

การทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โฟม  
โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

PREDICTION OF POLYMERIC FOAM STRUCTURES  
USING A MATHEMATICAL MODEL

พงศ์ประภาส ปิยมโนชา  
PONGPRAPAT PIYAMANOCHA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2569-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โฟม  
โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

PREDICTION OF POLYMERIC FOAM STRUCTURES  
USING A MATHEMATICAL MODEL

พงศ์ประภาส ปิยมโนชา  
PONGPRAPAT PIYAMANOCHA

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61610  
วัน,เดือน,ปี..... 19 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2569-9

**PREDICTION OF POLYMERIC FOAM STRUCTURES  
USING A MATHEMATICAL MODEL**

**PONGPRAPAT PIYAMANOCHA**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2006  
ISBN 974-15-2569-9**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง	การทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โพล์มโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
นักศึกษา	นายพงศ์ประภาส ปิยมโนชา
รหัสประจำตัว	47060704
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

### บทคัดย่อ

คุณภาพของพอลิเมอร์โพล์มโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับลักษณะทางสัญญาณวิทยาของเนื้อโพล์ม ได้แก่ ขนาดของฟองก๊าซ ความหนาแน่นของจำนวนฟองก๊าซ และความหนาของผนังเซลล์ ดังนั้นการทำนายลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์โพล์มโดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ จึงมีประโยชน์ในการออกแบบกระบวนการผลิต และการพัฒนาผลิตภัณฑ์โพล์ม งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โพล์มด้วยวิธีการอย่างง่าย โดยอาศัยพื้นฐานทฤษฎีการขยายตัวของฟองก๊าซในของเหลวที่มีปริมาตรจำกัด และสมมติให้การขยายตัวของฟองก๊าซขึ้นอยู่กับกาลถ่ายเทมวลเท่านั้น เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์โพล์มอันเป็นผลมาจากการแปรเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น ชนิดและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิต และปริมาณของสารเชื่อมโยง พบว่าสามารถสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของความหนาของผนังเซลล์ที่เกิดขึ้น จากนั้นสร้างสมการในรูปตัวแปรไร้หน่วยของขนาดเซลล์และขนาดฟองก๊าซ และใช้สมการร่วมกับสมการอย่างง่ายที่สร้างขึ้น เพื่อคำนวณขนาดของฟองก๊าซและขนาดของเซลล์ นำสมการทั้งสองมาอธิบายร่วมกับสมการควบคุมมวลในหนึ่งหน่วยเซลล์ จะทำให้สามารถหาขนาดของเซลล์เริ่มต้นได้ เมื่อทำการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดของฟองก๊าซ พบอัตราส่วนดังกล่าวสามารถทำนายว่าแสดงถึงลักษณะโครงสร้างเซลล์ของพอลิเมอร์โพล์มที่ได้ คือ เมื่ออัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 1 โพล์มที่ได้จะมีลักษณะโครงสร้างของเซลล์เป็นแบบเซลล์เปิด และเมื่อมีค่ามากกว่า 1 โพล์มที่ได้จะมีลักษณะโครงสร้างของเซลล์เป็นแบบเซลล์ปิด

<b>Thesis Title</b>	PREDICTION OF POLYMERIC FOAM STRUCTURES USING A MATHEMATICAL MODEL
<b>Student</b>	Mr. Pongprapat Piyamanocha
<b>Student ID</b>	47060704
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Surat Areerat

### **ABSTRACT**

Generally, the quality of polymeric foam depends on its morphology such as bubble diameter, bubble density and thickness of cell wall. Therefore, the prediction of polymeric foam structures using a mathematical model is useful for production of polymeric foam and products development. This research presents the empirical method to predict foam structure based on the bubble growth in a finite amount of liquid theory and the assumption bubble growth depends only on mass transfer. The change of morphology of polymeric foams which obtained from different foaming parameters such as type and ratios of polymer blend, foaming temperatures and amount of cross linking agent were presented into an empirical mathematic equation. This empirical equation is used to explain the change of thickness of cell wall. The bubble and cell radius was then calculated from the relation of empirical equation and the dimensionless equation of bubble and cell radius. Later, the initial cell radius was obtained by the mass balance equation of unit cell. The ratio of initial cell radius and bubble radius could be use to predict the bubble structure in polymeric foam. When the ratio is less than 1, the foam could be an open cell structure and when the ratio is more than 1, the foam could be a close cell structure.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาอบรมสั่งสอน และดูแลการทำงานวิจัยจนกระทั่งเสร็จเรียบร้อยสมบูรณ์

ขอขอบคูนนักศึกษาภายใต้การดูแลของ ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลการทดลองเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัยของข้าพเจ้า ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากขาดข้อมูลในส่วนนี้แล้ว งานวิจัยชิ้นนี้คงไม่สำเร็จโดยแน่แท้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้การอุปการคุณ และส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มี การศึกษาที่สูง รวมถึงน้องชายและเครือญาติทุกคนที่ช่วยพรให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จเสมอ เรื่อยมา ข้าพเจ้าจะไม่ลืมที่จะตอบแทนพระคุณของทุกท่าน

หากเกิดความผิดพลาดประการใดในงานวิจัย ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้ และผู้วิจัยยินดี ให้นำข้อมูลอันจะมีประโยชน์แก่ผู้สนใจ สามารถนำไปใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้า ด้วยความ ยินดียิ่ง

พงศ์ประกาศ ปิยมโนชา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 วัสดุโฟม.....	4
2.2 การแบ่งประเภทของโฟม.....	4
2.2.1. การแบ่งประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์.....	4
2.2.2. การแบ่งประเภทโฟมตามประเภทของพลาสติก.....	5
2.2.3. การแบ่งประเภทโฟมตามลักษณะของการทำให้เกิดฟองก๊าซ.....	5
2.3 หลักการของการเกิดโฟม.....	5
2.3.1 การเกิดฟองก๊าซ.....	6
2.3.2 การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ.....	6
2.3.3 การคงสภาพของฟองก๊าซ.....	6
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	6
2.5 ทฤษฎีการขยายตัวของฟองก๊าซ.....	7
2.5.1 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพไม่จำกัดปริมาณของเหลว.....	7
2.5.2 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพจำกัดปริมาณของเหลว.....	9
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง.....	14
3.1 การผลิตโพลิเมอร์ผสมด้วยการเติมสารให้ฟองก๊าซ.....	14
3.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	14
3.1.2 การขึ้นรูปโพลิเมอร์ผสม.....	15
3.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติ และคุณลักษณะของพอลิเมอร์โพลิ.....	15
บทที่ 4 การทำนายพฤติกรรมการเกิดโพลิ.....	16
4.1 วิธีการทำนายพฤติกรรมการเกิดโพลิด้วยวิธีอย่างง่าย.....	16
4.1.1 การสร้างความสัมพันธ์เพื่อบอกแนวโน้มขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์.....	17
4.1.2 การหาขนาดเริ่มต้นของเซลล์ ( $y_0$ ).....	18
1) การหาขนาดของเซลล์เริ่มต้น ( $y_0$ ) จากผลการทดลอง.....	18
2) การหาขนาดเซลล์เริ่มต้น ( $y_0$ ) จากสมการทางทฤษฎี.....	19
4.2 การศึกษาและทำนายผลจากการเปลี่ยนอัตราส่วนและชนิดของพอลิเมอร์ผสม.....	19
ที่มีผลต่อการเกิดโพลิ	
4.2.1 เอทิลีน ไวนิลอะซิเตท และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์.....	20
4.2.2 พอลิเอทิลีน-ออกทีน และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์.....	24
4.3 การศึกษาและทำนายผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการผลิต.....	28
ต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์โพลิ	
4.3.1 พอลิยูรีเทนโพลิ.....	28
4.3.2 เอทิลีน ไวนิลอะซิเตท และยางธรรมชาติ.....	32
4.4 การศึกษาและทำนายผลจากปริมาณสารเชื่อมโยงต่อคุณสมบัติของโพลิ.....	37
พอลิเมอร์ผสม	
4.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซกับฟังก์ชัน.....	41
แสดงลักษณะของฟองก๊าซ	

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	45
5.1 สรุปขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	45
5.2 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก ก การศึกษาลักษณะทางสัญญาณวิทยา.....	49
ภาคผนวก ข ตารางค่าคงที่ของสมการคุณมวล.....	55
ภาคผนวก ค วิธีการหาค่าคงที่ของสมการคุณมวล.....	60
ภาคผนวก ง การหาความหนาแน่น.....	62
ภาคผนวก จ การหาจำนวนฟองก๊าซในเนื้อโฟม.....	63
ภาคผนวก ฉ วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตพอลิเมอร์โฟม.....	64
ภาคผนวก ช ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	71

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงอัตราส่วนต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่จะใช้ในการผลิตโฟม.....	14
3.2 แสดงอัตราส่วนต่างๆ ของสารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ผสม.....	15
4.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์โฟมเอทิลีนไวนิลอะซีเตท..... และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์	20
4.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์โฟมผสมระหว่างพอลิเอทิลีน-ออกทีน..... และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์	25
4.3 คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิยูรีเทนโฟมจากการทดลอง.....	29
4.4 คุณสมบัติของพอลิเมอร์โฟมผสมระหว่างพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตท..... และยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิต่างๆ	33
4.5 คุณสมบัติของพอลิเมอร์โฟมผสมระหว่างพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตท..... และยางธรรมชาติ ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงต่างกัน	38

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างภายในของโฟม.....	4
2.2 เปรียบเทียบลักษณะการขยายตัวของฟองก๊าซในของเหลว.....	8
4.1 แสดงนิวเคลียสของพอลิเมอร์ และฟองก๊าซในพอลิเมอร์โฟม.....	18
4.2 ภาพตัดขวางจาก SEM ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง EPDM และ EVA.....	21
4.3 ผลของปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซีเตตต่อความหนาของผนังเซลล์.....	21
4.4 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันของระยะที่พอลิเมอร์มีก๊าซละลายอยู่..... กับปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซีเตต	22
4.5 รัศมีของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	23
4.6 ขนาดของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	23
4.7 ผลของปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซีเตต ต่ออัตราส่วนของขนาด..... เซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ	24
4.8 ภาพตัดขวางจาก SEM ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างEPDMและPE-Octene.....	25
4.9 ผลของปริมาณของพอลิเอทิลีน-ออกทีนต่อความหนาของผนังเซลล์.....	26
4.10 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันของระยะที่พอลิเมอร์มีก๊าซละลายอยู่..... กับปริมาณพอลิเอทิลีน-ออกทีน	26
4.11 รัศมีของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	27
4.12 รัศมีของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	27
4.13 ผลของปริมาณพอลิเอทิลีน-ออกทีน ต่ออัตราส่วนของ..... ขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ	28
4.14 ภาพตัดขวางจาก SEM ของพอลิยูรีเทน โฟมที่อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่างกัน.....	29
4.15 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่อความหนาของผนังเซลล์..... ของพอลิยูรีเทน โฟม	30
4.16 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันของระยะที่พอลิเมอร์มีก๊าซละลายอยู่..... กับอุณหภูมิ	30
4.17 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	31
4.18 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ.....	32
4.20 ภาพตัดขวางจาก SEM ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง EVA และ NR..... โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub> เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่อุณหภูมิต่างกัน	33
4.21 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการโฟมต่อความหนาของผนังเซลล์ของ..... EVA และ NR โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub> เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง	34
4.22 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันของระยะที่พอลิเมอร์มีก๊าซละลายอยู่..... กับอุณหภูมิ	35
4.23 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	35
4.24 ขนาดของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	36
4.25 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ.....	36
4.26 ภาพตัดขวางจาก SEM ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง EVA และ NR..... โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub> เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่ปริมาณสารเชื่อมโยงต่างกัน	37
4.27 แสดงความหนาของผนังเซลล์เทียบกับปริมาณร้อยละ DCP.....	38
4.28 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันของระยะที่พอลิเมอร์มีก๊าซละลายอยู่..... กับร้อยละ DCP	39
4.29 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	40
4.30 ขนาดของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง.....	40
4.31 ผลของสารเชื่อมโยงต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้น..... กับขนาดฟองก๊าซ	41
4.32 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซกับฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ.....	42
4.33 ความเข้มข้นของก๊าซตั้งแต่ผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์..... ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (พอลิยูรีเทนโฟม)	43
4.34 ความเข้มข้นของก๊าซตั้งแต่ผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์..... ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (เอทิลีนไวนิลอะซิเตท-ยางธรรมชาติ)	43
4.35 ความเข้มข้นของก๊าซตั้งแต่ผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์..... ที่ความดันต่างกัน	44

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีการใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์โฟม หรือพลาสติก โฟมกันมากขึ้น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ ที่มีการนำวัสดุประเภทพอลิเมอร์โฟมมาใช้ เป็นชิ้นส่วนประกอบเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น พวงมาลัย ค้ำจับเกียร์ แผงคอนโซลรถ รวมถึงอุปกรณ์ตกแต่งและอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ ภายในห้องโดยสาร เป็นต้น ซึ่งผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศในรูปแบบของเครื่องจักร แต่ยังคงขาดในด้านเทคโนโลยีการผลิตที่ไม่สามารถพัฒนาได้เอง ทำให้ผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาด ขนาดย่อม เสียโอกาสในการพัฒนาศักยภาพการแข่งขัน เพื่อช่วยพัฒนาคุณภาพของสินค้า และปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เหมาะสม การทำวิจัยเพื่อสนับสนุนเทคโนโลยีการผลิต จะมีส่วนช่วยให้ผู้ประกอบการมีศักยภาพในการผลิตและการแข่งขันในตลาดเพิ่มขึ้น และสามารถต่อสู้กับการแข่งขันที่รุนแรงในตลาดโลก

ตัวอย่างความสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพอลิเมอร์โฟม เช่น ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากพอลิยูรีเทนโฟมด้วยกระบวนการฉีด มักเกิดปัญหาทางานฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ ทำให้เกิดรอยตำหนิบนผลิตภัณฑ์ หรือการฉีดเนื้อโฟมมากเกินไปทำให้เกิดเศษโฟมจากรู้นของแม่พิมพ์เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการสูญเสียวัตถุดิบ และยังเป็นการสร้างขยะพิษ หรือการควบคุมความหนาแน่นของโฟมเฉพาะส่วน เช่นบริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ เพื่อเป็นการเพิ่มอายุการใช้งาน เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้ยังต้องอาศัยการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นต้นทุนที่สูง ทำให้ผู้ประกอบการระดับเอสเอ็มอีไม่สามารถลงทุนอย่างต่อเนื่องได้ การร่วมมือกับสถานศึกษาและการได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากรัฐบาล จึงเป็นการพัฒนาความรู้ด้านการผลิตพอลิเมอร์โฟมได้เป็นอย่างดี

ปัญหาที่สำคัญที่สุดของอุตสาหกรรมพอลิเมอร์อีกอย่างหนึ่งก็คือการเกิดฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการที่ต้องมีการกำจัดก๊าซหรือสารเคมีที่ระเหยได้ง่ายออกจากพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว และกระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์ ในกระบวนการแรกต้องมีการกำจัดองค์ประกอบที่ระเหยได้ที่ปนอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวออกให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามต้องการ เพื่อให้ได้มาตรฐานความปลอดภัยต่อสุขภาพ รวมทั้งการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ ส่วนในกระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น วัสดุน้ำหนักเบา ให้ความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักวัสดุ และใช้เพิ่มความต้านทานไฟฟ้าหรือความเป็นฉนวนของวัสดุ ทั้งสองกระบวนการจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะร้อนยิ่งยวด (Superheat condition) ทำให้ห้องค์ประกอบที่ระเหยได้เปลี่ยนเป็นก๊าซเกิดเป็นนิวเคลียสของฟองก๊าซ และนิวเคลียสขยายตัวจนกลายเป็นฟองก๊าซในที่สุด

วัสดุโพลีเมอร์อาจแบ่งได้ตามขนาดของฟองก๊าซภายใน โดยขนาดของฟองก๊าซอาจมีตั้งแต่ 0.1 – 300 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นของเซลล์ตั้งแต่  $10^5 - 10^{15}$  เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เนื่องจากวัสดุโพลีเมอร์มีช่วงของคุณสมบัติค่อนข้างกว้าง ดังนั้นการศึกษาการเกิดนิวเคลียส และการขยายตัวของฟองก๊าซ จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำความเข้าใจให้ได้มากที่สุด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ที่ผลิตได้มีการกระจายตัวของฟองก๊าซสม่ำเสมอ และทำให้ยังคงคุณสมบัติความแข็งแรงเชิงกลเหมือนเดิมมากที่สุด ดังนั้นจึงได้มีการศึกษากระบวนการเกิดฟองก๊าซ และมีการนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกลไกการเกิด และการเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการเกิดฟองก๊าซ แต่ทฤษฎีดั้งเดิม (Classical Theory) ก็ยังไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง ทำให้มีความพยายามในการพัฒนารูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของการเกิดนิวเคลียส และการขยายตัวของฟองก๊าซได้

ทฤษฎีดั้งเดิมที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเกิดฟองก๊าซในพอลิเมอร์ กำหนดให้ฟองก๊าซเกิดจากนิวเคลียสที่มีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤตขึ้นไปสามารถขยายตัวได้ ส่วนนิวเคลียสที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤตจะไม่สามารถขยายตัวในสภาวะดังกล่าวได้ ทำให้ฟองก๊าซเหล่านี้ยุบตัวและหายไปมากที่สุด สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการขยายตัวของฟองก๊าซในพอลิเมอร์โพลีเมอร์ส่วนใหญ่จะกำหนดให้กระบวนการเกิดฟองก๊าซถูกควบคุมโดยกระบวนการถ่ายเทโมเมนตัม และการถ่ายเทมวลเท่านั้น ส่วนการถ่ายเทความร้อนไม่นิยมนำมาคำนวณร่วมด้วย เนื่องจากทำให้การคำนวณซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่นำการถ่ายเทความร้อนมาคำนวณร่วมด้วย

อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่ จะกำหนดให้กระบวนการเกิดฟองก๊าซเป็นการเกิดฟองก๊าซเดี่ยว (Single cell) ในของเหลวที่มีปริมาตรไม่จำกัด (Finite amount of liquid) และความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในของเหลวมีปริมาณคงที่ แต่โดยปกติการเกิดพอลิเมอร์ โพลีเมอร์ จะมีการเกิดฟองก๊าซจำนวนมากมายับไม่ถ้วนในของเหลวที่มีปริมาตรจำกัด ยิ่งไปกว่านั้นถ้าปริมาณของก๊าซที่ถูกปล่อยออกมามีไม่เพียงพอ ฟองก๊าซที่ได้ก็จะไม่สามารถขยายตัวได้เต็มที่ หรือขยายตัวไม่ได้เลย ในกระบวนการเกิดฟองความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในของเหลวจะลดลง ในขณะที่ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งกระบวนการเกิดฟองก๊าซสิ้นสุด

ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายการเกิดฟองก๊าซทรงกลมในพอลิเมอร์หลอมเหลว ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โพลีเมอร์ โดยทั่วไปลักษณะการเกิดฟองก๊าซสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์การถ่ายเทโมเมนตัม และการถ่ายเทมวลเท่านั้น ส่วนการถ่ายเทความร้อนจะมีการนำเฉพาะตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเท่านั้นมาใช้ในการคำนวณ

## 1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ทางกายภาพ และเคมี โดยวิเคราะห์จากผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อการขึ้นรูปโพลีเมอร์ และทำการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ และวิธีการคำนวณพื้นฐานเพื่อใช้ทำนายคุณสมบัติของพอลิเมอร์โพลีเมอร์

## 1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษากระบวนการเกิดพอลิเมอร์โพลีเมอร์ทางกายภาพ โดยการใส่เอโซไดคาร์โบนาไมด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตเป็นสารให้ฟองก๊าซ และกระบวนการเกิดพอลิยูรีเทนโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์โพลีเมอร์ทางเคมี นำข้อมูลผลการทดลองที่เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนค่าของตัวแปรในกระบวนการผลิตมาอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ สรุปผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

## 1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ศึกษาปัจจัยทั่วไปที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ทางกายภาพ และเคมี โดยศึกษาจากการทดลองผลิตพอลิเมอร์โพลีเมอร์ด้วยกระบวนการต่าง ๆ และผลิตที่สภาวะต่างกัน รวบรวมผลการทดลอง หรือข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายแนวโน้มของผลที่ได้ นำสมการทางคณิตศาสตร์จากวิธีการเชิงทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง รวมเป็นวิธีกึ่งการทดลอง (Semi-empirical Method) สรุปและอภิปรายผลที่ได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำนายผลกระทบจากการเปลี่ยนตัวแปรในกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ได้
2. สามารถนำสมการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้อธิบายกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ได้
3. สามารถขยายขอบเขตการใช้งานของสมการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายกระบวนการเกิดโพลีเมอร์

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 วัสดุโฟม

“วัสดุโฟม” หมายถึง วัสดุที่มีฟองก๊าซจำนวนมากแทรกและกระจายตัวอยู่ภายในเนื้อของวัสดุนั้น ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุโฟมจะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคที่เป็นของแข็ง หรือของเหลว และวัฏภาคก๊าซ ซึ่งวัฏภาคที่เป็นก๊าซจะการแทรกตัวอยู่ในวัฏภาคของแข็ง หรือของเหลว ทำให้คุณสมบัติของวัสดุนั้นเปลี่ยนไป เช่น ความหนาแน่นลดลง ความแข็งแรงเชิงกลลดลง หรือคงที่ เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่เรียกว่าพอลิเมอร์โฟมนั้น ส่วนที่เป็นวัฏภาคของแข็งอาจประกอบด้วยพอลิเมอร์หนึ่งชนิดหรือมากกว่า เช่นในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน โฟมพอลิเมอร์อาจมีลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว องค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตโฟม ระดับของการเกิดผลึก และปริมาณการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์

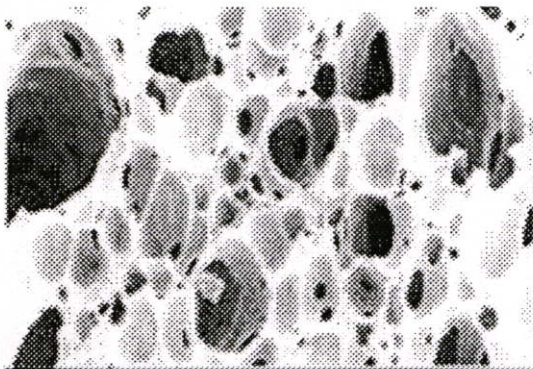
#### 2.2 การแบ่งประเภทของโฟม

##### 2.2.1. การแบ่งประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์

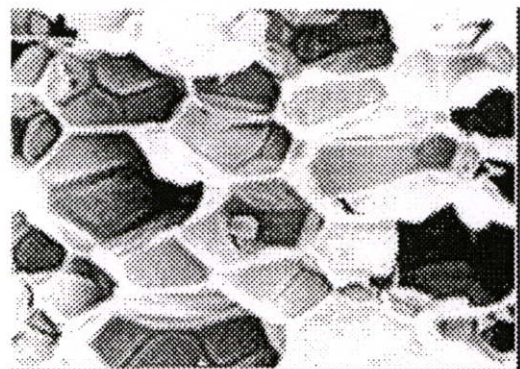
สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) โฟมแบบเซลล์เปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อเนื่องกันจนทำให้ก๊าซหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ในหมุนเวียนถึงกันได้ดังรูปที่ 2.1 (ก)

2) โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่าง หรือเซลล์ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้ก๊าซหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ในแต่ละเซลล์ไม่สามารถหมุนเวียนถึงกันได้ ลักษณะของเซลล์แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (ข)



(ก) แบบเซลล์เปิด



(ข) แบบเซลล์ปิด

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของโฟม

### 2.2.2. การแบ่งประเภทโฟมตามประเภทของพลาสติก

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) โฟมชนิดเทอร์โมเซตติง (Thermosetting foam) คือ พลาสติกโฟมที่ไม่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใหม่ได้ โฟมประเภทนี้ที่รู้จักกันดี คือ พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) ซึ่งเป็นโฟมที่เกิดจากสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นสารผสมของเหลว ได้แก่ โฟมคงรูป และโฟมยืดหยุ่น เป็นต้น

2) โฟมชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) คือ พลาสติกโฟมที่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น พอลิเอทิลีนโฟม พอลิพรอพิลีนโฟม และพอลิสไตรีนโฟม เป็นต้น

### 2.2.3. การแบ่งประเภทโฟมตามลักษณะของการทำให้เกิดฟองก๊าซ

การทำให้เกิดฟองก๊าซในกระบวนการผลิตโฟมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) วิธีทางกายภาพ (Physical Method) คือ ใช้ก๊าซความดันสูงอัดให้เกิดก๊าซแทรกในเนื้อพอลิเมอร์ที่อ่อนตัวเนื่องจากความร้อน เมื่อลดความดันลงอย่างรวดเร็วก๊าซที่แทรกตัวในพอลิเมอร์จะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดรูพรุนกระจายในพอลิเมอร์ หรือการใช้กระบวนการเชิงกล เช่นการใช้เครื่องปั่นให้อากาศแทรกตัวในพอลิเมอร์ ก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการให้พอลิเมอร์คงรูปเพื่อกักอากาศไว้ในโครงสร้างของเซลล์เกิดเป็นโฟมในที่สุด

2) วิธีทางเคมี (Chemical Method) คือ ใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปทำให้เกิดโฟมวัตถุดิบที่ใช้มักประกอบด้วยสารเคมีเหลวสองชนิดหรือมากกว่านั้น โดยชนิดหนึ่งเป็นมอนอเมอร์ หนึ่งหรือสองตัวซึ่งพร้อมจะเกิดเป็นพอลิเมอร์ อีกชนิดหนึ่งเป็นสารที่ทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดก๊าซ และก๊าซที่เกิดจะถูกกักไว้ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ในขณะที่โครงสร้างของพอลิเมอร์เริ่มอยู่ตัว ตัวอย่างเช่น พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) หรือการใช้สารเคมีที่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนผสมลงในพอลิเมอร์ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน ก๊าซซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อพอลิเมอร์

## 2.3 หลักการของการเกิดโฟม (Principles of foam formation)

การเกิดโฟม เป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางด้านฟิสิกส์และทางด้านเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่ สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นที่เข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองก๊าซ (Bubble nucleation) และ การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟม ซึ่งการเกิดโฟม มีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์ และมี

พลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันภายนอก เพื่อขยายขนาด จึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟองพองออกมา หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic instability) เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้นการเกิดนิวเคลียส ทำให้เกิดกลุ่มของฟองจำนวนมากจะได้ภายในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งวิธีการในการทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอสำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธีการ คือ การลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ กระบวนการเกิดโฟม จะประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเกิดฟองก๊าซ (Bubble formation) การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) และการคงสภาพของฟองก๊าซ (Bubble stability)

### 2.3.1 การเกิดฟองก๊าซ (Bubble Formation)

การเกิดฟองก๊าซเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยเมื่อมีการรบกวนระบบหรือก่อให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ กระบวนการดังกล่าวจะไปกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส หรือฟองก๊าซขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ นิวเคลียสเหล่านี้จะมีการเจริญเติบโตไปเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ต่อไป

### 2.3.2. การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble Growth)

หลังจากเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซขึ้นแล้ว และนิวเคลียสเหล่านี้มีการขยายขนาดเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลจากการแพร่ของก๊าซจากพอลิเมอร์เข้าไปในฟองก๊าซ และผลจากการรวมตัวกันของฟองก๊าซ (Coalescence) มากกว่า 2 ฟอง

### 2.3.3 การคงสภาพของฟองก๊าซ (Bubble Stability)

การคงสภาพของฟองก๊าซ เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม ฟองก๊าซในขั้นนี้ จะมีการคงสภาพและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด ซึ่งอาจเกิดจากสมดุลใหม่ของระบบ หรือเกิดจากการคงรูปของพอลิเมอร์

## 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถแบ่งออกตามวิธีการพัฒนา ได้ 3 ประเภท

- 1) แบบจำลองทางทฤษฎี (Theoretical models) เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนา โดยใช้หลักการทางเคมีและฟิสิกส์
- 2) แบบจำลองที่ได้จากการทดลอง (Empirical models) เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการใช้วิธีการทางสถิติวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
- 3) แบบจำลองกึ่งการทดลอง (Semi-empirical models) เป็นแบบจำลองที่อาศัยทั้งค่าตัวแปรจากแบบจำลองทางทฤษฎีและการค่าตัวแปรบางค่าจากข้อมูลการทดลอง

## 2.5 ทฤษฎีการขยายตัวของฟองก๊าซ

การขยายตัวของฟองก๊าซในพอลิเมอร์ เป็นปรากฏการณ์แยกตัวจากของก๊าซออกจากพอลิเมอร์ที่เป็นวัฏภาคของเหลว อันเนื่องมาจากการรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ จนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุลใหม่ การขยายตัวของฟองก๊าซก็จะสิ้นสุด ในขณะที่ฟองก๊าซเกิดการขยายตัวนั้น ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ไปพร้อมกัน ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของก๊าซในพอลิเมอร์จะลดลง หรือขนาดของผนังเซลล์ที่ลดลง เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เพื่อประโยชน์ในด้านวิศวกรรมการผลิต และการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์โฟม

### 2.5.1 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพไม่จำกัดปริมาณของเหลว [1]

โดยทั่วไปทฤษฎีที่อธิบายกระบวนการเกิดฟองก๊าซ จะกำหนดให้มีการเกิดฟองก๊าซเพียงฟองเดียวในของเหลวปริมาณไม่จำกัด (An Infinite Amount of Liquid) ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงสมการการที่ใช้อธิบายสภาวะดังกล่าวข้างต้น โดยกำหนดให้การเกิดฟองก๊าซอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ ดังนั้นการเกิดฟองก๊าซจึงขึ้นอยู่กับค่าการถ่ายเทโมเมนตัม และการถ่ายเทมวลเท่านั้น

กำหนดให้ความหนาแน่นของของเหลวมีค่าคงที่ และฟองก๊าซมีรูปทรงกลมสมมาตร หรือความเร็วของการขยายตัวของฟองก๊าซในแนวรัศมีเท่ากันทุกด้าน โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$v_r = \left( \frac{R}{r} \right)^2 \frac{dr}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R(t)$  คือรัศมีของฟองก๊าซ และ  $t$  คือเวลา

การไหลของพอลิเมอร์ไหลรอบฟองที่มีความหนืดสูงๆ จะมีเลขเรย์โนลด์ต่ำ ( $Re \ll 1$ ) จากสมการ Navier-Stokes กำหนดให้การไหลของพอลิเมอร์เป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และฟองก๊าซเป็นทรงกลมเท่ากันทุกด้าน นำสมการของ Navier-Stokes มารวมกับสมการของความเร็วในแนวรัศมีของของเหลว ณ จุดสมดุลที่ผิวของฟองก๊าซจะได้รับความสัมพันธ์

$$P_b - P_\infty - \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\mu}{R} \left( \frac{dR}{dt} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $P_b(t)$  คือความดันภายในฟองก๊าซ,  $P_\infty$  คือความดันภายนอก (ความดันบรรยากาศขณะทดลอง),  $\sigma$  คือความตึงผิว (Surface Tension) และ  $\mu$  คือความหนืดของของเหลว สภาวะเริ่มต้นสำหรับสมการที่ (2.2) คือ

$$R = R_0 \quad \text{ที่} \quad t = 0 \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.2) แสดงให้เห็นว่าเมื่อฟองก๊าซขยายตัว ( $dR/dt > 0$ ) ก็ต่อเมื่อรัศมีเริ่มต้นของฟองก๊าซต้องมากกว่ารัศมีวิกฤต หรือ

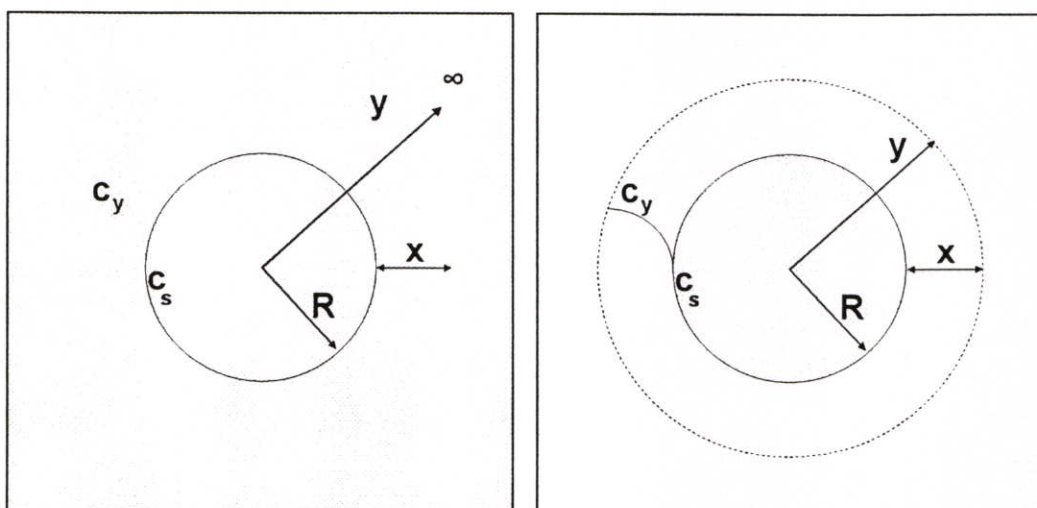
$$R_{cr} = \frac{2\sigma}{P_{b0} - P_{\infty}} \quad (2.4)$$

การทำนายสภาวะของก๊าซที่อยู่ในฟองก๊าซ มักจะใช้สมการของก๊าซอุดมคติในการคำนวณ ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากในการคำนวณ

$$P_b V = nR_g T \quad (2.5)$$

เมื่อ  $V$  คือปริมาตรของฟองก๊าซ,  $R_g$  คือค่าคงที่ของก๊าซ, และ  $T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งมีค่าคงที่

หนึ่งในปัญหาที่สำคัญของการสร้างสมการคำนวณการเกิดฟองก๊าซ คือ การกำหนดหรือประมาณค่าความดันเริ่มต้นในฟองก๊าซ ( $P_{b0}$ ) โดยอาจหาได้จากสมการสมดุลเชิงกล ในสมการที่ (2.2) โดยกำหนดให้ที่  $t=0$  จะได้  $R=R_0$ ,  $dR/dt=0$  ก็จะสามารถคำนวณความดันเริ่มต้นในฟองก๊าซได้ หรือใช้สมการที่ (2.2) เช่นกันโดยกำหนดให้ที่  $t=0$  ค่า  $R=R_{cr}$  และ  $dR/dt=0$  เมื่อรัศมีของฟองก๊าซมีค่ามากกว่ารัศมีวิกฤต ( $R_0 > R_{cr}$ ) ฟองก๊าซก็จะขยายตัวได้ แต่ถ้าฟองก๊าซมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีวิกฤต ( $R_0 < R_{cr}$ ) ฟองก๊าซก็จะไม่สามารถขยายตัวได้และยุบหายไป ดังนั้นการหาค่าตัวแปรใดๆ จากสมการ ต้องประมาณค่ารัศมีวิกฤตให้ได้ก่อนเพื่อหาค่าความดันของฟองก๊าซเริ่มต้น และนำไปใช้คำนวณในสมการต่อไป



ก) ของเหลวปริมาตรไม่จำกัด

ข) ของเหลวปริมาตรจำกัด

รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะการขยายตัวของฟองก๊าซในของเหลว

## 2.5.2 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพจำกัดปริมาณของเหลว [1]

### (A Finite Amount of Liquid)

รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดฟองก๊าซทรงกลมในของเหลวปริมาตรจำกัด และไม่จำกัด ในรูปที่ 2.2 ข) แสดงการขยายตัวของฟองก๊าซในของเหลวปริมาตรจำกัด ซึ่งโดยปกติแล้วการเกิดฟองก๊าซ จะเป็นการเกิดในพอลิเมอร์พร้อมกันทั่วทั้งก้อน ทำให้แต่ละฟองก๊าซมีขอบเขตของพอลิเมอร์ที่จะจ่ายก๊าซให้จำกัด ซึ่งแสดงด้วยเส้นประสีแดงได้จากรูปที่ 2.2 ข) ขอบเขตนี้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง แต่อาจประมาณได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยในส่วน  $0 \leq r \leq R(t)$  คือส่วนที่ฟองก๊าซจะขยายตัวออก และในส่วน  $R(t) \leq r \leq y(t)$  คือส่วนของ พอลิเมอร์รอบๆ ฟองก๊าซโดย  $y(t) = R(t) + x(t)$  ซึ่งในกรณีการเกิดฟองก๊าซในของเหลวที่มีปริมาตรไม่จำกัดนั้นจะพบว่าขอบเขตดังกล่าวมีค่าไม่จำกัด ( $y \rightarrow \infty$ )

กำหนดให้ความเข้มข้นของก๊าซจากองค์ประกอบที่ระเหยได้มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเข้มข้นในส่วนที่เป็นของเหลว ดังนั้นจึงสามารถกำหนดให้ความหนาแน่นของวัฏภาคของของเหลวมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ จากรูปที่ 2.2 ข) เมื่อกำหนดให้มวลรวมในหน่วยเซลล์มีค่าคงที่ จะสามารถเขียนสมการดุลมวลได้ดังสมการที่ 2.6

$$\rho_{bo} \frac{4}{3} \pi R_o^3 + \rho_L \frac{4}{3} \pi (y_o^3 - R_o^3) = \rho_b \frac{4}{3} \pi R^3 + \rho_L \frac{4}{3} \pi (y^3 - R^3) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\rho_b$  คือความหนาแน่นของก๊าซ (ไม่คงที่)  $\rho_L$  คือความหนาแน่นของของเหลว (คงที่)  $y$  คือรัศมีของเซลล์  $R$  คือรัศมีของฟองก๊าซ และตัวห้อย 0 คือสถานะที่  $t = 0$

หรือเขียนสมการดุลมวลในหน่วยของจำนวนโมล จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.7

$$(n_o - n) + \frac{4}{3} \pi [(y_o^3 - R_o^3) c_{ave}(0) - (y^3 - R^3) c_{ave}(t)] = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อ  $c_{ave}(0), c_{ave}(t)$  คือความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในวัฏภาคของของเหลวที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลาใด ๆ ตามลำดับ และ  $n$  คือจำนวนโมลรวม

จากสมการ 2.7 มวลขององค์ประกอบที่ระเหยได้จะมีค่าคงที่เสมอในหนึ่งหน่วยเซลล์ อินทิเกรตสมการดุลมวลขององค์ประกอบที่ระเหยได้เป็น

$$(n_o - n) + \frac{4}{3} \pi (y_o^3 - R_o^3) c_{ave}(0) - \int_R^{R+x} 4\pi R^2 c dr = 0 \quad (2.8)$$

ในกระบวนการกำจัดก๊าซออกจากพอลิเมอร์หลอมเหลว จะให้ความสนใจสมการที่มีเทอมของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในวัฏภาคของของเหลว ดังสมการที่ 2.8 แต่

ในทางกลับกัน ในการผลิตโฟมพอลิเมอร์ก็จะสนใจเทอมของความหนาแน่นในหนึ่งหน่วยเซลล์ โดยอาจละมวลงของก๊าซได้เมื่อเทียบกับมวลของพอลิเมอร์ จะได้ว่า

$$\rho_{cell} = \rho_L \left[ 1 - \left( \frac{R}{y} \right)^3 \right] \quad (2.9)$$

จากรูปที่ 2.2 ข) การวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในขอบเขตของพอลิเมอร์ที่อยู่รอบ ฟองก๊าซ ไม่สามารถวัดได้ด้วยการทดลอง ดังนั้น Rosner และ Epstein [15] ได้นำเสนอสมการที่ แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่เป็นฟังก์ชันพาราโบลาดังสมการที่ 2.10

$$\frac{c_y - c}{c_y - c_s} = (1 - \eta)^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ 
$$\eta = \frac{r - R}{x} \quad (2.11)$$

ตัวแปร  $\eta$  หมายถึงระยะตั้งแต่ผนังฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์ จากสมการที่ 2.11 เมื่อ กำหนดค่าของตัวแปร  $R \leq r \leq y$  และ  $x = y - R$  ตัวแปร  $\eta$  จะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง ( $0 \leq \eta \leq 1$ ) โดยที่  $\eta$  เท่ากับศูนย์ คือระยะที่ผนังของฟองก๊าซ และ  $\eta$  เท่ากับหนึ่ง คือระยะที่ ผนังของเซลล์

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Favelukis [1] ได้นำเสนอแบบจำลองการขยายตัวของฟองก๊าซทรงกลมสมมาตรใน ของเหลวที่มีปริมาตรจำกัด การขยายตัวของฟองก๊าซจะถูกควบคุมโดยกระบวนการถ่ายเท โมเมนตัม และการถ่ายเทมวลเท่านั้น เมื่อกำหนดลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ องค์ประกอบที่ระเหยได้ในพอลิเมอร์เป็นฟังก์ชันพาราโบล่า ทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าตัวแปร ต่าง ๆ ในกระบวนการได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสามารถนำมาทำนายการขยายตัวของฟอง ก๊าซ องค์ประกอบที่ระเหยได้ที่ลดลงต่อเวลา และความหนาแน่นของเซลล์ที่ลดลงต่อเวลา สมการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้คำนวณในอุตสาหกรรมจริงได้ เช่น การกำจัดองค์ประกอบ ที่ระเหยได้ในพอลิเมอร์หลอมเหลว หรือการผลิตโฟมที่มีการเกิดฟองก๊าซพร้อมกันทั่วทั้งโฟม

Ki Yong Kim และคณะ [2] ได้ศึกษาและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานของ แบบจำลองกลุ่มโมเลกุล (Molecular cluster model) เพื่อทำนายการเกิดฟองก๊าซในพลาสติกชนิด ยืดหยุ่น (Elastomer) และพอลิเมอร์ทั่วไป ซึ่งฟองก๊าซจะเกิดจากนิวเคลียสที่มีขนาดเท่ากับขนาด วิกฤต และสามารถเอาชนะแรงต้านการขยายตัวได้ แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายจำนวน ฟองก๊าซได้แม่นยำเกี่ยวกับผลการทดลอง ส่วนในกรณีการขยายตัวของฟองก๊าซที่มีขนาดวิกฤต

โดยกระบวนการแพร่ในตัวกลางที่มีความหนืดและยืดหยุ่น (Viscoelastic) จะพัฒนาแบบจำลองด้วยวิธีการอินทิกรัลขอบเขตของความเข้มข้น ซึ่งเมื่อนำแบบจำลองมาคำนวณขนาดของเซลล์พบว่าจะขึ้นอยู่กับความดันเริ่มต้น และผลการคำนวณก็มีแนวโน้มเดียวกับการทดลองแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้อธิบายกระบวนการผลิตไมโครเซลล์ลาร์โพม

Deming Mao [3] และคณะ ได้ทำการศึกษาเทคนิค Influence volume approach (IVA) ซึ่งมีจะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองการถ่ายโอนมวลของการขยายตัวของฟองก๊าซในกระบวนการเกิดโพมทางกายภาพ อย่างไรก็ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของวิธีการ IVA นี้จะใช้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์ในปริมาณน้อย ๆ (น้อยกว่าร้อยละ 5) คณะผู้วิจัยได้นำเสนอแบบจำลองการเกิดฟองก๊าซในกระบวนการเกิดโพมทางกายภาพแบบ 2 ชั้น โดยในขั้นตอนแรกการเกิดฟองก๊าซจะถูกกำหนดให้เกิดภายใต้สภาวะการขยายตัวอย่างอิสระ ความดันลดในฟองก๊าซเกิดจากความดันอ้อมตัวยั้งยวดในระบบความเข้มข้นของก๊าซในชั้นนี้เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในชั้นที่สองการขยายตัวของฟองก๊าซจะเกิดภายใต้สภาวะที่ถูกจำกัด ความเข้มข้นของก๊าซจะเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์จะหมดไป การเกิดฟองก๊าซในชั้นแรกจะเป็นการเกิดนิวเคลียสซึ่งเป็นการเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ในชั้นที่สองจะเป็นการขยายตัวของฟองก๊าซ ซึ่งใช้เวลามากกว่า ฟองก๊าซส่วนใหญ่จึงเกิดในชั้นที่สอง และในงานวิจัยนี้ยังคำนึงถึงความแตกต่างของความเข้มข้นในผนังเซลล์ ซึ่งแบบจำลองอื่นมักจะละเลยส่วนนี้อีกด้วย

Sameer P. Nalawade และคณะ [4] ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical carbon dioxide) เป็นตัวทำละลายในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ เช่น การปรับปรุงคุณภาพพอลิเมอร์ การผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิต การผสมพอลิเมอร์ การผลิตไมโครเซลล์ลาร์โพม การผลิตสารระดับอนุภาค และกระบวนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซิ่น จากคุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่มีค่าการแพร่ใกล้เคียงก๊าซ แต่มีความหนาแน่นใกล้เคียงของเหลว ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถใช้แทนตัวทำละลายที่ใช้กันทั่วไปได้ และยังมีพิษอีกด้วย แม้ว่าจะมีพอลิเมอร์ไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่สามารถละลายได้ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต แต่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตกลับละลายในพอลิเมอร์หลอมเหลวได้หลายชนิด ซึ่งอาจสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพ แต่การใช้เครื่องมือ FT-IR จะช่วยให้เห็นถึงการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์ได้ดีกว่า จากงานวิจัยจำนวนมาก รวมถึงสมการสภาวะ (Equation of state) แสดงให้เห็นว่าสามารถทำนายค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์จะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง ในขณะที่คุณสมบัติบางอย่างดีขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปจึงทำหน้าที่คล้ายสารเติมแต่ง หรือพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนตัวทำละลาย ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการ

รวบรวมทฤษฎี และการทดลองเกี่ยวกับค่าการละลายและค่าความหนืดของพอลิเมอร์ หลายชนิด ที่มีการประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตในกระบวนการผลิต

S.L. Everitt และคณะ [5] ศึกษาผลกระทบของความหนืดและความยืดหยุ่นของของเหลวต่อการเกิดฟองก๊าซในพอลิเมอร์โฟมในกระบวนการผลิตแบบเกิดปฏิกิริยา และไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในกรณีที่มีการผลิตโฟมไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี การขยายตัวของฟองก๊าซจะถูกควบคุมโดยการแพร่ของก๊าซ และคุณสมบัติของของเหลว ส่วนการเกิดฟองก๊าซในพอลิเมอร์กรณีที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี จะเริ่มด้วยการเจริญเติบโตพอลิเมอร์เป็นโซ่ โซ่กิ่ง และเกิดการเป็นเจลในขณะที่มีการเกิดก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงของปฏิกิริยาเคมี จากสมการ Newtonian และแบบจำลอง Oldroyd-B ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการเกิดก๊าซ การแพร่ของก๊าซในของเหลว และการขยายตัวของฟองก๊าซควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงความเครียดของพอลิเมอร์

Ogawa และคณะ [6] ทำการทดลองผลิตโฟมพอลิสไตรีนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารให้ฟองก๊าซทางกายภาพ พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟองก๊าซ และเวลาที่ใช้ในขณะที่ลดความดันที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกว่าความสัมพันธ์ของเวลา (ที่ใช้ลดความดัน) กับอุณหภูมิ (ที่ใช้ในกระบวนการโฟม) ในกระบวนการผลิตโฟมทางกายภาพ ในงานวิจัยนี้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายคุณลักษณะของโฟมเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง และผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว และมีการลดความดันลงอย่างรวดเร็ว (เวลาที่ใช้ในการลดความดันสั้น) ความหนืดของพอลิเมอร์จะเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของฟองก๊าซกับเวลาที่ใช้ลดความดัน และเส้นกราฟที่มีการเลื่อนตำแหน่งจะเป็นผลจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิ

Satish K. Goale และ Eric J. Beckman [7] ทดลองผลิตไมโครเชลลูลาร์โฟมจาก พอลิเมทิล เมทาอะครีเลต (Polymethyl methacrylate: PMMA) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตเป็นสารกระตุ้นให้เกิดการแยกวัฏภาค ซึ่งกระบวนการผลิตดังกล่าวจะแตกต่างกับกระบวนการโดยทั่วไป คือกระบวนการโดยทั่วไปจะใช้วิธีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ ในขณะที่การใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะเป็นการลดอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ และยังเป็น การเติมสารให้ฟองแก่พอลิเมอร์ไปพร้อมกันอีกด้วย กระบวนการผลิตโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นไมโครเชลลูลาร์โฟมที่มีผิวเรียบ ไม่มีรูพรุนภายนอก เซลล์ที่ได้มีขนาด 0.5-15 ไมครอน ความหนาแน่น 0.4-0.9 กรัมต่อลบ.ซม. เทียบกับพอลิเมอร์ก่อนทำการโฟมที่ 1.2 กรัมต่อลบ.ซม. ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของโฟม เช่น ความดันอิมพัลส์ อุณหภูมิ การเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ และเวลาอิมพัลส์ของก๊าซในพอลิเมอร์ จากทฤษฎีแบบดั้งเดิม (Classical theory) แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของเซลล์จะเพิ่มขึ้น (ขนาดของเซลล์ลดลง) อย่างรวดเร็วเมื่อความดันใน

การผลิตโฟมสูงกว่า 13.79 เมกกะพาสคัล และเริ่มคงที่ที่ความดัน 27.59 เมกกะพาสคัล ในขณะที่อุณหภูมิในกระบวนการผลิตจะมีผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความดัน

S.G. Kim และคณะ [8] ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง (Thermoplastic vulcanization: TPV) ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการผสมเทอร์โมพลาสติกกับยางที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน หรือปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เพื่อให้ง่ายเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนเป็นสารให้ฟองก๊าซ และใช้กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องฉีดพลาสติกแบบสกรูเดี่ยว ผลการทดลองพบว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการผลิตจะทำให้ได้โฟมที่มีอัตราการขยายตัวดีกว่า โครงสร้างของเซลล์ละเอียดและมีผิวเรียบ

Min-Su Kim และคณะ [9] ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์โฟมผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วนต่างกัน และใช้สารเชื่อมโยงร้อยละ 0.6 ของน้ำหนักยาง รวมถึงผลกระทบของการเปลี่ยนอุณหภูมิในกระบวนการผลิตโฟม จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทต่อยางธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในกระบวนการโฟมเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด มีความสามารถในการคืนสภาพ และความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด

ณรงค์ และคณะ [10] ทำการศึกษากระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมในอุตสาหกรรมผลิตพวงมาลัยรถยนต์เพื่อลดปริมาณของเสียจากรัดในกระบวนการผลิต โดยมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม และแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานต่าง ๆ ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการขยายตัวของฟองก๊าซ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสามารถนำมาทำนายการเปลี่ยนแปลงการเกิดฟองก๊าซในพอลิยูรีเทนโฟมได้ ซึ่งเป็นผลให้การปรับปรุงกระบวนการผลิตทำได้แม่นยำมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาคุณภาพของพอลิยูรีเทนโฟมให้ตรงกับความต้องการได้ดียิ่งขึ้น

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 การผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ผสมด้วยการเติมสารให้ฟองก๊าซ

การผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ผสม ในขั้นแรกจะเป็นการผสมพอลิเมอร์ที่ต้องการจำนวนสองชนิด รวมทั้งมีการเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ และเติมสารให้ฟองก๊าซซึ่งเป็นสารเคมีที่จะสลายตัวให้ก๊าซบางชนิดเพื่อให้เกิดก๊าซแทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการโฟมผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) จะได้พอลิเมอร์ผสมที่พร้อมจะนำไปเข้าสู่กระบวนการโฟม จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ไปเข้ากระบวนการขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องขึ้นอัดรีดแบบร้อน จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการขยายตัวค่อนข้างสูง วิธีการทดลองมีดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

- 1) ชั่งพอลิเมอร์ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 แบ่งไว้เป็นชุดจำนวน 8 ชุด
- 2) อุณหภูมิของเครื่องผสมแบบอัดรีดชนิด 2 ลูกกลิ้ง ให้มีอุณหภูมิประมาณ 90 °ซ
- 3) ใส่เอทิลีนไวนิลอะซิเตท ลงไประหว่างลูกกลิ้งแล้วรอให้ เอทิลีนไวนิลอะซิเตทละลาย และพันรอบลูกกลิ้งจึงผสมเอทิลีน-พรอพิลีน หรือพอลิเอทิลีน-ออกทีน ลงไป ทำการกรีดและพับแผ่นพอลิเมอร์ไปมาเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมกันได้อย่างทั่วถึง จากนั้นใส่สารเติมแต่งตามตารางที่ 3.2 ลงไป โดยช่วงเวลาในการเทส่วนผสมในแต่ละส่วน จะห่างกันประมาณ 2-3 นาที ลูกกลิ้งจะรีดส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นแผ่นบางและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยผู้ทำการทดลองจะต้องกรีดแผ่นพอลิเมอร์ผสมนี้แล้วพับกลับไปตามตลอดเวลาที่ทำการผสม ใช้เวลาทั้งหมดในการผสม พอลิเมอร์และสารเคมีให้เข้ากันประมาณ 30 นาที ต่อการผสม 1 ชุด (Batch)
- 4) เมื่อพอลิเมอร์และสารเคมีผสมเข้ากันดีแล้ว ปรับความหนาของลูกกลิ้งที่ความกว้างประมาณ 3 มิลลิเมตรเพื่อรีดพอลิเมอร์ผสมออกเป็นแผ่น ผึ่งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วน ของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตโฟม

สารเคมี	ชุดที่ (ร้อยละโดยมวล)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
EVA (18% Vinyl acetate content)	-	-	-	-	10	30	50	70
EPDM	10	30	50	70	90	70	50	30
PE-Octene	90	70	50	30	-	-	-	-

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วน ของสารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ผสม

สารเคมี	phr
Silica (SiO <sub>2</sub> )	5
Zinc Oxide (ZnO)	2
Zinc Stearate (Zn-St)	2
Stearic Acid	2
Dicumyl Peroxide (DCP)	1
Azo dicarbonamide (AZ)	5
Carbon black Master Batch (50% content)	30

### 3.1.2 การขึ้นรูปโฟมพอลิเมอร์ผสม

- 1) ชั่งพอลิเมอร์ผสม โดยให้มีน้ำหนักประมาณ 140 กรัม เพื่อบรรจุลงในแม่พิมพ์โดยแม่พิมพ์ที่ใช้มีขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 16.7 x 20.8 x 0.5 เซนติเมตร
- 2) นำพอลิเมอร์ผสมที่ชั่งแล้วใส่เข้าเครื่องอัดรีดแบบร้อน โดยปรับความดัน 13.20 เมกกะปาสคาล และอุณหภูมิประมาณ 150 °ซ ใช้เวลาอบประมาณ 15 นาที เมื่อเปิดแม่พิมพ์ออกจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์โฟมที่ขยายตัวอยู่บนแม่พิมพ์
- 3) บันทึกขนาดความกว้าง ยาว และหนาของพอลิเมอร์โฟม นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละการขยายตัวเทียบกับปริมาตรของพอลิเมอร์ก่อนผ่านกระบวนการขึ้นรูปโฟม
- 4) ขึ้นรูปโฟมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิเมอร์ชุดอื่น ๆ ดังที่ได้เตรียมมาแล้วข้างต้น

### 3.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติ และคุณลักษณะของพอลิเมอร์โฟม

- 1) นำพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปโฟมเรียบร้อยแล้วมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 1 x 1 ซม. จำนวน 5 ชิ้น ต่อโฟม 1 แผ่น นำไปวัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ตามภาคผนวก ง บันทึกและหาค่าเฉลี่ย
- 2) ตัดโฟมให้มีขนาดประมาณ 0.5 x 3 ซม. นำไปแช่ในโตรเจนเหลวประมาณ 1 ซม. เพื่อให้โฟมแข็งตัว และเปราะ นำโฟมชิ้นและใช้คีมจับปลายทั้งสองด้านของชิ้นโฟมแล้วหัก เก็บชิ้นโฟมในช่องพลาสติกเพื่อนำไปศึกษาลักษณะทางสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามภาคผนวก ก
- 3) นำภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาวัดขนาดฟองก๊าซ และขนาดเซลล์ของโฟม โดยบันทึกและหาค่าเฉลี่ยจากหลาย ๆ ตำแหน่งของภาพเพื่อลดความคลาดเคลื่อน

## บทที่ 4

### การทำนายพฤติกรรมการเกิดโพลีเมอร์

#### 4.1 วิธีการทำนายพฤติกรรมการเกิดโพลีเมอร์ด้วยวิธีอย่างง่าย

ในงานวิจัยนี้จะใช้การทำนายพฤติกรรมการเกิดโพลีเมอร์ด้วยวิธีการอย่างง่าย (Semi-Empirical Method) ซึ่งเป็นการนำตัวแปรจากแบบจำลองทางทฤษฎี และข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาประกอบการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการเกิดพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์โพลีเมอร์ ทำให้สามารถนำสมการดังกล่าวมาอธิบายกลไกการเกิดโพลีเมอร์ และทำนายลักษณะของโพลีเมอร์ที่ผลิตได้

การทำนายการเกิดโพลีเมอร์ด้วยวิธีการดังกล่าว ทำได้โดยการทดลองผลิตพอลิเมอร์โพลีเมอร์ในสภาวะ หรือมีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการผลิต เช่น ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ผลจากการเปลี่ยนชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ผสม ผลจากปริมาณของสารเชื่อมโยง ผลจากชนิดและปริมาณของสารให้พอลิเมอร์ เป็นต้น นำพอลิเมอร์โพลีเมอร์ที่ผลิตได้ไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อหาขนาดของพอลิเมอร์ ขนาดของเซลล์ และความหนาของผนังเซลล์ นำข้อมูลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์โพลีเมอร์ ที่เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนตัวแปรใด ๆ ในการศึกษา ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อาจอยู่ในรูปของสมการอย่างง่าย (Empirical equation) เช่น สมการเส้นตรง (Linear function equation) หรือ สมการพอลิโนเมียล (Polynomial function equation) เป็นต้น ตัวอย่างเช่น

$$Y = aX + b \quad (4.1)$$

หรือ 
$$Y = aX^2 + bX + c \quad (4.2)$$

ในงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเซลล์ ขนาดของพอลิเมอร์ และความหนาของผนังเซลล์ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โพลีเมอร์ นำข้อมูลผลการทดลองมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และใช้แบบจำลองทางทฤษฎีในการทำนายโครงสร้างของเซลล์ที่เกิดขึ้น

4.1.1 การสร้างความสัมพันธ์เพื่อบอกแนวโน้มขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์

ในขั้นแรกให้นำค่าความหนาของผนังเซลล์ ( $x$ ) ที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มาเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์ และตัวแปรในการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลง ( $a$ ) เช่น อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น จากนั้นเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ หรือสมการอย่างง่าย ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 4.3

$$x = f_1(a) \tag{4.3}$$

เมื่อ  $x$  = ความหนาของผนังเซลล์  
 $a$  = ตัวแปรในการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลง

สมการที่ 4.3 เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์กับตัวแปร  $a$  เท่านั้น เมื่อนำสมการที่ 4.3 มาแทนค่าของตัวแปร  $a$  และทำการคำนวณจะได้ผลลัพธ์เพียงค่าความหนาของผนังเซลล์ ( $x$ ) แต่ยังไม่สามารถคำนวณหาขนาดฟองก๊าซ ( $R$ ) และขนาดของเซลล์ ( $y$ ) ได้ ดังนั้นจึงต้องหาสมการทางคณิตศาสตร์อีกอย่างน้อย 1 สมการ เพื่อช่วยในการหาค่าของตัวแปรที่เหลือ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้สร้างสมการดังกล่าวขึ้นมา โดยกำหนดตัวแปรไร้หน่วย  $\lambda$  ที่เป็นฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซดังแสดงในสมการที่ 4.4 และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ กับตัวแปรในการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลง ( $a$ ) สามารถแสดงเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้เช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$\lambda = \frac{y^3 - R^3}{R^3} \tag{4.4}$$

$$\lambda = \frac{y^3 - R^3}{R^3} = f_2(a) \tag{4.5}$$

เมื่อ  $R$  = รัศมีของฟองก๊าซ  
 $y$  = รัศมีของเซลล์

จากความสัมพันธ์รัศมีของเซลล์เท่ากับรัศมีของฟองก๊าซรวมกับความหนาของผนังเซลล์ ( $y = R + x$ ) นำความสัมพันธ์นี้แทนค่าลงในสมการที่ 4.5 ทำการจัดรูปสมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ 4.6 เพื่อให้สามารถคำนวณหารัศมีของฟองก๊าซ และนำไปคำนวณหารัศมีของเซลล์ได้ต่อไป

$$R = \frac{f_1(a)}{(f_2(a) + 1)^{1/3} - 1} \tag{4.6}$$

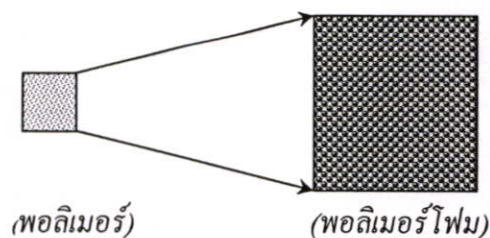
#### 4.1.2 การหาขนาดเริ่มต้นของเซลล์ ( $y_0$ )

โดยทั่วไปในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์โพนั้น จะอยู่ในรูปของการเกิดฟองก๊าซจำนวนมากในของเหลวที่มีปริมาตรปริมาตรจำกัด ซึ่งการที่ฟองก๊าซแต่ละฟองจะขยายตัวได้ จะต้องได้รับก๊าซที่แพร่จากพอลิเมอร์ที่อยู่บริเวณโดยรอบ ซึ่งระยะดังกล่าวจะมีค่าจำกัด เพราะในกระบวนการเกิดโพนจะมีฟองก๊าซจำนวนมากในระบบเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน การหาระยะที่ก๊าซจะแพร่จากพอลิเมอร์เข้าสู่ฟองก๊าซในขณะเริ่มต้น จะทำให้สามารถทำนายปริมาณก๊าซที่จะแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซได้ จากกระบวนการถ่ายเทก๊าซนี้เอง ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซในพอลิเมอร์ลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ฟองก๊าซขยายตัวใหญ่ขึ้น จนกระทั่งความเข้มข้นของก๊าซในพอลิเมอร์ และฟองก๊าซมีค่าเท่ากัน หรืออยู่ในสมดุล การขยายตัวของฟองก๊าซก็จะสิ้นสุด หรือไม่เกิดการขยายตัวของฟองก๊าซอีกต่อไป

##### 1) การหาขนาดของเซลล์เริ่มต้น ( $y_0$ ) จากผลการทดลอง

ในขณะที่ฟองก๊าซเกิดการขยายตัว จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ พอลิเมอร์จะมีการขยายตัวเนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดภายในเนื้อของพอลิเมอร์มีการขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้พอลิเมอร์เกิดรูพรุนจำนวนมาก และเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์โพนในที่สุด จากกระบวนการนี้เองทำให้สามารถประมาณปริมาตรของพอลิเมอร์ที่จะจ่ายก๊าซให้แต่ละฟองก๊าซที่เวลาเริ่มต้นได้ โดยการกำหนดให้ฟองก๊าซหนึ่งฟอง เกิดจากนิวเคลียสหนึ่งนิวเคลียส ดังนั้นเมื่อทำการหาจำนวนฟองก๊าซทั้งหมดในพอลิเมอร์โพนที่ผลิตได้ ก็จะทราบจำนวนนิวเคลียสทั้งหมดเช่นกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1 เมื่อนำปริมาตรเริ่มต้นของพอลิเมอร์หารด้วยจำนวนนิวเคลียสทั้งหมด ก็จะทราบปริมาตรของพอลิเมอร์ต่อหนึ่งนิวเคลียส และโดยการกำหนดให้ปริมาตรของพอลิเมอร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นทรงกลม จะสามารถหาขนาดของเซลล์เริ่มต้นได้ด้วยสมการปริมาตรทรงกลมดังสมการที่ 4.7

วิธีการหาขนาดของเซลล์เริ่มต้นด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสาเหตุสามประการ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากการนับจำนวนเซลล์ในโพน การกำหนดให้จำนวนนิวเคลียสของฟองก๊าซเท่ากับจำนวนฟองก๊าซในโพนที่นับได้โดยไม่คำนึงถึงการรวมกันของฟองก๊าซ และการกำหนดให้ปริมาตรของแต่ละนิวเคลียสเป็นทรงกลม



รูปที่ 4.1 แสดงนิวเคลียสของพอลิเมอร์ และฟองก๊าซในพอลิเมอร์โพน

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (4.7)$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของวัตถุทรงกลม

$R$  = รัศมีของวัตถุทรงกลม

## 2) การหาขนาดเซลล์เริ่มต้นจากสมการทางทฤษฎี

จากสมการคูลอมวลาภายในหนึ่งเซลล์ของพอลิเมอร์ก่อนและหลังกระบวนการโฟม ที่นำเสนอไว้โดย Favelukis [1] ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์อยู่ในเทอมของความหนาแน่นคูณกับปริมาตร และโดยการกำหนดให้ฟองก๊าซ และเซลล์ของโฟมมีลักษณะเป็นทรงกลม ก็จะสามารถหาขนาดของเซลล์เริ่มต้นได้

$$\rho_{bo} \frac{4}{3}\pi R_o^3 + \rho_L \frac{4}{3}\pi (y_o^3 - R_o^3) = \rho_b \frac{4}{3}\pi R^3 + \rho_L \frac{4}{3}\pi (y^3 - R^3) \quad (2.6)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการทำนายลักษณะของฟองก๊าซที่สภาวะเริ่มต้น โดยใช้สมการคูลอมวลาดังกล่าวจะต้องทำการหาค่าของตัวแปรอื่น ๆ เพิ่มเติม และใช้ค่าของรัศมีของฟองก๊าซ และรัศมีของเซลล์ที่คำนวณได้จากวิธีการในหัวข้อ 4.1.1 มาใช้ในการคำนวณ

## 4.2 การศึกษาและทำนายผลจากการเปลี่ยนอัตราส่วนและชนิดของพอลิเมอร์ผสม ที่มีผลต่อการเกิดโฟม

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนและชนิดของพอลิเมอร์ผสมโดย นรินทร์ และคณะ [13] พบว่าการเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตโฟม จะมีผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมที่ผลิตได้ ทำให้ขนาดของเซลล์ และขนาดของฟองก๊าซที่ได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ จากนั้นนำค่าความหนาของผนังเซลล์ ขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์จากการทดลองมาทำการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงที่เกิด และใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายแนวโน้มการเกิดโฟมที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกัน

#### 4.2.1 เอทิลีนไวนิลอะซิเตท และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์

โพลิเมอร์จากพอลิเมอร์ผสมเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA) และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์ (EPDM) มีลักษณะของฟองก๊าซเป็นชนิดเซลล์ปิด มีการกระจายตัวสม่ำเสมอที่ อัตราส่วนของเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์ ร้อยละ 70 และ 90 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ ถ้ามีอัตราส่วนของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ร้อยละ 30 แล 50 โดยน้ำหนัก โพลิเมอร์จะมีการกระจาย ตัวของขนาดของฟองก๊าซไม่ค่อยดี มีแนวโน้มเกิดฟองก๊าซชนิดเซลล์เปิด และฟองก๊าซมีขนาด ใหญ่ ภาพถ่ายขยายของพอลิเมอร์โพลิที่ได้จากการทดลอง และคุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 4.2 และตาราง 4.1

ตาราง 4.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของโพลิเมอร์ผสม EVA / EPDM

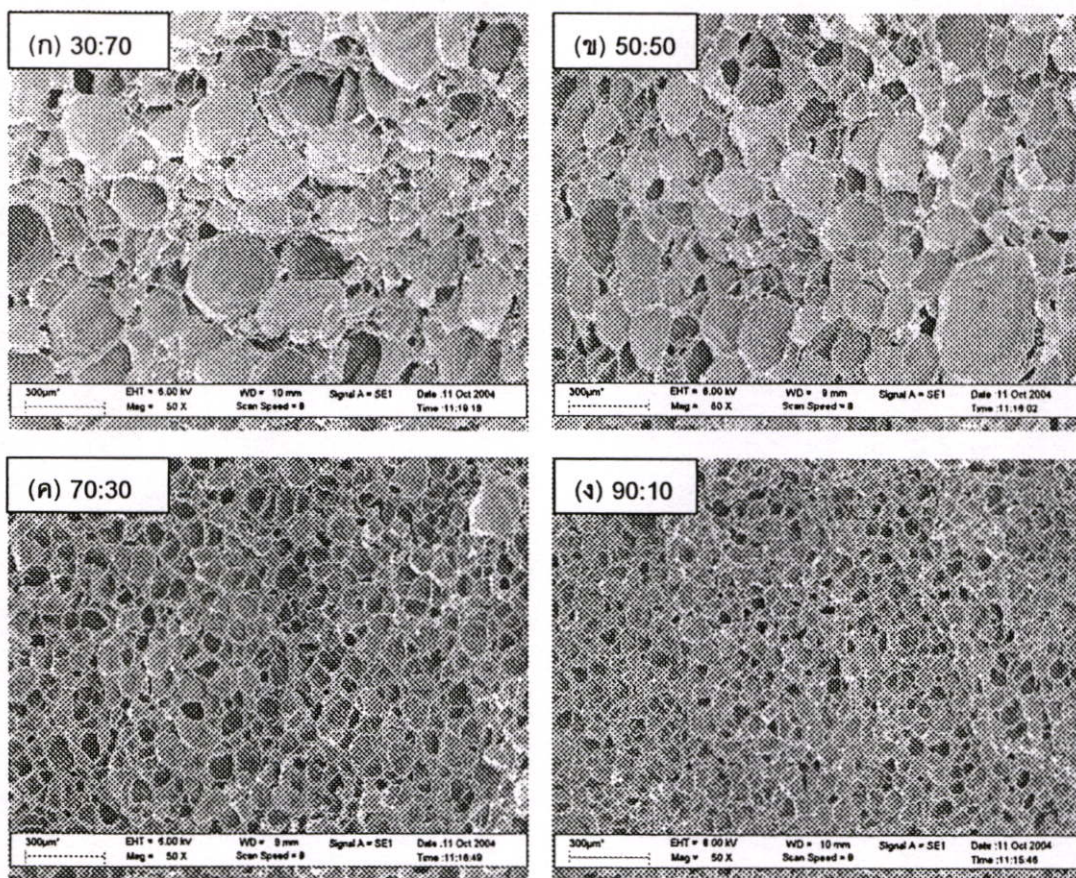
คุณสมบัติ	ร้อยละเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	10	30	50	70
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)	45	50	113	164
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ (ไมโครเมตร)	65	70	131	178
ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิเมอร์ (กรัม/ลบ.ซม.)	0.856	0.887	0.951	0.969
ความหนาแน่นเฉลี่ยของโพลิ (กรัม/ลบ.ซม.)	0.317	0.214	0.101	0.082
อัตราการขยายตัว (เท่า)	2.7	4.1	9.4	11.8
จำนวนฟองก๊าซ (ฟอง/ลบ.ซม.)	$1.4 \times 10^5$	$1.5 \times 10^5$	$7.9 \times 10^4$	$5.6 \times 10^4$

เมื่อนำความหนาของผนังเซลล์ที่ได้มาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์ กับร้อยละของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท พบว่าได้กราฟเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.3 และเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.8

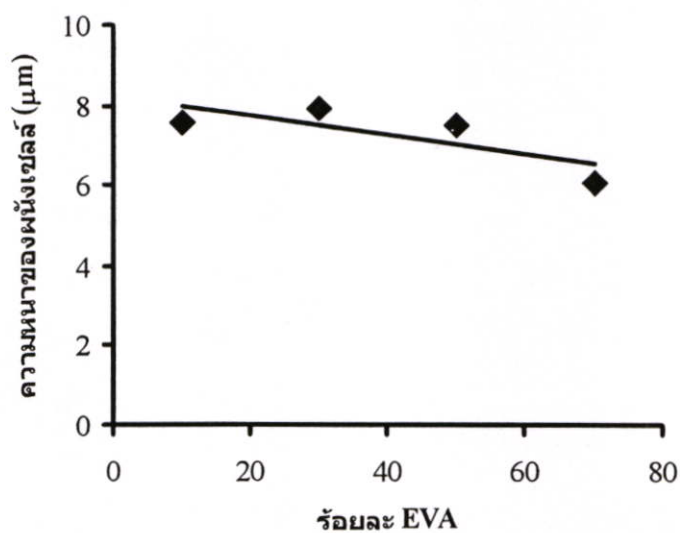
$$x = -0.0236A + 8.2045 \quad (4.8)$$

เมื่อ  $x$  = ความหนาของผนังเซลล์ โดย  $x = y - R$

$A$  = ร้อยละเอทิลีนไวนิลอะซิเตท



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง EPDM / EVA เป็นร้อยละโดยน้ำหนัก และใช้ไอโซไซโคคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 150 °ซ ความดัน 13.20 เมกะปาสคาล ใช้เวลาอบ 15 นาที



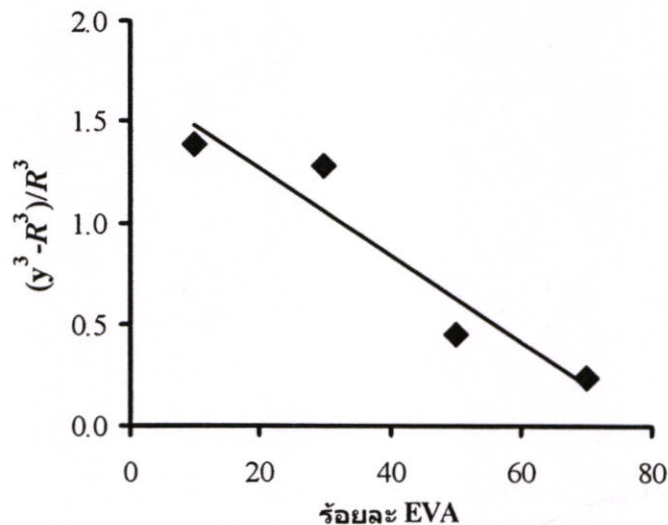
รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณของ EVA ต่อความหนาของผนังเซลล์

จากนั้นนำสมการที่ 4.4 ซึ่งเป็นสมการที่จะช่วยสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\lambda$  กับร้อยละของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.4 และเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.9

$$\lambda = \frac{y^3 - R^3}{R^3} = -0.0212A + 1.6871 \quad (4.9)$$

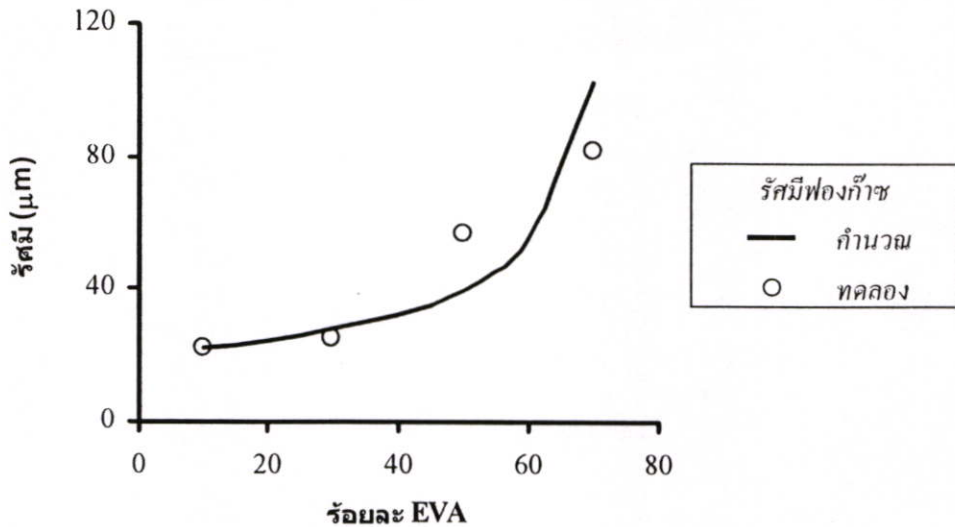
เมื่อ  $R$  = รัศมีของฟองก๊าซ

$y$  = รัศมีของเซลล์

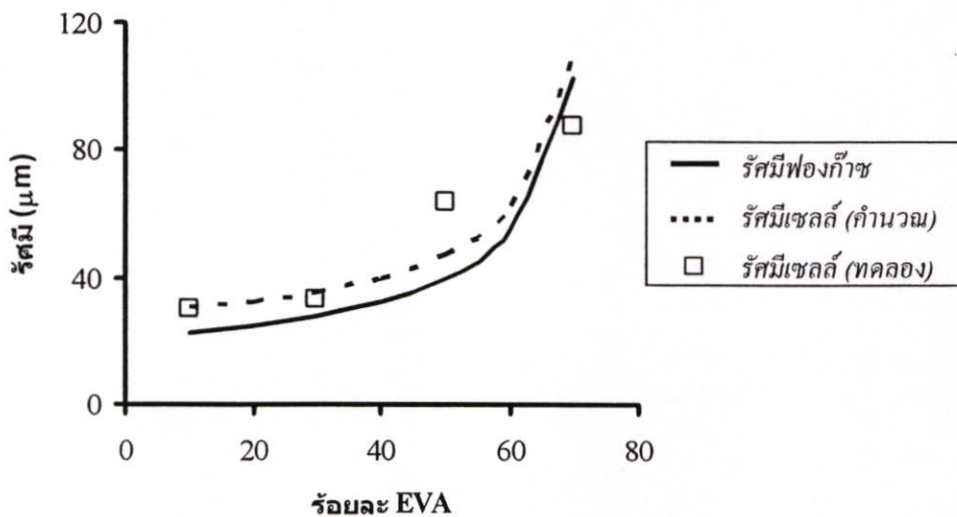


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลักษณะของก๊าซกับปริมาณ EVA

จากสมการที่ 4.8 และ 4.9 ทำให้สามารถคำนวณหาขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.6 ซึ่งผลการคำนวณแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากผลการคำนวณพบว่าเมื่อปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเพิ่มขึ้น ขนาดของฟองก๊าซมีแนวโน้มใหญ่ขึ้น แสดงว่าเอทิลีนไวนิลอะซิเตทสามารถกักเก็บก๊าซได้ดี และสามารถรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างภายหลังการเกิดเป็นโฟมได้ดีกว่าเอทิลีน-พโรพิลีน-ไดอีน มอนอเมอร์



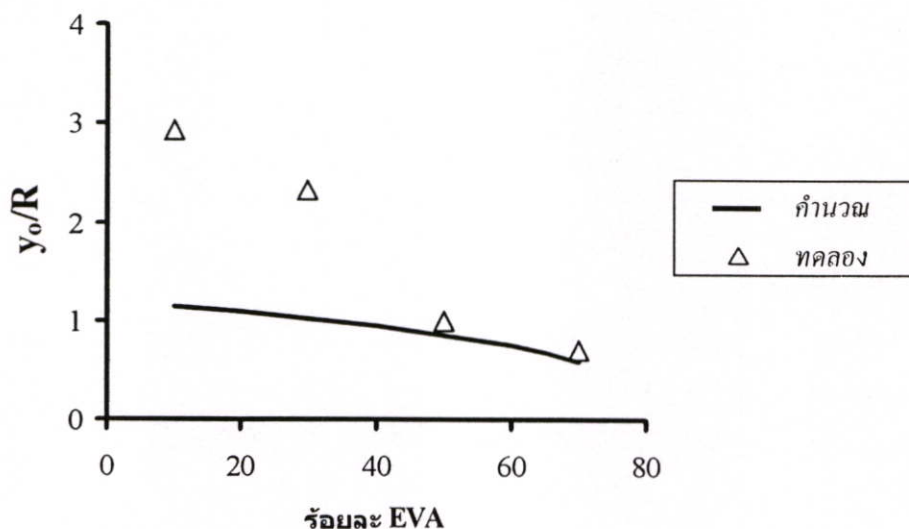
รูปที่ 4.5 รัศมีของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.6 ขนาดของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง

เมื่อนำสมการคูณมวลของ Favelukis มาคำนวณหาขนาดของเซลล์เริ่มต้น โดยใช้ค่าคงที่ตามภาคผนวก ข และนำอัตราส่วนระหว่างขนาดของเซลล์เริ่มต้นกับขนาดของฟองก๊าซมาเขียนกราฟได้ดังรูป 4.7 ซึ่งพบว่าค่าที่คำนวณจากสมการจะต่ำกว่าค่าจากการทดลอง แต่มีแนวโน้มเหมือนกัน คือ เมื่อปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตตเพิ่มขึ้น อัตราส่วนดังกล่าวจะลดลง เมื่อสังเกตค่าที่ได้จากการคำนวณเทียบกับลักษณะทางสัญญาณวิทยาของโฟมในรูปที่ 4.2 จะพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวจะสัมพันธ์กับปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตต คือ เมื่อปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตตเริ่มมากกว่าร้อยละ 50 จะมีแนวโน้มทำให้เกิดโฟมชนิดเซลล์เปิด ค่าของอัตราส่วนระหว่างขนาดเซลล์เริ่มต้นกับรัศมีของฟองก๊าซมีค่าน้อยกว่า 1 นั่นคือขนาดของเซลล์เริ่มต้นเล็ก

กว่าขนาดของฟองก๊าซ แต่ในกรณีที่มีปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซีเตทน้อยกว่าร้อยละ 50 อัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 1 ขนาดของเซลล์เริ่มต้นจึงใหญ่กว่าขนาดของฟองก๊าซ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับลักษณะทางสัญญาณวิทยาในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณ EVA ต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ

#### 4.2.2 พอลิเอทิลีน-ออกทีน และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์

จากการศึกษาลักษณะทางสัญญาณวิทยาของโพลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าโพลิเมอร์ที่ผลิตได้มีลักษณะทางสัญญาณวิทยาค่อนข้างดี คือ ฟองก๊าซมีลักษณะเป็นเซลล์ปิด มีแนวโน้มของขนาดของฟองก๊าซใกล้เคียงกัน และการจัดเรียงตัวของเซลล์ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่มีอัตราการขยายตัวต่ำ ขนาดของฟองก๊าซใกล้เคียงกันที่ทุกอัตราส่วนของโพลิเมอร์ทั้งสองชนิด คุณสมบัติต่าง ๆ ของโพลิเมอร์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

เมื่อนำความหนาของผนังเซลล์ที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟเทียบกับอัตราส่วนของพอลิเอทิลีน-ออกทีน (PE-Octene) แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้เป็นสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 4.10 และเมื่อเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ ( $\lambda$ ) กับอัตราส่วนของพอลิเอทิลีน-ออกทีน แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.11

$$x = -0.0585B + 11.48 \quad (4.10)$$

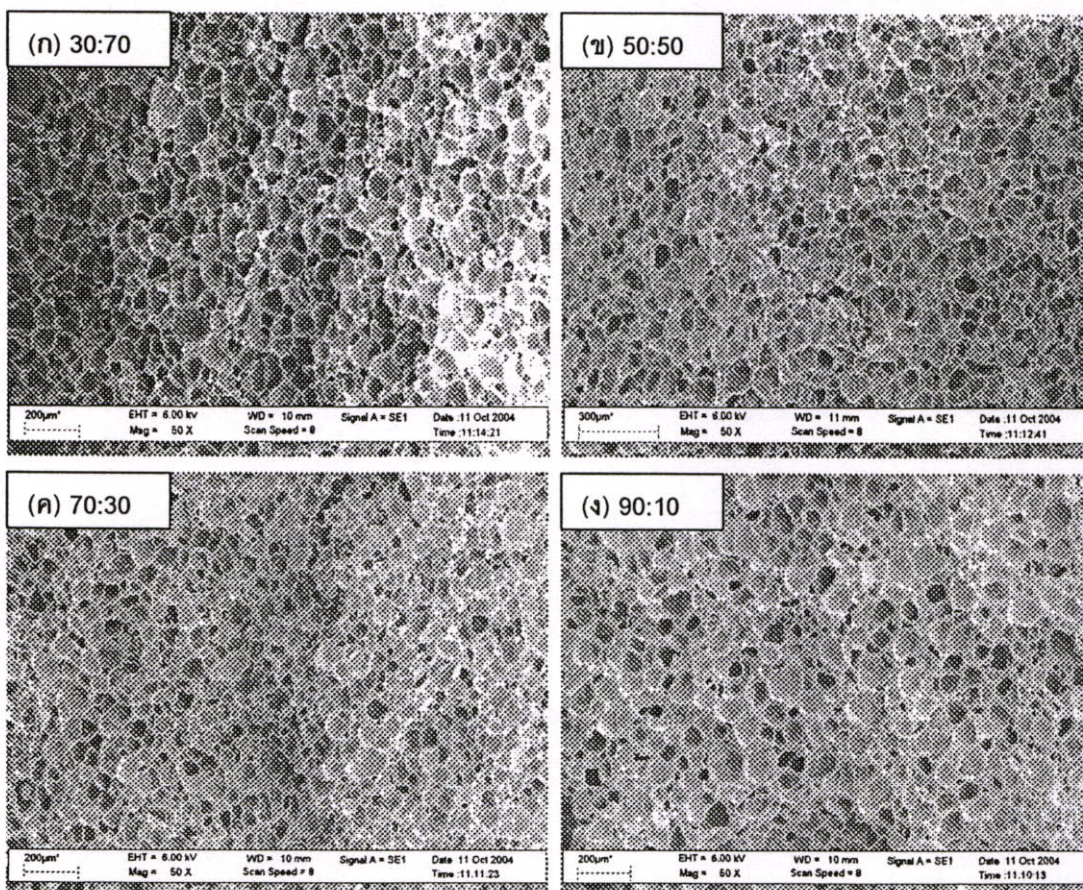
เมื่อ  $x$  = ความหนาของผนังเซลล์

$B$  = ร้อยละพอลิเอทิลีน-ออกทีน

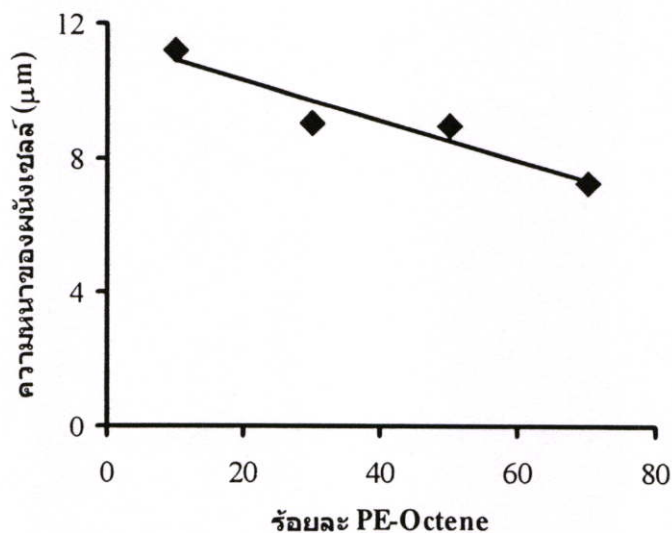
$$\frac{y^3 - R^3}{R^3} = -0.011B + 1.9892 \quad (4.11)$$

ตาราง 4.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์โฟมผสมระหว่าง PE-Octene / EPDM

คุณสมบัติ	ร้อยละพอลิเอทิลีน-ออกทีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	10	30	50	70
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)	51	50	53	46
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ (ไมโครเมตร)	81	79	83	71
ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิเมอร์ (กรัม/ลบ.ซม.)	0.909	0.882	0.855	0.873
ความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟม (กรัม/ลบ.ซม.)	0.248	0.264	0.259	0.174
อัตราการขยายตัว (เท่า)	3.7	3.3	3.3	5.0
จำนวนฟองก๊าซ (ฟอง/ลบ.ซม.)	$1.4 \times 10^5$	$1.4 \times 10^5$	$1.3 \times 10^5$	$1.7 \times 10^5$

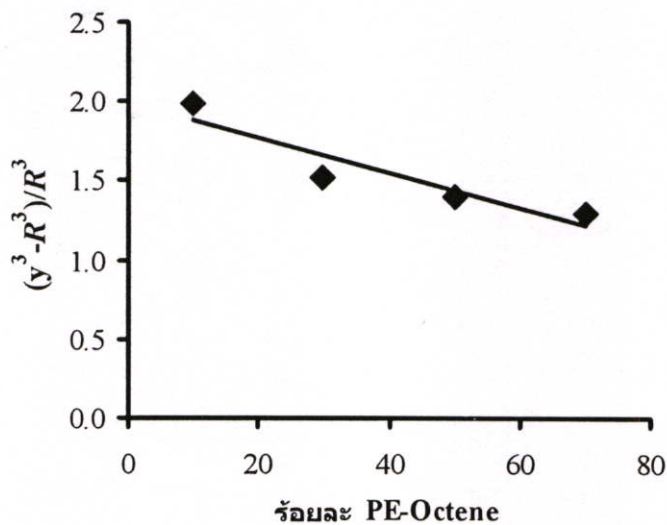


รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง EPDM / PE-Octene เป็นร้อยละโดยน้ำหนัก และใช้โซโครคาร์บอนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 150 °ซ ความดัน 13.20 เมกะปาสคาล ใช้เวลาอบ 15 นาที

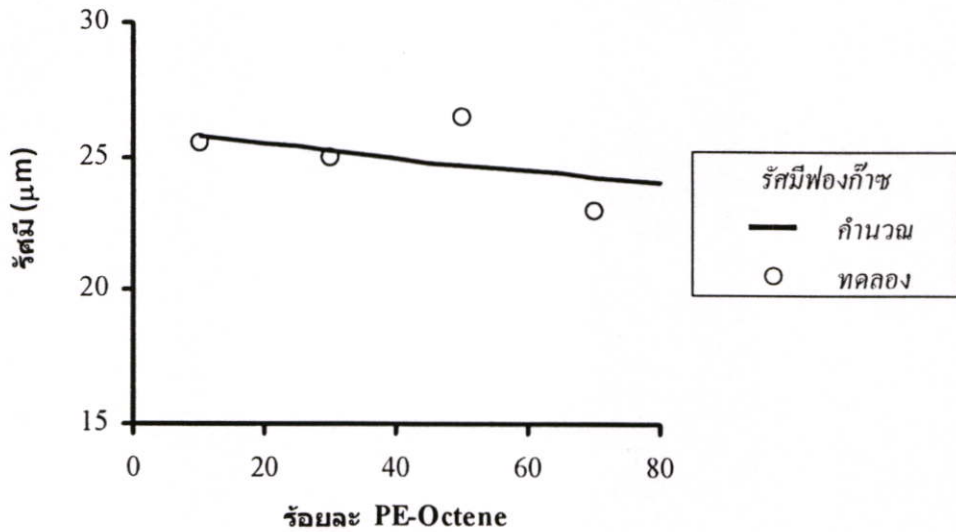


รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณของ PE-Octene ต่อความหนาของผนังเซลล์

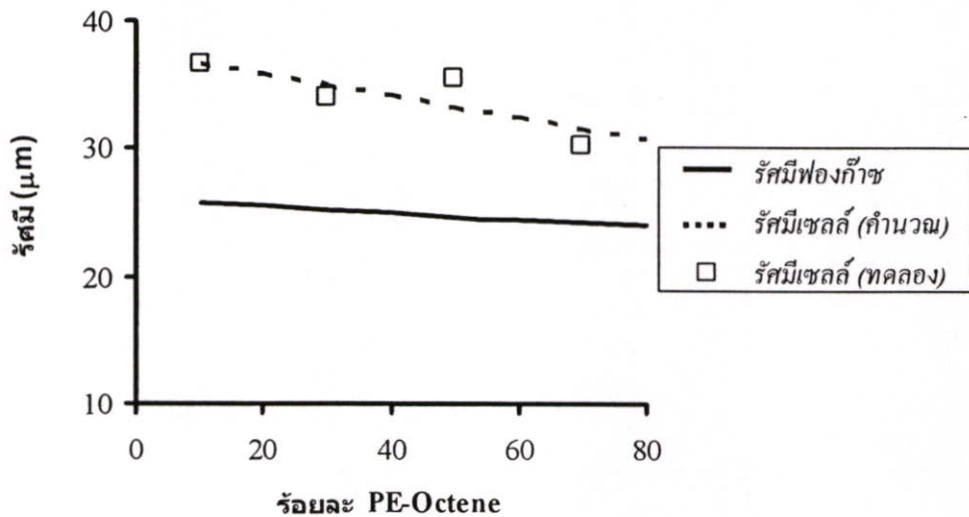
จากสมการที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อนำมาคำนวณหาขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ จะได้ผลการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของพอลิเอทิลีน-ออกทีนเพิ่มขึ้น ขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แสดงว่าพอลิเอทิลีน-ออกทีน และเอทิลีน-พรอพิลีนไดอีน-มอนอเมอร์ มีความสามารถในการเกิดโฟมใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลักษณะของก๊าซกับปริมาณ PE-Octene

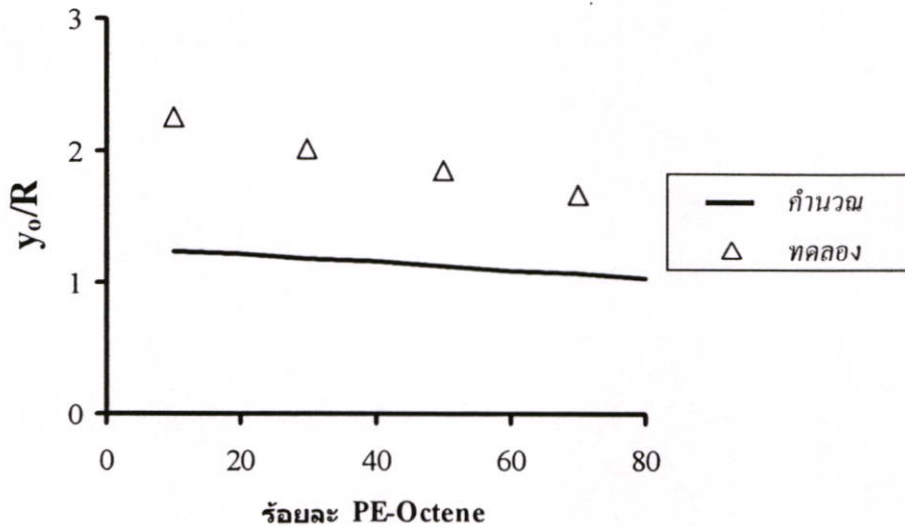


รูปที่ 4.11 รัศมีของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.12 รัศมีของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง

จากนั้นนำสมการควบคุมมวลของ Favelukis มาคำนวณหาขนาดของเซลล์เริ่มต้น โดยใช้ค่าคงที่จากตารางในภาคผนวก ข นำอัตราส่วนของขนาดของเซลล์เริ่มต้นต่อขนาดของฟองก๊าซ มาเขียนกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อปริมาณของพอลิเอทิลีน-ออกทีนเพิ่มขึ้น อัตราส่วนระหว่างขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดของฟองก๊าซจะลดลง แต่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 ทั้งค่าจากการคำนวณ และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางสัญญาณวิทยา ในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าโฟมจากพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดนี้มีแนวโน้มเป็นแบบเซลล์ปิด ทุกอัตราส่วนผสม นั่นคือขนาดของเซลล์เริ่มต้นมากกว่าขนาดของฟองก๊าซเสมอ



รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณ PE-Octene ต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ

### 4.3 การศึกษาและทำนายผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์โฟม

ในกระบวนการผลิตโฟมจากพอลิเมอร์ ตัวแปรหนึ่งที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติ และคุณลักษณะของโฟมที่ผลิตได้ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟม เนื่องจากอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อปัจจัยในกระบวนการโฟมอย่างมาก เช่น ความสามารถในการละลายของก๊าซในพอลิเมอร์ หรืออัตราการแพร่ของก๊าซเข้าสู่ฟองก๊าซ ในขณะที่อุณหภูมิยังมีผลต่อความดันในระบบ หรือในฟองก๊าซ เป็นต้น

#### 4.3.1 พอลิยูรีเทนโฟม

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ ที่มีต่อลักษณะทางสัญญาณวิทยาโดย ณรงค์ และคณะ [10] และ ปรียวัฒน์ และคณะ [11] ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าขนาดของฟองก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์สูงขึ้น และมีลักษณะของโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด ซึ่งในกระบวนการเกิดพอลิยูรีเทนโฟม ฟองก๊าซเกิดการขยายตัวในขณะที่พอลิยูรีเทนยังไม่คงรูป ทำให้ฟองก๊าซสามารถขยายตัวมาชนกันได้ ก่อนจะถูกกักไว้ภายในโครงสร้างของเซลล์ คุณสมบัติทางสัญญาณวิทยาที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

และเมื่อนำผลการทดลองในตารางที่ 4.3 มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์ กับอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ จะพบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงดังสมการที่ 4.12 และแสดงได้ดังรูปที่ 4.15

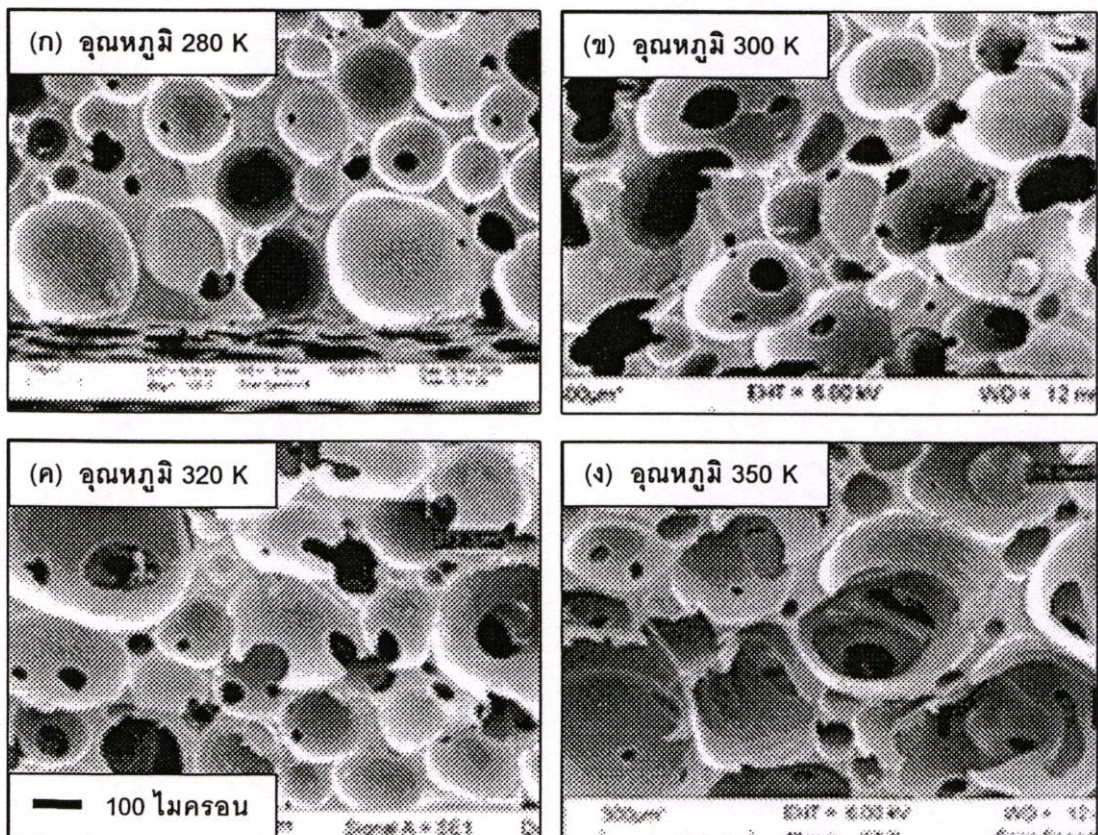
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิยูรีเทน โฟมจากการทดลอง

คุณสมบัติ	อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ (เคลวิน)			
	280	300	320	350
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)	326	315	371	386
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ (ไมโครเมตร)	296	344	397	405
ความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟม (กรัม/ลบ.ซม.)	0.396	0.205	0.197	0.199
อัตราการขยายตัว (เท่า)	10.6	10.6	10.6	10.6
จำนวนฟองก๊าซ (ฟอง/ลบ.ซม.)	$2.3 \times 10^4$	$2.4 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$	$2.3 \times 10^4$

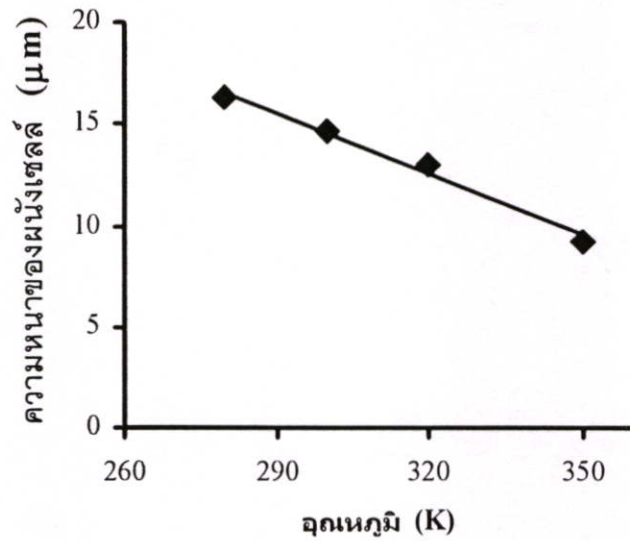
$$x = -0.0997T + 44.461 \quad (4.12)$$

เมื่อ  $x$  = ความหนาของผนังเซลล์

$T$  = อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์



รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิยูรีเทน โฟมที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน

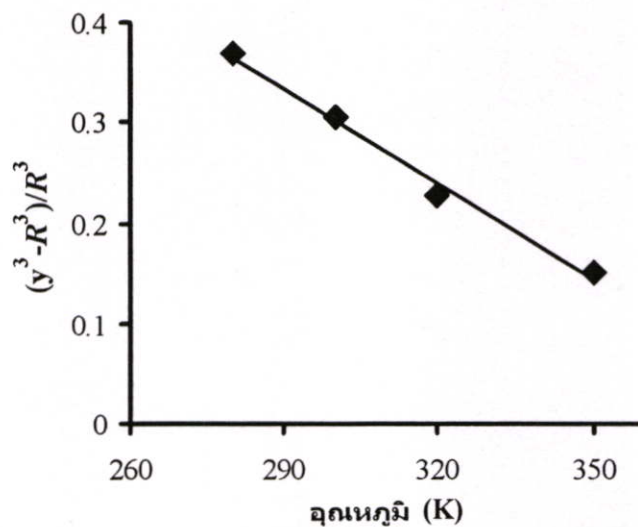


รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่อความหนาของผนังเซลล์ของพอลิยูรีเทน โฟม

เมื่อนำสมการที่ 4.4 มาใช้สร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ ( $\lambda$ ) เทียบกับอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.3 แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 และสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.13

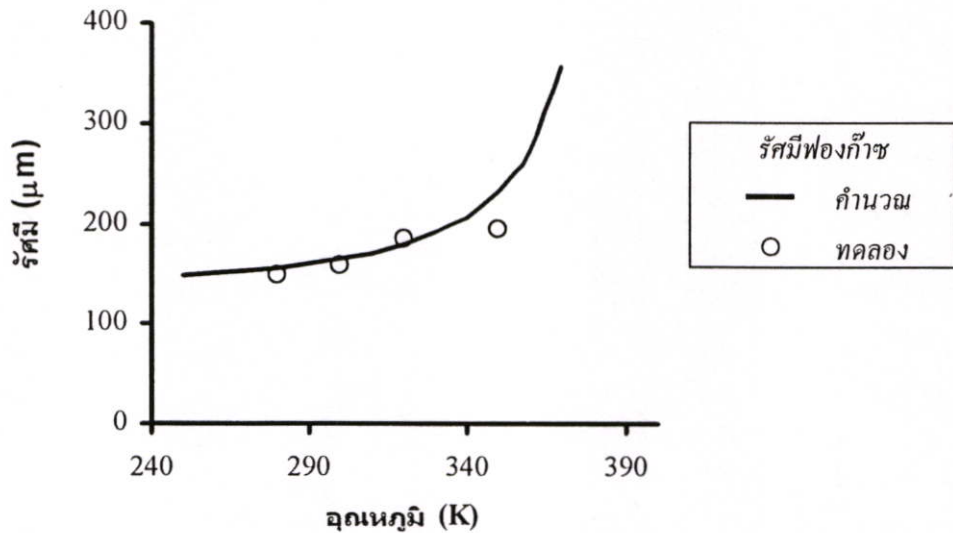
$$\frac{y^3 - R^3}{R^3} = -0.0032T + 1.2492 \quad (4.13)$$

เมื่อนำสมการ 4.12 และ 4.13 มาคำนวณหาขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ จากนั้นนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

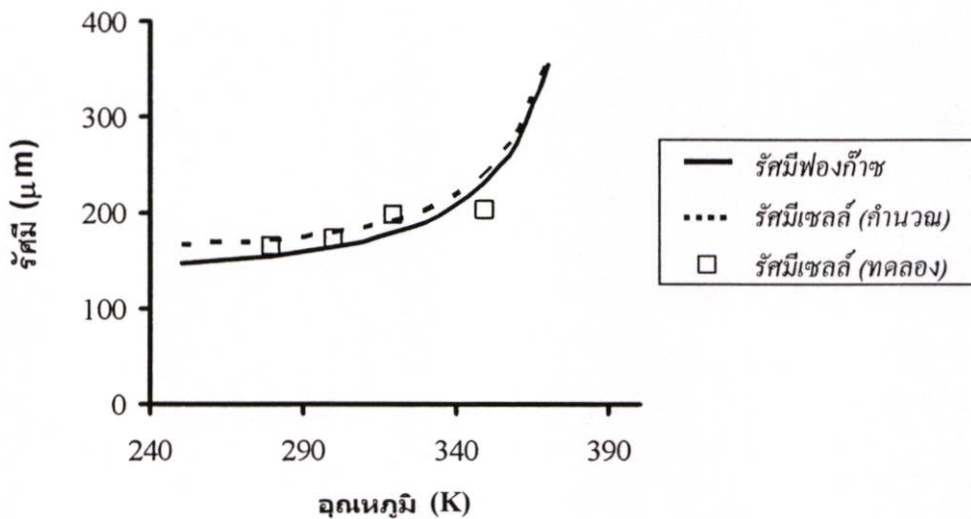


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลักษณะของก๊าซกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นแนวโน้มของการเกิดโฟมที่มีลักษณะเป็นเซลล์เปิดที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350 เคลวินขึ้นไป ขนาดของฟองก๊าซจะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเซลล์มาก เป็นผลให้มีแนวโน้มของการเกิดโฟมชนิดเซลล์เปิดมากขึ้น



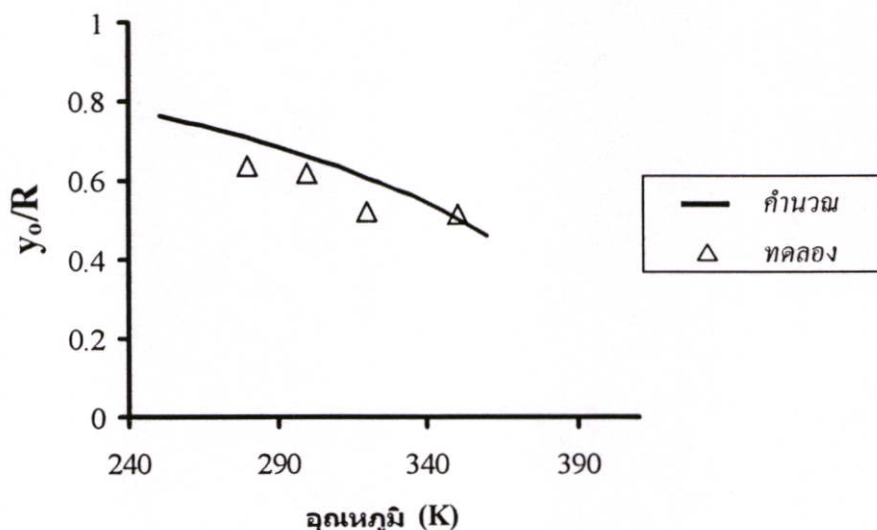
รูปที่ 4.17 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.18 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง

จากนั้นนำสมการคุณมวลของ Favelukis มาคำนวณหาขนาดของเซลล์เริ่มต้น โดยใช้ค่าคงที่ต่าง ๆ จากตารางภาคผนวก ข และนำค่าของขนาดเซลล์เริ่มต้นที่คำนวณได้ต่อรัศมีของฟองก๊าซ มาเขียนกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 จากกราฟพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของ

ขนาดเซลล์เริ่มต้นกับรัศมีของฟองก๊าซที่คำนวณจากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 1 มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าที่ได้จากการคำนวณ และการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.14 ซึ่งโฟมมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดทั้งหมด ดังนั้นค่าอัตราส่วนระหว่างของขนาดของเซลล์ เริ่มต้นกับรัศมีของฟองก๊าซที่น้อยกว่า 1 จึงบอกถึงแนวโน้มของการเกิดโครงสร้างโฟมแบบ เซลล์เปิดในทุก ๆ ช่วงของอุณหภูมิที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ

#### 4.3.2 เอทิลีนไวนิลอะซิเตท และยางธรรมชาติ

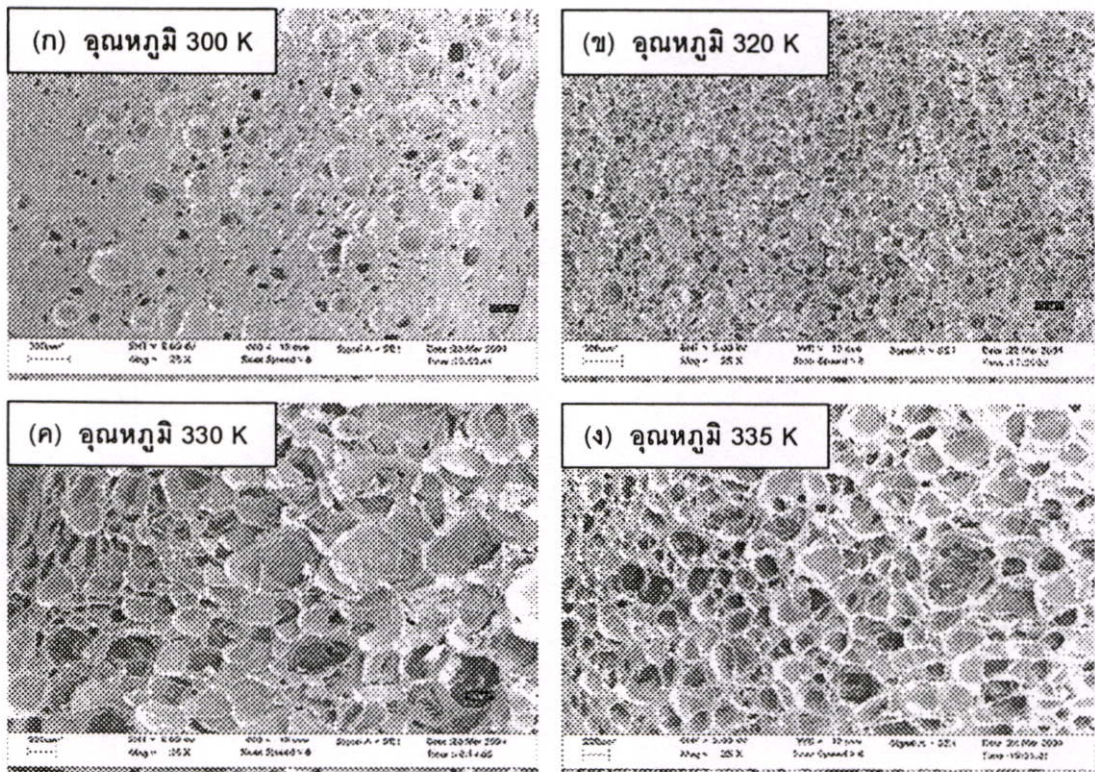
ในหัวข้อนี้เป็นการผลิตพอลิเมอร์โฟมจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และยางธรรมชาติ (NR) ซึ่งเป็นผลการทดลองของกมลรัตน์ และคณะ [12] โดยในการทดลองครั้งนี้ ทางผู้ทดลอง ได้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต (Super critical carbon dioxide : SC-CO<sub>2</sub>) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองในกระบวนการผลิตโฟม และใช้อัตราส่วนของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ต่อยางธรรมชาติ เป็นร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก มีการเติมสารเชื่อมโยงประเภทเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide: DCP) อีกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการโฟม ทำให้ได้พอลิเมอร์โฟมที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.20 โดยมีคุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์โฟมที่ผลิตได้ดังตารางที่ 4.5

จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.20 พบว่าที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ฟองก๊าซที่เกิดมีขนาด และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิ 320 เคลวิน ฟองก๊าซที่ได้จะมีขนาดเล็กลง และกระจายตัวสม่ำเสมอ และยังมีลักษณะเป็นเซลล์ปิด ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 330 และ

350 เคลวิน ฟองก๊าซที่เกิดจะเริ่มมีขนาดใหญ่มาก การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และมีแนวโน้มลักษณะของเซลล์เป็นแบบเซลล์เปิด

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของพอลิเมอร์โฟมผสมระหว่าง EVA / NR ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

คุณสมบัติ	อุณหภูมิในกระบวนการโฟม			
	(เคลวิน)			
	300	320	330	335
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)	250	200	400	350
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ (ไมโครเมตร)	297	232	435	390
ความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟม (กรัม/ลบ.ซม.)	0.312	0.151	0.175	0.281
อัตราการขยายตัว (เท่า)	3.1	6.3	5.5	3.4
จำนวนฟองก๊าซ (ฟอง/ลบ.ซม.)	$5.4 \times 10^4$	$8.4 \times 10^4$	$4.1 \times 10^4$	$4.0 \times 10^4$



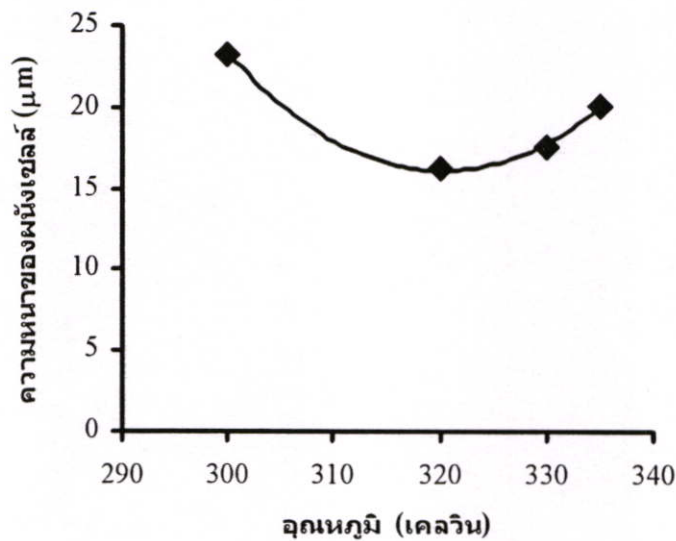
รูปที่ 4.20 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง EVA / NR ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก และใช้ SC-CO<sub>2</sub> เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง ภายใต้ความดัน 7.05 เมกะพาสคัล

เมื่อนำความหนาของผนังเซลล์มาเขียนกราฟเทียบกับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟม จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็นสมการพหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 4.14

$$x = 0.0176T^2 - 11.24T + 1815.7 \quad (4.14)$$

เมื่อ  $x$  = ความหนาของผนังเซลล์

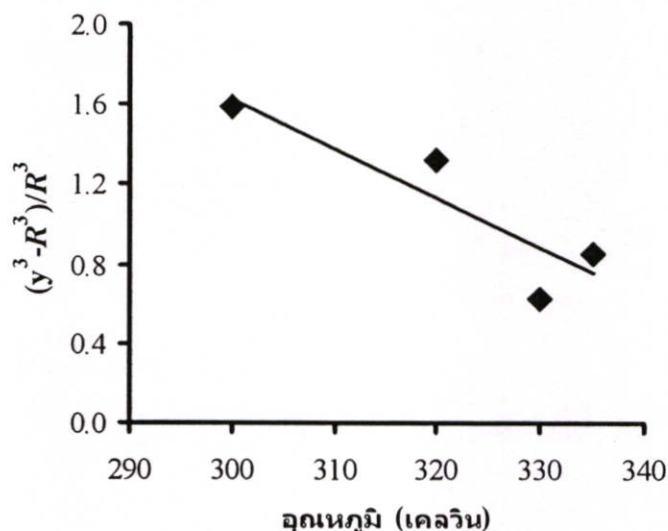
$T$  = อุณหภูมิในกระบวนการโฟม



รูปที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการโฟมต่อความหนาของผนังเซลล์ของ EVA/NR โดยใช้ SC-CO<sub>2</sub> เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่ความดัน 7.05 เมกกะพาสคัล

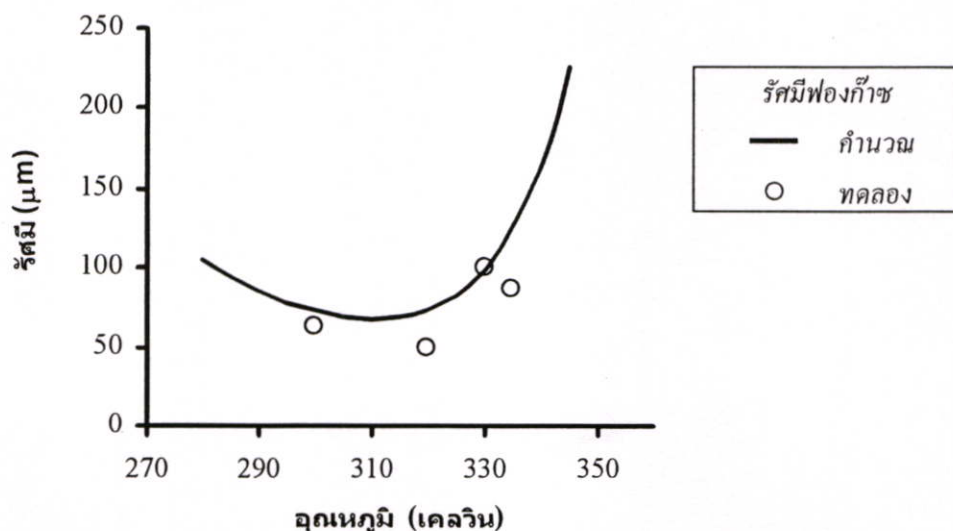
เมื่อนำคุณสมบัติของพอลิเมอร์จากตารางที่ 4.5 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซจากสมการที่ 4.4 กับอุณหภูมิในกระบวนการผลิตโฟม นำผลการคำนวณมาเขียนกราฟเทียบกับอุณหภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 และสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 4.15

$$\frac{y^3 - R^3}{R^3} = -0.0251T + 9.1587 \quad (4.15)$$

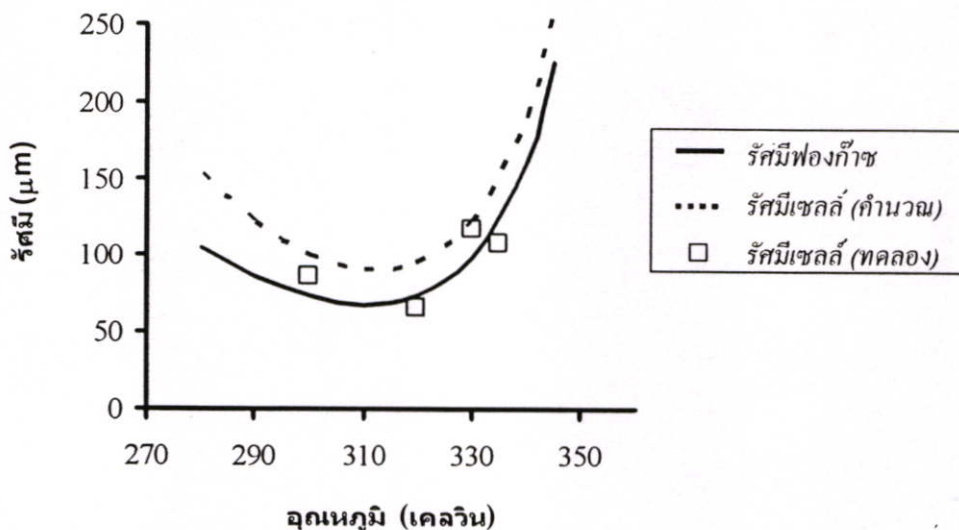


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลักษณะของก๊าซกับอุณหภูมิ

จากนั้นนำสมการที่ 4.14 และ 4.15 มาคำนวณหาขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ นำผลการคำนวณมาเขียนกราฟเทียบกับอุณหภูมิในกระบวนการโพลีเมอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่าในช่วงอุณหภูมิประมาณ 310-320 เคลวิน ผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์จะมีขนาดของฟองก๊าซเล็กที่สุด โดยที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่านั้น จะทำให้ได้โพลีเมอร์ที่มีขนาดของฟองก๊าซใหญ่ ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะทางสัญญาณวิทยาในรูปที่ 4.20 สาเหตุที่ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิต่ำและสูงเกินไป ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อุณหภูมิต่ำ พลังเซลล์ของพอลิเมอร์จะยังคงแข็งอยู่ ทำให้เกิดนิวเคลียสที่เกิดใหม่สามารถขยายตัวจนพัฒนาไปเป็นฟองก๊าซมีจำนวนน้อย ฟองก๊าซที่เกิดจึงมีโอกาสดังรับปริมาณก๊าซจากพอลิเมอร์มากขึ้น ฟองก๊าซที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการโพลีเมอร์สูงเกินไป จะทำให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะใกล้หลอมเหลว และความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลง ทำให้ความสามารถในการละลายของก๊าซเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นมาก ฟองก๊าซจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น

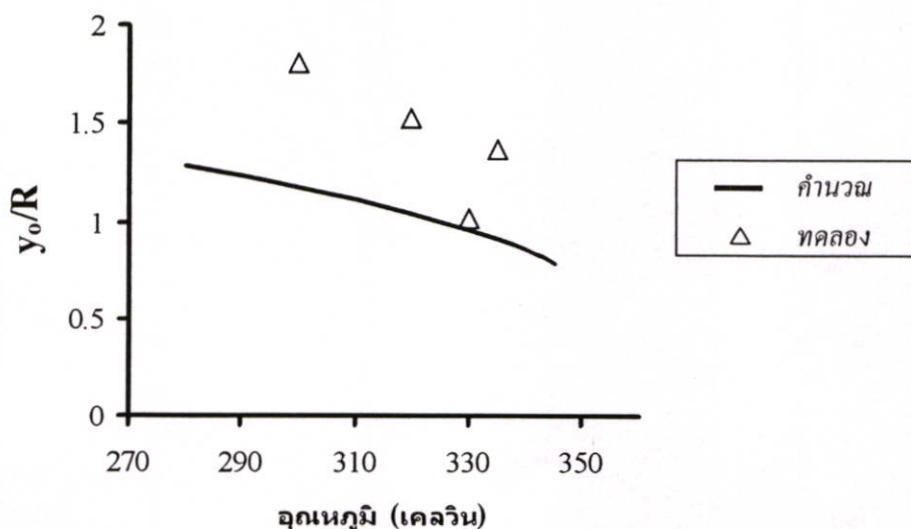


รูปที่ 4.23 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.24 ขนาดของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง

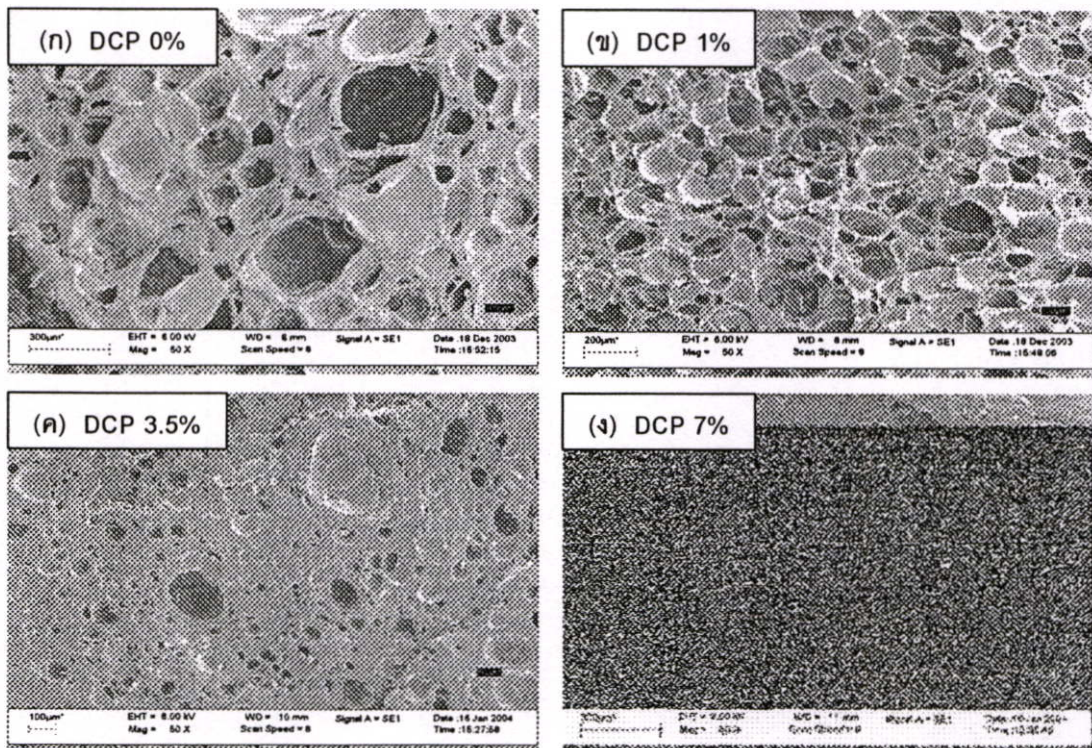
หลังจากนำเสนอการควบคุมมวลของ Favelukis มาใช้ในการคำนวณหาขนาดของเซลล์เริ่มต้น โดยใช้สมการ 4.14 และ 4.15 ในการหาขนาดของฟองก๊าซและขนาดของเซลล์ นำอัตราส่วนระหว่างขนาดของเซลล์เริ่มต้นที่คำนวณได้ต่อขนาดของฟองก๊าซ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.25 พบว่าอัตราส่วนดังกล่าวลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยในขณะที่ยุณหภูมิต่ำกว่า 320 เคลวิน อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 นั่นคือ ขนาดของเซลล์เริ่มต้นใหญ่กว่าขนาดของฟองก๊าซ และแสดงถึงแนวโน้มของการเกิดโครงสร้างโฟมแบบเซลล์ปิด และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 320 เคลวิน อัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นต่อขนาดของฟองก๊าซมีค่าน้อยกว่า 1 นั่นคือ โฟมที่ได้จะมีแนวโน้มเกิดโครงสร้างชนิดเซลล์เปิด เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับลักษณะทางสัญญาณวิทยาในรูปที่ 4.20 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถทำนายแนวโน้มการเกิดโครงสร้างของโฟมได้ดีกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ

#### 4.4 การศึกษาและทำนายผลจากปริมาณสารเชื่อมโยงต่อคุณสมบัติของโฟม พอลิเมอร์ผสม

จากการทดลองของกมลรัตน์ และคณะ [12] ที่ศึกษาผลของกระทบบของการเติมสารเชื่อมโยงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซีเตท และยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก ก่อนนำไปผ่านกระบวนการโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ความดัน 5.18 เมกกะพาสคัล ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 พบว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมโยง ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ โครงสร้างของเซลล์มีลักษณะเป็นเซลล์เปิด เมื่อเติมสารเชื่อมโยง ร้อยละ 1 ฟองก๊าซที่ได้มีขนาดเล็กกลวงและสม่ำเสมอมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเชื่อมโยงจะทำให้ผนังเซลล์ของพอลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้น พอลิเมอร์สามารถรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างได้ดี ทำให้โครงสร้างของเซลล์เริ่มมีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมโยงเป็นร้อยละ 3.5 และ 7 ตามลำดับ พบว่าสารเชื่อมโยงในปริมาณมากทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้น นิวเคลียสจำนวนมากที่เกิดไม่สามารถเอาชนะแรงต้านการเกิดฟองก๊าซได้ นิวเคลียสเหล่านั้นจึงยุบหายไป และมีเพียงบางส่วนที่สามารถขยายตัวจนพัฒนาไปเป็นฟองก๊าซได้ และมีขนาดค่อนข้างใหญ่ คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผลิตได้แสดงดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.26 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง EVA / NR ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก และใช้ SC-CO<sub>2</sub> เป็นสารช่วยให้เกิดฟองภายใต้ความดัน 5.18 เมกกะพาสคัล อุณหภูมิ 327 เคลวิน

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของพอลิเมอร์โฟมผสมระหว่าง EVA / NR ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงต่างกัน

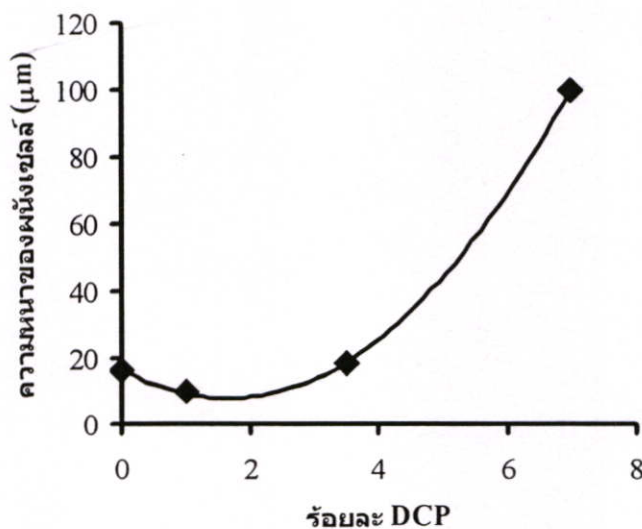
คุณสมบัติ	ร้อยละไดควิมิวเปอร์ออกไซด์			
	(phr)			
	0	1	3.5	7
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)	340	94	166	200
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ (ไมโครเมตร)	373	113	203	400
ความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟม (กรัม/ลบ.ซม.)	0.283	0.241	0.736	0.940
อัตราการขยายตัว (เท่า)	1.2	1.1	1.3	1.0
จำนวนฟองก๊าซ (ฟอง/ลบ.ซม.)	$4.1 \times 10^4$	$1.6 \times 10^5$	$2.8 \times 10^4$	$1.1 \times 10^4$

เมื่อนำความหนาของผนังเซลล์มาเขียนกราฟเทียบกับร้อยละของไดควิมิวเปอร์ออกไซด์ จะได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.27 ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นสมการพอลิโนเมียลกำลัง 2 ดังสมการที่ 4.16

$$x = 3.2346D^2 - 10.763D + 16.809 \quad (4.16)$$

เมื่อ  $x$  = ความหนาของผนังเซลล์

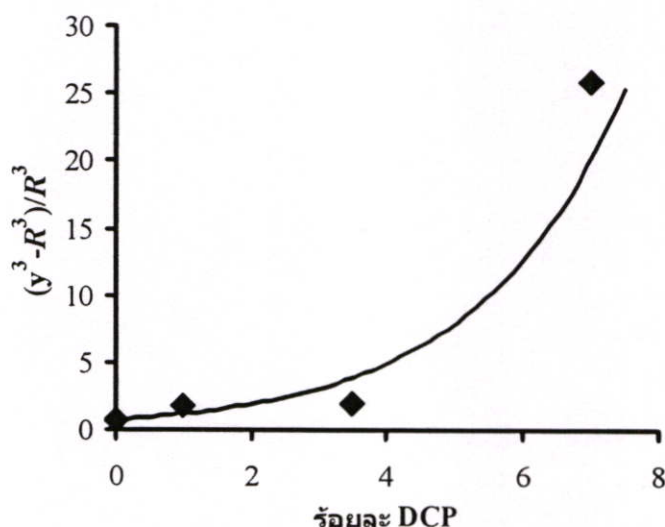
$D$  = ร้อยละของไดควิมิวเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 4.27 แสดงความหนาของผนังเซลล์เทียบกับปริมาณร้อยละ DCP

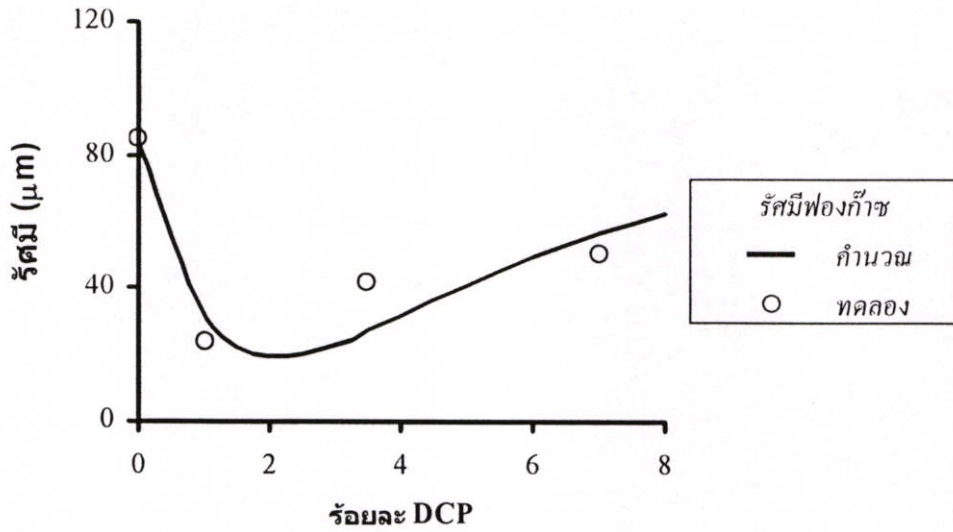
จากนั้นนำคุณสมบัติของพอลิเมอร์จากตารางที่ 4.5 มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ และนำผลการคำนวณมาเขียนกราฟเทียบกับร้อยละของไดคิวมิท-เปอร์ออกไซด์ จะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 4.28 และสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.17

$$\frac{y^3 - R^3}{R^3} = 0.7389e^{0.4717D} \quad (4.17)$$

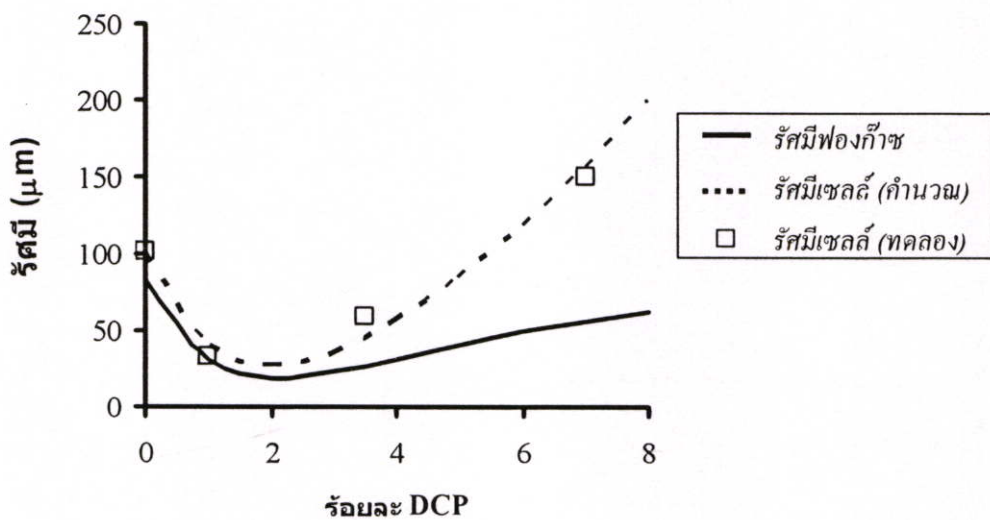


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันลักษณะของก๊าซกับร้อยละ DCP

เมื่อนำสมการที่ 4.16 และ 4.17 มาใช้คำนวณขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง จะได้ผลลัพธ์เป็นกราฟรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับพบว่าที่ปริมาณของสารเชื่อมโยงที่ร้อยละ 1-2 จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีขนาดของฟองก๊าซเล็กที่สุด และความหนาของผนังเซลล์น้อย แต่เมื่อปริมาณของสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 2 ขนาดของฟองก๊าซจะเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของผนังเซลล์จะใหญ่มาก ทั้งนี้เนื่องจากสารเชื่อมโยงจะไปทำให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมติด และมีความแข็งแรงมาก ทำให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นบางส่วนไม่สามารถเอาชนะแรงด้านการขยายตัวได้ และยุบหายไปโดยสิ้นเชิง ดังนั้นจึงมีนิวเคลียสเพียงบางส่วนที่สามารถขยายตัวไปเป็นฟองก๊าซได้ ฟองก๊าซที่เหลือมีโอกาสได้รับก๊าซจากพอลิเมอร์มากขึ้นจึงมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่มีจำนวนน้อย ในขณะที่ความหนาของผนังเซลล์มีขนาดใหญ่มาก สังเกตได้จากกราฟรูปที่ 4.30



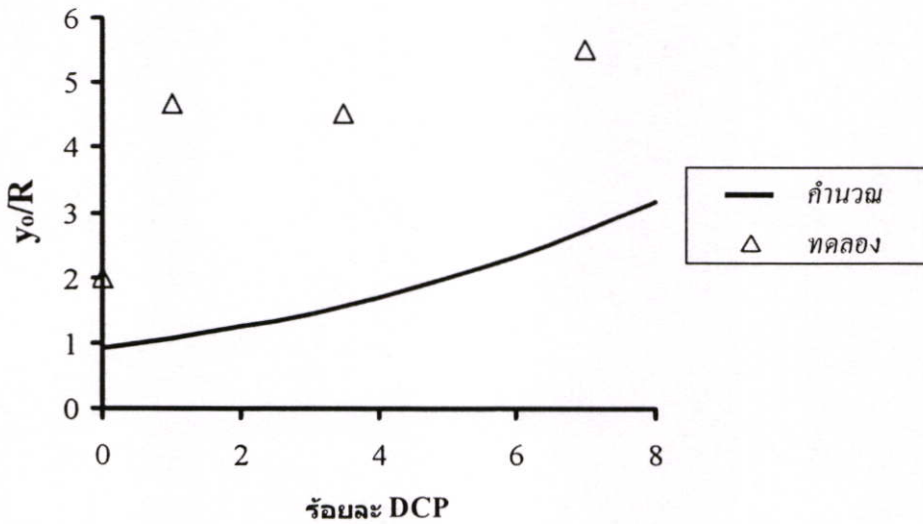
รูปที่ 4.29 ขนาดของฟองก๊าซที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.30 ขนาดของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง

จากนั้นใช้สมการควบคุมมวลของ Favelukis มาคำนวณขนาดของเซลล์เริ่มต้นโดยใช้ค่าคงที่ตามภาคผนวก ข เมื่อนำอัตราส่วนระหว่างขนาดของเซลล์เริ่มต้นกับขนาดของฟองก๊าซมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์เทียบกับร้อยละของไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ จะได้ผลลัพธ์ดังกราฟรูปที่ 4.31 โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อไม่เติมสารเชื่อมโยง อัตราส่วนดังกล่าวจะมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดโครงสร้างพอลิเมอร์ชนิดเซลล์เปิด ในขณะที่เมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงเพียงร้อยละ 1 ก็ทำให้อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์โพลิเมอร์ที่ได้มีแนวโน้มลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ปิด และอัตราส่วนดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณของสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับ

ลักษณะทางสัญญาณวิทยาในรูปที่ 4.26 พบว่าโครงสร้างของพอลิเมอร์โพรพีนที่ได้ตรงกับการทำนายโดยสมการทางคณิตศาสตร์ และทำนายได้ดีกว่าค่าจากการทดลอง



รูปที่ 4.31 ผลของสารเชื่อมโยงต่ออัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดฟองก๊าซ

#### 4.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซกับฟังก์ชันแสดงลักษณะของฟองก๊าซ

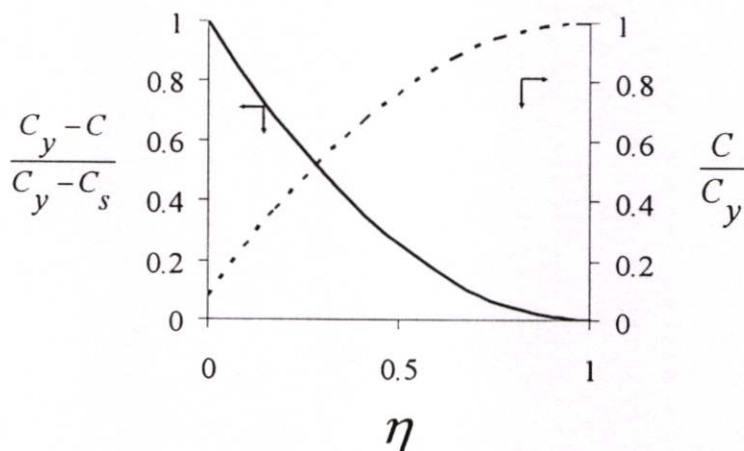
เมื่อพิจารณาการขยายตัวของฟองก๊าซใด ๆ พอลิเมอร์ที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ฟองก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายอยู่ โดยความเข้มข้นของก๊าซจะลดลงไปเรื่อย ๆ ในขณะที่ฟองก๊าซกำลังขยายตัว และความเข้มข้นของก๊าซจะหยุดเปลี่ยนแปลงเมื่อฟองก๊าซหยุดการขยายตัว ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วฟองก๊าซจะหยุดขยายตัวเมื่อความเข้มข้นของก๊าซที่อยู่ภายในฟองก๊าซ และภายในเนื้อพอลิเมอร์มีค่าเท่ากัน การวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซในกรณีดังกล่าว ไม่สามารถวัดได้จากการทดลอง เนื่องจากไม่มีเครื่องมือที่วัดได้โดยตรง แต่อาจทำนายได้จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้นำเสนอไว้คือ Rosner และ Epstein [15] ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{c_y - c}{c_y - c_s} = (1 - \eta)^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ 
$$\eta = \frac{r - R}{x} \quad (2.11)$$

ตัวแปร  $\eta$  หมายถึงระยะตั้งแต่ผนังฟองก๊าซถึงผนังของฟองก๊าซ จากสมการที่ 2.11 เมื่อกำหนดค่าของตัวแปร  $R \leq r \leq y$  และ  $x = y - R$  ตัวแปร  $\eta$  จะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง

( $0 \leq \eta \leq 1$ ) และสามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น จากผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์ได้ดังรูปที่ 4.32



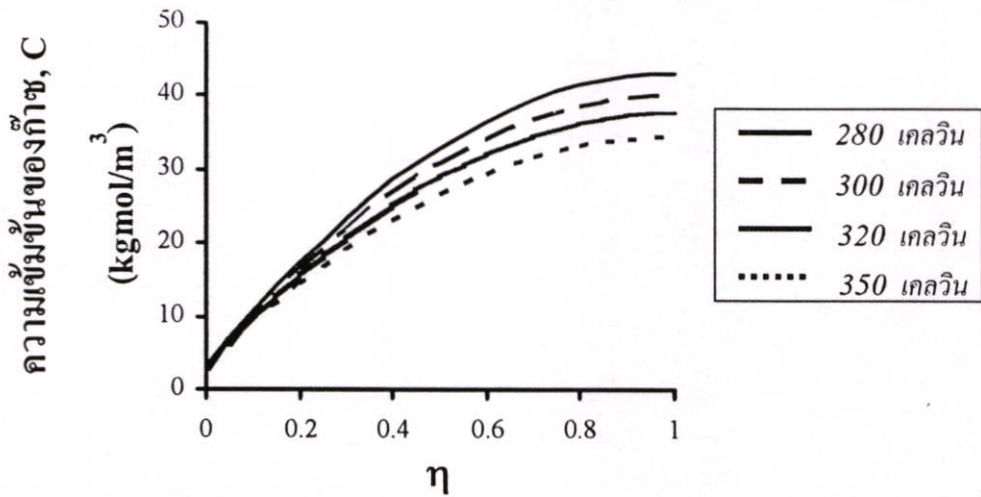
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซกับฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ

จากรูปที่ 4.32 ที่  $\eta = 0$  คือที่บริเวณผนังของฟองก๊าซมีความเข้มข้นของก๊าซ ( $c$ ) เท่ากับความเข้มข้นภายในฟอง ( $c_s$ ) และระยะถัดจากจากผนังของฟองก๊าซออกไป  $\eta$  จะมีค่ามากกว่าศูนย์ ( $\eta > 0$ ) โพลีเมอร์จะมีความเข้มข้นของก๊าซมากขึ้น ดังเส้นประในรูปที่ 4.32 จนกระทั่งที่  $\eta$  มีค่าเท่ากับหนึ่ง ( $\eta = 1$ ) หรือที่บริเวณผนังของเซลล์ ความเข้มข้นของก๊าซจะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของก๊าซในโพลีเมอร์ กราฟรูปที่ 4.32 จึงมีประโยชน์ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซ ในขณะที่ฟองก๊าซเกิดการขยายตัวในกระบวนการเกิดโฟม

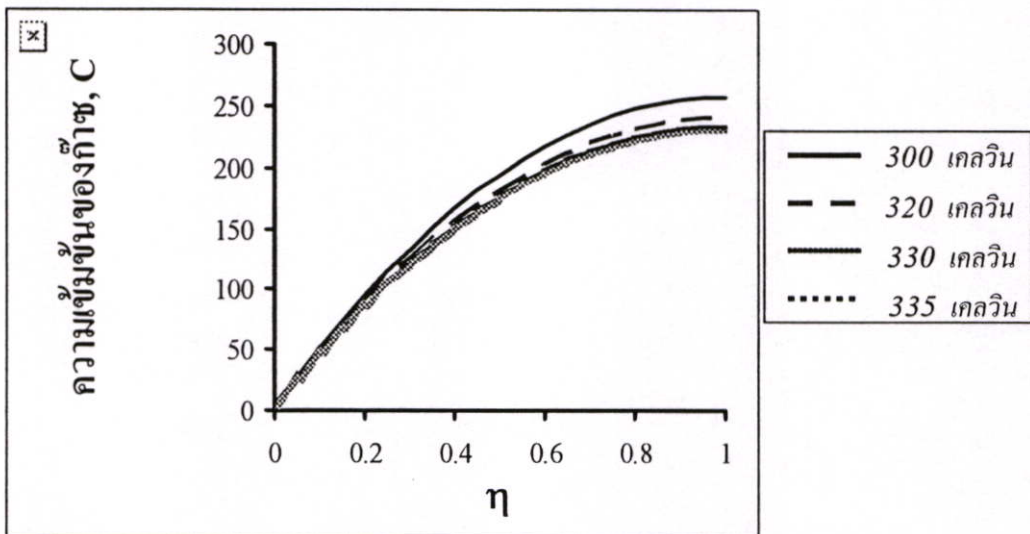
จากการศึกษาพบว่าตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซดังกล่าว คืออุณหภูมิ และความดัน ซึ่งตัวแปรทั้งสองจะมีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นของก๊าซ ในขณะที่เริ่มต้นกระบวนการเกิดฟองก๊าซ ทำให้เมื่อเขียนกราฟแสดงความเข้มข้นของก๊าซที่อุณหภูมิ หรือความดันต่างกัน จะได้เส้นกราฟที่มีลักษณะเดียวกัน แต่จะเลื่อนตำแหน่งตามอุณหภูมิ หรือความดันที่เปลี่ยนไป

จากการทดลองผลิตพอลิยูรีเทนโฟมที่อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่าง ๆ กันโดย ณรงค์ และคณะ [10] และ ปรียวีวัฒน์ และคณะ [11] เมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซในพอลิยูรีเทน จากการทดลองมาใช้ในสมการของ Rosner และ Epstein เพื่อแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซ จะได้ผลดังรูปที่ 4.33 ซึ่งแสดงความเข้มข้นของก๊าซที่ระยะตั้งแต่ผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิต่ำพบว่ามีค่าความเข้มข้นของก๊าซสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความหนาแน่นของก๊าซจะต่ำลง ดังสมการความสัมพันธ์ของก๊าซอุดมคติ และเมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนไวนิล-

อะซีเตทกับยางธรรมชาติจากการทดลองของ กมลรัตน์ และคณะ [12] มาคำนวณจะได้ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเช่นเดียวกับกรณีของพอลิยูรีเทน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.34

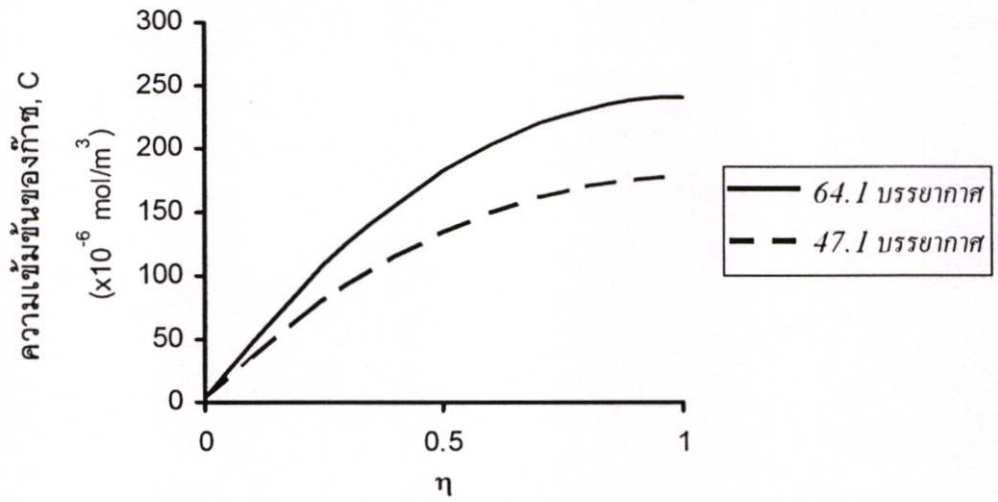


รูปที่ 4.33 ความเข้มข้นของก๊าซตั้งแต่ผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (พอลิยูรีเทน โฟม)



รูปที่ 4.34 ความเข้มข้นของก๊าซตั้งแต่ผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (เอทิลีน ไวนิลอะซิเตท-ยางธรรมชาติ)

ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงความดัน ก็มีผลทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยเมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซ จากการทดลองของกมลรัตน์ และคณะ [12] ที่ความดัน 47.1 และ 64.1 บรรยากาศ มาใช้ในสมการของ Rosner และ Epstein สามารถเขียนกราฟการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นได้ดังรูปที่ 4.35 และแสดงให้เห็นว่าที่ความดันสูง ความเข้มข้นของก๊าซจะสูงกว่าที่ความดันต่ำ ซึ่งก็เป็นผลมาจากก๊าซที่ความดันสูงจะมีความหนาแน่นมากกว่าก๊าซที่ความดันต่ำ



รูปที่ 4.35 ความเข้มข้นของก๊าซตั้งแต่ผนังของฟองก๊าซถึงผนังของเซลล์ที่ความดันต่างกัน

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

### 5.1 สรุปขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์กับตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลง

นำความหนาของผนังเซลล์ที่หาได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟเทียบกับตัวแปรในการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น สร้างความสัมพันธ์อย่างง่าย เช่น สมการเส้นตรง เป็นต้น เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ให้ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นสมการที่ 5.1

$$x = f_1(a) \quad (5.1)$$

2) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันแสดงลักษณะฟองก๊าซกับตัวแปรเดียวกับข้อที่ 1)

นำขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ที่หาได้จากการทดลองมาแทนค่าลงในฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ ( $\lambda$ ) นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับตัวแปรเช่นเดียวกับข้อที่ 1) จากนั้นสร้างความสัมพันธ์อย่างง่ายเช่นเดียวกัน ให้ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นสมการที่ 5.2

$$\lambda = f_2(a) \quad (5.2)$$

3) คำนวณขนาดเซลล์เริ่มต้นจากสมการดุลมวล

นำสมการที่ 5.1 และ 5.2 มาใช้หาค่าขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ เพื่อแทนค่าลงในสมการดุลมวลของ Favelukis [1] สมการที่ 2.9 ทำให้สามารถหาค่าขนาดของเซลล์เริ่มต้น ( $y_0$ ) ได้ นำค่าขนาดของเซลล์เริ่มต้นที่คำนวณได้หารด้วยขนาดของฟองก๊าซ ( $R$ ) และพิจารณาค่าที่ได้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเซลล์ของโพนที่ได้อีก

$$\rho_{bo} \frac{4}{3} \pi R_o^3 + \rho_L \frac{4}{3} \pi (y_o^3 - R_o^3) = \rho_b \frac{4}{3} \pi R^3 + \rho_L \frac{4}{3} \pi (y^3 - R^3) \quad (2.9)$$

## 5.2 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ลักษณะการขยายตัวของฟองก๊าซในพอลิเมอร์ที่เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรในกระบวนการผลิต เช่น การเปลี่ยนชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ผสม การเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารให้ฟองก๊าซ และการเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการเกิดโฟม สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำผลการทดลองมาสร้างความสัมพันธ์ กับฟังก์ชันลักษณะของฟองก๊าซ จะสามารถทำนายขนาดของฟองก๊าซ และขนาดของเซลล์ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรในกระบวนการผลิตได้ และจากสมการควบคุมพลทำให้สามารถหาขนาดของเซลล์เริ่มต้น หรือระยะที่คาดว่าก๊าซจะแพร่เข้าสู่ฟองก๊าซได้ ซึ่งอัตราส่วนของขนาดเซลล์เริ่มต้นกับขนาดของฟองก๊าซ ยังสามารถบอกถึงแนวโน้มการเกิดฟองก๊าซที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด หรือเซลล์เปิดได้อีกด้วย โดยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 1 โครงสร้างของฟองก๊าซจะมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด และอัตราส่วนที่มากกว่า 1 จะได้ฟองก๊าซที่มีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ปิด

จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นก๊าซในส่วนที่จะแพร่จากพอลิเมอร์เข้าสู่ฟองก๊าซ ทำให้การอธิบายการกลไกการขยายตัวของฟองก๊าซได้ดียิ่งขึ้น และพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นดังกล่าวคือ ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นของก๊าซที่อยู่ในพอลิเมอร์ และฟองก๊าซ

วิธีการทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โฟม และการอธิบายการขยายตัวของฟองก๊าซ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการสร้างแบบจำลองโดยวิธีกึ่งการทดลอง สามารถใช้ทำนาย และอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โฟมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีการอาศัยทั้งความรู้ทางทฤษฎี และข้อมูลจากผลการทดลอง และวิธีที่ได้นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ ยังไม่คำนึงถึงรูปแบบของกระบวนการผลิตอีกด้วย ตัวแปรส่วนใหญ่ที่ใช้คำนวณจะเป็นคุณสมบัติของพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์โฟมทั้งสิ้น

วิธีการที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยฉบับนี้ ยังมีข้อด้อยคือ ไม่ได้มีการนำค่าการละลาย อัตราการแพร่ของก๊าซ และความหนืดของพอลิเมอร์มาร่วมในการคำนวณ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ก็เป็นตัวแปรหลัก ๆ ที่มีผลกระทบต่อขยายตัวของฟองก๊าซ และอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

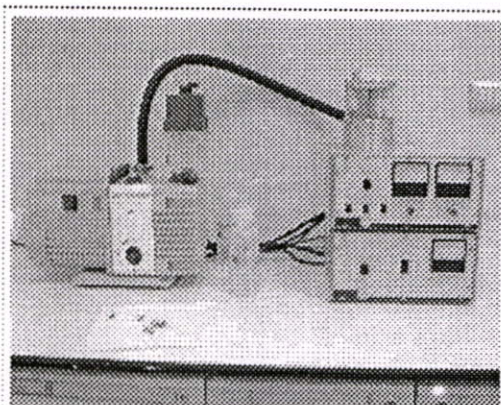
- [1] M. Favelukis, "Dynamics of Foam Growth: Bubble Growth in a Limited Amount of Liquid", *Polym. Eng. Sci.*, 44, 1900 (2004).
- [2] K. Young Kim, K. Lin Kang, and K. Ho-young, "Bubble Nucleation and Growth in Polymer Solutions", *Polym. Eng. Sci.*, 44, 1890 (2004).
- [3] D. Mao, J. R. Edwards and A. Harvey, "Prediction of Foam Growth and Its Nucleation in Free and Limited Expansion", *Chem. Eng. Sci.*, 61, 1836 (2006)
- [4] S.P. Nalawade, F. Picchioni and L.P.B.M. Janssen, "Supercritical Carbon Dioxide as a Green Solvent for Processing Polymer Melts: Processing Aspects and Applications" *Prog. Polym. Sci.* 31, 19 (2006)
- [5] S.L. Everitt, O.G. Harlen, H.J. Wilson and D.J. Read, "Bubble Dynamics in Viscoelastic to Reacting and Non-reacting Polymer Foams", *J. Non-newtonian Fluid Mech.*, 114, 83 (2003)
- [6] H. Ogawa, K. Taki, K. Muratani, M. Shimbo and M. Ohshima, "Simulation and Experiments for Temperature and Pressure Release Rate Superposition Principle in Physical Polymer Polymeric Foaming", *Kanazawa Ints. of Tech.*, Kanazawa, 924-0838 Japan.
- [7] K. Satish and E.J. Beckman, "Generation of Microcellular Polymers Using Supercritical CO<sub>2</sub>", *Chem. Eng. Dept.*, U. of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 15260, USA (1993)
- [8] S.G. Kim, B.S. Kang and C.B. Park, "Foamability of Thermoplastic Vulcanizates (TPV) Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) and Nitrogen (N<sub>2</sub>)", *Dept. of Mech. & Ind. Eng.*, U. of Toronto., Toronto, Ontario M5S 3G8.
- [9] M.S. Kim, C.C. Park, S.R. Chowdhury and G.H. Kim, "Physical Properties of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer(EVA)/Natural Rubber(NR) Blend Based Foam", *Wiley InterSci.* DOI 10.1002/app.21174.

- [10] J. Narong, S. Piyawat, M. Malin, N. Apinan, and A. Surat, "Study of Processing Parameters and Development of Simulation Model of Polyurethane Foam in Reaction Injection Molding", Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE), Thailand, LM-032, 2004.
- [11] ปรียวัฒน์ รักสวย, สาธิต ไผทวนิชย์, และเอกรัฐ มารีแพงศรี, "การศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม", ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, สจล., 2547
- [12] กมลรัตน์ สุนทรลาภ, ฉัตรทิพย์ พรหมหมวก, และเมธา บัวรักสกุล, "การเตรียมไมโครเซลล์ลาร์โฟมจากพอลิเมอร์ผสมโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต", ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, สจล., 2546
- [13] นรินทร์ หาททรัพย์, นิกร เกิดทองกลาง, และสุกิจ เกิดทองกลาง, "การศึกษาผลของอัตราส่วนยางเอทิลีนพรอพิลีนต่อคุณสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม", ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, สจล., 2547
- [14] A. Arefmanesh, S.G. Advani, *Rheol. Acta*, 30, 274 (1991).
- [15] D. E. Rosner and M. Epstein, *Chem. Eng. Sci.*, 27, 69 (1972).
- [16] N. Toshi, T. Nagata, M. Tanigaki and M. Ohshima, *Proc. Of Symposium Chemical Engineering Japan*, C105, 2000.
- [17] D. Klempner and K. C. Frisch, "Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology", Oxford University Press New York, 1991.
- [18] J. Bicerano, "Prediction of Polymer Properties", Marcel Dekker, INC. New York 1996.

## ภาคผนวก ก

### 1. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

- 1) การเตรียมชิ้นตัวอย่างโพลีเมอร์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากพอลิเมอร์ผสม มีลักษณะอ่อนนุ่มและเหนียว ดังนั้นการตัดชิ้นตัวอย่างเพื่อดูภาคตัดขวางของโพลีเมอร์ จึงต้องใช้วิธีการแช่โพลีเมอร์ตัวอย่างลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ชิ้นโพลีเมอร์ตัวอย่างแข็ง และเปราะสามารถแตกหักได้ง่าย จากนั้นใช้คีมจับปลายของพอลิเมอร์ทั้งสองด้านแล้วทำการหัก จะได้ชิ้นตัวอย่างโพลีเมอร์สำหรับศึกษาสัณฐานวิทยา
- 2) เคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 1 ชม. เพื่อให้ชิ้นโพลีเมอร์ตัวอย่างมีสมบัติในการนำไฟฟ้า
- 3) ศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



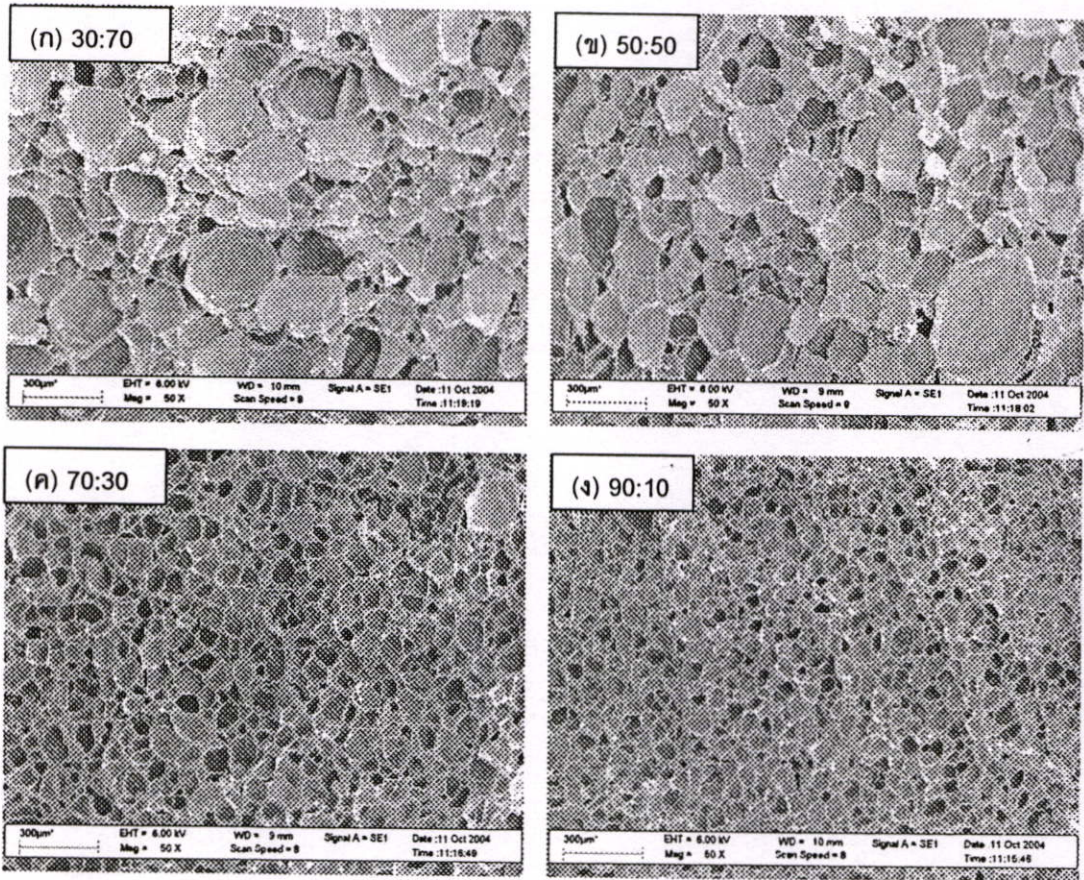
(ก) เครื่องเคลือบทอง



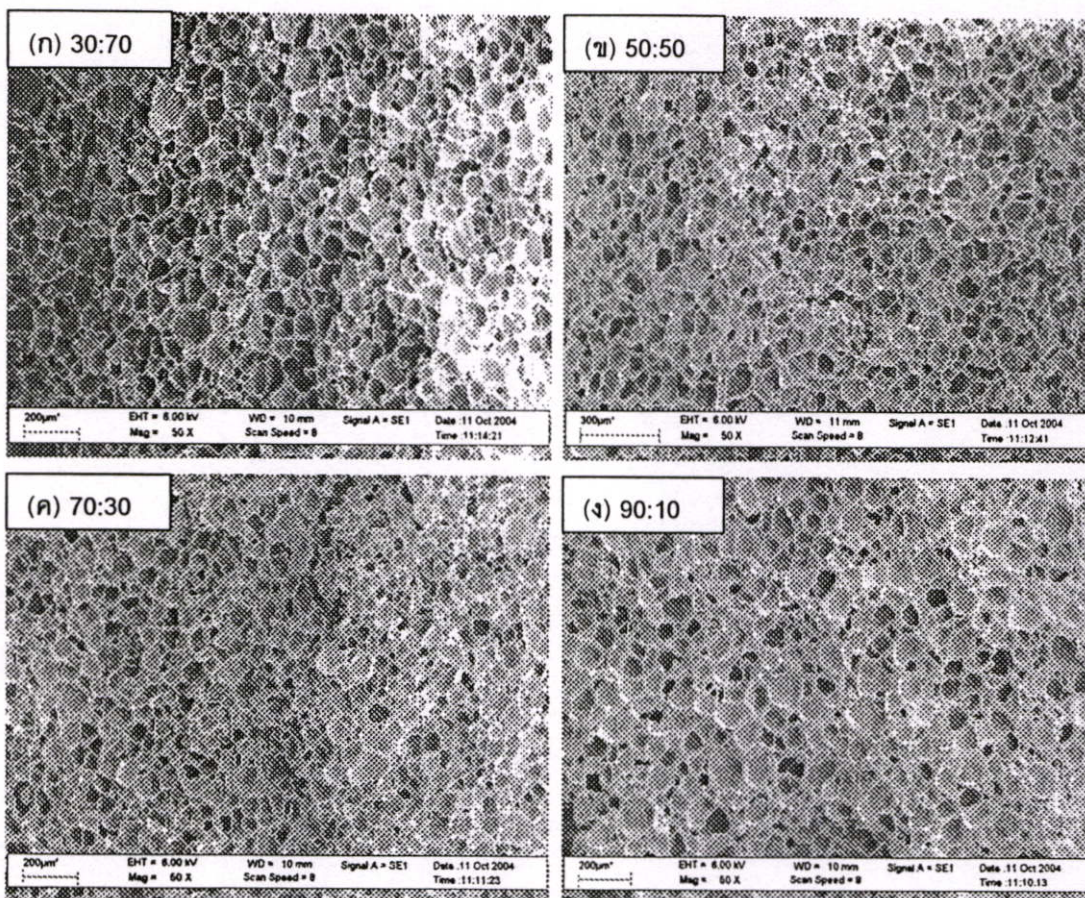
(ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปที่ ก1 เครื่องทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

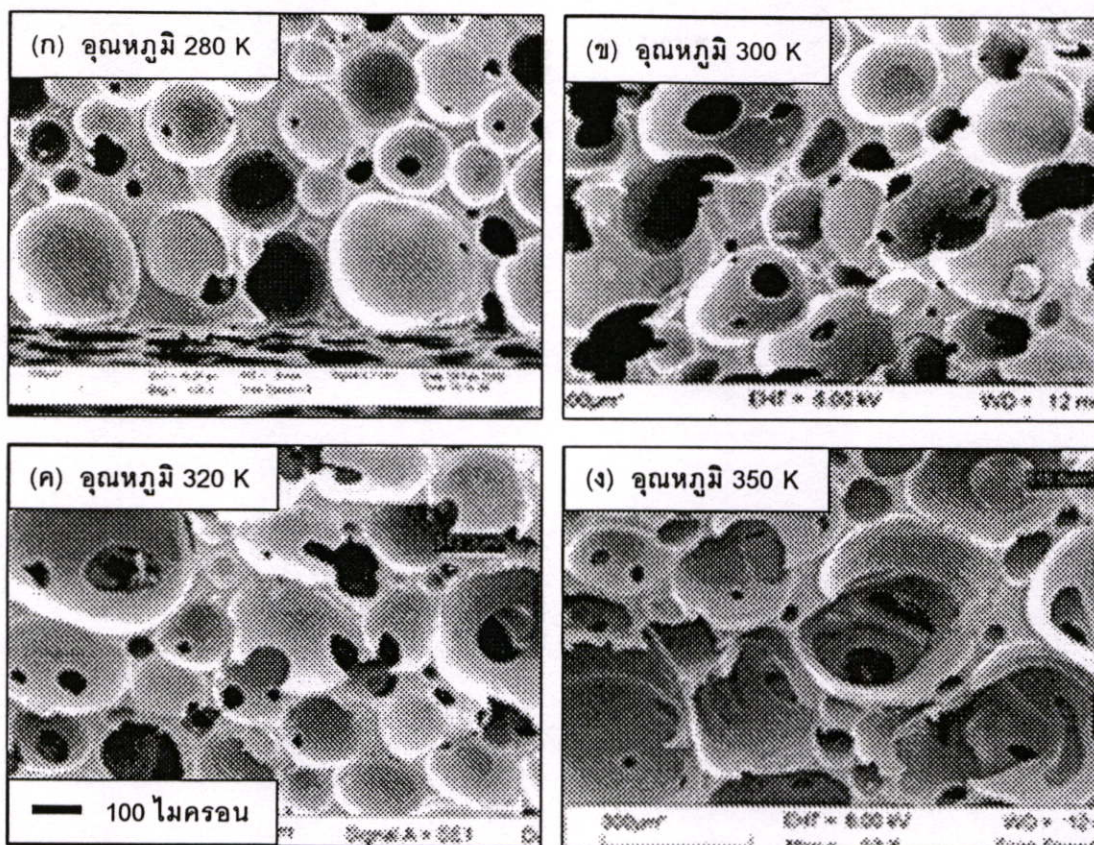
## 2. ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง



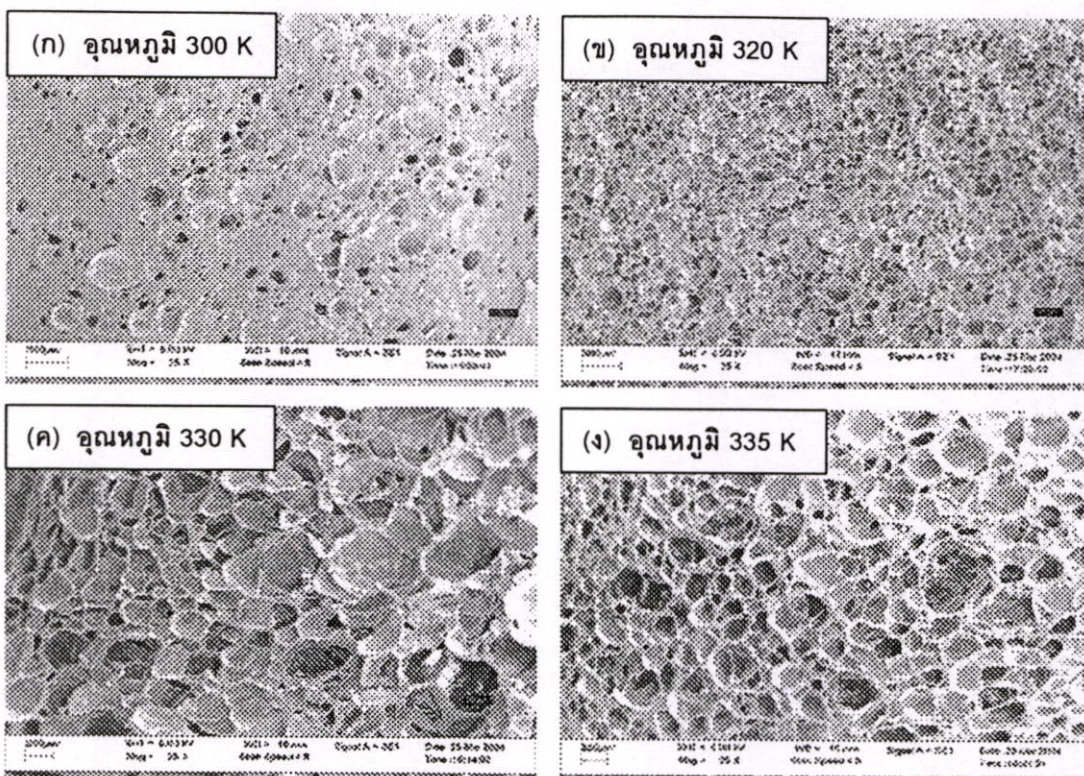
รูปที่ 2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีน มอนอเมอร์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เป็นร้อยละโดยน้ำหนัก และใช้โซโคคาร์-โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ความดัน 13.20 เมกะปาสกาล ใช้เวลาอบ 15 นาที



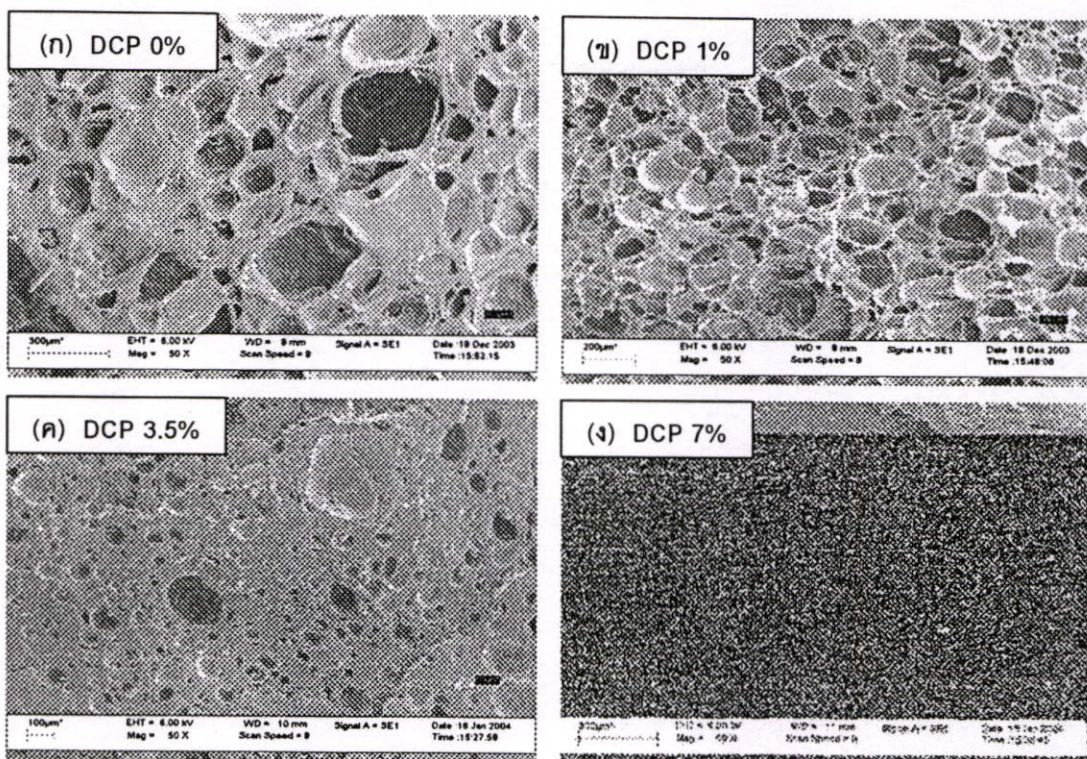
รูปที่ ก3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีน มอนอเมอร์กับพอลิเอทิลีน-ออกทีน เป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก และใช้โซโคคาร์-โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางเคมี ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ความดัน 13.20 เมกะปาสกาล ใช้เวลาอบ 15 นาที



รูปที่ ก4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิยูรีเทน โฟมที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่าง ๆ กัน



รูปที่ ๓5 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโฟมพอลิเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซีเตต กับยางธรรมชาติ ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก และใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตเป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางกายภาพ ภายใต้ความดัน 7.05 เมกะพาสคัล



รูปที่ 6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโพลีอิมเมอร์โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซีเตต กับยางธรรมชาติ ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก และใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตเป็นสารช่วยให้เกิดฟองทางกายภาพ ภายใต้ความดัน 5.18 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 327 เคลวิน

## ภาคผนวก ข

### ตารางค่าคงที่ที่ใช้ในสมการดุลมวลของ Favelukis

ในการคำนวณด้วยสมการดุลมวลของ Favelukis จำเป็นต้องแทนค่าตัวแปร หรือค่าคงที่อื่น ๆ ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โฟม ซึ่งแต่ละการทดลองจะมีค่าตัวแปร หรือคงที่ในแต่ละกรณีไม่เท่ากัน ซึ่งจะแสดงไว้ดังตารางต่อไปนี้

#### 1. ผลจากการเปลี่ยนอัตราส่วนและชนิดของพอลิเมอร์ผสม

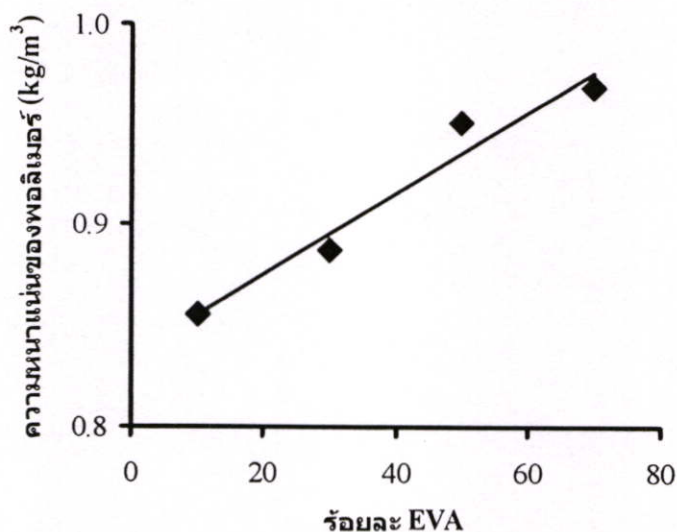
##### 1.1 เอทิลีนไวนิลอะซีเตท และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์

ในกรณีของการผลิตพอลิเมอร์โฟมจากพอลิเมอร์ผสมจากเอทิลีนไวนิลอะซีเตท และ เอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์ โดยการใช้เอโซไดคาร์บอนาไมด์ เป็นสารให้ฟองก๊าซทางเคมี จะมีค่าตัวแปร และค่าคงที่ในการคำนวณดังตารางที่ 1ข

ตารางที่ 1ข ค่าตัวแปรและค่าคงที่ ที่ใช้ในสมการของ Favelukis

ตัวแปรต่าง ๆ	ค่าของตัวแปร	หน่วย
ความดันบรรยากาศ, $P_{\infty}$	$10^5$	Pa
ความดันภายในฟองก๊าซ, $P_{b0}$	$3.44 \times 10^{13}$	Pa
อุณหภูมิสุดท้ายของการทดลอง, $T_f$	300	K
รัศมีวิกฤติของฟองก๊าซ, $R_{cr}$	291	pm
ค่าคงที่ของก๊าซ, R	8290	$m^3 \cdot atm / kgmol \cdot K$
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์, $\rho_L$	(1)	$kg/m^3$
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของก๊าซที่เกิด	28.26	$kg/kg \text{ mol}$

ในกรณีของพอลิเมอร์โฟมที่เกิดจากพอลิเมอร์ผสมนั้น เมื่ออัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมเปลี่ยนแปลง จะเป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนไปเนื่องจากความหนาแน่นเริ่มต้นของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่เปลี่ยนไป กับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมมาเขียนแสดงเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ โดยในกรณีพอลิเมอร์ผสมจากเอทิลีนไวนิลอะซีเตท และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังกราฟรูปที่ 1ข และเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 1ข



รูปที่ 1x แสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมเทียบกับปริมาณเอทิลีน ไวนิลอะซีเตท

$$\rho = 0.002A + 0.8352 \quad (1x)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม

$A$  = ร้อยละเอทิลีน ไวนิลอะซีเตท

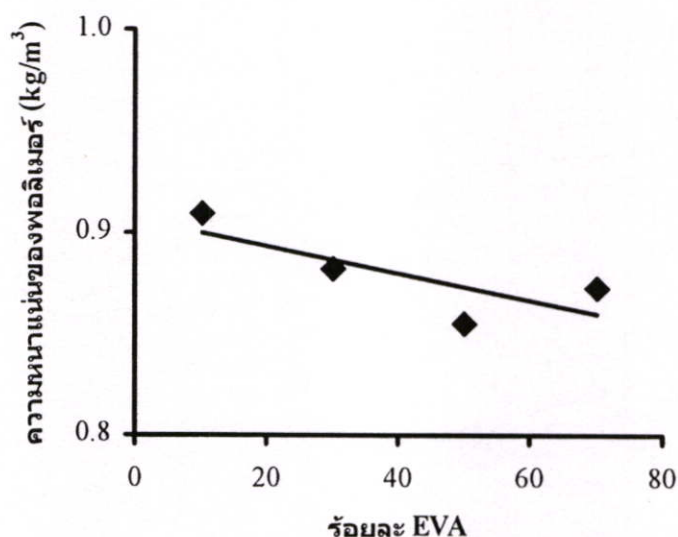
## 1.2 พอลิเอทิลีน-ออกทีน และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์

เมื่อเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ผสมเป็นพอลิเอทิลีน-ออกทีน และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอิน มอนอเมอร์ แต่กรณีนี้จะใช้ไอโซโคคาร์บอนาไมด์เป็นสารให้ฟองก๊าซเช่นเดียวกัน และใช้สภาวะในการผลิตเดียวกันกับกรณีแรก ดังนั้นค่าตัวแปร และค่าคงที่ต่าง ๆ ส่วนใหญ่จึงเท่ากับกรณีแรก ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2x

ตารางที่ 2x ค่าตัวแปรและค่าคงที่ ที่ใช้ในสมการของ Favelukis

ตัวแปรต่าง ๆ	ค่าของตัวแปร	หน่วย
ความดันบรรยากาศ, $P_{\infty}$	$10^5$	Pa
ความดันภายในฟองก๊าซ, $P_{b0}$	$3.44 \times 10^{13}$	Pa
อุณหภูมิสุดท้ายของการทดลอง, $T_f$	300	K
รัศมีวิกฤติของฟองก๊าซ, $R_{cr}$	291	pm
ค่าคงที่ของก๊าซ, $R$	8290	$m^3 \cdot atm / kgmol \cdot K$
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์, $\rho_L$	(2)	$kg/m^3$
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของก๊าซที่เกิด	28.26	kg/kg mol

ในกรณีนี้เช่นเดียวกัน เป็นพอลิเมอร์โพลิเมอร์ที่เกิดจากพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมเปลี่ยนแปลง จะเป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยน ดังนั้นจึงสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่เปลี่ยนไป กับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมมาเขียนแสดงเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ เช่นกัน โดยในกรณีพอลิเมอร์ผสมจากพอลิเอทิลีน-ออกทีน และเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีน มอนอเมอร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังกราฟรูปที่ 2ข และเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2ข



รูปที่ 2ข แสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมเทียบกับปริมาณพอลิเอทิลีน-ออกทีน

$$\rho = -0.0007B + 0.9068 \quad (2ข)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม

$B$  = ร้อยละพอลิเอทิลีน-ออกทีน

## 2. ผลของอุณหภูมิต่อขนาดของฟองก๊าซ

### 2.1 พอลิยูรีเทนโพลิเมอร์

ในกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทนโพลิเมอร์นั้น โดยปกติแล้วจะมีตัวแปรในการทดลองเป็นจำนวนมาก แต่ในการทดลองนี้จะมีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ให้คงที่เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนไปเท่านั้น ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณด้วยสมการของ Favelukis แสดงไว้ในตารางที่ 3ข

ตารางที่ 3x ค่าตัวแปรและค่าคงที่ ที่ใช้ในสมการของ Favelukis

ตัวแปรต่าง ๆ	ค่าของตัวแปร	หน่วย
ความดันบรรยากาศ, $P_{\infty}$	$10^5$	Pa
ความดันภายในฟองก๊าซ, $P_{bo}$	$10^6$	Pa
อุณหภูมิสุดท้ายของการทดลอง, $T_f$	400	K
รัศมีวิกฤติของฟองก๊าซ, $R_{cr}$	1.11	$\mu\text{m}$
ค่าคงที่ของก๊าซ, R	8290	$\text{m}^3 \cdot \text{atm} / \text{kgmol} \cdot \text{K}$
ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทน, $\rho_L$	1200	$\text{kg} / \text{m}^3$
น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์	44	$\text{kg} / \text{kg mol}$

## 2.2 เอทิลีนไวนิลอะซิเตท และยางธรรมชาติ

ค่าตัวแปร และค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณด้วยสมการของ Favelukis ในกรณีที่ใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วนร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก ซึ่งการใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่คงที่ ทำให้ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมมีค่าคงที่ การขึ้นรูปโฟมจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต ทำหน้าที่เป็นสารให้ฟองก๊าซ แสดงไว้ดังตารางที่ 4x

ตารางที่ 4x ค่าตัวแปรและค่าคงที่ ที่ใช้ในสมการของ Favelukis

ตัวแปรต่าง ๆ	ค่าของตัวแปร	หน่วย
ความดันบรรยากาศ, $P_{\infty}$	$10^5$	Pa
ความดันภายในฟองก๊าซ, $P_{bo}$	$7.05 \times 10^6$	Pa
อุณหภูมิสุดท้ายของการทดลอง, $T_f$	300	K
รัศมีวิกฤติของฟองก๊าซ, $R_{cr}$	0.14	$\mu\text{m}$
ค่าคงที่ของก๊าซ, R	8290	$\text{m}^3 \cdot \text{atm} / \text{kgmol} \cdot \text{K}$
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์, $\rho_L$	956	$\text{kg} / \text{m}^3$
น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์	44	$\text{kg} / \text{kg mol}$

### 3. ผลของสารเชื่อมโยง

กรณีนี้เป็นการศึกษาผลของกระทบของการเติมสารเชื่อมโยงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เอทีลีนไวนิลอะซีเตท และยางธรรมชาติที่อัตราส่วนคงที่ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนักเช่นเดียวกัน ทำให้ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์มีค่าคงที่ นำไปผ่านกระบวนการโพนด้วย คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ค่าตัวแปร และค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณด้วยสมการคุณมวล ของ Favelukis แสดงไว้ในตารางที่ 5ข

ตารางที่ 5ข ค่าตัวแปรและค่าคงที่ ที่ใช้ในสมการของ Favelukis

ตัวแปรต่าง ๆ	ค่าของตัวแปร	หน่วย
ความดันบรรยากาศ, $P_{\infty}$	$10^5$	Pa
ความดันภายในฟองก๊าซ, $P_{b0}$	$5.18 \times 10^6$	Pa
อุณหภูมิสุดท้ายของการทดลอง, $T_f$	300	K
รัศมีวิกฤติของฟองก๊าซ, $R_{cr}$	0.19	$\mu\text{m}$
ค่าคงที่ของก๊าซ, R	8290	$\text{m}^3 \cdot \text{atm} / \text{kgmol} \cdot \text{K}$
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์, $\rho_L$	956	$\text{kg} / \text{m}^3$
น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์	44	$\text{kg} / \text{kg mol}$

## ภาคผนวก ก

### ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการดุลมวลของ Favelukis

ในการคำนวณด้วยสมการดุลมวลของ Favelukis จำเป็นต้องแทนค่าตัวแปร หรือค่าคงที่อื่น ๆ ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โพลี ซึ่งมึ่วิธีการหาค่าของตัวแปรบางตัวดังต่อไปนี้

#### 1. ความหนาแน่นของก๊าซที่สภาวะเริ่มต้น

ความหนาแน่นของก๊าซที่สภาวะเริ่มต้นหาได้ 2 วิธี คือ

##### 1.1 การใช้สมการก๊าซอุดมคติ

วิธีการใช้สมการก๊าซอุดมคติในการคำนวณความหนาแน่นของก๊าซ จะต้องทราบความดันเริ่มต้น และอุณหภูมิเริ่มต้นของกระบวนการผลิต จากนั้นจะใช้สมการก๊าซอุดมคติคำนวณดังสมการที่ 3.8 จะได้ผลลัพธ์อยู่ในหน่วยของโมลต่อปริมาตร

$$n/V = P/RT \quad \text{kg mol/m}^3 \quad (\text{ค.1})$$

หรือ 
$$C = P/RT \quad \text{kg mol/m}^3 \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ  $R = 82.057 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{atm/kg} \cdot \text{mol K}$

จากนั้นนำน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการ มาคูณกับจำนวนโมลของก๊าซต่อปริมาตรที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 3.9 จะได้ความหนาแน่นของก๊าซที่สภาวะเริ่มต้น

$$\rho = CM \quad \text{kg/m}^3 \quad (\text{ค.3})$$

##### 1.2 การคำนวณจากปริมาณก๊าซเริ่มต้น

ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โพลีทางกายภาพ ที่มีการใช้ก๊าซความดันสูงแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อของพอลิเมอร์ที่กำลังหลอมตัวจากความร้อนที่ให้ หรือการเติมสารเคมีที่สลายตัวให้ก๊าซในขณะที่ให้นำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปด้วยความร้อน วิธีการทั้งสองวิธีนี้จะทราบปริมาณของก๊าซเริ่มต้นในกระบวนการที่ค่อนข้างแน่นอน รวมถึงปริมาตรของระบบ ดังนั้นการหาความหนาแน่นของก๊าซที่เวลาเริ่มต้น จึงหาได้จากอัตราส่วนของปริมาณก๊าซต่อปริมาตรของระบบ ดังสมการที่ ค.4

$$\rho = m/V \quad \text{kg/m}^3 \quad (\text{ค.4})$$

เมื่อ  $m =$  น้ำหนักของก๊าซ

$V =$  ปริมาตรเริ่มต้นของระบบ

## 2. การหาขนาดของฟองก๊าซเริ่มต้น

ขนาดของฟองก๊าซเริ่มต้น ( $R_0$ ) คือ ขนาดของฟองก๊าซที่เวลาเริ่มต้นที่จะขยายขนาดหรือพัฒนาไปเป็นฟองก๊าซในพอลิเมอร์โฟม ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ขนาดของฟองก๊าซเริ่มต้นมีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤต ซึ่งเป็นขนาดของฟองก๊าซที่เล็กที่สุดที่ฟองก๊าซจะสามารถขยายตัวได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$R_0 \cong R_{cr} = \frac{2\sigma}{P_{bo} - P_\infty} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $R_{cr}$  = รัศมีวิกฤตของฟองก๊าซเมื่อ

$\sigma$  = ความตึงผิวของพอลิเมอร์ (Surface Tension)

$P_{bo}$  = ความดันภายในฟองก๊าซที่เวลาเริ่มต้น

$P_\infty$  = คือความดันภายนอก

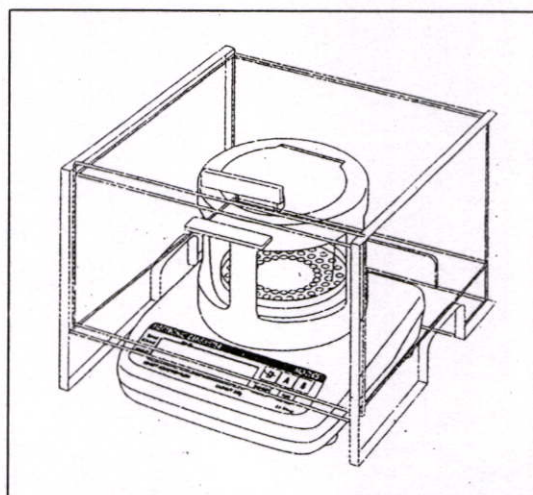
## ภาคผนวก ง

### การหาความหนาแน่น (Density)

ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โฟม เมื่อได้ผลิตภัณฑ์โฟมแล้ว จะต้องมีการหาความหนาแน่นของโฟมที่ได้ เพื่อนำค่าที่ได้มากำหนดหาจำนวนฟองก๊าซในโฟม และความหนาแน่นของโฟมยังเป็นตัวแปรหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของโฟมที่ผลิตได้อีกด้วย ปัจจุบันมีเครื่องมือวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำ หรืออาคิมิติส โดยมีวิธีการวัดดังต่อไปนี้

- 1) ตัดชิ้นโฟมตัวอย่างที่ได้ ให้มีขนาดความกว้างxความยาวxความหนา ประมาณ 0.5x2x0.5 เซนติเมตรตามลำดับ
- 2) ตั้งค่าจอแสดงผลของเครื่องวัดให้เป็นศูนย์ (set zero)
- 3) ชั่งน้ำหนักชิ้นโฟมตัวอย่างในอากาศ กดปุ่ม memory เพื่อให้เครื่องบันทึกค่าไว้
- 4) ชั่งน้ำหนักชิ้นโฟมตัวอย่างอีกครั้งในน้ำ (หากมีฟองอากาศเกาะอยู่ที่ชิ้นโฟมตัวอย่างให้พยายามกำจัดออก) กดปุ่ม memory เพื่อให้เครื่องคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นโฟมตัวอย่าง
- 5) เครื่องจะแสดงผลค่าความหนาแน่นในหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตรได้ โดยการกดปุ่ม A)
- 6) นำชิ้นโฟมตัวอย่างออกจากเครื่อง

หมายเหตุ : ในการนำชิ้นโฟมตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้คีมจับ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นออกมาทำความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปง1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S)

## ภาคผนวก จ

### การหาจำนวนของฟองก๊าซในเนื้อโพลีเมอร์ [17]

โดยทั่วไป โพลีเมอร์พลาสติกที่มีเนื้อเนื้อผิวสม่ำเสมอ และมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอด ปริมาตร 1 ลบ.ซม. จะประกอบด้วยฟองก๊าซ  $10^5$  ถึง  $10^{10}$  ฟอง โดยจะมีความแตกต่างของขนาดฟองก๊าซที่แท้จริงกับขนาดของฟองก๊าซโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12% ถึง 25% ขนาดของฟองก๊าซและการกระจายขนาดของฟองก๊าซไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์ แต่จะขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการโพลีเมอร์ด้วย จำนวนฟองก๊าซต่อหน่วยปริมาตรโพลีเมอร์เป็นตัวแปรที่สำคัญ และมีการนำมาใช้บ่อยครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) หรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวม จำนวนฟองก๊าซต่อปริมาตรโพลีเมอร์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร หาได้จากสมการ

$$N_c \cong \left( \frac{1 - \rho / \rho_p}{10^{-4} d} \right) \quad (จ1)$$

- เมื่อ  $N_c$  = จำนวนฟองก๊าซต่อปริมาตรโพลีเมอร์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $\rho_p$  = ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองก๊าซในหน่วยมิลลิเมตร

## ภาคผนวก ฉ

### วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตโฟมจากพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม

ในงานวิจัยฉบับนี้มีการผลิตพอลิเมอร์โฟมด้วยกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน และยังมี การใช้พอลิเมอร์ สารเติมแต่ง และสารเคมีหลายชนิด ซึ่งคุณสมบัติของสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้มี ดังต่อไปนี้

#### 1. เอทิลีนไวนิลอะซิเตท (Ethylene Vinyl Acetate: EVA)

เอทิลีนไวนิลอะซิเตท เป็นโคพอลิเมอร์ของ เอทิลีนและไวนิลอะซิเตท เนื่องจากสายโซ่หลักของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตท เป็นพันธะอิมิตัวโดยสมบูรณ์ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ ทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน โอโซน และสภาพอากาศได้เป็นอย่างดี ส่วนหมู่ไวนิลอะซิเตทซึ่งมีความเป็นขั้วสูงก็จะทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความทนทานต่อน้ำมัน และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี อย่างไรก็ตามเอทิลีนไวนิลอะซิเตท มีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิ ต่ำไม่ดี และเนื่องจากมีความเป็นขั้วสูง จึงมีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ไม่ดี ส่วนใหญ่จะใช้ พอลิเมอร์ ชนิดนี้ในการผลิตปลอกหุ้มสายเคเบิลเฉพาะในกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษทางด้าน ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน สภาพอากาศ ความร้อน และน้ำมัน เท่านั้น เนื่องจากสายโซ่หลักของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเป็นพันธะเดี่ยวหมด ดังนั้น พอลิเมอร์ ชนิดนี้จึงไม่สามารถคงรูปได้ด้วยระบบกำมะถัน แต่สามารถคงรูปได้ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ โดยมีการเติมสารกระตุ้นเพื่อปรับปรุงระดับของการคงรูปให้สูงขึ้น

#### 2. เอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีน มอนอเมอร์

##### (Ethylene-Propylene-Diene monomer: EPDM)

พอลิเอทิลีน-พรอพิลีน มีข้อเสียก็คือไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ (เพราะไม่มี พันธะคู่อยู่ในโมเลกุล) การทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เปอร์ออกไซด์เท่านั้น ดังนั้นจึงได้มีการเติม มอนอเมอร์ชนิดที่สาม คือไดอีนลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีส่วนที่ไม่อิมิตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุล ทำให้สามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน และเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า เอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีน มอนอเมอร์ และมีชื่อทางการค้าว่า นอเดลล์ (Nordel<sup>®</sup>) ซึ่งมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจาก แสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน สารเคมี และสิ่งแวดลอมอื่นๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยัง

มีความเป็นฉนวนสูง สมบัติที่เด่นอีกประเภทหนึ่ง คือเป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ประมาณ 0.854 กรัม/ลบ.ซม. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำหนักเบา

### 3. พอลิเอทิลีน-ออกทีน (Polyethylene-Octene)

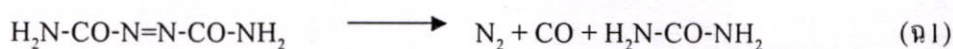
พอลิเอทิลีน-ออกทีน มีชื่อทางการค้าว่า เอนเกจ (Engage®) สามารถนำไปใช้ทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติกและอุตสาหกรรมยาง โดยส่วนมากจะใช้เป็นตัวปรับปรุงคุณภาพของยางคอมปาวด์ โดยคุณสมบัติเด่นของยางชนิดนี้คือความทนทานต่อโอโซน และออกซิเจน มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี ทนทานต่อสารเคมีและเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนได้เป็นอย่างดี

### 4. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ มีชื่อทางเคมีคือ *cis*-1,4-polyisoprene ประกอบด้วยหน่วยย่อย คือ ไอโซพรีน (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>) มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่ และมีไฮโดรเจน และคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเท่านั้น ทำให้คุณสมบัติการทนต่อสภาพอากาศโดยเฉพาะออกซิเจน โอโซน และแสงอัลตราไวโอเล็ตต่ำ นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ และความร้อนต่ำ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นตัวขัดขวางที่ทำให้ไม่สามารถนำยางธรรมชาติไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์บางชนิดได้ การปรับปรุงคุณสมบัติเหล่านี้สามารถทำได้โดยวิธีทางเคมี เช่น ปฏิกริยาการเติมไฮโดรเจน การกราฟต์พอลิเมอร์ ปฏิกริยาการเติมประเภทอื่น ๆ หรือปรับปรุงด้วยวิธีการทางกายภาพโดยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติดีกว่า

### 5. เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ)

เอโซไดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารให้ฟองก๊าซ มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ความหนาแน่น 1.65 กรัม/ลบ.ซม. จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 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% เอโซไดคาร์โบนาไมด์จะสามารถให้ก๊าซประมาณ 220 ลบ.ซม./กรัม สารประกอบเอโซไดคาร์โบนาไมด์ไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี สามารถทำให้เกิดการสลายตัวง่าย ปฏิกริยาการสลายตัวของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ คือ



เอโซโดคาร์โบนาไมด์ เป็นสารให้ฟองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายแต่จะเกิดปฏิกิริยาสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจึงไม่สามารถใช้กับพอลิเมอร์ที่ไม่เสถียรทางความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารที่ช่วยให้เอโซโดคาร์โบนาไมด์สลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลงสารจำพวกนี้เรียกว่า สารกระตุ้น หรือ คิกเกอร์ (Activator or Kicker) ตัวอย่างเช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

## 6. คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide: SC-CO<sub>2</sub>)

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต มีอุณหภูมิวิกฤต (T<sub>c</sub>) เท่ากับ 31 °ซ และมีความดันวิกฤต (P<sub>c</sub>) เท่ากับ 7.38 เมกกะพาสคัล คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบไม่มีขั้ว (Non-polar) มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถผสมเข้าได้ง่ายกับพลาสติกในขณะหลอมตัว โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะแทรกและกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพลาสติก ช่วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลหรือสายโซ่ของพลาสติก ช่วยทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และทำให้พลาสติกบวมขึ้น ทำให้ความหนืดของพลาสติกหลอมเหลวลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีส่วนช่วยให้จุดหลอมตัว และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพลาสติกลดลง ซึ่งทำให้สามารถผสมพลาสติกหลายชนิดได้ที่อุณหภูมิต่ำลงจากระบบทั่วไป ซึ่งมีข้อดีคือ โครงสร้างของพลาสติกไม่ถูกทำลายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงและสีของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน

## 7. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide , DCP)

สารเชื่อมโยงที่นิยมใช้ คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงประมาณ 104 องศาเซลเซียส ใช้ในการเชื่อมโยงสายโซ่ (cross-linking) ของพอลิเมอร์ที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล หรือเป็นพอลิเมอร์ที่อิมิตัวโดยสมบูรณ์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงผ่านอนุมูลอิสระ (Free radicals) โดยปริมาณสารเชื่อมโยงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับองศาการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ที่ต้องการ

## 8. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง หรือเรียกสั้นๆ ว่า สารกระตุ้น มีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงโดยเกิดเป็นสารเชิงซ้อน (Complexes) กับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) ทำให้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูงขึ้นเวลาที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงลดลง และยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผ่านการเชื่อมโยงให้ดีขึ้น สารกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ใช้ร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน โดยซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับ

กรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายได้ในพอลิ-เมอร์และช่วยเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง

## 9. สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent)

สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

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

การใช้งานของสารประเภทนี้มักจะอยู่ในรูปของผสมที่เป็นผง สารแขวนลอยหรือสารละลาย การใส่สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสจะทำให้พอลิเมอร์เกิดโครงสร้างผลึกที่ละเอียดขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความแข็งแรงดึง ความเหนียวเพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างดังกล่าวจะช่วยกระจายแรงที่กระทำบนพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้การที่พอลิเมอร์มีผลึกที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น จะทำให้รูปร่างที่ปรากฏของพอลิเมอร์เปลี่ยนไปด้วย พอลิเมอร์ที่ใส่สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสจะมีความโปร่งแสงหรือโปร่งใสเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากขนาดผลึกที่เล็กลง ทำให้แสงผ่านได้ดีโดยไม่ถูกกบดบัง สารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสที่นิยมใช้ คือ ทัลคัม (Talcum) ซึ่งเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตที่มีน้ำอยู่ในโมเลกุล (Hydrate magnesium silicate) มีสูตร  $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  เกิดในธรรมชาติ การใช้ทัลคัมในเทอร์โมพลาสติกในปัจจุบันจะเลือกใช้เฉพาะงานที่ต้องการความแข็งไม่ยืดหยุ่นสูงเป็นอันดับแรก ซึ่งการที่จะได้ชิ้นงานที่มีความแข็ง ไม่ยืดหยุ่นนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่เติมแต่อย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของผง และส่วนผสมทางเคมีของทัลคัมด้วย

## 10. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide , ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นของแข็งสีขาวมีความหนาแน่น 5.6 กรัม/ลบ.ซม. มีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย 0.2 ไมครอน การใช้ซิงค์ออกไซด์กับพอลิเมอร์ มักใช้เพื่อเป็นสารดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เพิ่มความแข็งและช่วยป้องกันการทำลายจากจุลินทรีย์ และ ซิงค์ออกไซด์ ยังทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นหรือคิกเกอร์ (Activator or Kicker) ที่เติมลงไปเพื่อลดอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition temperature) ของสารให้ฟอง

## 11. ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Fillers) ที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมอื่นที่ไม่มีสีดำ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดของอนุภาคเล็กๆ และมีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์เช่น เป็นสารกันติดและสารทำให้ลื่น (release agent) เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat buildup) เพิ่มความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในพอลิเมอร์ และยังช่วยลดต้นทุน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการเกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) สำหรับการเกิดฟอง การใส่ ซิลิกา ในปริมาณมาก แม้ว่าจะช่วยลดต้นทุนแต่จะทำให้ความหนาแน่นและความแข็งของโพลสูงขึ้น ส่วนความยืดหยุ่นคืนตัว (Resilience) จะลดลงค่อนข้างมาก

## 12. เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำ (Carbon black) จัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดและมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ปริมาณมาก (มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักยาง) และที่สำคัญที่สุดคือเขม่าดำสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก โดยทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

## 13. พอลิโออล (Polyols)

พอลิโออล ถือเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทน โดยที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของพอลิโออลที่ใช้ จะเป็นพอลิโออลชนิด พอลิอีเทอร์ (Polyether) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ และถ้าใช้พอลิโออลชนิดพอลิเอสเทอร์ (Polyester) จะได้ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติเฉพาะ แต่โดยปกติราคาของพอลิเอสเทอร์จะแพงกว่าพอลิอีเทอร์ ดังนั้น การเลือกพอลิโออล จะต้องพิจารณาถึงขนาดและความยืดหยุ่นของโครงสร้าง ค่าฟังก์ชันนอลิตี้ (Functionality) ซึ่งเป็นปริมาณของไฮดรอกซิลที่สัมพันธ์กับปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลต่อปริมาณพอลิโออล และระดับการเกิดโครงสร้างร่างแหในโมเลกุล ค่านี้จะส่งผลต่อการควบคุมความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ นั่นคือ โฟมคงรูป ต้องการโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งตัว จำเป็นต้องใช้พอลิโออลที่มีค่าระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่สูง แต่สำหรับโฟมยืดหยุ่น ต้องการพอลิโออลที่มีระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่ต่ำ

#### 14. ไอโซไซยานาต (Isocyanate)

ไอโซไซยานาตถือเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทนวิธีการหนึ่งที่น่ามาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน คือ การปรับเปลี่ยนชนิดของไอโซไซยานาตที่ใช้ โดยที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทน จะใช้ไอโซไซยานาตที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ โทลูอีนไดไอโซไซยานาต (Toluene diisocyanate, TDI) และไดไอโซไซยานาต ไดเฟนิลมีเทน (Diisocyanato-diphenylmethane, MDI) หรืออาจใช้อนุพันธ์ของสาร 2 ชนิดนี้

## ภาคผนวก ข

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. **P. Piyamanocha, N. Apinan and S. Areerat, "Prediction of Polyurethane Foam Product Using a Parabolic Concentration Profile"**, Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2005), p. 230-239, Hanoi, Vietnam, Nov 30<sup>th</sup> – Dec 2<sup>nd</sup> 2005.

## ประวัติผู้เขียน

นายพงศ์ประภาส ปิยมโนชา เกิดเมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ.2525 ที่จังหวัดลำปาง จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนประจำจังหวัด และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ.2547 และศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี ในสถาบันเดียวกัน ในขณะที่ศึกษาได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัยประจำโรงงาน เอสซี ฟุตแวร์ จำกัด เป็นเวลา 60 วัน ได้ติดตามอาจารย์ที่ปรึกษาเข้าอบรมและศึกษางานด้านอุตสาหกรรมยางธรรมชาติหลายครั้ง และยังมีโอกาสทำงานด้านออกแบบท่อขนส่งสารเคมีกับ บริษัท ยูนิตี้ จำกัด และปลายปี พ.ศ.2548 - ต้นปี พ.ศ.2549 ได้ทำงานช่วยเหลือภาควิชาในฐานะ ผู้ดูแลระบบคอมพิวเตอร์ประจำภาควิชาเคมีอีกด้วย