับโพลีเมอร์โพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ ๆ ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีค่าถึงร้อยละ 30 ของค่าการนำความร้อนปรากฏ

ในส่วนของโพลีเมอร์ สัดส่วนการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์และความโปร่งใสของผนังเซลล์ โพลีเมอร์ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ขนาดเล็กจำนวนมากจะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีน้อยกว่าโพลีเมอร์ที่อยู่ในเต็มไปด้วยเซลล์ขนาดใหญ่ ภายใต้สภาวะเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ขนาดของเซลล์มีผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนของโพลีเมอร์มากกว่าความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ความหนาแน่น อุณหภูมิ การดูดซับความชื้นและการแผ่กระจายของแก๊สก็มีส่วนต่อค่าการนำความร้อนปรากฏ แต่การดูดซับความชื้นและการแผ่กระจายของแก๊สหลีกเลี่ยงได้โดยการปิดผิวของวัสดุโฟมด้วยแผ่นโลหะพอลิเอทิลีนหรือผ้าใยสังเคราะห์

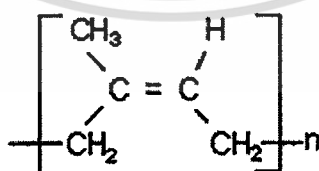
## 2.5 วัสดุเชิงประกอบโฟมยาง (rubber foams composites) [7,10,20-24]

สารตั้งต้น ประกอบด้วย

### 2.5.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) [20]

ยางธรรมชาติ คือน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางซึ่งจะมีลักษณะสีขาวข้นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้น ก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วัน จะได้ยางแผ่นรมควัน

นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นรมควัน ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 ยางธรรมชาติ เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

ข้อดีของยางธรรมชาติ สามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

ก) ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนแรงดึง (tensile strength)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.5.2.2 สารให้ฟองเชิงเคมี (chemical blowing agents) สารให้ฟองประเภทนี้จะให้แก๊สออกมาโดยผ่านปฏิกิริยาเคมี เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition) หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรืออันตรกิริยา (interaction) ของสารประกอบเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและย้อนกลับไม่ได้ (irreversible) แต่มีบางกรณีเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน

สารให้ฟองเชิงเคมีสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

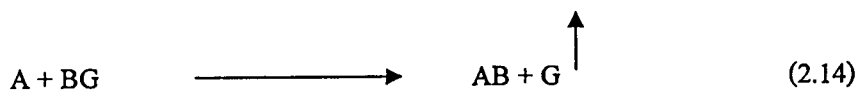
ก) สารประกอบเคมีที่ให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่สามารถย้อนกลับได้ เช่น เกลืออินทรีย์และอนินทรีย์ของแอมโมเนีย สารประกอบไบคาร์บอเนต คาร์บอเนตของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ธ ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารให้ฟองกลุ่มนี้แสดงได้ดังสมการที่ 2.12 เมื่อ AB – แทนสารให้ฟอง C – แทนส่วนที่เหลือ (residue) และ G – ผลผลิตที่เป็นแก๊ส



ข) สารประกอบเคมีที่ให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่สามารถผันกลับได้ เช่น สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอะลิฟาติกอะไซค์และไดอะไซค์ สารประกอบไดอะไซม์เป็นต้น ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารให้ฟองกลุ่มนี้แสดงได้ดังสมการที่ 2.13



ของผสมของสารประกอบเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่ให้แก๊สโดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบ ตัวอย่างเช่น ของผสมระหว่างโซเดียมไนไตรด์กับแอมโมเนียมคลอไรด์ของผสมของกรดโอเลอิกกับซิงค์คาร์บอเนต เป็นต้น ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารให้ฟองกลุ่มนี้แสดงได้ดังสมการที่ 2.14



โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมผลิตโฟม มีการใช้สารให้ฟองเคมีหลายชนิดด้วยกัน ตัวอย่างของสารให้ฟองแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารให้ฟองที่ใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุโฟม [23]

สารให้ฟอง	อุณหภูมิสลายตัว (องศาเซลเซียส)	ปริมาณแก๊สที่ให้ (มิลลิลิตรต่อกรัม)
Sodiumbicarbonate/ $\text{NaHCO}_3$	100-140	125
$\text{N,N}'\text{-Dimethyl- N,N}'\text{-dinitrosoterephthalamide}$ (DNTA/ $\text{C}_6\text{H}_4\text{-(CON(CH}_3\text{)-NO)}_2$ )	118	200
4-4'-oxybisbenzenesulfonyldiazide(OBSH/ $\text{O(C}_6\text{H}_4\text{-SO}_2\text{NH-NH}_2)_2$ )	130-140	313
Azobisbutyronitrile (ABN/ $(\text{CH}_3)_2\text{(CN)CN=NC(CN)(CH}_3)_2$ )	100	137
Azodicarbonamide(ADC)/ $\text{H}_2\text{N-CO-n=n-CONH}_2$	190-240	270

สำหรับงานวิจัยนี้จะขอกกล่าวถึงแต่สารให้ฟองที่ใช้ในการทดลอง คือ สารประกอบอะโซไดคาร์โบไมด์ (azodicarbonamide) ซึ่งเป็นสารให้ฟองที่มีผลผลิตเป็นแก๊สในปริมาณสูง โดยแก๊สที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแก๊สไนโตรเจนที่มีสมบัติการนำความร้อนค่อนข้างต่ำ สารประกอบอะโซไดคาร์โบไมด์เป็นของแข็งที่มีสีส้มจนถึงสีเหลืองอ่อน ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค มีความหนาแน่นประมาณ 1.65 กรัม/ลบ.ซม. โดยทั่วไปจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ใดๆ แต่จะละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide) ที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิสลายตัวในอากาศประมาณ 190-240 องศาเซลเซียส โดยปริมาณแก๊สที่ให้ออกมาประมาณ 270 มิลลิลิตร/กรัม และประกอบไปด้วย

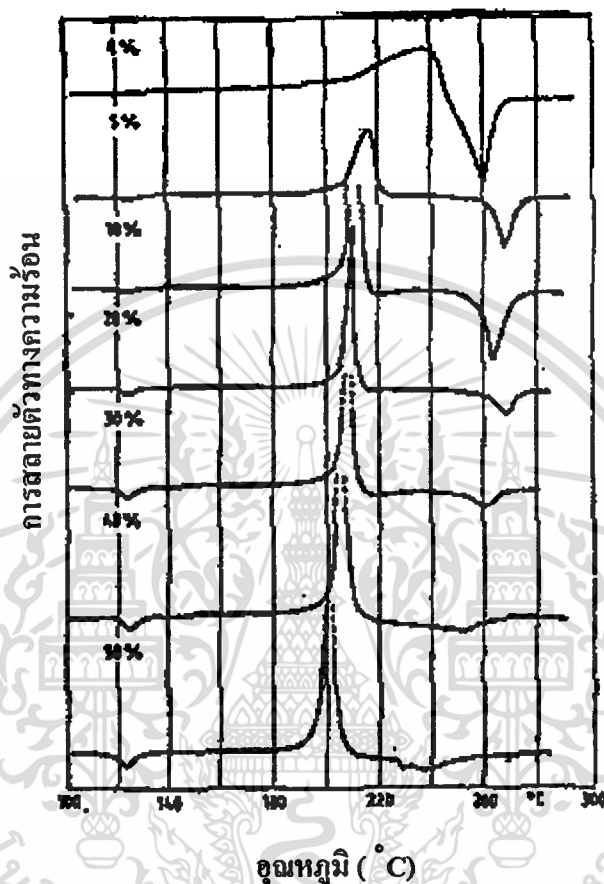
แก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )	65	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ )	32	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ )	3	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

นอกจากนี้ผลผลิตจากการสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบไมด์ยังประกอบไปด้วยของแข็ง (solid residues) ได้แก่ สารประกอบยูราโซล (urazole) กรดไซยานูริก (cyanuric acid) ไฮดราโซไดคาร์โบไมด์ (hydrazodicarbonamide) และสารประกอบไซยามิไลด์ (cyamelide)

แม้ว่าอุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบไมด์จะมีค่าสูงมาก แต่สามารถทำให้อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าต่ำลงได้ โดยวิธีที่ใช้กันทั่วไป คือ การใช้สารเติมแต่ง (additives) วิธีนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยสารเติมแต่งดังกล่าวเรียกว่าคิกเกอร์ (kicker) ได้แก่ สารประกอบพอลิออล สารประกอบยูเรีย สารประกอบอะมีน กรดอินทรีย์ เบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทรีซ์ และสารประกอบโลหะ[24] ผลของคิกเกอร์ต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ แสดงดังรูปที่ 2.8 กล่าวคือ สารคิกเกอร์จะช่วยทำให้อุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ลดลง เมื่อปริมาณการใช้สารคิกเกอร์เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.8 ผลของคิกเกอร์ต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ [21]

นอกจากสารคิกเกอร์แล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ ได้แก่ ขนาดอนุภาคของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์และอัตราการให้ความร้อนขณะขึ้นรูปโฟม

### 2.5.3 สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agents) [22]

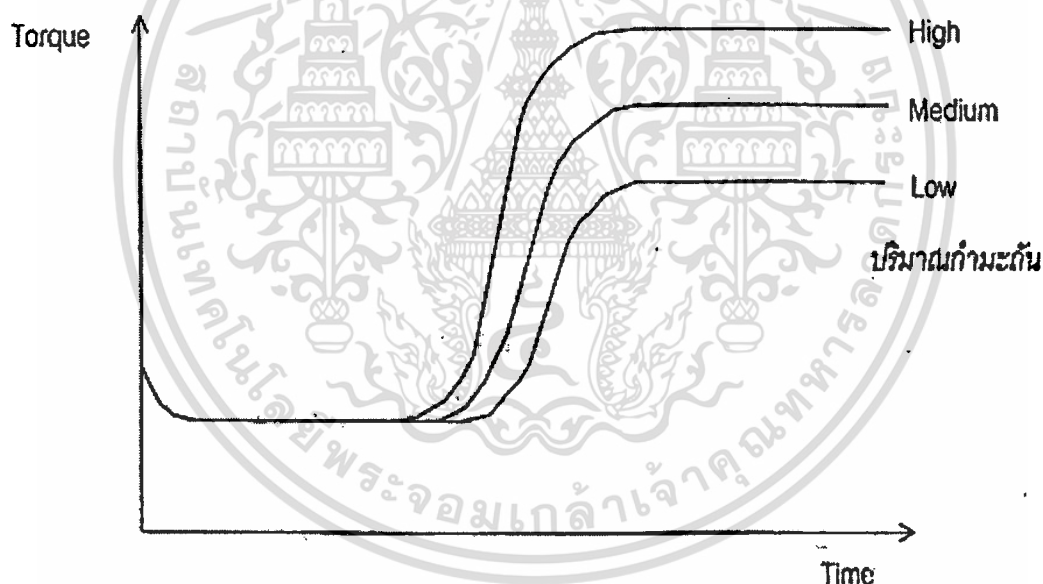
การวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตโฟมพลาสติกสามารถทำได้โดยการใส่สารวัลคาไนซ์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ในกระบวนการขยายตัวของโฟมนั้น จำเป็นต้องมีการเชื่อมโยงฟองที่เกิดขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์เพื่อทำให้ฟองที่ขยายตัวเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การวัลคาไนซ์ยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการขูดฉีกเนื่องมาจากความร้อนของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย โดยทั่วไปสารวัลคาไนซ์ ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ได้แก่ กำมะถัน (sulfur, S) เปอร์ออกไซด์ (peroxide) ออกไซด์ของโลหะ (metal oxide) ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างข่ายสามมิติ (3-D network) โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อม โยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางทางเคมี

การวัลคาไนซ์ยางสามารถทำได้หลายวิธี ที่นิยมที่สุดได้แก่ การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือ ยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นยางที่ไม่อิมตัว มีพันธะคู่อยู่เป็นจำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) ฯลฯ จึงต้องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อม โยง (accelerator) และสารกระตุ้น (activator) ได้แก่ กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ (stearic acid/ZnO)

กลไกปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันเมื่อไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อม โยง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กลไกปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถัน [22]

#### 2.5.4 สารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerators)

สารเร่งวัลคาไนซ์ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สารเร่ง ทำหน้าที่ช่วยสารวัลคาไนซ์ทำให้มีอัตราเร็วการวัลคาไนซ์ (rate of vulcanization) เร็วขึ้น ลดเวลาเชื่อม โยง ทำให้เกิดการเชื่อม โยงอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและใช้สารวัลคาไนซ์ น้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ เชื่อม โยงดีขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานสารเร่งในเชิงอุตสาหกรรมอาจ ใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้มากกว่าจะเป็นสารเร่งหลัก เรียกว่าสารเร่งปฐมภูมิ (primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าเรียกว่า สารเร่งทุติยภูมิ (secondary accelerators) หรือคิกเกอร์

#### 2.5.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาอาจเรียกสั้น ๆ ว่า สารกระตุ้น ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ โดยเกิดเป็นสารเชิงซ้อน (complexes) กับสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราการวัลคาไนซ์สูงขึ้น เวลาวัลคาไนซ์ลดลง และยังช่วยในสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ให้ดีขึ้น

สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ กรดสเตียริกและซิงค์ ออกไซด์ (stearic acid/ZnO) เนื่องจากราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงานสามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (zinc ions) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

2.5.6 สารหน่วงการลุกติดไฟ (fire retardant) ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการลุกติดไฟของพลาสติกในระหว่างการใช้งาน

#### 2.5.7 สารเสริมแรง [10]

สารเสริมแรงเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติเชิงกลและทางกายภาพให้แก่วัสดุพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงอัด ความทนแรงกระแทก เป็นต้น โดยทั่วไปสารเสริมแรงส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอนินทรีย์ สารเสริมแรงควรมีความแข็งแรงและความแข็งมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ โดยหลักการ สารเสริมแรงที่ใช้จะมีรูปร่างหลายแบบ เช่น ผง อนุภาคทรงกลม เกล็ด เส้นใย เป็นต้น โดยสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยจะให้สมบัติการเสริมแรงที่สูงกว่ารูปร่างอื่นๆ ซึ่งเส้นใยอาจอยู่ในรูปของเส้นใยยาวหรือเส้นใยสั้นก็ได้ เส้นใยที่นิยมให้เสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม ได้แก่

2.5.7.1 เส้นใยคาร์บอน (carbon fibers) เส้นใยคาร์บอนที่ใช้เสริมแรงจะอยู่ในรูปของเส้นใยสั้น สามารถเตรียมได้จาก polyacrylonitrile หรือจาก pitch ซึ่งเส้นใยคาร์บอนทั้ง 2 ชนิด จะมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันไป โดยเส้นใยจาก pitch จะมีสมบัติทางกลที่ด้อยกว่าและมีราคาถูกกว่า การนำเส้นใยคาร์บอน ไปใช้งานจะคำนึงถึงสมบัติการนำไฟฟ้ามากกว่าสมบัติเชิงกลของมัน

2.5.7.2 เส้นใยพอลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymeric fibers) เส้นใยประเภทนี้ ได้แก่ เส้นใยอะรามิด (aramid) และเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเส้นใยเพทโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในรูปของเส้นใยสั้น ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจะนำไปใช้งาน

ประเภทที่ต้องการความทนต่อการขัดถู ในขณะที่เส้นใยพหุจะนิยมใช้ผสมกับเส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มความทนต่อแรงกระแทกและลดต้นทุนการผลิต

2.5.7.3 เส้นใยโลหะ (metal fibers) เส้นใยกลุ่มนี้ ได้แก่ เส้นใยแอสแตนเลสสตีล และเส้นใยอะลูมิเนียม เส้นใยเหล่านี้ไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลแก่วัสดุพอลิเมอร์ แต่จะช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านไฟฟ้าให้แก่วัสดุ เช่น electrostatic charge dissipation, electro magnetic sheilding เป็นต้น

2.5.7.4 เส้นใยเซรามิก (ceramic fibers) เส้นใยเซรามิก ได้แก่ เส้นใยอะลูมินา เส้นใยโบรอน เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ และเส้นใยอะลูมินาซิลิเกต เป็นต้น เส้นใยกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ใช้กับฟลูออโรพอลิเมอร์และเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบเหล่านี้จะใช้ในอุตสาหกรรมการบิน และชิ้นส่วนอุปกรณ์เคมีเป็นหลัก

2.5.7.5 เส้นใยธรรมชาติ (natural fibers) เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากส่วนประกอบของพืชซึ่งมีเซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนประกอบหลัก เส้นใยธรรมชาติแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มตามส่วนประกอบของพืชที่นำมาทำเป็นเส้นใย [7]

2.5.7.6 เส้นใยแร่ (mineral fibers) ตัวอย่างเช่น เส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) เส้นใยวอลลาสโตไนต์ (wallastonite) เส้นใยแคลเซียมซิลิเกต (calciumsilicate) และเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว (glass fibers) เส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงอย่างกว้างขวางเพราะมีราคาถูก และมีข้อดี คือ มีความอยู่ตัวหรือคงตัวของรูปร่าง มีความต้านทานต่อการสึกกร่อน มีความต้านทานต่อความร้อน ขึ้นรูปได้ง่าย มีความทนต่อแรงดึง ทนต่อสารเคมี ทนต่อแรงกระแทก และมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น เส้นใยแก้วสามารถแบ่งได้เป็นหลายชนิดด้วยกัน เช่น เส้นใยชนิดยาว เส้นใยชนิดสั้น เส้นใยชนิดเส้นด้าย เป็นต้น และนอกจากนี้เส้นใยแก้วก็ยังมีอีกหลายเกรดซึ่งมีสมบัติและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป ใยแก้วสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มตามส่วนประกอบทางเคมี และแสดงดังตารางที่ 2.3 [10] ดังนี้

กลุ่ม A-glass (alkali glass) เป็นใยแก้วที่มีปริมาณแอลคาไลสูง เสริมแรงได้จำกัด และทนทานน้ำได้ต่ำ ใยแก้วชนิดนี้ผลิตขึ้นมาเพื่อทำกระจกธรรมดา

กลุ่ม C-glass (chemical corrosion glass) เป็นใยแก้วที่มีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์สูง ทนการกัดกร่อนได้ดี ใช้ในกรณีที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง ส่วนมากใช้ในวงการแพทย์ โรงพยาบาล และงานวิทยาศาสตร์

กลุ่ม D-glass (dielectrical glass) มีสมบัติไดอิเล็กตริกดี มีความหนาแน่นต่ำ ส่วนใหญ่ใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

กลุ่ม E-glass (electrical glass) เป็นใยแก้วที่มีการผลิตและนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกเสริมแรงมากที่สุด มีสมบัติต้านทานไฟฟ้าดี และมีความแข็งแรงสูง

กลุ่ม S-Glass หรือ T-Glass (high-strength glass) เป็นใยแก้วที่มีความแข็งแรงสูงมาก (สูงกว่า E-Glass ประมาณ 30%) ใช้ในชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานอวกาศ เครื่องบินและจรวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติของใยแก้ว [10]

ประเภท ส่วนประกอบทางเคมี	A-Glass	C-Glass	D-Glass	E-Glass	S-Glass
SiO <sub>2</sub>	75	65	74	52-56	65
CaO	10	14	0.5	16-25	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	4	0.3	12-16	25
MgO	2.5	3	-	0-5	10
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6	22	5-10	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	0-1.5	-
Na <sub>2</sub> O	14.2	8	1.0	0-2	-
K <sub>2</sub> O	-	-	1.5	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.2	Trace	0.08	-
SO <sub>3</sub>	0.7	0.1	-	-	-
F <sub>2</sub>	-	-	-	0-1.0	-
ความถ่วงจำเพาะ	2.50	2.49	2.16	2.54	2.49
ดัชนีหักเห	1.51	1.54	1.47	1.55	1.52
ความทนแรงดึง	3,100	3,100	2,500	3,400	4,590
อิลาสติกมอดุลัส	74,000	71,000	75,000	73,000	85,500
จุดอ่อนตัว	1,300	1,380	1,420	1,555	1,580
Dielectric Constant at 1 MHz	5	6.8	3.85	5.8-6.4	4.9-5.3

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature reviews)

Alonso และคณะ [25] ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอพอกซีเรซินจากเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced epoxy foam) และเส้นใยอะรามิด (aramid fiber-reinforced epoxy foam) ที่อัตราส่วนร้อยละ 2.5 ถึง 5 และขนาดความยาวของเส้นใยตั้งแต่ 1.40 ถึง 6.30 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบกับโพลีเอพอกซีเรซินที่ไม่เติมเส้นใยเสริมแรง (epoxy foam) พบว่า การเติมเส้นใยเสริมแรงในโพลีเอพอกซีเรซินเป็นการช่วยพัฒนาสมบัติทางกายภาพ อาทิเช่น สมบัติการทนแรงอัด (compressive strength) สมบัติความแข็งแรงเฉือน (shear strength) และเมื่อความยาวของเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นยังเป็นการพัฒนาสมบัติทางกายภาพให้ดีขึ้น พิจารณาการกระจายขนาดเซลล์จากลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเอพอกซีเรซินจากเส้นใยอะรามิดมีขนาดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยต่ำกว่าโพลีเอทิลีนเรซิน ส่วนด้านสมบัติทางความร้อน วัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนเรซิน จากเส้นใยแก้วมีสมบัติความเสถียรทางความร้อน (thermal stability) สูงกว่าวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้งานวิจัย นอกจากนี้ยังศึกษาถึงลักษณะการยึดเกาะผิวของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเส้นใยเสริมแรง กับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ พบว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนเรซินจากเส้นแก้วจะมีพื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับโพลีเอทิลีนเรซินน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนเรซินจากเส้นอะรามิด ทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างผิวน้อยมาก แต่สามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้โดยการเติมสารเชื่อมโยง (sizing agent) ประเภทไซเลน

Kiyoshi และคณะ [26] ศึกษาผลการเติมเส้นใย Si-Al-C ลงในวัสดุเชิงประกอบ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide composite) ต่อค่าส่งผ่านความร้อน (thermal diffusivity,  $a$ ) และค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 0 ถึง 50 โดยมวล เส้นใย Si-Al-C ที่ใช้ในงานวิจัยมีความยาวเฉลี่ย 394 ไมโครเมตร อัดขึ้นรูปร้อนวัสดุเชิงประกอบ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 1800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้ความดัน 31 เมกะปาสคาล จากผลการศึกษาพบว่าที่ปริมาณส่วนผสมเส้นใย Si-Al-C ไม่เกินร้อยละ 20 โดยมวล ค่าการนำความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลง คือ มีค่าประมาณ 32.1 W/mK แต่เมื่อเพิ่มเส้นใย Si-Al-C ในวัสดุเชิงประกอบมากขึ้น ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนสูงสุดเมื่อส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบมีเส้นใย Si-Al-C ถึงร้อยละ 50 โดยมวล คือ มีค่าการนำความร้อนประมาณ 56.3 W/mK และเมื่อพิจารณาการส่งผ่านความร้อนที่อัตราส่วนเส้นใย Si-Al-C ร้อยละ 40 โดยมวล พบว่า ค่าการส่งผ่านความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น คือ ลดจาก 0.185 (cm)<sup>2</sup>/s เป็น 0.120 (cm)<sup>2</sup>/s เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจากอุณหภูมิห้องเป็นอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

Jong Kyoo Park และ Tae Jin Kang [27] ศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ จากเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส (low temperature carbon fibers : LTCF) และ 1,500 องศาเซลเซียส (high temperature carbon fiber: HTCF) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าวัสดุเชิงประกอบฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ จาก LTCF (LTCF-PE) มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์จาก HTCF (HTCF-PE) ประมาณร้อยละ 35 ในแนวขนานและร้อยละ 10 ในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบ นอกจากนี้ยังพบว่า LTCF-PE มีค่าอัตราการกร่อนสูงกว่า HTCF-PE ประมาณร้อยละ 30 ผู้วิจัยจึงสรุปว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นการพัฒนาสมบัติการเป็นฉนวนของวัสดุให้ดีขึ้น แต่จะลดความสามารถในการต้านทานการกร่อนในเนื้อวัสดุลง

Tae Jin Kang และคณะ [28] ศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ จากเส้นใยคาร์บอนแบบเส้นสั้น เส้นยาวและแบบผสมคละ ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าวัสดุเชิงประกอบฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ จากเส้นใยคาร์บอน แบบเส้นใยยาวมีสมบัติการต้านทานแรงดึง และสมบัติความโค้งงอสูงสุด แต่มีสมบัติความแข็งแรง เหนือต่ำที่สุด ส่วนสมบัติทางความร้อนวัสดุเชิงประกอบฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ จากเส้นใย คาร์บอนแบบเส้นสั้นมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดในทิศทางแนวระนาบ ส่วนวัสดุเชิงประกอบฟีน ออล-ฟอร์มาลดีไฮด์ จากเส้นใยคาร์บอนแบบผสมคละ คุณสมบัติการนำความร้อนขึ้นอยู่กับอัตรา ส่วนผสมระหว่างเส้นใยคาร์บอนแบบเส้นยาวและเส้นสั้น โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นใยคาร์บอน แบบเส้นยาวในเนื้อวัสดุเชิงประกอบมากขึ้นมีผลกระทบให้ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิง ประกอบสูงขึ้น

Tae Jin Kang และคณะ [29] ศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพีโนลิกจากเส้นใยคาร์บอน แบบพันและแบบต่อเนื่อง ต่อคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ เส้นใยคาร์บอนแบบต่อเนื่องมีคุณสมบัติ การทนแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นสูง ส่วนเส้นใยคาร์บอนแบบพันมีค่าความเค้นแรงเฉือนและค่า การนำความร้อนต่ำ จากการศึกษาพบว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนแบบพันส่งผลให้ค่าความเค้นแรง ดึงและค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 28 และร้อยละ 20 ตามลำดับ และมีค่า ความเค้นแรงเฉือนที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยคาร์บอนแบบต่อเนื่อง ส่วนค่าการนำความ ร้อนของวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยคาร์บอนแบบพัน จะมีค่าต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใย คาร์บอนแบบพัน ร้อยละ 4-8 และการเพิ่มปริมาณเส้นใยคาร์บอนส่งผลให้ค่าการนำความร้อน ลดลง

Shen และ Nutt [30] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของพีโนลิก โฟมเปรียบเทียบกับพีโนลิก โฟมที่ เติมเส้นใยในรูปของค่าความเปราะ คุณสมบัติการกดอัดและเฉือน การงอโค้งในลักษณะของคาน รูปแซนวิช โดยเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยคือเส้นใยแก้วและเส้นใยอะรามิดที่มีความยาว 6.4 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมเส้นใยร้อยละ 5-10 โดยมวล ผลการศึกษาพบว่า โฟมพีโนลิกที่เติมเส้นใยอะรามิดมีค่าความเปราะต่ำ มีความต้านทานการหักสูง และมีความเสถียร สูง ในขณะที่โฟมพีโนลิกที่เติมเส้นใยแก้วมีค่าความแข็งแรงและแข็งแรงกว่าเมื่อเทียบกับโฟมพีโนลิก

kodah และคณะ [31] ศึกษาคุณลักษณะสมบัติทางความร้อนของฉนวนกันความร้อนวัสดุเชิง ประกอบโพลียูรีเทน โฟมจากวัสดุธรรมชาติในท้องถิ่น โดยทำการศึกษา พอลิยูรีเทน โฟม วัสดุเชิง ประกอบพอลิยูรีเทน โฟมจากฟางแห้ง และวัสดุเชิงประกอบพอลิยูรีเทน โฟมจากชานอ้อย ในรูป ของวัสดุแผ่นเรียบ โดยนำแต่ละชนิดประกอบกันขึ้นเป็นห้องปิด แล้วให้ความร้อนส่งถ่ายออกมา จากแหล่งความร้อนภายในห้อง และเก็บค่าอุณหภูมิในลักษณะสามมิติ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของผนังทั้งทางแนวนอนและแนวตั้ง พบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิยูรีเทน โฟมจากฟางและ ชานอ้อยมีความเป็นฉนวนกันความร้อนดีกว่าโพลียูรีเทน โฟม โดยมีความต้านทานความร้อนสูง กว่าและมีต้นทุนการผลิตที่ลดลง ในงานวิจัยนี้ยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิยูรีเทน โฟมจากฟางมี ประสิทธิภาพการเป็นฉนวนที่ดีที่สุดและมีราคาต่ำสุด โดยข้อมูลที่น่าเสนอนี้จะเป็นไปในรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลไร้หน่วย (non-dimensional) ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิแบบไร้หน่วยที่ไม่ขึ้นอยู่กับแหล่งความร้อนที่ให้กับระบบ ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรก ศึกษาหาอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเชิงประกอบโพลีเมียงโดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารให้ฟอง และส่วนที่สองศึกษาผลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมียง ซึ่งรายละเอียดของสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง การทดสอบสมบัติของเส้นใยแก้วและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมียง มีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ยางธรรมชาติ (NR)
- 3.1.2 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO)
- 3.1.3 กรด สเตียริก (stearic acid)
- 3.1.4 MBTS (2,2-benzothiazole disulphide)
- 3.1.5 50% TMTM (tetramethylthiuram monosulfide)
- 3.1.6 กำมะถัน (sulfur)
- 3.1.7 สารให้ฟอง (blowing agent) ชนิด (azodicarbonamide)
- 3.1.8 สารหน่วงไฟ (antimony retardants)
- 3.1.9 เส้นใยแก้ว (fiber glass)

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องบดบอลมิล (ball mill)
- 3.2.2 เครื่องบด (hammer machine) ยี่ห้อ Lincoln รุ่น TF 4209 ขนาด 3 แรงม้า (hp)
- 3.2.3 ตระแกรงร่อนมาตรฐาน (sieves) U.S.A. standard testing ASTM E11 specification
- 3.2.4 เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill)
- 3.2.5 เครื่องอัดด้วยความร้อน (hot compression machine)
- 3.2.6 แม่พิมพ์ขึ้นรูปโพลีเมียง ขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 200x100x10 มิลลิเมตร
- 3.2.7 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic densimeter) รุ่น MD-200S
- 3.2.8 เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ (electronic balance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.9 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (tensile testing machine)

3.2.10 อุปกรณ์วัดความหนา (thickness gauge)

3.2.11 เวอร์เนีย (vernier caliper)

3.2.12 เครื่องทดสอบการนำความร้อน (thermal conductivity measurement) รุ่น Fox 304 ของ

บริษัท Laser com

3.2.13 เครื่องทดสอบความแข็งของวัสดุแบบ durometer hardness ใช้หัวเจาะ ชอร์ เอ

3.2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

3.2.15 ชุดทดสอบการนำความร้อน

3.2.16 เทียนไข

3.2.17 ไม้ขีดไฟ

3.2.18 มีดสำหรับกรีดพอลิเมอร์ผสม

3.2.19 ตู้อบสารเคมี (oven)

3.2.20 ถูมือกันความร้อน

### 3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง

เนื่องจากเศษใยแก้วจากกระบวนการผลิตของโรงงาน ส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะเป็นผืน และเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดไม่แน่นอน และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดเส้นใยแก้วกับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง จึงทำการเตรียมเส้นใยแก้ว โดยการบดลดขนาด ก่อนที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง โดยงานวิจัยนี้ทำการลดขนาดของเศษฉนวนใยแก้วให้ได้ 2 ชนิด คือ ชนิดเส้นสั้นและชนิดผง

ก) เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น

ตัดเศษใยแก้วให้ได้ชิ้นงานขนาดที่สามารถป้อนเข้าสู่เครื่องบดได้ โดยในงานวิจัยนี้ ตัดให้ได้ขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร ป้อนเข้าเครื่องบดที่อัตรา 3 kg/hr ที่ความเร็วรอบเครื่อง 1,440 rpm จากนั้นนำไปศึกษาการกระจายขนาดของเส้นใยแก้วโดยใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐาน

ข) เส้นใยแก้วชนิดผง

นำเศษใยแก้วชนิดเส้นสั้นมาบดซ้ำให้ได้ขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดขนาดบอลมิล (ball mill) โดยใส่เศษใยแก้วชนิดเส้นสั้น 200 กรัม ใน โม่บดขนาด 5.5 ลิตร และใส่ลูกบดทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาว เท่ากับ 2 X 2 เซนติเมตร จำนวน 200 ลูก ปิดฝาโม่ให้แน่น แล้วนำไปวางในเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปศึกษาการกระจายขนาดของเส้นใยแก้วโดยใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเตรียมยางคอมปาวด์สำหรับนำไปขึ้นรูปโฟม

#### 3.3.2.1 อัตราส่วนผสม

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่างานวิจัยนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรก ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารให้ฟองตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr โดยควบคุมปริมาณอัตราส่วนผสมของสารอื่นๆคงที่ ดังแสดงอัตราส่วนผสมในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ที่ปริมาณสารให้ฟอง ตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr

วัตถุดิบ	สูตรการผสม (phr)					
	1	2	3	4	5	6
1. ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100	100
2. ไบแก้ว	10	10	10	10	10	10
3. Antimony	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
4. ซิงค์ออกไซด์	10	10	10	10	10	10
5. กรด สเตียริก	2	2	2	2	2	2
6. MBTS	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16
7. 50% TMTM	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
8. กำมะถัน	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
9. Azodicarbonamide	0	5	10	15	20	30

เลือกอัตราส่วนผสมที่แสดงลักษณะการเกิดโฟมดีที่สุดและค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด โดยพิจารณาจาก ลักษณะพื้นฐานวิชา ความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาผลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ต่อไป

สำหรับการทดลองส่วนที่สอง เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางและกำจัดขยะอุตสาหกรรมชนิดเศษฉนวนใยแก้วกันความร้อนให้ได้ปริมาณมาก ทำการวิจัย โดยการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในอัตราส่วนผสม เริ่มศึกษา ตั้งแต่ 0 ถึง 100phr โดยเลือกใช้ปริมาณสารให้ฟองคงที่ค่าหนึ่ง ดังแสดงอัตราส่วนผสมในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ที่ปริมาณใยแก้วตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr

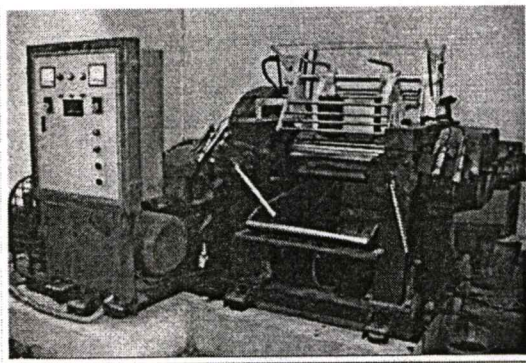
วัตถุดิบ	สูตรการผสม (phr)				
	1	2	3	4	5
1. ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100
2. เส้นใยแก้ว	0	30	50	70	100
3. Antimony	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
4. ซิงค์ออกไซด์	10	10	10	10	10
5. กรด สเตียริก	2	2	2	2	2
6. MBTS	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16
7. 50% TMTM	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
8. กำมะถัน	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
9. azodicarbonamide	x	x	x	x	x

หมายเหตุ X คือ ปริมาณสารให้ฟองคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่เลือกมาจากการทดลองหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการทดลองส่วนแรก

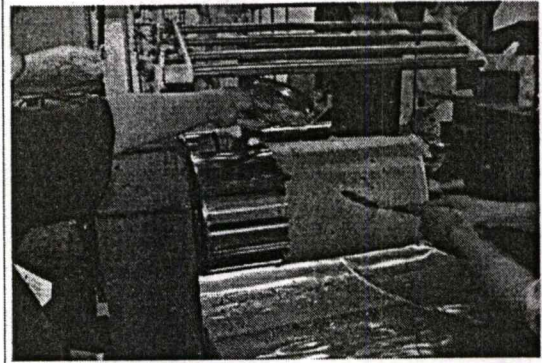
### 3.3.2.2 การผสมวัตถุดิบ

ก. นำยางธรรมชาติใส่เข้าไปในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งเพื่อทำการบด เป็นเวลาประมาณ 10 นาที สังเกตเห็นได้ว่ายางธรรมชาติเริ่มอ่อนนุ่ม จากนั้นจึงใส่สารหน่วงไฟ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก MBTS TMTM และสารให้ฟอง ตามอัตราส่วนผสมในตารางที่ 3.1 พร้อมกับใช้มีดกรีดพอลิเมอร์ตัดเนื้ออย่างทับทันทันไปมาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของสารต่างๆ ในเนื้อยางได้ดี โดยใช้เวลาผสมประมาณ 30 นาที ต่อการผสม 800 กรัมต่อกะ(batch) โดยควบคุมอุณหภูมิการผสมให้อยู่ในช่วง 35 ถึง 45 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำหล่อเย็น

ข. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว ปรับให้ระยะห่างของลูกกลิ้งห่างกันประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อรีดยางผสมออกมาในลักษณะแผ่น แล้วทิ้งให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปขึ้นรูปต่อไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้เรียกว่า ยางคอมปาวด์



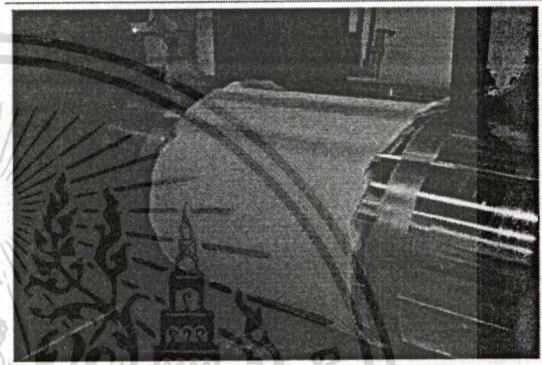
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนในกระบวนการผสมยางคอมปาวด์ (ก) เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (ข) การเทส่วนผสมแต่ละส่วนผสมกับยางธรรมชาติ (ค) การกรีดแล้วพับกลับไปกลับมา เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (ง) ชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนการผสมสาร

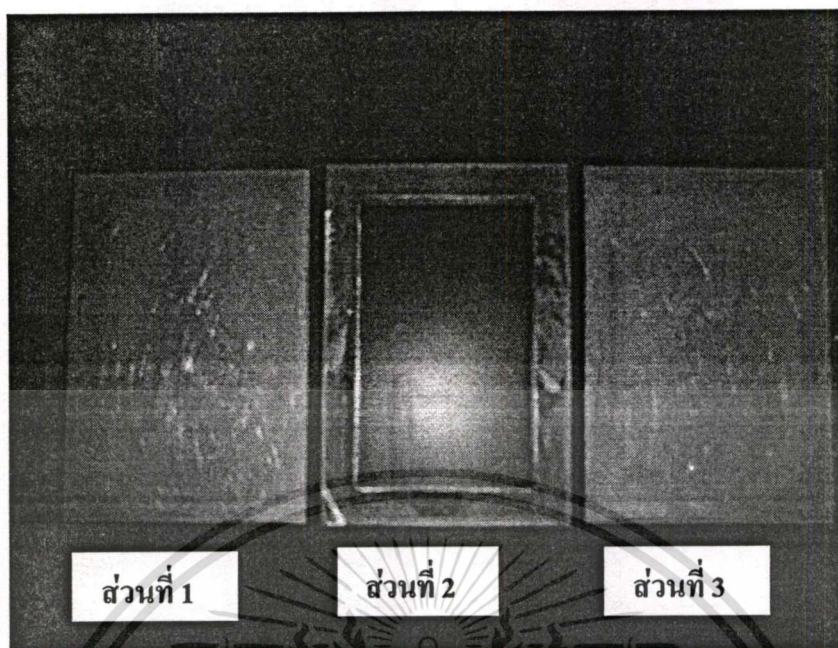
### 3.3.2.3 การขึ้นรูปโฟมยาง

ก. นำแม่พิมพ์ไปให้ความร้อนด้วยเครื่องอัดร้อน ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที โดยแม่พิมพ์ที่ใช้ทำจากเหล็ก ประกอบด้วยกัน 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 และส่วนที่ 3 มีขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 200x100x10 มิลลิเมตร และส่วนที่ 2 มีขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 200x100x10 มิลลิเมตร เจาะเป็นช่องตรงกลางขนาด 180x80x10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก)

ข. ชั่งยางคอมปาวด์ โดยให้มีน้ำหนักประมาณ 140 กรัม บรรจุลงในแม่พิมพ์ แล้วใส่เข้าเครื่องอัดแบบร้อน ที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.2 (ข) ใช้เวลาอัดขึ้นรูปประมาณ 10 นาที

ค. เมื่อครบตามเวลา เครื่องอัดแบบร้อนจะเปิดออก นำแผ่นโฟมยางที่เตรียมได้ ออกจากแม่พิมพ์และนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบคุณสมบัติต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ขึ้นรูปโคมยาง โดย (ก) แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโคมยาง (ข) เครื่องอัดรีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การทดสอบสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์การกระจายขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว

นำเส้นใยแก้วที่ต้องการวิเคราะห์การกระจายขนาดใส่ในเครื่องคัดขนาด ตั้งเวลาให้เครื่องทำการร่อนคัดขนาดเป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลาตามที่กำหนด นำตะแกรงแต่ละชั้นมาปิดด้วยแปรงขนอ่อนและชั่งน้ำหนักของเส้นใยแก้วที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละชั้น แล้วบันทึกค่าน้ำหนักของเส้นใยแก้วในแต่ละชั้น

ส่วนในการวิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว ให้ทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 3.4.2 การวัดค่าความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว (bulk density)

นำเส้นใยแก้วที่ต้องการวัดความหนาแน่นใส่ในกระบอกตวงขนาด 150 มิลลิลิตร โดยในระหว่างที่บรรจุให้ทำการเขย่ากระบอกตวงตลอดเวลา นำกระบอกตวงที่มีใยแก้วบรรจุอยู่ไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว ตามสมการ 3.1

$$\rho = \frac{(W_b - W_a)}{V} \quad (3.1)$$

$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของเส้นใยแก้ว, (กรัมต่อมิลลิลิตร)
$W_a$	คือ	น้ำหนักของกระบอกตวง, (กรัม)
$W_b$	คือ	น้ำหนักของกระบอกตวงรวมกับเส้นใยแก้ว, (กรัม)
$V$	คือ	ปริมาตรของกระบอกตวง, (มิลลิลิตร)

### 3.5 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฝมายางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง

#### 3.5.1 การวิเคราะห์อัตราขยายตัวของโฝม (expansion ratio analysis)

อัตราขยายตัวของโฝมายางและวัสดุเชิงประกอบโฝมายาง คำนวณได้จากค่าความหนาแน่นของแผ่นยางคอมปาวด์เทียบกับค่าความหนาแน่นของโฝมายางหรือวัสดุเชิงประกอบโฝมายาง สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.2

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (3.2)$$

- $\varphi$  คือ อัตราการขยายตัวของโฟม, (expansion ratio)  
 $\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของยางหรือวัสดุเชิงประกอบยาง, (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของโฟมยางหรือวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง, (g/cm<sup>3</sup>)

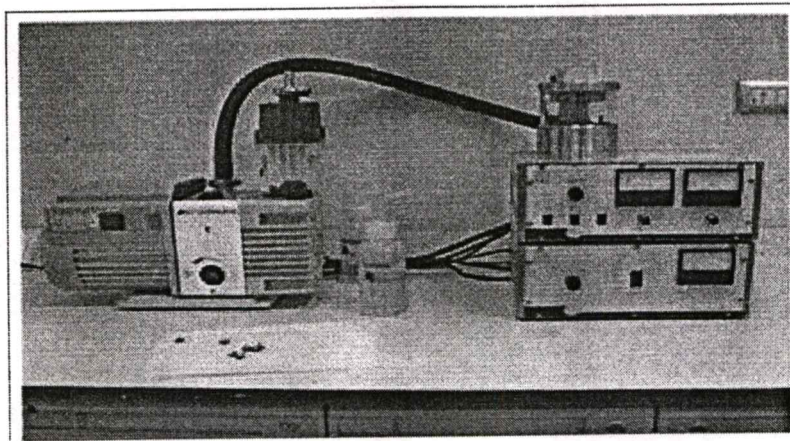
โดยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำการศึกษาคือ รุ่น MD-2000S ซึ่งใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) เพื่อหาความหนาแน่นและความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1.00 g/cm<sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นค่าอ้างอิง เครื่อง MD-2000S สามารถวัดความหนาแน่นของวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ ยกเว้นวัสดุที่เป็นผงและของเหลวที่มีความหนืดสูง วัสดุตัวอย่างที่นำมาทดสอบคือ โฟมที่เป็นพอลิเมอร์ผสม โดยตัวกลางของเหลวคือน้ำ ก่อนที่จะทำการวัดค่า จะต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อยเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการใช้งาน เพื่อเป็นการอุ่นเครื่องและเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส)

### 3.5.2 ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของโฟม (morphology analysis)

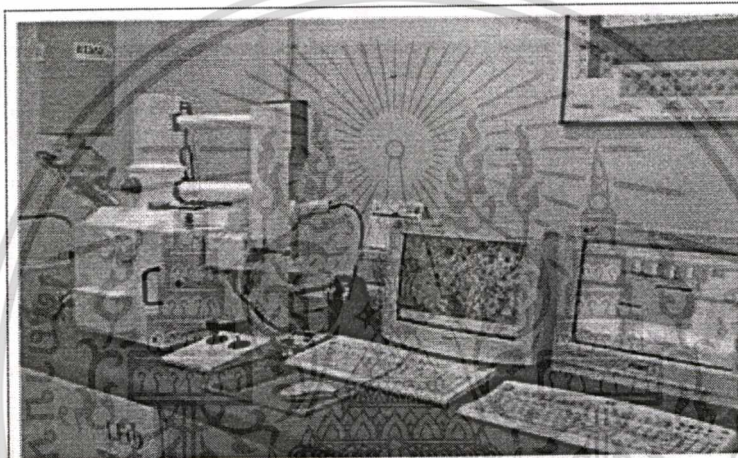
3.5.2.1 การเตรียมชิ้นตัวอย่างโฟม เนื่องจากผลิตภัณฑ์โฟมยางและวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง มีลักษณะอ่อนนุ่มและเหนียว ดังนั้นการตัดชิ้นตัวอย่างเพื่อดูภาคตัดขวางของโฟม จึงต้องใช้วิธีการแช่โฟมตัวอย่างลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 30 นาที การแช่ตัวอย่างโฟมในไนโตรเจนเหลวจะทำให้โฟมแข็งตัวและเปราะสามารถแตกหักได้ง่าย ทำให้พื้นที่ของชิ้นตัวอย่างโฟมเรียบ ไม่เกิดการขีดตัวของโฟมยางหรือวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง และสามารถสังเกตพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างโฟมได้ชัดเจน ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ จะได้ชิ้นตัวอย่างโฟมสำหรับศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา

3.5.2.2 นำชิ้นงานโฟมไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 1 ชม. เพื่อให้ชิ้นโฟมตัวอย่างมีสมบัติในการนำไฟฟ้า

3.5.2.3 ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของโฟม (morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบสัณฐานวิทยา (morphology) โดย (ก)เครื่องกล้องส่องทางไกลและ(ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.5.3 การวิเคราะห์หาขนาดและจำนวนเซลล์ (size and quantity of cell analysis)

โดยทั่วไป โฟมพลาสติกที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอและมีคุณสมบัติเท่ากันตลอดปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะประกอบด้วย 1,000 ถึง 10,000 เซลล์ โดยจะมีความแตกต่างของขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12% ถึง 25% ขนาดของเซลล์และการกระจายขนาดของเซลล์ไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ แต่ยังขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการขึ้นรูปโฟมด้วย จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรโฟม ( $n$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญและมีการใช้อยู่บ่อยครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส หรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมในส่วนของตัวอย่างนั้น ตัวแปร  $n$  เป็นฟังก์ชันกับขนาดของเซลล์และความหนาแน่นของโฟมพลาสติกและจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร โฟมสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้

ดังสมการที่ 3.3 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

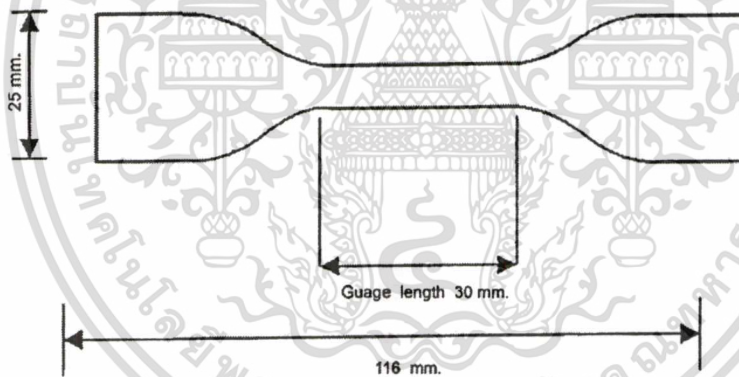
$$n = \left( \frac{n_b}{\ell^2} \right)^{3/2} \times 10^3 \times \varphi \quad (3.3)$$

โดยที่

- $n$  คือ จำนวนเซลล์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรของโฟม  
 $n_b$  คือ จำนวนเซลล์ในพื้นที่  
 $\ell$  คือ ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร  
 $\varphi$  คือ อัตราการขยายตัว (expansion ratio)

#### 3.5.4 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile strength test)

ทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Lloyd ; LR30K) ใช้ชิ้นตัวอย่างโฟมทดสอบรูปคัมเบลล์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้ เครื่องวัดแรง (load cell) ขนาด 300 KN อัตราเร็วในการดึง 300 มิลลิเมตรต่อนาที โดยสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength)



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ทดสอบรูปคัมเบลล์

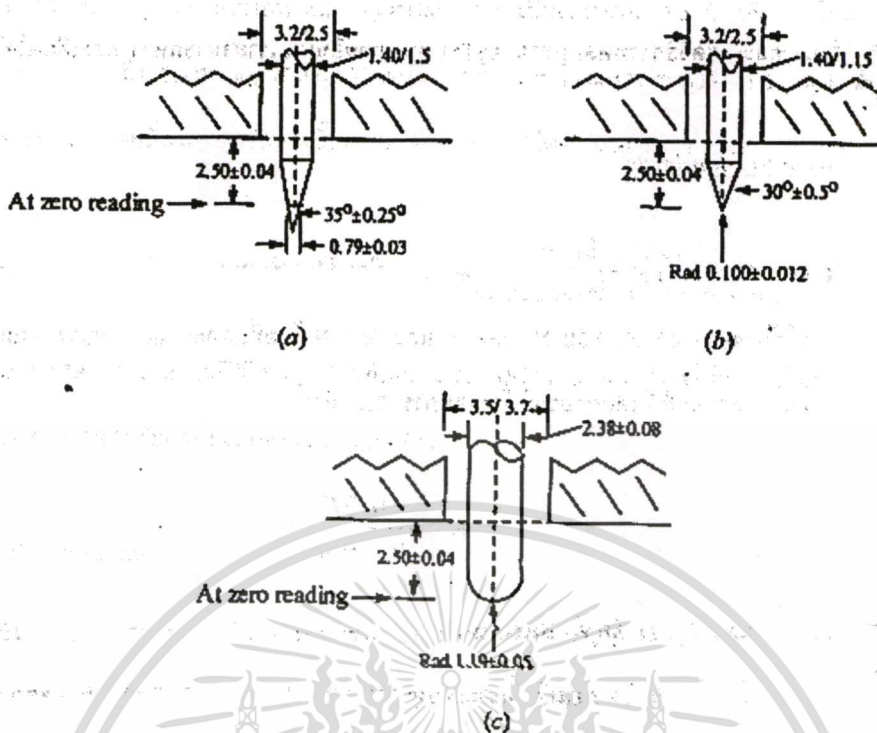


รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (tensile testing machine)

เครื่องวัดแรงดึงที่นิยมใช้แสดงดังรูปที่ 3.5 เรียกว่าเครื่องทดสอบแรงดึง (tensile testing machine) ตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนจับตัวอย่าง (grip) สองข้าง ข้างหนึ่งอยู่กับที่ อีกข้างหนึ่งติดกับส่วนให้แรงที่สามารถเคลื่อนที่ให้แรงดึง หรือเคลื่อนที่ลงให้แรงกดอัด (compression) ในอัตราเร็ว (crosshead speed) ที่สามารถควบคุมได้ โดยจะมีเครื่องวัดแรง (load cell) ต่ออยู่ ทำหน้าที่วัดแรงที่ใช้ดึงหรือกดอัดตัวอย่าง ส่วนจับตัวอย่าง (grip) มีหลายชนิด จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับตัวอย่างสามารถจับตัวอย่างได้ดี ไม่เกิดการลื่นหลุด หรือทำให้ตัวอย่างบิดเบี้ยว

### 3.5.5 การทดสอบสมบัติความแข็ง (hardness test)

ทดสอบสมบัติความแข็งตามมาตรฐาน ASTM 2240 ด้วยเครื่องทดสอบแบบ durometer หรือที่เรียกกันว่า shore durometer โดยอาศัยหลักการ ของความสามารถของหัววัดค่าความแข็งที่มีลักษณะเป็นเข็ม โลหะที่มีขนาดเฉพาะที่กำหนด ที่เรียกว่า หัวเจาะทดสอบ (indentor) ในการเจาะทิ่มแทงลงไปบนชิ้นทดสอบ ในเวลาที่กำหนดให้ ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบจะขึ้นอยู่กับค่า elastic modulus และ พฤติกรรมแบบ viscoelastic ของวัสดุที่นำมาทดสอบ และค่าแรงที่กดลงบนชิ้นงานทดสอบ จะมีผลต่อค่าการทดสอบ โดยที่ไม่สามารถหาค่าความสัมพันธ์อย่างง่าย เมื่อใช้หัวทดสอบต่างชนิดกัน โดยทั่วไปแบ่งชนิดของหัวทดสอบตามรูปร่างลักษณะของหัวเจาะ โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มของหัวเจาะ โดยที่หัวเจาะทดสอบแต่ละชนิดก็เหมาะสมกับตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแตกต่างกันออกไป แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงหัวเจาะทดสอบความแข็ง (a) shore A และ C (b) shore B และ D (c) shore DO, O และ OO

### 3.5.6 การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ (water absorption test)

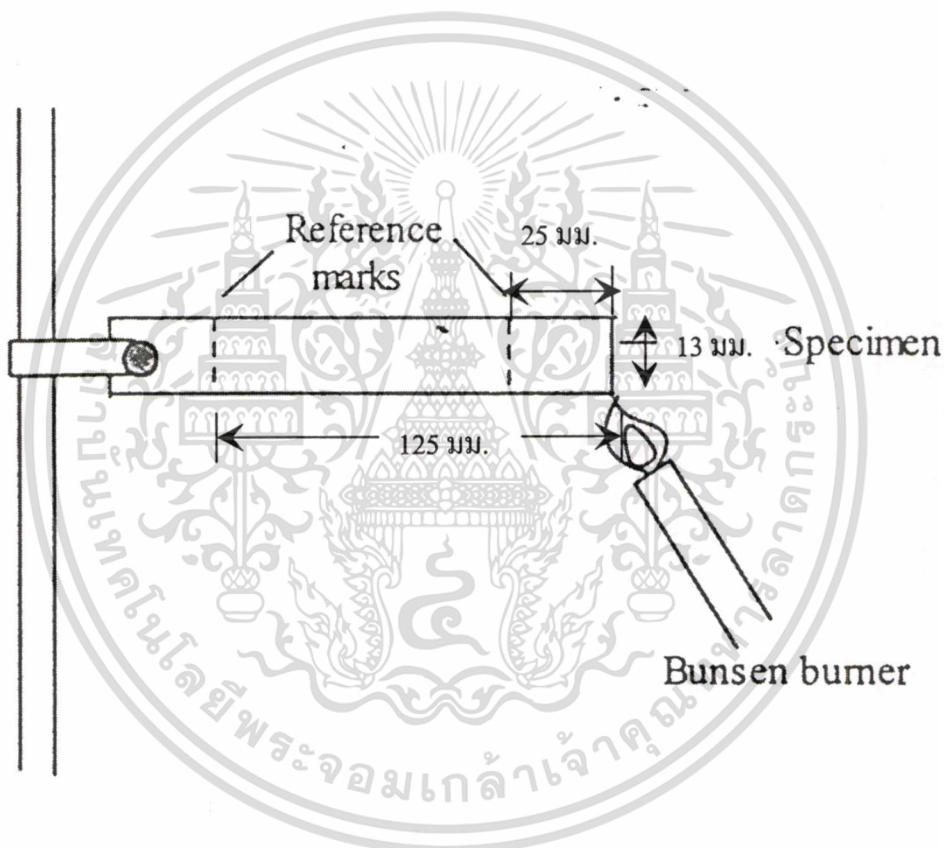
การวิเคราะห์หาร้อยละการดูดซับน้ำ (% water absorption) ของโฟมยางและวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง คำนวณได้จาก ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างก่อนและหลังแช่น้ำหารด้วย น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างก่อนแช่น้ำ คูณด้วย 100 ดังสมการ 3.4

$$\% \text{ water absorption} = \frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100 \quad (3.4)$$

$W_b$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างหลังแช่น้ำ  
 $W_a$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างก่อนแช่น้ำ

### 3.5.7 การทดสอบสมบัติการลามไฟ (flame test)

ทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน ASTM D 635 โดยใช้แท่งชิ้นทดสอบที่มีขนาดยาว 150 มิลลิเมตร กว้าง 13 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 10 มิลลิเมตร ทำเครื่องหมายอ้างอิง ณ ระยะทาง 25 มิลลิเมตร และ 125 มิลลิเมตร จากปลายด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 3.7 ยึดชิ้นทดสอบให้อยู่ในตำแหน่งขนานกับพื้น โดยให้ระนาบทางด้านกว้างทำมุม 45 องศา ใช้เปลวไฟที่มีความสูง 13 มิลลิเมตร หรือ 19 มิลลิเมตร จ่อเข้าที่ปลายตรงข้ามกับแท่นยึดเป็นเวลา 10 วินาที จับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ในช่วงระยะทาง 100 มิลลิเมตร ที่ทำเครื่องหมายไว้ ทำการทดสอบ 5 ชิ้นทดสอบต่อหนึ่งตัวอย่างการทดสอบ แล้วหาค่าเวลาเฉลี่ย



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดสอบการลามไฟ

### 3.5.8 การทดสอบการนำความร้อน (thermal conductivity tasting)

การทดสอบการนำความร้อนใช้วิธีวัดตามมาตรฐาน ASTM C 518 โดยจัดเตรียมชุดทดสอบ ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดค่าการนำความร้อน รุ่น fox 304

ทำการทดสอบการนำความร้อนของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการนำชิ้นงานเข้าเครื่องวัดค่าการนำความร้อนทำการวัดโดยใช้โปรแกรมวินเทอม ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการวัด โดยในการทดลองนี้จะตั้งแผ่นให้ความร้อนที่ 36 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นหล่อเย็นที่ 11 องศาเซลเซียส (เพื่อให้ได้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 24 องศาเซลเซียส) แล้วป้อนชื่อและความหนาของตัวอย่างที่ต้องการวัด เครื่องจะทำการวัดค่าการนำความร้อน โดยอัตโนมัติและหยุดเองเมื่อการวัดสิ้นสุดลง จากนั้นบันทึกค่าการนำความร้อนที่วัดได้ โดยข้อควรระวังในการใช้เครื่องวัดค่าการนำความร้อน คือ ตรวจสอบเช็คการไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นทุกครั้งก่อนการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการศึกษาสมบัติของเส้นใยแก้ว

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ ของเส้นใยแก้ว ที่ใช้เดิม เป็นสารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง เส้นใยแก้วที่นำมาศึกษาประกอบด้วยเส้นใยแก้ว 2 รูปแบบ คือ เส้นใยแก้วชนิดเส้นใยสั้นและชนิดผง ดังรูปที่ 4.1

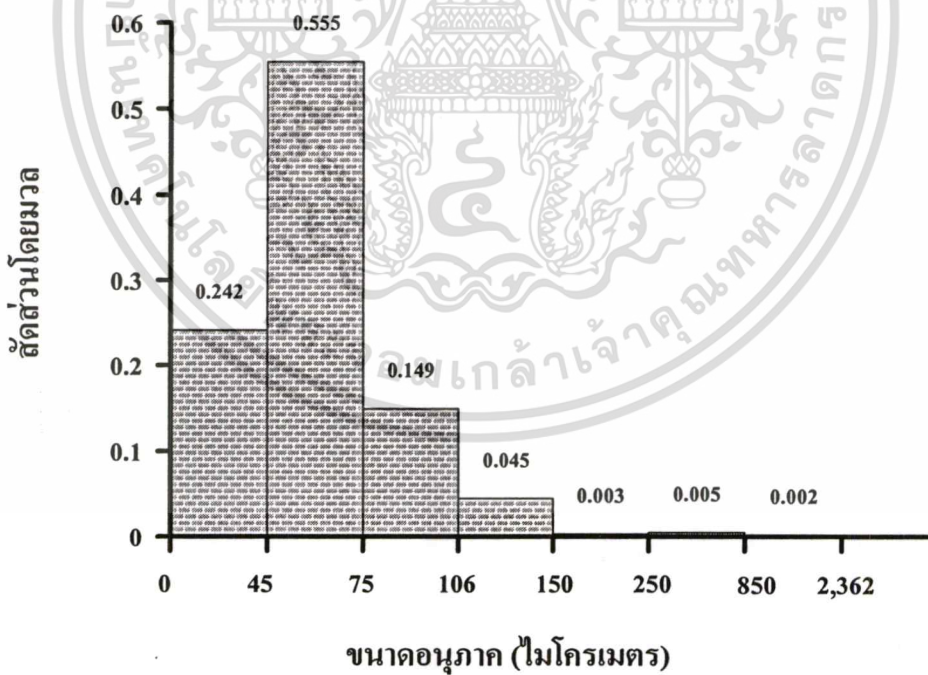
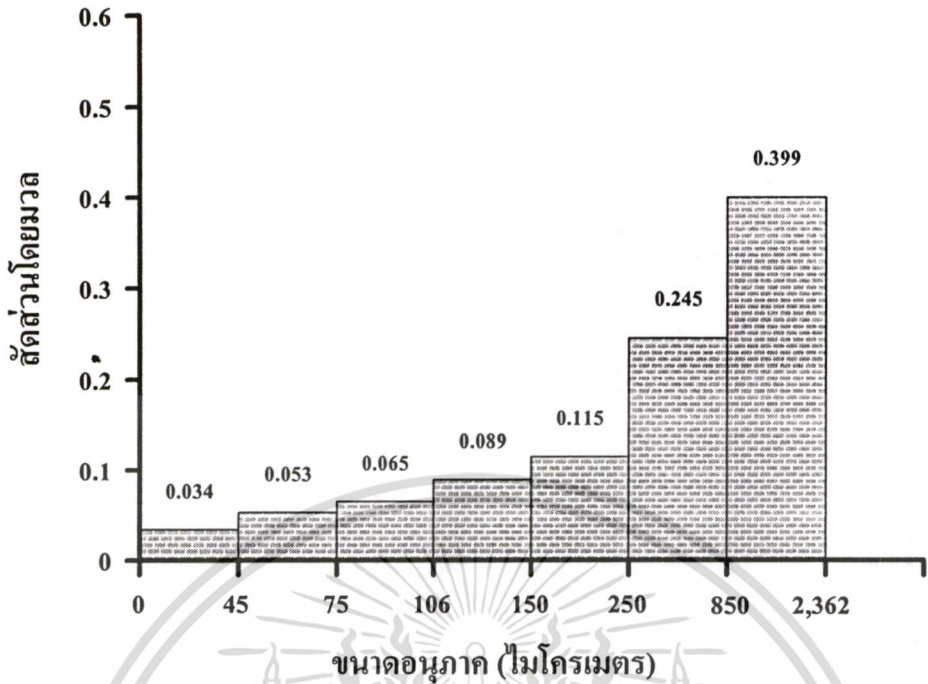


(ก) ชนิดเส้นสั้น

(ข) ชนิดผง

รูปที่ 4.1 ลักษณะของเส้นใยแก้ว โดย (ก) เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและ (ข) เส้นใยแก้วชนิดผง

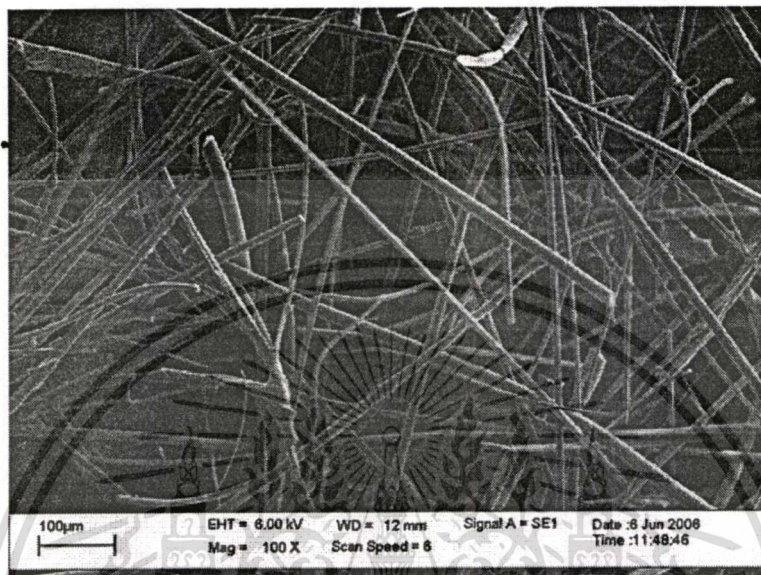
เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น คือ เส้นใยแก้วที่ได้จากการบดเศษจนวนใยแก้วกันความร้อนด้วย เครื่องบดหยาบ โดยพบว่าเส้นใยแก้วที่ได้มีลักษณะฟู เส้นใยแก้วจับตัวกันเป็นกลุ่มๆ ดังแสดงใน รูป 4.1 (ก) ส่วนเส้นใยแก้วชนิดผง คือ เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นที่บดละเอียดด้วยลูกบดเซรามิก เป็น เวลา 1 ชั่วโมง ได้เส้นใยที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด ดังแสดงในรูป 4.1 (ข) และเมื่อนำเส้นใยแก้วทั้ง 2 ชนิดมาวิเคราะห์หาการกระจายตัว ได้ผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเส้นใย ดังรูปที่ 4.2



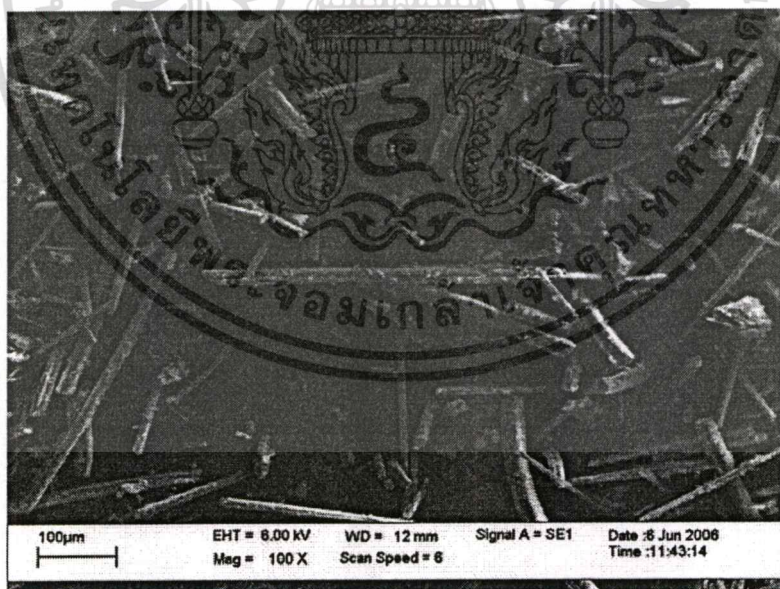
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแก้ว โดย (ก) เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและ(ข) เส้นใยแก้วชนิดผ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.2 (ก) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีขนาดความยาวของเส้นใย กระจายตัว อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 850 ไมโครเมตร ส่วนรูป 4.2 (ข) แสดงการกระจายตัวของขนาดความยาวของ เส้นใยแก้วชนิดผงอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 106 ไมโครเมตร สามารถวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยของเส้นใยแก้วได้ โดยการพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ดังรูปที่ 4.3



(ก)



(ข)

**รูปที่ 4.3** ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยแก้ว โดย (ก)เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น (ข)เส้นใยแก้ว ชนิดผง ที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่า เส้นใยแก้วทั้ง 2 ชนิดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 7 ไมโครเมตร ส่งผลให้สัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio, L/D) ของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีค่าประมาณ 117 และเส้นใยแก้วชนิดผงมีค่าประมาณ 9

เส้นใยแก้วทั้ง 2 ชนิดถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค ความหนาแน่นของแก้ว ความหนาแน่นของเส้นใยและสัดส่วนของน้ำยาประสาน ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1 และภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง

คุณสมบัติ	ใยแก้วชนิดเส้นสั้น	ใยแก้วชนิดผง
ความหนาแน่นเฉลี่ยของอนุภาคแบบกลุ่ม (bulk density), (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.070	0.101
ความหนาแน่นเฉลี่ยของวัตถุแก้ว (glass density), (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.541	2.541
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	7.0	7.0
สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	117	9
สัดส่วนน้ำยาประสาน (%)	9.09	9.09

#### 4.2 ผลการศึกษาปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง

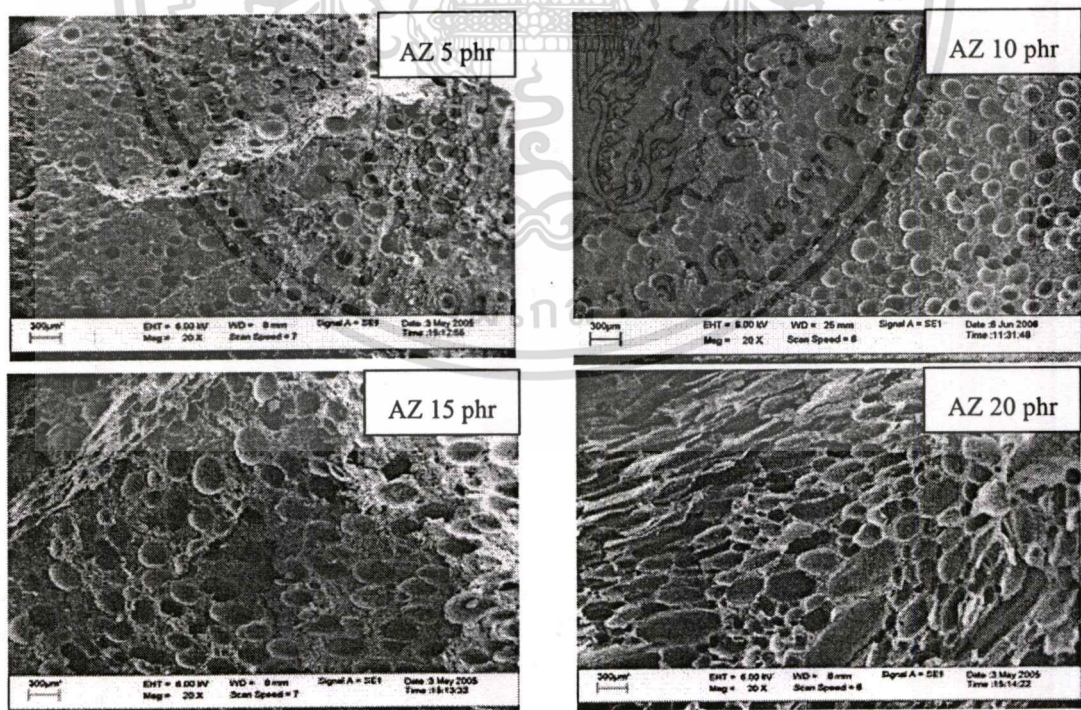
การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของสารให้ฟองต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 4.2 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารให้ฟองอยู่ในช่วง 0 ถึง 30 phr ทำการผสมวัตถุดิบโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เป็นเวลา 30 นาที ขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบโฟมยางโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำชิ้นงานมาทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ขนาดและจำนวนเซลล์ รวมทั้งสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น อัตราการขยายตัว และค่าการนำความร้อน เป็นต้น

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางที่ปริมาณสารให้ฟอง ตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr

วัตถุดิบ	สูตรการผสม (phr)					
	1	2	3	4	5	6
1. ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100	100
2. ไยแก้ว	10	10	10	10	10	10
3. Antimony	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
4. ซิงค์ออกไซด์	10	10	10	10	10	10
5. กรด สเตียริก	2	2	2	2	2	2
6. MBTS	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16
7. 50% TMTM	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
8. กำมะถัน	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
9. Azodicarbonamide	0	5	10	15	20	30

#### 4.2.1 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง

การศึกษาพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อัตราส่วนผสมของสารให้ฟองที่ 5 ถึง 20 phr แสดงดังรูปที่ 4.4

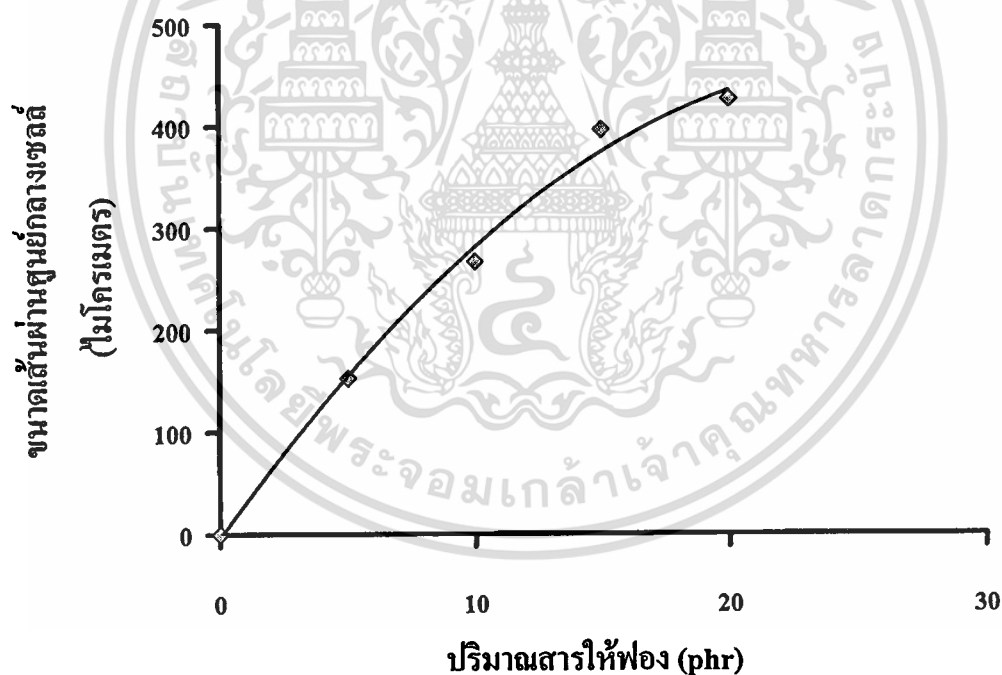


รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ที่ปริมาณสารให้ฟองในช่วง 5 ถึง 20 phr ขนาดกำลังขยาย 20 เท่า

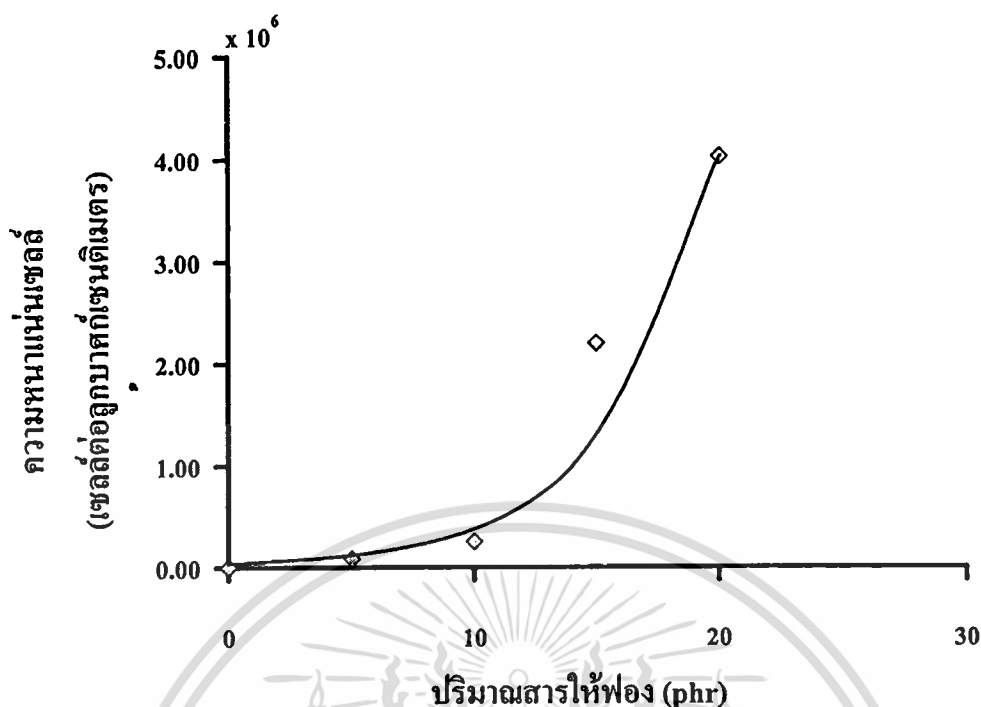
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองในอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง โครงสร้างภายในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีเซลล์เกิดเพิ่มขึ้น และเซลล์ที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดใหญ่ลักษณะเป็นเซลล์ปิดและมีการจัดเรียงชิดติดกันมากขึ้น เนื่องจากสารให้ฟองที่ผสมอยู่ในอัตราส่วนผสมของยางคอมปาวด์ เกิดการสลายตัวให้แก๊สออกมา เมื่อยางคอมปาวด์นั้นได้รับพลังงานความร้อนมากพอ โดยแก๊สที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะทำหน้าที่ทำให้เกิดเซลล์และอีกส่วนที่เหลือทำหน้าที่ขยายให้เซลล์นั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมื่อสัดส่วนของปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้น โอภาสเกิดแก๊สในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางก็เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เซลล์ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางมีจำนวนมากและมีขนาดใหญ่ขึ้น เซลล์จึงเกิดการจัดเรียงชิดติดกันมากขึ้น

เมื่อวิเคราะห์หาขนาดและจำนวนเซลล์ที่เกิดขึ้นภายใน โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ 3.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.5, 4.6 และตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาณสารให้ฟองที่ปริมาณเส้นใยแก้ว ชนิดเส้นสั้น 10 pHR

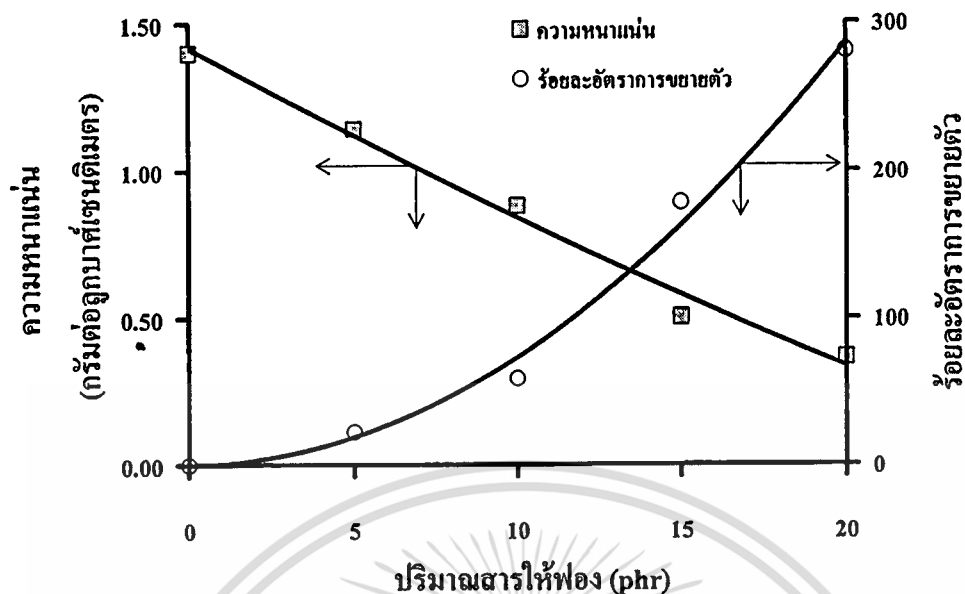


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของจำนวนเซลลูล์กับปริมาณสารให้ฟอง ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง ขนาดเซลลูล์ภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบโฟมยางมีขนาดใหญ่ขึ้น พิจารณาได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลลูล์ โดยที่สารให้ฟอง ตั้งแต่ 0 ถึง 20 phr พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลลูล์ มีขนาดใหญ่ขึ้นมากที่สุดถึง 450 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาจำนวนเซลลูล์ในโครงสร้าง พบว่าที่สารให้ฟองตั้งแต่ 0 ถึง 15 phr มีความหนาแน่นเซลลูล์ไม่เกิน  $2.5 \times 10^6$  เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อสารให้ฟองเพิ่มเป็น 20 phr ความหนาแน่นเซลลูล์เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ  $4 \times 10^6$  เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองที่ 30 phr พบว่า ชิ้นงานแตกกระจายไม่เป็นรูปทรงตามแม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟม ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมีมากเกินไป ทำให้ความดันภายในชิ้นงานโฟมมีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศมากเกินไป ดังนั้นเมื่อเปิดเครื่องอัดรีดเพื่อลดความดันของระบบ ชิ้นงานโฟมที่ได้จึงเกิดการแตกกระจายไม่เป็นรูปทรงตามแม่พิมพ์

#### 4.2.2 สมบัติความหนาแน่นและอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการขยายตัวกับปริมาณสารให้ฟองของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ ข.2 ในภาคผนวก ข.

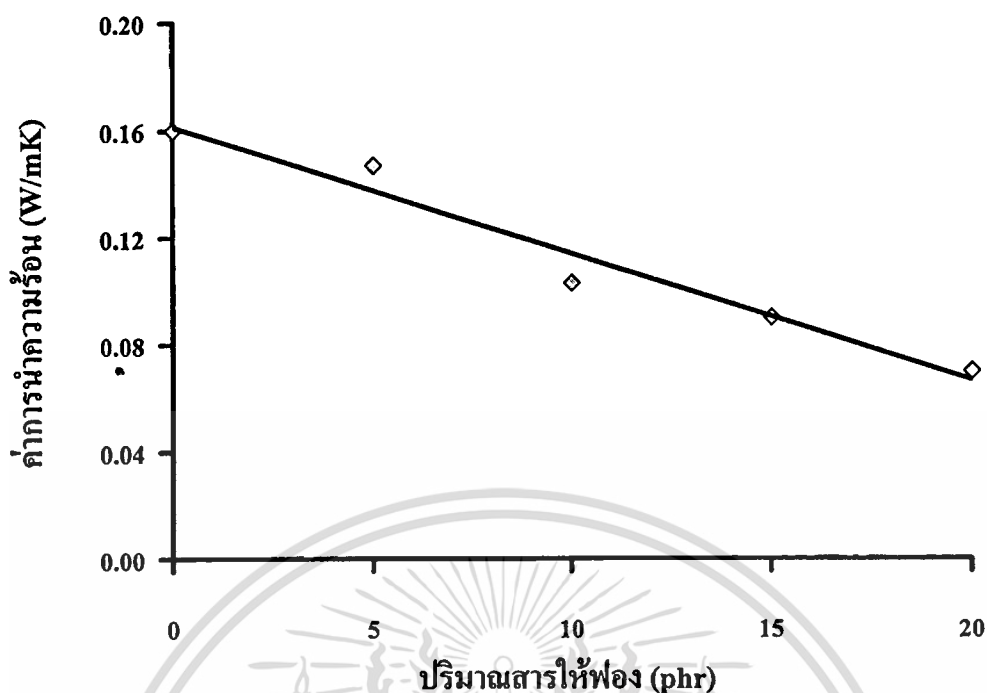


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับปริมาณสารให้ฟองที่เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวกับปริมาณสารให้ฟองของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว ผลจากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจะมีแนวโน้มลดลง มีผลให้อัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางเพิ่มขึ้น โดยเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มจาก 0 เป็น 20 phr ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางลดลงจาก 1.4 เป็น 0.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่งผลให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 280 เนื่องจาก แก๊สที่เกิดจากการขยายตัวของสารให้ฟองเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติ ซึ่งแก๊สนี้มีความหนาแน่นน้อยกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจึงมีความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น

#### 4.2.3 สมบัติการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง

เมื่อศึกษาคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง พบว่าได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ ข.3 ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับปริมาณสารให้ฟองที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับปริมาณสารให้ฟองของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น ผลจากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มมากขึ้น ค่าการนำความร้อนมีค่าลดลง โดยวัสดุเชิงประกอบโฟมยางที่ปริมาณสารให้ฟอง 0 phr มีค่าการนำความร้อนประมาณ 0.16 (W/mK) แต่เมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้นเป็น 5, 10, 15 และ 20 phr ค่าการนำความร้อนมีค่าประมาณ 0.14, 0.12, 0.09 และ 0.07 (W/mK) ตามลำดับ เนื่องจากที่ปริมาณสารให้ฟองในอัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น โอกาสที่จะเกิดแก๊สภายในวัสดุเชิงประกอบก็เพิ่มขึ้น ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าการนำความร้อนประมาณ 0.026 (W/mK) ซึ่งน้อยกว่าค่าการนำความร้อนของยางธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้น ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางที่เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr จึงมีแนวโน้มต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของวัสดุเชิงประกอบ

จากการทดลองในส่วนนี้ พบว่าที่ปริมาณสารให้ฟอง 20 phr จึงเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง เพราะมีเซลล์ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเป็นเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ ลักษณะเป็นเซลล์ปิดเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและที่สำคัญที่สุด คือ มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน ดังนั้นจึงเลือกศึกษาขนาดและปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ที่ปริมาณสารให้ฟอง 20 phr ต่อไป

### 4.3 ผลการศึกษาขนาดและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง

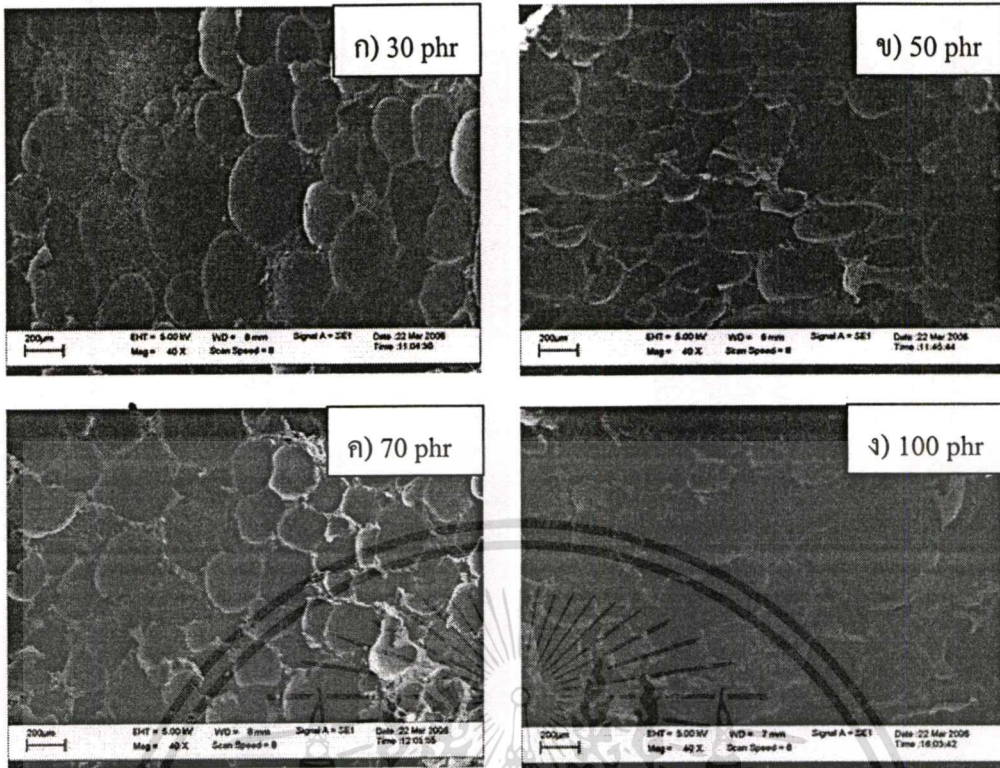
การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของขนาดและปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 4.3 โดยเส้นใยแก้วที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและเส้นใยแก้วชนิดผง ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยแก้วเริ่มตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr ทำการผสมวัตถุดิบโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เป็นเวลา 30 นาที ขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบโฟมยางโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปรีออน ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำชิ้นงานมาทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา ขนาดเซลล์ จำนวนเซลล์ ความหนาแน่น อัตราการขยายตัว ค่าการนำความร้อน อัตราการลามไฟ การดูดซับน้ำ ความแข็งและความทนแรงดึง

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว ตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr

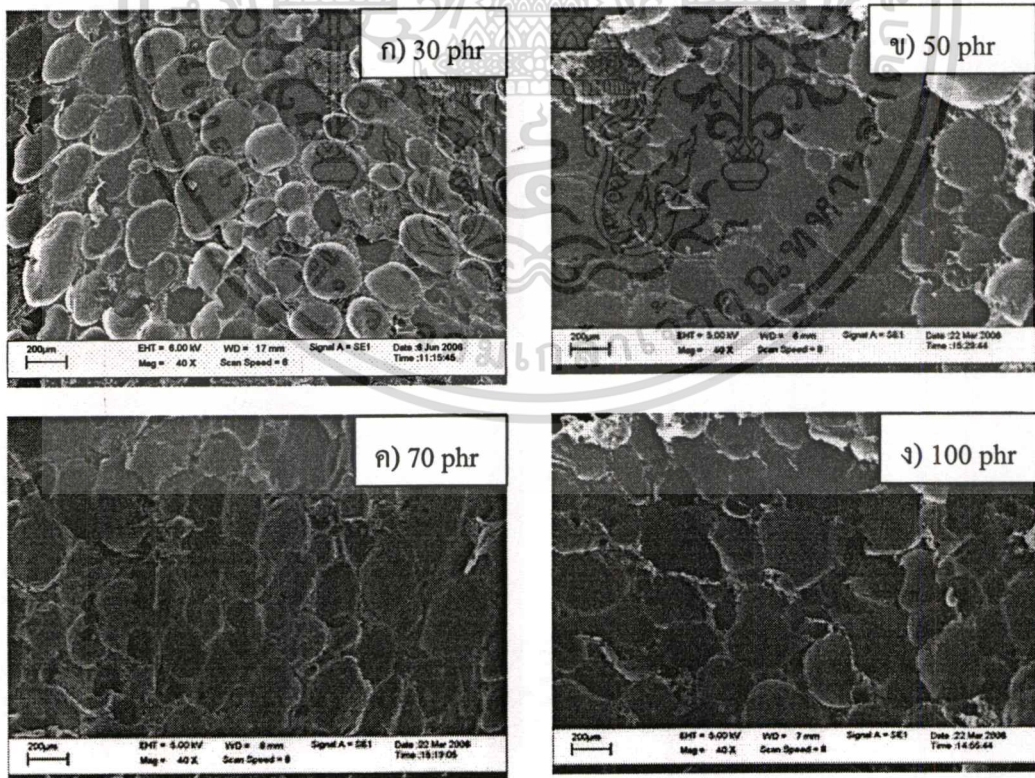
วัตถุดิบ	สูตรการผสม (phr)				
	1	2	3	4	5
1. ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100
2. ใยแก้ว	0	30	50	70	100
3. Antimony	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
4. ซิงค์ออกไซด์	10	10	10	10	10
5. กรด สเตียริก	2	2	2	2	2
6. MBTS	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16
7. 50% TMTM	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
8. กำมะถัน	5	5	5	5	5
9. azodicarbonamide	20	20	20	20	20

#### 4.3.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์ในวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วทั้งชนิดเส้นสั้นและชนิดผง ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว ตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 สันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 30, 50, 70 และ 100 ที่กำลังขยาย 40 เท่า



รูปที่ 4.10 สันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผก ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว

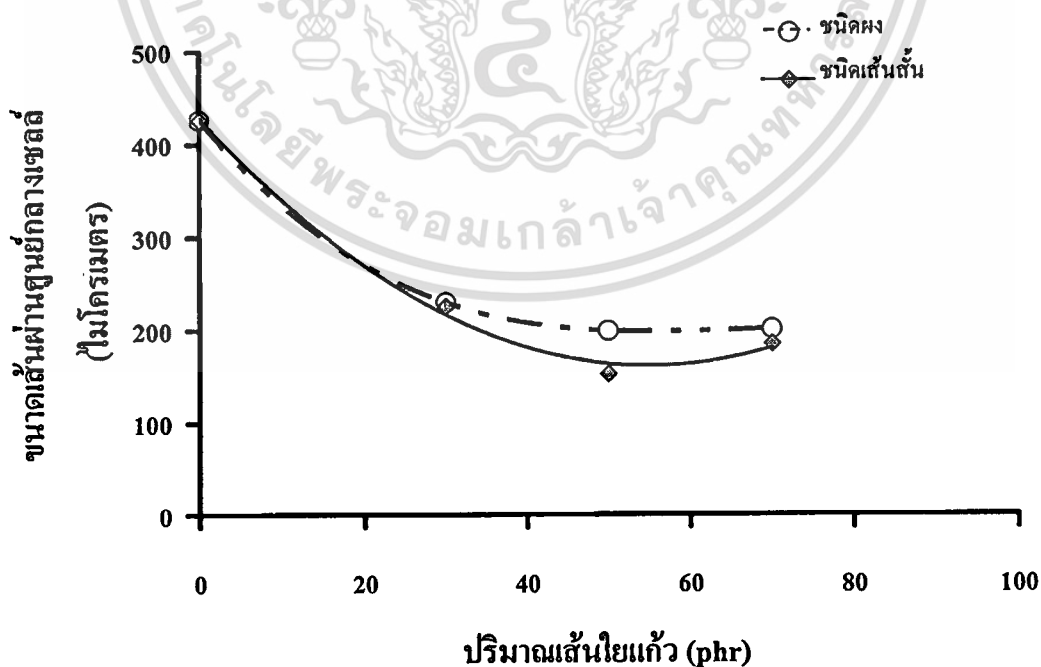
30, 50, 70 และ 100 ที่กำลังขยาย 40 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง ที่อัตราส่วนผสมของเส้นใยแก้ว ตั้งแต่ 30 ถึง 100 phr พบว่าที่ปริมาณเส้นใยแก้วไม่เกิน 50 phr ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางมีความเป็นระเบียบสูง แต่เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วมากกว่า 50 phr ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางเริ่มมีความเป็นระเบียบของเซลล์ต่ำลงตามปริมาณเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง พบว่าที่ปริมาณเส้นใยแก้วต่ำกว่า 50 phr ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะคล้ายกัน คือ มีความเป็นระเบียบของเซลล์สูง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วมากกว่า 50 phr วัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจะมีความไม่เป็นระเบียบของเซลล์สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผง พิจารณาได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 100 phr ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมากกว่าเส้นใยแก้วชนิดผง จึงทำให้เกิดการยับยั้งการขยายตัวของเซลล์ได้ไม่สม่ำเสมอทุกทิศทางเหมือนกับเส้นใยแก้วชนิด

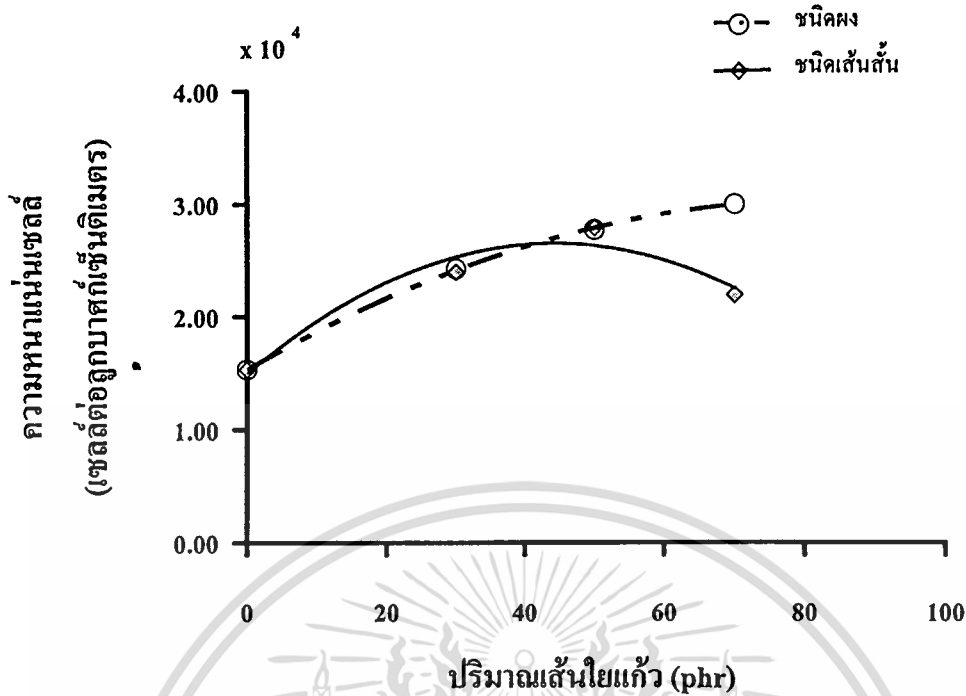
#### 4.3.2 ขนาดและความหนาแน่นเซลล์ในวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาแน่นเซลล์กับปริมาณเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง ที่ปริมาณสารให้ฟอง 20 phr พบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.12 และตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.11 ผลของเส้นใยแก้วต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ ที่สารให้ฟอง 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

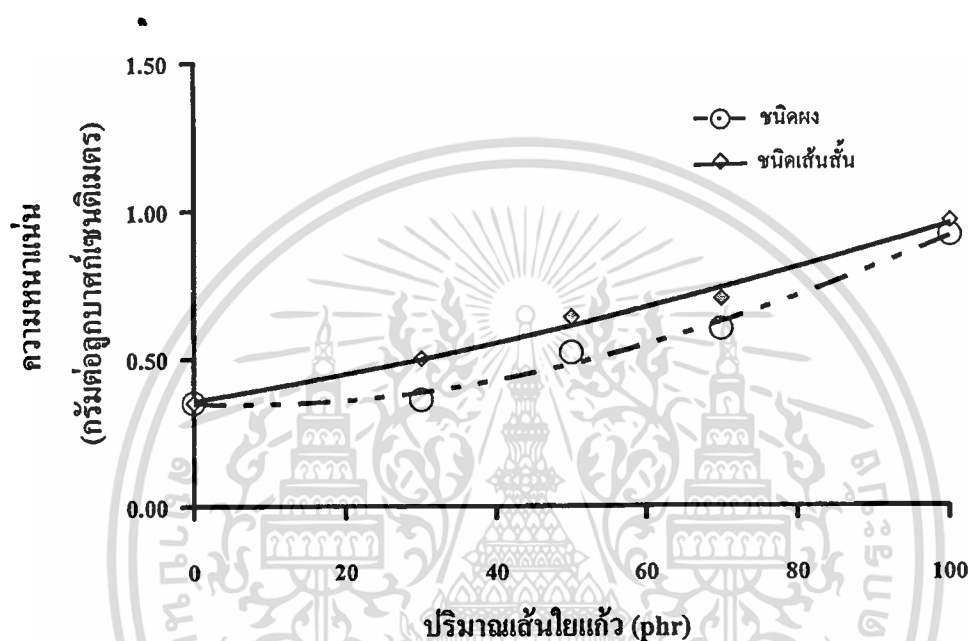


รูปที่ 4.12 ผลของเส้นไอน้ำไก่ต่อความหนาแน่นเซลล์ ที่สารให้ฟอง 20 p/hr

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นไอน้ำไก่ขึ้นไปจนถึง 50 p/hr แต่เซลล์จะเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณเส้นไอน้ำไก่ในอัตราส่วนผสมมากกว่า 50 p/hr โดยพบว่าที่ปริมาณเส้นไอน้ำไก่ตั้งแต่ 0 ถึง 50 p/hr วัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดเส้นสั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ลดลงจาก 420 ลงมาจนถึง ประมาณ 180 ไมโครเมตร ส่วนวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดผงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ลดลงจาก 420 ลงมาจนถึง ประมาณ 200 ไมโครเมตร แต่เมื่อปริมาณเส้นไอน้ำไก่เพิ่มเป็น 70 p/hr เส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์วัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดเส้นสั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 200 ไมโครเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดผงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่น้อยมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดเส้นสั้น เมื่อพิจารณาความหนาแน่นเซลล์ในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง ที่ปริมาณไอน้ำไก่ 0 ถึง 70 p/hr พบว่าความหนาแน่นเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นไอน้ำไก่ชนิดเส้นสั้นเพิ่มขึ้นไปจนถึง 50 p/hr แล้วจากนั้นความหนาแน่นเซลล์จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นไอน้ำไก่ชนิดเส้นสั้นมากกว่า 50 p/hr ซึ่งแตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดผงที่มีความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นไอน้ำไก่ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดผงมีค่าความหนาแน่นเซลล์มากกว่าวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นไอน้ำไก่ชนิดเส้นสั้นทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเติมเส้นไอน้ำไก่

#### 4.3.3 ผลการศึกษาความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้ว

ผลการทดลองส่วนนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบโฝมยาง เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้วสั้นและผงใยแก้วที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบและวัสดุเชิงประกอบโฝมยางแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ ค.2, ค.3 ในภาคผนวก ค.

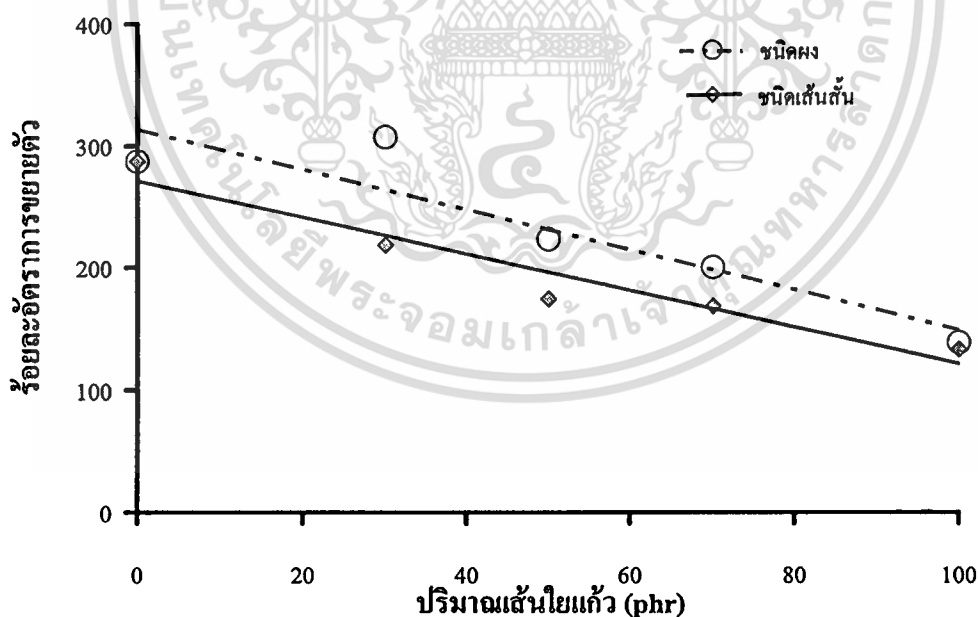


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับปริมาณเส้นใยแก้วที่สารให้ฟอง 20 phr

จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากใยแก้วมีความหนาแน่นประมาณ 2.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของยางธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณใยแก้วในอัตราส่วนผสม จึงเป็นผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางเพิ่มมากขึ้น โดยวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 0 ถึง 100 phr มีความหนาแน่นประมาณ 0.4 ถึง 0.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และทุกอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผงมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยาง โดยวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจะมีปริมาตรมากกว่าวัสดุเชิงประกอบยางที่น้ำหนักเท่ากัน โดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการสลายตัวของสารให้ฟองที่ผสมอยู่ในอัตราส่วนผสม เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวลงไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางและวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง พบว่าวัสดุเชิงประกอบยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผง เนื่องจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นที่เตรียมได้มีลักษณะจับกลุ่มกันเป็นก้อนฟูและมีค่าความหนาแน่นของเส้นใยแก้วเพียง 0.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าความหนาแน่นของเส้นใยแก้วชนิดผงที่มีความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบยางที่เตรียมได้จากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบยางจากเส้นใยแก้วชนิดผง แต่เมื่อวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นโฟมแล้ว วัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผงกลับมีความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น เนื่องจากเซลล์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผงมีลักษณะเป็นเซลล์ปิดมากกว่าวัสดุเชิงประกอบยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น พิจารณาได้จากลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 100 phr

เมื่อศึกษาอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง เพื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากผงและเส้นใยแก้วสั้นที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ ค. 2, ค.3 ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.14 อัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง ที่ปริมาณสารให้ฟอง 20 phr

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจะมีอัตราการขยายตัวน้อยกว่า โฟมยาง โดยโฟมยางมีร้อยละอัตราการขยายตัวประมาณ 280 และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในอัตราส่วนผสม ร้อยละอัตราการขยายตัวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้ว โดยวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง มีร้อยละอัตราการขยายตัวลดลงจากประมาณ 280 เป็น 150 เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มจาก 0 เป็น 100 phr ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยแก้วเป็นวัสดุคงรูปแต่ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้นเมื่อผสมเส้นใยแก้วเข้าไปในอัตราส่วนผสม เส้นใยแก้วจะเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติ ทำให้พื้นที่ที่สามารถเกิดโฟมได้ลดน้อยลง ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจึงมีค่าลดลงส่งผลให้อัตราการขยายตัวมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

#### 4.3.4 ผลการศึกษาสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง สัดส่วนโดยปริมาตรของยางธรรมชาติและเส้นใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 - 4.3

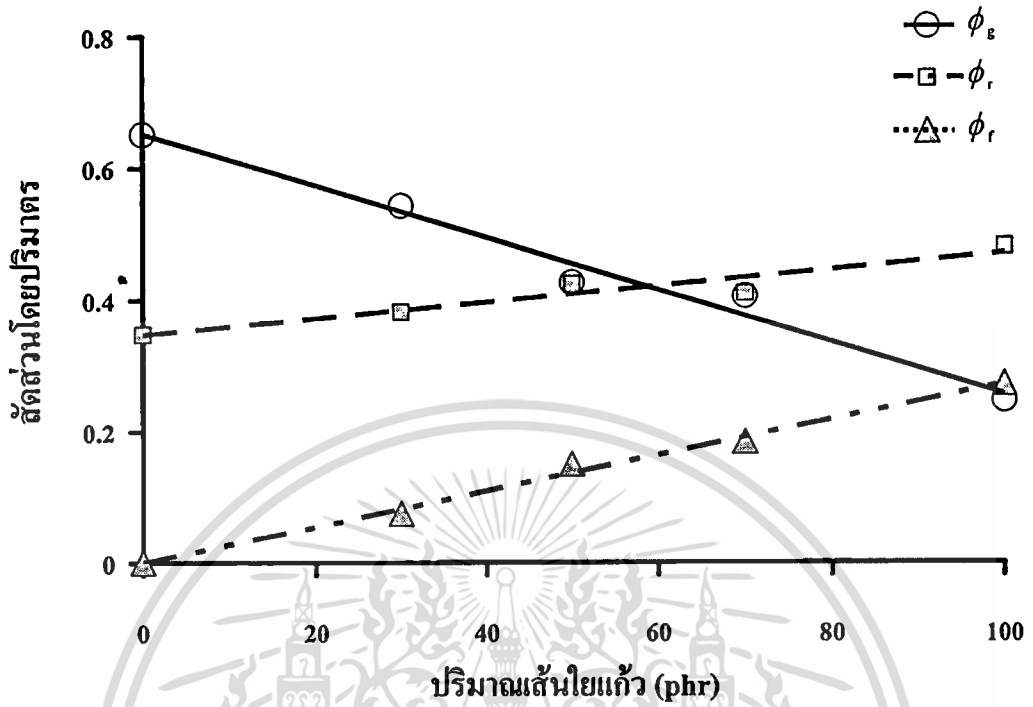
$$\phi_g = 1 - \left( \frac{\rho_f}{\rho_p} \right) \quad (4.1)$$

$$\phi_r = \frac{\rho_f}{\rho_r} \times \left( \frac{100}{100 + w_f} \right) \quad (4.2)$$

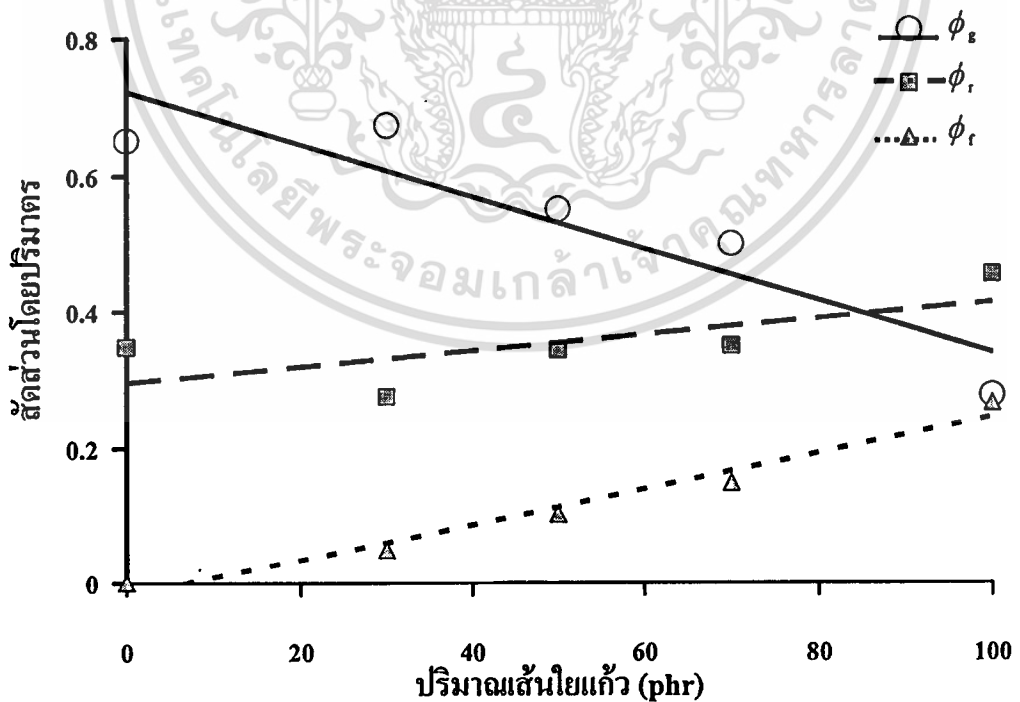
$$\phi_f = 1 - \phi_g - \phi_r \quad (4.3)$$

โดย	$\phi_g$	สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส
	$\phi_r$	สัดส่วนโดยปริมาตรของยาง
	$\phi_f$	สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยแก้ว
	$\rho_p$	ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบก่อนการขึ้นรูปโฟม, (g/cm <sup>3</sup> )
	$\rho_f$	ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบหลังผ่านการขึ้นรูปโฟม, (g/cm <sup>3</sup> )
	$\rho_r$	ความหนาแน่นของยาง, (g/cm <sup>3</sup> )
	$w_f$	ปริมาณเส้นใยแก้ว, (กรัม)

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยปริมาตรกับปริมาณเส้นใยแก้ว ได้ดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.16 และตารางที่ ค.4 ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.15 สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส ขางธรรมชาติและเส้นใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบโฟม ขางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น

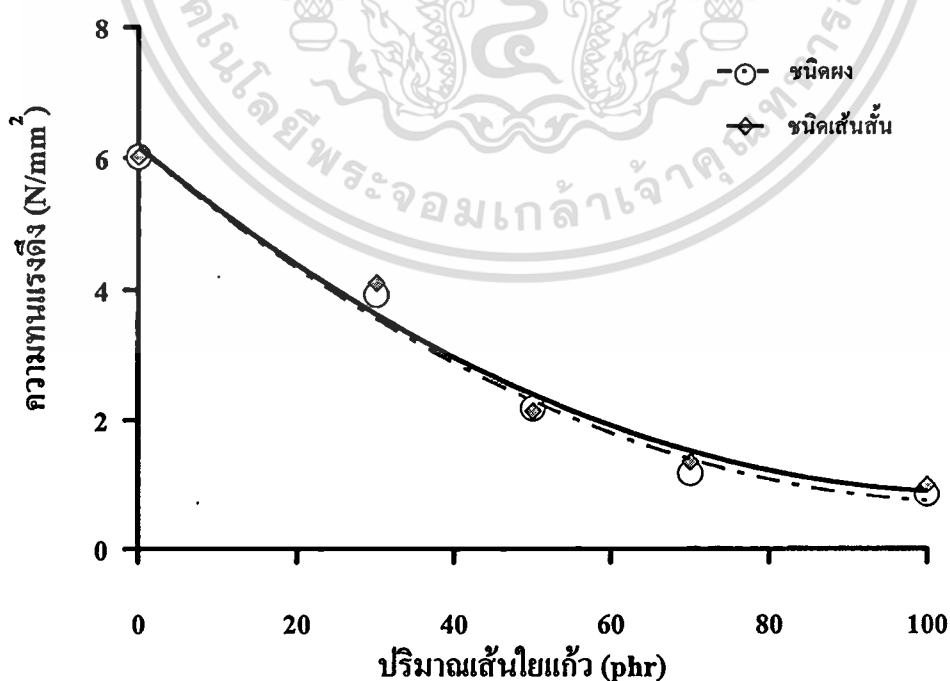


รูปที่ 4.16 สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส ขางธรรมชาติและเส้นใยแก้วของวัสดุเชิงประกอบโฟม ขางจากเส้นใยแก้วชนิดผง

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สมีแนวโน้มลดลง แต่สัดส่วนโดยปริมาตรของยางธรรมชาติ และเส้นใยแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณเส้นใยแก้วที่เติมเข้าไปในอัตราส่วนผสม มีผลกระทบต่อสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สมากที่สุด รองลงมาคือสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยแก้วและ สัดส่วนโดยปริมาตรของยางธรรมชาติ ตามลำดับ โดยพิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟสัดส่วน โดยปริมาตรของแก๊สที่มีค่ามากที่สุดแต่เป็นค่าที่ติดลบ และความชันของเส้นกราฟสัดส่วน โดยปริมาตรของเส้นใยแก้วที่มีค่ามากที่สุดรองลงมา และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผก พบว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีแนวโน้มลดลงมากกว่าวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผกเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้น พิจารณาจากความชันของเส้นกราฟสัดส่วน โดยปริมาตรของแก๊สต่อปริมาณเส้นใยแก้วซึ่งมีค่าติดลบมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผกมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น

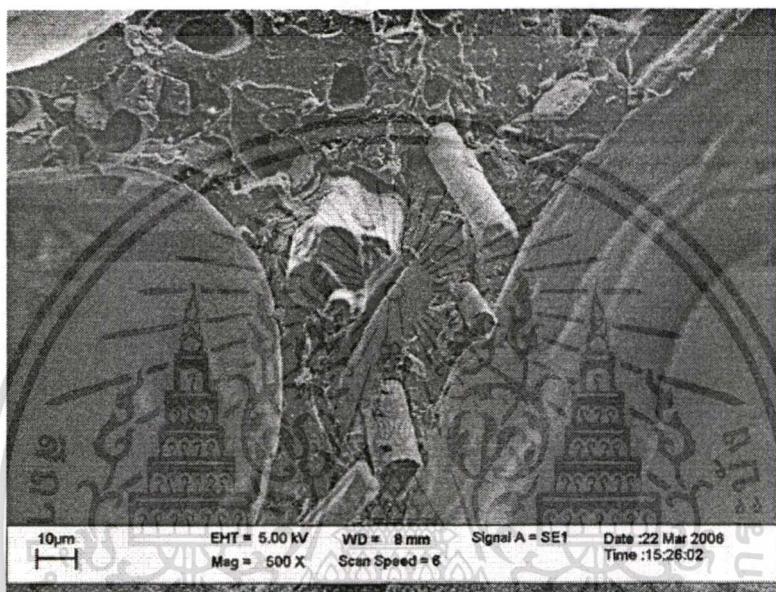
#### 4.3.5 ผลการศึกษาความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผกกับปริมาณเส้นใยแก้ว แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ ก.5 ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.17 ผลของเส้นใยแก้วต่อความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง

จากรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมียงจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วนผสม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 6 N/mm<sup>2</sup> ที่ปริมาณเส้นใยแก้วไม่เกิน 100 phr โดยค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยแก้วทั้งชนิดเส้นสั้นและชนิดผงกับยางธรรมชาติยึดเกาะกันได้ไม่ดี พิจารณาได้จากลักษณะสัณฐานวิทยาการยึดเกาะกันระหว่างยางธรรมชาติกับเส้นใยแก้ว ดังรูปที่ 4.18

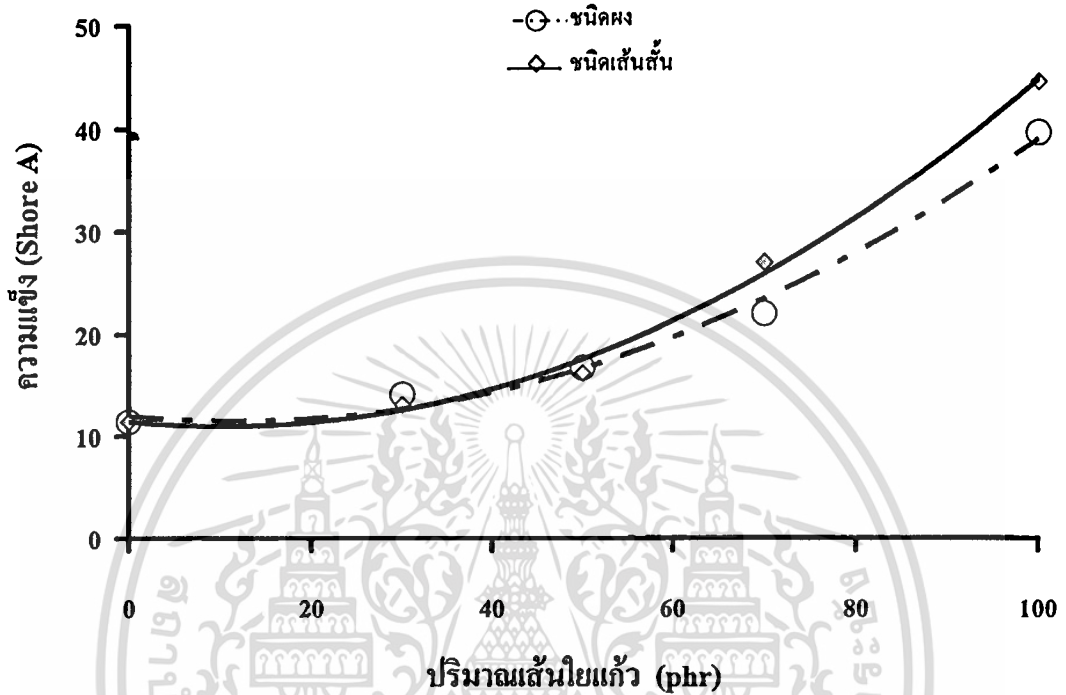


รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาการยึดเกาะของยางธรรมชาติกับเส้นใยแก้ว ที่ปริมาณเส้นใยแก้วชนิดผง 70 phr กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่า การยึดเกาะกันระหว่างยางธรรมชาติกับเส้นใยแก้วทำได้ไม่ดีนัก พิจารณาจากผิวของเส้นใยแก้วที่โผล่พ้นเนื้อยางธรรมชาติออกมา มีลักษณะเป็นผิวเรียบไม่มีเนื้อยางธรรมชาติยึดติดกับผิวของเส้นใยแก้ว ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ว่า เป็นเพราะองค์ประกอบของวัสดุทั้งสองแตกต่างกัน โดยยางธรรมชาติจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นอินทรีย์สาร ส่วนใยแก้วมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาซึ่งจัดเป็นอนินทรีย์สาร ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนปริมาณเส้นใยแก้วในเนื้อวัสดุเชิงประกอบโพลีเมียงเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

#### 4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงจากเส้นใยแก้ว

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงบกับปริมาณเส้นใยแก้ว ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ ก.6 ในภาคผนวก ก.



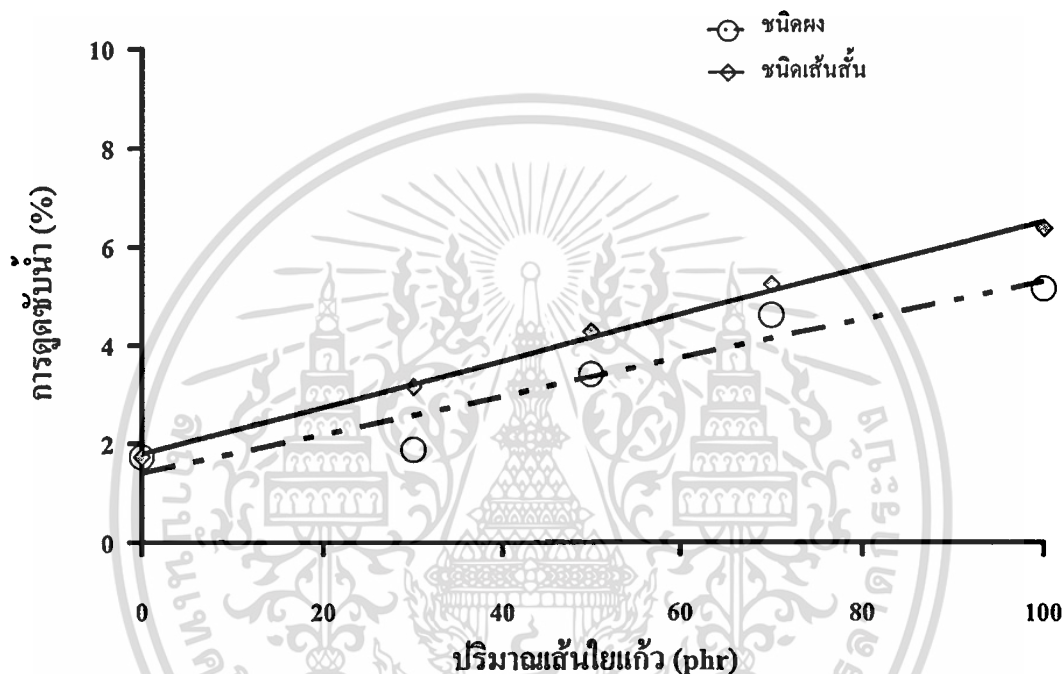
รูปที่ 4.19 ผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียง

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วในวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงเพิ่มขึ้นสมบัติความแข็งแรงก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเส้นใยแก้วที่เติมเข้าไปจะทำหน้าที่กีดขวางการถ่ายเทแรงในเนื้ออย่างธรรมชาติและยังช่วยรับแรงส่วนหนึ่งก่อนที่จะถ่ายเทแรงที่เหลือให้เนื้ออย่างธรรมชาติที่อยู่ติดกับเส้นใยแก้ว ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงจึงมีสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้ว และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงบ พบว่าที่ปริมาณเส้นใยแก้วน้อยกว่า 50 phr สมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงบมีค่าเท่ากัน แต่เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วในอัตราส่วนผสมเพิ่มมากกว่า 50 phr สมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงมีค่าต่างกัน โดยวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจะมีสมบัติความแข็งแรงมากกว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงจากเส้นใยแก้วชนิดผงบ เพราะเมื่อวัสดุเชิงประกอบโพลีเมรียงได้รับแรงแรงจะถูกกระจายไปตลอดความยาวของเส้นใยแก้วก่อนที่จะถ่ายเทแรงต่อไปยังเนื้ออย่างธรรมชาติที่อยู่

ติดกับเส้นใย ด้วยเหตุนี้วัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจึงมีสมบัติความแข็งแรงมากกว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดผก

#### 4.3.7 ผลการศึกษาการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้ว

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผกกับปริมาณเส้นใยแก้ว แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ ก.7 ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.20 ผลของเส้นใยแก้วต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีน

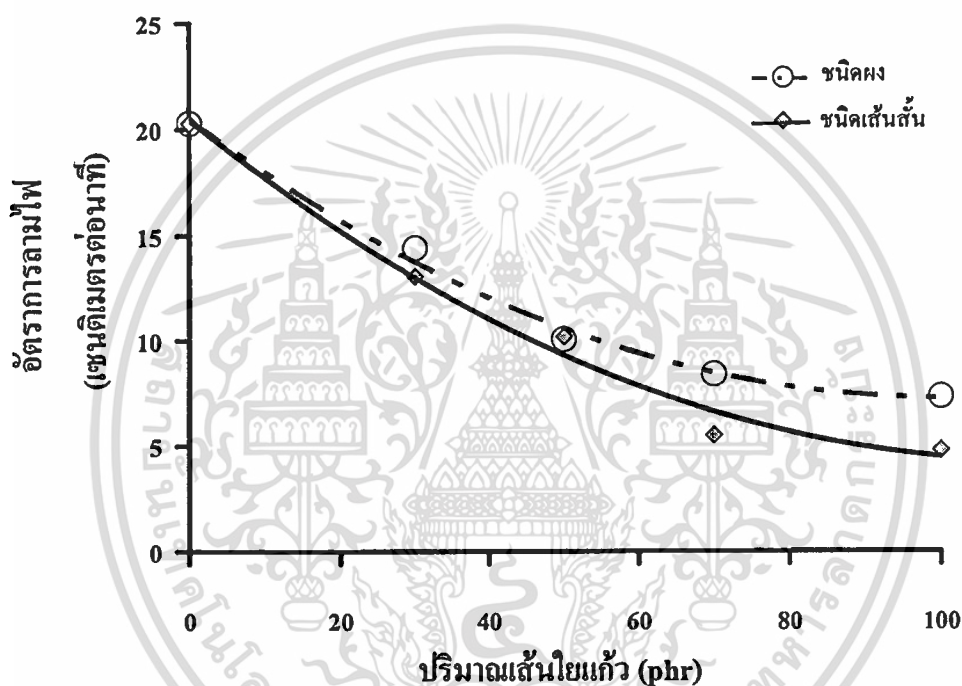
จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วในวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนเพิ่มขึ้น สมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากน้ำและเส้นใยแก้วเป็นสารที่มีขั้ว ใยแก้วที่อยู่ในเนื้อวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจึงทำหน้าที่ดูดซึมน้ำ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในเนื้อวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีน สมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผก พบว่าที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 0 ถึง 100 phr วัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดผก โดยมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงประมาณ 2 ถึง 6 % ส่วนวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดผกมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงประมาณ 2 ถึง 5 % เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในเนื้อวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีน ความไม่เป็นระเบียบของเซลล์ที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจะมีมากกว่าวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดผงดั้งนั้นวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจึงมีค่าการดูดซับน้ำสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดผงดั้งนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในอัตราส่วนผสม

#### 4.3.8 ผลการศึกษาอัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้ว

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงดั้งนั้นกับปริมาณเส้นใยแก้ว แสดงได้ดังรูปที่ 4.21 และตารางที่ ค.8 ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของอัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนกับปริมาณเส้นใยแก้ว

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีน อัตราการลามไฟมีแนวโน้มลดลง เพราะเส้นใยแก้วเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟ ดังนั้นเมื่อเติมลงไป ในอัตราส่วนผสม เส้นใยแก้วจะเข้าไปแทนที่ที่ของธรรมชาติที่มีคุณสมบัติติดไฟ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนมีอัตราการลามไฟลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้ว และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงดั้ง พบว่าวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น มีอัตราการลามไฟลดลงจาก 20 เซนติเมตรต่อนาที เป็น 9 เซนติเมตรต่อนาที ส่วนวัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจากเส้นใยแก้วชนิดผงดั้งมีอัตราการลามไฟลดลงจาก 20 เซนติเมตรต่อนาที เป็น 6 เซนติเมตรต่อนาที ที่ปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นจาก 0 phr เป็น 100 phr โดยสังเกตเห็นได้ว่า ที่ปริมาณเส้นใยแก้วไม่เกิน 50 phr วัสดุเชิงประกอบโพลียเอทิลีนจาก

เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงมีอัตราการลามไฟใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นมากกว่า 50 phr อัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากที่ปริมาณเส้นใยแก้วน้อยกว่า 50 phr ลักษณะเซลล์ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผงจะมีลักษณะคล้ายคลึง แต่เมื่อปริมาณเส้นใยแก้วมากกว่า 50 phr วัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจะมีความไม่เป็นระเบียบของเซลล์สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผง

#### 4.3.9 ผลการศึกษาค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

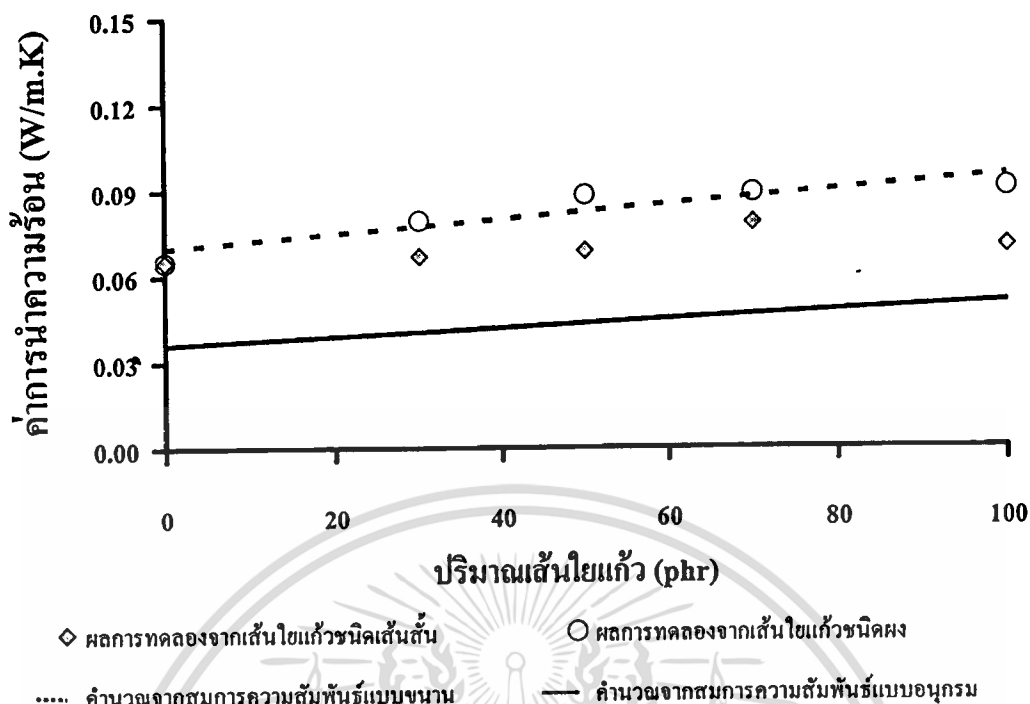
ศึกษาสมบัติการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วที่ได้จากการทดลอง พร้อมกับนำค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองนั้นมาเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.4 และ 4.5

$$\text{สมการความสัมพันธ์แบบขนาน} \quad k_c = \phi_g k_g + \phi_r k_r + \phi_f k_f \quad (4.4)$$

$$\text{สมการความสัมพันธ์แบบอนุกรม} \quad k_c = \frac{k_g k_r k_f}{\phi_g k_g + \phi_r k_r + \phi_f k_f} \quad (4.5)$$

โดย	$k_c$	ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ (W/mK)
	$k_n$	ค่าการนำความร้อนของแก๊ส (W/mK)
	$k_r$	ค่าการนำความร้อนของยางธรรมชาติ (W/mK)
	$k_f$	ค่าการนำความร้อนของเส้นใยแก้ว (W/mK)

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณกับปริมาณเส้นใยแก้ว ได้ดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ ค.9 ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณจากสมการเชิงคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4.22 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผกที่ได้จากการทดลองกับผลคำนวณตามทฤษฎีโดยอาศัยความสัมพันธ์แบบอนุกรมและแบบขนาน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ โฟมยาง ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางทั้งจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี โดยค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.06 ถึง 0.07 W/m.K ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผกอยู่ในช่วงประมาณ 0.07 ถึง 0.09 W/m.K ส่วนค่าการนำความร้อนที่คำนวณจากสมการความสัมพันธ์แบบขนานและแบบอนุกรมจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.07 ถึง 0.09 W/m.K และประมาณ 0.04 ถึง 0.05 W/m.K ตามลำดับ จากผลการเปรียบเทียบ พบว่าการประมาณค่าการนำความร้อนโดยการใช้สมการความสัมพันธ์แบบขนานจะสามารถอธิบายพฤติกรรมการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผกได้ดี เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผก พบว่าวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีสมบัติการนำความร้อนต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผก เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทมายังเส้นใยแก้วจะกระจายตลอดทั่วทั้งความยาวของเส้นใยแก้ว ก่อนที่จะถ่ายเทไปยังเนื้อยางที่อยู่รอบๆ

เส้นใย ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทมายังเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจึงมีระยะทางในการเคลื่อนที่มากกว่าเส้นใยแก้วชนิดผก ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีสมบัติการนำความร้อนต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วชนิดผก

#### 4.4 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์กับฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น

นำวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วทั้งชนิดเส้นสั้นและชนิดผกที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่นที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์กับฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น

รายการ	ชนิดฉนวน ฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น	วัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์	
		ชนิดเส้นสั้น	ชนิดผก
ค่าการนำความร้อน, (W/mK)	0.037	0.06-0.07	0.07-0.09
อัตราการลามไฟ, (cm/min)	0 (ติดไฟแต่ไม่ลามไฟ)	6-20	8-20
การดูดซึมน้ำ, (%)	น้อยกว่า 5	2-6	2-5

จากตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วที่ได้จากการทดลองกับฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น พบว่า วัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผก มีค่าการนำความร้อนและอัตราการลามไฟสูงกว่าฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น ส่วนสมบัติการดูดซึมน้ำ วัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 5 % ที่ปริมาณเส้นใยแก้วต่ำกว่า 70 phr และสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วชนิดผกมีค่าไม่เกิน 5 % ที่ปริมาณเส้นใยแก้วต่ำกว่า 100 phr ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วทั้ง 2 ชนิดมีสมบัติของการเป็นฉนวนกันความร้อนต่ำกว่าฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น

แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้วจะมีสมบัติของการเป็นฉนวนกันความร้อนไม่ดีเท่ากับฉนวนโพลีเมอร์แบบยืดหยุ่น แต่เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จากเส้นใยแก้ว เป็นวัสดุที่ผลิตมาจากของเสียจากโรงงาน ดันทุนการผลิตจึงน่าจะต่ำ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์มีราคาถูกประกอบกับการเลือกใช้ฉนวนกันความร้อนนั้น นอกจากจะพิจารณาสมบัติของฉนวนแล้ว ยังต้องพิจารณาสถานะการใช้งานและเรื่องราวของฉนวนประกอบด้วย ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบโพลีเมอร์จึงเป็นทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่ง ที่น่าจะถูกเลือกนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

#### 5.1.1 ผลการศึกษาปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง

จากการศึกษาหาอัตราส่วนผสมในการผลิตวัสดุเชิงประกอบโฟมยางเพื่อผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารให้ฟอง ตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr พบว่าที่ปริมาณสารให้ฟอง 20 phr เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ในการนำไปผลิตฉนวนกันความร้อน เพราะวัสดุเชิงประกอบโฟมยางที่อัตราส่วนผสมนี้ มีค่าความหนาแน่น 0.368 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลักษณะเซลล์ที่เกิดขึ้นเป็นเซลล์แบบปิดมีขนาดประมาณ 426 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่นเซลล์ประมาณ  $4 \times 10^6$  เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด คือ 0.07 W/mK ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน

#### 5.1.2 ผลการศึกษานิวคลีและปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฟมยาง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยแก้วที่เป็นชนิดเส้นสั้นและชนิดผง ตั้งแต่ 0 ถึง 100 phr พบว่า

5.1.2.1 วัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนดีกว่าวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดผง

5.1.2.2 สามารถนำเศษฉนวนใยแก้วมาใช้ผลิตฉนวนวัสดุเชิงประกอบโฟมยางได้ในอัตราส่วนผสม 50 ถึง 70 phr โดยมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 0.06 – 0.08 W/mK และเศษใยแก้วที่เติมลงไปจะช่วยชะลอการลามไฟของวัสดุลงได้สูงถึง 70 %

5.1.2.3 สามารถประมาณค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเศษฉนวนใยแก้วได้ โดยใช้สมการความสัมพันธ์แบบขนาน

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการขึ้นรูปโฟมนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาการขึ้นรูปโฟมเพียง 1 วิธีเท่านั้น คือ การขึ้นรูปโฟมโดยการอัดขึ้นรูปร้อน ดังนั้น จึงน่าจะทำการขึ้นรูปโฟมแบบอื่นมาเปรียบเทียบว่า การขึ้นรูปโฟมแบบใดเป็นวิธีการขึ้นรูปโฟมที่ดีที่สุด

# เอกสารอ้างอิง

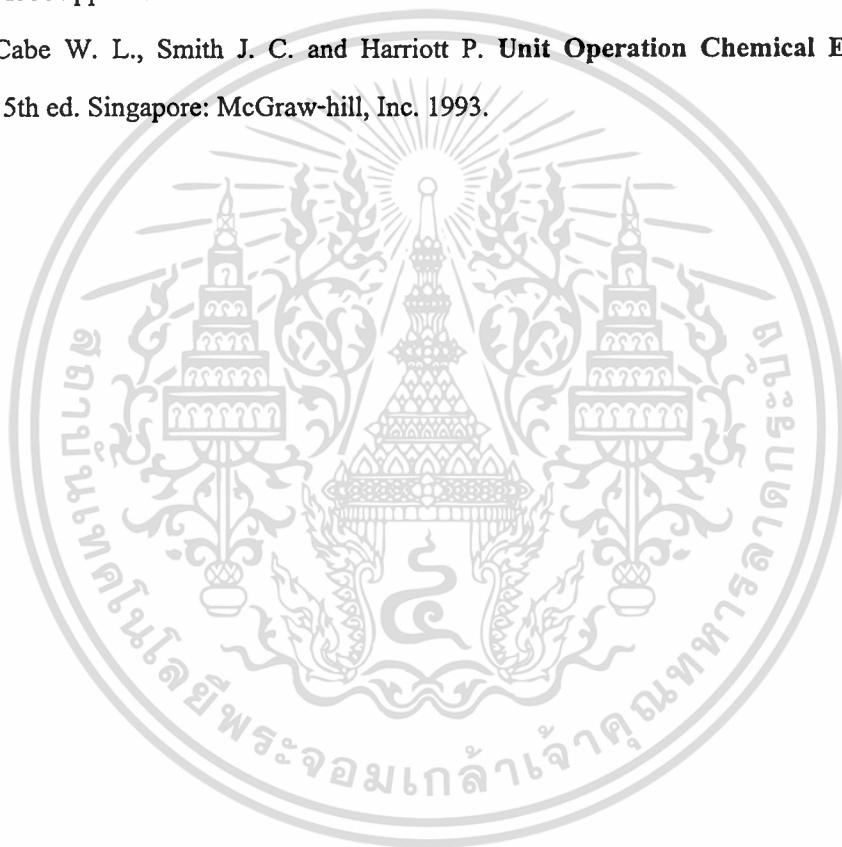
- [1] Chapman A. J. **Heat Transfer**. New York: Macmillan Publishing Company. 1984.
- [2] ตระการ ก้าวสถิกรรณ. **คู่มือจนวนกันความร้อน**. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอ็มแอนดีอี จำกัด. 2537.
- [3] นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. **การถ่ายเทความร้อน**. กรุงเทพมหานคร: ห.จ.ก. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2538.
- [4] เอกสารประกอบการเรียนการสอนภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล “การถ่ายเทความร้อน.” โดย สุพันธ์ ศรีณินิตย์. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2532
- [5] สำนักงานเลขานุการ โครงการฉลากเขียว. “ข้อกำหนดของจนวนกันความร้อน.” โครงการฉลากเขียว. กรุงเทพมหานคร: กองส่งเสริมและฝึกอบรมสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2540.
- [6] Jones F. **Handbook of Polymer-fiber Composite**. London, Longman Science & Technical. 1994.
- [7] เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (Polymer Composite). โดย อธิพิล แจ้งชัด. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [8] Donald G. and Dimitris I. **Polymer Processing Principles and Design**. New York: Wiley-interscience. 1998.
- [9] Richardson M.O.W. **Polymer Engineering Composite**. London: Applied Science Publishers Ltd. 1977.
- [10] เอกสารประกอบการเรียนการสอนเรื่อง “การเติมแต่งสารพอลิเมอร์.” โดย อรุสา สรวารี. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์).
- [11] Klempler D. and Frich K. C. **Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology**. New York: Hanser Publisher. 1991.
- [12] Grayson M. **Encyclopedia of Composite Materials and Components**. New York: Wiley-Interscience. 1993.
- [13] Berlins L. M. **Plastic Engineering Handbook of Society of the Plastics**. New York: Chapman & Hall. 1991.
- [14] Frish K. C. **Plastic Foams.**, vol. 1. New York: Hanser Publisher. 1976.
- [15] Brody L. A. and Marsh S. K. **The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology**. New York: John Wiley & Sons. 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] ช้างทอง มหาผาสุกวัฒน์. “การศึกษากระบวนการโฟมของยางอีวีเอ/ยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2533.
- [17] Hilyard N. C. and Cunningham A. **Low Density Cellular Plastic (Physical Basis of Behaviour)**. London: Chapman & Hall. 1991.
- [18] Gibson L. J. and Ashby M. F. “**Structure and Properties Cellular,**” New York: Pergamon. 1988.
- [19] International Workshop on Long-term Thermal Performance of Cellular Plastics; SPI Canada: Huantsville. 1989.
- [20] ศูนย์เพื่อการวิจัยยางและเทคโนโลยี. “ชนิดของยางและการใช้งาน.” [Online]. Available: [http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3\\_1.htm](http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_1.htm). 2004.
- [21] Gatcher R. and Muller H. **Plastics Additives Handbook**. 4th ed. Munich: Hanser Publisher. 1993.
- [22] เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง (Rubber technology). โดย อธิติพล แจ่มชัด. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [23] Simh G. L. A. and Jafaar H. A. S. “A Chemical Blowing Agent System (CBAS) Based on Azodicarbonamide.” **Journal of Cellular Plastic.**, vol. 30, March 1994. pp 175-188
- [24] Simh G. L. A. and Jafaar H. A. S. “Thermal Decomposition of Aazodicarbonamide.” **Cellular Polymers.**, vol. 12, 1993. pp 303-316.
- [25] Alonso M.V., Auad M. L. and Nutt S. “Short-fiber-reinforced Epoxy Foams.” **Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing**, 2006. pp. 1-9.
- [26] Kiyoshi I., Tsuyoshi T. and Ian J. D. “Thermal Properties of Silicon Carbide Composites Fabricated with Chopped Tyranno® Si Al C Fibres.” **Journal of the European Ceramic Society.**, vol. 26, 2006. pp. 703–710.
- [27] Park J. K. and Kang T. J. “Thermal and Ablative Properties of Low Temperature Carbon Fiber–phenol Formaldehyde Resin Composites.” **Carbon.**, vol. 40, 2002. pp. 2125–2134.
- [28] Park J. K. and Kang T. J. “A Comparison of the Interfacial, Thermal and Ablative Properties Between Spun and Filament Yarn Type Carbon Fabric/Phenolic Composites.” **Carbon.**, vol. 4, 2004. pp. 795-804.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] Kang T. J., Shin S. J., Jung K. and Park J. K. "Mechanical, Thermal and Ablative Properties of Interplay Continuous/Spun Hybrid Carbon Composites." **Carbon**, vol. 44, 2006. pp. 833–839.
- [30] Shen H. and Nutt S. "Mechanical Characterization of Short Fiber Reinforced Phenolic Foam." **Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 34, 2003. pp. 899–906.
- [31] Kođah Z. H., Jarrah M.A. and Shanshal N.S. "Thermal Characterization of Foam±Cane (Quseab) as an Insulant Material." **Energy Conversion & Management**, vol. 40, 1999. pp. 349-367.
- [32] McCabe W. L., Smith J. C. and Harriott P. **Unit Operation Chemical Engineering**, 5th ed. Singapore: McGraw-hill, Inc. 1993.





## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก 1. การวัดการกระจายตัวของขนาดของเส้นใยแก้ว

ตารางที่ ก.1.1 การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น [32]

mesh number	screen opening Dpi, mm	mass fraction retained, Xi	average particle diameter in Increment, Dpi, mm	cumulative fraction smaller than Dpi
8	2.362	0.0000	-	1.0000
20	0.850	0.3993	1.606	0.6007
60	0.250	0.2453	0.550	0.3554
100	0.150	0.1145	0.200	0.2409
140	0.106	0.0894	0.128	0.1515
200	0.075	0.0650	0.091	0.0865
325	0.045	0.0528	0.060	0.0337
pan	0.000	0.0337	0.023	0.0000

ตารางที่ ก.1.2 การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแก้วชนิดผง [32]

mesh number	screen opening Dpi, mm	mass fraction retained, Xi	average particle diameter in Increment, Dpi, mm	cumulative fraction smaller than Dpi
8	2.362	0.0000	-	1.0000
20	0.850	0.0019	1.606	0.9981
60	0.250	0.0050	0.550	0.9931
100	0.150	0.0029	0.200	0.9902
140	0.106	0.0446	0.128	0.9456
200	0.075	0.1493	0.091	0.7963
325	0.045	0.5547	0.060	0.2416
pan	-	0.2416	0.023	0.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาขนาดเฉลี่ยโดยมวล ( $\bar{D}_w$ ) ของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นและชนิดผง ได้จากสมการที่ ก-1

$$\bar{D}_w = \sum_{i=1}^n Xi\bar{D}_{pi} \quad (\text{ก-1})$$

ขนาดเฉลี่ยโดยมวล ( $\bar{D}_w$ ) ของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น คือ 0.820 มิลลิเมตร

ขนาดเฉลี่ยโดยมวล ( $\bar{D}_w$ ) ของเส้นใยแก้วชนิดผง คือ 0.064 มิลลิเมตร

## ก 2. การวัดความหนาแน่นของอนุภาคแบบกลุ่ม (bulk density) ของเส้นใยแก้ว

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นของอนุภาคแบบกลุ่ม (bulk density) ของเส้นใยแก้ว

ชนิดเส้นใยแก้ว	ความหนาแน่นของอนุภาคแบบกลุ่ม (bulk density), (g/cm <sup>3</sup> )					
	NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	NO. 5	ค่าเฉลี่ย
เส้นสั้น	0.065	0.078	0.070	0.069	0.066	0.070
ผง	0.111	0.099	0.110	0.115	0.120	0.111

## ก 3. การวัดความหนาแน่นของของวัตถุแก้ว (glass density)

ตารางที่ ก.3 ความหนาแน่นของของวัตถุแก้ว (glass density)

วัตถุ	ความหนาแน่นของอนุภาคแบบกลุ่ม (bulk density), (g/cm <sup>3</sup> )					
	NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	NO. 5	ค่าเฉลี่ย
แก้ว	2.542	2.541	2.540	2.540	2.540	2.541

#### ก 4. การหาสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง

ตัวอย่างการคำนวณหาสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจาก

$$\text{สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง} = (\bar{D}_w / \text{เส้นผ่านศูนย์กลาง})$$

แทนค่า

$$\bar{D}_w = 820 \text{ ไมครอน}$$

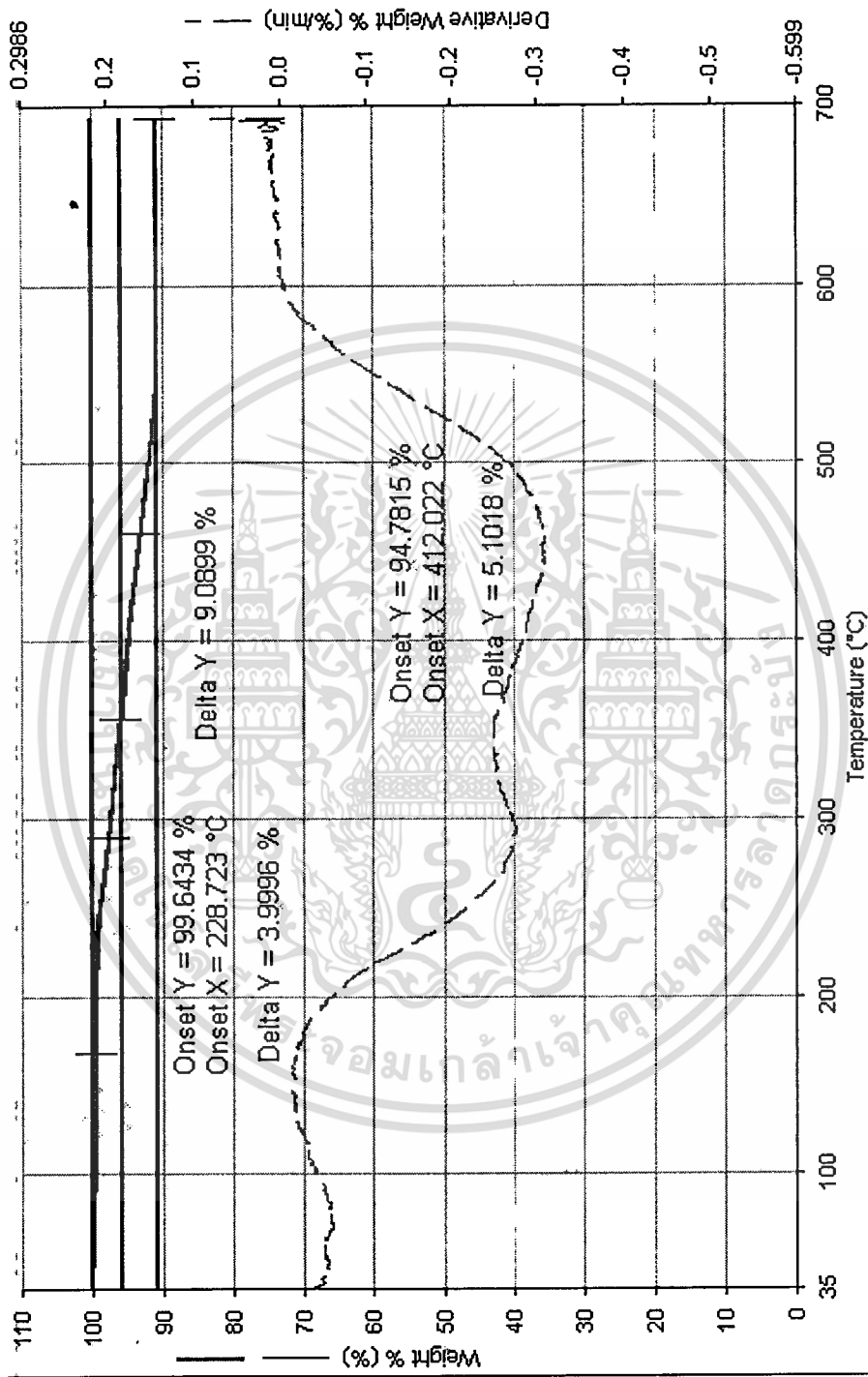
$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลาง} = 7.0 \text{ ไมครอน}$$

$$\text{สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง} = (820/7)$$

$$\text{สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 117$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 การสลายตัวทางความร้อนของโพลิเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### สมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr

ตารางที่ ข.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและจำนวนเซลล์ของวัสดุเชิงประกอบ โฝมยางจากเส้นใย  
แก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr

ปริมาณสารให้ฟอง (phr)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	ความหนาแน่นเซลล์ (เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
0	0	0
5	153	85,630
10	267	257,327
15	396	2,198,634
20	426	4,024,098

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นเซลล์ของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้ว  
ชนิดเส้นสั้น 10 phr ที่ปริมาณสารให้ฟอง 5 phr โดยใช้สมการที่ 3.2

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f}$$

แทนค่า  $\rho_p = 1.403 \text{ g/cm}^3$

แทนค่า  $\rho_f = 1.144 \text{ g/cm}^3$

จะได้

$$\varphi = \frac{1.403}{1.144}$$

$$\varphi = 1.226$$

จากสมการที่ 3.3

$$n = \left( \frac{n_b}{\ell^2} \right)^{\frac{3}{2}} \times 10^3 \times \varphi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการกำหนดพื้นที่เพื่อนับจำนวนเซลล์ จะได้จำนวนเซลล์ทั้งหมด เซลล์ ในพื้นที่  $10^8$  ตารางเซนติเมตร

แทนค่า  $n_b$  = จำนวนเซลล์ในพื้นที่

$\ell$  = 2.5 มิลลิเมตร

$\varphi$  = 1.226

จะได้

$$n = \left( \frac{106}{2.5 \times 2.5} \right)^{3/2} \times 10^3 \times 1.226$$

$n = 85,630$  เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ดังแสดงผลการคำนวณความหนาแน่นเซลล์ในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.2 ความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr

ปริมาณสารให้ฟอง (phr)	ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )						ร้อยละอัตราการขยายตัว
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	ค่าเฉลี่ย	
0	1.396	1.395	1.384	1.388	1.450	1.403	0
5	1.005	1.206	1.204	1.100	1.206	1.144	23
10	0.716	0.893	0.876	0.914	0.978	0.875	59
15	0.575	0.556	0.488	0.482	0.420	0.504	178
20	0.418	0.351	0.353	0.356	0.360	0.368	281

ตารางที่ ข.3 ค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบโฟมยางจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น 10 phr

ปริมาณสารให้ฟอง (phr)	ค่าการนำความร้อน ( $\text{w/m.K}$ )		
	No. 1	No. 2	ค่าเฉลี่ย
0	0.170	0.158	0.164
5	0.153	0.141	0.147
10	0.102	0.104	0.103
15	0.088	0.092	0.090
20	0.065	0.076	0.071

## ภาคผนวก ค

### สมบัติของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้ว

ตารางที่ ค.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์เฉลี่ยและจำนวนเซลล์ของวัสดุประกอบ โฝมยางจากเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว		เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	ความหนาแน่นเซลล์
ชนิด	ปริมาณ (phr)	( $\mu\text{m}$ )	(เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
เส้นสั้น	0	426	15,300
	30	226	24,002
	50	152.7	27,907
	70	185	21,950
ผง	30	278	25,403
	50	199	27,260
	70	167	25,517
	100	201	20,204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบโฟมยางจากเส้นใย  
แก้วชนิดเส้นสั้น

สภาวะ	ปริมาณเส้นใย แก้วชนิดเส้น สั้น (phr)	ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )						ร้อยละ อัตราการ ขยายตัว
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	ค่าเฉลี่ย	
ก่อน โฟม	0	1.018	1.032	0.996	0.983	1.012	1.008	0
	30	1.123	0.975	1.128	1.125	1.126	1.095	0
	50	1.126	1.159	1.131	1.103	1.065	1.117	0
	70	1.180	1.184	1.199	1.163	1.182	1.182	0
	100	1.308	1.289	1.285	1.295	1.246	1.285	0
หลัง โฟม	0	0.360	0.350	0.356	0.348	0.342	0.351	287
	30	0.508	0.486	0.521	0.504	0.488	0.501	219
	50	0.647	0.640	0.638	0.649	0.632	0.641	174
	70	0.705	0.709	0.694	0.700	0.704	0.702	168
	100	0.960	0.955	0.978	0.967	0.975	0.967	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ความหนาแน่นและร้อยละอัตราการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใย  
แก้วชนิดผง

สภาวะ	ปริมาณเส้นใย แก้วชนิดเส้น ผง (phr)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )						ร้อยละ อัตราการ ขยายตัว
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	ค่าเฉลี่ย	
ก่อนโฟม	0	1.018	1.032	0.996	0.983	1.012	1.008	0
	30	1.128	1.113	1.100	1.106	1.109	1.111	0
	50	1.176	1.167	1.156	1.163	1.152	1.163	0
	70	1.200	1.176	1.175	1.276	1.180	1.201	0
	100	1.253	1.301	1.286	1.254	1.268	1.272	0
หลังโฟม	0	0.360	0.350	0.356	0.348	0.342	0.351	287
	30	0.369	0.372	0.342	0.389	0.341	0.360	307
	50	0.560	0.536	0.513	0.520	0.506	0.532	223
	70	0.589	0.607	0.606	0.599	0.584	0.599	200
	100	0.943	0.904	0.916	0.923	0.914	0.933	139

ตารางที่ ค.4 สัดส่วน โดยปริมาตรของยาง ใยแก้วและแก๊สในเนื้อวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้น  
ใยแก้ว

เส้นใยแก้ว		สัดส่วนโดยปริมาตร ของยาง	สัดส่วนโดยปริมาตร ของใยแก้ว	สัดส่วนโดยปริมาตร ของแก๊ส
ชนิด	ปริมาณ (phr)	No. 1	No. 2	No. 3
เส้นสั้น	0	0.348	0.000	0.652
	30	0.382	0.075	0.542
	50	0.424	0.150	0.426
	70	0.410	0.184	0.406
	100	0.480	0.273	0.247
ผง	30	0.276	0.050	0.675
	50	0.345	0.103	0.552
	70	0.350	0.149	0.501
	100	0.455	0.266	0.278

ตารางที่ ค.5 ความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว		ความทนแรงดึง (N/mm <sup>2</sup> )					
ชนิด	ปริมาณ (phr)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	ค่าเฉลี่ย
เส้นสั้น	0	5.275	5.965	5.675	7.413	5.737	6.013
	30	3.124	4.229	4.950	4.276	3.958	4.107
	50	1.642	2.010	2.346	2.663	2.063	2.145
	70	1.647	1.223	1.141	1.493	1.276	1.356
	100	1.097	0.869	0.730	2.048	0.287	1.006
ผง	30	3.186	3.547	4.165	4.072	4.653	3.925
	50	1.912	1.976	2.038	2.135	2.846	2.181
	70	1.243	1.284	1.076	1.004	1.283	1.178
	100	0.946	0.876	0.796	0.814	0.799	0.846

ตารางที่ ค.6 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว		ความแข็ง (shore A)					
ชนิด	ปริมาณ (phr)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	ค่าเฉลี่ย
เส้นสั้น	0	13.50	13.00	13.00	10.50	7.00	11.40
	30	14.00	12.50	14.00	13.00	12.00	13.10
	50	17.50	14.50	17.00	15.50	16.50	16.20
	70	29.50	26.50	25.00	26.50	27.50	27.00
	100	43.00	45.00	44.00	44.00	46.50	44.50
ผง	30	13.50	14.50	15.00	14.50	13.00	14.10
	50	16.00	17.00	17.00	17.50	16.00	16.70
	70	21.50	22.50	23.00	21.00	22.00	22.00
	100	40.00	39.50	40.00	39.00	39.50	39.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ร้อยละการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว		ร้อยละการดูดซับน้ำ					
ชนิด	ปริมาณ (phr)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	ค่าเฉลี่ย
เส้นสั้น	0	1.724	1.504	1.923	2.083	1.389	1.725
	30	2.985	3.226	3.306	3.361	2.899	3.155
	50	4.425	4.255	3.883	4.464	4.348	4.275
	70	5.000	4.908	5.389	5.000	5.882	5.236
	100	7.059	7.018	6.061	6.180	5.587	6.381
ผง	30	1.775	1.657	1.875	2.190	1.863	1.872
	50	3.333	2.881	3.419	3.687	3.704	3.405
	70	4.375	3.681	7.784	0.556	6.618	4.603
	100	5.291	5.200	5.238	5.140	4.933	5.160

ตารางที่ ก.8 อัตราการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบ โฟมยางจากเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว		อัตราการลามไฟเผาไหม้ (เซนติเมตรต่อนาที)					
ชนิด	ปริมาณ (phr)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	ค่าเฉลี่ย
เส้นสั้น	0	21.973	20.036	21.887	20.362	20.279	20.907
	30	13.481	14.080	14.773	14.272	13.365	13.994
	50	10.566	9.233	11.155	10.946	9.558	10.292
	70	5.482	5.806	5.948	5.256	5.071	5.513
	100	4.303	4.647	4.850	5.073	5.129	4.800
ผง	30	15.812	15.862	16.704	16.704	16.170	16.250
	50	10.681	11.892	10.904	10.112	10.345	10.787
	70	9.042	8.867	8.330	8.300	7.461	8.400
	100	7.535	7.022	7.442	7.658	7.049	7.341

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้วที่ได้จากการทดลอง และคำนวณ

เส้นใยแก้ว		ค่าการนำความร้อน (W /mK)				
		จากการทดลอง			จากการคำนวณ	
ชนิด	ปริมาณ (phr)	No. 1	No. 2	ค่าเฉลี่ย	แบบขนาน	แบบอนุกรม
เส้นสั้น	0	0.064	0.066	0.065	0.073	0.037
	30	0.067	0.067	0.067	0.078	0.040
	50	0.067	0.068	0.068	0.085	0.044
	70	0.077	0.078	0.078	0.084	0.044
	100	0.069	0.070	0.070	0.094	0.052
ผง	30	0.078	0.079	0.079	0.064	0.035
	50	0.086	0.089	0.088	0.074	0.039
	70	0.089	0.089	0.089	0.075	0.040
	100	0.090	0.090	0.090	0.091	0.049

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบโฝมยางจากเส้นใยแก้ว ชนิดเส้นสั้น 30 phr โดยใช้สมการที่ 4.4 และ 4.5

$$\text{สมการความสัมพันธ์แบบขนาน} \quad k_c = \phi_g k_g + \phi_r k_r + \phi_f k_f \quad (4.4)$$

แทนค่า

$$k_g = 0.026 \quad \text{W/mK}$$

$$k_r = 0.16 \quad \text{W/mK}$$

$$k_f = 0.04 \quad \text{W/mK}$$

$$\phi_g = 0.542$$

$$\phi_r = 0.382$$

$$\phi_f = 0.075$$

$$k_c = (0.542 \times 0.026) + (0.382 \times 0.16) + (0.075 \times 0.04)$$

$$k_c = 0.078 \quad \text{W/mK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความสัมพันธ์แบบอนุกรม

$$k_c = \frac{k_g k_r k_f}{\phi_g k_g + \phi_r k_r + \phi_f k_f} \quad (4.5)$$

แทนค่า

$$k_g = 0.026 \quad \text{W/mK}$$

$$k_r = 0.16 \quad \text{W/mK}$$

$$k_f = 0.04 \quad \text{W/mK}$$

$$\phi_g = 0.542$$

$$\phi_r = 0.382$$

$$\phi_f = 0.075$$

$$k_c = \frac{(0.026 \times 0.16 \times 0.04)}{(0.542 \times 0.026) + (0.382 \times 0.16) + (0.075 \times 0.04)}$$

$$k_c = 0.040 \quad \text{W/mK}$$

ดังแสดงผลการคำนวณค่าการนำความร้อนจากสมการความสัมพันธ์แบบขนานและแบบอนุกรมในตารางที่ ค.9

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวลัดดาวรรณม์ คัชনী
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 8 พฤษภาคม 2521
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เคมี)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2544

## ประสบการณ์

- ฝึกงานที่บริษัทซีไอแกนด์คาร์บอน จำกัด ระหว่างวันที่ 10 กันยายน - 28 ธันวาคม 2544
- ขณะศึกษาต่อปริญญาโท ทำงานที่บริษัทไมโครไฟเบอร์อุตสาหกรรม จำกัด

## ผลงานทางวิชาการ

- สุรัตน์ อารีรัตน์ และ ลัดดาวรรณม์ คัชনী “การใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนใยแก้วสำหรับการผลิตฉนวนกันความร้อนชนิดพอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม.” ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15. ชลบุรี: ประเทศไทย. 27-28 ตุลาคม 2548.