

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปัจจัยสำหรับการเตรียมไมโครเซลลูลาร์โฟม

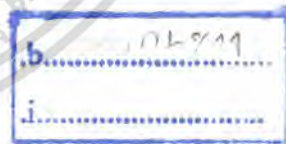
Studying of Parameter for Preparation of Microcellular Foam



T104206



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 104206  
วัน,เดือน,ปี 30 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## **Studying of Parameters for Preparation of Microcellular Foam**



**A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements**

**For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering**

**Faculty of Engineering**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์    การศึกษาปัจจัยสำหรับการเตรียมไมโครเซลดุลาร์โฟม  
โดย                            นายณัฐพงศ์    เชื้อพล                            รหัสนักศึกษา 48010258  
                                  นายธนบัตร    ธาราศักดิ์                            รหัสนักศึกษา 48010341  
อาจารย์ที่ปรึกษา        ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์  
                                  สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
                                  สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร.สุรัตน์                            อาริรัตน์)  
.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.อภิรักษ์                            นัมคณิสร์)  
.....กรรมการ  
(ผศ.รื่นฤดี                            เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาปัจจัยสำหรับการเตรียมไมโครเซลลูลาร์โฟม
โดย	นายณัฐพงศ์ เชื้อพล นายชนบัตร์ ชาราศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาแนวทางในการพัฒนาคุณภาพและเพิ่มมูลค่าของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงคือการทำพอลิเอทิลีนโฟม ด้วยการมุ่งเน้นพัฒนาและเสริมสร้างความเข้าใจในปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนโฟมชนิดความหนาแน่นสูง เช่น ขนาดของฟองแก๊สในโฟม ความหนาแน่นของฟองแก๊สในโฟม เป็นต้น ในการทดลองได้ใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ขนาดเล็กเพื่อขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีทางเคมีและใช้ปั๊มอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์จากนั้นคลายความดันอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้โฟมด้วยวิธีทางกายภาพ เมื่อได้พอลิเมอร์โฟมแล้วจึงนำมาวัดค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์โฟมและพอลิเมอร์ที่ยังไม่ได้ขึ้นรูปโฟม รวมทั้งศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy : SEM) และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานต่างๆกับคุณภาพของพอลิเอทิลีน โฟมชนิดความหนาแน่นสูง จากผลการทดลองขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีทางเคมี การปรับเปลี่ยนสูตรผสมที่มีพอลิเมอร์ A อยู่ในช่วงร้อยละ 80 ถึง 100 โดยมวล และพอลิเมอร์ B อยู่ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 20 โดยมวล พบว่าพอลิเอทิลีน โฟมชนิดความหนาแน่นสูงที่เตรียมได้มีขนาดของฟองเฉลี่ยเล็กที่สุด 24.6 ไมโครเมตร ขนาดของฟองเฉลี่ยใหญ่ที่สุด 196 ไมโครเมตร ในขณะที่ความหนาแน่นของฟองต่ำสุด  $1.4 \times 10^5$  ฟองต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของฟองมากที่สุดคือ  $2.61 \times 10^6$  ฟองต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งอัตราส่วนผสมมีผลต่อขนาดของฟองคือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพอลิเมอร์ B มากขึ้นทำให้ขนาดฟองมีขนาดเล็กลงโดยอัตราส่วนของพอลิเมอร์ B ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 20 โดยมวล อีกทั้งทำให้ความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟมคือ 195 และ 200 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมมีผลต่อขนาดของฟองคือเมื่อลดอุณหภูมิจะทำให้ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลง และปริมาณของสารเกิดนิวเคลียสที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.4-0.5 phr โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเกิดนิวเคลียสจะส่งผลให้ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลง และความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้นแต่เมื่อเพิ่มมากเกินไปก็จะไม่ส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟม ซึ่งการขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีทางกายภาพได้ผลการทดลองลักษณะเดียวกับการทดลองวิธีทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Report Title** Studying of Parameters for Preparation of Microcellular Foam

**By** Mr.Natthapong Chuapon  
Mr.Thanabat Tharasak

**Advisor** Assist. Prof. Dr.Surat Areerat

**Report for** Bachelor Degree in Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

Aim of this research is find the best way for suit the electrical data transfer wire insulator is investigated. Via each factor affected to properties of HDPE foam, we examine basic factor involved, for instance, size of bubble cell and density of bubble. Our experiment is around two type polymer casting. One is chemical casting on mini twin screw extruder, other is physical casting, which was, attempt to dissolve super critical carbon dioxide in dense polymer then rapidly release pressure. Each type, we consider the morphological result by SEM (Scanning Electron Microscope) and attempt to find some relationship with each basic factor. According to the result of experiment, polymer blend ratio between polymer A and B is concerned. We adjust ratio of polymer A:B from 80:20 to 100:0, now, we find that bubble size is 24.6 to 196 micrometer and bubble density in cutting plain is  $1.4 \times 10^5$  to  $2.61 \times 10^6$  bubbles per cubic centimeters. We also find trend on two factors, first, we find increasing of polymer B ratio is reducing the average bubble size. Second, we find increasing of polymer B ratio is also increase bubble density. Due to trend we discuss earlier, we advice to keep ratio of polymer B in range 15% to 20% by mass. The other factor we evaluate the effect is casting temperature. Study range is between 195 and 200 degree Celsius. This factor influent larger bubble size when experiment held at higher temperature. Suitable nucleating agent amount is in rage of 0.4 to 0.5 phr. Effect of this variable is increasing amount of nucleating agent, less bubble size and also increasing bubble density. However increasing too much nucleating agent there is no effect on foam morphology. Investigation results of chemical variable are harmonized by physical variable.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ และดูแลเอาใจใส่การทำงานตลอดมา อีกทั้งยังมอบโอกาสที่ดีในด้านต่างๆอีกมากมาย

ขอขอบคุณบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้มีโอกาสฝึกงานและเก็บข้อมูลที่เป็น อันยังสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ต่างๆอีกด้วย

ขอขอบคุณคุณวิญญู ตัฒตะพานิชกุล คุณเยาวมาลย์ อังกิจไพบูลย์ คุณจรรยา หิรัญวิวัฒน์กุล และเจ้าหน้าที่ของบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด ที่คอยดูแล และให้คำแนะนำในขณะที่ฝึกงาน

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ

ขอขอบคุณคุณพงศ์ประกาศ ปิยะม โนชา นักศึกษาปริญญาโท และเพื่อนทุกคนภายใต้การดูแลของ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่คอยช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการซ่อมแซมเครื่องมือ อุปกรณ์ และทำให้การทดลองยังดำเนินต่อไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน

ยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ ขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นายณัฐพงศ์

เชื้อพล

นายธนบัตร

ธาราศักดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	1
1.2 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	2
1.3 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 โฟม.....	3
2.2 ประเภทของโฟม.....	3
2.2.1 การแบ่งประเภทของโฟมตามประเภทของพลาสติก.....	3
2.2.2 การแบ่งประเภทของโฟมตามโครงสร้างของฟอง.....	4
2.2.3 การแบ่งประเภทของโฟมตามลักษณะของการเกิดฟอง.....	4
2.3 หลักการของการเกิดโฟม.....	5
2.3.1 การเกิดฟองแก๊ส.....	5
2.3.2 การเติบโตของฟองแก๊ส.....	5
2.3.3 การคงสภาพของฟองแก๊ส.....	5
2.4 ผลกระทบของการหาค่าจำนวนฟองบนพื้นผิว.....	7
2.5.1 การรู้ขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ.....	7
2.5.2 การรู้จำนวนฟองที่แน่นอน.....	8
2.5 การคำนวณหาความหนาแน่นของฟอง.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม.....	10
2.6.1 ผลของอุณหภูมิ.....	10
2.6.2 ผลของความดัน.....	12
2.6.3 ผลของอัตราการปล่อยความดัน.....	12
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
<b>บทที่ 3 การทดลอง.....</b>	<b>19</b>
3.1 การผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ผสมด้วยการเติมสารเคมี.....	19
3.1.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	19
3.1.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์โฟม.....	20
3.1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของพอลิเมอร์โฟม.....	21
3.2 การผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีทางกายภาพ.....	21
3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	21
3.2.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์โฟม.....	22
3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของพอลิเมอร์โฟม.....	22
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>23</b>
ตอนที่ 1 ผลการทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น.....	23
4.1 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม.....	24
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม.....	25
4.3 ผลของสารเกิดนิวเคลียสที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม.....	26
ตอนที่ 2 ผลการทดลองการเกิด โฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด.....	26
4.4 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม.....	28
4.5 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม.....	30
ตอนที่ 3 ผลการทดลองการเกิด โฟมด้วยวิธีทางกายภาพ.....	32
4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมชุดที่ 1.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลีซูดที่ 2.....	34
4.8 ผลของสารเกิดนิวเคลียสที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลีซูดที่ 2.....	35
4.9 ผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลีซูดที่ 2.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	37
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	37
5.1.1 ผลของอุณหภูมิของการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนแบบวิธีทางเคมี.....	37
5.1.2 ผลของอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ของการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนแบบวิธีทางเคมี.....	37
5.1.3 ผลของสารเกิดนิวเคลียสของการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนแบบวิธีทางเคมี.....	37
5.1.4 ผลของอุณหภูมิของการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนแบบวิธีทางกายภาพ.....	37
5.1.5 ผลของอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ของการขึ้นรูปโพลี โพรพิลีนแบบวิธีทางกายภาพ.....	38
5.1.6 ผลของสารเกิดนิวเคลียสของการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนแบบวิธีทางกายภาพ.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก ก.....	40
ภาคผนวก ก การหาความหนาแน่น.....	41
ภาคผนวก ข การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา.....	42
ภาคผนวก ค การคำนวณหาความหนาแน่นของฟอง.....	43
ภาคผนวก ง การหลอมพอลิเมอร์.....	46
ภาคผนวก จ การขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนด้วยวิธีทางกายภาพ.....	47
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองและผลการคำนวณ.....	49

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนการขยายตัวของโฟมอะแทกติกพอลิสไตรีนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	11
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น.....	20
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด.....	20
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ.....	22
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น.....	23
ตารางที่ 4.2 ผลของพอลิเมอร์ผสมต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr.....	24
ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม ประกอบด้วย พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 1.0 phr .....	25
ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม ประกอบด้วย พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 1.0 phr .....	26
ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด.....	27
ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพเบื้องต้น.....	32
ตารางที่ ค-1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าของพอลิเมอร์โฟม.....	45
ตารางที่ ฉ-1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น.....	49
ตารางที่ ฉ-2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ การเกิด โฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น.....	50
ตารางที่ ฉ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr.....	51
ตารางที่ ฉ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr.....	52
ตารางที่ ฉ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr.....	53
ตารางที่ ฉ-6 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิด โฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด.....	54
ตารางที่ ฉ-7 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของการเกิด โฟมด้วยวิธี ทางเคมีอย่างละเอียด.....	55
ตารางที่ ฉ-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ฉ-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr.....	57
ตารางที่ ฉ-10 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ.....	58
ตารางที่ ฉ-11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ การเกิด โฟมด้วยวิธีทางกายภาพชุดที่ 1.....	59
ตารางที่ ฉ-12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของ การเกิด โฟมด้วยวิธีทางกายภาพชุดที่ 2.....	60
ตารางที่ ฉ-13 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส.....	61
ตารางที่ ฉ-14 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส.....	62
ตารางที่ ฉ-15 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.....	63

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของโฟม.....	4
รูปที่ 2.2 กราฟส่วนโค้งของไบโมดอลและสปิน โมดอล M และ U คือส่วนของ metastable phase และ unstable paths.....	6
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบการแยกเฟส.....	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างการแยกเฟสสองแบบของพอลิสไตรีนและพอลิสไตรีนที่เจือโบริน.....	6
รูปที่ 2.5 การนับจำนวนฟองกรณีรู้ขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ.....	7
รูปที่ 2.6 การนับจำนวนฟองกรณีรู้จำนวนฟอง.....	8
รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างของโฟมอะแทกติกพอลิสไตรีน.....	10
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างของโฟมอะแทกติกพอลิสไตรีน.....	10
รูปที่ 2.9 การกระจายตัวของขนาดของฟองที่อุณหภูมิต่างๆ.....	10
รูปที่ 2.10 ผลของความดันที่มีผลต่อโครงสร้างของโฟมพอลิโพรพิลีน.....	12
รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของขนาดของฟองที่ความดันต่างๆ.....	13
รูปที่ 2.12 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อโครงสร้างของโฟมพอลิโพรพิลีน.....	14
รูปที่ 2.13 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อโครงสร้างของ โฟมพอลิโพรพิลีน.....	15
รูปที่ 2.14 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของฟอง.....	16
รูปที่ 2.15 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อความหนาแน่นของฟอง.....	16
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของพอลิเมอร์ผสมต่อ ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ โฟมระหว่างพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B ที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยสารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr.....	24
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิต่อ ลักษณะ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ โฟม ประกอบด้วยพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 1.0 phr.....	25

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของ สารเกิดนิวเคลียสต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลี ประกอบด้วย พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	26
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด มีอัตราส่วนผสมของ พอลิเมอร์ A ต่อพอลิเมอร์ B เป็นร้อยละ โดยมวล มีสารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส.....	28
รูปที่ 4.5 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อขนาดของฟองและความหนาแน่นของฟองสารเกิดฟอง 3 phr และสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส.....	29
รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยมีอัตราส่วนผสมของ พอลิเมอร์ A ต่อพอลิเมอร์ B เป็นร้อยละ โดยมวล โดยมีสารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	29
รูปที่ 4.7 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อขนาดของฟองและความหนาแน่นของฟองสารเกิดฟอง 3 phr และสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	30
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิ ต่อขนาดของฟองและความหนาแน่นของฟอง พอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมวลพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr.....	30
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดของฟอง มีสารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr.....	31
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของฟอง มีสารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr.....	31
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของฟอง มีสารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr.....	31
รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลี.....	32
รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิ ต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมวลพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมวล สารเกิดนิวเคลียส 0.0 phr.....	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลีเมทิลที่ 2.....	34
รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิ ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr.....	34
รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของ อัตราการปล่อยความดันต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส.....	35
รูปที่ 4.16 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของ สารเกิดนิวเคลียสต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.....	35
รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของ สารเกิดนิวเคลียสต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.....	36
รูปที่ 4.18 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอัตราส่วนผสม ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.....	36
รูปที่ ก-1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S).....	41
รูปที่ ข-1 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater.....	42
รูปที่ ข-2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น LEO 1455VP.....	42
รูปที่ ค-1 การนับจำนวนฟองกรณีรู้ขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ.....	43
รูปที่ ง-1 เครื่องให้ความร้อน (Heater) รุ่น yellow MAG HS7.....	46
รูปที่ ง-2 พอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอม.....	46
รูปที่ จ-1 การติดชิ้นงานพอลิเมอร์ลงบนแผ่นอลูมิเนียม.....	48
รูปที่ จ-2 การติดตั้งปฏิกรณ์ความดันสูง.....	48
รูปที่ จ-3 หน้าจอแสดงผลของปั๊มแรงดันสูง.....	48

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันการปรับปรุงคุณสมบัติพอลิเมอร์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมกันมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์โพลีมีคุณสมบัติที่ดีหลายด้าน เช่น มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ ดูดซับแรงกระแทกได้ดี มีความสามารถในการเป็นฉนวนความร้อนและความต้านทานทางไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้พอลิเมอร์โพลีเหมาะที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น วัสดุโพลีกันกระแทก ฉนวนกันความร้อน และ ฉนวนสายไฟฟ้า เป็นต้น

ปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของพอลิเมอร์โพลีส่วนใหญ่เกิดมาจากการกระจายตัวของฟองแก๊สและความหนาแน่นของฟองในเนื้อโพลีไม่สม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากพอลิเมอร์โพลีไม่ได้มาตรฐาน เช่น ความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันในแต่ละส่วนของเนื้อโพลี เป็นต้น ในปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาค้นคว้าวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพลี โดยเฉพาะสภาวะในการขึ้นรูปโพลี อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและปริมาณสารที่จำเป็นสำหรับการเกิดโพลี เช่น สารเกิดฟอง (Blowing agent) และสารเกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) เป็นต้น เพื่อช่วยการละลายและการกระจายตัวของสารเคมีเหล่านี้ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยมีจุดประสงค์หลักคือหาความสัมพันธ์ที่ได้จากแนวโน้มของปัจจัยต่างๆของการขึ้นรูปโพลีที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของโพลี (Foam Morphology) และทำให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิเมอร์โพลีที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต ลดการเกิดของเสียที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานและทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการแข่งขันด้านคุณภาพและราคามากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มโอกาสทางธุรกิจของผู้ประกอบการไทยในตลาดโลกต่อไป

### 1.1 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) สำหรับการผลิตพอลิเมอร์โพลี
- 2) เพื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการเกิดโพลีระหว่างวิธีทางกายภาพ (Physical Method) และวิธีทางเคมี (Chemical Method)
- 3) ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์โพลี เช่น อุณหภูมิ อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ขอบเขตการดำเนินงาน

- 1) ปรับส่วนผสมและชนิดของพอลิเมอร์
- 2) ปรับความเข้มข้นของสารเกิดนิวเคลียส (Nucleating Agent)
- 3) การเกิดโฟมใช้สองวิธีคือวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี

## 1.3 วิธีการดำเนิน

ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเกิดโฟมทางกายภาพและเคมี โดยศึกษาจากการทดลองการขึ้นรูปพอลิเมอร์โฟมด้วยกระบวนการต่างๆ และขึ้นรูปโฟมที่สภาวะต่างๆกัน รวบรวมผลการทดลอง หรือข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลของการเกิดโฟมด้วยกระบวนการเกิดโฟมทั้งสองวิธี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทำนายผลกระทบและแนวโน้มจากการเปลี่ยนตัวแปรในกระบวนการเกิดโฟมได้
- 2) สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์โฟมได้
- 3) สามารถอธิบายผลกระทบของการเกิดโฟมจากกระบวนการเกิดโฟมทั้งสองวิธีได้ (วิธีทางเคมีและทางกายภาพ)

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 โฟม (Foam) [1]

โฟม หรือ โฟมพลาสติก หมายถึงวัสดุที่มีโพรงแก๊สเล็กๆ (Cellular materials) มากมาย กระจายในเนื้อพลาสติก โดยเกิดจากสารเกิดฟอง (Blowing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกเช่น เพนเทน (Pentane) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene Chloride) เป็นต้น โฟมมีทั้งชนิดแข็ง (Rigid foam) แข็งปานกลาง (Semirigid foam) และยืดหยุ่น (Flexible foam) [2] โดยทั่วไปวัสดุโฟมจะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัสดุ ได้แก่ วัสดุที่เป็นของแข็งหรือของเหลว และวัสดุแก๊ส ซึ่งวัสดุแก๊สจะแทรกตัวอยู่ในวัสดุของแข็งหรือของเหลว ทำให้คุณสมบัตินั้นเปลี่ยนไป เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล ความเป็นฉนวน เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่เรียกว่าพอลิเมอร์โฟมนั้น ส่วนที่เป็นวัสดุของแข็งอาจประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียงชนิดหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งชนิด เช่น ในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปโฟม เป็นต้น การผสมของพอลิเมอร์ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนไป เช่น อุณหภูมิการหลอมตัว ความหนาแน่น เป็นต้น

#### 2.2 ประเภทของโฟม

##### 2.2.1. การแบ่งประเภทของโฟมตามประเภทของพลาสติก [1]

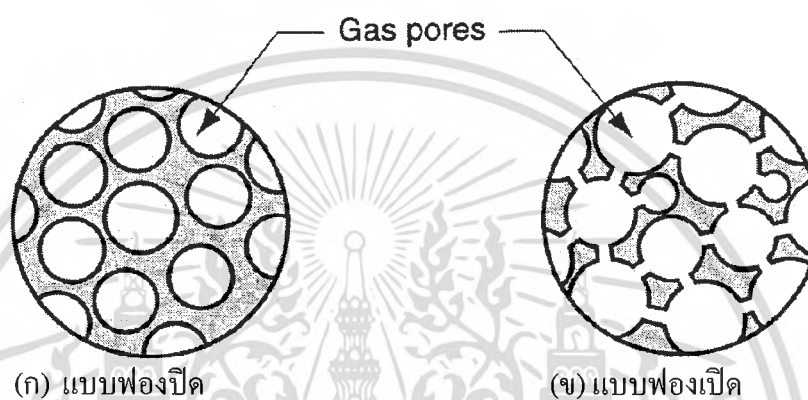
โฟมสามารถจำแนกได้ตามแบ่งการประเภทของพลาสติก ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset foam) เป็นโฟมพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam : PU foams)
2. โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) เป็นโฟมพลาสติกที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้เช่น โฟมพอลิสไตรีน (Expandable Polystyrene Foams : EPS foams) โฟมพอลิเอทิลีน (Expandable Ethylene Foams : EPE foams) เป็นต้น

### 2.2.2 การแบ่งประเภทของโฟมตามโครงสร้างของฟอง [2]

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. โฟมแบบฟองเปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโครงของฟองต่อกันจนถึงกันจนทำให้แก๊สหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในหมุนเวียนถึงกันได้ ดังรูปที่ 2.1 (ก)
2. โฟมแบบฟองปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโครงของช่องว่าง หรือฟองไม่ต่อกันถึงกันได้ ลักษณะของฟองแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของโฟม [3]

### 2.2.3 การแบ่งประเภทของโฟมตามลักษณะของการเกิดฟอง [2]

การทำให้เกิดฟองแก๊สในกระบวนการผลิตโฟมสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1. วิธีทางกายภาพ (Physical Method) คือใช้แก๊สความดันสูงอัดให้เกิดแก๊สแทรกในเนื้อพอลิเมอร์ที่อ่อนตัวลงเนื่องจากความร้อน เมื่อลดความดันลงอย่างรวดเร็วแก๊สที่แทรกตัวในพอลิเมอร์จะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดรูพรุนกระจายในพอลิเมอร์ หรือการใช้กระบวนการเชิงกล เช่นการใช้เครื่องปั่นให้อากาศแทรกตัวลงในพอลิเมอร์ ก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการทำให้พอลิเมอร์คงรูปเพื่อกักอากาศหรือแก๊สไว้ใน โครงสร้างของฟองจึงเกิดเป็นโฟมในที่สุด
2. วิธีทางเคมี (Chemical Method) คือใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปทำให้เกิดโฟม วัตถุดิบที่ใช้มักประกอบด้วยสารเคมีเหลวสองชนิดหรือมากกว่านั้น โดยชนิดหนึ่งเป็นมอนอเมอร์ หนึ่งหรือสองตัวซึ่งพร้อมจะเกิดเป็นพอลิเมอร์ อีกชนิดหนึ่งเป็นสารที่ทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดแก๊ส แก๊สที่เกิดจะถูกกักไว้ใน โครงสร้างของพอลิเมอร์ในขณะที่โครงสร้างของพอลิเมอร์เริ่มอยู่แข็งตัว เช่น โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam) หรือการใช้สารเคมีที่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนผสมลงในพอลิเมอร์ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน แก๊สซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อพอลิเมอร์

## 2.3 หลักการของการเกิดโฟม (Principles of foam formation)

การเกิดโฟมเป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางด้านฟิสิกส์และทางด้านเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่ สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเอง หรือจากสารอื่นที่เข้ามา พื้นฐานของการเกิด โฟมที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟองแก๊ส (Bubble nucleation) และการเจริญเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟม ซึ่งการเกิดโฟมมีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของแก๊สจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์ และมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันจากภายนอกเพื่อขยายขนาด จึงมองเห็น โฟมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟองพองตัวออกมา หากความไม่มีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics instability) เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้นการเกิดนิวเคลียสทำให้เกิดกลุ่มของฟองจำนวนมากจะได้ในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งวิธีการในการทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอ สำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธี คือการลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ กระบวนการเกิดโฟมจะประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอนได้แก่

### 2.3.1 การเกิดฟองแก๊ส (Bubble Formation)

การเกิดฟองแก๊สเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยเมื่อมีการรบกวนระบบหรือก่อกวนให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ กระบวนการดังกล่าวจะไปกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส หรือฟองแก๊สขนาดเล็กๆจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ นิวเคลียสเหล่านี้จะมีการเจริญเติบโตไปเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ต่อไป

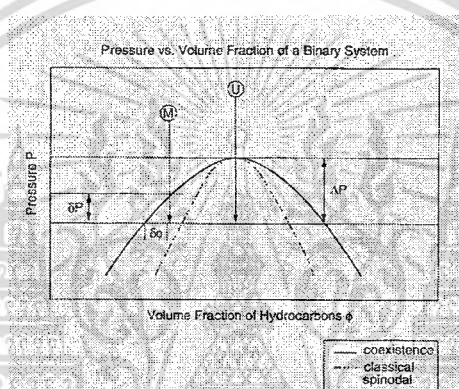
### 2.3.2 การเจริญเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble Growth)

หลังจากการเกิดนิวเคลียสของฟองแก๊สเกิดขึ้นแล้ว และนิวเคลียสเหล่านี้มีการขยายขนาดเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลจากการแพร่ของแก๊สจากพอลิเมอร์เข้าไปในฟองแก๊ส และผลจากการรวมตัวกันของแก๊ส (Coalescence) มากกว่า 2 ฟอง

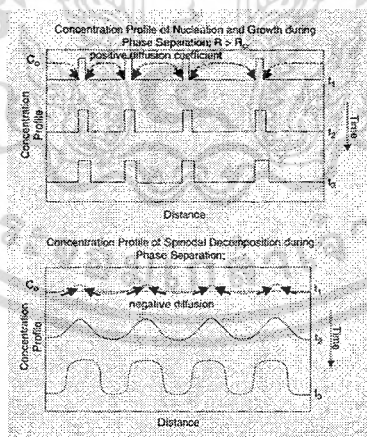
### 2.3.3 การคงสภาพของฟองแก๊ส (Bubble Stability)

การคงสภาพของฟองแก๊ส เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม ฟองแก๊สขั้นนี้จะมีการคงสภาพและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด ซึ่งอาจเกิดสมดุลใหม่ของระบบ หรือเกิดจากการคงรูปของพอลิเมอร์

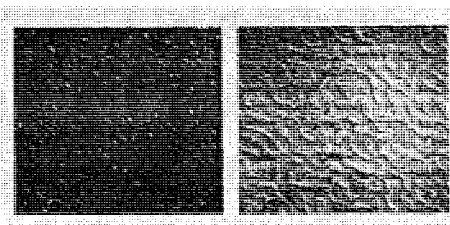
หลักการเกิดโพลีเมอร์วิธีหนึ่งคือเมื่อให้ความสามารถในการละลายของแก๊สถึงจุดหนึ่ง เฟสของแก๊สจะมีแนวโน้มที่จะแยกออกจากเฟสพอลิเมอร์ เฟสไดอะแกรมพื้นฐานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งทำให้เห็นว่าจะเกิดสภาวะ stable single phase มากกว่า metastable single phase ในส่วนที่เป็น unstable two phase region ทำให้เชื่อได้ว่า ภายใน metastable phase กลไกที่เกิดขึ้นได้เด่นกว่าคือ Nucleation (Nu) แต่กลไกหลักที่เกิดในส่วนที่ไม่เสถียรคือ Spinodal Decomposition (SD) หรืออาณาเขตของการเรียงตัวและขยายขนาด ทั้งสองส่วนถูกควบคุมโดยการแพร่ แม้ว่า ในทิศทางของการแพร่จะตรงกันข้ามก็ตาม ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.2 รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึง โครงสร้างการแยกเฟสสองแบบของพอลิस्टาไทรินและพอลิस्टาไทรินที่เจือโบริมิน ที่สัดส่วนโดยปริมาตรแตกต่างกันสองค่า [4]



รูปที่ 2.2 กราฟส่วนโค้งของไบโมดอลและสปีน โมดอล M และ U คือส่วนของ metastable phase และ unstable paths



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบการแยกเฟส



รูปที่ 2.4 โครงสร้างการแยกเฟสสองแบบของพอลิस्टาไทรินและพอลิस्टาไทรินแบบเจือโบริมิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ผลกระทบของการหาค่าจำนวนฟองบนพื้นผิว [5]

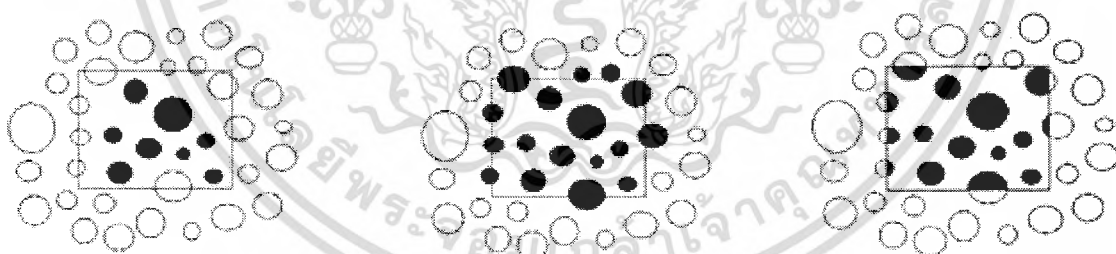
การหาค่าของความหนาแน่นฟองนั้นเป็นสิ่งที่ไม่มีความแน่นอนเนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะวัดพื้นที่ผิวที่แน่นอนไปพร้อมๆกันกับพื้นที่ผิวที่สนใจได้ และค่าฟองที่นับได้อย่างแน่นอน มีวิธี 2 วิธีที่ได้ผลในการหาค่าความหนาแน่นฟองเชิงพื้นที่ผิวที่ได้รับการสนใจได้แก่

### 2.4.1 การรู้ขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ

เทคนิคนี้ประกอบด้วยการหารูปร่างของพื้นที่ผิวที่ทราบค่าในกรณีที่ยากที่สุดคือเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและนับฟองที่อยู่ในนั้น ความยากคือหาจำนวนฟองที่อยู่ในนั้นที่แน่นอนดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 ต้องกำหนดขอบขึ้นมาก่อนเป็นอันดับแรก ต่อไปนี้คือกรณีที่สามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณีคือ

1. พิจารณาเฉพาะฟองที่อยู่ในพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้เกิดการนับน้อยกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.5 (ก) จำนวนฟองที่ต่ำที่สุดคือ 8 ฟอง
2. พิจารณาฟองทั้งหมดที่อยู่ซ้อนเหลื่อมกับขอบของพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้เกิดการนับเกินจากความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.5 (ข) จำนวนฟองที่มากที่สุดคือ 17 ฟอง
3. พิจารณาฟองพื้นผิวที่อยู่ภายในพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด แต่เป็นการยากที่จะวัดขนาดฟองที่อยู่ภายในหรือภายนอกของส่วนที่สนใจ โดยปราศจากความรู้และข้อมูลเพิ่มเติม ซึ่งการนับฟองที่อยู่บริเวณขอบให้ถือเป็นครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.5 (ค) จำนวนฟองเฉลี่ยคือ 12.5 ฟอง

ในกรณีทั้งหมดที่กล่าวมานี้เลือกใช้พื้นที่ที่มีความน่าจะเป็นสูงสุดที่จะลดผลกระทบจากกรณีดังกล่าว



(ก) จำนวนฟอง 8 ฟอง

(ข) จำนวนฟอง 17 ฟอง

(ค) จำนวนฟอง 12.5 ฟอง

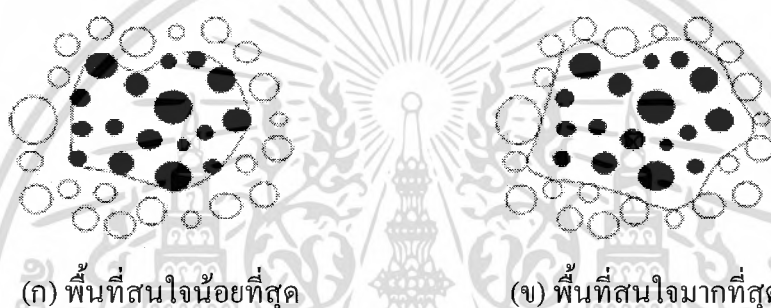
รูปที่ 2.5 การนับจำนวนฟองกรณีรู้ขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ

### 2.4.2 การรู้จำนวนฟองที่แน่นอน

เป็นการจะนับฟองโดยการกำหนดจำนวนฟองที่สนใจ ในขณะที่การหาพื้นที่ที่สนใจสามารถหาค่าได้ดังนี้

1. กรณีพื้นที่ที่สนใจมีขนาดเล็กที่สุดกำหนดโดยขอบนอกของฟองที่ถูกนับ วิธีนี้จะเกิดการนับที่น้อยกว่าความเป็นจริงจากพื้นที่ผิวจริง ดังนั้น จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นฟองมากกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.6 (ก)

2. กรณีพื้นที่ที่มีขนาดที่สนใจใหญ่ที่สุด ซึ่งถูกจำกัดโดยเส้นภายในของรอยต่อของฟองที่อยู่ล้อมรอบ เทคนิคนี้จะทำให้ค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง ดังนั้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นฟองน้อยกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.6 (ข)



(ก) พื้นที่สนใจน้อยที่สุด

(ข) พื้นที่สนใจมากที่สุด

รูปที่ 2.6 การนับจำนวนฟองกรณีรู้จำนวนฟอง

### 2.5 การคำนวณหาความหนาแน่นของฟอง (Cell Density) [6]

โดยทั่วไปโพลีเมพลาสติกที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอ และมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะประกอบด้วยฟองแก๊สประมาณ  $10^5$  ถึง  $10^{10}$  ฟอง โดยมีความแตกต่างของขนาดฟองแก๊สที่แท้จริงกับขนาดของฟองแก๊สโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 25 ขนาดของฟองแก๊สและการกระจายขนาดของฟองแก๊สไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์ แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการโพลีด้วย จำนวนฟองแก๊สต่อหน่วยปริมาตรโพลีเป็นตัวแปรที่สำคัญและมีการนำมาใช้บ่อยครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารเกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) หรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมจำนวนฟองแก๊สต่อปริมาตรโพลี 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร หาได้จากสมการ

$$n = \left(\frac{n_b}{l^2}\right)^{3/2} \times 10^3 \times \emptyset \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $n$  คือ จำนวนฟองต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของพอลิเมอร์โฟม  
 $n_b$  คือ จำนวนฟองในพื้นที่  $l \times l$   
 $l$  คือ ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร  
 $\emptyset$  คือ อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio)

อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) นิยามได้ดังสมการต่อไปนี้

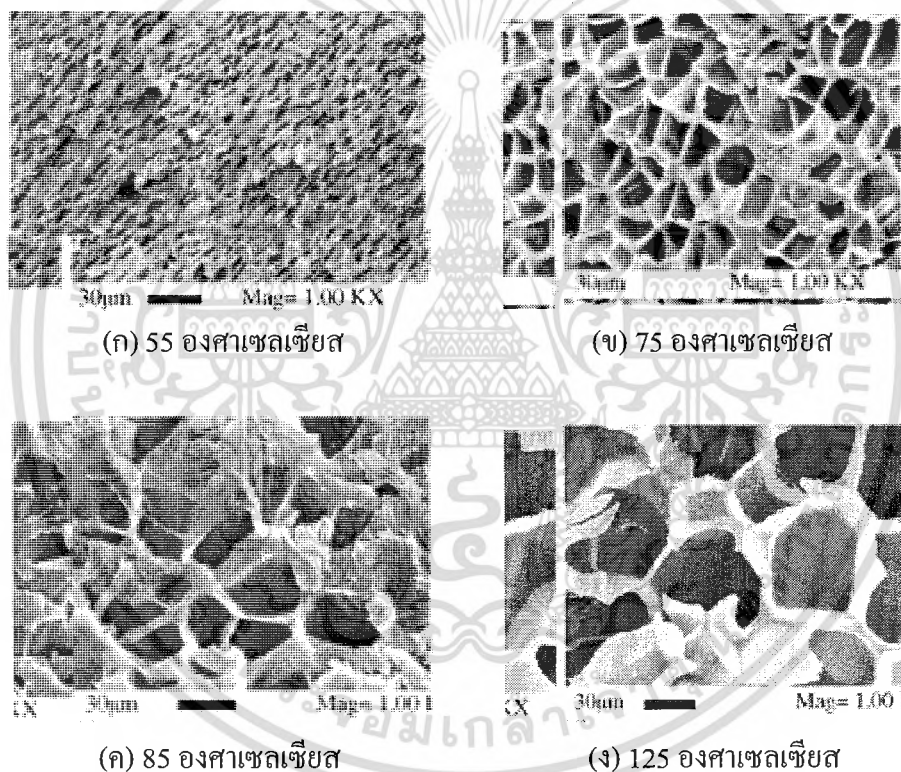
$$\emptyset = \frac{\rho_p}{\rho_f} = \frac{V_f}{V_p} \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์  
 $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์โฟม  
 $V_f$  คือ ปริมาตรของพอลิเมอร์โฟม  
 $V_p$  คือ ปริมาตรของพอลิเมอร์

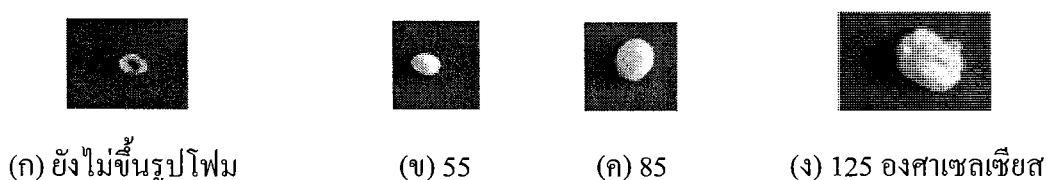
## 2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของฟอเมออร์โฟม (Foam Morphology)

### 2.6.1 ผลของอุณหภูมิ [7]

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมของอะแทคติกพอลิสไตรีน (Atactic polystyrene) ที่ความดัน 230 บาร์ (bar) เวลาในการทดลอง (Contact time) 240 นาที สารเกิดฟองคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon dioxide) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในขึ้นรูปโฟม มีดังนี้ 55 75 85 และ 125 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 2.7 เป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ขนาดของฟองมีขนาดใหญ่ขึ้นคือเพิ่มจาก 5 ไมโครเมตร จนถึงมีขนาดประมาณ 60 ไมโครเมตร ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ความหนาแน่นของฟองลดลง



รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างของโฟมอะแทคติกพอลิสไตรีน



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างของโฟมอะแทคติกพอลิสไตรีน

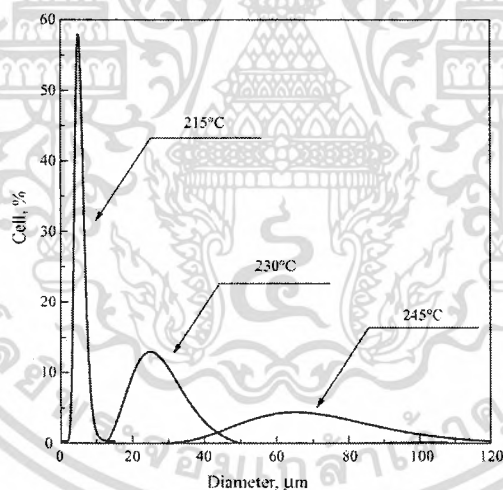
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนการขยายตัวของโฟมอะแทคติกพอลิสไตรีนที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาตรก่อนการทดลอง (ลูกบาศก์เมตร)	ปริมาตรหลังการทดลอง (ลูกบาศก์เมตร)	อัตราส่วนการขยายตัว
55	17.7	21.1	1.2
85	17.8	62.2	3.5
125	17.5	167.8	9.6

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้พอลิเมอร์โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ยังไม่ได้ขึ้นรูปโฟมดังรูปที่ 2.5 จากตารางที่ 2.1 อัตราส่วนการขยายตัว ( $\Delta V$ ) หาได้จากปริมาตรหลังการทดลอง ( $V_{\text{final}}$ ) หารด้วยปริมาตรก่อนการทดลอง ( $V_{\text{initial}}$ ) ผลของอุณหภูมิคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 55 85 และ 125 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราส่วนการขยายเพิ่มจาก 1.2 ถึง 9.6

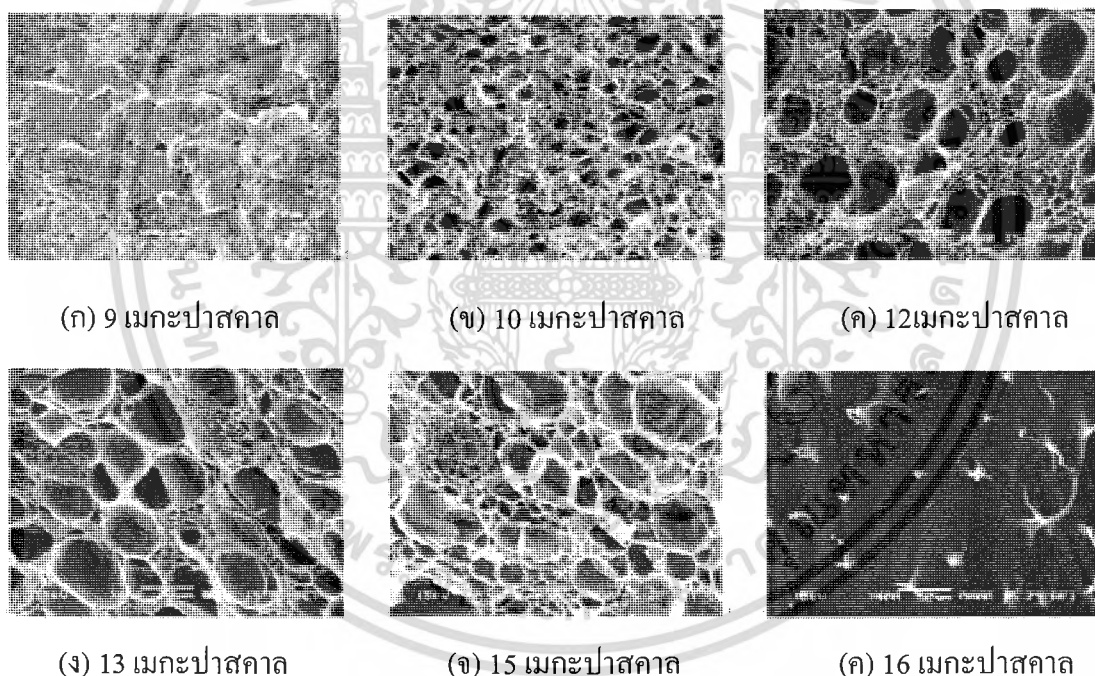
จากการขึ้นรูปโฟมด้วยเซลลูโลสแอซิเตต (Cellulose Acetate) ที่ความดัน 250 บาร์ (bar) เวลาในการทดลอง 480 นาที โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมคือ 215 230 และ 245 องศาเซลเซียส ผลที่ได้คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีการกระจายตัวของขนาดฟองมากขึ้นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การกระจายตัวของขนาดของฟองที่อุณหภูมิต่างๆ

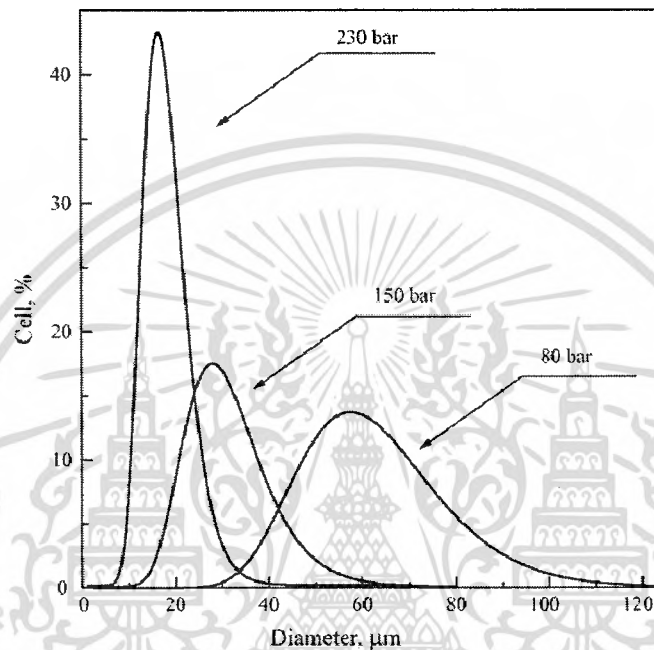
## 2.6.2 ผลของความดัน

จากรูปที่ 2.10 เป็นผลจากความดันเมื่อขึ้นรูปโพลีเมอร์ด้วยพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส อัตราการปล่อยความดันที่ 15 เมกะปาสคาลต่อวินาที (MPa/s) และใช้สารเกิดฟองคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยความดันที่ใช้คือ 9 10 12 13 15 และ 16 เมกะปาสคาล (MPa) โดยที่ความดัน 9 เมกะปาสคาลไม่พบว่ามีฟองเกิดขึ้น เมื่อเพิ่มความดันพบว่ามีการเกิดฟองขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเพิ่มความดันจนถึง 16 เมกะปาสคาล พบว่าไม่มีฟองเกิดขึ้น ผลการทดลองที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ความดันต่ำ ทำให้มีการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิโพรพิลีนที่ค่อนข้างน้อยจึงมีความเป็นโพลีเมอร์น้อย เมื่อทำการเพิ่มความดัน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายได้มากขึ้นจึงมีความเป็นโพลีเมอร์มากขึ้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงของการหลอมเหลว (Melt strength) ที่ค่อนข้างต่ำจึงทำให้ไม่สามารถคงรูปของโพลีเมอร์ได้จึงไม่เห็นฟองเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.10 (ค) [8]



รูปที่ 2.10 ผลของความดันที่มีผลต่อโครงสร้างของโพลีโพรพิลีน

เมื่อทำการขึ้นรูปโพลีเมอร์ด้วยอะแทกติกพอลิสไตรีนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 240 นาที สารเกิดฟองที่ใช้คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยใช้ความดัน 80 180 และ 230 บาร์ มีผลทำให้ขนาดของฟองใหญ่ขึ้นจาก 15 จนถึง 60 ไมโครเมตร ในทางกลับกันการกระจายตัวของขนาดของฟองก็มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความดันดังรูปที่ 2.11 [7]



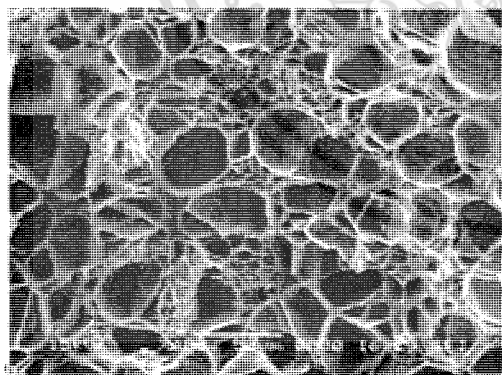
รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของขนาดของฟองที่ความดันต่างๆ

### 2.6.3 ผลของอัตราการปล่อยความดัน (Depressurization rate) [8]

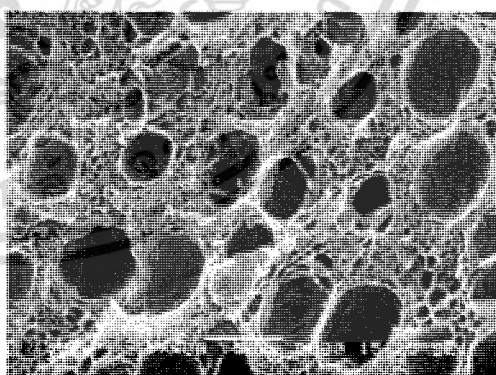
จากการศึกษาพบว่าเมื่อขึ้นรูปโฟมด้วยพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิ (อุณหภูมิสูง) 160 องศาเซลเซียส ที่ความดัน (ความดันต่ำ) 12 เมกะปาสคาล สารเกิดฟองคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยอัตราการปล่อยความดันที่ใช้คือ 1.4 2.8 และ 15 เมกะปาสคาลต่อวินาที ผลคือที่อัตราการปล่อยความดันต่ำ ฟองจะเกิดขึ้นในบริเวณอสัณฐานเท่านั้น (Amorphous region) ดังรูปที่ 2.12 (ก) เมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยความดัน ฟองมีขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณอสัณฐานและฟองสามารถเกิดได้ในบริเวณผลึก (Crystalline region) เนื่องจากบริเวณอสัณฐานมีความอ่อนตัวมากกว่าบริเวณผลึกจึงทำให้ฟองในบริเวณอสัณฐานมีขนาดใหญ่กว่าฟองในบริเวณผลึก ดังรูปที่ 2.12 (ข) และ 2.12 (ง)



(ก) 9 เมกะปาสคาลต่อวินาที



(ข) 10 เมกะปาสคาลต่อวินาที

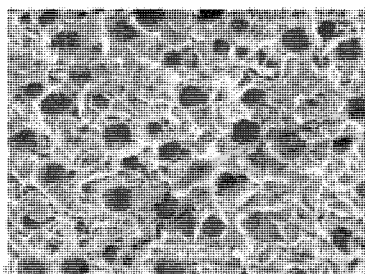


(ค) 12 เมกะปาสคาลต่อวินาที

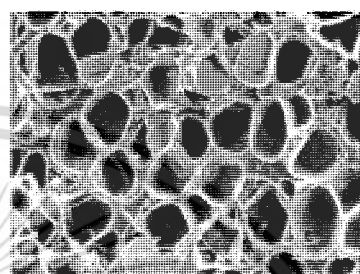
รูปที่ 2.12 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อ โครงสร้างของโฟมพอลิโพรพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

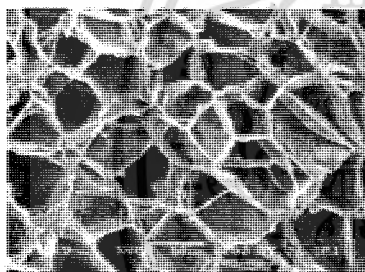
เมื่อขึ้นรูปโฟมด้วยพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิ (อุณหภูมิต่ำ) 154 องศาเซลเซียส ที่ความดัน (ความดันสูง) 25 เมกะปาสคาล สารเกิดฟองคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยอัตราการปล่อยความดันที่ใช้คือ 1.5 3.5 5.0 17.5 และ 25 เมกะปาสคาลต่อวินาที ผลคือลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิโพรพิลีนดังรูปที่ 2.10 มีลักษณะที่ดีกว่ารูปที่ 2.13 ยกเว้นที่อัตราการปล่อยความดันที่ 1.5 เมกะปาสคาลต่อวินาที



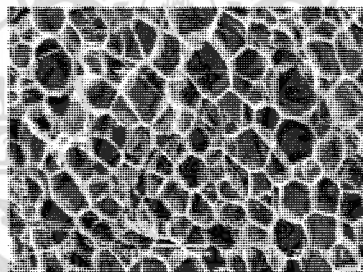
(ก) 1.5 เมกะปาสคาลต่อวินาที



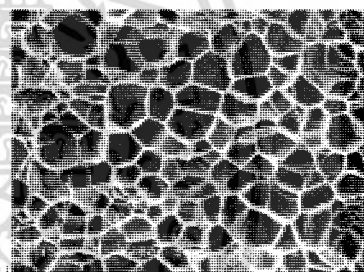
(ข) 3.5 เมกะปาสคาลต่อวินาที



(ค) 5.0 เมกะปาสคาลต่อวินาที



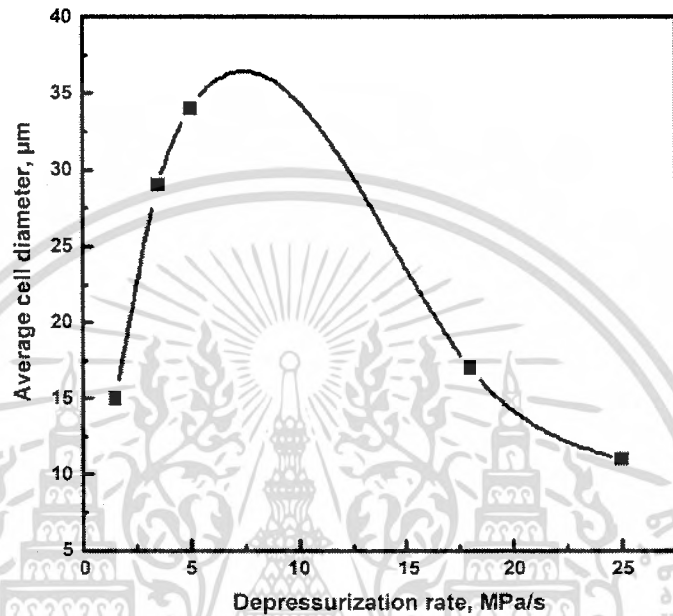
(ง) 17.5 เมกะปาสคาลต่อวินาที



(จ) 25 เมกะปาสคาลต่อวินาที

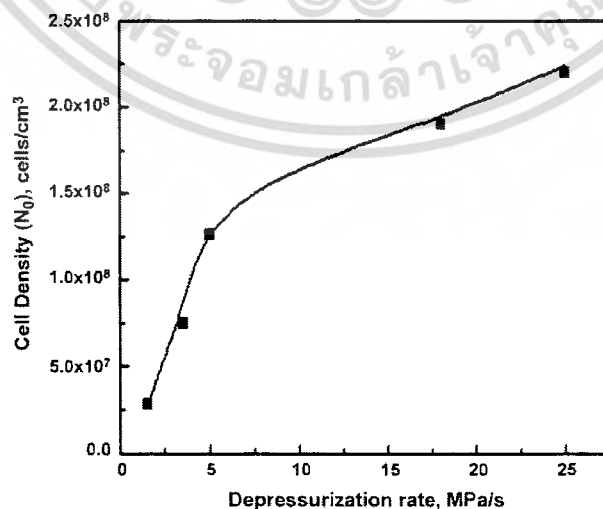
รูปที่ 2.13 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อโครงสร้างของโฟมพอลิโพรพิลีน

รูปที่ 2.14 คือผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อขนาดของฟอง เมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยความดันขนาดของฟองมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน มีขนาดฟองใหญ่ที่สุด 35 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) เมื่ออัตราการปล่อยความดันอยู่ในช่วง 7 – 12 เมกะปาสคาลต่อวินาที และฟองจะมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราการปล่อยความดันสูงขึ้น



รูปที่ 2.14 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของฟอง

รูปที่ 2.15 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อความหนาแน่นของฟอง ความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่ออัตราการปล่อยความดันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.15 ผลของอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อความหนาแน่นของฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ryan Gosselin และ Denis Rodrigue [5] ศึกษาโฟมพอลิโพลีเอทีลีนส์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด (Extrusion) และการฉีด (Injection) ในกระบวนการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาการศึกษาขึ้นรูปโฟมหาวิธีการคำนวณหาจำนวนฟองเชิงพื้นที่ผิว ในขณะที่เดียวกันเป็นการหาวิธีในการแปลงจำนวนฟองเชิงพื้นที่ผิวไปเป็นจำนวนฟองในเชิงปริมาตร วิธีการสองวิธีในการคำนวณหาจำนวนฟองเชิงพื้นที่ผิวคือ วิธีแรกเป็นการกำหนดขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ วิธีที่สองเป็นการหาจำนวนฟอง ซึ่งไม่สามารถหาพื้นที่ผิวได้โดยตรง วิธีที่สามเป็นการหาความหนาแน่นฟองต่อหน่วยปริมาตรโฟม ซึ่งคิดบนพื้นฐานของรูปทรงของฟองทรงกลมหรือทรงไข่ ทั้งสองวิธีมีความผิดพลาดประมาณร้อยละ 20 วิธีทั้งสามวิธีในการหาความหนาแน่นของฟองในหนึ่งหน่วยปริมาตรให้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันเมื่อทำการวิเคราะห์โฟมที่ได้จากการฉีดซึ่งจะได้ฟองที่มีลักษณะเป็นทรงกลม แต่จะมีความแตกต่างกันเมื่อขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีการอัดรีด ซึ่งจะได้ฟองที่มีลักษณะเป็นทรงรีหรือทรงรูปไข่

E. Reverchon และ S. Cardea [7] ศึกษาการเกิดโฟมด้วยพอลิสไตรีนและเซตูลอสแอซีเทต โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งลักษณะของโครงสร้างสามารถควบคุมได้ด้วยสภาวะการเกิดโฟม สำหรับการทดลองของพอลิสไตรีน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 55 – 120 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 230 บาร์ และเวลาที่ใช้ในการศึกษาจะอยู่ในช่วง 60 – 240 นาที ในขณะที่เซตูลอสแอซีเทต อุณหภูมิอยู่ในช่วง 215 – 245 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 250 บาร์ และเวลาที่ใช้ในการศึกษาจะอยู่ในช่วง 180 - 480 นาที ผลที่ได้คือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ขนาดของฟองใหญ่ขึ้น (พอลิสไตรีนมีค่าอยู่ในช่วง 5 – 65 ไมโครเมตร และเซตูลอสแอซีเทตมีค่าอยู่ในช่วง 7 – 70 ไมโครเมตร) ในขณะที่ความดันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟองของพอลิสไตรีนมีขนาดเล็กลงจาก 60 จนถึง 15 ไมโครเมตร ในขณะที่เซตูลอสแอซีเทตมีขนาดเล็กลงจาก 80 ถึง 20 ไมโครเมตร และเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างมีความสมมาตรและมีความเป็นระเบียบมากขึ้น

Zhi-Mei Xu และคณะ [8] ศึกษาการลักษณะการเกิดโพลีโพรพิลีน ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ และอัตราการปล่อยความดันที่มีผลต่อโครงสร้างของโพลีและอัตราส่วนการขยายตัว อีกทั้งยังศึกษาช่วงของการเกิดโพลี คือหาข้อจำกัดบนและข้อจำกัดล่างของอุณหภูมิและความดัน โดยข้อจำกัดบนของการเกิดโพลีถูกกำหนดด้วยความแข็งแรงของการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีน ในขณะที่ข้อจำกัดล่างถูกกำหนดโดยการเปลี่ยนรูป (Deformability) ช่วงของอุณหภูมิในการเกิดโพลีนั้นค่อนข้างแคบ ประมาณ 4 องศาเซลเซียส อีกทั้งช่วงของความดันในการเกิดโพลีมีค่าค่อนข้างแคบเช่นกัน จากการศึกษาผลของการเกิดโพลีด้วยการเพิ่มอุณหภูมิและการเพิ่มความดัน ผลของสถานะการขึ้นรูปโพลีที่ความดันสูง อุณหภูมิต่ำ จะมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่ดีกว่าการขึ้นรูปโพลีที่สภาวะความดันต่ำ อุณหภูมิสูง ในขณะที่อัตราการปล่อยความดันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราการปล่อยความดันนั้นทำให้ขนาดของฟองและอัตราส่วนการขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งหลังจากนั้นจะลดลงตามอัตราการเพิ่มขึ้นของความดัน

V. Firdaus และคณะ [9] ศึกษาลักษณะทางรีโอ โลยีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความเหมาะสมต่อการผลิตโพลี เนื่องจากความยาวโซ่ของกิ่งที่มีมาก ทำให้มีแรงเสียดทานในเนื้อวัสดุหลอมเหลวต่ำ เนื่องจากการที่มีความหนาแน่นต่ำส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในด้านการใช้งานที่ต้องการความเหนียวสูง ในทางกลับกันพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีความเหนียวของวัสดุหลอมเหลวสูงและทำให้โครงสร้างฟองของโพลีตามต้องการทำได้ยาก งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลในการปรับปรุง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงหรือเรียกว่า HDPE ที่ทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพ และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการมากขึ้นและยังคงจุดเด่นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเอาไว้

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 การผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีการเติมสารเคมี

การผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ผสม ในขั้นตอนแรกจะเป็นการผสมพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์สองชนิด อีกทั้งยังประกอบด้วยสารเติมแต่งต่างๆ และสารเกิดฟอง ซึ่งเป็นสารเคมีที่สามารถสลายตัวให้แก๊ส เพื่อให้แก๊สแทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการผสมของพอลิเมอร์ทำการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin screw extruder) จะได้พอลิเมอร์ผสมที่พร้อมจะนำไปเข้าสู่กระบวนการเกิดโฟม จากนั้นจะนำพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ไปเข้ากระบวนการขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดรีด (Extrusion) จะได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์โฟมผสมที่มีการขยายตัวที่ค่อนข้างสูง ซึ่งวิธีการทดลองมีดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หรือ พอลิเมอร์ A  
อุณหภูมิหลอมตัว 135 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.954 กรัม/ซม<sup>3</sup>
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หรือ พอลิเมอร์ B  
อุณหภูมิหลอมตัว 140 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.949 กรัม/ซม<sup>3</sup>
3. สารเกิดฟอง (Chemical Blowing Agent)
4. สารเกิดนิวเคลียส (Nucleating Agent)
5. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin screw extruder)
6. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (Extrusion)
7. เครื่องตัดเม็ด

##### 3.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

1. ชั่งพอลิเมอร์ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2
2. อุ้नเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ให้มีอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส
3. ใส่พอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ลงในช่องป้อนวัตถุดิบ (Hopper) สกรูจะทำการผสมพอลิเมอร์และรีดออกมาเป็นเส้นออกมาผ่านทางหัวใด
4. ทำการหล่อเย็นโดยการนำเส้นพอลิเมอร์ที่ออกมาจากหัวใดลงรางน้ำ จากนั้นนำเส้นพอลิเมอร์ผสมผ่านเข้าเครื่องตัดเพื่อให้ออกมาเป็นเม็ดพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น

ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)	สารเกิด นิวเคลียส (phr)
1	100	0	3	0.0
2	100	0		0.4
3	100	0		1.0
4	80	20		0.0
5	80	20		0.4
6	80	20		1.0

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด

ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)
1	100	0	3	0.5
2	95	5		
3	90	10		
4	85	15		
5	80	20		

### 3.1.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์โฟม

1. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ เข้ากระบวนการขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว

2. ตั้งอุณหภูมิเครื่องไว้ตามที่ต้องการดังนี้ ตารางที่ 3.1 ใช้สำหรับการขึ้นรูปโฟมที่ 200 220 และ 240 องศาเซลเซียส ตารางที่ 3.2 ใช้สำหรับการขึ้นรูปโฟมที่ 195 และ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นจะได้พอลิเมอร์โฟมที่มีลักษณะเป็นเส้น โดยเลือกช่วงที่ค่อนข้างราบเรียบเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติ และคุณลักษณะของพอลิเมอร์โฟม

1. นำพอลิเมอร์โฟมและพอลิเมอร์ผสมที่ยังไม่ได้ขึ้นรูปโฟม นำไปวัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter) ตามภาคผนวก ก บันทึกค่าที่ได้
2. ตัดโฟมให้มีขนาดประมาณ 1 x 3 ซม. นำไปแช่ในโตรเจนเหลวประมาณ 2 ซม. เพื่อให้โฟมแข็งตัวและเปราะ นำโฟมขึ้นแล้วหักโฟม เก็บชิ้นโฟมในช่องพลาสติกเพื่อนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดตามภาคผนวก ข
3. นำภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดตามัดขนาดฟองแก๊สและคำนวณหาความหนาแน่นของฟองตามภาคผนวก ค บันทึกและหาค่าเฉลี่ยจากหลายๆตำแหน่งของภาพเพื่อลดความคลาดเคลื่อน

## 3.2 การผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีทางกายภาพ

### 3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หรือ พอลิเมอร์ A  
อุณหภูมิหลอมตัว 135 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.954 กรัม/ซม<sup>3</sup>
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หรือ พอลิเมอร์ B  
อุณหภูมิหลอมตัว 140 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.949 กรัม/ซม<sup>3</sup>
3. สารเกิดนิวเคลียส
4. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว
5. อุปกรณ์การทดลองตามภาคผนวก จ

### 3.2.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

1. ชั่งพอลิเมอร์ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.3
2. อุณหภูมิเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ให้มีอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส
3. ใส่พอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ลงในช่องป้อนวัตถุดิบ (Hopper) สกรูจะทำการผสมพอลิเมอร์และทำการรีดออกมาเป็นเส้นออกมาผ่านทางหัวได
4. ทำการหล่อเย็นโดยการนำเส้นพอลิเมอร์ที่ออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเส้นพอลิเมอร์ผ่านเข้าเครื่องตัดเพื่อให้ออกมาเป็นเม็ดพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ

ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)
1	85	15	0.0
2	85	15	0.4
3	85	15	1.0
4	80	20	0.0
5	80	20	0.4
6	80	20	1.0

### 3.2.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์โฟม

1. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมทำการหลอมพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้มีขนาดประมาณ 1 x 3 ซม. ตามภาคผนวก ง
2. นำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการหลอมให้มีขนาดประมาณ 1 x 3 ซม. นำเข้าเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง
3. ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับเครื่องอัดความดันและอ่างน้ำมันตามภาคผนวก จ อัดความดันไว้ที่ 2000 psia ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส ทดลองอีกครั้งที่อุณหภูมิ 120 125 และ 130 โดยใช้อัตราส่วนผสมเหมือนเดิม ปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชม. จึงทำการเก็บตัวอย่าง

### 3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติ และคุณลักษณะของพอลิเมอร์โฟม

1. นำพอลิเมอร์โฟมและพอลิเมอร์ผสมที่ยังไม่ได้ขึ้นรูปโฟม นำไปวัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter) ตามภาคผนวก ก บันทึกค่าที่ได้
2. ตัดโฟมให้มีขนาดประมาณ 1 x 3 ซม. นำไปแช่ในโตรเจนเหลวประมาณ 2 ชม. เพื่อให้โฟมแข็งตัวและเปราะ นำโฟมขึ้นแล้วหักโฟม เก็บชิ้นโฟมในช่องพลาสติกเพื่อนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดตามภาคผนวก ข
3. นำภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมาวัดขนาดฟองแก๊สและคำนวณหาความหนาแน่นของฟองตามภาคผนวก ค บันทึกและหาค่าเฉลี่ยจากหลายๆตำแหน่งของภาพเพื่อลดความคลาดเคลื่อน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### ตอนที่ 1 ผลการทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น

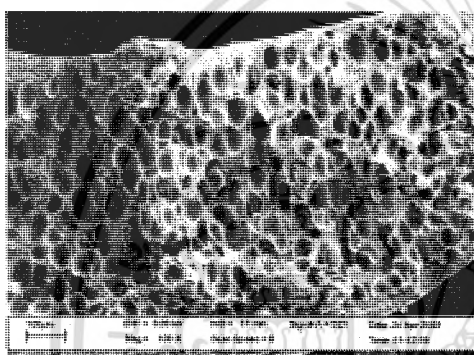
จากการทดลองขึ้นรูปโฟมด้วยอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4.1 อุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมคือ 200 220 และ 240 องศาเซลเซียส (สำหรับอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียสใช้สำหรับการทดลองชุดที่ 3 และ 6 เท่านั้น) ขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น

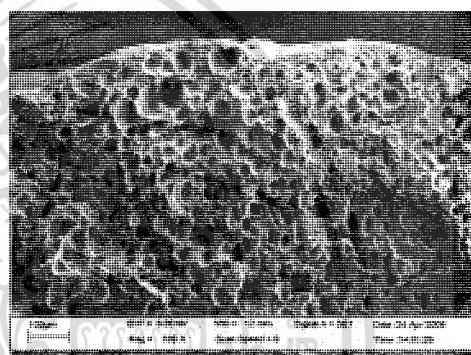
ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)	สารเกิด นิวเคลียส (phr)
1	100	0	3	0.0
2	100	0	3	0.4
3	100	0	3	1.0
4	80	20	3	0.0
5	80	20	3	0.4
6	80	20	3	1.0

#### 4.1 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม

ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมพอลิเมอร์ A ร้อยละ 100 โดยมวลและพอลิเมอร์ B ร้อยละ 0 โดยมวล เกิดฟองที่มีขนาดใหญ่ และยังมีเนื้อพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดโฟมได้อีกดังรูปที่ 4.1 (ก) ในขณะที่พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวลและพอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล ขนาดของฟองเล็กลงและมีความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ B มีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature) ที่สูงกว่าพอลิเมอร์ A ส่งผลให้เนื้อของพอลิเมอร์ B มีความแข็งมากกว่าส่งผลให้ฟองขยายตัวได้น้อยกว่าขนาดของฟองจึงมีขนาดเล็กลง การที่ขนาดของฟองเล็กลงนั้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของฟองเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 4.2



(ก) 100 : 0



(ข) 80 : 20

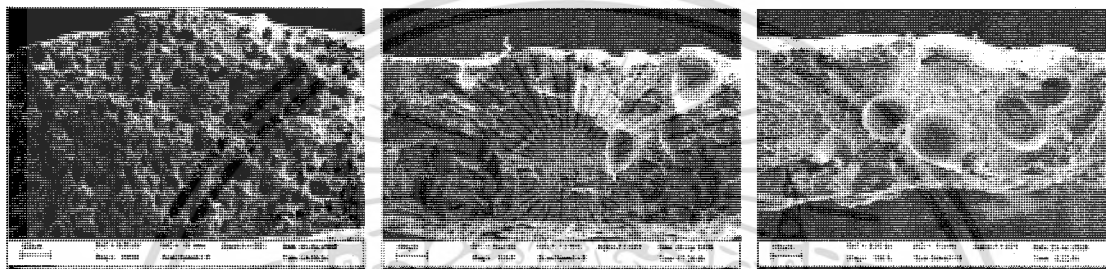
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของพอลิเมอร์ผสมต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมระหว่างพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยสารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr

ตารางที่ 4.2 ผลของพอลิเมอร์ผสมต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr

พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละ โดยมวล)	ขนาดของฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่นของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
100 : 0	48.2	$8.4 \times 10^6$
80 : 20	24.7	$1.5 \times 10^7$

#### 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม

พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 1.0 phr พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.2 (ก) มีความหนาแน่นของฟองค่อนข้างสูง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 220 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.2 (ข) มีฟองเกิดขึ้นน้อยและมีขนาดใหญ่ และที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ฟองมีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของฟองลดน้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวจึงไม่สามารถเก็บแก๊สได้ ดังรูปที่ 4.2 (ค) ซึ่งผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 4.3



(ก) 200 องศาเซลเซียส

(ข) 220 องศาเซลเซียส

(ค) 240 องศาเซลเซียส

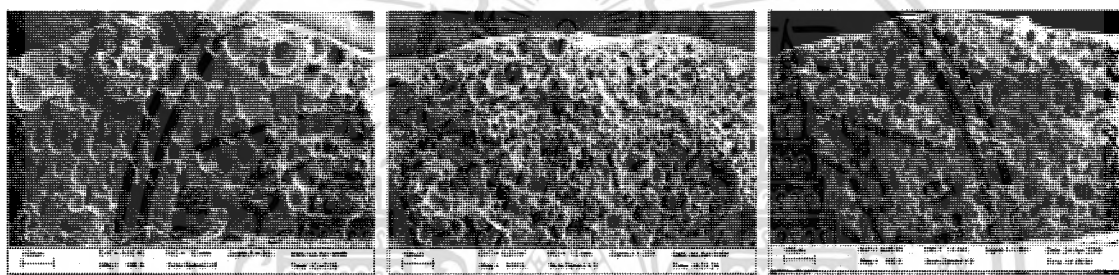
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิต่อลักษณะ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม ประกอบด้วยพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 1.0 phr

ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม ประกอบด้วย พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 1.0 phr

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ขนาดฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่นฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
200	25	$9.67 \times 10^6$
220	110	$1.17 \times 10^6$
240	186	$1.52 \times 10^5$

#### 4.3 ผลของสารเกิดนิวเคลียสที่มีผลต่อลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม

พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าที่สารเกิดนิวเคลียส 0 phr มีฟองเกิดขึ้นน้อย อีกทั้งยังมีเนื้อของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดฟองได้อีก ดังรูปที่ 4.3 (ก) และเมื่อเพิ่มสารเกิดนิวเคลียสเป็น 0.4 phr และ 1.0 phr พบว่ามีฟองเกิดมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของฟองสูงขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากเมื่อเติมสารเกิดนิวเคลียสเข้าไปทำให้เกิดที่ละลายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์มารวมตัวเพื่อเกิดเป็นฟองได้ง่ายขึ้นส่งผลให้จำนวนฟองที่เกิดมากขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการที่เพิ่มสารเกิดนิวเคลียสมากจนถึงระดับหนึ่งการเพิ่มสารเกิดนิวเคลียสจึงไม่มีผลต่อความหนาแน่นของฟอง ดังรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ในขณะที่ผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 4.4



(ก) 0 phr

(ข) 0.4 phr

(ค) 1.0 phr

รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของสารเกิดนิวเคลียสต่อลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม ประกอบด้วยพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม ประกอบด้วย พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 1.0 phr

สารเกิดนิวเคลียส (phr)	ความหนาแน่นของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
0.0	$4.04 \times 10^6$
0.4	$1.51 \times 10^7$
1.0	$9.67 \times 10^6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองตอนที่ 1 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสมในการทำพอลิเมอร์โฟมคือ พอลิเมอร์ A อยู่ในช่วง ร้อยละ 80 - 100 โดยมวล และพอลิเมอร์ B ร้อยละ 0 - 20 โดยมวล โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพอลิเมอร์ B ส่งผลให้ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลง และความหนาแน่นของฟองเพิ่มมากขึ้น การทดลองตอนที่ 2 จึงเป็นการทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียดโดยการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิเมอร์ B ขึ้นครั้งละ ร้อยละ 5 โดยมวล อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมคือ 195 และ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากการทดลองตอนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 220 และ 240 องศาเซลเซียส นั้นสูงเกินไปทำให้เนื้อพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถกักเก็บแก๊สไว้ได้ขนาดของฟองจึงมีขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นของฟองค่อนข้างน้อย ในขณะที่การทดลองตอนที่ 1 ใช้สารเกิดนิวเคลียส 0.4 และ 1.0 phr ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันคือความหนาแน่นของฟองไม่เพิ่มขึ้นตามสารเกิดนิวเคลียสที่เพิ่มขึ้น ในการทดลองตอนที่ 2 จึงใช้สารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr

## ตอนที่ 2 ผลการทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด

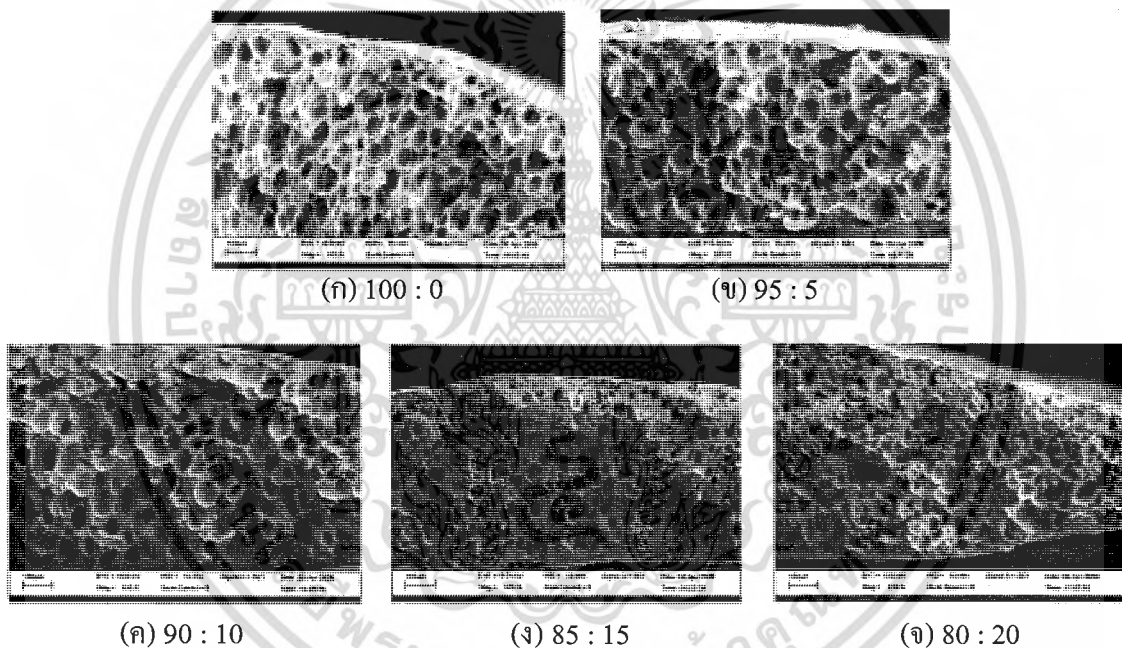
จากการทดลองขึ้นรูปโฟมด้วยอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4.5 อุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมคือ 195 และ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งประกอบด้วยสารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด

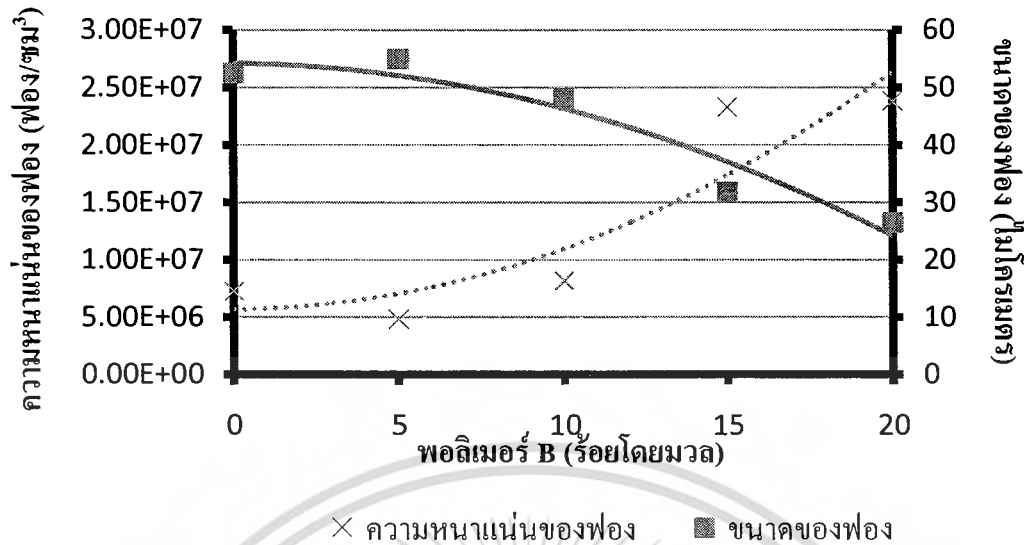
ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)
1	100	0	3	0.5
2	95	5		
3	90	10		
4	85	15		
5	80	20		

#### 4.4 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม

ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิเวเคลียส 0.5 phr พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ B นั้นส่งผลให้โครงสร้างของโฟมเป็นระเบียบมากขึ้น ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลงโดยในช่วงแรกการเพิ่มอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ B มีผลต่อขนาดของฟองค่อนข้างน้อยแต่เมื่อเพิ่มส่วนผสมของพอลิเมอร์ B ที่ร้อยละ 10 โดยมวลขึ้นไปจะส่งผลต่อขนาดของฟองอย่างมากนั่นคือเมื่อเพิ่มพอลิเมอร์ B ก็จะทำให้ขนาดของฟองนั้นเล็กลง และความหนาแน่นของฟองมากขึ้นโดยในช่วงแรกการเพิ่มอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ B มีผลต่อความหนาแน่นของฟองค่อนข้างน้อยแต่เมื่อเพิ่มส่วนผสมของพอลิเมอร์ B ที่ร้อยละ 10 โดยมวลขึ้นไปจะส่งผลต่อความหนาแน่นของฟองอย่างมากนั่นคือเมื่อเพิ่มพอลิเมอร์ B ก็จะทำให้ความหนาแน่นของฟองนั้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งผลการวิเคราะห์และคำนวณ ได้ดังรูปที่ 4.5

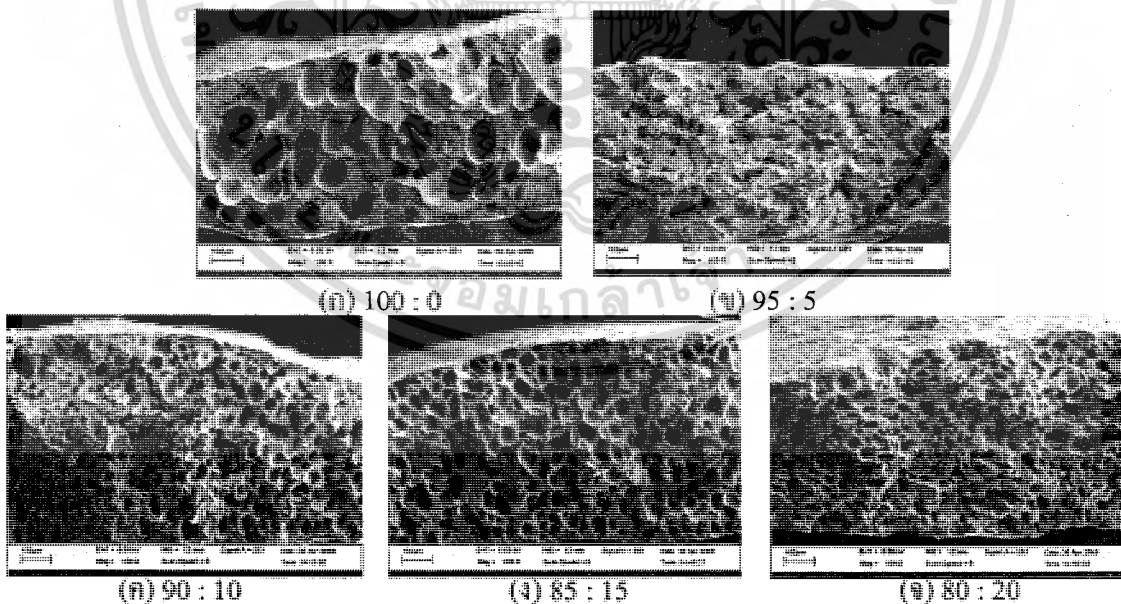


รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด มีอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ A ต่อพอลิเมอร์ B เป็นร้อยละโดยมวล มีสารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิเวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส



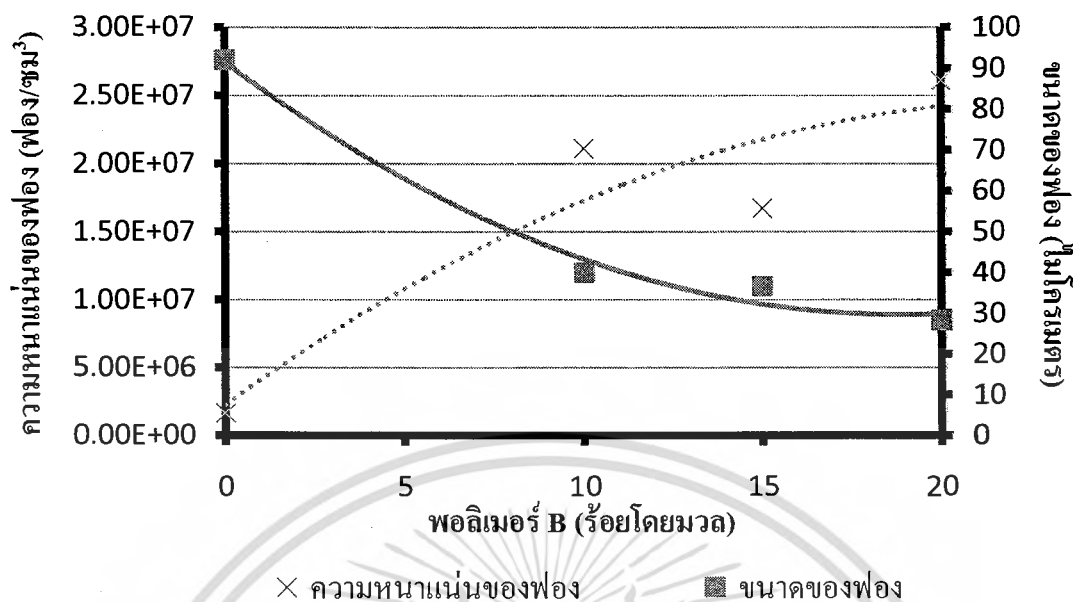
รูปที่ 4.5 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อขนาดของฟองและความหนาแน่นของฟอง โดยมีสารเกิดฟอง 3 phr และสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส

ในขณะที่ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.6 มีลักษณะคล้ายกับสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส อีกทั้งมีแนวโน้มขนาดของฟองและความหนาแน่นของฟองเหมือนกับพอลิเมอร์โฟมที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิเคราะห์และการคำนวณของพอลิเมอร์โฟมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยมีอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ A ต่อพอลิเมอร์ B เป็นร้อยละโดยมวล โดยมีสารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

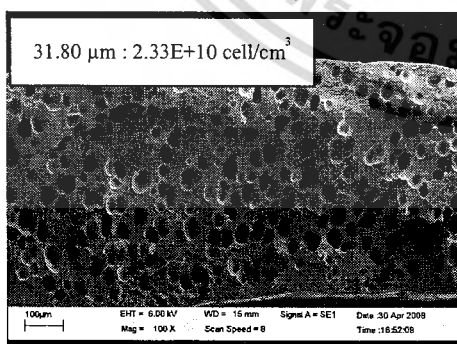
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



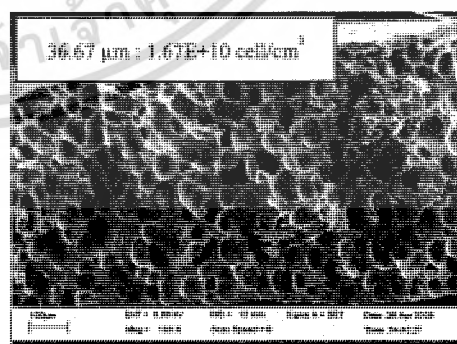
รูปที่ 4.7 ผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อขนาดของฟองและความหนาแน่นของฟอง โดยมีสารเกิดฟอง 3 phr และสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

#### 4.5 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม

พอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมวลพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส ฟองมีขนาดเล็ก ความหนาแน่นของฟองค่อนข้างสูง ดังรูปที่ 4.8 (ก) ในขณะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ฟองมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของฟองลดลง ดังรูปที่ 4.8 (ข) ซึ่งผลการวิเคราะห์และการหาขนาดของฟองได้ดังรูปที่ 4.9 สำหรับความหนาแน่นของฟองได้ผลดังรูปที่ 4.10



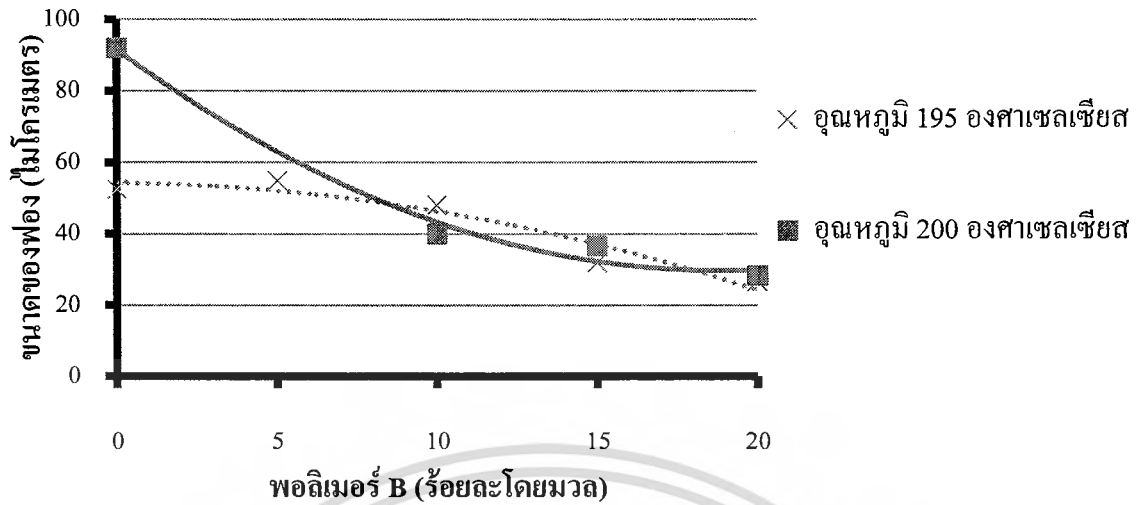
(ก) อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส



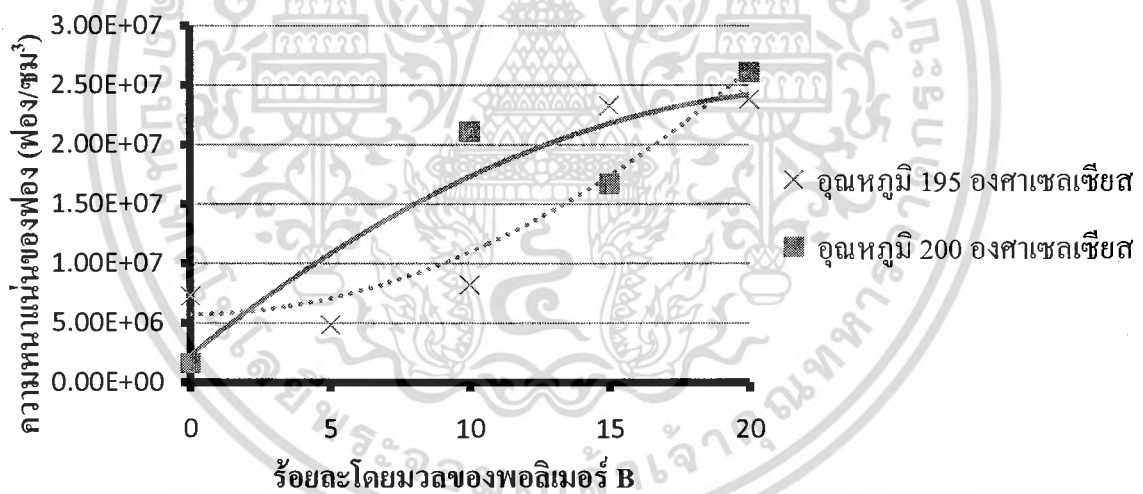
(ข) อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิต่อขนาดของฟองและความหนาแน่นของฟอง พอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมวลพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดของฟอง มีสารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของฟอง มีสารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตอนที่ 3 ผลการทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ

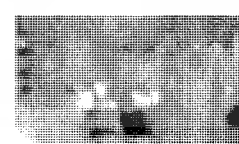
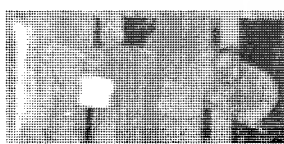
ทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ ใช้สารเกิดฟองคือแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยติดตั้งอุปกรณ์ตามภาคผนวก จ ทดลองที่อุณหภูมิ 120 130 140 และ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมเตรียมได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพเบื้องต้น

ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)
1	85	15	0.0
2	85	15	0.4
3	85	15	1.0
4	80	20	0.0
5	80	20	0.4
6	80	20	1.0

#### 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมชุดที่ 1

พอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมวลพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมวล สารเกิดนิวเคลียส 0.0 phr ดังรูปที่ 4.11 (ก) เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ยังไม่ได้ขึ้นรูปโฟม รูปที่ 4.11 (ข) เป็นการขึ้นรูปโฟมที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งมีลักษณะขาวขุ่นมากกว่ารูปที่ 4.11 (ก) ในขณะที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส พบว่าการขยายตัวที่ค่อนข้างสูงคือมีปริมาตรขยายใหญ่ขึ้นหลังการขึ้นรูปโฟมแล้ว ดังรูปที่ 4.11 (ค) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 140 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.11 (ง) พบว่าพอลิเมอร์มีการหลอมตัวมากจนไม่สามารถเก็บแก๊สไว้ได้

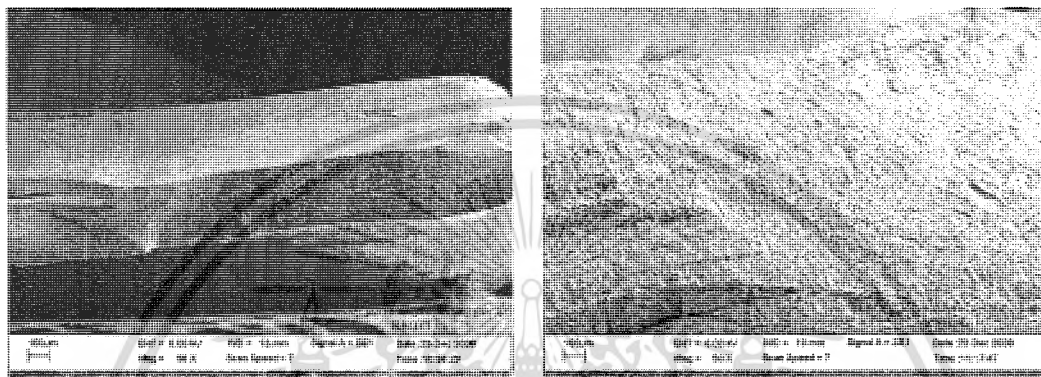


(ก) ยังไม่ขึ้นรูปโฟม (ข) 120 องศาเซลเซียส (ค) 130 องศาเซลเซียส (ง) 140 องศาเซลเซียส

#### รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของผลการทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพชุดที่ 1 ของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมีพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมีมวลสารเกิดนิวเคลียส 0.0 phr พบว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสมีลักษณะไม่มีฟองเกิดขึ้นดังรูปที่ 4.12 (ก) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 130 องศาเซลเซียส พบว่ามีฟองเกิดขึ้นและกระจายในทุกระดับของเนื้อพอลิเมอร์ ในขณะที่พอลิเมอร์โฟมที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 140 องศาเซลเซียส ไม่สามารถหักโฟมได้จึงไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้



(ก) 120 องศาเซลเซียส

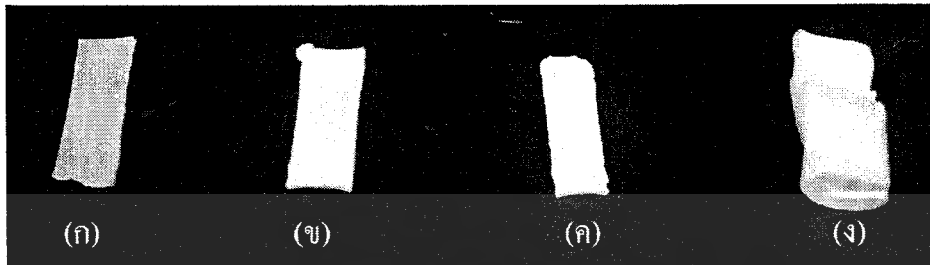
(ข) 130 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมีพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมีมวลสารเกิดนิวเคลียส 0.0 phr

ผลการทดลองในชุดที่ 1 พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟมคือ 120 ถึง 130 องศาเซลเซียสและเนื่องจากวิธีจับยึดพอลิเมอร์ทำได้ไม่ดี ทำให้โฟมไม่สามารถขยายตัวได้อย่างอิสระ จึงได้มีการเปลี่ยนวิธีจับยึดพอลิเมอร์ใหม่ ในการทดลองชุดที่สองนี้ได้มีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นมาอีกหนึ่งจุดคือ 125 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมยังคงเหมือนดังตารางที่ 4.6

#### 4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมชนิดที่ 2

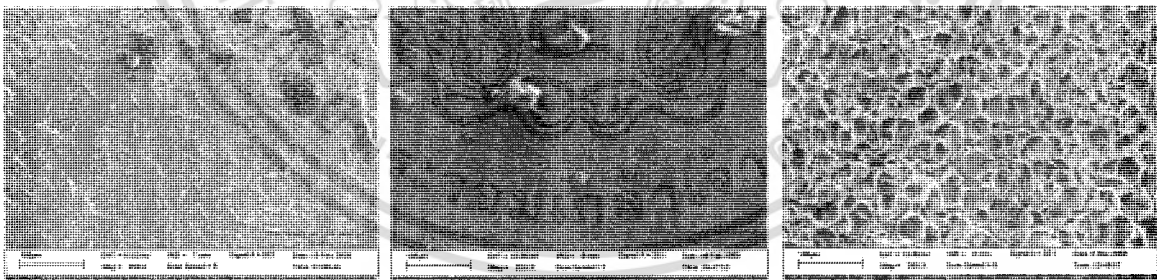
จากการเปลี่ยนวิธีจับยึดพอลิเมอร์ใหม่ในขณะขึ้นรูปโฟม ผลที่ได้คือโฟมมีการขยายตัวได้อย่างอิสระดังรูปที่ 4.13 (ง)



(ก) ยังไม่ขึ้นรูปโฟม (ข) 120 องศาเซลเซียส (ค) 125 องศาเซลเซียส (ง) 130 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟมชนิดที่ 2

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปโฟมที่ 120 องศาเซลเซียส ไม่เกิดโฟมตามลักษณะที่ต้องการคือเห็นเป็นฟอง ดังรูปที่ 4.14 (ก) เนื่องจากปล่อยความดันเร็วเกินไปจึงทำให้เกิดโฟมแบบสปินโนเดิลดีคอมโพสิชัน (Spinodal Decomposition) ดังรูปที่ 4.15 ขณะที่อุณหภูมิการขึ้นรูปโฟม 125 องศาเซลเซียส ไม่เกิดโฟมตามลักษณะที่ต้องการคือไม่เห็นเป็นฟอง ดังรูปที่ 4.14 (ข) และที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 130 องศาเซลเซียส เกิดเป็นโฟมตามลักษณะที่ต้องการ ซึ่งมีขนาดของฟองตรงตามความต้องการ คือมีขนาดประมาณ 33.1 ไมโครเมตร ความหนาแน่นของฟองประมาณ  $5.79 \times 10^7$  ฟอง/ซม<sup>3</sup>

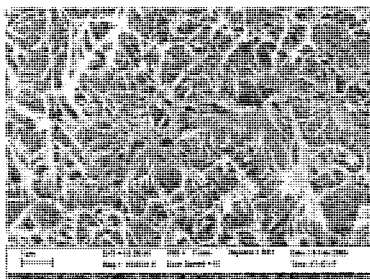


(ก) 120 องศาเซลเซียส

(ข) 125 องศาเซลเซียส

(ค) 130 องศาเซลเซียส

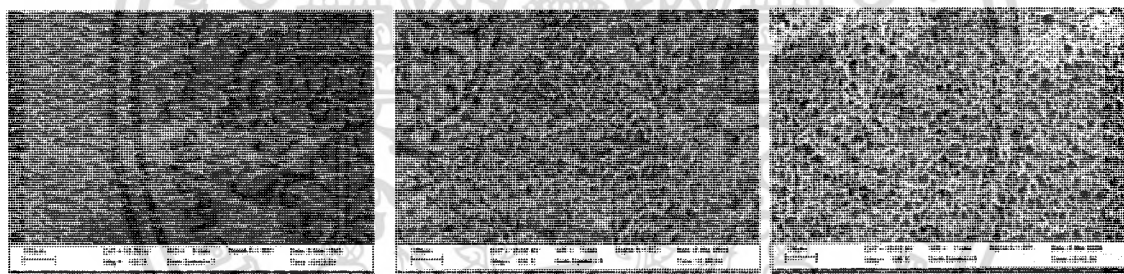
รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอุณหภูมิต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr



**รูปที่ 4.15** ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอัตราการปล่อยความดันต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดนิวเคลียส 0.4 phr ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

#### 4.8 ผลของสารเกิดนิวเคลียสที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลบูทีล 2

จากการทดลองพบว่าสารเกิดนิวเคลียสทำให้การเกิดฟองมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น อีกทั้งฟองยังมีขนาดเล็กและความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสารเกิดนิวเคลียสจนถึงค่าหนึ่ง สารเกิดนิวเคลียสไม่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลบูทีล 2 ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17



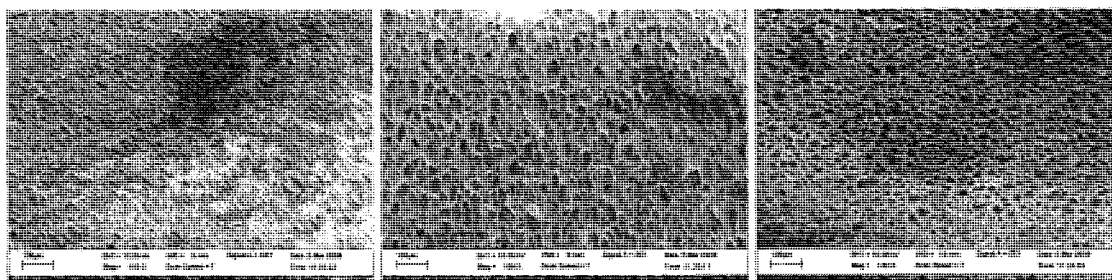
(ก) 0.0 phr

(ข) 0.4 phr

(ค) 1.0 phr

**รูปที่ 4.16** ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของสารเกิดนิวเคลียสต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 0.0 phr

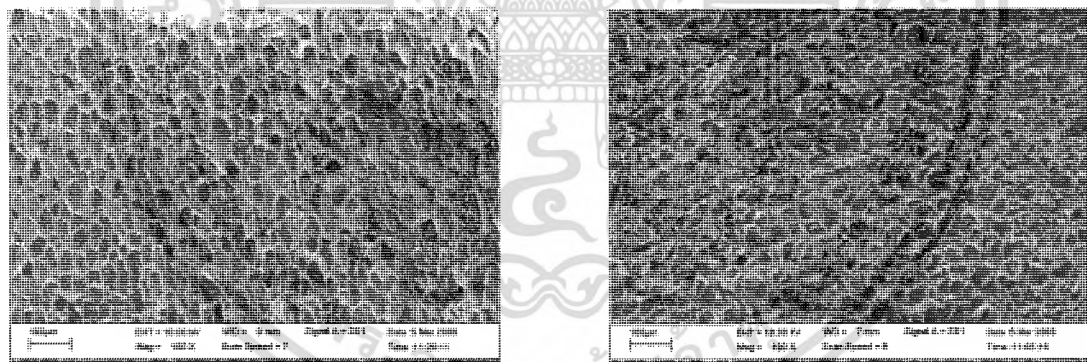
(ข) 0.4 phr

(ค) 1.0 phr

**รูปที่ 4.17** ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของสารเกิดนิวเคลียสต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ A ร้อยละ 85 โดยมีพอลิเมอร์ B ร้อยละ 15 โดยมีมวล ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส

#### 4.9 ผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพนชุดที่ 2

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มพอลิเมอร์ B จากร้อยละ 15 โดยมีมวล ดังรูปที่ 4.18 (ก) ไปเป็นพอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมีมวล ดังรูปที่ 4.18 (ข) พบว่าขนาดของฟองมีขนาดเล็กลงจาก 50 ไมโครเมตรไปเป็น 33 ไมโครเมตร และความหนาแน่นของฟองเพิ่มมากขึ้นจาก  $5.53 \times 10^7$  ฟอง/ซม<sup>3</sup> ไปเป็น  $5.79 \times 10^7$  ฟอง/ซม<sup>3</sup>



(ก) พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (85:15)

(ข) พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (80:20)

**รูปที่ 4.18** ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงผลของอัตราส่วนผสมต่อลักษณะสัณฐานวิทยาที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อกระบวนการการเกิดพอลิเอทิลีนโพรชนิดความหนาแน่นสูงทั้งวิธีทางกายภาพ และเคมี พร้อมทั้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานต่างๆกับคุณภาพของพอลิเอทิลีนโพรชนิดความหนาแน่นสูง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ผลของอุณหภูมิของการขึ้นรูปโพรแบบวิธีทางเคมี

อุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโพรแบบวิธีทางเคมีคือ 195 และ 200 องศาเซลเซียส โดยเมื่อลดอุณหภูมิในการขึ้นรูปโพรจะส่งผลให้ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลงและความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้น

##### 5.1.2 ผลของอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ของการขึ้นรูปโพรแบบวิธีทางเคมี

อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ B ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโพรแบบวิธีทางเคมีอยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยมวล ซึ่งส่งผลให้ฟองมีขนาดเล็กลงจาก 36.7 ไมโครเมตร ไปเป็น 28.3 ไมโครเมตร แต่ในทางกลับกันความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้นจาก  $1.67 \times 10^7$  ไปเป็น  $2.61 \times 10^7$  ฟองต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

##### 5.1.3 ผลของสารเกิดนิวเคลียสของการขึ้นรูปโพรแบบวิธีทางเคมี

ปริมาณที่เหมาะสมของสารเกิดนิวเคลียสอยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 phr โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเกิดนิวเคลียสส่งผลให้ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลง แต่ในขณะที่ความหนาแน่นของฟองมากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเกิดนิวเคลียสจนถึงค่าหนึ่งการเพิ่มปริมาณสารเกิดนิวเคลียสก็จะมีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพร

##### 5.1.4 ผลของอุณหภูมิของการขึ้นรูปโพรแบบวิธีทางกายภาพ

อุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโพรแบบวิธีทางกายภาพควรมากกว่า 125 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส โดยการลดอุณหภูมิลงจะทำให้ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลงและความหนาแน่นของฟองมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปเนื้อของพอลิเมอร์จะแข็งจนแก๊สไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อของพอลิเมอร์ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปเนื้อของพอลิเมอร์ก็จะอ่อนจนไม่สามารถกักเก็บแก๊สไว้ได้

### 5.1.5 ผลของอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ของการขึ้นรูปโฟมแบบวิธีทางกายภาพ

อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ B ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟมแบบวิธีทางกายภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 20 โดยมีผลที่จะส่งผลให้ขนาดของฟองมีขนาดลดลงจาก 51.0 ไมโครเมตร จนถึง 33.1 ไมโครเมตร ในขณะที่ความหนาแน่นของฟองเพิ่มขึ้นจาก  $5.53 \times 10^7$  ไปเป็น  $7.5 \times 10^7$  ฟองต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

### 5.1.6 ผลของสารเกิดนิวเคลียสของการขึ้นรูปโฟมแบบวิธีทางกายภาพ

ปริมาณที่เหมาะสมของสารเกิดนิวเคลียสอยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 phr ซึ่งส่งผลให้ฟองมีขนาดเล็กลงจาก 51.0 ไมโครเมตร เป็น 33.1 ไมโครเมตร โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเกิดนิวเคลียสส่งผลให้ขนาดของฟองมีขนาดเล็กลงและความหนาแน่นของฟองมากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเกิดนิวเคลียสจนถึงค่าหนึ่งการเพิ่มปริมาณสารเกิดนิวเคลียสก็จะไม่มีผลต่อลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เรื่องที่ควรจะศึกษาต่อ คือ

5.3.1 การทดลองศึกษาผลของอัตราการปลดปล่อยความดันที่มีผลต่อลักษณะฐานวิทยาของพอลิเอทีลีนโฟมชนิดความหนาแน่นสูง

5.3.2 การทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงที่แคบขึ้นในการขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีทางกายภาพเพื่อให้ได้โฟมที่มีขนาดของฟองตามต้องการ

5.3.3 การทดลองศึกษาชนิดของแก๊สอื่น ๆ ที่มีค่าการละลายในพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงมากกว่าแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ว่าจะมีผลต่อลักษณะฐานวิทยาของพอลิเอทีลีนโฟมชนิดความหนาแน่นสูงอย่างไร

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จีราวรรณ หาญวัฒนกุล. 2550. โฟมพลาสติกชนิดพอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน (Polyurethane and Polystyrene Plastic Foams). [Online]. Available: [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/bla\\_4\\_2550\\_foams.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/bla_4_2550_foams.pdf). 2008
- [2] พงศ์ประภาส ปิยมโนชา, “การทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โฟมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, สจล., 2549
- [3] M P Groover. 2002. **Fundamentals of Modern Manufacturing 2<sup>nd</sup> ed.**, New York : John Wiley and Sons.
- [4] S.T. Lee and N.S. Ramesh. 2004. **“Polymeric Foams Mechanism and Materials”**. Boca Raton London New York Washington D.C.
- [5] Ryan Gosselin and Denis Rodrigue. 2005. **“Cell morphology analysis of high density polymer foams.”**
- [6] D. Klemperer and K. C. Frisch, **“Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology”**, Oxford University Press New York, 1991.
- [7] E. Reverchon and S. Cardea. 2006. **“Production of controlled polymeric foams by SC-CO<sub>2</sub>.”**
- [8] Zhi-Mei Xua, Xiu-Lei Jiang.et. al. 2006. **“Foaming of polypropylene with supercritical carbon dioxide.”**
- [9] V. Firdaus, P.P. Tong, K.K. Cooper. 1996. **“A Developmental HDPE Foam Resin.”**
- [10] JICC Co., Ltd. 2008. **ELECTRONIC DENSIMETER**.  
[Online]. Available: <http://www.itraders.com/jicc/mirage/md-200s-1.jpg> . 2008



**ภาคผนวก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

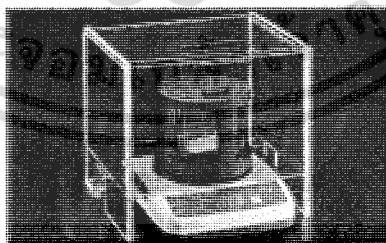
## ภาคผนวก ก

### การหาความหนาแน่น (Density)

จากกระบวนการการผลิตโฟม เมื่อได้พอลิเมอร์โฟมแล้วจะต้องมีการหาความหนาแน่นของพอลิเมอร์โฟม เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นของฟองในพอลิเมอร์โฟม อีกทั้งความหนาแน่นของโฟมยังเป็นตัวแปรหนึ่งที่บอกลถึงคุณภาพของพอลิเมอร์โฟมที่ผลิตได้อีกด้วย ปัจจุบันมีเครื่องมือวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาศัยหลักการแทนที่น้ำหรือหลักการของอาคิมิดีส โดยมีวิธีการวัดดังต่อไปนี้

1. ตัดชิ้นพอลิเมอร์โฟมที่ได้ ให้มีขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 1 x 3 ซม.
2. ตั้งค่าจอแสดงผลของเครื่องวัดให้เป็นศูนย์ (Set zero)
3. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพอลิเมอร์โฟมในอากาศ กดปุ่ม memory เพื่อทำการบันทึกค่าให้กับเครื่องชั่ง
4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพอลิเมอร์โฟมในน้ำอีกครั้ง (หากมีฟองอากาศเกาะติดอยู่ชิ้นงานให้พยายามกำจัดออก) กดปุ่ม memory เพื่อให้เครื่องคำนวณค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์โฟม
5. เครื่องชั่งจะแสดงผลค่าความหนาแน่นในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตรได้ โดยการกดปุ่ม A)
6. นำชิ้นงานพอลิเมอร์โฟมออกจากเครื่อง

**หมายเหตุ :** ในการนำชิ้นตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้คีมจับ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นออกมาทำความเสียหายให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



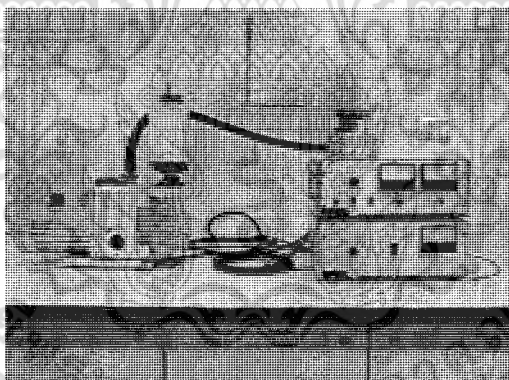
**รูปที่ ก-1** เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S) [9]

## ภาคผนวก ข

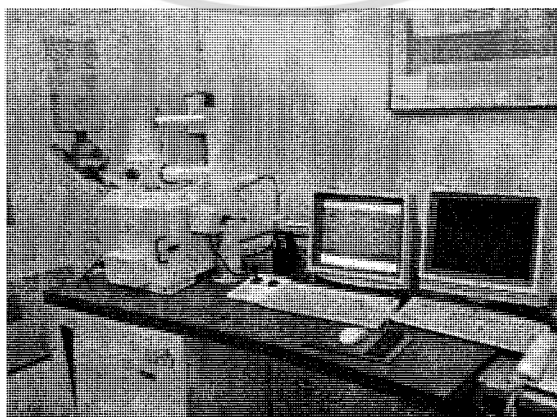
## การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology)

## วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

1. ทำการบากด้านข้างตามแนวขวางบริเวณตรงกลางของชิ้นงานพอลิเมอร์โฟมเพียงเล็กน้อย
2. แช่ตัวอย่างพอลิเมอร์โฟมลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้พอลิเมอร์โฟมมีความแข็งและเปราะ ซึ่งสามารถหักได้ง่ายและทำการหักพอลิเมอร์โฟม โดยจะเกิดการหักบริเวณที่เกิดการบากบนชิ้นงาน จากนั้นเก็บตัวอย่างของพอลิเมอร์โฟมสำหรับศึกษาสัณฐานวิทยา
3. เคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater เพื่อให้พอลิเมอร์โฟมมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ ข-1
4. ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โฟม (Foam Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM ) ดังรูปที่ ข-2



รูปที่ ข-1 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater



เอกสารนี้เป็น **รูปที่ ข-2** กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น LEO 1455VP ซึ่งดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณหาความหนาแน่นของฟอง

#### การหาค่าจำนวนฟองบนพื้นผิว [5]

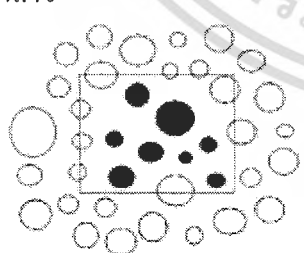
การหาค่าของความหนาแน่นฟองนั้นเป็นสิ่งที่ไม่มีความแน่นอนเนื่องจากเป็นไปได้ที่จะวัดพื้นที่ผิวที่แน่นอนไปพร้อมๆกันกับพื้นที่ผิวที่สนใจได้ และค่าฟองที่นับได้อย่างแน่นอน มีวิธี 2 วิธีที่ได้ผลในการหาค่าความหนาแน่นฟองเชิงพื้นที่ผิวที่ได้รับการสนใจได้แก่

##### 2.4.1 การรู้ขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ

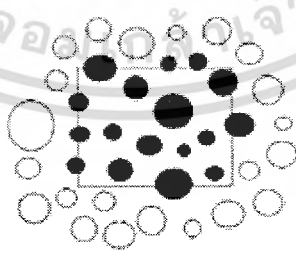
เทคนิคนี้ประกอบด้วยการหารูปร่างของพื้นที่ผิวที่ทราบค่าในกรณีที่ยากที่สุดคือเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและนับฟองที่อยู่ในนั้น ความยากคือหาจำนวนฟองที่อยู่ในนั้นที่แน่นอนดังที่แสดงในรูปที่ ก-1 ต้องกำหนดขอบขึ้นมาก่อนเป็นอันดับแรก ต่อไปนี้คือกรณีที่สามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณีคือ

1. พิจารณาเฉพาะฟองที่อยู่ในพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้เกิดการนับน้อยกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ ก-1 (ก) จำนวนฟองที่ต่ำที่สุดคือ 8 ฟอง
2. พิจารณาฟองทั้งหมดที่อยู่ซ้อนเหลื่อมกับขอบของพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้เกิดการนับเกินจากความเป็นจริง ดังรูปที่ ก-1 (ข) จำนวนฟองที่มากที่สุดคือ 17 ฟอง
3. พิจารณาฟองพื้นผิวที่อยู่ภายในพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด แต่เป็นการยากที่จะวัดขนาดฟองที่อยู่ภายในหรือภายนอกของส่วนที่สนใจ โดยปราศจากความรู้และข้อมูลเพิ่มเติม ซึ่งการนับฟองที่อยู่บริเวณขอบให้ถือเป็นครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ ก-1 (ค) จำนวนฟองเฉลี่ยคือ 12.5 ฟอง

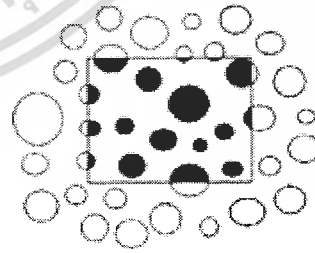
ในกรณีทั้งหมดที่กล่าวมานี้เลือกใช้พื้นที่ที่มีความน่าจะเป็นสูงสุดที่จะลดผลกระทบจากกรณีดังกล่าว



(ก) จำนวนฟอง 8 ฟอง



(ข) จำนวนฟอง 17 ฟอง



(ค) จำนวนฟอง 12.5 ฟอง

รูปที่ ก-1 การนับจำนวนฟองกรณีรู้ขนาดพื้นที่ผิวที่สนใจ

### การคำนวณหาความหนาแน่นของฟอง (Cell Density) [6]

โดยทั่วไป โฟมพลาสติกที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอ และมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะประกอบด้วยฟองแก๊สประมาณ  $10^5$  ถึง  $10^{10}$  ฟอง โดยมีความแตกต่างของขนาดฟองแก๊สที่แท้จริงกับขนาดของฟองแก๊สโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 25 ขนาดของฟองแก๊สและการกระจายขนาดของฟองแก๊สไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์ แต่ยังขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการโฟมด้วย จำนวนฟองแก๊สต่อหน่วยปริมาตร โฟมเป็นตัวแปรที่สำคัญและมีการนำมาใช้บ่อยครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารเกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) หรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมจำนวนฟองแก๊สต่อปริมาตร โฟม 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร หาได้จากสมการ

$$n = \left(\frac{n_b}{l^2}\right)^{3/2} \times 10^3 \times \phi \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ	$n$	คือ จำนวนฟองต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของพอลิเมอร์โฟม
	$n_b$	คือ จำนวนฟองในพื้นที่ $l \times l$
	$l$	คือ ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร
	$\phi$	คือ อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio)

อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) นิยามได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\phi = \frac{\rho_p}{\rho_f} = \frac{V_f}{V_p} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ	$\rho_p$	คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์
	$\rho_f$	คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์โฟม
	$V_f$	คือ ปริมาตรของพอลิเมอร์โฟม
	$V_p$	คือ ปริมาตรของพอลิเมอร์

### ตัวอย่างการคำนวณ

พอลิเมอร์ A ร้อยละ 80 โดยมวล พอลิเมอร์ B ร้อยละ 20 โดยมวล สารเกิดฟอง 3 phr สารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีทางเคมี อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากการหาค่าต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าของพอลิเมอร์โฟม

ข้อมูล	หน่วย	ค่าจากการวิเคราะห์
พื้นที่	ตารางมิลลิเมตร	0.2 x 0.2
จำนวนฟอง	ฟอง	31
ขนาดของฟอง	ไมโครเมตร	28.33
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม	กรัม/ซม <sup>3</sup>	0.808
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์โฟม	กรัม/ซม <sup>3</sup>	0.667

จากสูตรที่ (ค.2) จะได้ว่า

$$\phi = \frac{\rho_p}{\rho_f} = \frac{0.808}{0.667} = 1.211$$

จากสูตรที่ (ค.1) จะได้ว่า

$$n = \left( \frac{31}{0.2^2} \right)^{3/2} \times 10^3 \times 1.211 = 2.61 \times 10^7$$

ดังนั้น

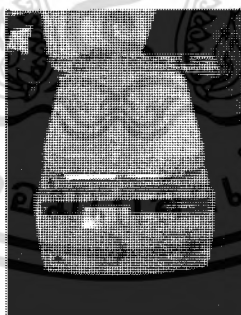
อัตราส่วนการขยายตัวคือ	1.211	
ความหนาแน่นของฟองคือ	2.61x10 <sup>7</sup>	ฟอง/ซม <sup>3</sup>

## ภาคผนวก ง

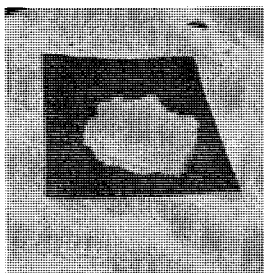
### การหลอมพอลิเมอร์

เป็นการหลอมพอลิเมอร์หลังจากการผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่และถูกตัดออกมาเป็นเม็ดซึ่งมีขนาดเล็ก ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีขนาดตามที่ต้องการ เพื่อที่จะนำไปวัดหาความหนาแน่นของพอลิเมอร์และหาความหนาแน่นของพอลิเมอร์โฟม หลังจากผ่านการขึ้นรูปโฟมแล้ว โดยขึ้นตอนการทำมีดังนี้

1. ตั้งอุณหภูมิของเครื่องให้ความร้อน (Heater) ที่ 160 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ ง-1
2. นำแผ่นอลูมิเนียมมารองบนเครื่องเพื่อป้องกันการหลอมของพอลิเมอร์ผสม
3. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมมาวางบนแผ่นอลูมิเนียมเพื่อให้เกิดการหลอม เมื่อพอลิเมอร์เกิดการหลอมจึงเกลี่ยเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมหลอมรวมเข้าด้วยกัน โดยระวังไม่ให้เกิดฟองระหว่างเนื้อพอลิเมอร์ผสม
4. นำแผ่นอลูมิเนียมอีกแผ่นมาวางบนพอลิเมอร์ผสมที่หลอมตัวรวมกัน จากนั้นรีดแผ่นอลูมิเนียมที่อยู่ด้านบนเพื่อให้พอลิเมอร์มีผิวที่ค่อนข้างเรียบ
5. ยกแผ่นอลูมิเนียมออกและทิ้งไว้สักครู่ จากนั้นดึงพอลิเมอร์ผสมที่มีขนาดใหญ่ออกดังรูปที่ ง-2
6. ตัดพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาด 1 x 3 ซม. เพื่อนำไปขึ้นรูปโฟมและชั่งหาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ ง-1 เครื่องให้ความร้อน (Heater) รุ่น yellow MAG HS7



รูปที่ ง-2 พอลิเมอร์ที่ผ่านการหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

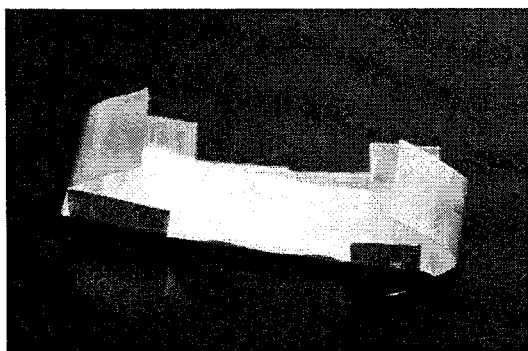
## ภาคผนวก จ

### การขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ

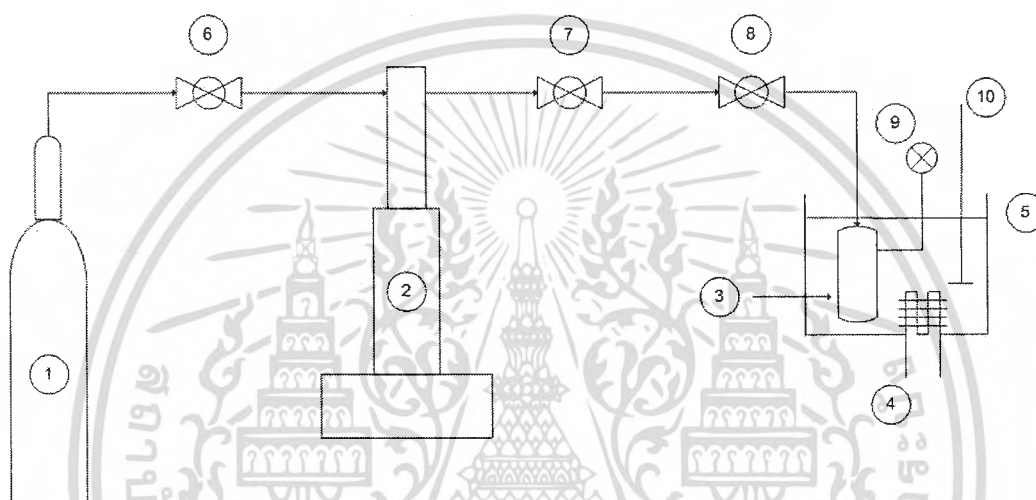
เป็นการการขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตแทนสารเกิดฟอง โดยทำที่สภาวะเหนือวิกฤต หลังจากนั้นทำการรบกวนระบบด้วยการปล่อยความดันออกอย่างรวดเร็ว โดยขั้นตอนการทำมีดังนี้

1. นำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมวางไว้บนแผ่นอลูมิเนียม ดังรูปที่ จ-1 เพื่อเป็นตัวป้องกันการหลุดในขณะที่ทำการทดลอง
2. นำแผ่นอลูมิเนียมที่ติดชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมเข้าไปในเครื่องปฏิบัติการความดันสูง หมายเลข 3 และขันน็อตให้แน่นเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส ซึ่งทำให้ความดันตกลง
3. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ จ-2
4. ตั้งค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องกำเนิดความร้อนหมายเลข 4 โดยตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการ ที่อยู่ในอ่างน้ำมันหมายเลข 5 โดยมีใบพัดซึ่งทำหน้าที่ในการกวนดังหมายเลข 10 เพื่อให้อุณหภูมิเท่ากันทุกจุด
5. เปิดวาล์วหมายเลข 6 และปิดวาล์วหมายเลข 7 และ 8
6. เติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังหมายเลข 1 เข้าไปในปั๊มหมายเลข 2 ด้วยการกดปุ่ม Refill เมื่อกระบอกสูบมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร จึงทำการกดปุ่ม Stop บนหน้าปัดของปั๊มแรงดันสูง ดังรูปที่ จ-3
7. ปิดวาล์วหมายเลข 6 เปิดวาล์วหมายเลข 7 และ 8 และตั้งค่าความดันด้วยการปั๊ม Pump Program แล้วกดปุ่ม A เพื่อตั้งค่าความดัน จากนั้นตั้งค่าความดันตามที่ต้องการ กดปุ่ม Enter และตามด้วยปุ่ม Run
8. เมื่อเกจวัดความดันหมายเลข 9 อ่านค่าความดันได้ตามที่ต้องการ จึงทำการตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่ได้ทำการทดลอง
9. เมื่อถึงเวลาตามที่ต้องการ ให้ปิดวาล์วหมายเลข 7 และ 8 แล้วถอดท่อที่อยู่ระหว่างวาล์วหมายเลข 7 และ 8 จากนั้นปล่อยความดันออกอย่างรวดเร็ว โดยเปิดวาล์วหมายเลข 8 ในตู้ดูดควัน
10. นำเครื่องปฏิบัติการความดันสูงออกจากอ่างความร้อน และขันน็อตออกเพื่อนำชิ้นงานของพอลิเมอร์โฟมไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

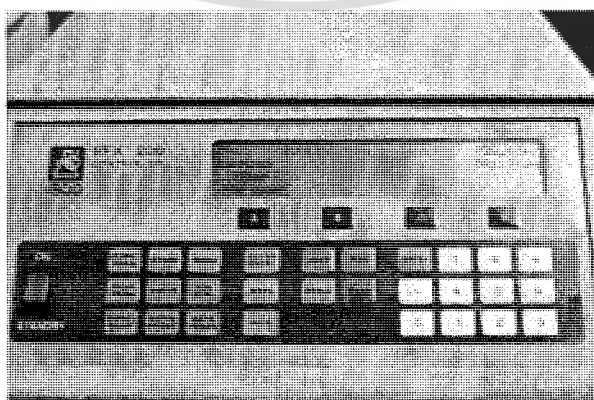


รูปที่ จ-1 การติดตั้งงานพอลิเมอร์ลงบนแผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ จ-2 การติดตั้งอุปกรณ์ความดันสูง

- |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|
| (1) ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์        | (2) ปุ่มแรงดันสูง                  |
| (3) เครื่องปฏิบัติการความดันสูง    | (4) เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) |
| (5) อ่างน้ำมัน (Oil bath)          | (6) วาล์วหมายเลข 6                 |
| (7) วาล์วหมายเลข 7                 | (8) วาล์วหมายเลข 8                 |
| (9) เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) | (10) ไบพัส                         |



รูปที่ จ-3 หน้าจอแสดงผลของปุ่มแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### ผลการทดลองและผลการคำนวณ

#### 1. ผลการทดลองของการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมี


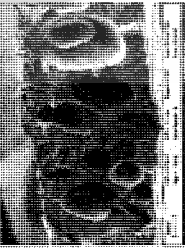
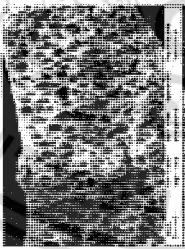





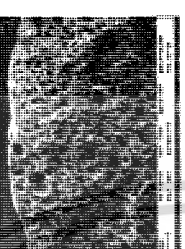
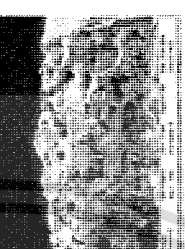

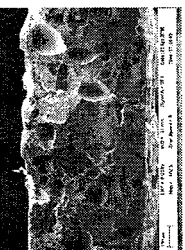

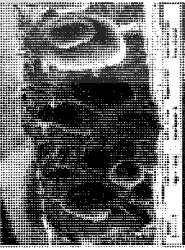
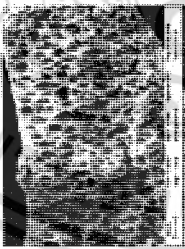





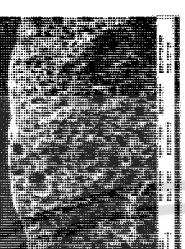
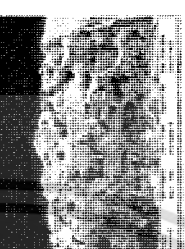

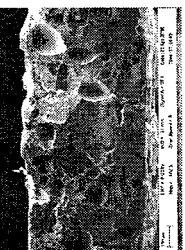

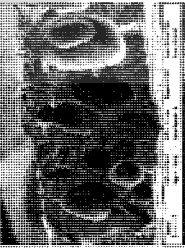
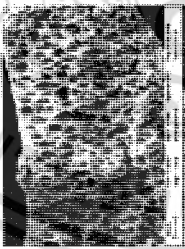





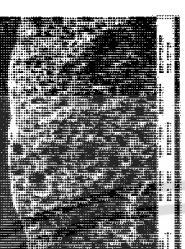
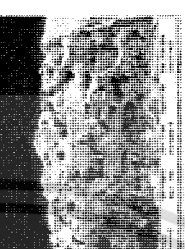

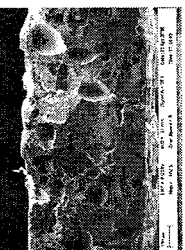
##### 1.1 การศึกษาผลของการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น

ทดลองขึ้นรูปโฟมด้วยอัตราส่วนผสมดังตารางที่ ฉ-1 อุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมคือ 200 220 และ 240 องศาเซลเซียส (สำหรับอุณหภูมิที่ 240 องศาเซลเซียสทดลองชุดที่ 3 5 และ 6 เท่านั้น) ขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ขนาดเล็ก

ตารางที่ ฉ-1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น

ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละ โดยมวล)	พอลิเมอร์ B (ร้อยละ โดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)	สารเกิด นิวเคลียส (phr)
1	100	0	3	0.0
2	100	0	3	0.4
3	100	0	3	1.0
4	80	20	3	0.0
5	80	20	3	0.4
6	80	20	3	1.0

ตารางที่ ๒-2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาวของการทดลองการเกิดโพไมด้วยวิธีทางเคมีเบื้องต้น

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พอลิเมอร์ A : B 100 : 0 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0 phr	พอลิเมอร์ A : B 100 : 0 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0.4 phr	พอลิเมอร์ A : B 100 : 0 % โดยมวล CBA 3 phr NA 1.0 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0.4 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล CBA 3 phr NA 1.0 phr
200	 	 	 	 	 	 
220	 	 	 	 	 	 
240	 	 	 	 	 	 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 pbr

ชุดที่	พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดนิวเคลียส (pbr)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์โฟม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว	ขนาดของฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น ของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
1	100 : 0	0.0	0.899	0.567	1.6	37.2	$1.3 \times 10^7$
2	100 : 0	0.4	0.892	0.552	1.6	48.2	$8.4 \times 10^6$
3	100 : 0	1.0	0.811	0.598	1.4	34.5	$1.2 \times 10^7$
4	80 : 20	0.0	0.899	0.629	1.4	44.1	$4.0 \times 10^6$
5	80 : 20	0.4	0.892	0.661	1.3	24.7	$1.5 \times 10^7$
6	80 : 20	1.0	0.811	0.609	1.3	24.6	$9.7 \times 10^6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr

ชุดที่	พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์โฟม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว	ขนาดของฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น ของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
1	100 : 0	0.0	0.899	0.666	1.3	188.0	$1.7 \times 10^7$
2	100 : 0	0.4	0.892	0.782	1.1	196.0	$1.4 \times 10^6$
3	100 : 0	1.0	0.811	0.711	1.1	145.7	$7.4 \times 10^7$
4	80 : 20	0.0	0.899	0.707	1.3	30.2	$8.3 \times 10^6$
5	80 : 20	0.4	0.892	0.731	1.2	34.5	$5.6 \times 10^7$
6	80 : 20	1.0	0.811	0.695	1.2	109.8	$1.2 \times 10^6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr

ชุดที่	พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์โฟม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว	ขนาดของฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น ของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
1	100 : 0	1.0	0.811	0.702	1.2	165.8	$1.4 \times 10^5$
2	80 : 20	0.4	0.914	0.711	1.3	123.0	$8.3 \times 10^5$
3	80 : 20	1.0	0.878	0.724	1.2	185.7	$1.5 \times 10^5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 การศึกษาผลของการเกิดโฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด

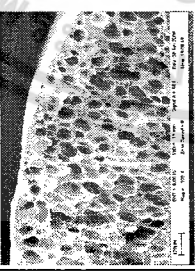
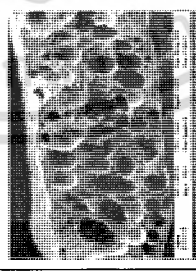
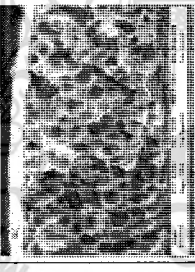
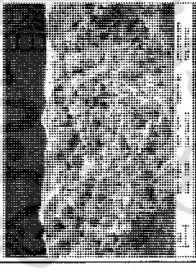
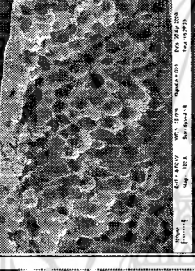
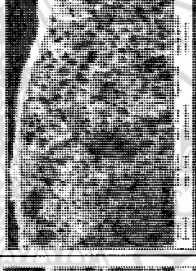

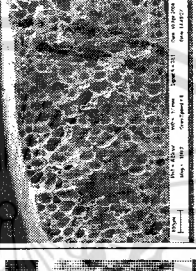
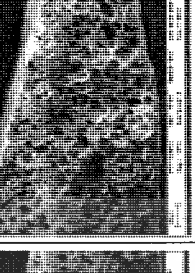
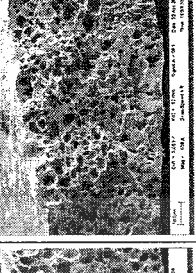
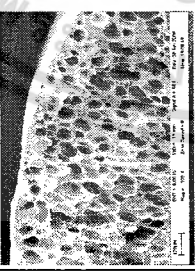
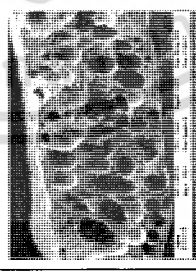
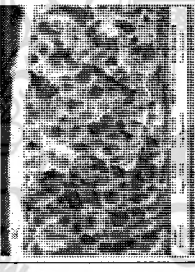
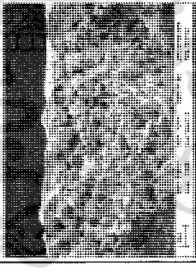
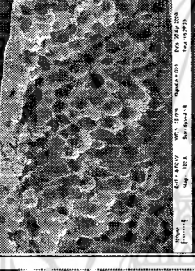
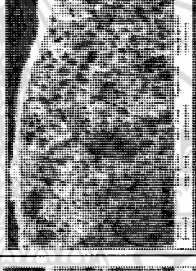

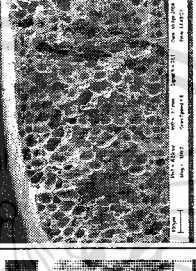
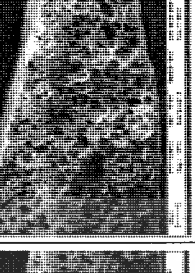
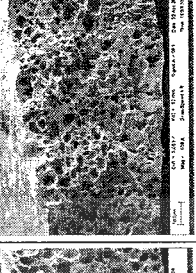
ทดลองขึ้นรูปโฟมด้วยอัตราส่วนผสมดังตารางที่ ฉ-6 อุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมคือ 195 และ 200 องศา ขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ขนาดเล็ก

ตารางที่ ฉ-6 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิด โฟมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด

ชุดที่	พอลิเมอร์ A (%โดยมวล)	พอลิเมอร์ B (%โดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)
1	100	0		
2	95	5		
3	90	10	3	0.5
4	85	15		
5	80	20		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑-7 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาวของผลการทดลองการเกิดโพรมด้วยวิธีทางเคมีอย่างละเอียด

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พอลิเมอร์ A : B 100 : 0 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0.5 phr	พอลิเมอร์ A : B 95 : 5 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0.5 phr	พอลิเมอร์ A : B 90 : 10 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0.5 phr	พอลิเมอร์ A : B 85 : 15 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0.5 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล CBA 3 phr NA 0.5 phr
195	 	 	 	 	 
200	 	 	 	 	 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ๘-๘ ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr**

ชุดที่	พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์โฟม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว	ขนาดของฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น ของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
1	100 : 0	0.785	0.560	1.402	52.50	$7.28 \times 10^6$
2	95 : 5	0.754	0.616	1.224	55.00	$4.84 \times 10^6$
3	90 : 10	0.736	0.528	1.394	48.13	$8.17 \times 10^6$
4	85 : 15	0.840	0.530	1.585	31.80	$2.33 \times 10^7$
5	80 : 20	0.808	0.562	1.438	26.55	$2.38 \times 10^7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓-๑ ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สารเกิดฟอง 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr

ชุดที่	พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์โฟม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว	ขนาดของฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น ของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
1	100 : 0	0.785	0.625	1.256	92.05	$1.63 \times 10^6$
2	95 : 5	0.754	0.631	1.195	-	-
3	90 : 10	0.736	0.613	1.201	40.00	$2.11 \times 10^7$
4	85 : 15	0.840	0.440	1.909	36.67	$1.67 \times 10^7$
5	80 : 20	0.808	0.667	1.211	28.33	$2.61 \times 10^7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ผลการทดลองของการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ

ทดลองขึ้นรูปโฟมด้วยอัตราส่วนผสมดังตารางที่ ฉ-10 อุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมคือ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส โดยติดตั้งอุปกรณ์ตามภาคผนวก จ

ตารางที่ ฉ-10 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเกิดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ

ชุดที่	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	พอลิเมอร์ A (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดฟอง (phr)
1	85	15	0.0
2	85	15	0.4
3	85	15	1.0
4	80	20	0.0
5	80	20	0.4
6	80	20	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๘-11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาวของผลการทดลองการเกิด โฟมด้วยวิธีทางกายภาพชุดที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พอลิเมอร์ A : B 85 : 15 % โดยมวล NA 0 phr	พอลิเมอร์ A : B 85 : 15 % โดยมวล NA 0.4 phr	พอลิเมอร์ A : B 85 : 15 % โดยมวล NA 1.0 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล NA 0 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล NA 0.4 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล NA 1.0 phr
120						
130						
140						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ในวารสารใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑-12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาวของผลการทดลองการเกิดโพรมติววิถีทางกายภาพชุดที่ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พอลิเมอร์ A : B 85 : 15 % โดยมวล NA 0 phr	พอลิเมอร์ A : B 85 : 15 % โดยมวล NA 0.4 phr	พอลิเมอร์ A : B 85 : 15 % โดยมวล NA 1.0 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล NA 0 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล NA 0.4 phr	พอลิเมอร์ A : B 80 : 20 % โดยมวล NA 1.0 phr
120						
125						
130						

หมายเหตุ : ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ใช้กำลังขยาย 10000 เท่า อุณหภูมิ 125 และ 130 องศาเซลเซียส ใช้กำลังขยาย 100 เท่า

ตารางที่ ๓-13 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

ชุดที่	พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ โฟม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว
1	85 : 15	0.0	0.948	0.909	1.032
2	85 : 15	0.4	0.944	0.905	1.069
3	85 : 15	1.0	0.936	0.913	1.033
4	80 : 20	0.0	0.946	0.917	1.043
5	80 : 20	0.4	0.943	0.882	1.043
6	80 : 20	1.0	0.936	0.906	1.025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-14 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส

ชุดที่	พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์โฟม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว
1	85 : 15	0.0	0.948	0.909	1.043
2	85 : 15	0.4	0.944	0.890	1.061
3	85 : 15	1.0	0.936	0.885	1.058
4	80 : 20	0.0	0.946	0.892	1.061
5	80 : 20	0.4	0.943	0.869	1.085
6	80 : 20	1.0	0.936	0.911	1.027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-15 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส

พอลิเมอร์ A : พอลิเมอร์ B (ร้อยละโดยมวล)	สารเกิดนิวเคลียส (phr)	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ ฟิม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	อัตราส่วน การขยายตัว	ขนาดของ ฟอง (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่นของฟอง (ฟอง/ซม <sup>3</sup> )
85 : 15	0.0	0.948	0.256	3.703	-	-
85 : 15	0.4	0.944	0.124	7.613	51.0	5.53 x 10 <sup>7</sup>
85 : 15	1.0	0.936	0.200	4.680	33.1	7.31 x 10 <sup>7</sup>
80 : 20	0.0	0.946	0.298	3.174	-	-
80 : 20	0.4	0.943	0.210	4.490	33.1	7.50 x 10 <sup>7</sup>
80 : 20	1.0	0.936	0.351	2.667	31.4	8.12 x 10 <sup>7</sup>