

การศึกษาผลของอัตราส่วนยางเอทิลีนพรอพิลีน  
ต่อคุณสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61737  
วัน,เดือน,ปี..... 21 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

Study on Effect of EPDM blend Ratios on Properties  
of Polymer Blends based Foams



A Report Submitted in Partial Fulfillment of The Requirments  
For The Degree of Bachelor of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

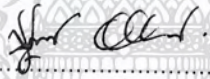
ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษามูลของอัตราส่วนยางเอทิลีนพรอพิลีน  
ต่อคุณสมบัติของโพลิเมอร์ผสม

ชื่อนักศึกษา นางสาวนรินทร์ หาททรัพย์ รหัส 45015698  
นายนิกร เกิดทองกลาง รหัส 45015700  
นายสุกิจ เกิดทองกลาง รหัส 45015712

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

ประธานกรรมการ



(ดร.อนันท์ นัมคณิสสรณ์)

กรรมการ



(อาจารย์รินฤดี เบญจางคประเสริฐ)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาผลของอัตราส่วนยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อคุณสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม	
โดย	นางสาวนรินทร์	หาทรัพย์
	นายนิกร	เกิดทองกลาง
	นายสุกิจ	เกิดทองกลาง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการทดลองศึกษาอัตราส่วนยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-Propylene-Diene-Monomer:EPDM) ต่อคุณสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene-Vinyl-Acetate:EVA) และยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน (Polyethylene-Octene:PE-Octene) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยอาศัยวิธีการเกิดโฟมทางเคมี (Chemical foaming method) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide:AZ) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate:NaHCO<sub>3</sub>) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี โดยสารช่วยให้เกิดฟองจะสลายตัวให้ก๊าซที่อุณหภูมิสูง ทำให้เมื่อฟองก๊าซถูกกักอยู่ในยางทำให้ได้โครงสร้างเป็นโฟมคล้ายฟองน้ำ

ในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม ขั้นตอนของการผสมพอลิเมอร์จะใช้เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) อุณหภูมิประมาณ 104 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที นำพอลิเมอร์ผสมไปอัดขึ้นรูป โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน (Hot Compression Molding Machine) ที่อุณหภูมิคงที่ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 13.20 เมกกะปาสคาล และใช้เวลาในการอบ 15 นาที จากนั้นนำโฟมพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลสมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยาของโฟม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope:SEM)

จากผลการทดลองโดยใช้ เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่ดีมีความหนาแน่นของเซลล์ระดับไมโครเมตร และมีความละเอียดของเนื้อโฟมที่ดี คือ อัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์ประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40-50 ไมครอน และมีจำนวนเซลล์สูงสุดประมาณ  $3 \times 10^{10}$  เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ประมาณ 0.24 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ในขณะที่ใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี พบว่า ลัทธิฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้ ลักษณะของผลิตภัณฑ์ โฟมมีฟองก๊าซแทรกอยู่น้อย ซึ่งสังเกตได้ว่าลักษณะส่วนใหญ่ยังคงสภาพเป็นเนื้อพอลิเมอร์ผสม การจัดเรียงตัวของเซลล์ไม่สม่ำเสมอ ขนาดของเซลล์มีขนาดใหญ่ โดยเซลล์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 70-370 ไมครอน และมีจำนวนเซลล์สูงสุดประมาณ  $10^7$ - $10^8$  เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของโฟมที่ได้ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ก่อนการผสม จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีเสถียรภาพไม่ดี แสดงให้เห็นว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี สำหรับพอลิเมอร์ผสมชนิด EPDM, EVA และ PE-Octene



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Study on Effect of EPDM blend Ratios on Properties  
of Polymer Blends based Foams

By Miss Narin Hasap  
Mr.Nikon Kerdtonghlang  
Mr.Sukit Kerdtonghlang

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 Ladkraban

### Abstract

This senior project presents a study on effects of Ethylene-propylene (EPDM) blend ratios on properties of polymer blends based foams between Ethylene-Propylene-Diene-Monomer (EPDM)/Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) and EPDM/Polyethylene-Octene (PE-Octene) by chemical foaming method using azodicarbonamide (AZ) and sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ) as a blowing agent and decompose to give  $\text{N}_2$  and  $\text{CO}_2$  at high temperature, respectively.

In this experiment, the ratio of blending between EPDM/EVA and EPDM/PE-Octene was varied. The mixing of blended polymer and all additives were mixed using a two-roll mill at a temperature of about 104 degree celsius for about 15 min. The mixed compounds were then cured using a hydraulic compression molding machine at 150 degree celsius with a pressure of about 13.20 MPa for 15 min. The mechanical, physical and morphological properties were characterized.

The experimental result in which azodicarbonamide (AZ) was used as a blowing agent revealed that the foam with fine structure could be obtained by using the ratio of EPDM/PE-Octene at 70 : 30, the bubble density was estimated to be about  $3.0 \times 10^{10}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cell/cm<sup>3</sup>, while the average cell diameter was about 40-50 μm and average density of foam about 0.24 g/cm<sup>3</sup>

The experimental result in which Sodium bicarbonate was used as a blowing agent revealed that the foam with large bubble size and broad size distribution could be obtained, while the average cell diameter was about 70-370 μm and the bubble density was estimated to be about 10<sup>7</sup>-10<sup>8</sup> cells/cm<sup>3</sup>.

Based on the characteristic of foam structure, Sodium bicarbonate may not be a suitable blowing agent for chemical foaming of EPDM , EVA and PE-Octene blending polymer.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน

ขอขอบคุณ คุณพงศ์ประกาศ ปิยมโนชา และคุณชาญณรงค์ ยิ้มแก้ว ที่คอยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณบริษัท เอส ซี ฟุตแวร์แมททีเรียล จำกัด (FC.foot wear materiel,Ltd) ที่เอื้อเฟื้อและสนับสนุนอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แด่บิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่คณะผู้จัดทำไม่ได้กล่าวนาม หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ คณะผู้จัดทำขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวนรินทร์ หาททรัพย์

นายนิกร เกิดทองกลาง

นายสุกิจ เกิดทองกลาง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ฌ
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง	ท
สัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 โฟม	4
2.2 กลไกในการเกิดโฟม	5
2.3 สมบัติต่างๆของโฟม	6
2.4 วัตถุดิบและสารเติมแต่งสำหรับการผลิตโฟม	9
2.5 คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม	11
บทที่ 3 การดำเนินโครงการ	14
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	14
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	14
3.3 วิธีการทดลอง	15
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	23
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของโคม.....	4
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโคมกับสารช่วย ให้เกิดฟอง.....	13
รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องผสมแบบอัตโนมัติสองลูกกลิ้ง.....	16
รูปที่ 3.2 แสดงการขึ้นรูปโคมพอลิเมอร์ผสม.....	17
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์.....	18
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	19
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	21
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสัญญาณวิทยาของโคม.....	22
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิเมอร์ โดยมี อัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน ในปริมาณต่างๆ โดยใช้เอโซไดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	24
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเซลล์กับปริมาณยาง เอทิลีนพรอพิลีนต่อพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน โดยใช้เอโซไดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	25
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน ต่อพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน โดยใช้เอโซไดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	25
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิเมอร์โดย มีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน เท่ากับ 70:30 phr โดยใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	26
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเซลล์กับปริมาณโซเดียม- ไบคาร์บอเนต โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับ พอลิเอทิลีน-อ็อกทีน เท่ากับ 70:30 phr.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับปริมาณไซโตเต็ม- ไบคาร์บอเนต โดยมีอัตราส่วนผลสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับ พอลิเอทิลีน-อ็อกทีน เท่ากับ 70:30 phr .....	27
รูปที่ 4.7	ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิ- เมอร์ โดยมีอัตราส่วนผลสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 70:30 phr โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	29
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเซลล์กับปริมาณ ยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตท โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	30
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน ต่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตท โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	30
รูปที่ 4.10	ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิเมอร์ โดยมีอัตราส่วนผลสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 70:30 phr โดยใช้ไซโตเต็มไบคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี .....	31
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเซลล์กับปริมาณ ไซโตเต็มไบคาร์บอเนต โดยมีอัตราส่วนผลสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีน กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 70:30 phr .....	32
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับปริมาณไซโตเต็มไบคาร์บอเนต (NaHCO <sub>3</sub> ) .....	32
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation) กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPDM) โดยใช้เอโซ- ไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	33
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPDM) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength) กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPDM) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง.....	34
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (Density)กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPDM) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	35
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัว (Expansion) กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPDM) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	36
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวของโฟม (%Shrinkage) กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPDM) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	36
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (Density) กับปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ).....	37
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัว (Expansion) กับปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ).....	38

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนต่างๆของสาร โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	15
ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนต่างๆของสาร โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี.....	15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

$A$	: พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบก่อนถูกดึงยึด (ตารางมิลลิเมตร)
$d$	: เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ (มิลลิเมตร)
$\%EB$	: เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด
$F$	: แรงที่ใช้ดึง (นิวตัน)
$l$	: ความยาวของชิ้นงานทดสอบหลังได้รับแรงดึง (มิลลิเมตร)
$l_0$	: ความยาวของชิ้นงานทดสอบที่ยังไม่ได้รับแรงดึงมีค่าเท่ากับ Gauge Length (มิลลิเมตร)
$\ell$	: ความยาวของด้านที่กำหนด (มิลลิเมตร)
$n$	: จำนวนเซลล์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรของโฟม
$nb$	: จำนวนเซลล์ในพื้นที่ $\ell * \ell$
$V$	: ปริมาตรของโฟมพอลิเมอร์ผสมหลังทำการอบ
$V_0$	: ปริมาตรของโฟมพอลิเมอร์ผสมก่อนทำการอบ
$x$	: ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (เมตร)
$\delta$	: ความหนาของผนังเซลล์เฉลี่ย (มิลลิเมตร)
$\sigma$	: ค่าความแข็งแรงดึง (เมกะปาสคาล หรือ นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
$\rho$	: ความหนาแน่นของพลาสติกที่ผ่านการโฟมแล้ว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\rho_f$	: ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$\rho_r$	: ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$\varphi$	: อัตราการขยายตัว (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนมีหลากหลายรูปแบบ- เพราะโพลีเอทิลีนมีข้อดีคือน้ำหนักเบา ลอยตัวได้ดี มีประสิทธิภาพเป็นฉนวนกันเสียง ฉนวนกันความร้อน และใช้ดูดซับแรงกระแทกได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้มีการนำพลาสติกโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene-vinyl acetate,EVA) ที่มีคุณสมบัติด้านความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นได้ดีมา ประยุกต์ใช้งานสำหรับการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์กีฬา เพื่อใช้ดูดซับแรงกระแทก ลดการบาดเจ็บ เนื่องจากการกระแทก เช่นพื้นรองเท้ากีฬา เป็นต้น นอกจากนี้ชิ้นส่วนอุปกรณ์กีฬาทางน้ำหลาย ชนิดที่ต้องการความเบา ลอยตัวในน้ำได้ดี ก็สามารถผลิตจากโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท แต่ยังมี ข้อจำกัดในการใช้งาน โพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ในงานที่ต้องการสมบัติความยืดหยุ่นคืนตัวสูง (Resilience) เช่นโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ซึ่งต้องอาศัยความยืดหยุ่นในการลดแรงดันใต้น้ำต่อ ผิวหนังของนักประดาน้ำ ทำให้ผู้ผลิตต้องนำเอาโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ผลิตจากยางสังเคราะห์ชนิดที่มีส่วนผสม ของคลอรีน คือยางคลอรีนเตต (Chlorinated rubber) หรือมีชื่อเรียกทางการค้าทั่วไปว่า ยาง นีโอพรีน (Neoprene rubber) ซึ่งในอนาคตอันใกล้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของสารคลอรีนจะถูก จำกัดหรือกีดกันในการนำไปใช้งานเนื่องจากเป็นสารตกค้างที่เป็นพิษ งานวิจัยสำหรับการผลิต พลาสติกโพลีเอทิลีนในปัจจุบันจึงให้ความสำคัญกับการปรับปรุงคุณภาพโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท โดย การผสมยางสังเคราะห์ เอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-Propylene Diene Monomer,EPDM) เพื่อ ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆเช่น ความเหนียว ความยืดหยุ่น ให้ดีขึ้น และทำให้ต้นทุนการผลิตถูก ลง รวมทั้งความเข้าใจปัจจัยพื้นฐานที่สัมพันธ์กับขั้นตอนการเกิดโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และคุณสมบัติทางกายภาพ ของผลิตภัณฑ์โพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ซึ่งจะก่อให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์โพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตททำได้อย่าง ต่อเนื่อง และช่วยลดปริมาณสารคลอรีนให้กับผลิตภัณฑ์โพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตทในอนาคตอีกด้วยโครงการนี้จึงมุ่งเน้น ศึกษาผลของการผสมยางเอทิลีนพรอพิลีนในพลาสติกโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่ผลิตจากโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตทระหว่าง ยาง เอทิลีนพรอพิลีน (EPDM)ต่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA) และเอทิลีนพรอพิลีน (EPDM) อนุพันธ์ ของโพลีเอทิลีนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมออกทึนมอนอเมอร์(Polyethylene-Octene,PE-Octene) โดยมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ด้วยวิธีใช้สารช่วยให้เกิด ฟองทางเคมีเพื่อใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์โพลีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษามลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีน เอทิลีนไวนิลอะซิเตท และพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน

1.2.2 ศึกษาผลของสารให้ฟอง (Blowing agent) ระหว่างเอโซไดคาร์บอไมด์ (Azodicarbonamide:AZ) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate:NaHCO<sub>3</sub>) ที่มีต่อโฟมพอลิเมอร์ผสม

1.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติสัณฐานวิทยา (Morphology)เกี่ยวกับการกระจายตัวและขนาดของเซลล์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน

1.3.2 ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของสารให้ฟอง (Blowing agent) ระหว่างเอโซไดคาร์บอไมด์ (AZ) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>)

1.3.3 เปรียบเทียบสมบัติสัณฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ

## 1.4 วิธีการดำเนินโครงการ

1.4.1 ศึกษาสมบัติพื้นฐานของยางเอทิลีนพรอพิลีน เอทิลีนไวนิลอะซิเตท พอลิเอทิลีน-อ็อกทีน และสารเติมแต่งตลอดจนกลไกในการเกิดโฟมจากทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ

1.4.2 เตรียมสารเคมีตามอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง

1.4.3 ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้ศึกษา

1.4.4 จากผลการทดลองทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดโฟมที่มีเสถียรภาพไม่ดี

1.4.5 ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์และสารเติมแต่งเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

1.4.6 สรุปผลการทดลอง และเสนอแนวทางในการเตรียมโฟมโดยใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี เพื่อให้ได้โฟมที่มีเสถียรภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถผลิตวัสดุทดแทนยางนีโอพรีน ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิต

1.5.2 เรียนรู้วิธีการทำงานเป็นกลุ่มและแก้ปัญหาอย่างเป็นขั้นตอน ตลอดจนฝึกทักษะในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

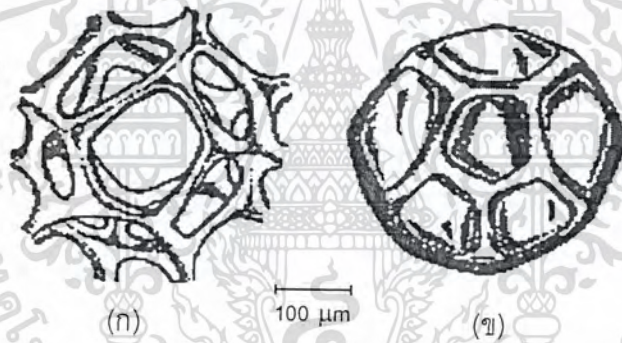


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 โฟม (Foam)

เซลล์ลาร์พลาสติกหรือพลาสติกโฟม หมายถึงพลาสติกที่ขยายตัวหรือพองฟูคล้ายฟองน้ำ โดยทั่วไป พลาสติกโฟมจะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัฏภาคได้แก่ วัฏภาคที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็งและวัฏภาคก๊าซ ซึ่งเกิดขึ้นจากสารที่เรียกว่า สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing agent) สำหรับส่วนที่เป็นวัฏภาคของแข็งนั้นอาจประกอบด้วยพอลิเมอร์หนึ่งชนิดหรือมากกว่า เช่นในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน โฟมอาจมีลักษณะอ่อนนุ่มหรือแข็งก็ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature :  $T_g$ ) ว่าอยู่ในช่วงที่ต่ำหรือสูงกว่า อุณหภูมิห้อง



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

การแบ่งประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) ดังรูปที่ 2.1 (ข) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ไม่ต่อถึงกัน เหมาะสำหรับการเป็นฉนวนกันความร้อน และโดยทั่วไปจะมีลักษณะแข็ง ในขณะที่โฟมแบบเซลล์เปิด ดังรูป 2.1 (ก) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อถึงกันจนทำให้ก๊าซหรืออากาศหมุนเวียนถึงกันได้ เหมาะสำหรับการทำเบาะที่นั่งในรถยนต์ ฉนวนกันเสียง เฟอร์นิเจอร์ และอุตสาหกรรมหลักที่ใช้โฟมยืดหยุ่น เช่น อุปกรณ์กีฬา, ของเล่น, บรรจุกัมภ์ รองเท้า และวัสดุกันกระแทกต่างๆ ถ้าโฟมประกอบด้วยเซลล์ปิดและเปิดอยู่ด้วยกันเรียกว่าเซลล์ผสม โครงสร้างของเซลล์นี้จะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีของการทำให้เกิดฟองโฟม และชนิดของสารช่วยให้เกิดฟองโฟมพลาสติกที่ผลิตได้จะมีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก ในช่วงประมาณ 1.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ถึงมากกว่า 96 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร การประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโฟมเหล่านี้จะพิจารณาจากช่วงความหนาแน่นของโฟมที่ผลิต เนื่องจากสมบัติเชิงกลจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของโฟม ดังนั้นโฟมแบบแข็งเหมาะสำหรับการรับแรงจึงต้องมีความหนาแน่นสูง มีการเสริมแรงโดยไฟเบอร์หรือจะต้องมีทั้งสองอย่างใน ขณะที่โฟมมีความหนาแน่นต่ำโดยทั่วไปเหมาะสำหรับทำฉนวนกันความร้อน โฟมที่ยืดหยุ่นซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ 30 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) จะใช้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ เบาะที่นั่งในรถยนต์ ที่มีความหนาแน่นสูงกว่านี้จะประยุกต์ใช้สำหรับแผ่นรองของพรม (Carpet backing) และตัวดูดซับพลังงาน (Energy-absorbing)

### 2.1.1 การผลิตโฟม

#### ขั้นตอนทั่วไป สำหรับการเกิดพอลิเมอร์โฟม

1. การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารช่วยให้เกิดฟอง จะทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือทั้งสองชนิด โดยอาศัยความร้อนจากภายนอกหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน
2. กลไกการก่อให้เกิดฟองก๊าซในระบบของพอลิเมอร์ (พอลิเมอร์หลอมเหลว สารละลายพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์แขวนลอย) โดยการเร่งของปฏิกิริยาหรือคายความร้อน ดังนั้น จะทำให้ฟองก๊าซเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์
3. การระเหยของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น สารฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbons) หรือเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) ที่อยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการคายความร้อนหรือความร้อนจากภายนอกระบบ
4. การระเหย ซึ่งเป็นผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้เกิดเป็นฟองก๊าซ เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำ จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในระบบ
5. การขยายตัวของก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ จะขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของความดันในระบบ

6. การรวมตัวกันของฟองก๊าซ ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์

การผลิตโฟมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีทางกายภาพ คือ ใช้ก๊าซอัดหรือผสมสารเคมีทำให้เกิดก๊าซแทรกในเนื้อพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน ก๊าซซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เนื้อพอลิเมอร์พองขึ้นเป็นโฟม ตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีนโฟม (Expandable polystyrene)

2. วิธีทางเคมี คือ ใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีสองชนิดทำให้เกิดโฟม วัตถุประสงค์ที่ใช้มักประกอบด้วยของเหลวสองชนิดหรือมากกว่า โดยชนิดหนึ่งเป็นพอลิเมอร์เหลวอีกชนิดหนึ่งเป็น
- เอ็กสแตนด์เลอร์เป็นเอ็กสแตนด์เลอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่ใช่น้ำมันที่ใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมของวัสดุตกผลึกหรือตัวทำให้แข็ง และสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เหลว เพื่อให้เกิดก๊าซ เช่น พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam)

## 2.2 กลไกในการเกิดโฟม

การเกิดโฟม เป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางฟิสิกส์และทางด้านเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นที่แพร่เข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซ (Bubble nucleation) และการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโฟม

การเกิดโฟมมีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของ พอลิเมอร์จะมีพลังงานเพียงพอจะเอาชนะแรงดันภายนอกเพื่อขยายขนาดจึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟองฟองออกมา หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic instability) เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้นการเกิดนิวเคลียส ทำให้เกิดกลุ่มฟองก๊าซจำนวนมากภายในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งวิธีการในการทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอสำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธี คือการลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ พอลิเมอร์แบบ เทอร์โมพลาสติก มีการนำความร้อนที่ไม่ดีและจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้วิธีการลดความดันมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ หากพิจารณาเป็นขั้นตอนของการเกิดโฟมแล้ว

กระบวนการเกิดโฟม ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเริ่มเกิดฟองก๊าซ (Bubble Initiation) หรือการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เป็นขั้นตอนที่เริ่มเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กจำนวนมาก กระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์
2. การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เป็นขั้นตอนที่ฟองก๊าซมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าไปในฟองก๊าซ เมื่อได้รับความร้อนหรือความดันของระบบลดลง และผลจากการรวมตัวกันของฟองก๊าซ (Coalescence) ของฟองก๊าซมากกว่า 2 ฟอง
3. การคงสภาพของโฟม (Stabilization) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม ฟองก๊าซในขั้นนี้ จะมีการคงสภาพและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 สมบัติต่างๆของโฟม

ความหนาแน่นของโฟม จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณก๊าซที่เกิดจากสารให้ฟองที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ที่จะทำเป็นโฟม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง กัด ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงดึง สามารถแสดงได้ดังนี้

### 2.3.1 เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้

2.3.1.1 สมบัติความแข็งแรงต่างๆเพิ่มขึ้น

2.3.1.2 ความสามารถในการการดูดกลืนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

2.3.1.3 ความสามารถในการการยืดออก ณ จุดสูงสุดเพิ่มขึ้น

2.3.1.4 ความสามารถในการการถ่ายเทความร้อนลดลง ทำให้มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนดีขึ้น

2.3.1.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง

### 2.3.2 ขนาดของเซลล์ เมื่อขนาดเซลล์ใหญ่ขึ้นจะมีผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.3.2.1 สมบัติความแข็งแรงต่างๆจะลดลง

2.3.2.2 ความสามารถในการการดูดกลืนการกระแทกจะลดลง

2.3.2.3 เกิดการโค้งงอในระหว่างการอัด

2.3.2.4 มีสมบัติการเป็นฉนวนลดลง

2.3.2.5 มีสมบัติการซึมผ่านของน้ำและอากาศเพิ่มขึ้น

### 2.3.3 เมื่อขนาดเซลล์เล็กลงจะมีผลต่อสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.3.3.1 ความแข็งแรงและการยืดออก ณ จุดสูงสุดจะเพิ่มขึ้น

2.3.3.2 มีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนเพิ่มขึ้น

## 2.4 วัสดุดิบสำหรับการผลิตโฟม

### 2.4.1 ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-Propylene Rubber , EDPM)

ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-Propylene Rubber, EPDM) ข้อเสียหลักของยางชนิดนี้ก็คือไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ (เพราะไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล) การทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เปอร์ออกไซด์เท่านั้น ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนายางชนิดใหม่โดยการเติมมอนอเมอร์ชนิดที่สาม คือ ไดอินลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุล ยางจึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถันและเรียกกยางชนิดนี้ว่ายางเอทิลีนพรอพิลีน มีชื่อทางการค้าว่า นอเดลล์ (Norde<sup>l</sup>) ด้วยเหตุนี้ ยางเอทิลีนพรอพิลีน จึงมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซน สารเคมี และสิ่งแวดลอมอื่นๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีความเป็นฉนวนสูง สมบัติที่เด่นอีกประเภทหนึ่ง คือเป็นยางที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดประมาณ 0.854 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบาสามารถผลิตยางได้เป็นปริมาณมาก

#### 2.4.2 เอทิลีนไวนิลอะซิเตท

ยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene-Vinyl Acetate Rubber, EVA) เป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตท เนื่องจากสายโซ่หลักของยางเอทิลีนและไวนิลอะซิเตท เป็นพันธะอิมิตัวโดยสมบูรณ์ ทำให้ยางชนิดนี้ทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ไอโซน และสภาพอากาศได้เป็นอย่างดี ส่วนหมู่ไวนิลอะซิเตทซึ่งมีความเป็นขั้วสูงก็จะทำให้ยางมีความทนทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี อย่างไรก็ตาม ยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตท มีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และเนื่องจากยางมีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ไม่ดี ส่วนใหญ่ยางชนิดนี้จะใช้ในการผลิตปลอกหุ้มสายเคเบิลเฉพาะในกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษทางด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากไอโซน สภาพอากาศ ความร้อน และน้ำมันเท่านั้น เนื่องจากสายโซ่หลักของยางเอทิลีนและไวนิลอะซิเตทเป็นพันธะเดี่ยวหมด ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงไม่สามารถคงรูปได้ด้วยระบบกำมะถัน แต่ยางสามารถคงรูปได้ด้วยระบบเปอร์-ออกไซด์ โดยมีการเติมสารกระตุ้นร่วมเข้าด้วยปรับปรุงระดับของการคงรูปให้สูงขึ้น

#### 2.4.3 พอลิเอทิลีน-อ็อกทีน (Polyethylene-Octene)

ยางพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน (Polyethylene-Octene) มีชื่อทางการค้าว่า เอนเกจ (Engage<sup>®</sup>) สามารถนำไปใช้ทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติกและอุตสาหกรรมยาง โดยส่วนมากจะใช้เป็นตัวปรับปรุงคุณภาพของยาง เช่น ยาง EPDM ยาง EVA เป็นต้น โดยคุณสมบัติเด่นของยางชนิดนี้คือความทนทานต่อไอโซน และออกซิเจน มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี ทนทานต่อสารเคมีและเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนได้เป็นอย่างดี

#### 2.4.4 สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing agent) [ 6 ]

สารช่วยให้เกิดฟองที่ใช้ได้ผลดีจะต้องละลายเข้าสู่เนื้อพอลิเมอร์ที่หลอมเหลว ในปริมาณที่เพียงพอในสภาวะที่ความดันสูงพอเหมาะ แต่อย่างไรก็ตาม ณ อุณหภูมิห้อง จะต้องไม่ละลายเข้าไปในผนังเซลล์ของพอลิเมอร์ที่ขยายตัวมากเกินไป สารช่วยให้เกิดฟองจะต้องผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์อย่างช้าๆและช้ากว่าอากาศ เพราะหากสารช่วยให้เกิดฟองผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์เร็วกว่าอากาศจะเป็นสาเหตุให้โฟมเกิดการหดตัวในช่วงอายุการใช้งาน นอกจากนี้สารช่วยให้เกิดฟองที่ดีจะต้อง

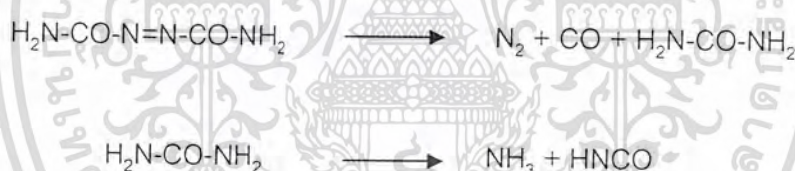
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความเป็นพิษน้อย มีความสามารถในการติดไฟต่ำ มีราคาถูกและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

สารช่วยให้ฟองที่ให้ฟองทางเคมี ทำให้เกิดฟองโดยการเกิดปฏิกิริยาและให้ก๊าซออกมาซึ่งก๊าซจะเข้าแทนที่ในเนื้อของพอลิเมอร์ทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์ สารให้ฟองชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารประกอบอนินทรีย์ ได้แก่ เกลือของสารคาร์บอเนตและสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ สารประกอบเอโซ (AZO compound)

#### 2.4.4.1 เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ)

เอโซไดคาร์โบนาไมด์มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ความหนาแน่น 1.65 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เกิดปฏิกิริยาสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 – 220 องศาเซลเซียส ให้ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ประมาณ 65% คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 30% คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) 3% และแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) 2% จะสามารถให้ก๊าซประมาณ 220 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม สารประกอบเอโซไดคาร์โบนาไมด์ไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี สามารถทำให้เกิดการสลายตัวง่าย ปฏิกิริยาการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ คือ



เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารให้ฟองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายแต่จะเกิดปฏิกิริยาสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำจึงไม่สามารถใช้กับพอลิเมอร์ที่ไม่เสถียรทางความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารช่วยให้เอโซไดคาร์โบนาไมด์สลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลงสารจำพวกนี้เรียกว่า สารกระตุ้นหรือคิกเกอร์ ตัวอย่างเช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

#### 2.4.4.2 โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>)

มีลักษณะเป็นผงสีขาว เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 130-180 องศาเซลเซียส ให้ก๊าซโซเดียมไดคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และน้ำ (H<sub>2</sub>O) จะสามารถให้ก๊าซประมาณ 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม สารประกอบโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) ไม่เป็นพิษไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี สามารถทำให้เกิดการสลายตัวง่าย ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.5 สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent)

สารเชื่อมโยงที่นิยมใช้ คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide , DCP) จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงประมาณ 104 องศาเซลเซียส ใช้ในการเชื่อมโยงสายโซ่ (cross-linking) ของเอทิลีนไวนิลอะซีเตทและเอทิลีนพรอพิลีน โดยการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงผ่านอนุมูลอิสระ (Free radicals) โดยปริมาณสารเชื่อมโยงที่ใช้ขึ้นกับองค์ประกอบของการเชื่อมโยงของโพลีเมอร์ที่ต้องการ

#### 2.4.6 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) อาจเรียกสั้นๆว่า สารกระตุ้น ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงโดยเกิดเป็นสารเชิงซ้อน (Complexes) กับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูงขึ้น เวลาเชื่อมโยงลดลงและยังช่วยปรับปรุงสมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงให้ดีขึ้น สารกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายได้ในยางและช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง

#### 2.4.7 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide , ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นของแข็งสีขาวมีความหนาแน่น 5.6 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย 0.2 ไมโครเมตร การใช้ซิงค์ออกไซด์กับพอลิเมอร์ มักใช้เพื่อเป็นสารดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นยูวีเพิ่มเติมเพื่อปกป้องผิวจากความร้อน เพิ่มความแข็งแรงและช่วยป้องกันการทำลายจากจุลินทรีย์ และ ซิงค์ออกไซด์ ยังทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นหรือคิกเกอร์ (Activator or Kicker) ที่เติมลงไปเพื่อลดอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition temperature) ของสารให้ฟอง

#### 2.4.8 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Fillers) ที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมที่ไม่มีสีด้า โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดของอนุภาคเล็กๆและมีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เป็นสารกันติดและสารทำให้ลื่น (release agent) เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat buildup) เพิ่มความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยางและยังช่วยลดต้นทุน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารก่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวเคลียส (Nucleating agent) สำหรับการเกิดฟองแม้การใส่ซิลิกาปริมาณมากจะช่วยลดต้นทุน แต่จะทำให้ความหนาแน่นและความแข็งของโฟมสูงขึ้น ส่วนความยืดหยุ่นคืนตัว (Resilience) จะลดลง

#### 2.4.9 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำหรือคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) จัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดและมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือเขม่าดำสามารถช่วยเสริมแรงให้ยางอย่างมากโดยอาจทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

### 2.5 คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม

#### 2.5.1 ขนาดและจำนวนเซลล์

โดยทั่วไป โฟมพลาสติกที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอและมีคุณสมบัติเท่ากันตลอดปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะประกอบด้วย 1,000 ถึง 10,000 เซลล์ โดยจะมีความแตกต่างของขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12% ถึง 25% ขนาดของเซลล์และการกระจายขนาดของเซลล์ไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการขึ้นรูปโฟมด้วย จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรโฟม ( $n$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญและมีการใช้บ่อยครั้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส หรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมในส่วนของตัวอย่างนั้น ตัวแปร  $n$  เป็นฟังก์ชันกับขนาดของเซลล์และความหนาแน่นของโฟมพลาสติกและจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร โฟมมีค่าดังสมการที่ (1) [2]

$$n = \left( \frac{n_b}{\ell^2} \right)^{3/2} \times 10^3 \times \varphi \quad (1)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนเซลล์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรของโฟม,  $n_b$  คือ จำนวนเซลล์ในพื้นที่  $\ell * \ell$  ,  $\ell$  คือ ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร,  $\varphi$  คือ อัตราการขยายตัว (Expansion ratio) ซึ่งนิยามได้ดังสมการที่ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (2)$$

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของโพลีพอลิเมอร์ผสม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 2.5.2 ขนาดและความหนาของผนังเซลล์

ความหนาแน่นและอัตราส่วนของจำนวนเซลล์เปิดต่อจำนวนเซลล์ปิดเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของโพลีพลาस्टิก แต่อย่างไรก็ตามพบว่า แม้ว่าจะมีความหนาแน่นและจำนวนเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิดเท่ากันแต่ความแข็งแรงและ สมบัติ ทางกายภาพต่ออุณหภูมิอาจแตกต่างกันอย่างมากในโพลีพลาस्टิกซึ่งทำมาจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน จึงต้องมีการพัฒนาในเรื่องความแตกต่างของรูปร่างและขนาดของเซลล์

สำหรับเซลล์ทรงกลมที่มีการกระจายตัวเดี่ยวๆ ในโพลีพลาस्टิกจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์เฉลี่ย  $\delta$  กับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์  $d$  เป็นดังสมการ (3)

$$\delta = d \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\rho}{\rho_p}}} - 1 \right) \quad (3)$$

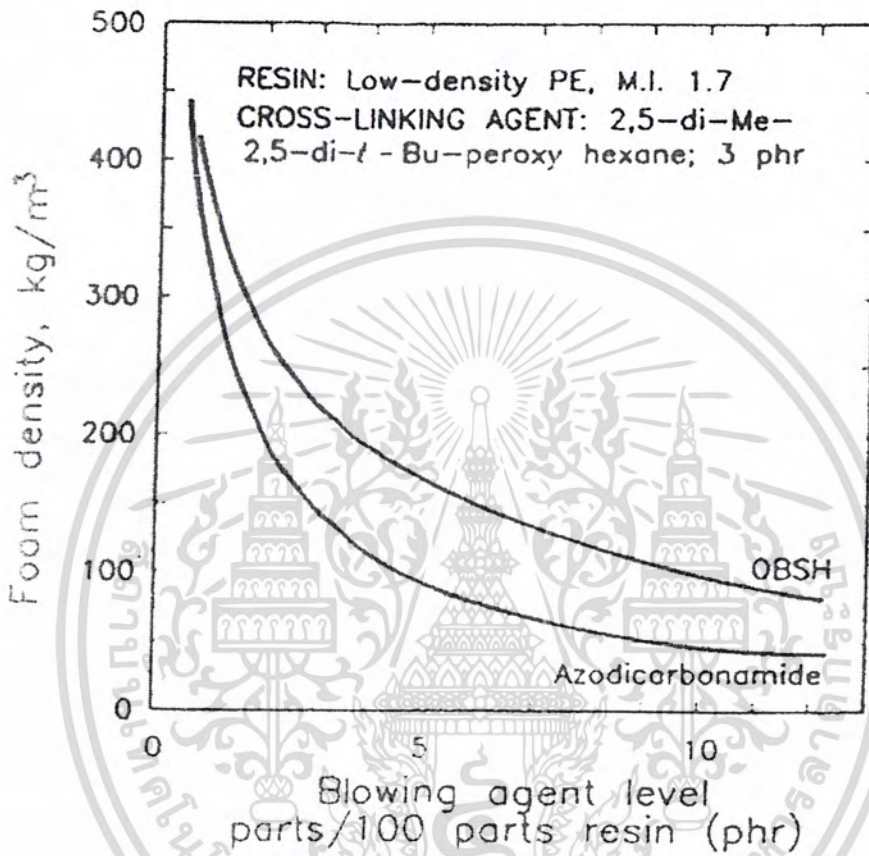
เมื่อ  $\rho_p$  คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่ยังไม่โม่ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของพลาस्टิกที่ผ่านการโม่แล้ว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

### 2.5.3 การควบคุมความหนาแน่นของโม่

ความหนาแน่นของโม่จะถูกควบคุมโดยระดับปริมาณสารช่วยให้เกิดฟอง ดังรูปที่ 2.2 ความหนาแน่นของโม่ เป็นสัดส่วนโดยประมาณแบบผกผันกับระดับปริมาณ สารช่วยให้เกิดฟอง ตัวแปรของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ เช่น ความหนาแน่นของโม่ ความหนาของโม่ ขนาดของเซลล์ ปริมาณการเชื่อมโยงในโครงสร้าง ปริมาณของเซลล์เปิด อุณหภูมิของการโม่ และสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการขยายตัว จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของสารช่วยให้เกิดฟอง ประสิทธิภาพของการแพร่ของสารช่วยให้เกิดฟองจะต่ำในผลิตภัณฑ์ที่มีความบางและมีความหนาแน่นน้อยเนื่องจากการสูญเสียก๊าซออกไปโดยการแพร่สู่สิ่งแวดล้อม การขยายตัวของโม่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศที่อุณหภูมิสูงเป็นสาเหตุที่ทำให้พื้นที่ผิวของเซลล์เสื่อมสภาพและเสียหาย การโฟมในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนหรือการเติมสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มประสิทธิภาพของสารช่วยให้เกิดฟองและปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของโฟม



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับสารช่วยให้เกิดฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เอทิลีนไวนิลอะซิเตท 18% (Ethylene vinyl acetate:EVA 18%)
- 3.1.2 พอลิเอทิลีน-ออกทีน (Polyethylene-Octene:PE- Octene)
- 3.1.3 ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-propylene-diene monomer:EPDM)
- 3.1.4 ซิลิกา (Silica)
- 3.1.5 ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide:DCP)
- 3.1.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zingoxide:ZnO)
- 3.1.7 กรดสเตียริก (Stearic acid:St)
- 3.1.8 เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide:AZ)
- 3.1.9 เขม่าดำ (Carbon black)
- 3.1.10 ซิงค์-สเตียริก (Zn-St)
- 3.1.11 โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate:NaHCO<sub>3</sub>)

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)
- 3.2.2 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter)
- 3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic weigh)
- 3.2.4 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน (Hot compression machine)
- 3.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing machine)
- 3.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด(Scanning Electron Microscope:SEM)
- 3.2.7 อุปกรณ์วัดความหนา (Thickness gauge)
- 3.2.8 เวอร์เนีย (Vernia caliper)
- 3.2.9 มีดสำหรับกรีดพอลิเมอร์ผสม
- 3.2.10 ตู้อบสารเคมี และถุงมือกันความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การผสมพอลิเมอร์

1. การเตรียมสาร : ชั่งสารตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนต่างๆของสารโดยใช้ไอโซโดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

สาร	สูตรที่ ( phr )							
	1	2	3	4	5	6	7	8
EVA ( 18 % )	-	-	-	-	10	30	50	70
EPDM	10	30	50	70	90	70	50	30
PE-Octene	90	70	50	30	-	-	-	-
Silica ( SiO <sub>2</sub> )	5	5	5	5	5	5	5	5
ZnO	2	2	2	2	2	2	2	2
Zinc Stearic acid (Zn-St)	2	2	2	2	2	2	2	2
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2
DCP	1	1	1	1	1	1	1	1
Azodicarbonamide ( AZ )	5	5	5	5	5	5	5	5
Carbon black Master batch	30	30	30	30	30	30	30	30

ตารางที่3.2 แสดงอัตราส่วนต่างๆของสารโดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

สาร	สูตรที่ ( phr )							
	1	2	3	4	5	6	7	8
EVA ( 18 % )	-	-	-	-	30	30	30	30
EPDM	70	70	70	70	70	70	70	70
PE-Octene	30	30	30	30	-	-	-	-
Silica ( SiO <sub>2</sub> )	5	5	5	5	5	5	5	5
ZnO	2	2	2	2	2	2	2	2
Zinc Stearic acid (Zn-St)	2	2	2	2	2	2	2	2
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2
DCP	1	1	1	1	1	1	1	1
Sodiumbicarbonate	9	11	15	19	9	11	15	19
Carbon black Master batch	30	30	30	30	30	30	30	30

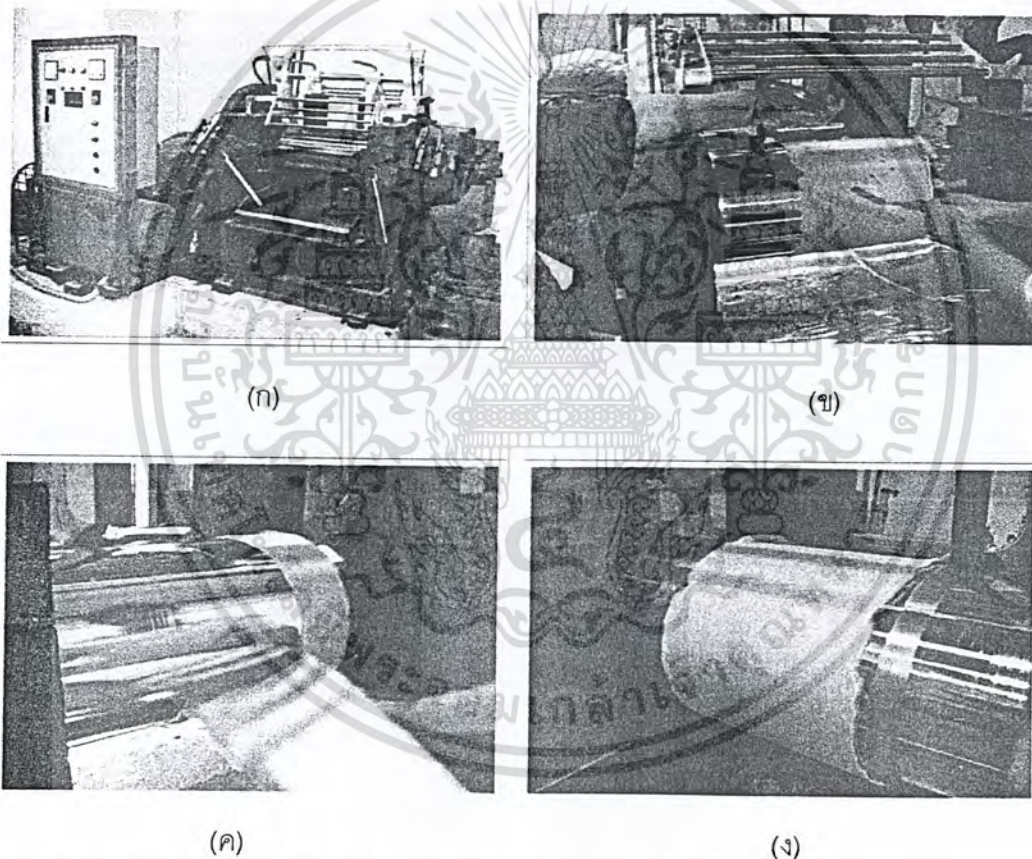
2. อุณหภูมิผสมแบบอัดรีดชนิด 2 ลูกกลิ้ง ให้มีอุณหภูมิประมาณ 90 องศา

เซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผสมอัตราส่วนผสมต่างๆเข้าด้วยกัน โดยเริ่มจากการใส่เอทิลีนไวนิลอะซิเตทลงไปแล้วรอให้ เอทิลีนไวนิลอะซิเตทผสมจนเข้ากันและพันรอบลูกกลิ้งจึงผสมเอทิลีนพรอพิลีนหรือพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน ซิลิกา ไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก ซิงค์สเตียเรต เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เขม่าดำ ตามลำดับ โดยช่วงเวลาในการเทส่วนผสมในแต่ละส่วน จะห่างกันประมาณ 2-3 นาที ลูกกลิ้งจะรีดส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นแผ่นบางและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และผู้ทำการทดลองจะต้องกรีดแผ่นพอลิเมอร์ผสมนี้แล้วพับกลับไปกลับมาตลอดเวลาที่ทำการผสม ใช้เวลาทั้งหมดในการผสมพอลิเมอร์และสารเคมีให้เข้ากันประมาณ 15 นาที ต่อการผสม 1 กะ (Batch)

4. เมื่อทำการผสมจนได้พอลิเมอร์ผสมแล้ว ปรับความหนาของลูกกลิ้งที่ความกว้างเท่ากับ 3 มิลลิเมตรเพื่อรีดพอลิเมอร์ผสมออก แล้วทิ้งให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องผสมแบบอัดรีดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

ก) เครื่องผสมแบบอัดรีดชนิด 2 ลูกกลิ้ง

ข) การเทส่วนผสมแต่ละส่วน

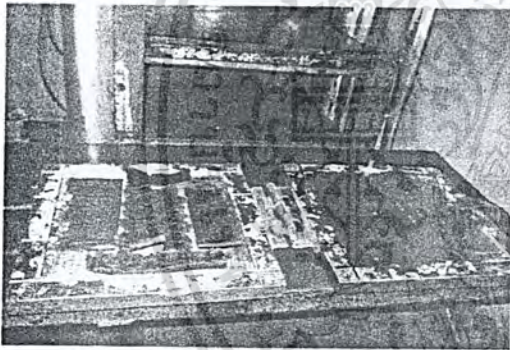
ค) การกรีดแล้วพับกลับไปกลับมาเพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

ง) ชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนการผสมสารให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การขึ้นรูปโฟมพอลิเมอร์ผสม เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบ

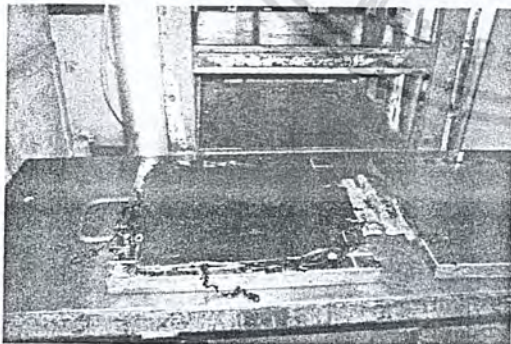
1. ชั่งพอลิเมอร์ผสม โดยให้น้ำหนักประมาณ 140 กรัม เพื่อบรรจุลงในแม่พิมพ์โดยแม่พิมพ์ที่ใช้มีขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 16.7x20.8x0.5 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.2 (ก)
2. นำพอลิเมอร์ผสมที่ชั่งแล้วใส่เข้าเครื่องอัดรีดแบบร้อน โดยปรับความดัน 13.20 เมกกะปาสคาล และอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.2 (ข) ใช้เวลาอบประมาณ 15 นาที เมื่อแม่พิมพ์จะเปิดออกจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นพลาสติกโฟมพอลิเมอร์ผสม ขยายตัวอยู่บนแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.2 (ค)
3. วัดขนาด ความกว้าง ความยาวของโฟมพอลิเมอร์ผสม แล้วจดบันทึกค่าไว้
4. ขึ้นรูปโฟมพอลิเมอร์ผสมต่อในสูตรต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วขั้นต้น
5. นำโฟมพอลิเมอร์ผสมที่ได้ในแต่ละสูตรมาทำการผ่าให้เป็นแผ่นบาง โดยมีขนาดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องผ่าโฟม ดังรูปที่ 3.2 (ง)
6. นำโฟมพอลิเมอร์ผสมที่ผ่าเสร็จแล้วไปป้อนเป็นชิ้นงานตามรูปแบบ มาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (The American Society for Testing and Materials : ASTM) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางด้านเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสม



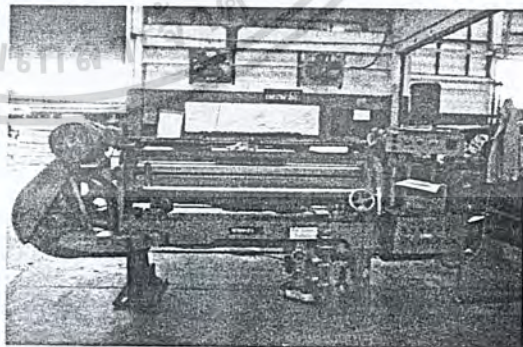
(ก) พอลิเมอร์ผสมในแม่พิมพ์



(ข) เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน



(ค) แม่พิมพ์เปิดออก



(ง) เครื่องผ่าโฟม

รูปที่ 3.2 แสดงการขึ้นรูปโฟมพอลิเมอร์ผสม

### 3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม

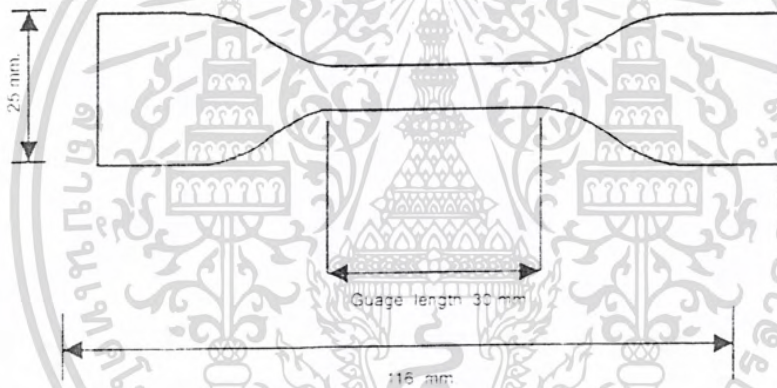
โดยใช้มาตรฐานในการทดสอบ คือ มาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (The American Society for Testing and Materials : ASTM)

3.3.2.1 การทดสอบสมบัติการดึงยึด ตามมาตรฐาน ASTM D638 ใช้ชิ้นตัวอย่างโฟมทดสอบรูปดัมเบลล์ ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Lloyd ; LR30K) ภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้

Load cell = 300 KGF

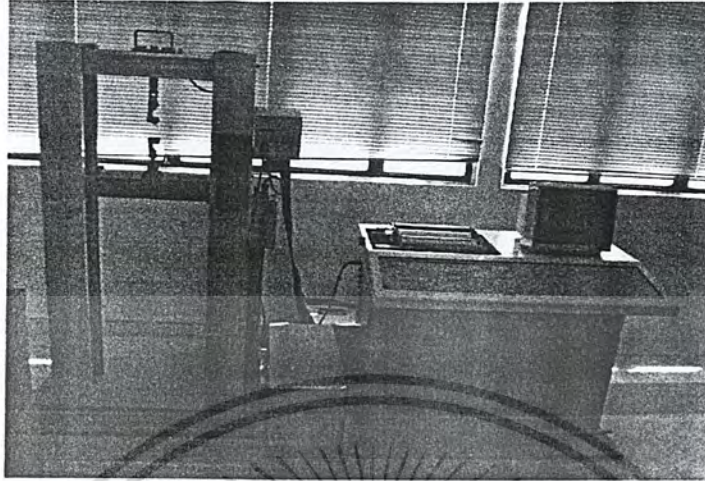
Test speed = 300 มิลลิเมตร/นาที

Gauge length = 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานที่ทดสอบรูปดัมเบลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)

เครื่องวัดแรงดึงที่นิยมใช้แสดงดังรูปที่ 3.4 เรียกว่าเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) ตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนจับตัวอย่าง (Grip) สองข้าง ข้างหนึ่งยึดกับที่ อีกข้างหนึ่งติดกับส่วนให้แรงที่สามารถเคลื่อนที่ให้แรงดึง หรือเคลื่อนที่ลงให้แรงกดอัด (Compression) ในอัตราเร็ว (Crosshead speed) ที่สามารถควบคุมได้ โดยจะมีเครื่องวัดแรง (Load cell) ต่ออยู่ ทำหน้าที่วัดแรงที่ใช้ดึงหรือกดอัดตัวอย่าง ส่วนจับตัวอย่าง (Grip) มีหลายชนิด จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง สามารถจับตัวอย่างได้ดี ไม่เกิดการลื่นหลุด หรือทำให้ตัวอย่างบิดเบี้ยว

#### ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติการดึงยึด ได้แก่

1. ความแข็งแรงดึง (Tensile stress) คำนวณ ค่าความแข็งแรงดึง จากสมการที่ (4)

$$\text{ความแข็งแรงดึง} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ค่าความแข็งแรงดึง (เมกะปาสคาล หรือ นิวตันต่อตารางเมตร)

$F$  = แรงที่ใช้ดึง (นิวตัน)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบก่อนถูกดึงยึด (ตารางมิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Percent elongation at break) คำนวณจากสมการที่ (5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (\%EB)} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ  $l_0$  = ความยาวของชิ้นงานทดสอบที่ยังไม่ได้รับแรงดึงมีค่าเท่ากับ Gauge length (มิลลิเมตร)

$l$  = ความยาวของชิ้นงานทดสอบหลังได้รับแรงดึง (มิลลิเมตร)

3. ค่าความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) คำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\text{ค่าความต้านทานการฉีกขาด} = \frac{F}{x} \quad (6)$$

เมื่อ  $F$  = แรงดึง (กิโลกรัม)

$x$  = ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (เมตร)

### 3.3.2.2 การทดสอบความต้านทานของการหดตัวของโฟม

นำโฟมพอลิเมอร์ผสม มาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วัดปริมาตรและบันทึกไว้ แล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที แล้วทำการวัดปริมาตรของโฟม พอลิเมอร์ผสม หลังการอบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอบแล้ว

$$\text{การหดตัว (\%Shringage)} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ  $V_0$  คือ ปริมาตรของโฟมพอลิเมอร์ผสมก่อนทำการอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V$  คือ ปริมาตรของโฟมพอลิเมอร์ผสมหลังทำการอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 3.3.2.3 หาอัตราการขยายตัวของโพลิเมอร์ผสม

หาความหนาแน่นของโพลิเมอร์ผสมก่อนการโม่ และเมื่อผ่านการโม่แล้วด้วย เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำการศึกษาคือ รุ่น MD-2000S ซึ่งใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) เพื่อหาความหนาแน่นและกำหนดความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1.00 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นค่าอ้างอิง เครื่อง MD-2000S สามารถวัดความหนาแน่นของวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ ยกเว้นวัสดุที่เป็นผงและของเหลวที่มีความหนืดสูง วัสดุตัวอย่างที่นำมาทดสอบคือ โฟมที่เป็นโพลิเมอร์ผสม โดยตัวกลางของเหลวคือน้ำ ก่อนที่จะทำการวัดค่า จะต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อยเป็นเวลา 10 นาทีก่อนการใช้งาน เพื่อเป็นการอุ่นเครื่องและเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำเท่ากับอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส)

#### ขั้นตอนการใช้งาน

1. ตั้งค่าน้ำจ่อแสดงผลให้เป็นศูนย์
2. ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างในอากาศขณะแห้งแล้วทำการบันทึกค่า
3. ชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างในน้ำแล้วทำการบันทึกค่า (หากมีฟองอากาศเกาะอยู่ที่วัสดุตัวอย่างให้พยายามกำจัดออกก่อนที่จะบันทึกค่า)
4. เครื่องจะแสดงผลหาความหนาแน่นทางจอแสดงผล
5. นำวัสดุตัวอย่างออกจากเครื่อง (ในการนำวัสดุตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้คีม เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นออกมาทำความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้) เมื่อได้ค่าความหนาแน่นจากเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์แล้ว นำมาคำนวณหาอัตราการขยายตัวจากสมการที่ (2)

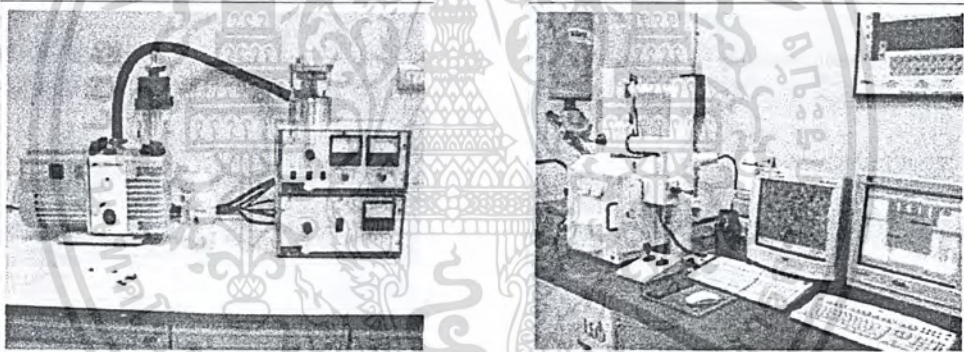
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.3 ศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟม (Morphology)

1. การเตรียมชิ้นตัวอย่างโฟม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากพอลิเมอร์ผสม มีลักษณะอ่อนนุ่มและเหนียว ดังนั้นการตัดชิ้นตัวอย่างเพื่อดูภาคตัดขวางของโฟม จึงต้องใช้วิธีการแช่โฟมตัวอย่างลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 30 นาที การแช่ตัวอย่างโฟมในไนโตรเจนเหลวจะทำให้โฟมแข็งตัวและเปราะสามารถแตกหักได้ง่าย ทำให้พื้นที่ของชิ้นตัวอย่างโฟมเรียบ ไม่เกิดการยุบตัวของโฟมพอลิเมอร์ และสามารถสังเกตพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างโฟมได้ชัดเจน ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ จะได้ชิ้นตัวอย่างโฟมสำหรับศึกษาสัณฐานวิทยา

2. เคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 1 ชม. เพื่อให้ชิ้นโฟมตัวอย่างมีสมบัติในการนำไฟฟ้า

3. ศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟม (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope;SEM)



(ก) เครื่องเคลือบทอง

(ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาเพื่อศึกษาผลของสารให้ฟอง (Blowing agent) ระหว่างเอโซไดคาร์โบนาไมด์(AZ) และ โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ผลของการจัดเรียงตัวของเซลล์ที่มีต่อจำนวนเซลล์และขนาดของเซลล์ ผลของการทดสอบสมบัติทางด้านเชิงกล ผลของการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ตลอดจนเสถียรภาพของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์โฟมจากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ โดยทำการทดลองในการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวโนลอะซิเตท และยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน ดังนี้

#### 4.1 ผลของการจัดเรียงตัวของเซลล์

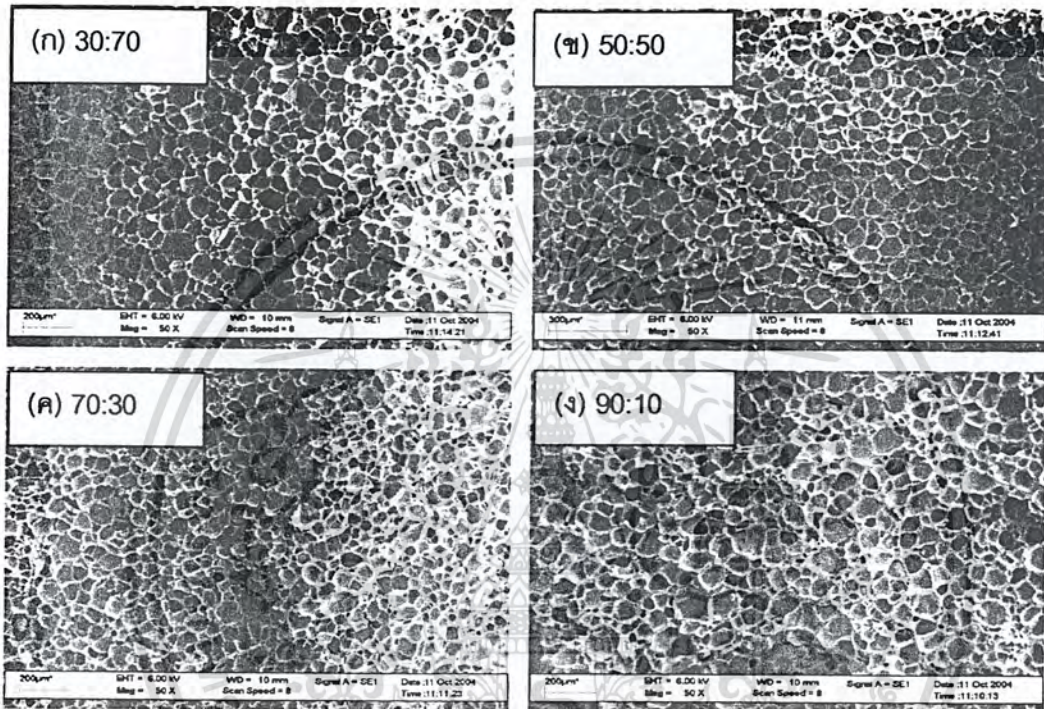
##### 4.1.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน

เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารให้ฟองทางเคมี พบว่า สันฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้จาก รูปที่ 4.1 (ก) (ข) (ค) (ง) มีลักษณะของโฟมที่ดี คือ มีขนาดและลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทำให้ได้จำนวนเซลล์ที่มีขนาดเล็ก และเซลล์จัดเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ โดยจะเซลล์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 40-53 ไมครอน ดังรูปที่ 4.2 และมีจำนวนเซลล์ ประมาณ  $2.15-3.73 \times 10^{10}$  เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.3 และความหนาแน่นของโฟมประมาณ 0.24 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ในขณะที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี พบว่า สันฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้ จากรูป 4.4 (ก) (ข) (ค) (ง) มีลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้เป็นโฟมที่มีฟองก๊าซแทรกอยู่น้อย ซึ่งสังเกตได้ว่าลักษณะส่วนใหญ่ยังคงสภาพเป็นเนื้อพอลิเมอร์ผสม การจัดเรียงตัวของเซลล์ไม่สม่ำเสมอ ขนาดของเซลล์มีขนาดใหญ่ โดยเซลล์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 138-375 ไมครอน ดังรูปที่ 4.5 และมีจำนวนเซลล์ประมาณ  $0.24-2.22 \times 10^{10}$  เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.6 และความหนาแน่นของโฟมประมาณ 0.65 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จะเห็นว่า ความหนาแน่นของโฟมที่ได้ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ก่อนการผสม จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีเสถียรภาพไม่ดี

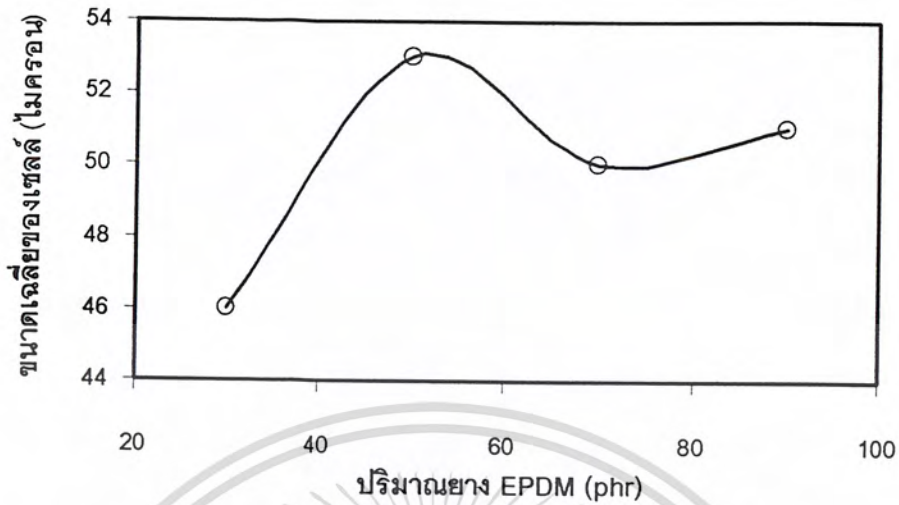
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 50 เท่า ของอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน

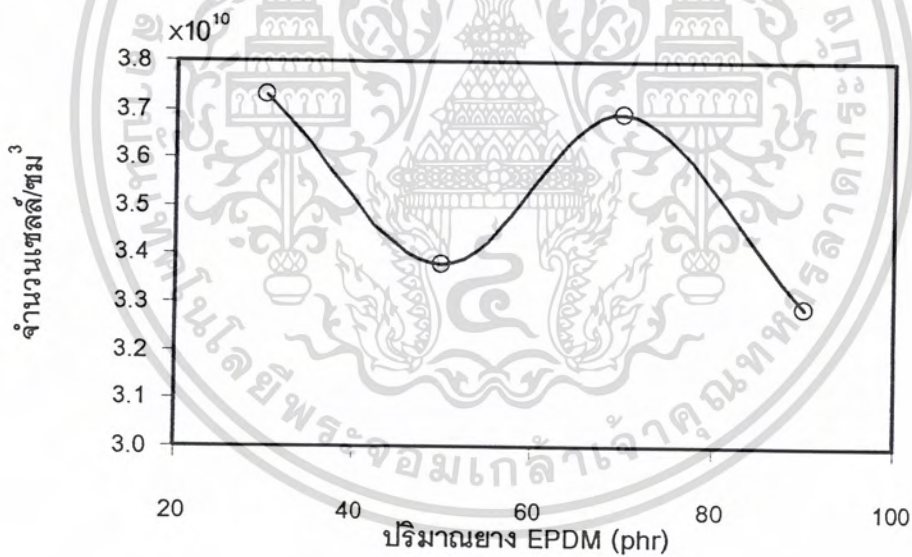


รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน ในปริมาณต่างๆ โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 150 °ซ ความดัน 13.20 MPa และใช้เวลาอบ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



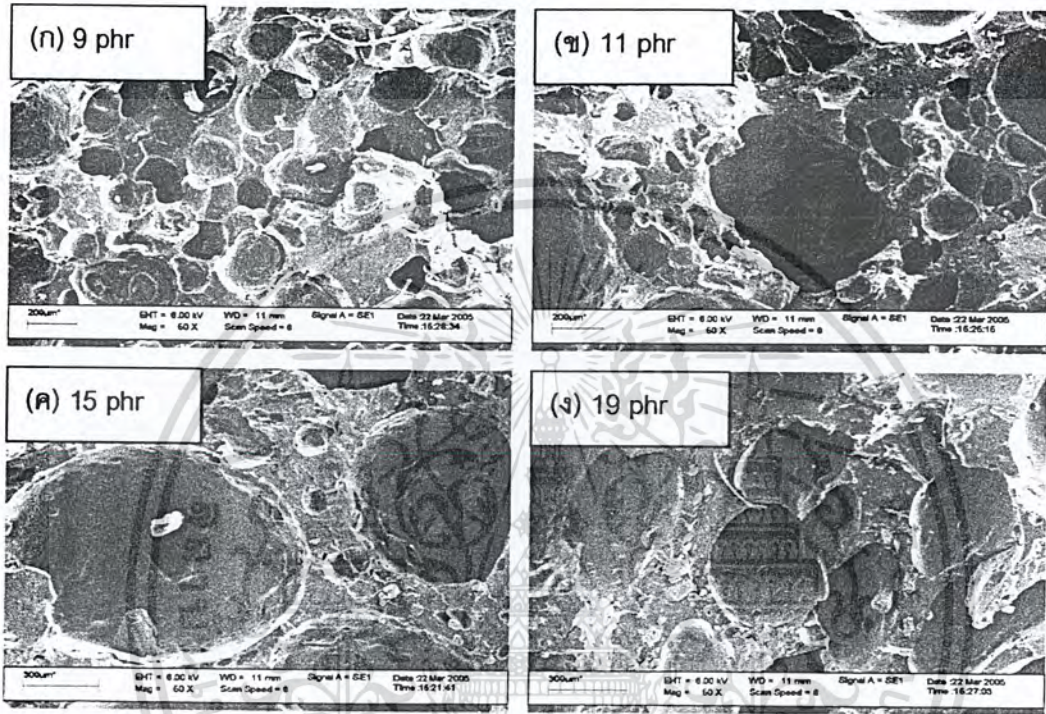
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเซลด์กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน โดยใช้เอโซไดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลด์กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน โดยใช้เอโซไดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

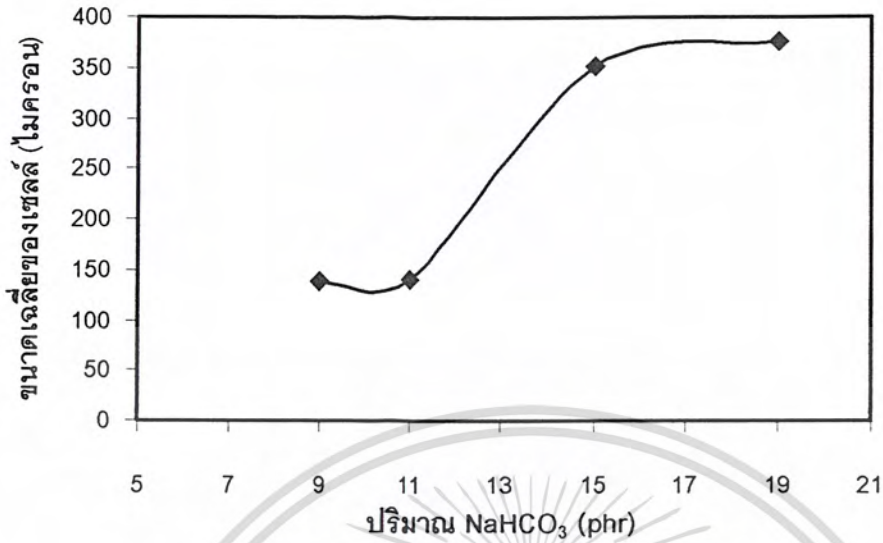
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 50 เท่า ของอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน

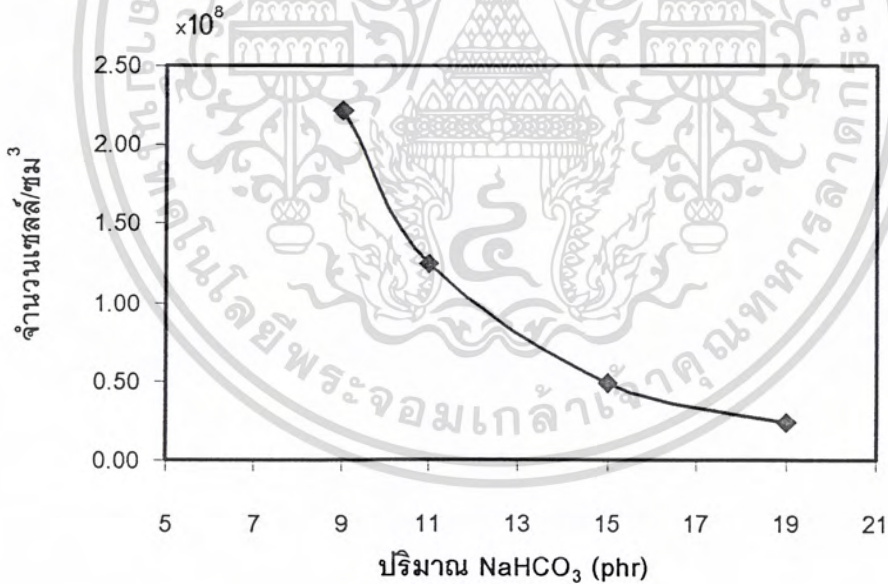


รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน เท่ากับ 70:30 phr โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ในปริมาณต่างๆ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $160^\circ\text{C}$  ความดัน 7 MPa และใช้เวลาอบ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเชลล์กับปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน เท่ากับ 70:30 phr



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเชลล์กับปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน เท่ากับ 70:30 phr

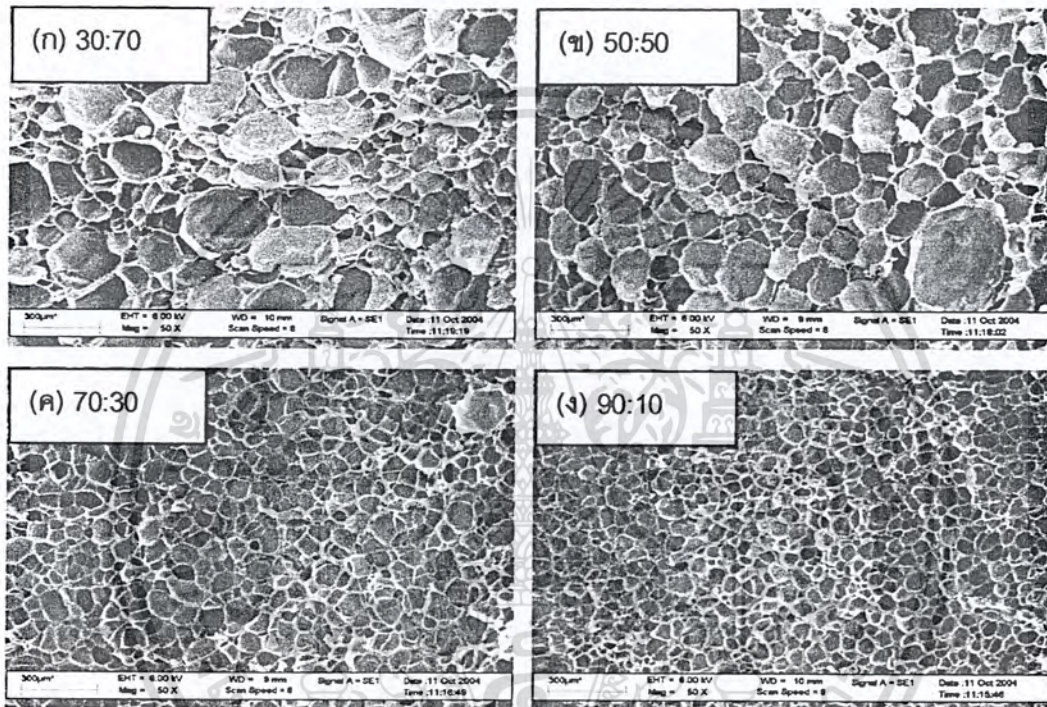
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอฟิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม ระหว่างเอทิลีนพรอฟิลีนและเอทิลีนไวนิลอะซิเตท โดยใช้เอโซโตคาร์บอนาไมด์ เป็นสารให้ฟองทางเคมี พบว่า สันฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้ มีลักษณะแตกต่างกัน จากรูปที่ 4.7 (ค) และ (ง) มีลักษณะของโฟมที่ดี คือ มีขนาดเล็ก และเซลล์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนั้นรูปที่ 4.7 (ก) พบว่า ที่อัตราส่วนผสมของยางเอทิลีนพรอฟิลีนต่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30:70 phr พบว่าขนาดของเซลล์มีขนาดใหญ่สุด โดยมีขนาดประมาณ 164 ไมครอน ดังรูปที่ 4.8 และมีจำนวนเซลล์ประมาณ  $2.41 \times 10^{10}$  เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของโฟมเป็น 0.082 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอฟิลีนในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ขนาดของเซลล์มีแนวโน้มลดลง โดยที่อัตราส่วนผสมของยางเอทิลีนพรอฟิลีนต่อเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ที่อัตราส่วนเท่ากับ 90:10 phr ดังรูปที่ 4.8 (ง) พบว่า โฟมที่ได้มีขนาดของเซลล์ประมาณ 45 ไมครอน ดังรูปที่ 4.8 และมีจำนวนเซลล์สูงสุดประมาณ  $3.28 \times 10^{10}$  เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นเป็น 0.317 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

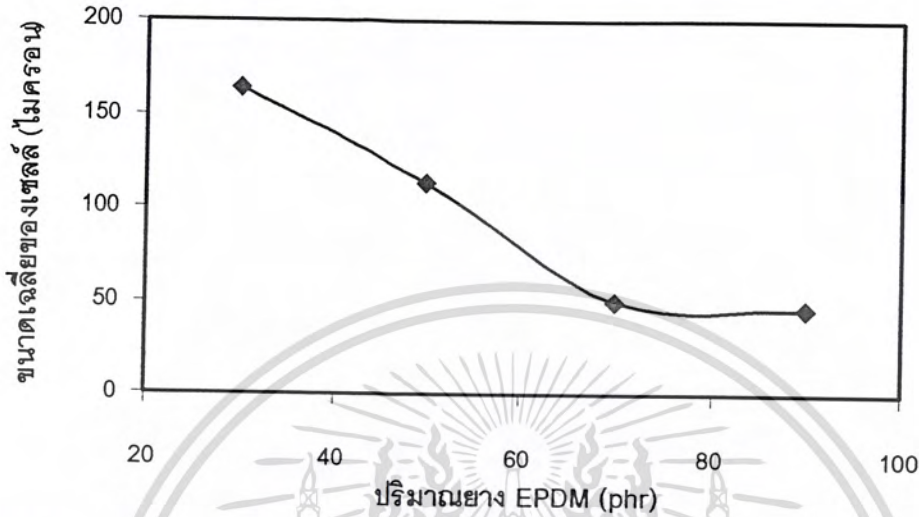
ในขณะที่ใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี พบว่า สันฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้ จากรูป 4.10 (ก) (ข) (ค) (ง) มีลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้เป็นโฟมที่มีฟองก๊าซแทรกอยู่น้อย จนสังเกตได้ว่าลักษณะส่วนใหญ่ยังคงสภาพเป็นเนื้อพอลิเมอร์ผสม การจัดเรียงตัวของเซลล์ไม่สม่ำเสมอ ขนาดของเซลล์มีขนาดใหญ่ โดยเซลล์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 70-300 ไมครอน ดังรูปที่ 4.11 และมีจำนวนเซลล์ประมาณ  $1.30-5.50 \times 10^5$  เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.12 และความหนาแน่นของโฟมประมาณ 0.64 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของโฟมที่ได้ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ก่อนการผสม จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีเสถียรภาพไม่ดี

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 50 เท่า ของอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

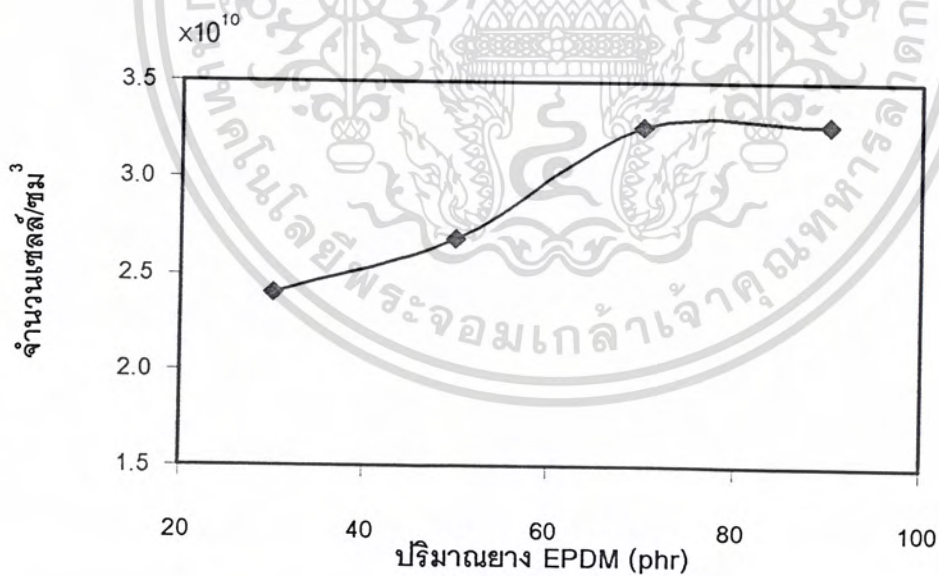


รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 70:30 phr โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 150 °ซ ความดัน 13.20 MPa และใช้เวลาอบ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



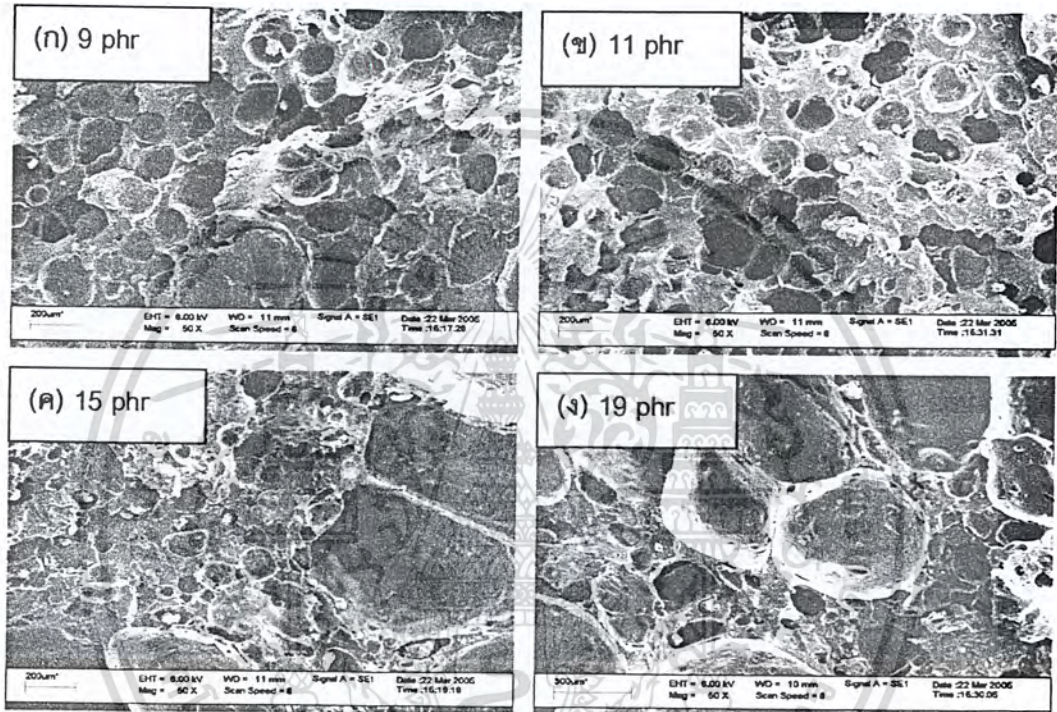
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเซลด์กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อเอทิลีนไวโนลอะซิเตท โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลด์กับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อเอทิลีนไวโนลอะซิเตท โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

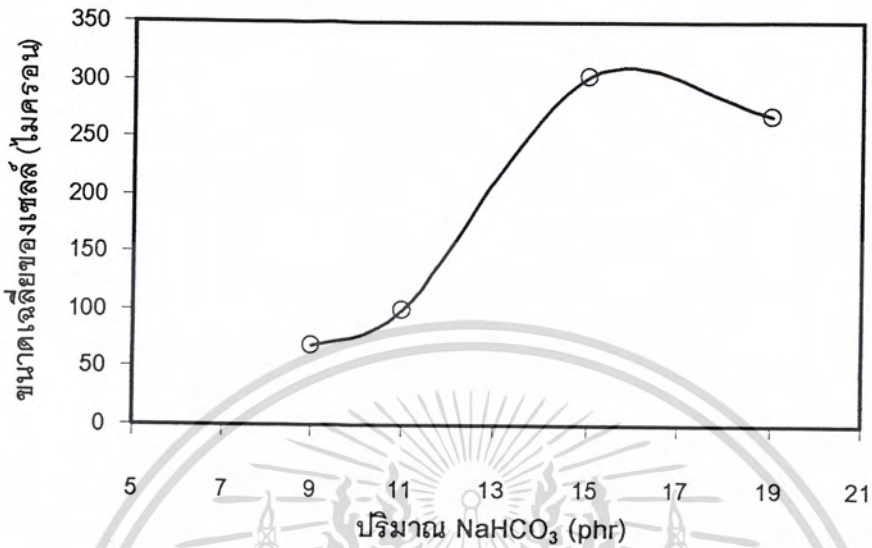
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 50 เท่า ของอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

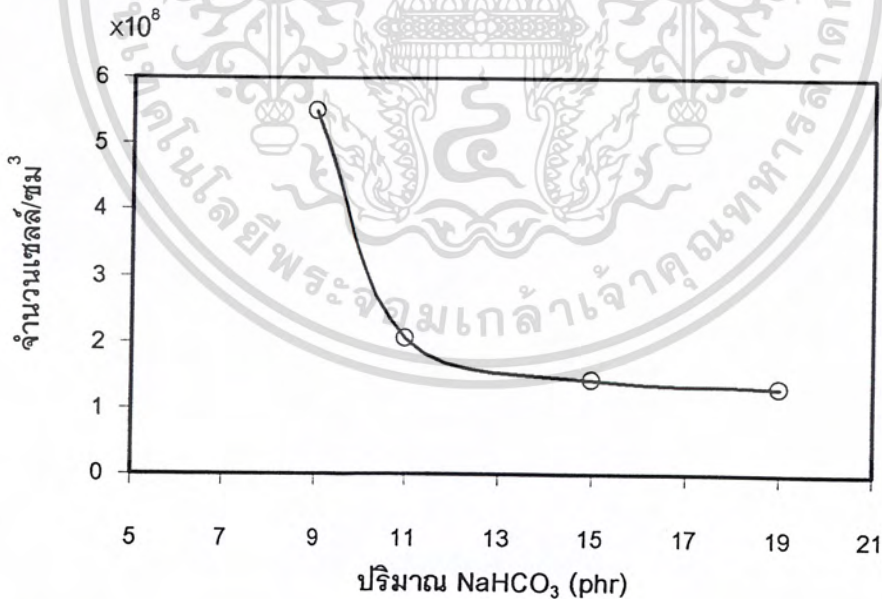


รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของพอลิเมออร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 70:30 phr โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ในปริมาณต่างๆ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $160^\circ\text{C}$  ความดัน 7 MPa และใช้เวลาอบ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของเชลล์กับปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 70:30 phr.



รูปที่

อัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 70:30 phr

ดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

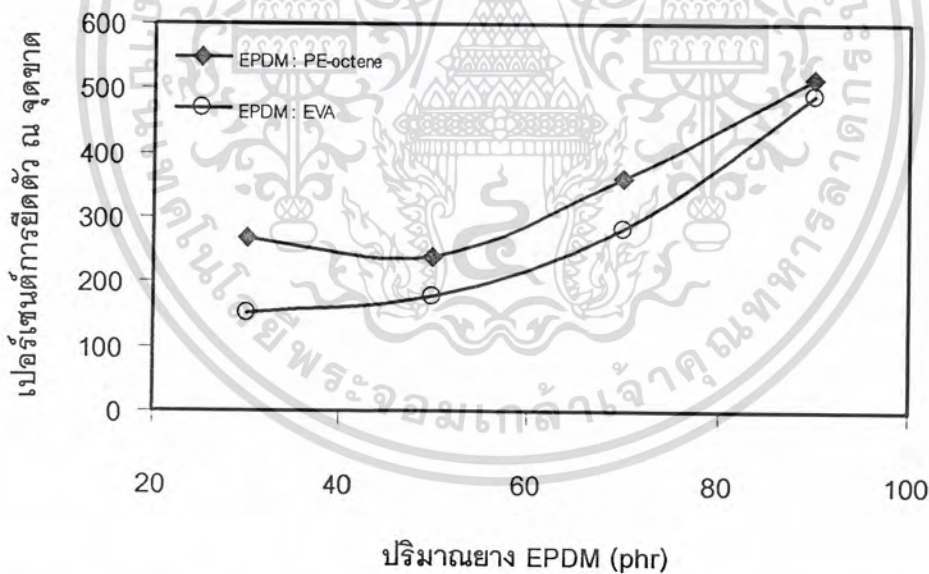
## 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของโพลิเมอร์ผสม

### 4.2.1 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองางเคมี

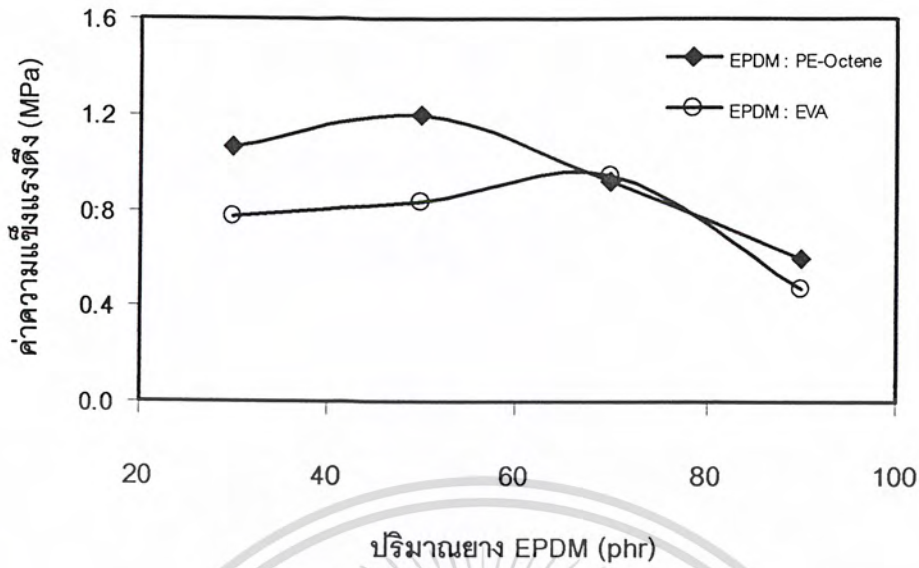
ผลของร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด ดังรูป 4.13 เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน ในโพลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน พบว่าค่าร้อยละของการยืดตัว จะมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกอัตราส่วน เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีน กับเอทิลีนไวโนลอะซิเตท และมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน เท่ากับ 90 phr

ผลของค่าความแข็งแรงดึง ดังรูป 4.14 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดต่ำลง แสดงว่ายางเอทิลีนพรอพิลีนมีผลโดยทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง

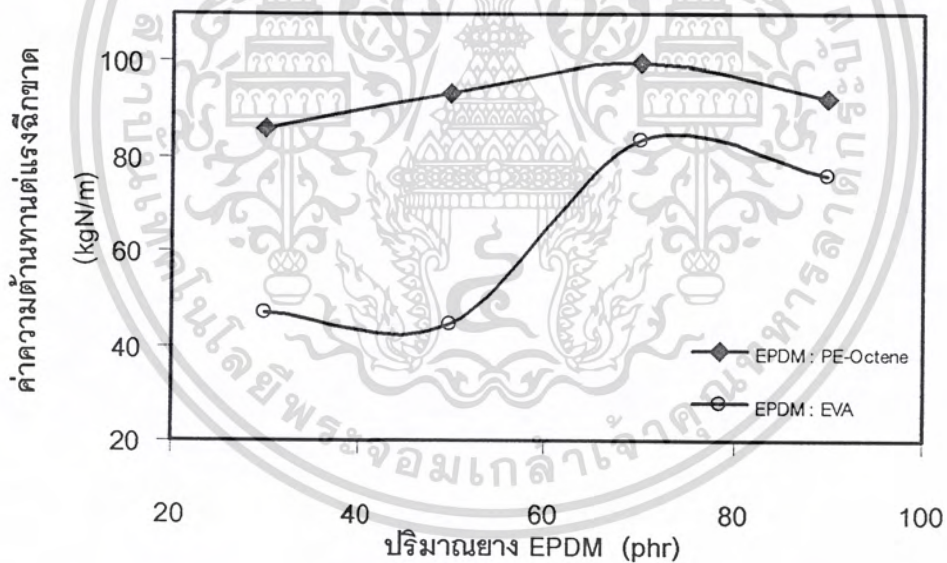
ผลของความต้านทานการฉีกขาด ดังรูป 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ช่วงปริมาณของยางเอทิลีนพรอพิลีน ที่ 70 phr ค่าความต้านทานการฉีกขาด มีแนวโน้มลดต่ำลง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดกับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง

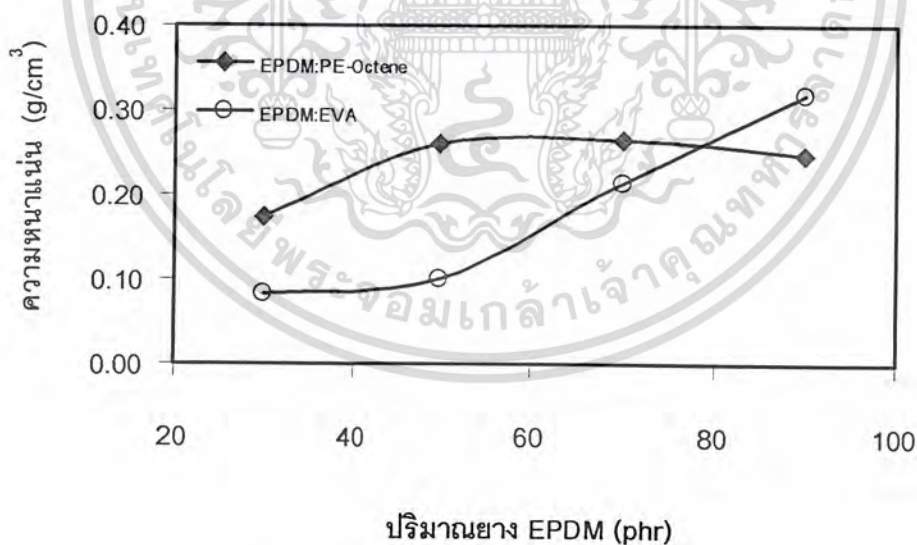
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลของการทดสอบสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิเมอร์ผสมโดยใช้ เอโซไตรโบ-นาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองเคมี

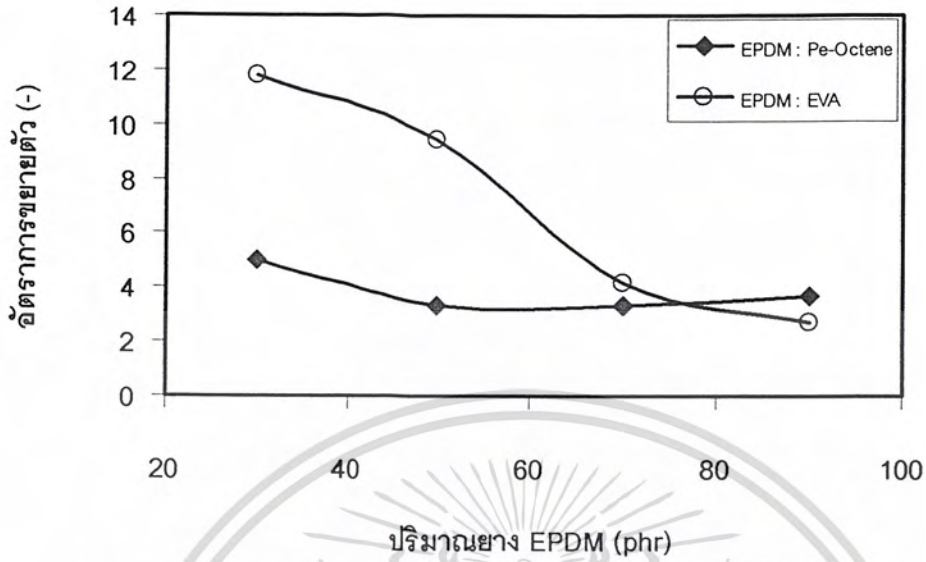
พิจารณาจากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน พบว่าค่าความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของยางเอทิลีนพรอพิลีน เท่ากับ 50 phr และมีแนวโน้มคงที่ จนปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน เท่ากับ 90 phr ในขณะที่ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวโนลอะซิเตท มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนที่เพิ่มขึ้น

พบว่าอัตราการขยายตัวของโฟมพอลิเมอร์ผสม ที่แสดงในรูป 4.17 พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน โดยพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวโนลอะซิเตท มีอัตราการขยายตัวของโฟม ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

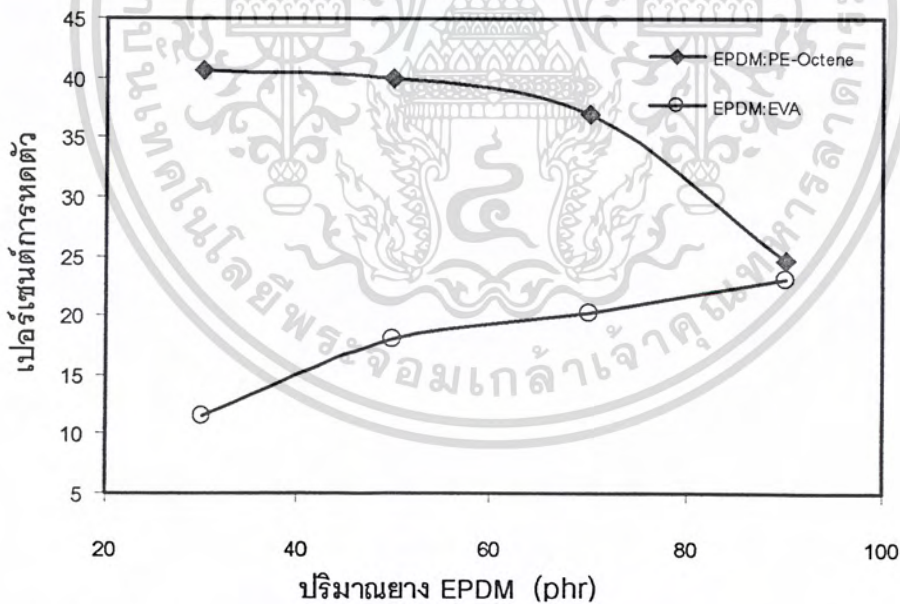
สำหรับร้อยละการหดตัวของโฟมพอลิเมอร์ผสม ที่แสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน ที่เพิ่มขึ้นให้ผลที่แตกต่างระหว่างพอลิเมอร์ผสมของเอทิลีนไวโนลอะซิเตท และพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน กล่าวคือ ปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนในโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เอทิลีนไวโนลอะซิเตทกับยางเอทิลีนพรอพิลีน มีร้อยละการหดตัวลดลง เมื่อปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนอยู่ในช่วง 70 - 90 phr แต่เมื่อพิจารณาผลของปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน ในโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน-อ็อกทีนกับยางเอทิลีนพรอพิลีน มีร้อยละของการหดตัวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน โดยใช้เอโซไตรโบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขาดตัวกับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี



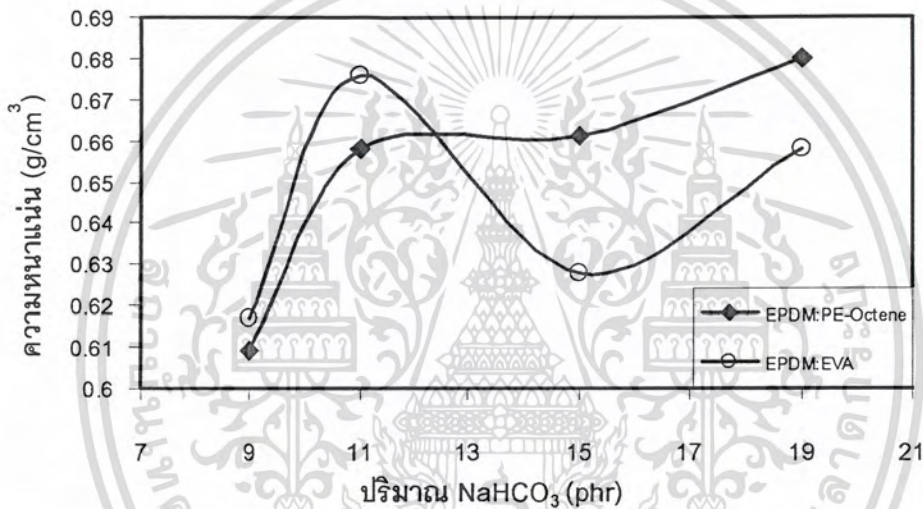
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การขาดตัวกับปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีน โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

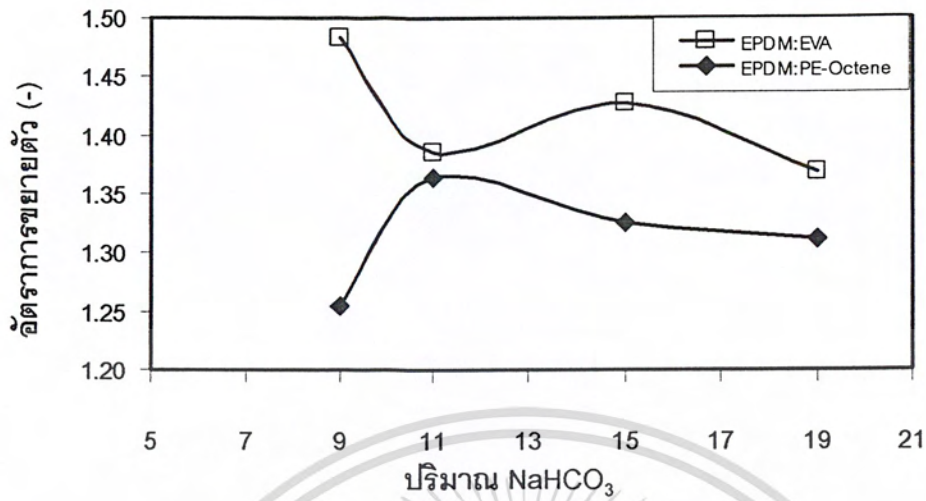
#### 4.2.3 ผลของการทดสอบสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

พิจารณาจากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า ที่ปริมาณของโซเดียมไบคาร์บอเนต เท่ากับ 15 phr ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน และยางเอทิลีนพรอพิลีนกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ผลของอัตราการขยายตัวของโฟมพอลิเมอร์ผสม ที่แสดงในรูป 4.20 พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน มีอัตราการขยายตัวของโฟมลดลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวกับปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อคู่พอลิเมอร์ผสมโดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี พบว่า

#### 1.1 คุณสมบัติที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

- ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด
- ความต้านทานการฉีกขาด
- ความหนาแน่น
- จำนวนเซลล์
- เปอร์เซ็นต์การหดตัว

#### 1.2 คุณสมบัติที่มีแนวโน้มลดลง

- อัตราการขยายตัว
- ค่าความแข็งแรงดึง
- ขนาดของเซลล์เฉลี่ย

2. จากการทดลองเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตทและยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี พบว่าผลิตภัณฑ์โฟมที่ผลิตได้ มีลักษณะของโฟมที่ดี คือ ขนาดของเซลล์มีขนาดเล็ก ลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ โดยพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตทและยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70:30 phr จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีเสถียรภาพดี

3. จากการทดลองเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนพรอพิลีนกับยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตทและยางเอทิลีนพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน-อ็อกทีน โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี พบว่าผลิตภัณฑ์โฟมที่ผลิตได้เป็นโฟมที่มีฟองก๊าซแทรกอยู่น้อย ซึ่งสังเกตได้ว่าลักษณะส่วนใหญ่ยังคงสภาพเป็นเนื้อพอลิเมอร์ผสม การจัดเรียงตัวของเซลล์ไม่สม่ำเสมอ ขนาดของเซลล์มีขนาดใหญ่ ความหนาแน่นของโฟมที่ได้ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ก่อนการผสม จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีเสถียรภาพไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมีในพอลิเมอร์ผสม คือ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที ส่วนอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมีในพอลิเมอร์ผสม คือ  $160^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 นาที

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลองพบว่า โซเดียมไบคาร์บอเนต ไม่เหมาะที่จะเป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ดังนั้น จึงควรเลือกใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางเคมีชนิดอื่นที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากสมบัติการเข้ากันได้ของคู่พอลิเมอร์ผสมนั้นๆ

2. เนื่องจากการทดลองใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางเคมีสองชนิด คือ เอโซไดคาร์โบนาไมด์ และ โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งจะใช้สารช่วยให้เกิดฟองทางเคมีเพียงหนึ่งชนิดต่อ อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ ดังนั้นควรมีการผสมสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมีทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน เพราะอาจทำให้ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Daniel Klempher and Kurt C. Frisch, Handbook of Polymeric Foams and Tecnology, Hanser, Mumich Vienna, 1991
- [2] Valentina Padarva, Chul B. Park, Patrick C. Lee, Hani E. Naguib, Extruded Open-Celled LDPE-Based Foams Using Non-Homogeneous Melt Structure Tornto, 2002
- [3] James E. Mark, Polymer Data Handbook, 1999
- [4] เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์, Properties of Polymer, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- [5] อธิธิพล แจ่มชัด, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
- [6] บรรณ เลง ศรีนิล, เทคโนโลยีพลาสติก(ฉบับปรับปรุง) พิมพ์ครั้งที่ 15, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย - ญี่ปุ่น), 2546
- [7] สมศักดิ์ วรมงคลชัย, สารปรับแต่งพอลิเมอร์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [8] อรุษา สรวรี, สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในโครงการงาน

1. ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หมายถึง ความเค้นดึงเท่ากับแรงดึงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดตัวอย่างบริเวณความยาวเกจ (Gauge length) ก่อนดึง มีหน่วยเป็น แรงต่อพื้นที่ (เมกกะปาสคาล MPa หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร  $N/mm^2$ )
2. Gauge length หมายถึง ความยาวเกจเท่ากับระยะห่างระหว่างขีดสองขีดบนตัวอย่าง เป็นความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนให้แรงดึง ที่ใช้ในการคำนวณความเครียด (Strain) หน่วยเป็นความยาว
3. การยืดตัว (Elongation) หมายถึงการยืด หรือ การเพิ่มขึ้นของความยาวเทียบกับความยาวเกจของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึง หน่วยเป็นความยาว
4. เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation) หมายถึง การยืดของตัวอย่างเทียบกับความยาวเกจ คิดเป็นเปอร์เซนต์
5. ความเครียด (Strain) หมายถึง ความเครียด เท่ากับ อัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับความยาวเริ่มต้นหรือความยาวเกจ (Gauge length)
6. ค่าความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) หมายถึง ค่าความต้านทานการฉีกขาด เท่ากับแรงที่ใช้ดึงต่อความหนาของชิ้นงาน
7. Part per hundred parts of resins (phr) หมายถึง ส่วนในร้อยส่วนของเรซินหรือพลาสติก
8. โฟม (Foam) หมายถึง วัตถุที่มีน้ำหนักเบา ภายในเนื้อจะมีรูฟองอากาศ ลักษณะทั่วไปคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ
9. พอลิเมอร์ (Polymer) หมายถึง สารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุล 5,000 ขึ้นไป ได้จากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างกัน เช่น พอลิเอทิลีน ยาง
10. คอมปาว (Compound) หมายถึง ของผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สารเพิ่มเนื้อ สารเพิ่มสภาพพลาสติก สี และตัวเร่งปฏิกิริยา ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน
11. อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) หมายถึงอุณหภูมิที่พอลิเมอร์สภาพอสัณฐาน หรือกึ่งผลึกเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแข็งเปราะ หรือสภาพแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมก่อนโฟมและหลังโฟม

ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมก่อนโฟมและหลังโฟม

ปริมาณ EPDM (phr)	ปริมาณ EVA (phr)	ปริมาณ PE-Octene (phr)	สภาวะที่ใช้เตรียมโฟม		Tear Kg.N/m	%Elongation	Stress MPa	%Shrinkage	Density (g/cm <sup>3</sup> )		อัตรา การขยายตัว (-)
			อุณหภูมิ °C	ความดัน MPa					ก่อนโฟม	หลังโฟม	
30	70	-	150	13.2	47.086	152	0.77	11.49	0.969	0.082	11.765
50	50	-			44.646	176.67	0.84	18	0.951	0.101	9.447
70	30	-			83.269	283.33	0.94	20.17	0.887	0.214	4.125
90	10	-			76.069	490	0.48	23.02	0.856	0.317	2.7
30	-	70	150	13.2	85.86	266.67	1.07	40.57	0.873	0.174	5.008
50	-	50			93.38	238.67	1.2	39.98	0.855	0.259	3.298
70	-	30			99.365	362	0.93	36.88	0.882	0.264	3.346
90	-	10			92.285	516.67	0.6	24.54	0.909	0.248	3.669

ภาคผนวก ค.

ขนาดของเซลล์เฉลี่ยของโฟมพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค-1 ขนาดของเซลล์เฉลี่ยเมื่อใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง EPDM:EVA ในปริมาณต่างๆ

โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

ปริมาณ EPDM (phr)	ปริมาณ EVA (phr)	ขนาดของเซลล์เฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวนเซลล์/ซม <sup>3</sup>
30	70	164	$2.41 \times 10^{10}$
50	50	113	$2.68 \times 10^{10}$
70	30	50	$3.27 \times 10^{10}$
90	10	45	$3.28 \times 10^{10}$

ตารางที่ ค-2 ขนาดของเซลล์เฉลี่ยเมื่อใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง EPDM:PE-Octene ในปริมาณต่างๆ

โดยใช้เอโซโดคาร์บอนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

ปริมาณ EPDM (phr)	ปริมาณ PE-Octene (phr)	ขนาดของเซลล์เฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวนเซลล์/ซม <sup>3</sup>
30	70	46	$3.73 \times 10^{10}$
50	50	53	$3.38 \times 10^{10}$
70	30	50	$3.69 \times 10^{10}$
90	10	51	$3.29 \times 10^{10}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ขนาดของเซลล์เฉลี่ยเมื่อใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง EPDM:EVA ในอัตราส่วน 70 : 30 Phr โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

ปริมาณ $\text{NaHCO}_3$	ขนาดของเซลล์เฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวนเซลล์/ซม <sup>3</sup>
90	69	$5.49 \times 10^8$
110	100	$2.06 \times 10^8$
150	302	$1.43 \times 10^8$
190	268	$1.32 \times 10^8$

ตารางที่ ค-4 ขนาดของเซลล์เฉลี่ยเมื่อใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง EPDM:PE-Octene ในอัตราส่วน 70:30 phr โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี

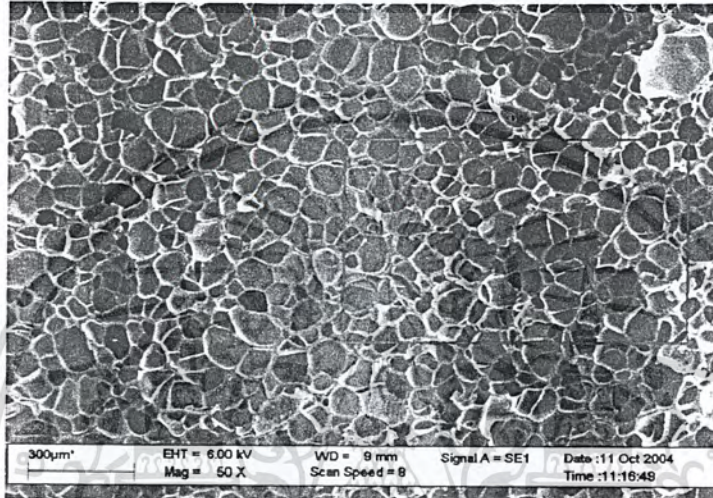
ปริมาณ $\text{NaHCO}_3$	ขนาดของเซลล์เฉลี่ย (ไมครอน)	จำนวนเซลล์/ซม <sup>3</sup>
90	138	$2.22 \times 10^8$
110	141	$1.25 \times 10^8$
150	352	$0.48 \times 10^8$
190	375	$0.24 \times 10^8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.  
การคำนวณจำนวนเซลล์

ตัวอย่างการคำนวณเซลล์รูปที่ 4.7 (ค)

กำหนดพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังรูปที่ ง-1 แล้วทำการนับจำนวนเซลล์ในพื้นที่ดังกล่าว



รูปที่ ง-1 การกำหนดพื้นที่เพื่อนับจำนวนเซลล์

แทนค่า  $\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f}$  จากภาคผนวก ข. ลงในสมการที่ (2)

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

$$n = \left( \frac{212}{0.073^2} \right)^{3/2} \times 10^3 \times 3.346$$

$$n = 3.27 \times 10^{10} \text{ เซลล์/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้