

การเตรียมไมโครเซลลูลาร์ฟอ์มจากพอลิเมอร์ผสม
โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....

55691

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี 24 พ.ค. 2548

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

Preparation of Microcellular Foam from Blended Polymers
by Supercritical Carbon Dioxide



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Bachelor in Chemical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง

การเตรียมไมโครเซลล์ลูลารีโพนจากพอลิเมอร์ผสมโดยใช้
คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

โดย

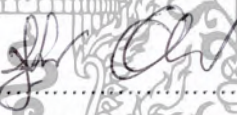
นางสาวกมลรัตน์ สุนทรลาภ
นางสาวฉัตรทิพย์ พรหมหมวก
นายเมธา บัวรักสกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



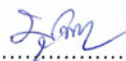
(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

ประธานกรรมการ



(ดร.เอกมันท์ นิมศนนิสรณ์)

กรรมการ



กรรมการ

(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$1.4-1.6 \times 10^7$ เซลล์/ซม.³ และความหนาแน่นของโฟมประมาณ 0.15 กรัม/ซม.³ นอกจากนี้ การเติมตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนมีส่วนช่วยให้ได้เซลล์ขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรจำนวนมาก และมีเสถียรภาพของโฟมที่ดี การเติมตัวทำละลายที่ระเหยเป็นไอได้ง่ายจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ ในการวิจัยต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Preparation of Microcellular Foam from Blended Polymers
by Supercritical Carbon Dioxide

By Miss Kamonrat Sunthonlap
Miss Chattip Prommuak
Mr. Metha Buaruksakul

Advisor Dr. Surat Areerat

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

Abstract

This senior project presents a preparation of microcellular foam from blended polymers between ethylene vinyl acetate (EVA) and natural rubber (NR) by physical foaming method in which supercritical carbon dioxide is directly dissolved into blended polymers matrix. This work aims to obtain microcellular foam with cell diameter in the range of micrometer and high bubble density. In addition, the suitable foaming conditions were also evaluated.

In this experiment, the ratio of blending between EVA/NR and the amount of crosslinking agent were varied. The mixing of blended polymers and all additives was performed by a two-roll mill. Furthermore, various foaming temperatures within the range of 30 to 65 °C were carried out prior to foaming, blended polymers samples were crosslinked using a hot compression machine at a constant temperature of 150 °C. The degree of crosslinking of blended polymers sample was determined by solvent refluxing method. Physical foaming of blended polymer sample was conducted by rapid pressure releasing method. Whereas, the morphology of the foam sample was investigated by scanning electron microscopy (SEM).

The experimental results revealed that the microcellular foam with fine structure could be obtained by using the ratio of EVA/NR at 9:1 and 1% DCP crosslink agent in addition to the suitable foaming temperature range between 45-55 °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The bubble density was estimated to be about 1.4 to 1.6×10^7 cells/cm³, while the average cell diameter was about 110-150 μm . Moreover it was found that good stability microcellular foam can be tailored by adding small amount of high volatile solvent such as 1% cyclohexane. Therefore, adding high volatile solvent during foaming might be an interesting method for a further study.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี

ขอขอบพระคุณ ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์ และ อ.บุญชัย ไชติวิริยวานิชย์

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดามารดา
ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดใน
รายงานนี้ ผู้วิจัยขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้



นางสาวกมลรัตน์ สุนทรลาม

นางสาวฉัตรทิพย์ พรหมหมวก

นายเมธา บัวรักสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ณ
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 ไฟม	4
2.2 กลไกในการเกิดไฟม	5
2.3 การผสมพอลิเมอร์และวัตถุดิบสำหรับการผลิตไฟม	6
2.4 สภาวะของกระบวนการเตรียมไฟม	9
2.5 คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไฟม	18
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	21
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3 วิธีการทดลอง	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	28
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ลักษณะโครงสร้างของโฟม (ก) เซลล์เปิด, (ข) เซลล์ปิด	4
รูปที่ 2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเจลที่มีต่ออัตราการขยายตัวของโฟม	8
รูปที่ 2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยให้เกิดฟองที่แพร่เข้าไปในพอลิเมอร์กับปริมาณของสารเชื่อมโยงบางรังสี	8
รูปที่ 2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเซลล์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการโฟม	10
รูปที่ 2.5	แผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสภาวะไม่คงที่ในวัสดุแผ่นแบนขนาดใหญ่	16
รูปที่ 2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับปริมาณสารช่วยให้เกิดฟอง	20
รูปที่ 3.1	เครื่องผสมแบบอัตโนมัติสองลูกกลิ้ง	23
รูปที่ 3.2	การเทส่วนผสมแต่ละส่วน	23
รูปที่ 3.3	การกรีดแล้วพับกลับไปกลับมาเพื่อช่วยให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน	23
รูปที่ 3.4	ชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนการผสมสารให้เข้ากัน	23
รูปที่ 3.5	เครื่องอัดขึ้นรูปแบบรีออร์ม	24
รูปที่ 3.6	ชุดรีฟลักซ์ที่ใช้ในการหาปริมาณของการเชื่อมโยงบางรังสี	24
รูปที่ 3.7	เครื่องปฏิบัติการวัดความดันสูง	25
รูปที่ 3.8	วิธีการขึ้นนอต	25
รูปที่ 3.9	แสดงตำแหน่งของวาล์ว	25
รูปที่ 3.10	เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์	26
รูปที่ 3.11	เครื่องเคลือบทอง (ก) และกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด (ข)	27
รูปที่ 4.1	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดของโฟมที่เตรียมได้ภายใต้ สภาวะ อุณหภูมิ 52 °ซ ความดัน 6.07 เมกกะพาสคาล โดยมีอัตราส่วนระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตตต่ออย่างธรรมชาติเป็น 9:1 (ก) DCP 0% (ข) DCP 1% (ค) DCP 3.5% (ง) DCP 7%	29
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์กับจำนวนเซลล์	30
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์กับความหนาแน่นของโฟม	30
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์กับจำนวนเซลล์	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของโฟมที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 40 °ซ ความดัน 8.45 เมกกะพาสคาล โดยมีปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ 1% และใช้อย่างธรรมชาติในปริมาณต่างๆ	32
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางธรรมชาติกับขนาดของเซลล์เฉลี่ย	33
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางธรรมชาติกับความหนาแน่นของโฟม	33
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางธรรมชาติกับจำนวนเซลล์/ซม. ³	34
รูปที่ 4.9	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของโฟมที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตตต่ออย่างธรรมชาติเป็น 9:1 ปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ 1% ภายใต้ความดัน 7.05 เมกกะพาสคาล ที่อุณหภูมิต่างๆ	35
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการโม่กับขนาดของเซลล์เฉลี่ย	36
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการโม่กับความหนาแน่นของโฟม	36
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจับกับจำนวนเซลล์	37
รูปที่ 4.13	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยเตรียมโม่ภายใต้ความดัน 7.34 เมกกะพาสคาล อุณหภูมิ 30 °ซ อัตราส่วนระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตตต่ออย่างธรรมชาติเป็น 9:1 ปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ 1% (ก) เมื่อใส่ไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลายในขั้นตอนการผสมพอลิเมอร์ในปริมาณ 1% (ข) เมื่อปล่อยให้ไซโคลเฮกเซนซึ่งเป็นตัวทำละลายระเหยในขั้นตอนการ โม่ในปริมาณ 1%	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	แสดงสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพสภาวะไม่คงที่	15
ตารางที่ 2.2	ค่าความสามารถของคาร์บอนไดออกไซด์ในการผ่านเข้า, ค่าความสามารถในการแพร่, ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการละลายในโคพอลิเมอร์/พอลิเมอร์ผสมของเอทิลีนไวโนลอะซิเตตที่มีไวโนลอะซิเตตเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างๆ ณ อุณหภูมิ 25 °ซ	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

โดยทั่วไปโฟมสามารถผลิตได้ 2 วิธีคือ วิธีที่ใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี (Chemical blowing agent) เช่น อะโซไดคาร์ไบโบนาไมด์ (ADC) ซึ่งแตกตัวให้ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง และวิธีที่ใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางกายภาพ (Physical blowing agent) เช่น คาร์บอนไดออกไซด์โดยตรง ปัจจุบันการผลิตโฟมโดยใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางเคมีกำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากทำให้ได้โฟมที่มีคุณภาพและมีเสถียรภาพดี แต่วิธีนี้จะทิ้งความเป็นพิษให้ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานที่ต้องสัมผัสกับอาหารและงานด้านการแพทย์ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยในปัจจุบันพบว่า การเตรียมผลิตภัณฑ์โฟมโดยวิธีที่ใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางกายภาพสามารถลดข้อเสียของวิธีแรกได้เนื่องจากสารช่วยให้เกิดฟองทางกายภาพไม่คงเหลือสารตกค้างในผลิตภัณฑ์โฟม แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากการควบคุมสภาวะในการผลิตทำได้ยากและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยและการผลิตยังมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงศึกษาวิจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโฟมด้วยวิธีการดังกล่าว โดยเลือกเอาเอทิลีนไวโนลอะซิเตทและยางธรรมชาติมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมเพื่อใช้ทำโฟม

สาเหตุที่เลือกเอาเอทิลีนไวโนลอะซิเตทและยางธรรมชาติมาศึกษา เนื่องจากเอทิลีนไวโนลอะซิเตทมีความสามารถในการเกิดโฟม (Foam ability) ได้ดี ผสมเข้ากับพอลิเมอร์หลายชนิดได้ง่ายและมีราคาถูก สำหรับสาเหตุที่เลือกยางธรรมชาติมาศึกษา เนื่องจากประเทศไทยถือเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ของโลก คือ มีกำลังการผลิตประมาณ 2.2 ล้านตันต่อปี แต่กลับมีการนำยางธรรมชาติมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพียง 10% ของยางธรรมชาติที่ผลิตได้ ที่เหลือนั้นจะถูกส่งออกไปยังต่างประเทศ ดังนั้นรัฐบาลไทยได้มีนโยบายที่จะเพิ่มการใช้ยางธรรมชาติในประเทศให้มากขึ้นแทนการส่งออก ด้วยเหตุนี้การนำยางธรรมชาติมาใช้ผสมในพอลิเมอร์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น จึงเป็นแนวทางสำคัญอีกทางหนึ่งที่ช่วยให้มีการใช้ยางธรรมชาติในประเทศมากขึ้นและยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสม 2 ชนิด ตลอดจนอุณหภูมิและความดันที่ใช้สำหรับการเตรียมไมโครเซลลูลาร์โฟมจากพอลิเมอร์ผสม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเชื่อมโยงในโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อการเกิดโฟม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติพื้นฐานวิทยา (Morphology) เกี่ยวกับการกระจายตัวและขนาดของเซลล์ที่ได้จากการเตรียมโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
- 1.2.4 เพื่อหาขนาดของเซลล์ที่ได้จากการโฟมและจำนวนฟองก๊าซ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตตกับยางธรรมชาติเพื่อการเตรียมไมโครเซลลูลาร์โฟม
- 1.3.2 หาร้อยละของการเชื่อมโยงที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์โฟมด้วยวิธีฟลักซ์กับตัวทำละลาย
- 1.3.3 เปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโดยมุ่งเน้นอัตราส่วนของพอลิเมอร์และสถานะของกระบวนการที่ทำให้ได้เซลล์ที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาสมบัติพื้นฐานของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตและยางธรรมชาติ ตลอดจนกลไกในการเกิดโฟมจากทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ
- 1.4.2 เตรียมอัตราส่วนสารที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้ศึกษา
- 1.4.4 วิเคราะห์สาเหตุของการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของเซลล์ เซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่าระดับไมโครเซลลูลาร์ การที่ฟองก๊าซไม่สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์จนอัดตัวได้ และการที่โฟมมีเสถียรภาพไม่ดี
- 1.4.5 ปรับเปลี่ยนสถานะของกระบวนการ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว
- 1.4.6 สรุปผลการทดลอง และเสนอแนวทางในการเตรียมโฟมโดยใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.5.1 เป็นแนวทางในการผลิตโคมด้วยวิธีที่ใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางกายภาพซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างใหม่ในปัจจุบัน

1.5.2 หากประสบความสำเร็จในการศึกษา จะสามารถช่วยนำวัตถุดิบในประเทศมาใช้ผลิตโคม เพราะแม้ประเทศไทยจะมีการผลิตยางธรรมชาติเป็นอันดับต้นของโลก แต่การนำยางธรรมชาติมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์อย่างสำเร็จรูปยังอยู่ในระดับต่ำ

1.5.3 เรียนรู้วิธีการทำงานและแก้ปัญหาอย่างเป็นขั้นตอน ตลอดจนฝึกทักษะในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 โฟม (Foam)

เซลล์พลาสติก หรือพลาสติกโฟม หมายถึง พลาสติกที่ขยายตัวหรือพองฟูคล้ายพองน้ำ โดยทั่วไปพลาสติกโฟม จะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัสดุ ได้แก่ วัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง และวัสดุภาคก๊าซซึ่งเกิดขึ้นจากสารที่เรียกว่า สารช่วยให้เกิดพอง (Blowing agent) สำหรับส่วนที่เป็นวัสดุของแข็งนั้น อาจประกอบด้วยพอลิเมอร์หนึ่งชนิดหรือมากกว่า เช่นในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน โฟมอาจมีลักษณะอ่อนนุ่ม หรือแข็งก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature : T_g) ว่าอยู่ในช่วงที่ต่ำ หรือสูงกว่า อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของโฟม (ก) เซลล์เปิด, (ข) เซลล์ปิด [1]

รูปทรงของเซลล์อาจเป็นแบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด ดังรูปที่ 2.1 โฟมแบบเซลล์ปิด หมายถึงโฟมที่มีโครงของเซลล์ไม่ต่อกัน เหมาะสำหรับเป็นฉนวนกันความร้อน และโดยทั่วไปจะมีลักษณะแข็ง ในขณะที่โฟมแบบเซลล์เปิด หมายถึงโฟมที่มีโครงของเซลล์ต่อกันจนทำให้ก๊าซหรืออากาศหมุนเวียนถึงกันได้ เหมาะสำหรับทำเบาะที่นั่งในรถยนต์ ฟอรันิเจอร์ ฉนวนกันเสียง การใช้งานอื่นๆ ที่มีลักษณะยืดหยุ่น ถ้าโฟมประกอบด้วยเซลล์ปิดและเปิดอยู่ด้วยกันเรียกว่า เซลล์ผสม โครงสร้างของเซลล์นี้จะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีของการทำให้เกิดพองโฟมและชนิดของสารช่วยให้เกิดพอง

โฟมพลาสติกที่ผลิตได้จะมีความหนาแน่นต่างๆ แตกต่างกันไปมากมาย มีขอบเขตประมาณ 1.6 กก./ม.³ ถึงมากกว่า 96 กก./ม.³ การประยุกต์ใช้งานของโฟมเหล่านี้จะพิจารณาจากช่วงความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของโฟมที่ผลิต เนื่องจากสมบัติเชิงกลจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของโฟม ดังนั้น โฟมแบบแข็งเหมาะสำหรับการทนรับแรงซึ่งต้องมีความหนาแน่นสูง มีการเสริมแรงโดยไฟเบอร์ หรือจะต้องมีทั้งสองอย่าง ในขณะที่โฟมความหนาแน่นต่ำโดยทั่วไปเหมาะสำหรับทำฉนวนกัน ความร้อน โฟมที่ยืดหยุ่นซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ 30 กก./ม.³) จะใช้ในการผลิต เฟอร์นิเจอร์ เบาะที่นั่งในรถยนต์และโฟมที่มีความหนาแน่นสูงกว่านี้จะประยุกต์ใช้สำหรับแผ่นรอง ของพรม (Carpet backing) และตัวดูดซับพลังงาน (Energy-absorbing)

2.2 กลไกในการเกิดโฟม

การเกิดโฟมเป็นปรากฏการณ์การเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางฟิสิกส์และทางเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่ สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเกิด นิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเอง หรือจาก สารอื่นที่แพร่เข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับกาเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซ (Bubble nucleation) และการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโฟม ซึ่งนิยามของโฟมที่ได้ก็คือ เซลล์ของก๊าซที่กระจายตัวในโครงสร้างของพอลิเมอร์

การเกิดโฟม มีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์ และมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันภายนอก เพื่อขยายขนาด จึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้น มีลักษณะเป็นฟองพองออกมา หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic instability) เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้นการเกิดนิวเคลียสทำให้เกิดกลุ่มของฟองก๊าซจำนวนมาก ภายในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งวิธีการในการทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอ สำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธีการ คือ การลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ พอลิเมอร์ แบบเทอร์โมพลาสติกมีการนำความร้อนที่ไม่ดีและจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้วิธีการลด ความดันมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ

หากพิจารณาเป็นขั้นตอนของการเกิดโฟมแล้ว กระบวนการเกิดโฟมประกอบด้วยขั้นตอน พื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเริ่มเกิดฟองก๊าซ (Bubble initiation) หรือ การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)
2. การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth)
3. การคงสภาพของโฟม (Stabilization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การผสมพอลิเมอร์และวัตถุดิบสำหรับการผลิตโฟม

2.3.1 การผสมพอลิเมอร์

คำว่า "เตรียม" ในทางเทคนิคของงานพลาสติก หมายถึง ขั้นตอนที่จำเป็นในการเตรียมพลาสติกซึ่งอยู่ในลักษณะวัตถุดิบให้พร้อมที่จะนำมาผลิตเป็นชิ้นงานได้ ซึ่งประกอบด้วยการทำงานเป็นเม็ดผสมซึ่งจะทำในขณะที่เป็นของแข็งหรือผสมขณะที่เป็นของเหลว น้อยครั้งที่จะมีการนำเอาพลาสติกที่ออกมาจากถังปฏิกริยามาทำงาน หรือนำมาใช้ได้ทันที โดยปกติจะต้องนำมาผสมกับสารเสริมคุณสมบัติต่างๆ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทางเทคนิคที่มีคุณสมบัติต่างๆ ตามต้องการ

การผสม คือ การนำวัสดุต่างชนิดมารวมกันและเฉลี่ยให้เข้ากันโดยการให้วัสดุเคลื่อนที่คลุกเคล้ากันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการ

เครื่องรีดผสม จะใช้เมื่อต้องการทำการผสมอย่างเดี่ยวและต้องใช้คนควบคุมการทำงานตลอดเวลา การรีดจะเกิดขึ้นภายในร่องรีดของลูกรีดร้อนสองลูกซึ่งมีแกนขนาน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 300-500 มม. และความยาวระหว่าง 800-1500 มม. หมุนสวนทางกันด้วยความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย เพื่อให้การผสมดียิ่งขึ้นจะต้องคอยปาดส่วนของพลาสติกที่วิ่งออกทางด้านข้างให้เข้าไปอยู่ตรงกลางของลูกรีดร้อนอยู่เสมอ อุณหภูมิของลูกกลิ้งที่ใช้ในการผสมให้เข้ากันสามารถวัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แตะที่ผิวของลูกกลิ้ง

2.3.2 วัตถุดิบสำหรับการผลิตโฟม

2.3.2.1 สารช่วยให้เกิดฟอง

สารช่วยให้เกิดฟองที่ใช้ได้ผลดีจะต้องละลายเข้าสู่พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวในปริมาณที่เพียงพอในสภาวะที่ความดันสูงพอเหมาะ แต่อย่างไรก็ตาม ณ อุณหภูมิห้อง จะต้องไม่ละลายเข้าไปในผนังเซลล์ของพอลิเมอร์ที่ขยายตัวมากเกินไป สารช่วยให้เกิดฟองจะต้องผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์อย่างช้าๆ และช้ากว่าอากาศ เพราะหากการผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของสารช่วยให้เกิดฟองเร็วกว่าอากาศ จะเป็นสาเหตุให้โฟมเกิดการหดตัวในช่วงอายุการใช้งาน นอกจากนี้ สารช่วยให้เกิดฟองที่ดีจะต้องมีความเป็นพิษน้อย มีความสามารถในการติดไฟต่ำ มีราคาถูกและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สารช่วยให้เกิดฟองที่ใช้บ่อยครั้งคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าอากาศ (ค่าการนำความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 0.016 วัตต์/มม.·เคลวิน และค่าการนำความร้อนของอากาศ คือ 0.027 วัตต์/มม.·เคลวิน) ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงใช้ได้ดีสำหรับโฟมที่ใช้เป็นฉนวนคุณภาพสูง

ปัจจุบัน วงการผลิตพอลิเมอร์ได้ให้ความสนใจในการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid) เพื่อใช้ปรับปรุงขบวนการขึ้นรูปและการผสมในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีข้อดีคือ ผสมได้ง่ายในพอลิเมอร์ ไม่มีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์และต้นทุนไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสารช่วยให้เกิดฟองชนิดอื่นๆ

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีอุณหภูมิวิกฤต (T_c) เท่ากับ 31°C และมีความดันวิกฤต (P_c) เท่ากับ 7.38 เมกะพาสกาล [7] คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบไม่มีขั้ว (Non-polar) มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถผสมเข้าได้ง่ายกับพลาสติกในขณะหลอมตัว โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะแทรกและกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพลาสติก ช่วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลหรือสายโซ่ของพลาสติก ช่วยทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและทำให้พลาสติกบวมขึ้น ทำให้ความหนืดของพลาสติกหลอมลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีส่วนช่วยให้จุดหลอมตัวและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพลาสติกลดลง ซึ่งทำให้สามารถผสมพลาสติกหลายชนิดได้ที่อุณหภูมิต่ำลงจากระบบทั่วๆ ไป ซึ่งมีข้อดีคือ โครงสร้างของพลาสติกไม่ถูกทำลายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงและสีของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน

2.3.2.2 สารเชื่อมโยง

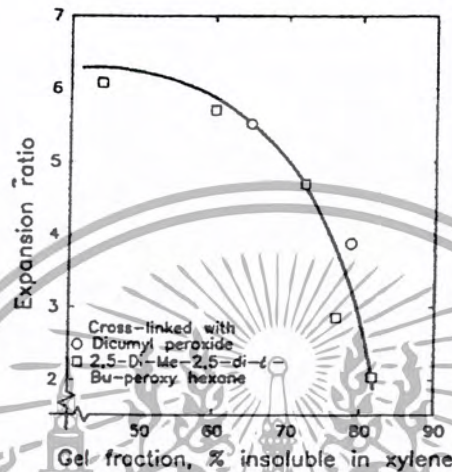
การกระจายตัวของสารเชื่อมโยงและร้อยละของการเชื่อมโยงจะมีผลต่อทั้งอัตราขยายตัวและสมบัติของโฟมที่ดี นอกจากนี้สารเชื่อมโยงจะมีอิทธิพลต่อการเชื่อมโยงในโครงสร้างแล้ว โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ก็มีผลต่อการเชื่อมโยงเช่นกัน ปริมาณของการเชื่อมโยงที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะวัดโดยวิธีลองผิดลองถูก (Trial & Error)

ปริมาณเจล (Gel level) หรือสัดส่วนเจล (Gel fraction) หมายถึงสัดส่วนของพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายในตัวทำละลายเฮกเซน ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.1)

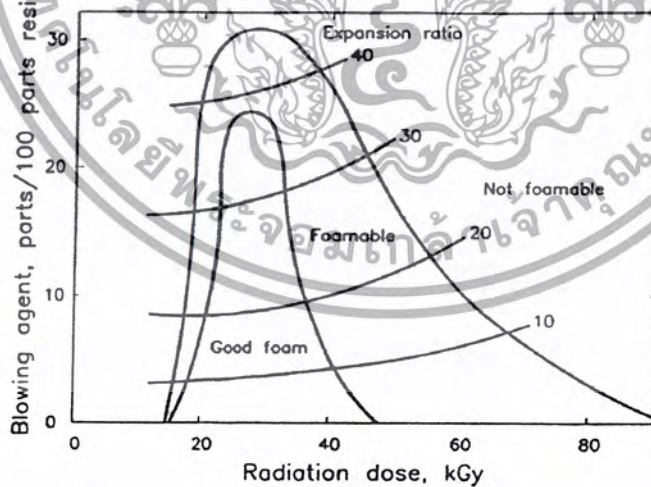
$$\text{ร้อยละของการเชื่อมโยง} = \frac{\text{ปริมาณพอลิเมอร์ที่ไม่ละลาย}}{\text{ปริมาณพอลิเมอร์ก่อนการรีฟลักซ์}} \times 100 \quad (2.1)$$

ปริมาณเจลใช้ในการบ่งบอกถึงปริมาณการเชื่อมโยงในโครงสร้างการเชื่อมโยงที่มีมากเกินไปจะเป็นตัวควบคุมปริมาณการขยายตัวของโฟม ในขณะที่หากเกิดการเชื่อมโยงในโครงสร้างไม่เพียงพอจะทำให้ฟองก๊าซแตกออก ผลจากการเชื่อมโยงของโครงสร้างแบบใช้เปอร์ออกไซด์และรังสีเป็นสารเชื่อมโยง ที่มีต่ออัตราการขยายตัวของโฟม อธิบายได้ดังรูปที่ 2.2 ช่วงของปริมาณการเชื่อมโยงที่เหมาะสมจะค่อนข้างแคบ ดังรูปที่ 2.3 สำหรับการขยายตัวของโฟมที่เหมาะสมปริมาณเจลที่จุดตัดของการขยายตัวของโฟมมีค่าประมาณ 20-40% และจะดียิ่งขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 30-40% สำหรับพอลิเมอร์จำพวกพอลิเอทีลีน การเชื่อมโยงในโครงสร้างที่เหมาะสม ปริมาณเจลจะอยู่ในช่วง 30-40 % เมื่อใช้รังสีเป็นสารเชื่อมโยงในโครงสร้าง ที่ปริมาณรังสี อยู่ในช่วง 10 kGy ถึง 50 kGy และเมื่อใช้ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยงในโครงสร้าง การเชื่อมโยงที่เหมาะสม ปริมาณเจลจะอยู่ในช่วง 60-70% (คาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5-1.5%)



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเจลที่มีต่ออัตราการขยายตัวของโฟม [1]



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยให้เกิดฟองที่แพร่เข้าไปในพอลิเมอร์กับ ปริมาณของสารเชื่อมโยงแบบรังสี [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent)

ปัจจุบันได้มีการนำสารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส มาใช้กับผลิตภัณฑ์ทางการค้า ซึ่งก็จะมีผลทำให้การแข็งตัวเร็วขึ้น มีองศาของการตกผลึกเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มของพอลิเมอร์ใสขึ้น สามารถลดช่องว่าง (Void) ซึ่งเกิดอยู่ระหว่างรอยต่อของโครงสร้างผลึกขนาดใหญ่

สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

- สารประกอบอนินทรีย์ เช่น ทัลคัม ซิลิกา เป็นต้น
- สารประกอบอินทรีย์ เช่น เกลือของกรดโมโนคาร์บอกซิลิกหรือกรดพอลิคาร์บอกซิลิก
- โคพอลิเมอร์ของเอสเทอร์ในเอทิลีน/อะคริลิก

การใช้งานของสารประเภทนี้มักจะอยู่ในรูปของผสมที่เป็นผง สารแขวนลอยหรือสารละลาย การใส่สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสจะทำให้พอลิเมอร์เกิดโครงสร้างผลึกที่ละเอียดขึ้น เป็นผลให้พอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติเชิงกล เช่น การทนแรงดึง ความแข็ง ความเหนียวเพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างดังกล่าวจะช่วยกระจายแรงที่กระทำบนพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้การที่พอลิเมอร์มีผลึกที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น จะทำให้รูปร่างที่ปรากฏของพอลิเมอร์เปลี่ยนไปด้วย พอลิเมอร์ที่ใส่สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส จะมีความโปร่งแสงหรือโปร่งใสเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากขนาดผลึกที่เล็กลง จะทำให้แสงผ่านได้ดีโดยไม่ถูกบดบัง สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสที่นิยมใช้ คือ ทัลคัม

ทัลคัมเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตที่มีน้ำอยู่ในโมเลกุล (Hydrate magnesium silicate) ซึ่งมีสูตร $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เกิดในธรรมชาติ การใช้ทัลคัมในเทอร์โมพลาสติกในปัจจุบันจะเลือกใช้เฉพาะงานที่ต้องการความแข็งแรงไม่ยืดหยุ่นสูงเป็นอันดับแรก ซึ่งการที่จะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงไม่ยืดหยุ่นนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่เติมแต่อย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงและส่วนผสมทางเคมีของทัลคัมด้วย

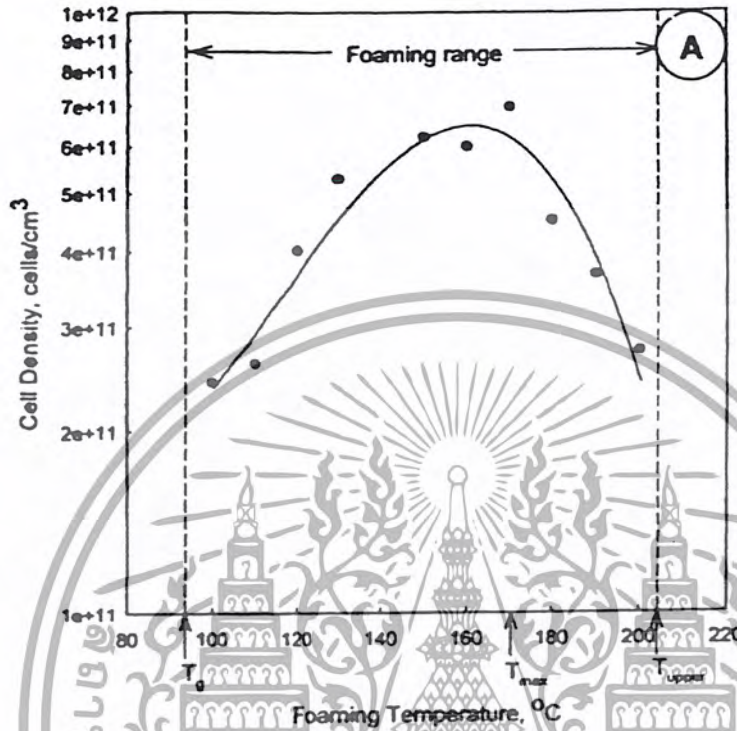
2.4 สภาวะของกระบวนการเตรียมโฟม

2.4.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการโฟม

อุณหภูมิที่ใช้ในการโฟมมีผลต่อขนาดของเซลล์ หากเซลล์มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ความหนาแน่นของเซลล์เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ B. Krause และ คณะ ซึ่งแสดงได้จากกราฟ ดังรูปที่ 2.4 การโฟมของระบบพอลิซัลโฟน/คาร์บอนไดออกไซด์ จะทำได้ที่เหนืออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่านั้น ในกรณีดังรูปนี้คือเหนืออุณหภูมิ 95 °C ซึ่งแสดงโดยเส้นประซ้ายมือ การเพิ่มความดันอิมพัลส์ เช่น การเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์ จะเป็นสาเหตุของการลดลงของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของของผสมพอลิเมอร์/ก๊าซ จึงทำให้อุณหภูมิของการโฟมมีค่าลดลงที่อุณหภูมิระหว่าง 100-165 °C จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นของเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเตรียมโฟมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจะเกิดขึ้นในระบบการเกิดโฟมที่เป็นเนื้อเดียวโดยทั่วไป



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเซลล์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการโฟม [1]

อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่ความหนาแน่นของเซลล์มากที่สุดประมาณ 170 °C จำนวนของเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรจะลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิของการโฟมเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาของการเกิดและการขยายขนาดของโฟมจะเด่นชัดในช่วงอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมกับอุณหภูมิซึ่งความหนาแน่นของเซลล์มีค่ามากที่สุด (T_{max}) การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายออกจากเนื้อของพอลิเมอร์ในช่วงของการโฟม ทำให้ความหนาแน่นของเซลล์ลดลงอย่างมากในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 165 ถึง 205 °C ที่เหนืออุณหภูมิของการโฟมวิกฤติ (Upper critical foaming temperature) จะไม่มีการเกิดโฟมอีกต่อไป

เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่มีช่วงอุณหภูมิการหลอมตัวในการผสมเรซินเข้าด้วยกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการวัดและควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่พอเหมาะตลอดเวลา เพราะถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้พลาสติกไหม้และถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ความหนืดสูงมากยากแก่การผสมเข้าด้วยกัน ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์รุ่นหน้าไปมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงได้มีการสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ใช้ในการวัดเพื่อความถูกต้องแม่นยำที่มากขึ้น

2.4.2 เวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์ (Soaking time)

เวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์ หมายถึง เวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองละลายในพอลิเมอร์จนอิ่มตัว เวลาดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากการแพร่ของก๊าซในตัวกลางแบบมีขอบเขตจำกัดภายใต้สภาวะที่ไม่คิดความต้านทานที่ผิว

วิธีการหากระบวนการถ่ายโอนมวลที่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้เทคนิคการแยกตัวแปร วัตถุประสงค์เหล่านี้ เริ่มแรกมีความเข้มข้นเท่ากับ c_{A0} และมีการเปลี่ยนแปลงตามสิ่งแวดล้อมโดยทันที ซึ่งทำให้มีความเข้มข้นที่ผิวเป็น c_{As} เพื่ออธิบายและวิเคราะห์เทคนิคการแยกตัวแปร ให้พิจารณาการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายในแผ่นของแข็งที่มีความหนา L เนื่องจากโมเลกุลมีการแพร่ในอัตราที่ช้าภายในของแข็ง ทำให้ทอมของการกระจายตัวของสารที่รวมกลุ่มกันอยู่ในกฎข้อแรกของฟิคส์ (Fick's first law) [3] เข็กโกล์คูนีย์ ดังนั้นการหาค่าตอบโพรไฟล์ความเข้มข้นจะแสดงได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \tag{2.2}$$

โดยมีเงื่อนไขของจุดเริ่มต้นและขอบเขต

$$\begin{aligned} c_A &= c_{A0} && \text{ที่ } t = 0 && \text{เมื่อ } 0 \leq z \leq L \\ c_A &= c_{As} && \text{ที่ } z = 0 && \text{เมื่อ } t > 0 \\ c_A &= c_{As} && \text{ที่ } z = L && \text{เมื่อ } t > 0 \end{aligned}$$

เงื่อนไขขอบเขตที่อยู่ด้านบนทำให้ง่ายขึ้นโดยการแสดงความเข้มข้นในทอมของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแบบไร้หน่วย Y ดังนี้

$$Y = \frac{c_A - c_{As}}{c_{A0} - c_{As}} \tag{2.3}$$

ดังนั้น สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจึงได้เป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

โดยมีเงื่อนไขของจุดเริ่มต้นและขอบเขต

$$\begin{aligned} Y &= Y_0 & \text{ที่ } t &= 0 & \text{เมื่อ } 0 \leq z \leq L \\ Y &= 0 & \text{ที่ } z &= 0 & \text{เมื่อ } t > 0 \\ Y &= 0 & \text{ที่ } z &= L & \text{เมื่อ } t > 0 \end{aligned}$$

ตั้งสมมติฐานว่า มีผลลัพธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในรูปแบบ

$$Y(z,t) = T(t)Z(z) \quad (2.5)$$

เมื่อฟังก์ชัน $T(t)$ ขึ้นอยู่กับเวลา t เพียงอย่างเดียวและฟังก์ชัน $Z(z)$ ขึ้นอยู่กับพิกัดจุด z อนุพันธ์ย่อยจึงได้เป็น

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = Z \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

และ

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} = T \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

แทนสมการเหล่านี้ในสมการที่ (2.4) จะได้ว่า

$$Z \frac{\partial T}{\partial t} = D_{AB} T \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (2.8)$$

นำ $D_{AB} \cdot T \cdot Z$ หารตลอด จะได้

$$\frac{1}{D_{AB} T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านซ้ายของสมการจะขึ้นอยู่กับเวลา t เพียงอย่างเดียวและด้านขวาของสมการจะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง z เพียงอย่างเดียว ถ้าค่า t เปลี่ยนแปลง ด้านขวาของสมการจะยังคงที่และถ้า z เปลี่ยนแปลง ด้านซ้ายของสมการจะยังคงที่ ดังนั้นทั้งสองด้านจะต้องเป็นอิสระต่อ z และ t ซึ่งจะเท่ากับค่าคงที่ $-\lambda^2$ จะทำให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์สองสมการแยกออกมา ซึ่งสมการแรกสำหรับเวลา t

$$\frac{1}{D_{AB}T} \frac{dT}{dt} = -\lambda^2 \quad (2.10)$$

โดยมีผลลัพธ์โดยทั่วไปของสมการคือ

$$T(t) = C_1 e^{-D_{AB}\lambda^2 t} \quad (2.11)$$

และอีกสมการหนึ่งสำหรับตำแหน่ง z

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -\lambda^2 \quad (2.12)$$

โดยมีคำตอบทั่วไปของสมการคือ

$$Z(z) = C_2 \cos(\lambda z) + C_3 \sin(\lambda z) \quad (2.13)$$

แทนที่สมการทั้งสองในผลลัพธ์จะได้

$$Y = T(t)Z(z) = [C'_1 \cos(\lambda z) + C'_3 \sin(\lambda z)]e^{-D_{AB}\lambda^2 t} \quad (2.14)$$

ค่าคงที่ C'_1 และ C'_3 และพารามิเตอร์ λ หาได้โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นและขอบเขตในสมการที่อยู่ในรูปทั่วไป เงื่อนไขขอบเขตแรกคือ $Y=0$ ที่ $z=0$ จะทำให้ C'_1 เป็นศูนย์ และเงื่อนไขขอบเขตที่สอง $Y=0$ ที่ $z=L$ ทำให้กล่าวได้ว่า $\sin(\lambda L)=0$ เพราะเป็นไปได้ที่ C'_3 จะมีค่าเท่ากับศูนย์ หาก C'_3 มีค่าเท่ากับศูนย์จะทำให้สมการทั้งหมดมีค่าเท่ากับศูนย์ ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่มีความสำคัญ ดังนั้น $\sin(\lambda L)$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = \frac{n\pi}{L} \text{ สำหรับ } n = 1, 2, 3, \dots$$

เพื่อที่จะหาค่า C_2' จึงนำสมบัติของการตั้งฉาก (Orthogonality) มาใช้ และได้คำตอบแบบสมบูรณคือ

$$Y = \frac{c_A - c_{As}}{c_{Ao} - c_{As}} = \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) e^{-(n\pi/2)^2 X_D} \int_0^L Y_0 \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) dz \quad (2.15)$$

โดยที่ L คือ ความหนาของแผ่นวัตถุและ X_D คือ อัตราของเวลาสัมพัทธ์ ซึ่งนิยามได้ว่า

$$X_D = \frac{D_{AB} t}{x_1^2} \quad (2.16)$$

โดยมี x_1 เป็นความยาวคุณลักษณะของ $L/2$ ถ้าแผ่นวัตถุมีการกระจายความเข้มข้นเริ่มแรก ที่สม่ำเสมอตลอด Z จะได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็น

$$\frac{c_A - c_{As}}{c_{Ao} - c_{As}} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) e^{-(n\pi/2)^2 X_D} \quad (2.17)$$

เนื่องจากสมการที่ (2.17) ยากแก่การคำนวณ อีกวิธีการหนึ่งในการคำนวณหาเวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองละลายในพอลิเมอร์จนอิ่มตัวคือวิธีการอ่านค่าความสัมพันธ์จากแผนภาพ (Graphic Method) ซึ่งใช้รูปที่ 2.5 ในการคำนวณ

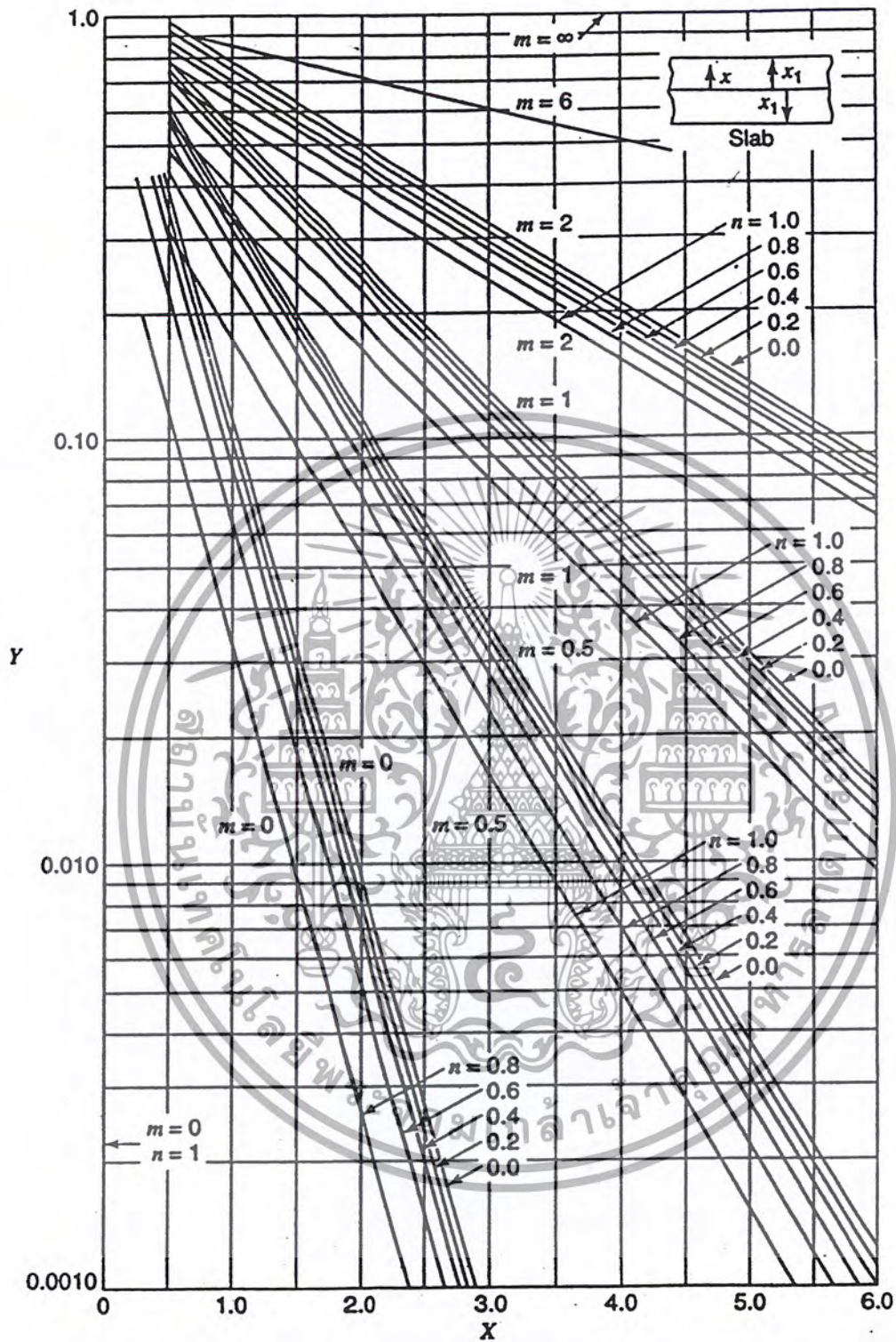
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพสถานะไม่คงที่ [3]

	สัญลักษณ์ของ พารามิเตอร์	การถ่ายโอนมวล ของโมเลกุล
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพัทธ์ , สัดส่วนแบบไร้มิติ (Unaccomplished change, a dimensionless ratio)	Y	$\frac{C_{As} - C_A}{C_{As} - C_{A0}}$
เวลาสัมพัทธ์ (Relative time)	X	$\frac{D_{AB}t}{x_1^2}$
ตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative position)	n	$\frac{x}{x_1}$
ความต้านทานสัมพัทธ์ (Relative resistance)	m	$\frac{D_{AB}}{k_c x_1}$

- C_A = ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบ
 C_{As} = ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่พื้นผิวของพอลิเมอร์
 C_{A0} = ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่เวลาเริ่มต้น
 x = ระยะจากจุดกึ่งกลางของแผ่นพอลิเมอร์ถึงตำแหน่งที่ต้องการทราบ
 x_1 = ระยะจากจุดกึ่งกลางถึงพื้นผิวของพอลิเมอร์
 t = เวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองละลายในพอลิเมอร์จนอิ่มตัว
 k_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective transfer coefficient)
 D_{AB} = ค่าความสามารถในการแพร่ของมวล (Mass diffusivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพการถ่ายโอนมวลสำหรับสภาวะไม่คงที่ในวัสดุแผ่นแบนขนาดใหญ่ [3]

เพื่อให้ได้ค่า X ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ t ดังตารางที่ 2.1 จึงต้องทำการคำนวณหาค่า Y ก่อน แล้วจึงอ่านความสัมพันธ์ระหว่างค่า X กับ Y จากรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากแซ่พอลิเมอร์ทิ้งไว้ในเครื่องปฏิกรณ์จนถึงเวลาดังกล่าว พอลิเมอร์จะอิมตัวไปด้วยก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองและทำให้ความเข้มข้นของก๊าซดังกล่าวในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ ดังนั้น c_{As} ใช้แสดงความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายในพอลิเมอร์ในหน่วย "กรัมของสารช่วยให้เกิดฟอง/กรัมของพอลิเมอร์" จึงหาได้จากสถานะของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองตามสมการสถานะ (Equation of state) ของ Sanchez-Lacombe (SL) [4]

$$\tilde{p}^2 + \tilde{P} + \tilde{T} \left[\ln(1 - \tilde{p}) + (1 - \frac{1}{r})\tilde{p} \right] = 0 \quad (2.18)$$

เมื่อ \tilde{P} , \tilde{T} และ \tilde{p} คือ ความดัน อุณหภูมิและความหนาแน่นลด (Reduced pressure, temperature and density) ของก๊าซที่ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองในเครื่องปฏิกรณ์ตามลำดับ r คือ พารามิเตอร์แสดงขนาด (Size parameter) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้แทนจำนวนตำแหน่งที่เกิดพลังงานแลตทิซจากการกระทำโดยโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยพารามิเตอร์ลดและพารามิเตอร์แสดงขนาด มีนิยามดังนี้

$$\tilde{P} = \frac{P}{P^*}, \quad \tilde{T} = \frac{T}{T^*}, \quad \tilde{p} = \frac{p}{p^*}, \quad r = \frac{MwP^*}{RT^*p^*} \quad (-) \quad (2.19)$$

โดยที่ R คือค่าคงที่ของก๊าซในหน่วย จูล·โมล⁻¹·เคลวิน⁻¹ และ Mw คือน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของก๊าซที่ใช้ในหน่วย กรัม/โมล, P^* ในหน่วยเมกกะพาสคาล, T^* ในหน่วยเคลวิน และ p^* ในหน่วย กรัม/ซม.³ คือพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะ

ความสัมพันธ์ของ p ในสมการ (2.19) กับ c_{As} แสดงได้ดังสมการ (2.20)

$$c_{As} = \frac{\rho V}{W} \quad (2.20)$$

เมื่อ W คือน้ำหนักของพอลิเมอร์ก่อนการโฟม ในหน่วยกรัมของพอลิเมอร์

ค่า c_A ในหน่วย "กรัมของสารช่วยให้เกิดฟอง/กรัมของพอลิเมอร์" มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการละลาย (Solubility coefficients) ซึ่งแทนด้วย S ในหน่วย "กรัมของสารช่วยให้เกิดฟอง/กรัมของพอลิเมอร์·เมกกะพาสคาล" ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_A = SP \quad (2.21)$$

ตัวอย่างค่า S และค่า D_{AB} แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถของคาร์บอนไดออกไซด์ในการผ่านเข้า, ค่าความสามารถในการแพร่, ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารณในการละลายในโคพอลิเมอร์/พอลิเมอร์ผสมของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่มีไวนิลอะซิเตทเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างๆ ณ อุณหภูมิ 25 °ซ [8]

	EVA % VA	PVC wt.%	P barrer	$D_{AB} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$S \text{ cm}^3 \text{ STP/cm}^3 \text{ cmHg}$
EVA	19 (EVA19)	0	57	45.9	0.012
	50 (EVA50)	0	70	22.5	0.031
	70 (EVA70)	0	30	7.8	0.038
EVAx/PVC	13 (EVA19/PVC)	30	11.7	10.8	0.011
	29 (EVA50/PVC)	42	13.4	7.4	0.018
	35 (EVA70/PVC)	50	2.3	11.11	0.021
PVC	0	100	0.28	0.16	0.018

ตัวอย่างการคำนวณเวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองละลายในพอลิเมอร์จนอิ่มตัวแสดงในภาคผนวก ก.

2.5 คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม

2.5.1 ขนาดและจำนวนเซลล์

โดยทั่วไป โฟมพลาสติกที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอและมีคุณสมบัติเท่ากันตลอดปริมาตร 1 ซม.³ จะประกอบด้วย 1,000 ถึง 10,000 เซลล์ โดยจะมีความแตกต่างของขนาดเซลล์ที่แท้จริงกับขนาดของเซลล์โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12% ถึง 25% ขนาดของเซลล์และการกระจายขนาดของเซลล์ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์ แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการโฟมด้วย จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรโฟม (n) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีการใช้อยู่บ่อยครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส หรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมในส่วนของตัวอย่างนั้น พารามิเตอร์ n เป็นฟังก์ชันกับขนาดของเซลล์และความหนาแน่นของโฟมพลาสติกและจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรโฟมมีค่าดังสมการที่ (2.22) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \left(n_b / \ell^2 \right)^{3/2} \times 10^3 \times \varphi \quad (2.22)$$

โดยที่ n คือ จำนวนเซลล์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรของโฟม, n_b คือ จำนวนเซลล์ในพื้นที่ $\ell \times \ell$, ℓ คือ ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วย มม., φ คืออัตราขยายตัว (Expansion ratio) ซึ่งนิยามได้ดังสมการที่ (2.23)

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (2.23)$$

เมื่อ ρ_f และ ρ_p คือ ความหนาแน่นของโฟมและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ในหน่วยกรัมต่อซม.³ ตามลำดับ

2.5.2 ขนาดและความหนาของผนังเซลล์

ความหนาแน่นและอัตราส่วนของจำนวนเซลล์เปิดต่อจำนวนเซลล์ปิดเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของโฟมพลาสติก แต่อย่างไรก็ตามพบว่า แม้ว่าจะมีความหนาแน่นและจำนวนเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิดเท่ากัน แต่ความแข็งแรงและพารามิเตอร์กายภาพทางอุณหภูมิก็คงแตกต่างกันอย่างมากในโฟมพลาสติกซึ่งทำมาจากพอลิเมอร์เกรดเดียวกัน จึงต้องมีการพิจารณาในเรื่องความแตกต่างของรูปร่างและขนาดของเซลล์

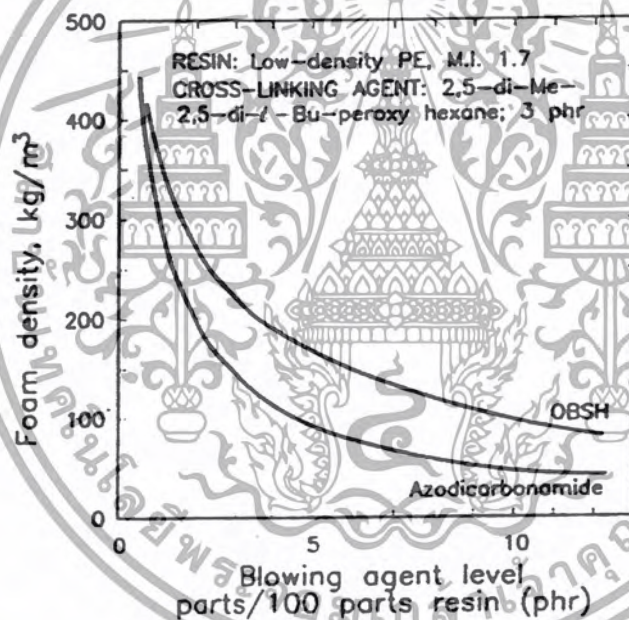
สำหรับเซลล์ทรงกลมที่มีการกระจายตัวเดียว ในโฟมพลาสติก จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์เฉลี่ย δ กับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ d เป็นดังสมการ (2.24)

$$\delta = d \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \rho / \rho_p}} - 1 \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ ρ_p คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่ยังไม่โฟมในหน่วย กก./ม.³ และ ρ คือความหนาแน่นของพลาสติกที่ผ่านการโฟมแล้วในหน่วย กก./ม.³

2.5.3 การควบคุมความหนาแน่นของโฟม

ความหนาแน่นของโฟมจะควบคุมโดยระดับปริมาณสารช่วยให้เกิดฟอง ในรูปที่ 2.6 ความหนาแน่นของโฟมเป็นสัดส่วนโดยประมาณแบบผกผันกับระดับปริมาณสารช่วยให้เกิดฟอง พารามิเตอร์ของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ เช่น ความหนาแน่นของโฟม ความหนาของโฟม ขนาดของเซลล์ ปริมาณการเชื่อมโยงในโครงสร้าง ปริมาณของเซลล์เปิด คุณสมบัติของการโฟม และสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการขยายตัว จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของสารช่วยให้เกิดฟอง ประสิทธิภาพของการแพร่ของสารช่วยให้เกิดฟองจะต่ำในผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดบางและมีความหนาแน่นน้อยเนื่องจากการสูญเสียก๊าซออกไปโดยการแพร่สู่สิ่งแวดล้อม การขยายตัวของโฟม ในอากาศที่อุณหภูมิสูงเป็นสาเหตุที่ทำให้พื้นผิวของเซลล์เสื่อมสภาพและเสียหาย การโฟม ณ บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนหรือการเติมสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มประสิทธิภาพของสารช่วยให้เกิดฟองและปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของโฟม



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับปริมาณสารช่วยให้เกิดฟอง

[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง
- 3.1.2 เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)
- 3.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
- 3.1.4 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน (Hot compression machine)
- 3.1.5 ชุดรีฟลักซ์
- 3.1.6 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter)
- 3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์
- 3.1.8 ตู้อบสารเคมี
- 3.1.9 ตะแกรงกรองขนาด 30 เมช
- 3.1.10 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.1.11 มีดสำหรับกรีดพอลิเมอร์ผสม
- 3.1.12 ถังมือกันความร้อน
- 3.1.13 แผ่นอะลูมิเนียมฟลอย

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เอทิลีนไวน์ลอะซิเตท 28% (Ethylene vinyl acetate : EVA)
- 3.2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)
- 3.2.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 99.9%
- 3.2.4 ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide : DCP)
- 3.2.5 ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane)
- 3.2.6 ทัลคัม (Talc)
- 3.2.7 ไกลีน (Xylene)
- 3.2.8 ซิลิโคนเหลว
- 3.2.9 ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง
- 3.1.2 เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)
- 3.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
- 3.1.4 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน (Hot compression machine)
- 3.1.5 ชุดรีฟลักซ์
- 3.1.6 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter)
- 3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์
- 3.1.8 ตู้อบสารเคมี
- 3.1.9 ตะแกรงกรองขนาด 30 เมช
- 3.1.10 เทอร์มิสเตอร์
- 3.1.11 มีดสำหรับกรีดพอลิเมอร์ผสม
- 3.1.12 ถุงมือกันความร้อน
- 3.1.13 แผ่นอะลูมิเนียมฟลอย

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เอทิลีนไวน์อะซิเตท 28% (Ethylene vinyl acetate : EVA)
- 3.2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)
- 3.2.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 99.9%
- 3.2.4 ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide : DCP)
- 3.2.5 ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane)
- 3.2.6 ทัลคัม (Talc)
- 3.2.7 ไซลีน (Xylene)
- 3.2.8 ซิลิโคนเหลว
- 3.2.9 ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การผสมพอลิเมอร์

1. การเตรียมสาร

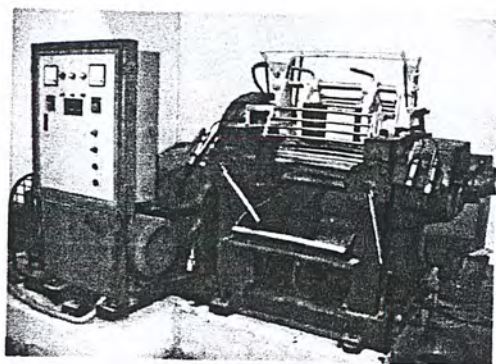
ซึ่งสารต่างๆ ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรการผสมพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง

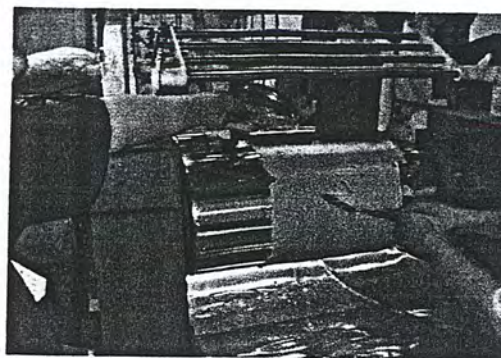
ชื่อพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง	หน้าที่	น้ำหนัก (phr)
เอทิลีนไวนิลอะซิเตท	พอลิเมอร์หลัก	90, 80, 70
ยางธรรมชาติ	พอลิเมอร์ประกอบ	10, 20, 30
ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์	สารช่วยให้เกิดการเชื่อมโยง	1, 3.5, 7
ทัลคัม	สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส	1.5
ไซโคลเฮกเซน	ตัวทำละลาย	1

2. อุณหภูมิของเครื่องผสมแบบอัตโนมัติ 2 ลูกกลิ้งให้มีอุณหภูมิประมาณ 50-60 °C โดยใส่ยางธรรมชาติลงไป เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว จึงตัดเอาแผ่นยางออก
3. เริ่มผสมส่วนผสมต่างๆ เข้าด้วยกัน โดยเริ่มจากการเทเอทิลีนไวนิลอะซิเตทลงไป รอให้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทผสมจนเข้ากันและพันรอบลูกกลิ้งจึงผสมตามด้วยยางธรรมชาติ, ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์และทัลคัม ตามลำดับ โดยช่วงเวลาในระหว่างการเทส่วนผสมแต่ละส่วนจะห่างกันประมาณ 3 นาที ลูกกลิ้งจะรีดส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นแผ่นบางและผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ผู้ทำการทดลองจะต้องกรีดแผ่นพอลิเมอร์ผสมนี้แล้วพับกลับไปกลับมาตลอดเวลาที่ทำการผสม ใช้เวลาทั้งหมดในการผสมสารเคมีและพอลิเมอร์ให้เข้ากันประมาณ 15 นาที ต่อการผสม 1 กะ (Batch)
4. เมื่อทำการผสมจนเข้ากันได้เป็นพอลิเมอร์ผสมแล้ว ปรับความหนาของลูกกลิ้งเพื่อรีดพอลิเมอร์ผสมออก แล้วทิ้งให้เย็นลง ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิด
2 ลูกกลิ้ง



รูปที่ 3.2 การเทส่วนผสมแต่ละส่วน



รูปที่ 3.3 การกรีดแล้วพับกลับไปกลับมา
เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

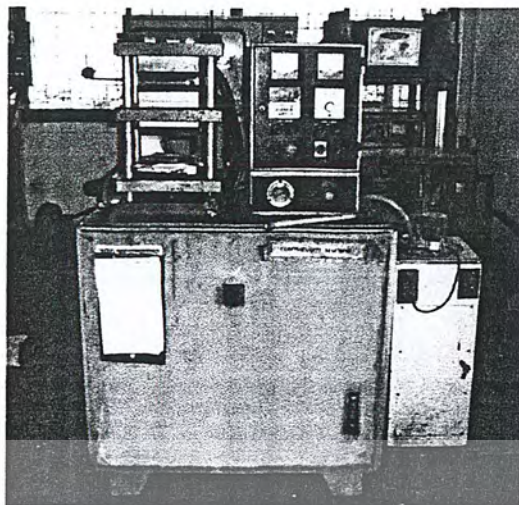


รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนการผสม
สารให้เข้ากัน

3.3.2 การทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการเชื่อมโยง (Curing)

1. ตัดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ในขั้นตอนแรกให้มีขนาดประมาณ 12x12 ซม.
2. ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อนเป็น 150 °ซ และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเป็น 9 °ซ
3. ทาซิลิโคนบนผิวของแม่พิมพ์ที่มีความหนา 3 มม. เพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ผสมติดแม่พิมพ์ อุ่นแม่พิมพ์โดยวางแม่พิมพ์บนเครื่องอัด ทำการอัดเป็นเวลา 6 นาที
4. ใส่พอลิเมอร์ผสมที่ตัดไว้แล้วลงในแม่พิมพ์ ทำการอัดเป็นเวลา 6 นาที
5. วางพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากข้อ 4 ในช่องหล่อเย็น ทำการอัดเป็นเวลา 2 นาที
6. แกะพอลิเมอร์ผสมออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน

3.3.3 การหาร้อยละการเชื่อมโยงในพอลิเมอร์ผสม

1. การเตรียมสาร

ชั่งพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเชื่อมโยงของโครงสร้างแล้ว 1 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมของชุดรีฟลักซ์ที่บรรจุไซลีน 100 มล.

2. รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 110 °ซ เป็นเวลา 12 ชม.

3. กรองด้วยตะแกรงขนาด 30 เมช นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 °ซ เป็นเวลา 8 ชม.

4. คำนวณหาร้อยละการเชื่อมโยงของโครงสร้างจากสมการที่ (2.1)

$$\text{ร้อยละของการเชื่อมโยง} = \frac{\text{ปริมาณพอลิเมอร์ที่ไม่ละลาย}}{\text{ปริมาณพอลิเมอร์ก่อนการรีฟลักซ์}} \times 100 \quad (2.1)$$



รูปที่ 3.6 ชุดรีฟลักซ์ที่ใช้ในการหาปริมาณของการเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การเตรียมโคม

1. การเตรียมตัวอย่าง

ตัดพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเชื่อมโยงของโครงสร้างแล้ว ให้มีขนาดประมาณ 3×1.5 ซม. ใส่ลงในกระถางอะลูมิเนียมฟลอย

2. ใส่พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ลงในเครื่องปฏิบัติการความดันสูง ชั้นนอตทั้ง 8 ตัวให้แน่น
3. ตั้งค่าให้กับเครื่องทำความร้อน (Heater) ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.7 เครื่องปฏิบัติการความดันสูง

รูปที่ 3.8 วิธีการขันนอต



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของวาล์ว

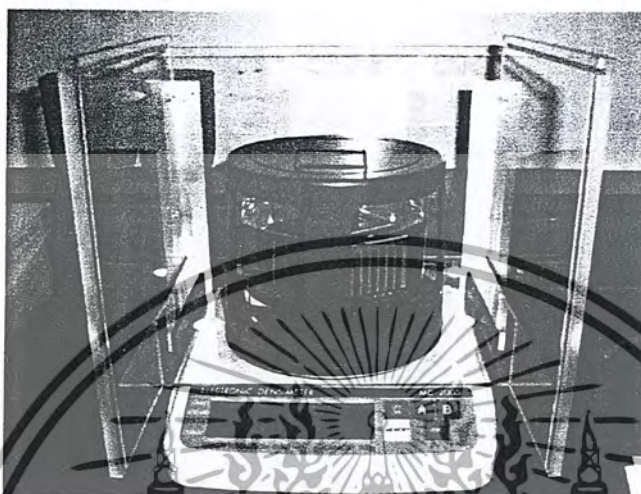
4. ใส่อากาศที่ค้างอยู่ในระบบโดยใช้วาล์วหมายเลข 1 และ 2 ในรูปที่ 3.9 เป็นตัวควบคุม
5. ปลดยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องปฏิบัติการความดันสูงให้สูงกว่าความดันวิกฤต (7.38 เมกกะพาสคาล) ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชม. (จากผลการคำนวณโดยใช้ค่า D_{AB} จากตารางที่ 2.2 ดังแสดงในภาคผนวก ก.)
6. ปิดเครื่องทำความร้อนและทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (Cool down) ใส่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจนหมดแล้วจึงขันนอตออก
7. แخذโคมที่ได้ลงในน้ำเย็นประมาณ 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการทดลองซ้ำโดยปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการโม่เพิ่มขึ้นครั้งละ 5°C

3.3.5 การหาอัตราขยายตัวของโม่

หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมก่อนการโม่ และเมื่อผ่านการโม่แล้วด้วย เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอเล็กทรอนิกส์

เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอเล็กทรอนิกส์ MD-200S ใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) เพื่อหาความหนาแน่นและกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของน้ำ 1 กรัม/ซม.^3 ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นค่าอ้างอิง เครื่อง MD-200S สามารถวัดค่าความหนาแน่นของวัตถุที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ ยกเว้นวัตถุที่เป็นผงและของเหลวที่มีความหนืดสูง

วัตถุตัวอย่างที่นำมาทดสอบคือ โม่ที่เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนไวโนลอะซิเตทและยางธรรมชาติซึ่งเป็นของแข็ง โดยตัวกลางของเหลวคือน้ำ ก่อนที่จะทำการวัดค่า จะต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อยเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการใช้งาน เพื่อเป็นการอุ่นเครื่องและเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง (25°C)

ขั้นตอนการใช้งาน

1. ตั้งค่าน้ำจอแสดงผลให้เป็นศูนย์
2. ชั่งน้ำหนักของวัตถุตัวอย่างในอากาศขณะแห้งแล้วทำการบันทึกค่า
3. ชั่งน้ำหนักของวัตถุตัวอย่างในน้ำแล้วทำการบันทึกค่า (หากมีฟองอากาศเกาะอยู่ที่วัตถุตัวอย่างให้พยายามกำจัดออกก่อนที่จะบันทึกค่า)
4. เครื่องจะแสดงผลค่าความหนาแน่นทางจอ (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตร

ในหน่วย ซม.^3 ก็ได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำวัตถุตัวอย่างออกจากเครื่อง (ในการนำวัตถุตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้ที่คีบจับ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นออกมาทำความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้) เมื่อได้ค่าความหนาแน่นจากเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์แล้ว นำมาคำนวณหาอัตราการขยายตัวจากสมการที่ (2.23)

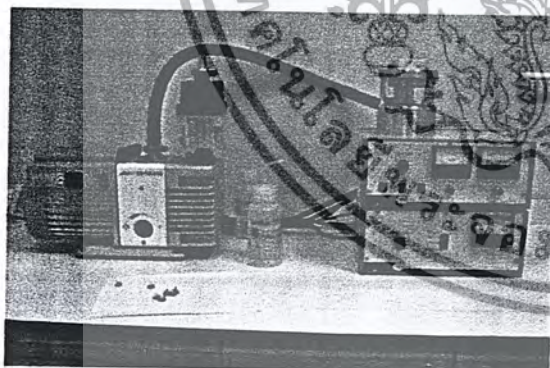
$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (2.23)$$

3.3.6 ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของโฟม

1. การเตรียมชิ้นตัวอย่างโฟม

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะอ่อนนิ่มและเหนียว ดังนั้นการตัดชิ้นตัวอย่างเพื่อดูภาคตัดขวางของโฟม จึงต้องใช้วิธีการแช่โฟมตัวอย่างลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 2-3 ชม. การแช่ไนโตรเจนเหลวช่วยทำให้โฟมแข็งตัวและเปราะ สามารถแตกหักได้ง่ายแล้ว จากนั้นให้ทำการหักโฟมตัวอย่าง ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ จะได้ชิ้นตัวอย่างโฟมสำหรับศึกษาสัณฐานวิทยา

2. เคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 1 ชม. เพื่อให้ชิ้นโฟมตัวอย่างมีสมบัติในการนำไฟฟ้า
3. ศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 เครื่องเคลือบทอง (ก) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

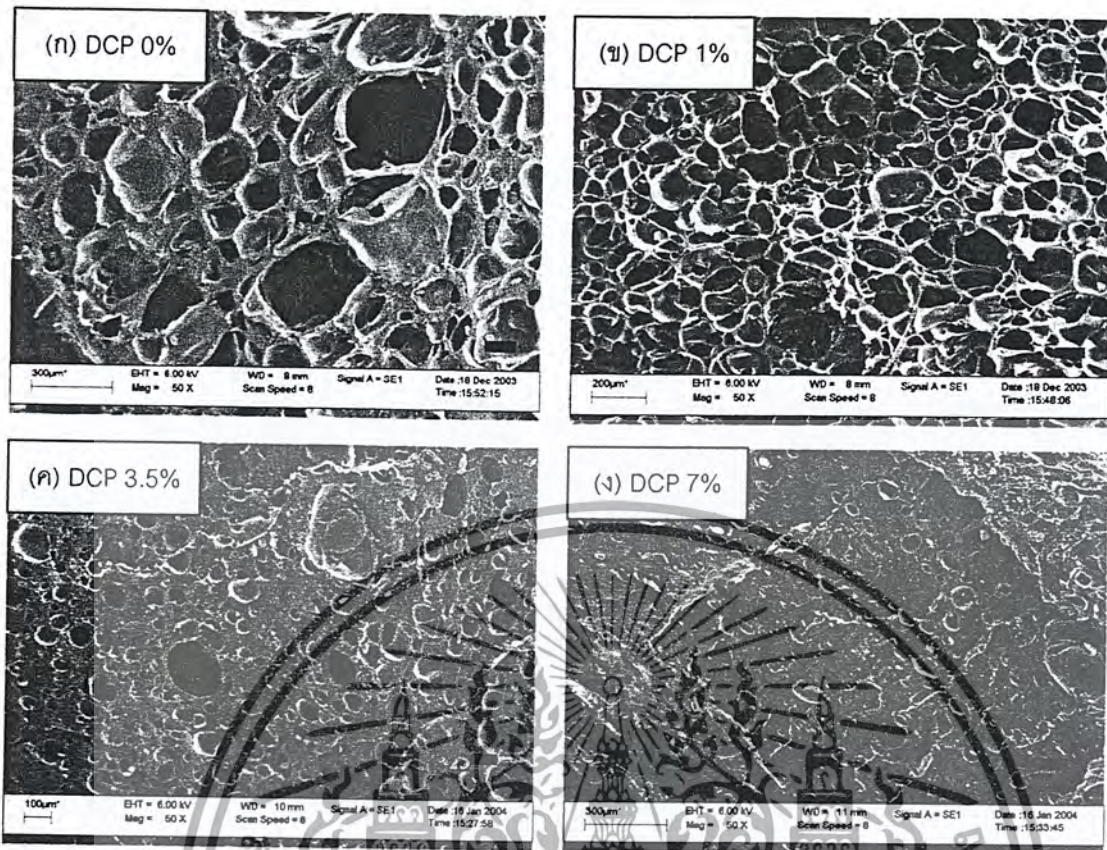
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิจัยเพื่อศึกษาผลของการเชื่อมโยงของโครงสร้าง ปริมาณยางธรรมชาติและผลของอุณหภูมิที่มีต่อจำนวนเซลล์และขนาดของเซลล์ ตลอดจนเสถียรภาพของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์โฟมจากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้โดยทำการทดลองในการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทและยางธรรมชาติ รวมทั้งปริมาณสารเชื่อมโยงต่างๆ สภาวะของการเตรียมโฟม และการใส่ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน พบว่า

4.1 ผลของการเชื่อมโยง

เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยง โดยเริ่มจากการไม่ใส่และใส่ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 1, 3.5 และ 7 ตามลำดับ พบว่าลักษณะของโฟมที่เตรียมได้มีลักษณะแตกต่างกัน รูปที่ 4.1 (ข) และ (ค) มีลักษณะของโฟมที่ดี คือมีเซลล์ขนาดเล็กและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ นอกจากนี้จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า เมื่อปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์เป็นร้อยละ 1 ทำให้เซลล์มีขนาดประมาณ 47 ไมครอน ความหนาแน่นของโฟมเป็น 0.239 กรัม/ซม.³ และเมื่อใส่ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 3.5 จะทำให้ได้เซลล์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 83 ไมครอน ความหนาแน่นของโฟม เพิ่มขึ้นเป็น 0.736 กรัม/ซม.³

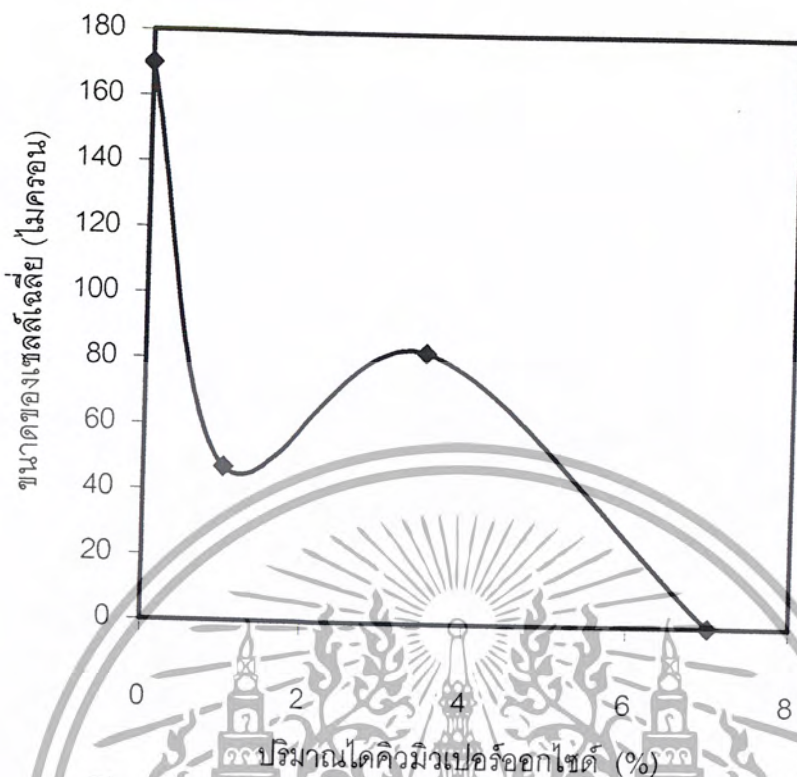
ในขณะที่เมื่อไม่ใส่ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ ทำให้ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้ไม่มีลักษณะของโฟมที่ดี คือมีเซลล์ขนาดใหญ่เกินไปและมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และเมื่อใส่ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 7 ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้เป็นโฟมที่มีฟองก๊าซแทรกอยู่น้อย จนสังเกตได้ว่า ลักษณะส่วนใหญ่ยังคงสภาพเป็นเนื้อพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 1 ยังทำให้ได้จำนวนเซลล์สูงสุดประมาณ 6.5×10^6 เซลล์/ซม.³ ดังรูปที่ 4.4



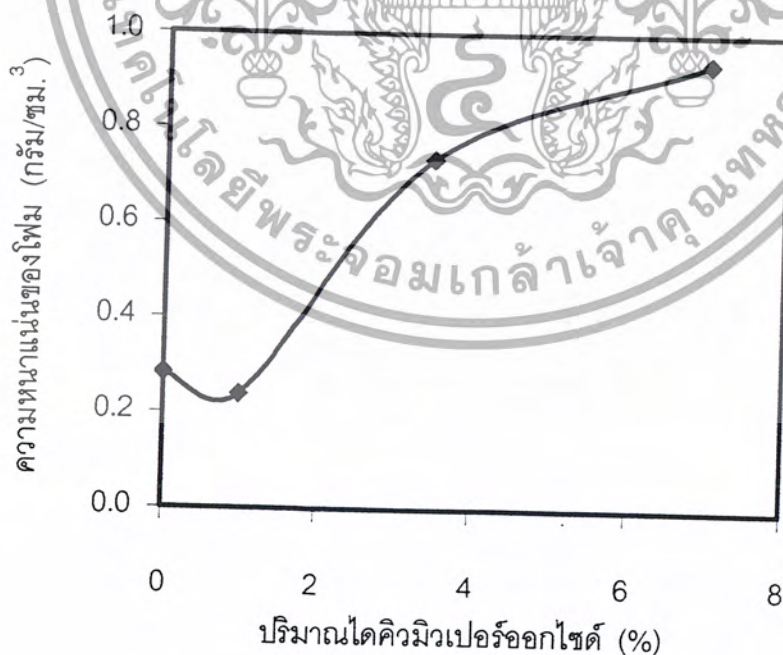
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโฟมที่ได้สภาวะอุณหภูมิ 52°C ความดัน 6.07 เมกกะพาสคาล โดยมีอัตราส่วนระหว่างเอทิลีนโวนิลอะซิเตตอย่างธรรมชาติเป็น 9:1 และใช้ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ

จากผลการทดลอง เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ ในรูปที่ 4.4 พบว่า จำนวนเซลล์จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงในโครงสร้างมากเกินไป เนื้อพอลิเมอร์จึงมีความแข็งแรงมาก จนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ของพอลิเมอร์ได้ จึงเกิดโฟมได้ยาก จำนวนเซลล์ที่ได้จึงน้อย แต่หากไม่ใส่ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ การเชื่อมโยงในโครงสร้างจะน้อยจนเกินไป ทำให้โครงสร้างของเซลล์ไม่สามารถทนต่อแรงดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่ดูดซึมเข้ามาได้ เซลล์จึงทะลุถึงกัน ทำให้ได้เซลล์ขนาดใหญ่ ขนาดเซลล์ไม่สม่ำเสมอและมีเสถียรภาพของโฟมต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



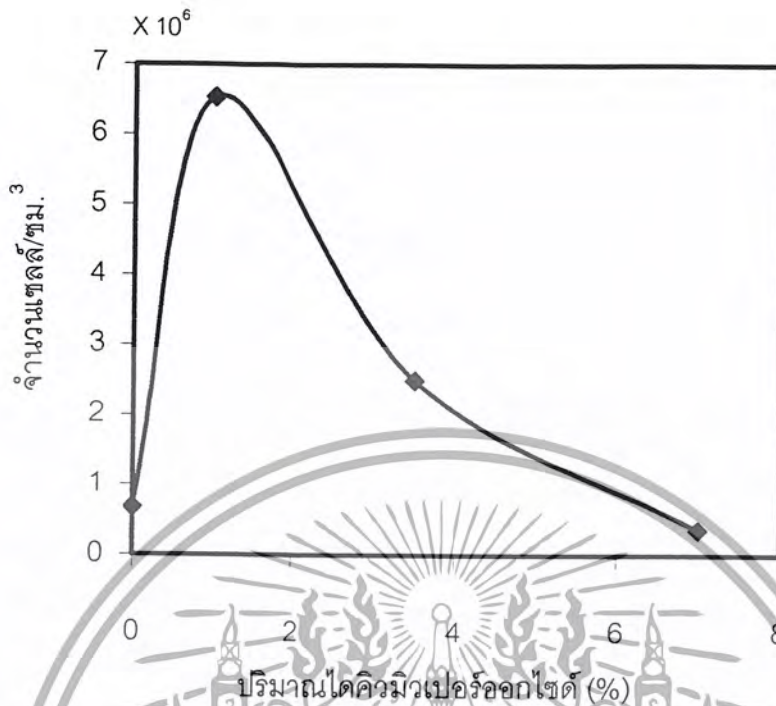
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์กับขนาดของเซลล์เฉลี่ย



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์

กับความหนาแน่นของโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



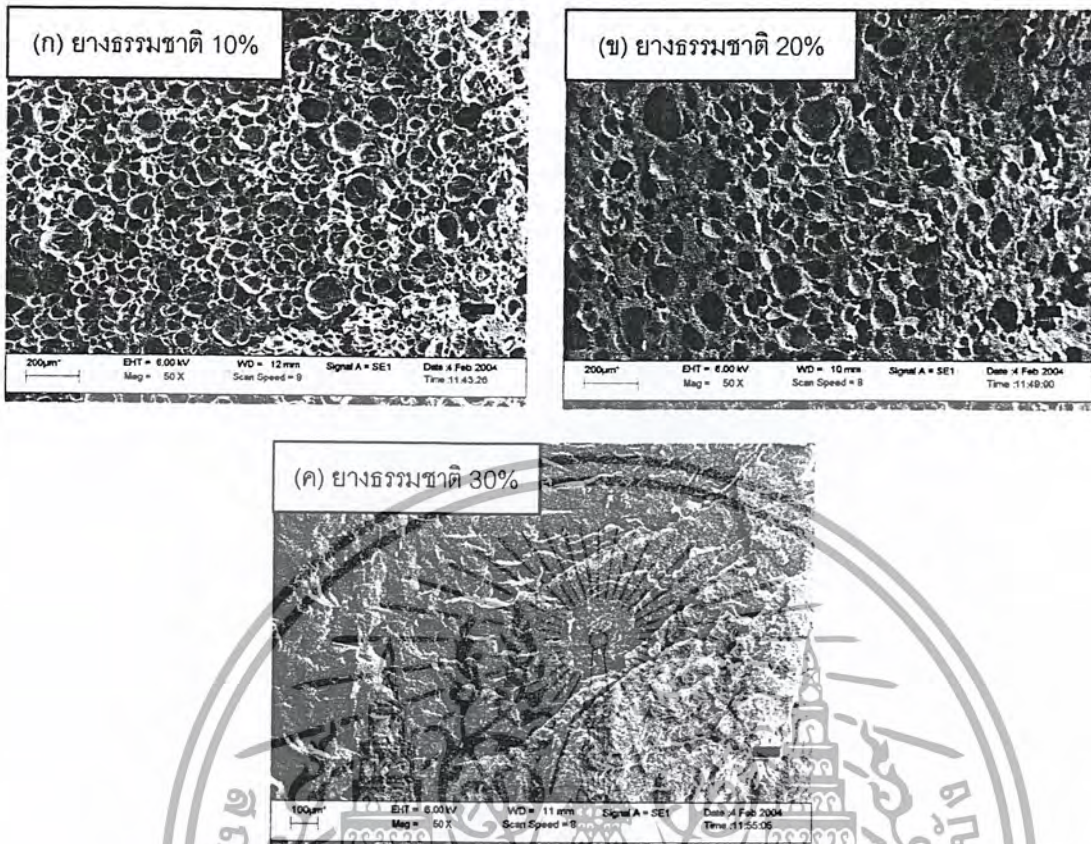
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์กับจำนวนเซลล์

4.2 ผลของปริมาณยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสม

ในการทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมจากร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 40 °ซ ความดัน 8.45 เมกกะพาสคาล โดยมีปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ 1% พบว่าสัณฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้มีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.5 จากรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) แสดงสัณฐานวิทยาของโฟมที่ใช้ยางธรรมชาติร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งให้ลักษณะโฟมที่มีเนื้อนุ่มสม่ำเสมอ มีขนาดฟองเฉลี่ยประมาณ 50 ไมครอน ส่วนรูปที่ 4.5 (ค) แสดงสัณฐานวิทยาของโฟมที่ใช้ปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีลักษณะของโฟมที่ดี มีจำนวนฟองน้อยและยังคงสภาพส่วนใหญ่เป็นลักษณะของเนื้อพอลิเมอร์ผสม เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเป็นร้อยละ 10 ความหนาแน่นของโฟมจะเป็น 0.459 กรัม/ซม.³ และเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ ความหนาแน่นของโฟมจะเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.7

นอกจากนี้ จากการคำนวณความหนาแน่นของเซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่าปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 10 ให้จำนวนเซลล์สูงสุดประมาณ 1.4×10^7 เซลล์/ซม.³ และจำนวนเซลล์ลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเฉลี่ยมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8

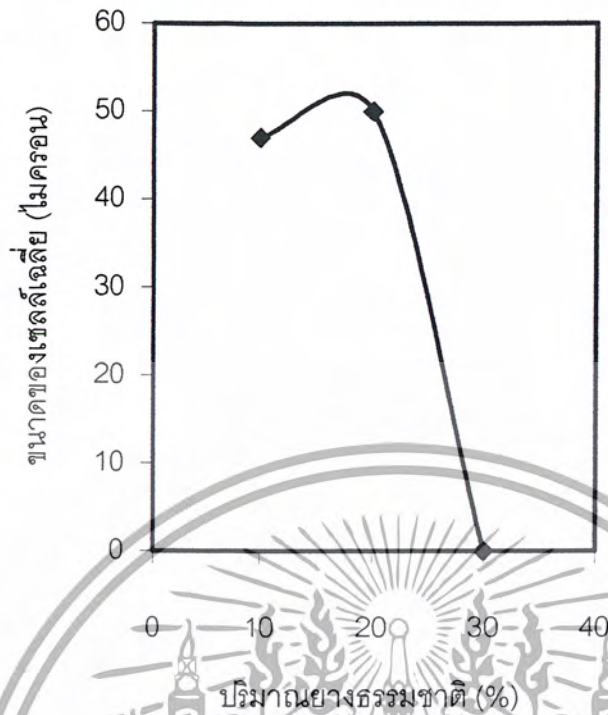
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



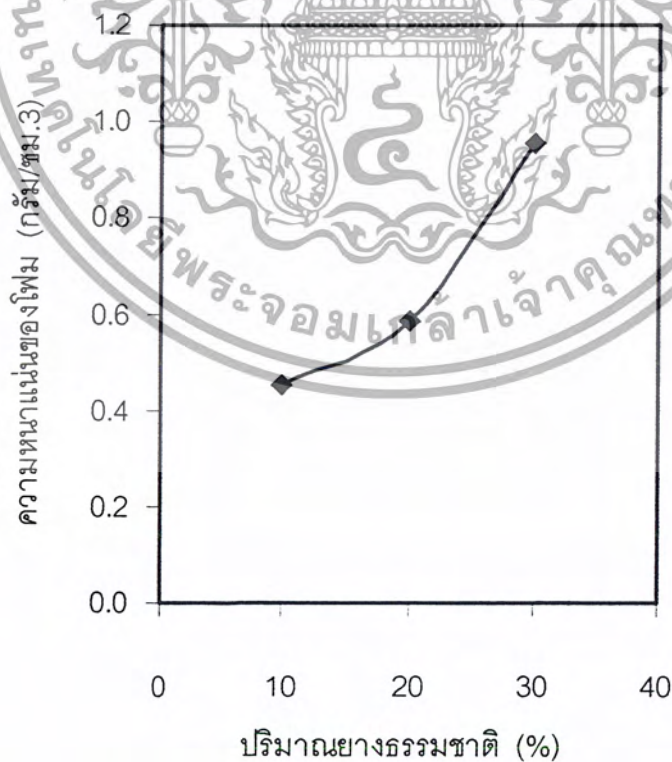
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของโฟมที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 40 °ซ ความดัน 8.45 เมกกะพาสคาล โดยมีปริมาณไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ 1% และใช้ยางธรรมชาติในปริมาณต่างๆ

ลักษณะของสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้และความหนาแน่นของเซลล์ลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้จากความแตกต่างในเรื่องความสามารถในการเกิดโฟม (Foam ability) ของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตและยางธรรมชาติ โดยทั่วไปเอทิลีนไวนิลอะซิเตตมีความสามารถในการเกิดโฟมได้ดีกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ ความสามารถในการเกิดโฟมของพอลิเมอริผสมจึงลดลงด้วย นอกจากนี้ยางธรรมชาติมีพันธะไม่อิ่มตัวอยู่มาก จึงทำให้พอลิเมอริผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติมากมีองศาของการเชื่อมโยงมากตามปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น ทำให้พอลิเมอริผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างเกิดโฟมจึงเกิดขึ้นได้ยาก จนทำให้ความหนาแน่นของโฟมที่ได้ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ก่อนการผสม ในขณะที่จำนวนของเซลล์กลับน้อยมาก

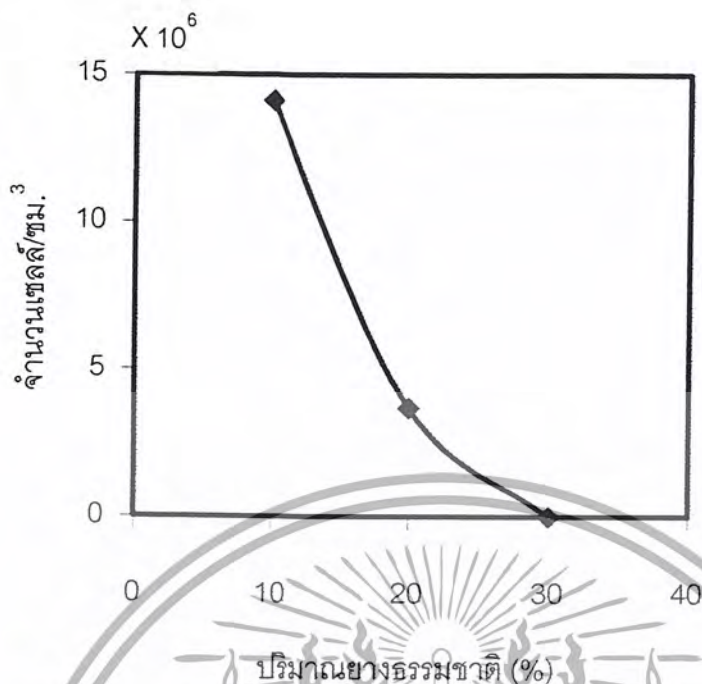
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางธรรมชาติกับขนาดของเจลเจลลี่



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางธรรมชาติกับความหนาแน่นของโฟม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



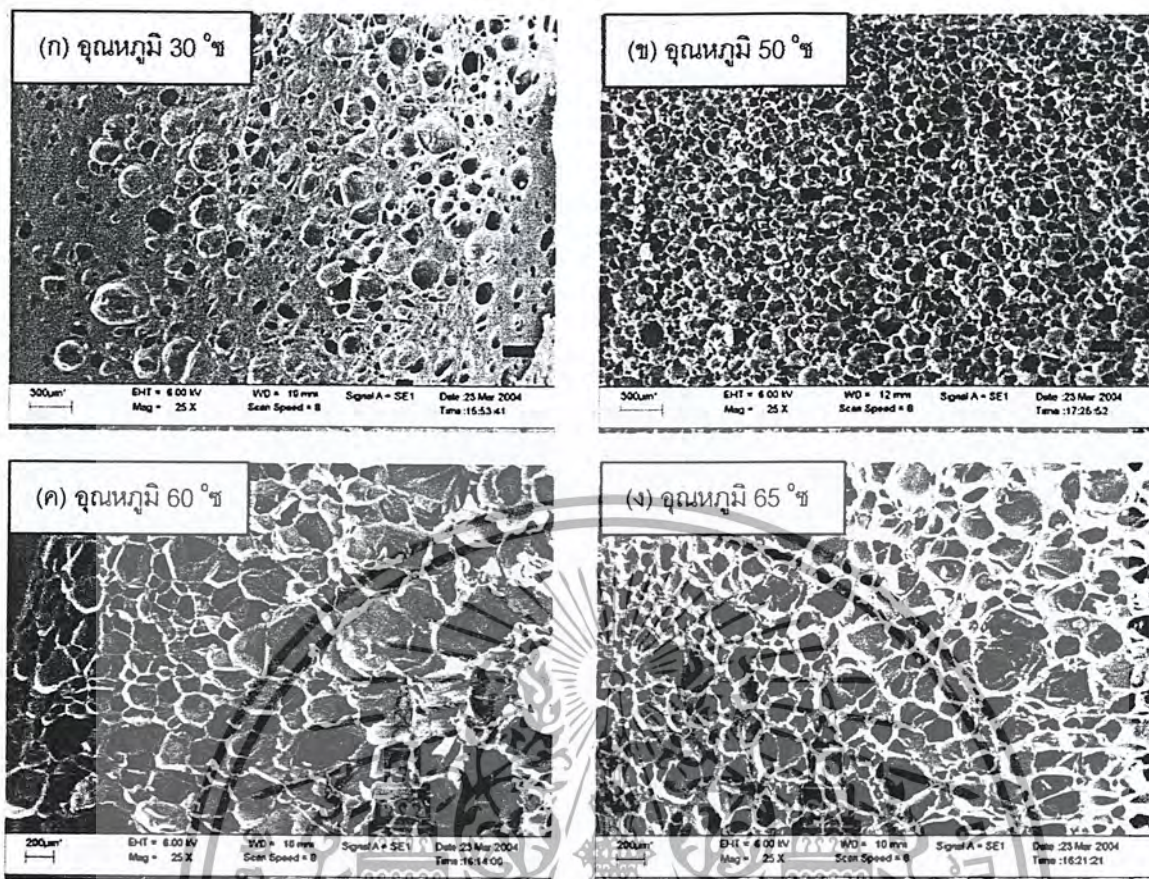
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยางธรรมชาติกับจำนวนเซลลูล์/ซม.³

4.3 ผลของอุณหภูมิ

เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนสภาวะของการโม่คืออุณหภูมิ เป็น 30, 50, 60 และ 65 °ซ ภายใต้สภาวะความดันคงที่ 7.05 เมกกะพาสคาล และใช้ปริมาณสัดส่วนระหว่างเอทิลีนไวโนลอะซิเตตต่อยางธรรมชาติเป็น 9:1 พบว่าสัดส่วนวิทยาของโม่ที่เตรียมได้มีลักษณะต่างกัันดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปที่ 4.9 (ข) และ (ค) แสดงสัดส่วนวิทยาของโม่เมื่อมีอุณหภูมิของกระบวนการเตรียมโม่เป็น 50 และ 60 °ซ ตามลำดับ ซึ่งรูปที่ 4.9 (ข) จะให้ผลิตภัณฑ์โม่ที่ได้มีลักษณะของโม่ที่ดีที่สุดคือ มีเซลล์ขนาดเล็กประมาณ 100 ไมครอน มีการกระจายตัวของเซลลูล์สม่ำเสมอ ความหนาแน่นของโม่ที่วัดได้คือ 0.151 กรัม/ซม.³ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนรูปที่ 4.9 (ค) ได้ผลิตภัณฑ์โม่ที่ค่อนข้างดีแต่ยังมีลักษณะเนื้อโม่ไม่ดีเท่ารูปที่ 4.9 (ข) เพราะเซลลูล์ที่ได้มีขนาดใหญ่ การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่วนรูปที่ 4.9 (ก) และ (ง) แสดงสัดส่วนวิทยาของโม่ที่เตรียมได้จากการทดลองใช้อุณหภูมิของการเตรียมโม่เป็น 30 และ 65 °ซ ตามลำดับ ซึ่งจากโครงสร้างสัดส่วนวิทยาที่ได้พบว่า ผลิตภัณฑ์โม่ที่ได้ไม่มีลักษณะของโม่ที่ดี โดยที่รูปที่ 4.9 (ก) มีฟองก๊าซเข้าแทรกน้อย และรูปที่ 4.9 (ง) เซลล์มีรูปร่างไม่ดีและเสถียรภาพต่ำ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 50 °ซ ยังทำให้ได้จำนวนเซลลูล์สูงสุดถึง 1.6×10^7 เซลล์/ซม.³ ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่านี้ จำนวนเซลลูล์ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 50 °ซ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

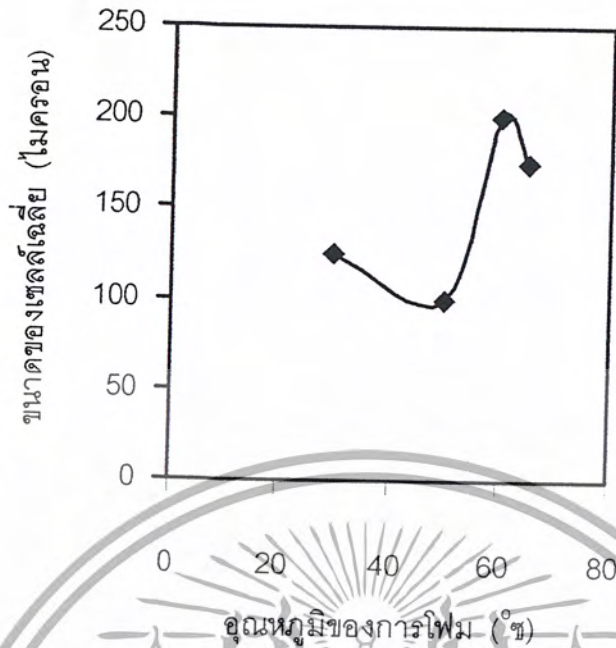
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



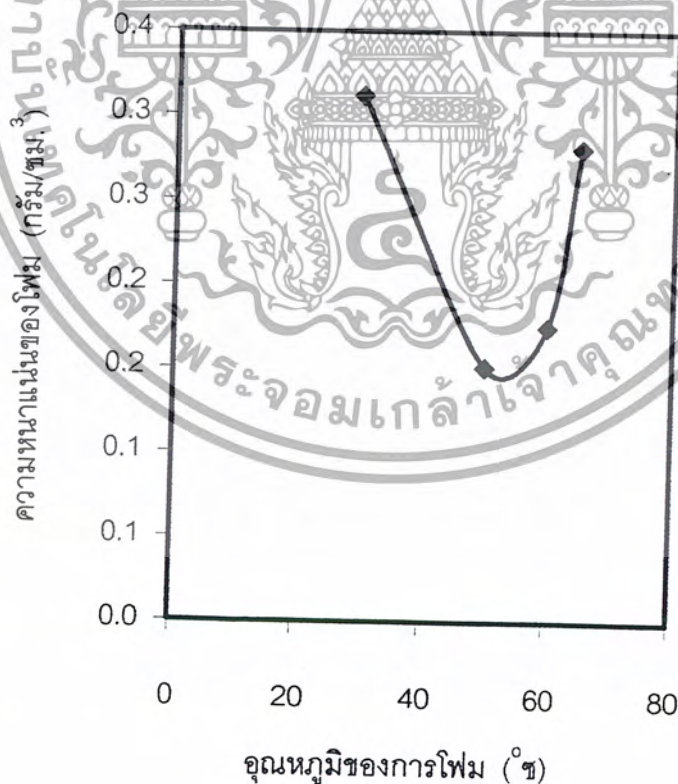
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของโฟมที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนระหว่างเอทิลีน ไวนิลอะซิเตตอย่างธรรมชาติเป็น 9:1 ปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ 1% ภายใต้ ความดัน 7.05 เมกกะพาสคาล ที่อุณหภูมิต่างๆ

ลักษณะผลของสัณฐานวิทยาที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีการกระจายตัวของเซลล์ สม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์โฟมจะมีจำนวนเซลล์จะสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการโฟมที่เหมาะสมช่วงหนึ่ง หากอุณหภูมิเตรียมโฟมไม่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ละลายผ่านเนื้อพอลิเมอร์ได้น้อยเนื่องจากผนังเซลล์แข็งแรงเกินไปที่จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แพร่ผ่านเข้าไปได้ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์โฟมที่เตรียมได้จึงมีค่าใกล้เคียงกับความ หนาแน่นของพอลิเมอร์ก่อนการโฟม และหากอุณหภูมิที่ใช้ในการโฟมสูงเกินไป แม้ว่า ความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้น แต่ จำนวนเซลล์กลับลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมอยู่ในสถานะใกล้จะหลอมเหลว ผนังเซลล์จึงบาง เกินกว่าจะทนแรงดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ฟองก๊าซจึงหดตัวอย่างรวดเร็ว เซลล์ที่ได้ จึงมีเสถียรภาพต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



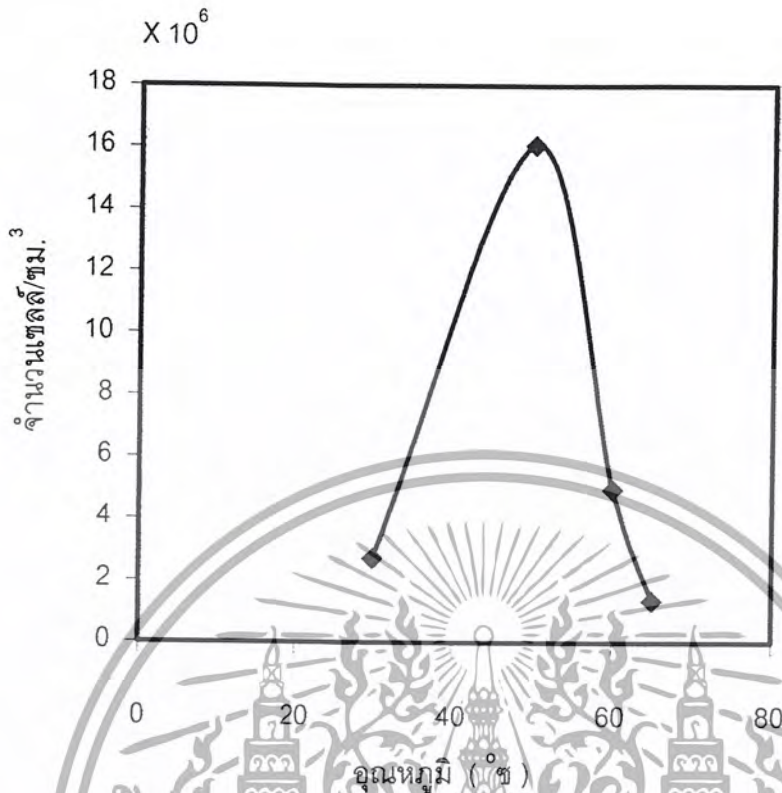
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมมุมของการโฟมกับขนาดของเซลล์เฉลี่ย



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมมุมของการโฟมกับความหนาแน่นของโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



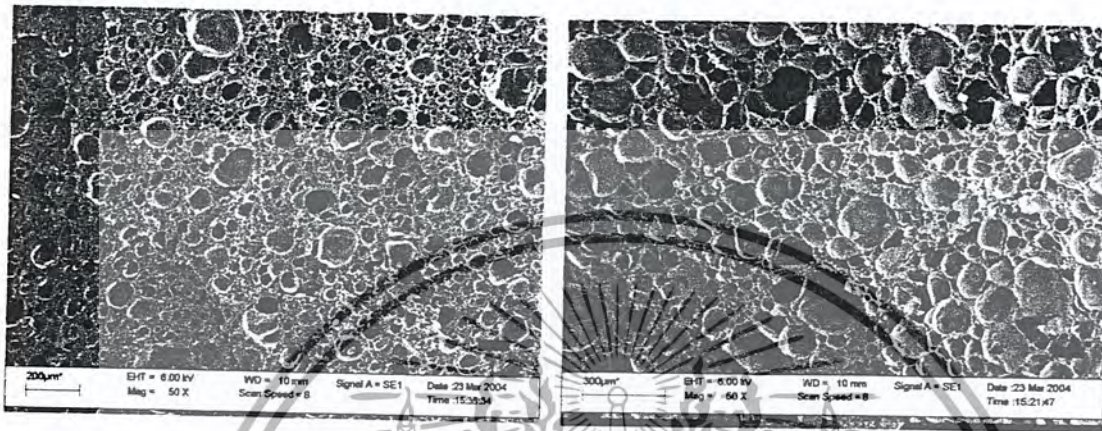
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนเซลล์

4.4 ผลของตัวทำละลายที่มีต่อคุณลักษณะของโฟม

จากการศึกษาความสามารถในการละลายของก๊าซผ่านเนื้อพอลิเมอร์ พบว่าที่อุณหภูมิสูงค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้น แต่จากผลการทดลองเมื่อได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ พบว่า ที่อุณหภูมิสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ได้มากขึ้นจริงตามทฤษฎี แต่ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้มีเสถียรภาพต่ำ เนื่องจากฟองก๊าซหดตัวอย่างรวดเร็ว จึงทำการทดลองเพื่อหาวิธีการที่ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ได้มากขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มอุณหภูมิมากนัก

จากการทดลองใส่ไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลายในขั้นตอนการผสมพอลิเมอร์และโดยการปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ในขั้นตอนการโฟม พบว่าสัดส่วนวิทยาของโฟมที่เตรียมได้มีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) รูปที่ 4.13 (ก) แสดงสัดส่วนวิทยาของโฟมที่ได้ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนในขั้นตอนการผสมพอลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์โฟมที่เตรียมได้มีจำนวนเซลล์มากถึง 2.1×10^7 เซลล์/ซม.³ มีขนาดเซลล์เฉลี่ยประมาณ 40 ไมครอน ความหนาแน่นของโฟมที่วัดได้คือ 0.312 กรัม/ซม.³ และมีเสถียรภาพที่ดี แตกต่างจากสัดส่วนวิทยาของโฟมในรูปที่ 4.13 (ข) ที่ได้ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยให้ระเหยในขั้นตอนการโฟม สัณฐานวิทยาของโฟมที่ได้จากวิธีการนี้พบว่า แม้ว่าฟองก๊าซจะสามารถละลายเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ผสมได้มาก แต่เซลล์ที่ได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ฟองก๊าซขนาดใหญ่มีปริมาณมาก ความหนาแน่นของโฟมที่วัดได้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์โฟมที่เตรียมได้โดยวิธีการแรก คือ 0.331 กรัม/ซม.³



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยเตรียมโฟมภายใต้ความดัน 7.34 เมกกะพาสคาล อุณหภูมิ 30 °ซ อัตราส่วนระหว่างเอทิลีนไวน์ลอะซิเตทต่อยางธรรมชาติเป็น 9:1 ปริมาณโคคิวมิลเปอร์ออกไซด์ 1% (ก) เมื่อใส่ไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลายในขั้นตอนการผสมพอลิเมอร์ในปริมาณ 1% (ข) เมื่อปล่อยให้ไซโคลเฮกเซนซึ่งเป็นตัวทำละลายระเหยในขั้นตอนการโฟมในปริมาณ 1%

ลักษณะของสัณฐานวิทยาที่ได้ดังรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) สามารถอธิบายได้ว่า ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนที่ผสมกับพอลิเมอร์โดยตรงในขั้นตอนการผสมพอลิเมอร์ ดังกล่าวจะแข่งขันกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการเกิดเป็นฟองก๊าซละลายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีทั้งฟองก๊าซของไซโคลเฮกเซนและฟองก๊าซของคาร์บอนไดออกไซด์ เซลล์ที่ได้จะมีขนาดเล็กในระดับใกล้เคียงกับไมโครเซลลูลาร์โฟม

สำหรับสัณฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้จากวิธีการปล่อยให้ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนระเหยในขั้นตอนการโฟม สามารถอธิบายได้ว่า ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนที่ระเหยเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ส่วนหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพาหะนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เข้าสู่เนื้อพอลิเมอร์ได้มากขึ้น โดยไม่ได้กระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซไปพร้อมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เพียงแต่ทำให้ผนังเซลล์อ่อนตัวลงเท่านั้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงซึมผ่านเนื้อพอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้นและสาเหตุที่ขนาดของเซลล์ไม่สม่ำเสมอ อาจอธิบายได้ว่า มีไอบางส่วนของตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซโคลเฮกเซนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์และช่วยให้เกิดการขยายตัวของฟองก๊าซ
พร้อมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ฟองก๊าซมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองส่วนนี้ควรต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเนื่องจากยังขาด
พื้นฐานของทฤษฎีเกี่ยวกับความสามารถในการละลายของไซโคลเฮกเซน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตทกับยางธรรมชาติที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า เมื่อส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจะทำให้ผนังเซลล์แข็งมากขึ้น การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นไปได้ยาก จึงได้จำนวนเซลล์ไม่มากเท่าที่ต้องการ สำหรับการทดลองนี้อัตราส่วนระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตทกับยางธรรมชาติที่ทำให้ได้จำนวนเซลล์มากที่สุดเป็น 9:1

2. ที่ปริมาณไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ 1% จะทำให้การเชื่อมโยงอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะ โฟมที่ได้จึงมีจำนวนเซลล์มากในระดับใกล้เคียงไมโครเซลลูลาร์โฟม

3. อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเตรียมโฟมอยู่ในช่วง 45-55 °C โดยผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้จะมีขนาดเซลล์สม่ำเสมอและมีจำนวนเซลล์มาก ส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงดังกล่าว ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้จะมีจำนวนเซลล์น้อย และที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงนี้ ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้ไม่เพียงแค่มียังมีจำนวนเซลล์น้อย แต่ยังมีเสถียรภาพต่ำด้วย

4. ที่อุณหภูมิ 30 °C ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้จะมีจำนวนเซลล์มากขึ้น เมื่อใส่ไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมโฟมจากคู่พอลิเมอร์ผสมอื่นๆ โดยพิจารณาสมบัติในการเข้ากันได้ของคู่พอลิเมอร์ผสมนั้นๆ

2. จากผลการทดลองพบว่า การใส่ไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลายมีแนวโน้มที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีเซลล์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตรในลักษณะของไมโครเซลลูลาร์โฟม จึงควรทดลองใส่ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนที่ปริมาณและสภาวะต่างๆ กัน หรืออาจเลือกตัวทำละลายชนิดอื่นมาศึกษาเพิ่มเติม

3. หาวีธีในการเพิ่มความดันให้ได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Daniel Klempher and Kurt C. Frisch, *Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology*, Hanser, Munich Vienna, 1991, 1 – 45, 187 - 222
- [2] B. Krause, M.E. Boerrigter, N.F.A. van der Vegt*, H. Strathmann, M.Wessling, *Novel Open-cellular Polysulfone Morphologies Produced with Trace Concentrations of Solvents as Pore Opener*, *Journal of membrane science* 187 2001, 181-192
- [3] James R. Welty, Charles E. Wicks, Robert E. Wilson and Gregory L. Rorrer *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 4th edition, John Wiley & Sons, Inc, 531 – 534, 706 - 707
- [4] Areerat S., *Solubility, Diffusion Coefficient and Viscosity in Polymer / CO₂ Systems*, Doctoral thesis, Kyoto University, Japan, 2002, 20, 30
- [5] Valentina Padareva, Chul B. Park, Patrick C. Lee, Hani E. Naguib. *Extruded Open-Celled LDPE-Based Foams Using Non-Homogeneous Melt Structure*. Toronto, 2002, 1 - 6
- [6] S. T. Lee, *Sealed Air. Foam Nucleation In Gas-Dispersed Polymeric System*. Japan, 1998.
- [7] J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott, *Chemical Engineering Thermodynamics*, 6th Edition. McGraw-Hill, 2001, 665
- [8] S. Marais ^{a,*}, E. Bureau ^b, F. Gouanvé ^a, E. Ben Salem ^a, Y. Hirata ^a, A. Andrio ^c, C. Cabot ^b, H. Atmani ^d, *Transport of water and gases through EVA/PVC blend Films — permeation and DSC investigations*, *Polymer Testing*, 2003, 10
- [9] บรรณเลข ศรนิล , *เทคโนโลยีพลาสติก (ฉบับปรับปรุง) พิมพ์ครั้งที่ 15, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น) , 2546, 25, 39, 51*
- [10] เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร, *Properties of Polymer*, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ม.ป.ท., ม.ป.ป., 37
- [11] กลุ่มบริษัทอินโนเวชั่น, *Inspiration of Technology, The 20th Anniversary of Innovation Group*, ม.ป.ท., ม.ป.ป.
- [12] กัญจนา ตระกูลคุ. *เทคโนโลยีโพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : เอ็กซ์เพรส มีเดีย. 2533, 82, 86.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ชลธิชา นุ่มหอม. โพลีเมอร์. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538, 194 - 195



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์

ตัวอย่างการคำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์หรือเวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองแพร่เข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์จนอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 304 เคลวิน, ความดัน 7.34 เมกกะพาสคาล, น้ำหนักและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ก่อนโฟมเท่ากับ 1.83 กรัม และ 0.956 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ

สมมติฐาน : มีการถ่ายโอนมวลเพียงทิศทางเดียวคือตามแนวแกน y ดังรูปที่ ก-1 เนื่องจากความยาวของพอลิเมอร์ตามแนวแกน x และ z ยาวกว่าแกน y มากการถ่ายโอนมวลจึงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน y และเป็นการถ่ายโอนมวลภายใต้สภาวะไม่คงที่

รูปที่ ก-1 แสดงทิศทางการถ่ายโอนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านพอลิเมอร์

จากสมการที่ (2.19) เมื่อแทนค่าสภาวะที่ใช้ในการเตรียมโฟม จะได้ว่า

$$\tilde{P} = \frac{P}{P^*} = \frac{7.34}{3619.1} = 0.0199 \quad (-)$$

$$\tilde{T} = \frac{T}{T^*} = \frac{304}{341.2} = 0.890 \quad (-)$$

$$r = \frac{\bar{M}_w P^*}{RT^* \rho^*} = \frac{(44)(369.1)}{(8.314)(341.2)(1.253)} = 4.57 \quad (-)$$

แทนค่า \tilde{P} , \tilde{T} และ r ที่ได้ลงในสมการ (2.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\tilde{\rho}^2 + \tilde{P} + \tilde{T} \left[\ln(1 - \tilde{\rho}) + \left(1 - \frac{1}{r}\right) \tilde{\rho} \right] &= 0 \\ \tilde{\rho}^2 + 0.0199 + 0.890 \left[\ln(1 - \tilde{\rho}) + \left(1 - \frac{1}{4.57}\right) \tilde{\rho} \right] &= 0\end{aligned}\quad (2.18)$$

ใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial & Error) จะได้

$$\tilde{\rho} = 0.5069$$

จากสมการที่ (2.19) จะได้ว่า

$$\rho = \tilde{\rho} \rho^* = 0.5069 (1.253) \text{ กรัม CO}_2/\text{ชม.}^3$$

แทนค่า ρ ที่ได้ในสมการที่ (2.20)

$$c_{As} = \frac{\rho V}{W} = \frac{(0.6351)(4140)}{1.837} = 1436.78 \text{ กรัม CO}_2/\text{กรัมพอลิเมอร์}$$

จากสมการ (2.21) เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านเอทิลีนไวน์ลอะซิเตต 28% จากตารางที่ 2.2 ในหน่วย กรัม CO₂/กรัมพอลิเมอร์-เมกกะพาสคาล จะได้ว่า

$$c_A = SP = (0.0270)(7.34) = 0.1982 \text{ กรัม CO}_2/\text{กรัมพอลิเมอร์}$$

แทนค่า c_A , c_{As} ที่คำนวณได้ และค่า $c_{Ao} = 0$ (เนื่องจากที่เวลาเริ่มต้นยังไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) เพื่อหาค่า Y ตามตารางที่ 2.1

$$Y = \frac{c_{As} - c_A}{c_{As} - c_{Ao}} = \frac{1436.78 - 0.1035}{1436.78 - 0} = 0.9999$$

อ่านความสัมพันธ์จากรูปที่ 2.5 เมื่อเลือกใช้ค่า $m = 2$ และ $n = 1$ จะได้ให้ค่า X ประมาณ 0.04 และสามารถหาเวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองแพร่เข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์จน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึมตัวได้จากความสัมพันธ์ในตารางที่ 2.1 โดยแทนค่าความสามารถในการแพร่ของมวล ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเอทิลีนไวโนลอะซิเตทจากตารางที่ 2.2

$$X = \frac{D_{AB}t}{x_1^2}$$

$$0.04 = \frac{39.1 \times 10^{-8} \times t}{0.3^2}$$

$$t = 2.56 \text{ ชม.}$$

∴ เวลา 3 ชม. เพียงพอที่จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมตัวในเนื้อพอลิเมอร์

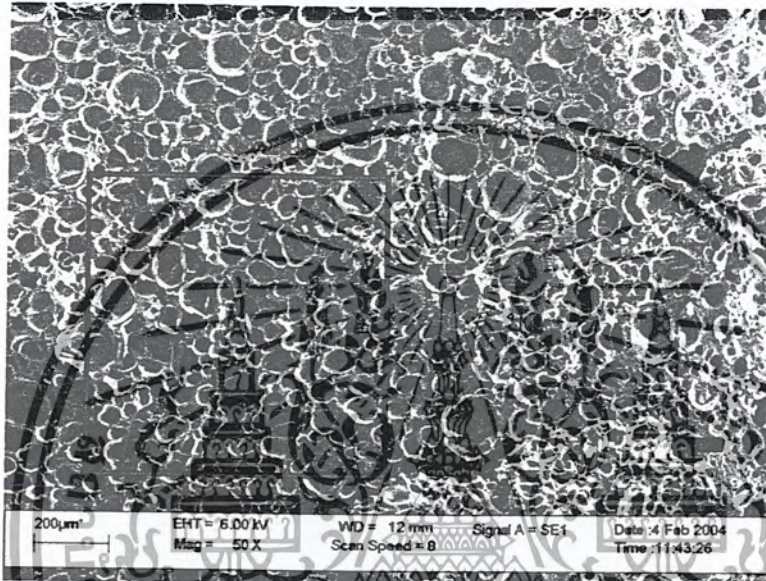


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. การคำนวณจำนวนเซลล์

ตัวอย่างการคำนวณจำนวนเซลล์รูปที่ 4.3 (ก)

กำหนดพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ ข-1 แล้วทำการนับจำนวนเซลล์ในพื้นที่ดังกล่าว



รูปที่ ข-1 การกำหนดพื้นที่เพื่อนับจำนวนเซลล์

แทนค่า $\frac{\rho_p}{\rho_f}$ จากภาคผนวก ค. ลงในสมการที่ (2.22)

$$N = \left(\frac{N_b}{l^2} \right)^{3/2} 10^3 \frac{\rho_p}{\rho_f}$$

$$N = \left(\frac{200}{0.75^2} \right)^{3/2} \times 10^3 \times \frac{0.956}{0.454}$$

$$N = 14,117,677 \text{ เซลล์/ซม.}^3$$

หรือประมาณ 14 ล้านเซลล์/ซม.³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ขนาดของเซลล์เฉลี่ยเมื่อใช้ปริมาณไดคิมิวเปอร์ออกไซด์
 ยางธรรมชาติและอุณหภูมิของการโฟมต่างๆ

ตารางที่ ค-1 ขนาดของเซลล์เฉลี่ยเมื่อใช้ไดคิมิวเปอร์ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ (%)	ขนาดของเซลล์เฉลี่ย (ไมครอน)
0	170
1	47
3.5	83
7	0

ตารางที่ ค-2 ขนาดของเซลล์เฉลี่ยเมื่อใช้ยางธรรมชาติในปริมาณต่างๆ

ปริมาณยางธรรมชาติ (phr)	ขนาดของเซลล์เฉลี่ย (ไมครอน)
10	47
20	50
30	0

ตารางที่ ค-3 ขนาดของเซลล์เฉลี่ยที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิของการโฟม (°C)	ขนาดของเซลล์เฉลี่ย (ไมครอน)
30	125
50	100
60	200
65	175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ความหนาแน่นของโฟมเมื่อใช้ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ ออกไซด์ ยางธรรมชาติและอุณหภูมิของการโฟมต่างๆ

ตารางที่ ง-1 แสดงความหนาแน่นของโฟมเมื่อใช้ไดคิวมิวเปอร์ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (%)	ความหนาแน่นของโฟม (กรัม/ซม. ³)
0	0.283
1	0.239
3.5	0.736
7	0.940

ตารางที่ ง-2 แสดงความหนาแน่นของโฟมเมื่อใช้ยางธรรมชาติในปริมาณต่างๆ

ปริมาณยางธรรมชาติ (%)	ความหนาแน่นของโฟม (กรัม/ซม. ³)
10	0.454
20	0.586
30	0.955

ตารางที่ ง-3 แสดงความหนาแน่นของโฟมที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิของการโฟม (°ซ)	ความหนาแน่นของโฟม (กรัม/ซม. ³)
30	0.312
50	0.151
60	0.175
65	0.281

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ข้อมูลความหนาแน่น และอัตราการขยายตัว
ของพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังการโฟม

ตารางที่ ค-1 แสดงความหนาแน่นและอัตราการขยายตัวของโฟมที่สภาวะและอัตราส่วน
พอลิเมอร์ผสมต่างๆ

ปริมาณ EVA (phr)	ปริมาณ NR (phr)	ปริมาณ DCP (phr)	สภาวะที่ใช้เตรียมโฟม		ความหนาแน่น (g/cm ³)		อัตรา การขยายตัว
			อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ก่อนโฟม	หลังโฟม	
90	10	1	52	6.07	0.956	0.239	4.000
80	20	1			0.946	0.223	4.242
70	30	1			0.955	0.438	2.180
90	10	1	54	5.18	0.956	0.241	1.143
		3.5			0.956	0.736	1.299
		7			0.955	0.940	1.016
80	20	1			0.946	0.820	1.198
		3.5			0.956	0.710	1.346
70	30	7			0.974	0.903	1.079
		1	0.955	0.847	1.128		
70	30	3.5	0.96	0.780	1.231		
		7	0.944	0.896	1.054		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ EVA (phr)	ปริมาณ NR (phr)	ปริมาณ DCP (phr)	สภาวะที่ใช้เตรียมโฟม		ความหนาแน่น (g/cm ³)		อัตรา การขยายตัว
			อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ก่อนโฟม	หลังโฟม	
90	10	1	42	5.72	0.956	0.293	3.263
		3.5			0.956	0.687	1.392
		7			0.955	0.819	1.166
80	20	1	42	5.72	0.946	0.835	1.133
		3.5			0.956	0.715	1.337
		7			0.974	0.859	1.134
70	30	1	42	5.72	0.955	0.855	1.117
		3.5			0.960	0.779	1.232
		7			0.944	0.869	1.086
90	10	1	43	4.91	0.956	0.288	3.319
		3.5			0.956	0.776	1.232
		7			0.955	0.858	1.113
80	20	1	43	4.91	0.946	0.864	1.095
		3.5			0.956	0.782	1.223
		7			0.974	0.893	1.091
70	30	1	43	4.91	0.955	0.864	1.105
		3.5			0.96	0.835	1.150
		7			0.944	0.897	1.052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ EVA (phr)	ปริมาณ NR (phr)	ปริมาณ DCP (phr)	สภาวะที่ใช้เตรียมโฟม		ความหนาแน่น (g/cm ³)		อัตรา การขยายตัว
			อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ก่อนโฟม	หลังโฟม	
90	10	1	46	9.05	0.956	0.277	3.451
		3.5			0.956	0.732	1.306
		7			0.955	0.875	1.091
80	20	1	46	9.05	0.946	0.342	2.766
		3.5			0.956	0.759	1.260
		7			0.974	0.816	1.194
70	30	1	46	9.05	0.955	0.836	1.142
		3.5			0.96	0.84	1.143
		7			0.944	0.884	1.068
90	10	1	46	9.05	0.956	0.545	1.754
		3.5			0.956	0.791	1.209
80	20	1	40	8.45	0.946	0.586	1.614
		3.5			0.956	0.846	1.130
70	30	1	46	9.05	0.955	0.945	1.011
		3.5			0.96	0.827	1.161
90	10	1	31	7.38	0.956	0.407	2.349
80	20	1			0.946	0.718	1.318
90	10*	1			0.953	0.602	1.583
90	10**	1	33	8.32	0.956	0.331	2.888
80	20**	1			0.946	0.677	1.397
70	30**	1			0.955	0.946	1.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ EVA (phr)	ปริมาณ NR (phr)	ปริมาณ DCP (phr)	สภาวะที่ใช้เตรียมโฟม		ความหนาแน่น (g/cm ³)		อัตรา การขยายตัว
			อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ก่อนโฟม	หลังโฟม	
90	10	1			0.956	0.312	3.064
90	10*	1	31	7.34	0.953	0.531	1.795
80	20	1			0.946	0.708	1.336
70	30	1			0.955	0.996	0.959
90	10	1			0.956	0.175	5.463
90	10*	1	60	7.01	0.953	0.1	9.530
80	20	1			0.946	0.289	3.273
70	30	1			0.955	0.149	6.409
90		1			0.956	0.281	3.402
90	10	3.5			0.956	0.604	1.583
90		7	65	7.04	0.955	0.79	1.209
90	10*	1			0.953	0.259	3.680
80	20	1			0.946	0.276	3.428
70	30	1			0.955	0.286	3.339
90	10	1			0.956	0.151	6.331
90	10	3.5			0.956	0.411	2.326
90	10	7	49	6.83	0.955	0.578	1.652
90	10*	1			0.953	0.144	6.618
80	20	1			0.946	0.208	4.548
70	30	1			0.955	0.216	4.421

หมายเหตุ * หมายถึง ใส่ ไซโคลเฮกเซน 1 phr ในขั้นตอนการผสม

หมายเหตุ ** หมายถึง ใส่ ไซโคลเฮกเซน 1 phr ในขั้นตอนการเตรียมโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง

FC Series Reaction Vessel

HP 1/2 RPM:1725

Pressure Products Industries , Inc

Reliability Under Pressure.

MAWP (BODY) 4800 PSI @ 1000°F.

HYDRO (BODY) 7750 PSI @ Amb. Temperature.

MAWP (JACKET) N/A

YEAR BUILT 1995

2. เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

FUSE FREE

BREAKER

TYPE S-50S

AC 600 V

AMB. TEMP 40 °C

โรงงานชัยเจริญการช่าง

ชนิดเครื่อง 10×20×20

NO. 27-1-92

3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy)

LEO 1455VP

LEO ELECTRON MICROSCOPY LTD.

Clifton Road Cambridge CDI 3QH England.

4. เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน (Hot compression machine)

Labtech Engineering.

อุณหภูมิใช้งาน 0-400 °C

AC 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชุดรีฟลักซ์

Electromantle

Cat No. EM0500/C MK5

Volts 230 V 50/60 Hz

Watts 200 W Fuse F1.25 A

6. เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter)

MD-200S

12 V, 100 mA

MFD BY A & D Co., Ltd.

7. เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์

DRAGON 204 METTLER TOLEDO

NO. 200500396

ITEM 12106615

Power Requirements 8-14,5 V ~ 50/60 Hz

6 VA of 9.5-20 V, 6 W

8. ตู้อบสารเคมี MEMMERT ตั้งเวลาได้ 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30-200 °C

9. เตาหิมัดแบบส้อมผัด 250 °C รุ่น HW-21T

ตัววัดอุณหภูมิแบบมือถือ รุ่น DP-71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้