

อิทธิพลของสภาวะการเกิดโฟมต่อสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟม
โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง

EFFECT OF FOAMING CONDITIONS ON FOAM MORPHOLOGY
OF POLYVINYLCHLORIDE FOAM BY USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE AS BLOWING AGENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-220-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF FOAMING CONDITIONS ON FOAM MORPHOLOGY
OF POLYVINYLCHLORIDE FOAM BY USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE AS BLOWING AGENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-220-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิพลของสภาวะการเกิดโฟมต่อสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง
Thesis Title Effect of Foaming Conditions on Foam Morphology of Polyvinylchloride Foam by using Supercritical Carbon Dioxide as Blowing Agent
นักศึกษา นางสาววรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์
รหัสประจำตัว 55612151
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-220-021

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	
ดร.ธนวรรณ	พิณรัตน์	
ดร.วุฒิพงษ์	รังษีสันติวานนท์	
ดร.กุลนันทน์	เกียรติกิตติพงษ์	
ผศ.ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร CCA ชั้น 4 ห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้ไว้
คนบตี คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่มีการนำไปใช้

วันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของสภาวะการเกิดโฟมต่อสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง
นักศึกษา	นางสาววรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์
รหัสนักศึกษา	55612151
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะการเกิดโฟมที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมหรือพีวีซีชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมจากกระบวนการเกิดโฟมแบบกะโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าพีวีซีมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว $88.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ การทดลองแบ่งเป็น 2 ตอนดังนี้ ตอนที่ 1 ศึกษาสภาวะเกิดโฟมที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาประกอบด้วยอุณหภูมิเกิดโฟม $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลาเกิดโฟม 30 60 90 และ 120 min ความดันอิมพัลส์ 120 150 และ 170 bar เวลาในการลดความดัน 5 - 7 s จากการทดลองพบว่า โฟมพีวีซีที่เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วพบว่าการขยายตัวเป็นโฟมได้ดี การเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมมีผลทำให้ขนาดฟองใหญ่ขึ้นและขนาดฟองใหญ่ที่สุดที่อุณหภูมิเกิดโฟม $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในทางกลับกันความหนาแน่นฟองน้อยที่สุดประมาณ $1.10 \times 10^5\text{ cell/cm}^3$ เป็นผลให้มีสัดส่วนการขยายตัวสูงสุดคือ 5.26 เท่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าขนาดฟองเฉลี่ยเล็กลงเป็น $163.5\text{ }\mu\text{m}$ และ $142.9\text{ }\mu\text{m}$ และความหนาแน่นฟองมากประมาณ $2.75 \times 10^6\text{ cell/cm}^3$ และ $5.58 \times 10^6\text{ cell/cm}^3$ ตามลำดับ เมื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อนโดยด้วย Thermo gravimetric Analysis (TGA) พบว่าเกิดการระเหยของไอของพลาสติกไฮเซอร้อออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม สัดส่วนการขยายตัวต่ำและต่ำสุดที่ 1.51 เท่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อศึกษาผลของเวลาเกิดโฟมพบว่าการเพิ่มเวลาโฟมจาก 30 min ถึง 120 min ส่งผลให้ขนาดฟองใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ความหนาแน่นฟองลดลง จากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้พีวีซีอิมพัลส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตอย่างสมบูรณ์คือ 30 min เมื่อศึกษาผลของความดันอิมพัลส์ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วคือ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า การเพิ่มความดันอิมพัลส์จาก 120 bar ถึง 170 bar ทำให้ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ละลายในพีวีซีสูงขึ้นเป็นผลให้เกิดนิวเคลียสในปริมาณสูง สภาวะดังกล่าวทำให้เกิดเป็นโฟมประเภทไมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครเซลลูลาร์ ตอนที่สอง ศึกษาชนิดของสารเกิดฟองร่วมได้แก่ เฮกเซนและไซโคลเฮกซาโนน ปริมาณ สัดส่วนโดยโมลของสารเกิดฟองร่วมที่ศึกษาคือ 0.02 0.05 0.1 และ 0.2 สภาวะเกิดโฟมที่ศึกษาคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar เวลาเกิดโฟม 30 min พบว่าที่สภาวะ อุณหภูมิเกิดโฟมดังกล่าวการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนมีผลทำให้พลาสติกไซเซอรัถูกสกัดออกจาก เมทริกซ์ของพีวีซีมากขึ้น ส่งผลให้เมทริกซ์แข็งขึ้น ดังนั้นขนาดฟองและความหนาแน่นฟองลดลงใน ขณะที่ความหนาแน่นโฟมสูงขึ้น สำหรับการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนพบว่าขนาดฟอง เล็กลง สัดส่วนการขยายตัวต่ำลง เมื่อศึกษาด้วย TGA พบว่าไซโคลเฮกซาโนนสกัดเอาพลาสติกไซเซอรั และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนออกไป ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C เมื่อสัดส่วนโดยโมล เพิ่มขึ้นเป็น 0.1 และ 0.2 พบว่าพีวีซีเกิดการหลอมเหลวไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้เนื่องจากอุณหภูมิ เกิดโฟมสูงอีกทั้งเสถียรภาพทางความร้อนของเมทริกซ์ต่ำลง ดังนั้นเมทริกซ์จึงเกิดการหลอมเหลวเป็น ฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Foaming Conditions on Foam Morphology of Polyvinylchloride Foam by using Supercritical Carbon Dioxide as Blowing Agent
Student	Miss Varintorn Trisattayawej
Student ID	55612151
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

ABSTRACT

This study examines the foaming condition effect on the foam morphology of polyvinylchloride, a type of flexible PVC foam produced via the batch foaming process using supercritical carbon dioxide as a physical blowing agent. Data collected by using the Differential Scanning Calorimetry (DSC) demonstrated that PVC had a glass transition temperature of 88.6 °C. The foaming condition study was separated into the following two parts. In the first part, the foaming conditions effect on foam morphology was studied at foaming temperatures of 95, 115, 135 and 145 °C, at foaming times of 30, 60, 90 and 120 min and at saturated pressures of 120, 150 and 170 bar with a time of release pressure of 5-7 s. Resulting PVC foam prepared by foaming temperatures higher than its glass transition temperature was found to be well expanded foam. Increasing the foaming temperature caused a larger bubble diameter, the largest of which occurred when the foaming temperature was 115 °C. On the other hand, the smallest bubble density, about $1.10 \times 10^5 \text{ cell/cm}^3$, caused the highest expansion: that of 5.26 times. When increased foaming temperatures to 135 °C and 145 °C, they resulted in a smaller average bubble diameter, about 163.5 μm and 142.9 μm respectively, and a higher bubble density, about $2.75 \times 10^6 \text{ cell/cm}^3$ and $5.58 \times 10^6 \text{ cell/cm}^3$ respectively. To study thermal degradation by Thermo Gravimetric Analysis (TGA), the vaporization of plasticizer between foaming

processes and a low expansion ratio was observed (the lowest being 1.51 times at foaming temperature 145 °C). Increasing foaming time from 30 min to 120 min caused a slightly larger bubble diameter, but resulted in a reductive bubble density. Foaming time suitable for PVC saturated with supercritical carbon dioxide was 30 min. When examining the saturated pressure at foaming temperatures lower than the glass transition temperature, 40, 60 and 80 °C demonstrated increasing saturated pressure from 120 to 170 bar caused higher solubility of supercritical carbon dioxide solute in PVC, which caused more nucleating. This foaming condition produced microcellular foam. In the second part, examining types of co-blowing agents such as hexane and cyclohexanone at mole fractions 0.02, 0.05, 0.1 and 0.2, foaming temperatures 40, 60 and 115 °C and a saturated pressure of 170 bar at a foaming time of 30 min, it was observed that increasing mole fraction of hexane resulted plasticizer might be more extracted out of PVC matrix, resulted matrix to be hard. Bubbles diameter and bubble density decreased, while foam density increased. Increasing the mole fraction of cyclohexanone resulted in a smaller bubble diameter and lower expansion ration compared to the study using TGA, which found that plasticizer and heat stabilizer were extracted by cyclohexanone. At foaming temperature 115 °C, increasing mole fraction to 0.1 and 0.2 resulted in PVC melting. This failure of foaming occurred because a high foaming temperature combined with reduction of heat stabilizer of PVC matrix. Therefore matrix was melted as film.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบผลสำเร็จได้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบความรู้ คำแนะนำและความกรุณาอบรมสั่งสอน อีกทั้งประสบการณ์ในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) ในกลุ่มธุรกิจเคมีภัณฑ์ในเครือของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) สำหรับสนับสนุนเงินทุนและวัสดุในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ นักศึกษาภายใต้การดูแลของ ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่ให้การช่วยเหลือและให้คำปรึกษาดำเนินงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือการใช้เครื่องมือทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้อุปการะคุณ ที่ช่วยส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีการศึกษา ข้าพเจ้าจะนำความรู้ความสามารถที่ได้ศึกษาไปใช้เพื่อก่อเกิดประโยชน์ต่อสังคมอย่างสุดความสามารถ และมีสิ่งที่จะตอบแทนบุญคุณทุกท่าน

ทั้งนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครู อาจารย์ ทุกท่าน และผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่คอยอบรมสั่งสอนและได้มอบความรู้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าจึงขอคุณพระศรีรัตนตรัย ดลบันดาลให้ทุกท่านมีแต่ความสุขและความเจริญยิ่งขึ้นไป

หากเกิดความผิดพลาดประการใด ในงานวิจัย ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้ และข้าพเจ้ายินดีที่จะนำข้อมูลอันจะมีประโยชน์แก่ผู้สนใจ สามารถนำไปใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้า เพื่อเป็นประโยชน์ในวันข้างหน้า ข้าพเจ้าจักยินดีอย่างยิ่ง คุณประโยชน์อันได้อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
สัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์.....	4
2.1.1 โครงสร้างของพีวีซี.....	4
2.1.2 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพีวีซี.....	5
2.1.3 สมบัติเชิงกล.....	5
2.1.3.1 ระดับการเกิดพอลิเมอไรเซชัน.....	5
2.1.3.2 ค่า K-Value.....	6
2.1.4 สมบัติทางความร้อนของพีวีซี.....	6
2.1.4.1 ปรากฏการณ์การเกิดเจลหรือการหลอมตัวของพีวีซี.....	6
2.1.4.2 การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซี.....	7
2.1.5 สารเติมแต่ง.....	9
2.1.5.1 พลาสติไซเซอร์.....	9
2.1.5.2 สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน.....	10
2.1.5.3 สารหล่อลื่น.....	10
2.1.5.4 สารต้านทานแรงกระแทก.....	11
2.1.5.5 สารช่วยในการขึ้นรูป.....	11
2.1.5.6 สี.....	11
2.1.6 ตัวทำละลายพีวีซี.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตี VI ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2	พอลิเมอร์โฟม.....	12
2.2.1	ประเภทของโฟม.....	13
2.2.2	หลักการเกิดโฟม.....	13
2.2.3	สารเกิดฟอง.....	14
2.2.3.1	สารเกิดฟองทางเคมี.....	14
2.2.3.2	สารเกิดฟองทางกายภาพ.....	14
2.2.4	กระบวนการเกิดโฟมของพีวีซีโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพ.....	14
2.3	ไมโครเซลล์ลูลาร์โฟม.....	15
2.4	คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	16
2.4.1	สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	17
2.4.2	สมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของของผสมเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์.....	17
2.4.3	สมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของของผสมไซโคลเฮกซานอนและคาร์บอนไดออกไซด์.....	17
2.5	การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟม.....	18
2.5.1	ขนาดฟอง.....	18
2.5.2	ความหนาแน่นฟอง.....	19
2.5.2.1	การกำหนดพื้นที่ผิว.....	19
2.5.2.2	การกำหนดจำนวนฟอง.....	20
2.5.3	สัดส่วนการขยายตัว.....	20
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3	วิธีการทดลอง.....	23
3.1	การศึกษาสภาวะเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี.....	
3.1.1	สารเคมี.....	23
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	23
3.1.3	กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ.....	23
3.2	การศึกษานิคมของสารเกิดฟองร่วมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี.....	
3.2.1	สารเคมี.....	25
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	25
3.2.3	กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดวีดิโออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา	
3.3.1 สารเคมี.....	27
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	27
3.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา.....	27
3.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีพีวีซี	
3.4.1 สารเคมี.....	28
3.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	29
4.1 การศึกษาสภาวะเกิดโพลีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	29
4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโพลีสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	29
4.1.2 การศึกษาผลของเวลาเกิดโพลีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	33
4.1.3 การศึกษาผลของความดันอิมพัลส์ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	37
4.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	43
4.2.1 การศึกษาผลของปริมาณเฮกเซนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	43
4.2.2 การศึกษาผลของปริมาณไซโคลเฮกซานอนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 การศึกษาสภาวะเกิดโพลีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	54
5.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโพลีสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	54
5.1.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโพลีต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	54
5.1.3 การศึกษาผลของเวลาเกิดโพลีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	54
5.1.4 การศึกษาผลของความดันอิมพัลส์ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	55
5.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีพีวีซี.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1 การศึกษาผลของปริมาณเฮกเซนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี.....	55
5.2.2 การศึกษาผลของปริมาณไซโคลเฮกซาโนนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี.....	55
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ.....	60
ภาคผนวก ข การหาความหนาแน่นโฟมด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์.....	62
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	63
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟมด้วยโปรแกรม Image – J.....	65
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพีวีซีด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry, DSC.....	68
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพีวีซีและโฟมพีวีซี.....	70
ภาคผนวก ช แผนผังวัฏภาคไอ-ของเหลวของของผสมระหว่างเฮกเซน และคาร์บอนไดออกไซด์.....	76
ภาคผนวก ซ แผนผังวัฏภาคไอ-ของเหลวของของผสมระหว่างไซโคลเฮกซาโนน และคาร์บอนไดออกไซด์.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K - Value และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	6
2.2 ค่าการละลายของพีวีซีและตัวทำละลายที่ใช้ละลายพีวีซี.....	11
2.3 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหลชนิดต่างๆ.....	16
2.4 การเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแก๊ส ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์.....	17
3.1 สภาวะเกิดโพล์มที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.2 สภาวะเกิดโพล์มที่ใช้เฮกเซนเป็นสารเกิดพองร่วมในการทดลอง.....	26
3.3 สภาวะเกิดโพล์มที่ใช้ไซโคลเฮกซาโนนเป็นสารเกิดพองร่วมในการทดลอง.....	27
4.1 เปอร์เซ็นต์ของการสลายตัวแต่ละช่วงของพีวีซีและโพล์มพีวีซี ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพล์ม 95 °C และ 145 °C.....	31
4.2 เปอร์เซ็นต์ของการสลายตัวแต่ละช่วงของพีวีซีและโพล์มพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพล์ม 40 °C และ 60 °C ที่สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.2.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องขึงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพีวีซี.....4
2.2	ตำแหน่งการแตกตัวของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนกับคลอรีนในโมเลกุลของพีวีซี8
2.3	การแทรกตัวพลาสติกไซเซออร์ในสายโซ่โมเลกุลของพีวีซี9
2.4	โครงสร้างภายในของโฟม12
2.5	ขั้นตอนการเกิดโฟมของพีวีซีโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพ15
2.6	แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์16
2.7	แผนภาพวัฏภาคไอ-ของเหลวระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C17
2.8	แผนภาพวัฏภาคไอ – ของเหลวระหว่างไซโคลเฮกซาโนนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 160 °C18
2.9	การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟอง19
2.10	การนับจำนวนฟองด้วยวิธีกำหนดพื้นที่ผิวและนับจำนวนฟองแบบเฉลี่ย20
2.11	การนับจำนวนฟองด้วยวิธีการกำหนดจำนวนฟอง20
3.1	เครื่องอัดรีดขึ้นรูปเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนด้วยวิธีการ Free-fall Method24
4.1	ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min ที่กำลังขยาย100x.....29
4.2	ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มและหลังบ่มเป็นเวลา 12 h ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอิมตัว 120 bar เวลาเกิดโฟม 120 min30
4.3	TGA curve ของพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 145 °C ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน31
4.4	ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองและความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min32
4.5	ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของพีวีซีโฟมที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min33
4.6	ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ เวลาเกิดโฟม 30 60 90 และ 120 min อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิมตัว 120 bar ที่กำลังขยาย 100x.....33
4.7	ผลของเวลาเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C ความดันอิมตัว 120 bar34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ผลของเวลาเกิดโคมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโคมหลังบ่มเป็นเวลา 12 h ที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 95 115 135 และ 145 °C ความดันอิมิตัว 120 bar35
4.9	ผลของเวลาเกิดโคมต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิมิตัว 120 bar36
4.10	ผลของเวลาเกิดโคมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิมิตัว 120 bar.36
4.11	ผลของเวลาเกิดโคมต่างๆ ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิมิตัว 120 bar37
4.12	ภาพไมโครกราฟของโคมพีวีซีที่สภาวะความดันอิมิตัว 120, 150 และ 170 bar ที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม (ก) 40 °C (ข) 60 °C ที่กำลังขยาย 15000X และ (ค) 80 °C ที่กำลังขยาย 1000X เวลาเกิดโคม 30 min.....38
4.13	ผลของความดันอิมิตัวที่สภาวะต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโคมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโคม 30 min.....39
4.14	ผลของความดันอิมิตัวที่สภาวะต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโคมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโคม 30 min39
4.15	ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 °C และ 60 °C เวลาเกิดโคม 30 min40
4.16	ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโคม 30 min.....40
4.17	ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโคม 30 min.....40
4.18	ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของผนังฟองที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโคม 30 min.....41
4.19	ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโคม 30 min.....41
4.20	ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโคม 30 min.....42
4.21	ภาพไมโครกราฟของโคมพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซน ที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม (ก) 40 °C (ข) 60 °C ที่กำลังขยาย 15000X และ (ค) 115 °C ที่กำลังขยาย 500X ความดันอิมิตัว 170 bar เวลาเกิดโคม 30 min43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นเบาะแสหรือข้อผิดพลาดใดๆ กรุณาแจ้งไปยังผู้จัดทำเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	44
4.23 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมหลังบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	45
4.24 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	45
4.25 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	46
4.26 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	46
4.27 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซนที่ส่งผลสัดส่วนการขยายตัวที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	47
4.28 ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม (ก) 40°C (ข) 60°C ที่กำลังขยาย 15000X และ (ค) 115°C ที่กำลังขยาย 500X ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min	48
4.29 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	49
4.30 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมหลังบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	49
4.31 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40°C และ 60 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟม คือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	50
4.33 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟอง ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	51
4.34 TGA curve ของแผ่นพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.2 ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน.....	52
4.35 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัว ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min.....	53
ก.1 ชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปพีวีซีโฟมแบบกะ	60
ข.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter ; MD-200S).....	62
ค.1 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater.....	63
ค.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ ZEISS รุ่น MA10.....	64
ค.3 ตัวอย่างภาพไมโครกราฟของพีวีซีโฟม	64
ง.1 การเลือกเกิดภาพไมโครกราฟจากโปรแกรม Image - J.....	65
ง.2 การเลือกเครื่องมือเส้นตรงบนแถบเครื่องมือ.....	65
ง.3 การตั้งค่าหน่วยวัด	66
ง.4 การกรอกข้อมูลตั้งค่าหน่วยวัด	66
ง.5 การเลือกเครื่องมือ "Polygon" บนแถบเครื่องมือ	67
ง.6 การกำหนดขอบเขตในการหาพื้นที่และการนับจำนวนฟองแก๊ส	67
จ.1 DSC ของพีวีซีช่วงอุณหภูมิ 25 - 200 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศ	69
ฉ.1 TGA curve ของแผ่นพีวีซีที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน.....	71
ฉ.2 TGA curve ของโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฉ.3	TGA curve ของโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 145 °C ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน73
ฉ.4	TGA curve ของแผ่นพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.2 ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน74
ฉ.5	TGA curve ของแผ่นพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.2 ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 60 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน75
ช.1	แผนผังวัฏภาคไอ - ของเหลวระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C สัญลักษณ์วงกลมที่บคือข้อมูลจากการทดลองของ lezzi และคณะ สัญลักษณ์กากบาทคือข้อมูลจากการทดลองของ Yee และคณะ สัญลักษณ์โป่งคือข้อมูลจากการใช้ SKS model.....76
ช.2	แผนผังวัฏภาคไอ - ของเหลวระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 °C สัญลักษณ์วงกลมที่บคือข้อมูลจากการทดลองของ lezzi และคณะ สัญลักษณ์วงกลมโป่งคือข้อมูลจากการใช้ SKS model77
ช.1	แผนผังวัฏภาคไอ - ของเหลวระหว่างไซโคลเฮกซาโนนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 160 °C โดยที่ สัญลักษณ์ + คือข้อมูลการทดลองของ Laugier และ Richon, สัญลักษณ์ x คือ ข้อมูลการทดลองของ Esmelindro และคณะ สัญลักษณ์ คือข้อมูลการทดลองของ Feng และคณะ สัญลักษณ์ คือข้อมูลการทดลองของ Merker และคณะ สัญลักษณ์เส้นตรงคือข้อมูลจากการใช้สมการ Peng-Robinson EOS โดยใช้ค่า $k_{ij} = 0.0325$78

สัญลักษณ์

ตัวอักษร

A	พื้นที่ในการนับจำนวนฟอง (cm^2)
m_p	น้ำหนักของพอลิเมอร์ (g)
m_g	น้ำหนักของแก๊ส (g)
N	จำนวนฟอง (cells)
N_F	ความหนาแน่นฟอง (cells/cm^3)
n	จำนวนฟองที่นับได้จากภาพไมโครกราฟ (cells)
P	ความดัน (bar)
V_F	ปริมาตรโฟม (cm^3)
V_p	ปริมาตรพอลิเมอร์ (cm^3)
x	สัดส่วนโดยโมลในวัฏภาคของเหลว
y	สัดส่วนโดยโมลในวัฏภาคแก๊ส
ϕ	สัดส่วนการขยายตัว
ρ_F	ความหนาแน่นของโฟม (g/cm^3)
ρ_P	ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (g/cm^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่^{xvi}่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride) หรือ พีวีซี (PVC) เป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic Polymer) ประเภทอสัณฐาน (Amorphous Polymer) สามารถหลอมเหลวขึ้นรูปได้ด้วยความร้อน และสามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ (Recycle) ได้ สังกะหรณ์จากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer) หรือ VCM คุณลักษณะทั่วไปเป็นผงละเอียดสีขาว เมื่อติดไฟแล้วสามารถดับได้ด้วยตัวเอง (Self Extinguish) ทนต่อสภาพกรด-ด่างและน้ำ แต่ไม่ทนความร้อน ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเติมแต่งก่อนนำไปใช้งาน หากนำมาหลอมขึ้นรูปจะมีความแข็งแต่เปราะ และเมื่อถูกเผาไหม้จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซบอนไดออกไซด์ (CO₂), ก๊าซไฮโดรคลอริก (HCl) และน้ำเป็นต้น พีวีซีแบ่งได้สองชนิดคือ พีวีซีชนิดแข็ง (Un-Plasticizes PVC) มีคุณสมบัติคือ แข็งแต่เปราะ ความแข็งแรงเชิงกลดี ความหนาแน่นประมาณ 1.3 - 1.45 g/cm³ นิยมใช้ในงานด้านอุปกรณ์ก่อสร้างบ้านเช่น ท่อน้ำพีวีซี ข้อต่อพีวีซี ขอบหน้าต่างและประตูเป็นต้น พีวีซีชนิดยืดหยุ่น (Plasticizes PVC) มีคุณสมบัติคือ อ่อนตัวและยืดหยุ่นได้ เนื่องจากมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งช่วยปรับเปลี่ยนจากพีวีซีที่แข็งให้เป็นพีวีซีที่นิ่มลง ความหนาแน่นประมาณ 1.1 - 1.35 g/cm³ นิยมใช้งานเช่น กระเป๋าหนังเทียม ฉนวนหุ้มสายไฟ โซฟา เบาะรถยนต์ ผ้าปูโต๊ะพีวีซีเป็นต้น ปัจจุบันนิยมนำพีวีซีมาใช้งานเป็นจำนวนมากเนื่องจากมีราคาถูก ทนต่อสารเคมี ทนต่อการเสียดสีและเป็นฉนวนไฟฟ้าเป็นต้น

พอลิเมอร์โฟม (Polymer Foam) เข้ามามีบทบาทกับการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้นไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเช่น ฟองน้ำ รองเท้า บรรจุภัณฑ์อาหาร เบาะรถยนต์ ฉนวนหุ้มสายไฟ โซฟา ผังเก็บเสียง ผังกั้นความร้อน ผังกั้นกระแทกรวมไปจนถึงวัสดุก่อสร้างอย่างอิฐมวลเบาเป็นต้น เนื่องจากพอลิเมอร์โฟมมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการอาหารเช่น มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงเมื่อเทียบกับของแข็งชนิดอื่น ดูดซับแรงกระแทกได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนและต้านทานทางไฟฟ้าได้ดี อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณการใช้สารตั้งต้นและสารเคมีในกระบวนการ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นเหตุผลให้พอลิเมอร์โฟมเป็นที่นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย กระบวนการเกิดพอลิเมอร์โฟมโดยส่วนใหญ่นิยมใช้สารเกิดฟองประเภทสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน Chlorofluorocarbon, CFCs) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrochlorofluorocarbons, HCFCs) เป็นต้น ซึ่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้เมื่อเกิดการระเหยจะไปทำลายโอโซนชั้นบรรยากาศของโลก ส่งผลให้รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลตราไวโอเลตหรือรังสียูวีส่งมายังโลกได้มากกว่าปกติ อีกทั้งยังเป็นอันตรายกับมนุษย์คือก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงมีการค้นคว้าวิจัยพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide, scCO₂) มีประสิทธิภาพในการเป็นสารเกิดฟองได้ดี โฟมที่ได้มีสมบัติเท่ากันทั้งชิ้นงาน ขนาดฟองที่ได้ใกล้เคียงกัน ปริมาณฟองและสามารถควบคุมสมบัติของโฟมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ง่ายด้วยการปรับความดันอิมพัลส์หรืออุณหภูมิเกิดโฟม คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตไม่เพียงใช้ในกระบวนการเกิดโฟมเพียงเท่านั้น ด้วยคุณสมบัติที่เป็นของไหลเหนือวิกฤตซึ่งมีสมบัติระหว่างของเหลวและแก๊สทำให้มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวทำละลาย สามารถใช้ในการสกัดคาเฟอีนจากเมล็ดชาและกาแฟได้อีกด้วย ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจึงเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจใช้แทนสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกระบวนการเกิดโฟม

โฟมประเภทไมโครเซลลูลาร์ (Microcellular Foam) มีลักษณะโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด ขนาดฟองประมาณ 1 - 10 μm ความหนาแน่นฟองสูงประมาณ $10^7 - 10^9 \text{ cells/cm}^3$ ด้วยลักษณะโครงสร้างดังกล่าวจึงทำให้โฟมประเภทนี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีคือ ความแข็งแรงกดอัด (Impact Strength) ดี สมบัติด้านการเป็นฉนวนความร้อน กระบวนการเกิดโฟมไมโครเซลลูลาร์เกิดที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ ความดันอิมพัลส์สูงและอัตราการเย็นตัวที่เร็ว ด้วยความที่โฟมประเภทนี้มีขนาดฟองที่เล็กใกล้เคียงกัน การกระจายตัวของฟองมากและสม่ำเสมอ สมบัติเชิงกลจึงเท่ากันทั้งชิ้นงาน พอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมนี้ได้เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิคาร์บอนเนต (Polycarbonate, PC) พอลิเมทิลเมทาคริลเลต (Polymethyl Methacrylate, PMMA) และพอลิทาเรพทาเรต (Polytraeptalate, PET) การนำไปใช้งานเช่น ฉนวนกันความร้อน ฉนวนกันเสียง อุปกรณ์โครงสร้างที่ใช้กับเรือและเครื่องบิน เป็นต้น จากงานวิจัย Shu-Kai Yeh และคณะ [1] ศึกษาการใช้น้ำเป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเกิดโฟมแบบอัดรีดผ่านกรวย (Extrusion Foaming Process) ของโฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ที่เป็นฉนวนความร้อน พบว่าน้ำที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วม (Co-Blowing Agent) นั้นมีผลทำให้สัมพัทธ์ของโฟมที่ได้ดีขึ้น ขนาดฟองใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นโฟมลดลง อีกทั้งยังเป็นฉนวนทางความร้อนที่ดีขึ้น และจากงานวิจัยของ Na Zhao และคณะ [2] ศึกษาการเกิดเป็นโฟมของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol) และ Microfibrillated Cellulose หรือ MFC โดยการใช้น้ำเป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตร่วมในกระบวนการเกิดโฟมแบบอัดรีดผ่านกรวยอย่างต่อเนื่อง พบว่าน้ำที่ทำหน้าที่เป็นสารเกิดฟองร่วมนั้น ทำให้โครงสร้างของโฟมดีและมีความหนาแน่นฟองสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาความสามารถในการเป็นโฟมและสัมพัทธ์ของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่สภาวะเกิดโฟมต่างๆ และศึกษาการใช้สารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเพื่อเพิ่มการประยุกต์การใช้งานของโฟมประเภทนี้ให้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการเป็นโฟม (Foamability) ของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมชนิดยืดหยุ่น ด้วยกระบวนการเกิดโฟมแบบกะซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพ

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะเกิดโฟมที่เหมาะสมต่อสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟม

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบชนิดของสารเกิดฟองร่วมอันได้แก่ เฮกเซน (n - Hexane) และไซโคลเฮกซาโนน (Cyclohexanone) ร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมที่เตรียมจากสภาวะเกิดโฟมที่กำหนด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาความสามารถในการเป็นโฟมของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 145°C ความดันอัดตัว 120 - 190 bar เวลาเกิดโฟม 30 - 120 min และกำหนดเวลาในการลดความดัน 5 - 7 s

1.3.2 ศึกษาชนิดของสารเกิดฟองร่วมคือ เฮกเซนและไซโคลเฮกซาโนน ที่สัดส่วนโดยโมลคือ 0.02, 0.05, 0.1 และ 0.2 สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 115°C ความดันอัดตัว 170 bar เวลาเกิดโฟม 30 min และกำหนดเวลาในการลดความดัน 5 - 7 s

1.3.3 ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.3.4 วิเคราะห์ขนาดฟองและความหนาแน่นฟองด้วยโปรแกรม Image J

1.3.5 วิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมด้วย Thermogravimetric Analysis หรือ TGA

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 เพิ่มองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมด้วยกระบวนการเกิดโฟมแบบกะโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองแทนการใช้สารเกิดฟองที่ระเหยง่าย

1.4.2 สามารถวิเคราะห์สภาวะเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์

1.4.3 สามารถวิเคราะห์กลไกการทำงานของสารเกิดฟองร่วมร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

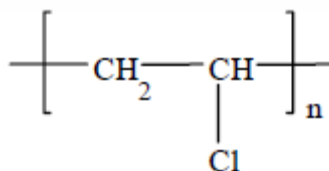
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) [3,4]

พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือเรียกอีกอย่างว่า พีวีซี เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งสังเคราะห์จาก ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer) หรือ VCM เป็นพอลิเมอร์ประเภท เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic Polymer) คือสามารถหลอมเหลวขึ้นรูปได้ด้วยความร้อน และสามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ (Recycle) ได้ คุณลักษณะทั่วไปเป็นผงละเอียดสีขาว เมื่อติดไฟแล้วสามารถดับได้ด้วยตัวเอง (Self Extinguish) ทนต่อสภาพกรด-ด่างและน้ำ แต่ไม่ทนความร้อนดังนั้นจึง ต้องมีการเติมสารเติมแต่งก่อนนำไปใช้งาน หากนำมาหลอมขึ้นรูปจะมีความแข็งแต่เปราะ และเมื่อถูกเผาไหม้จะ ปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), แก๊สไฮโดรคลอริก (HCl) และน้ำ เป็นต้น [3]

พีวีซีสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ พีวีซีชนิดแข็ง (Rigid PVC หรือ un-Plasticizer, uPVC) มีลักษณะแข็ง เปราะ สมบัติเชิงกลดี ความหนาแน่นประมาณ 1.3 - 1.45 g/cm³ นิยมใช้งานด้านอุปกรณ์ภายในบ้านเช่น ท่อน้ำ พีวีซี ข้อต่อพีวีซี ประตูและหน้าต่าง เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและการนำไปใช้งานจึงนำพีวีซีชนิดแข็งผสมกับ สารเติมแต่ง (Additive) อาทิเช่น พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งช่วยปรับเปลี่ยนจากพีวีซีที่แข็งให้เป็นพีวีซีที่นิ่มลง ได้เรียกพีวีซีชนิดนี้ว่า พีวีซีชนิดยืดหยุ่น (Flexible PVC, PVC) ซึ่งมีลักษณะอ่อนตัวและยืดหยุ่นได้ ความหนาแน่นประมาณ 1.1 - 1.35 g/cm³ นิยมใช้งานเช่น ฉนวนหุ้มสายไฟ ผนังเทียม ฯลฯ สารเติมแต่งถูกผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับ พีวีซีเรซินก่อนนำไปหลอมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป [4]

2.1.1 โครงสร้างของพีวีซี (Structure)

โครงสร้างทางเคมีของพีวีซีประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจนและคลอรีนเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยคลอรีน 57 % และไฮโดรคาร์บอน 43 % ทำให้พีวีซีมีส่วนผสมของปิโตรเลียมน้อยกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น โดยส่วนใหญ่เกิดการจัดเรียงตัวแบบอะแทคติก (Atactic) ดังนั้นโครงสร้างส่วนใหญ่ของพีวีซีจึงเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) และอีกประมาณ 5 - 10 % เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของพีวีซี [5]



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพีวีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพีวีซี (Polymerization of PVC) [6]

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพีวีซีแบบอนุมูลอิสระ (Free Radical) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอน Initiation คือขั้นตอนที่เกิดการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้แก่ โมเลกุลของฮาโลเจน (Halogen Molecule) สารประกอบเอโซ (Azo - Compound) เช่น Azo-bis-isobutyronitrile (AIBN) และสารประกอบอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic Peroxide) เช่น Benzoyl Peroxide (BPO) เป็นต้น จากนั้นอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์

ขั้นตอน Propagation คือขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันอย่างต่อเนื่องโดยเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลไปเรื่อยๆ ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีขนาดและน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขั้นตอน Propagation

ขั้นตอน Termination คือขั้นตอนการหยุดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการรวมตัวกันของสองสายโซ่โมเลกุลที่มีอนุมูลอิสระ ทำให้ไม่มีอนุมูลอิสระในสายโซ่ใด หรืออีกวิธีหนึ่งคือการเติมสารยุติปฏิกิริยา (Terminator) เช่น ฟีนิลอะซิไทลีน (Phenylacetylene)

2.1.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical Property)

พีวีซีมีสมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแต่เปราะ (Brittle) เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้งานต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) โดยทั่วไปพีวีซีมีค่า T_g ที่ประมาณ 82 - 87°C โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน สมบัติเชิงกลของพีวีซีขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) การเกิดเจล (Gelation) เป็นต้น โดยหากพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงที่ดี แต่น้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากอาจส่งผลทำให้พีวีซีไหลได้ยากในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นจึงควรเลือกพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลให้เหมาะสมต่อประเภทของกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยสามารถพิจารณาการเลือกใช้ประเภทของพีวีซีได้จากข้อมูลดังนี้

2.1.3.1 ระดับการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) [7]

ระดับการเกิดพอลิเมอร์คือ จำนวนหน่วยซ้ำ (Repeating Units) ที่อยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์กับน้ำหนักโมเลกุลของมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ได้ดังสมการ (2.1)

$$DP = \frac{\text{Total MW of Polymer}}{\text{MW of Monomer}} \quad (2.1)$$

โดยที่ Total MW of Polymer คือ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งหมด






MW of Monomer คือ น้ำหนักโมเลกุลของมอนอเมอร์

2.1.3.2 ค่า K - Value [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า K - Value จะสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพีวีซีเรซิน ใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติที่สำคัญของพีวีซีเรซินในการเลือกเพื่อนำไปใช้งานเพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตขึ้นรูปของพีวีซีหลักการคือ เปรียบเทียบความเหนียวของสารละลายเจือจางกับความเหนียวของพอลิเมอร์ การแสดงค่า K - Value ต้องระบุชนิดของตัวทำละลาย ความเข้มข้นของสารละลายและมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ การเลือกเกรดพีวีซีเรซิน ควรพิจารณาจากคุณสมบัติด้านต่างๆซึ่งเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับระดับค่า K - Value ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K - Value และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ [9]

คุณสมบัติ	Low K	High K
รูพรุน (Porous)		
ความแข็งแรง (Strength), การยืดตัว (Elongation)		
ความเหนียว (Stiffness)		
อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป (Melt Temperature)		
ความใส (Clarity)		

ค่า K - Value สำหรับพอลิเมอร์เกรดการค้าประมาณ 55 - 80 สามารถแบ่งได้ดังนี้ ค่า K - Value ประมาณ 50 - 58 เหมาะสำหรับพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำ เนื่องจากมีความเหนียวต่ำ สามารถใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ ค่า K - Value ประมาณ 55 - 63 เหมาะสำหรับการผลิตแผ่นพีวีซีแข็ง (Rigid Sheet PVC) ค่า K - Value ประมาณ 60 - 68 เหมาะสำหรับพีวีซีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูง เนื่องจากมีความเหนียวสูง สามารถใช้ในงานผลิตท่อ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงสูง

2.1.4 สมบัติทางความร้อนของพีวีซี (Thermal Properties)

พีวีซีเป็นพอลิเมอร์ไม่ทนความร้อน ดังนั้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจึงอาจเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้จาก 2 ลักษณะคือ ปรากฏการณ์การเกิดเจล (Gelation) และการเสื่อมสภาพทางความร้อนสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

2.1.4.1 ปรากฏการณ์การเกิดเจล (Gelation) ของพีวีซีหรือการหลอมตัว (Fusion) ของพีวีซี [10]

ปรากฏการณ์การเกิดเจลหรือการหลอมตัวของพีวีซีเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลต่อสมบัติของพีวีซีและความสวยงามของผิวชิ้นงาน กลไกการเกิดเจลของพีวีซีมี 2 ช่วงคือ

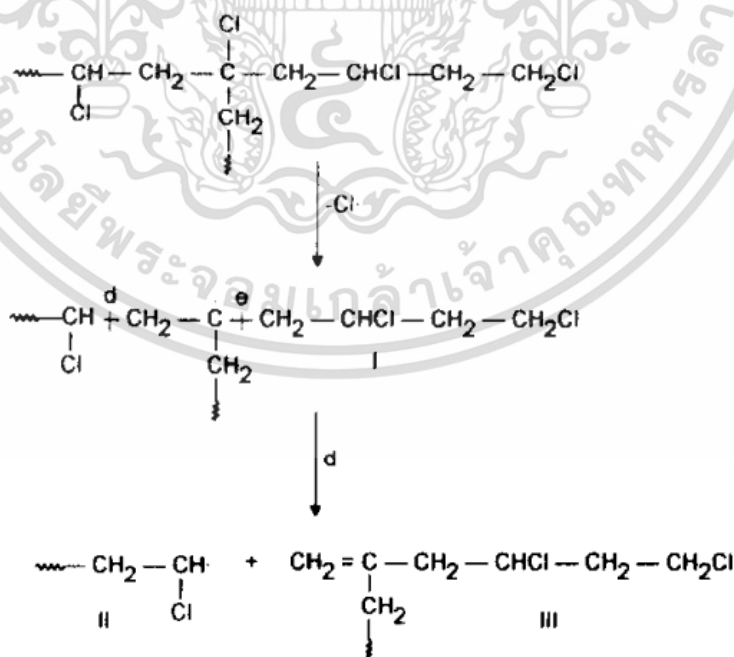
ช่วงที่ 1 ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป พีวีซีได้รับความร้อนและแรงเฉือนจนทำให้อนุภาคของพีวีซีที่มีขนาดอนุภาคใหญ่เกาะกลุ่มกันและมีรูพรุนแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีความละเอียดมากขึ้น การที่อนุภาคแตกออกจนมีขนาดเล็กลงนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป แรงเฉือน ความดัน ประเภทของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงที่ 2 เมื่อกระบวนการหลอมตัวของพีวีซีเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความร้อนและแรงเฉือนจะทำให้ส่วนที่เป็นอนุภาคละเอียดขนาดเล็กเกิดการหลอมเหลว ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีการเกี่ยวพันกัน (Entanglement) ระหว่างอนุภาคจนเป็นโครงสร้างตาข่าย (Network) หรือแบบที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (Crosslinking) หากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลมีค่าสูงมากจนถึงจุดที่พอลิเมอร์ไม่สามารถไหลได้และละลายได้ยาก เรียกจุดนั้นว่าจุดเกิดเจล (Gel Point) และเรียกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวว่าการเกิดเจล (Gelation)

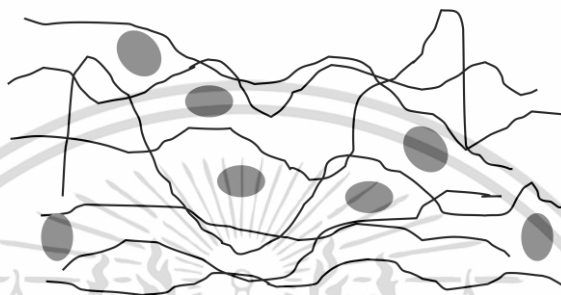
2.1.4.2 การเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซี (Thermal Degradation of PVC) [11]

ขั้นตอนการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพีวีซีเกิดขึ้นเมื่อพีวีซีได้รับความร้อนสูงอุณหภูมิประมาณ 200 - 360 °C จะเกิดการแตกตัวของพันธะระหว่างอะตอม โดยการแตกตัวของพันธะที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอนและคลอรีน การแตกตัวทางความร้อนจะเริ่มจากอะตอมของคลอรีนจะเกิดการแตกตัวออกไปก่อน จากนั้นจะดึงอะตอมของไฮโดรเจนข้างเคียงให้หลุดออกมากลายเป็นแก๊สไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Gas, HCl) ปฏิกิริยาดังกล่าวที่เกิดขึ้นนั้นเรียกว่า ปฏิกิริยาการขจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ (Dehydrochlorination) โดยจะเกิดที่ตำแหน่งโซ่ข้าง (Side Group) เป็นอันดับแรกเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมต่ำกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ จากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดการขจัดแก๊สไฮโดรคลอริกไปเรื่อยๆ ในขณะที่เดียวกันจะเกิดพันธะคู่ในหลายๆตำแหน่งขึ้นในสายโซ่ของพีวีซี ซึ่งลำดับของพันธะคู่จะยาวขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวอย่างต่อเนื่อง (Polyconjugate) หรือที่เรียกว่าพอลิอิน (Polyene) การเกิดพันธะคู่ขึ้นนี้ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสี (Discoloration) เป็นสีเข้มจนเป็นสีน้ำตาลไหม้ถึงสีดำ สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของพีวีซีจะลดต่ำลงและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 360 - 500 °C หมู่พอลิอินจะเกิดการเสื่อมสภาพต่อ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพีวีซีเกิดการขาดออก (Chain Scission) หรือเชื่อมโยงโมเลกุล (Crosslinking) นำไปสู่การเกิดสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic Compounds) เช่น Benzene และ Toluene แสดงดังรูปที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างสายโซ่โมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทำให้แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง มีปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้ค่า T_g ลดต่ำลง ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงทำให้สามารถขึ้นรูปพีวีซีได้ที่อุณหภูมิต่ำลง สมบัติทางกายภาพเช่น จุดหลอมเหลว (Melting point) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ลดต่ำลง แต่ค่าการดึงยืด (Elongation) ความยืดหยุ่น (Flexibility) มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณของพลาสติกไซเซออร์มีผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ กล่าวคือหากเลือกใช้ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่มากส่งผลให้พีวีซีที่ได้มีลักษณะที่อ่อนตัวมาก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้พลาสติกไซเซออร์ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ [14]



รูปที่ 2.3 การแทรกตัวพลาสติกไซเซออร์ในสายโซ่โมเลกุลของพีวีซี

พลาสติกไซเซออร์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. โมโนเมอร์พลาสติกไซเซออร์ (Monomeric Plasticizers) มีอยู่หลายกลุ่ม ได้แก่

- กลุ่มพทาเลทเอสเทอร์ (Phthalate Ester) นิยมใช้มากที่สุด เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่มีหมู่คาร์บอกซิเลท 2 หมู่ มีลักษณะเป็นของเหลว จุดเดือดสูง ความดันไอต่ำเป็นสารที่เสถียรและละลายในไขมันได้ดี เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างพทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic Anhydride) กับแอลกอฮอล์ (Alcohol) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ กรดซัลฟูริก ตัวอย่างของพลาสติกไซเซออร์ในกลุ่มนี้เช่น ไดเมทิลพทาเลท (Dimethyl Phthalate, DMP) ไดเอทิลพทาเลท (Diethyl Phthalate, DEP) ไดโนอร์มัลบิวทิลพทาเลท (Di-n Butyl Phthalate, DBP) และ ไดทูเอทิลเฮกซิลพทาเลท (Di-(2-ethylhexyl) Phthalate, DOP) เป็นต้น [9]

- กลุ่มอะดิเพท (Adipates) และอะซีเลท (Azelates) ผลิตจากกรดอะดิพิค (adipic acid) หรือกรดอะซีเลอิกกับแอลกอฮอล์ ตัวอย่างพลาสติกไซเซออร์ในกลุ่มนี้เช่น ไดทูเอทิลเฮกซิลอะดิเพท (Di-2-Ethylhexyl Adipate, DOA) ไดไอโซเดซิลอะดิเพท (Diisodecyl Adipate, DIDA) ไดทูเอทิลเฮกซิลอะซีเลท (Di-2-Ethylhexyl Azelate, DOZ) ไดไอโซออกทิลอะซีเลท (Diisooctyl Azelate, DIOZ) และไดเฮกซิลอะซีเลท (Dihexyl Azelate, DHZ) เป็นต้น

- กลุ่มฟอสเฟต ตัวอย่างเช่นออกทิลไดฟีนิลฟอสเฟต (Octyl Diphenyl Phosphate)

2. โพลีเมอร์พลาสติกไซเซออร์ (Polymeric Plasticizers) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดไดเบสิก (Dibasic Acid) เช่น กรดอะดิพิค หรือกรดอะซีเลอิกกับไกลคอล (Glycol) เช่น โพรไพ-ลีนไกลคอล (Propylene Glycol) จะได้พลาสติกไซเซออร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 20 เท่าของชนิดโมโนเมอร์ ทำให้โอกาสหลุดจากพลาสติกได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง และยังทนต่อการละลายของน้ำมันและตัวทำละลาย ราคาของโพลีเมอร์พลาสติกไซเซออร์จึงสูงกว่าพทาเลทเอสเทอร์ประมาณ 1.5-2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5.2 สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat Stabilizer)

สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเป็นสารที่ทำหน้าที่ป้องกันการเสื่อมสภาพของพีวีซีเมื่อได้รับความร้อนหรือพลังงานจากแสง เนื่องจากพีวีซีสามารถเกิดการสลายตัวทางความร้อนดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ช่วยให้พีวีซีคงทนต่อความร้อน ป้องกันการไหม้ อันเนื่องมาจากความร้อนที่ได้รับในระหว่างการขึ้นรูป อาทิเช่น ความร้อนจากบาร์เรล (Barrel) ความร้อนจากแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับสกรู (Screw) และความร้อนจากการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลเป็นต้น คุณสมบัติของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่สำคัญคือ ควรผสมเข้ากันได้กับพีวีซีและสารประกอบอื่น ไม่เป็นอันตราย ไม่ควรมีผลในด้านอื่นๆต่อการผลิต ตัวอย่างสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่นิยมใช้งานเช่น Ca/Zn Stabilizer และ Tin Stabilizer เป็นต้น [9]

2.1.5.3 สารหล่อลื่น (Lubricant)

สารหล่อลื่นเป็นสารที่ช่วยหล่อลื่นในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พีวีซี ทำให้พีวีซีขึ้นรูปได้ง่ายเนื่องจากช่วยลดความหนืดหลอมเหลว (Melt Viscosity) ลดความเสียดทานที่เกิดจากสายโซ่พอลิเมอร์กับบาร์เรล ลดการเกิดการบวมตัวเมื่อออกจากหัวฉีด (Die Swell) และทำให้ผิวของชิ้นงานมีความเรียบ สารหล่อลื่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

- External Lubricant ช่วยลดความเสียดทานและการเกาะติดระหว่างพีวีซีที่หลอมเหลวกับส่วนของเครื่องจักรที่เป็นโลหะร้อนเช่น สกรู บาร์เรลและแม่พิมพ์ (Mould) ตัวอย่างของสารหล่อลื่นเช่น Paraffin Waxes เป็นต้น

- Internal Lubricant ช่วยลดความเสียดทานระหว่างอนุภาคของพีวีซีด้วยกันเองในระหว่างการหลอมตัว ตัวอย่างของสารหล่อลื่นเช่น Glycerol Mono Stearate (GMS) เป็นต้น

2.1.5.4 สารต้านทานแรงกระแทก (Impact Modifier)

สารต้านทานแรงกระแทกทำหน้าที่เพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกให้กับผลิตภัณฑ์ หรือทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเหนียวเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของสารต้านทานแรงกระแทกที่สำคัญ คือ สามารถผสมเข้ากับพีวีซีและสารเติมแต่งอื่นได้ดี ตัวอย่างของสารต้านทานแรงกระแทกที่ใช้งานอยู่เช่น Terpolymer of Methyl Methacrylate-Butadiene-Styrene (MBS), Acrylic และ Chlorinated Polyethylene (CPE) เป็นต้น

2.1.5.5 สารช่วยในการขึ้นรูป (Processing Aid)

สารช่วยในการขึ้นรูปหรือสารช่วยผสมเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงหลอมเหลว (Melt Strength) ของพีวีซีที่หลอม ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้นนอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิด Plate Out และช่วยให้ผิวชิ้นงานสวยงาม ตัวอย่างของสารช่วยในการขึ้นรูปที่นิยมใช้กัน เช่นกลุ่ม Acrylic Polymer เป็นต้น

2.1.5.6 สี (Pigment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีใช้เพื่อเพิ่มความสวยงามของผลิตภัณฑ์ การใช้สีในพีวีซีทำได้ 2 วิธีคือ การใช้สีโดยตรงหรือการทำเป็นแม่สีเข้มข้น (Master Batch) คุณสมบัติของสีที่ดีควรมีความคงทนต่อความร้อนและแสงทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีต้านทานต่อการเกิด Migration ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อสารเคมีอื่นๆที่ใช้ในสูตร และมีการกระจายตัวที่ดี ตัวอย่างสีที่ใช้งาน เช่น สีขาวเป็นสาร Titanium Dioxide (TiO₂) เป็นต้น

2.1.6 ตัวทำละลายพีวีซี

ตัวทำละลายทำหน้าที่ในการละลายพอลิเมอร์โดยการแพร่เข้าไปตามช่องว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของพีวีซีเรซิน เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ โดยพันธะไฮโดรเจนเชื่อมโยงแบบทุติยภูมิ (Secondary Bond) ซึ่งต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ดังนั้นเมื่อพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ถูกทำลายด้วยอิทธิพลของตัวทำละลาย ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ (Mobility) การละลายที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อตัวทำละลายสามารถทำลายพันธะที่เชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ได้ทั้งหมด ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระ

การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมควรพิจารณาถึงค่าการละลายของตัวทำละลายและพอลิเมอร์ ให้มีค่าที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 2.2 เป็นการแสดงค่าการละลายของพีวีซีและค่าการละลายของชนิดตัวทำละลายที่ใช้ละลายพีวีซี โดยตัวทำละลายที่มีค่าการละลายใกล้เคียงกับพอลิเมอร์จะมีความสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดี

ตารางที่ 2.2 ค่าการละลายของพีวีซีและตัวทำละลายที่ใช้ละลายพีวีซี

สาร	ค่าการละลาย (ca/cm ³) ^{1/2}
Polyvinyl Chloride	9.5
Tetrahydrofuran	9.1
Methyl Ethyl Ketone	9.3
Cyclohexanone	9.9

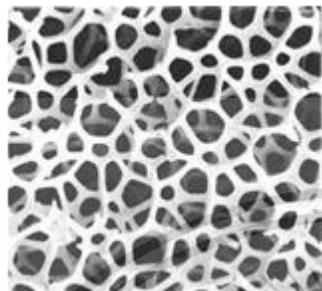
2.2 พอลิเมอร์โฟม (Polymer Foams) [15]

พอลิเมอร์โฟม หรือ โฟมคือ วัสดุพอลิเมอร์ที่มีฟองแก๊สขนาดเล็ก (Cellular Polymers) จำนวนมากกระจายตัวและแทรกอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ เป็นผลทำให้พอลิเมอร์นั้นมีสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) สมบัติเชิงกล (Mechanical Property) และสมบัติทางความร้อน (Thermal Property) เปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ (Polymer Matrix) โครงสร้างเซลล์ (Cellular Structure) และปริมาณของฟองแก๊สเป็นต้น โดยฟองแก๊สที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์นั้นเกิดจากสารเกิดฟอง (Blowing Agents) ซึ่งทำหน้าที่ก่อเกิดนิวเคลียสหรือเรียกอีกอย่างว่าฟอง

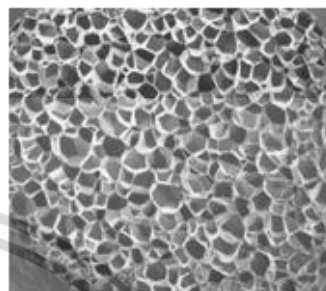
แก๊ส สามารถจำแนกประเภทของโฟมตามโครงสร้างของฟองหรือเซลล์แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ โฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในทางที่ไม่ถูกต้องใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเซลล์เปิด (Open Cell) คือโฟมที่มีลักษณะโพรงของเซลล์มีผนังเปิดโล่งทำให้แก๊สหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในสามารถหมุนเวียนถึงกันได้ดังรูปที่ 2.4 (ก) และโฟมแบบเซลล์ปิด (Close Cell) คือโฟมที่มีลักษณะโพรงของเซลล์มีผนังปิดล้อมรอบเซลล์ทำให้แก๊สหรืออากาศที่อยู่ภายในไม่สามารถแทรกตัวหมุนเวียนถึงกันได้ดังรูปที่ 2.4 (ข)



(ก) โฟมแบบเซลล์เปิด



(ข) โฟมแบบเซลล์ปิด

รูปที่ 2.4 โครงสร้างภายในของโฟม [16]

โฟมทั้ง 2 ลักษณะนี้มีข้อดี ข้อเสียและลักษณะการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างเฉพาะตัวโฟมแต่ละชนิด โดยสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

โฟมแบบเซลล์เปิด

ข้อดี : โครงสร้างที่มีผนังของเซลล์เปิดโล่งทำให้แก๊สหรือสารเกิดฟองเกิดการแลกเปลี่ยนกับแก๊สภายนอกเซลล์ได้ดีจึงทำให้มีสารเกิดฟองตกค้างต่ำ สามารถดูดซึมและคายของเหลวได้ดี ผิวภายนอกขรุขระจึงสามารถเชื่อมระหว่างพื้นระได้อัตโนมัติที่มีการเคลือบผิวต่างชนิดกัน

ข้อเสีย : โครงสร้างที่มีผนังของเซลล์เปิดโล่ง ส่งผลให้มีเสถียรภาพด้านรูปร่างที่ต่ำ ทำให้ความสามารถในการรับแรงลดลง สมบัติเชิงกลต่ำลง อีกทั้งสมบัติด้านการเป็นฉนวนกันเสียง ฉนวนกันความร้อนต่ำขึ้นกับชนิดของแก๊สที่อยู่ภายในสมบัติด้านการเป็นฉนวนต่ำลง

การนำไปใช้งาน : เบาะนอน เฟอร์นิเจอร์ ฉนวนหุ้มสายไฟ

โฟมแบบเซลล์ปิด

ข้อดี : โครงสร้างที่มีผนังของเซลล์ปิด ทำให้อากาศไม่สามารถแลกเปลี่ยนกันได้ กั้นการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี เป็นฉนวนความร้อนและฉนวนทางเสียงได้ดี และด้วยการมีโครงสร้างที่แข็งแรงจึงสามารถรับแรงกดอัดได้ดี

ข้อเสีย : ความหนาแน่นต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเกิดเป็นโฟม ดังนั้นจึงเป็นการลดปริมาณการใช้สารตั้งต้นในกระบวนการเพียงเล็กน้อย

การนำไปใช้งาน : โฟมกันกระแทก ฉนวนกันความร้อนและฉนวนกันเสียงภายในอาคาร

2.2.1 ประเภทของโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟมแต่ละประเภทมีลักษณะการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของโฟมนั้นๆ โฟมสามารถจำแนกประเภทออกตามขนาดฟอง (Bubble Diameter) และความหนาแน่นฟอง (Bubble Density) ได้ 4 ประเภทคือ [17]

2.2.1.1 Commercial Foam มีขนาดฟองประมาณ 100 - 500 μm และมีความหนาแน่นฟองประมาณ 10^5 cells/cm³

2.2.1.2 Crosslinked Polyolefin Foam มีขนาดฟองประมาณ 20 - 100 μm และมีความหนาแน่นฟองประมาณ 10^6 cells/cm³

2.2.1.3 Microcellular Foam มีขนาดฟองประมาณ 1 - 10 μm และมีความหนาแน่นฟองสูงประมาณ $10^7 - 10^9$ cells/cm³

2.2.1.4 Ultramicrocellular Foam มีขนาดฟองประมาณ 0.1 μm และมีความหนาแน่นฟองประมาณ $10^7 - 10^9$ cells/cm³

2.2.2 หลักการเกิดโฟม (Principle of Foam Formation) [18]

การเกิดโฟมคือการเกิดวัฏภาคแก๊สภายในโครงสร้างพอลิเมอร์ โดยวัฏภาคแก๊สจะเกิดการกระจายตัวทั่วทั้งโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ วัฏภาคแก๊สที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากสารเกิดฟอง (Blowing Agent) เกิดการปลดปล่อยแก๊สออกมา ส่งผลให้โครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป หลักการเกิดโฟมประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.2.2.1 การเกิดฟองแก๊ส (Bubble Formation)

การเกิดฟองแก๊ส เกิดจากการรบกวนระบบหรือทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้สารเกิดฟองเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยแก๊สออกมาภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยจะเกิดเป็นฟองแก๊สขนาดเล็กหรือเรียกว่านิวเคลียสกระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์

2.2.2.2 การเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble Growth)

เมื่อเกิดฟองแก๊สขนาดเล็กแล้ว ความดันและความเข้มข้นของแก๊สภายในฟองมีค่าลดลง ทำให้เกิดความต่างระหว่างความเข้มข้นของแก๊สภายในฟองและพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้แก๊สบริเวณข้างเคียงจึงเกิดการแพร่เข้ามาภายในฟอง ส่งผลทำให้นิวเคลียสเกิดการขยายขนาดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การขยายขนาดของฟองแก๊สขึ้นกับแรงตึงผิวและความหนืดของพอลิเมอร์ด้วย

2.2.2.3 การคงสภาพของฟองแก๊ส (Bubble Stability)

ฟองแก๊สเกิดจากการแลกเปลี่ยนแก๊สจากสารเกิดฟองที่อยู่ภายในโฟมแพร่ออกมายังสภาวะบรรยากาศและในขณะเดียวกันอากาศที่สภาวะบรรยากาศเกิดการแพร่เข้าสู่ภายในโฟม จึงส่งผลให้เกิดสภาวะสมดุลของอากาศขึ้น ดังนั้นขนาดโฟมและขนาดฟองจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.2.3 สารเกิดฟอง (Blowing Agent) [19, 20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเกิดฟอง คือสารที่สามารถให้หรือปลดปล่อยแก๊สออกมาในระบบ ทำให้พอลิเมอร์เกิดการพองตัว ปริมาณของสารเกิดฟองส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของโฟม หากปริมาณสารเกิดฟองมากส่งผลให้ได้โฟมที่เบาเนื่องจาก ความหนาแน่นของโฟมลดลง สามารถแบ่งสารเกิดฟองออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.2.3.1 สารเกิดฟองทางเคมี (Chemical Blowing Agent)

สารเกิดฟองทางเคมีคือ สารเคมีชนิดหนึ่งเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Thermal Degradation) ของสารเคมีชนิดนั้นจะเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยแก๊สออกมา ตัวอย่างของสารเกิด ฟองทางเคมีเช่น อะโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide) ข้อจำกัดของสารเกิดฟองทางเคมีคือ แก๊สที่ถูก ปลดปล่อยออกมานั้นจะทำให้มีสารตกค้างที่เป็นของแข็งภายในโฟม ซึ่งไม่สามารถนำโฟมที่เกิดจากการใช้สารเกิด ฟองนี้ไปใช้ในบางผลิตภัณฑ์ได้

2.2.3.2 สารเกิดฟองทางกายภาพ (Physical Blowing Agent)

สารเกิดฟองทางกายภาพคือ สารเคมีที่เมื่อถูกรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์โดย การลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิแล้วเกิดการระเหยหรือขยายตัวของแก๊ส โดยสารเกิดฟองที่นิยมใช้อยู่ในตระกูลของ แก๊สเฉื่อย ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน อาร์กอน (Ar) และฮีเลียม (He) เป็นต้น นิยมใช้คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพเนื่องจากมีความสามารถในการแพร่ เข้าสู่พอลิเมอร์ได้ดี อีกทั้งยังเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าสารประกอบอินทรีย์ประเภทอื่นเช่น คลอโรฟลูออโร คาร์บอน (Chlorofluorocarbons, CFCs) และง่ายต่อการแยกออกจากระบบ คาร์บอนไดออกไซด์ได้จากการเป็น ผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By Product) จากกระบวนการอื่นๆในอุตสาหกรรมโดยไม่ผ่านการสังเคราะห์ขึ้นใหม่

2.2.4 กระบวนการเกิดโฟมของพีวีซีโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพ (PVC Foam Processing) [18]

กระบวนการเกิดโฟมสำหรับพีวีซีโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 2.7 ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้คือ

1. การละลายของสารเกิดฟอง (Gas Dissolution) แก๊สเกิดการละลายในพีวีซีเมทริกซ์ โดยละลายในส่วนที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous Polymer) ได้เป็นสารละลายระหว่างแก๊สและ พีวีซีเมทริกซ์ (PVC Matrix) เกิดขึ้น
2. การเกิดฟองแก๊ส (Bubble Nucleation) เมื่อแก๊สละลายในพีวีซีเมทริกซ์จนอิ่มตัวแล้ว ทำการรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยการลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเพียง ระยะเวลาที่สั้นมาก ทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กกระจายอยู่ในเนื้อพีวีซีเมทริกซ์
3. การเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble Growth) เมื่อเกิดนิวเคลียสหรือฟองแก๊สขนาดเล็กแล้ว ความดัน และความเข้มข้นของแก๊สภายในฟองมีค่าลดลง ทำให้เกิดความต่างระหว่างความเข้มข้นของแก๊สภายในฟองและ พีวีซีเมทริกซ์ขึ้น ส่งผลให้แก๊สบริเวณข้างเคียงจึงเกิดการแพร่เข้ามาภายในฟอง ทำให้ฟองเกิดการขยายขนาดเพิ่มขึ้น
4. การคงสภาพของฟองแก๊ส (Bubble Stability) เกิดจากการแลกเปลี่ยนแก๊สจากสารเกิดฟองที่อยู่ ภายในโฟมแพร่ออกมายังสภาวะบรรยากาศและในขณะเดียวกันอากาศที่สภาวะบรรยากาศเกิดการแพร่เข้าสู่ภายใน โฟม จึงส่งผลให้เกิดสภาวะสมดุลของอากาศ ดังนั้นขนาดโฟมและขนาดฟองจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือ เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดโฟมของพีวีซีโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพ [16]

2.3 ไมโครเซลลูลาร์โฟม (Microcellular Foam) [21]

โดยทั่วไปโฟมมีคุณสมบัติคือเบาและอ่อนตัว จึงถูกนำไปใช้งานเช่น เบาะรถยนต์ โซฟาต่างๆ ลักษณะการใช้งานของโฟมค่อนข้างจำกัด ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มการใช้งานของโฟมให้หลากหลายมากขึ้นจึงมีการพัฒนาโฟมประเภทไมโครเซลลูลาร์ ซึ่งมีความต่างกับโฟมโดยทั่วไปคือ มีลักษณะโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด ขนาดฟองประมาณ 1 - 10 μm ความหนาแน่นฟองสูงประมาณ $10^7 - 10^9$ cells/cm³ ด้วยลักษณะโครงสร้างดังกล่าวจึงทำให้โฟมประเภทนี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีคือ ความแข็งแรงกดอัด (Impact Strength) ดี สมบัติด้านการเป็นฉนวนความร้อน ฉนวนทางเสียงดี โดยกระบวนการเกิดไมโครเซลลูลาร์โฟมเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการเกิดโฟมทั่วไป แต่จะเกิดที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่า T_g ของพอลิเมอร์ ความดันอิมพัลส์สูงและอัตราการเย็นตัวที่เร็ว ทำให้ได้นิวเคลียสที่มีความหนาแน่นสูงอัตราในการเติบโตของฟองแก๊สต่ำและเกิดการรวมตัวของฟองแก๊สน้อยจึงทำให้ได้ฟองขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ โดย ด้วยความที่โฟมประเภทนี้มีขนาดฟองที่เล็กใกล้เคียงกันและมีการกระจายตัวของฟองมากและสม่ำเสมอ จึงทำให้มีสมบัติเชิงกลเท่ากันทั้งชิ้นงาน พอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมประเภทไมโครเซลลูลาร์ อาทิเช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) พอลิเมทิลเมทาคริลเลต (Polymethyl Methacilate, PMMA) และพอลิทาเรพทาเรต (Polytraeptalate, PET) การนำไปใช้งานของโฟมประเภทนี้เช่น ฉนวนกันความร้อน ฉนวนกันเสียง อุปกรณ์โครงสร้างที่ใช้กับเรือและเครื่องบิน เป็นต้น

2.4 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [22]

ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Fluid) คือของไหลที่มีพฤติกรรมอยู่ระหว่างของเหลวและแก๊สซึ่งไม่สามารถแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกันได้ ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนี้อยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature, T_c) และความดันวิกฤต (Critical Pressure, P_c) ของของไหลชนิดนั้น ตัวอย่างชนิดของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตแสดงดังตารางที่ 2.4 ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวทำละลาย (Solvating Power) ที่ดีกว่าตัวทำละลายของเหลวทั่วไป เนื่องจากมีพฤติกรรมที่เป็นทั้งของเหลวและแก๊สจึงสามารถเป็นตัวทำละลายที่ดีเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวและยังสามารถเกิดการแพร่ได้ดีในสถานะแก๊สทำให้การละลายดีขึ้น

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหลชนิดต่างๆ
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

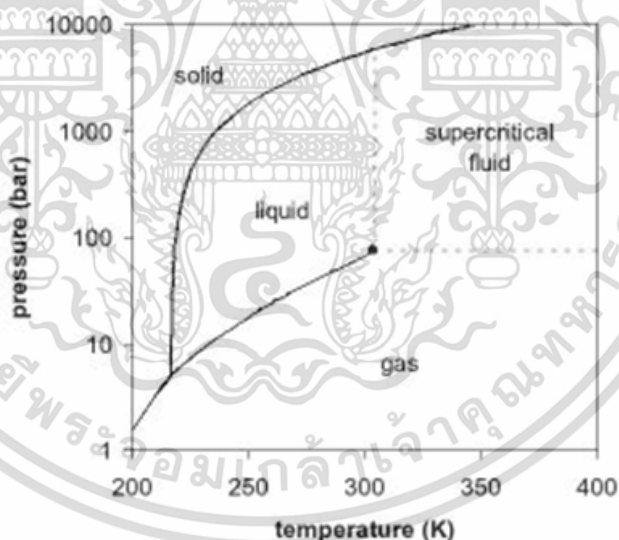
ชนิดของของไหล	อุณหภูมิวิกฤต (K)	ความดันวิกฤต (MPa)
คาร์บอนไดออกไซด์	304.2	7.38
เมทานอล	512.6	8.09
น้ำ	647.3	22.00
อะซิโตน	508.1	4.70

2.4.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon dioxide, ScCO₂)

คาร์บอนไดออกไซด์มีอุณหภูมิวิกฤต 304.2 K และความดันวิกฤต 7.38 MPa ซึ่งเป็นสภาวะวิกฤตที่ค่อนข้างไม่สูงมากนัก และสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ได้จากการปรับความดันหรืออุณหภูมิ แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ยังสามารถแยกออกจากกระบวนการได้ง่าย ดังนั้นจึงนิยมนำคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตใช้ในหลายกระบวนการเช่น ใช้เป็นสารเกิดฟองทางกายภาพในกระบวนการเกิดโฟม การสกัดคาเฟอีนออกจากชาและกาแฟ เป็นต้น สมบัติทางเคมีฟิสิกส์

(Physiochemical Property) เช่น ความหนาแน่น (Density) ความหนืด

(Viscosity) และการแพร่ (Diffusivity) ของคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.6 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแก๊ส ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์

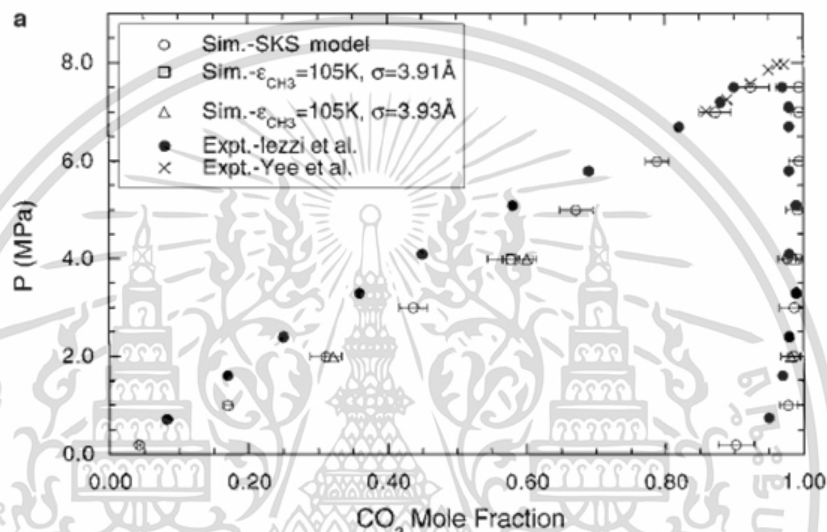
สมบัติทางเคมีฟิสิกส์	แก๊ส	ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต	ของเหลว
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1	100 - 800	1000
ความหนืด (Pa.s)	0.001	0.005 - 0.01	0.05 - 0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่ (m^3/s)	1×10^{-5}	1×10^{-7}	1×10^{-9}
-----------------------------------	--------------------	--------------------	--------------------

2.4.2 สมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของของผสมระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Vapor - Liquid Phase Diagram for Hexane - Carbon dioxide)

แผนภาพสมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของของผสมระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C แสดงดังรูปที่ 2.7 พบว่า ณ อุณหภูมิ 40 °C ของผสมระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์มีความดันวิกฤตเทียมคือ 8 MPa หรือประมาณ 80 bar ซึ่ง ณ สภาวะความดันและอุณหภูมิวิกฤตเทียมดังกล่าวส่งผลให้ของผสมทั้งสองชนิดอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า “ของไหลเหนือวิกฤต”

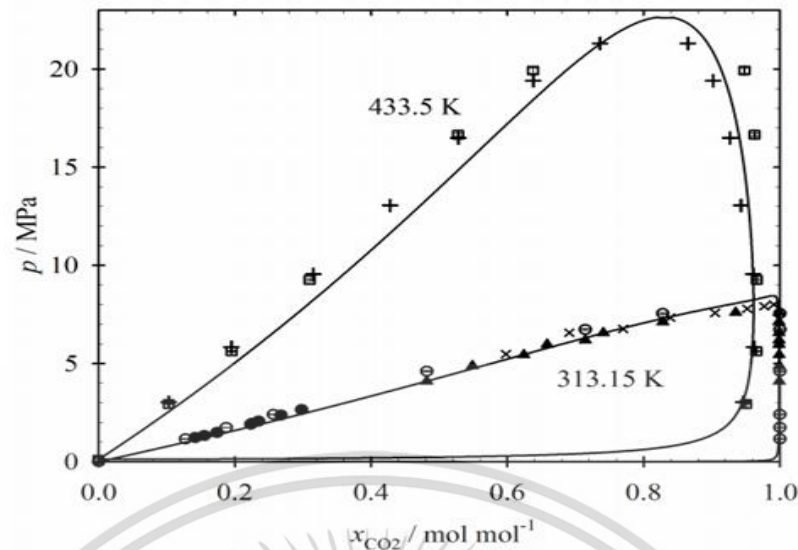


รูปที่ 2.7 แผนภาพวัฏภาคไอ - ของเหลวระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C สัญลักษณ์วงกลมทึบคือข้อมูลจากการทดลองของ lezzi และคณะ สัญลักษณ์กากบาทคือข้อมูลจากการทดลองของ Yee และคณะ สัญลักษณ์โปร่งคือข้อมูลจากการใช้ SKS model [23]

2.4.3 สมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของของผสมระหว่างไซโคลเฮกซาโนนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Vapor - Liquid Phase Diagram for Cyclohexanone - Carbon dioxide)

แผนภาพสมดุลวัฏภาคไอและของเหลวของของผสมระหว่างไซโคลเฮกซาโนนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C แสดงดังรูปที่ 2.7 พบว่า ณ อุณหภูมิ 313.15 K หรือประมาณ 40 °C ของผสมระหว่างไซโคลเฮกซาโนนและคาร์บอนไดออกไซด์มีความดันวิกฤตเทียมคือ 9 MPa หรือประมาณ 90 bar และที่อุณหภูมิ 433.5 K หรือประมาณ 160 °C ของผสมระหว่างไซโคลเฮกซาโนนและคาร์บอนไดออกไซด์มีความดันวิกฤตเทียมคือ 22.5 MPa หรือประมาณ 225 bar ซึ่ง ณ สภาวะความดันและอุณหภูมิวิกฤตเทียมดังกล่าวส่งผลให้ของผสมทั้งสองชนิดอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า “ของไหลเหนือวิกฤต”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



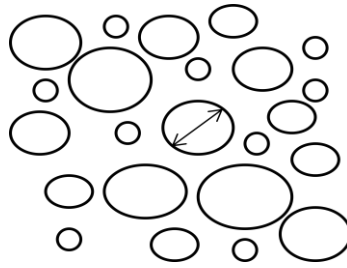
รูปที่ 2.8 แผนภาพวัฏภาคไอ - ของเหลวระหว่างไซโคลเฮกซานอนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 160 °C โดยที่ สัญลักษณ์ + คือข้อมูลการทดลองของ Laugier และ Richon, สัญลักษณ์ x คือ ข้อมูลการทดลองของ Esmelindro และคณะ สัญลักษณ์ ▲ คือข้อมูลการทดลองของ Feng และคณะ สัญลักษณ์ ● คือข้อมูลการทดลองของ Merker และคณะ สัญลักษณ์เส้นตรงคือข้อมูลจากการใช้สมการ Peng-Robinson EOS โดยใช้ค่า $k_{ij} = 0.0325$ [24]

2.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟม (Foam Morphology)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟมคือ การศึกษาลักษณะโครงสร้างของโฟมที่เกิดขึ้นผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งจากสัณฐานวิทยาทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างฟอง การจัดเรียงตัวของฟองที่เกิดขึ้น ขนาดฟอง (Bubble Diameter) และความหนาแน่นฟอง (Bubble Density) เพื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของโฟมที่ได้ต่อไป การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

2.5.1 ขนาดฟอง (Bubble Diameter)

ขนาดฟองเป็นการแสดงขนาดของฟองที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง พิจารณาจากภาพไมโครกราฟ ถูกรายงานเป็นค่าความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละฟอง จากนั้นนำข้อมูลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละฟองหาค่าเฉลี่ยได้เป็นขนาดฟองโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ตัวอย่างการวัดขนาดฟองดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.9 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟอง

2.5.2 ความหนาแน่นฟอง (Bubble Density) [25]

ความหนาแน่นฟองเป็นการแสดงผลของการกระจายตัวของฟองแก๊ส ฎุกรายงานเป็นจำนวนฟองต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโฟม (V_F) โดยสมมติให้ฟองมีขนาดเป็นทรงกลมและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ดังนั้นคุณสมบัติของโฟมจึงเท่ากันทุกทิศทางเรียกโฟมที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า โฟมไอโซโทรปิก (isotropic foam) สมการการคำนวณความหนาแน่นฟองแสดงดังสมการ (2.4)

$$N_F = \frac{N}{V_F} \quad (2.4)$$

หรือความหนาแน่นฟองสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$N_F = \left[\frac{n}{A} \right]^2 \quad (2.5)$$

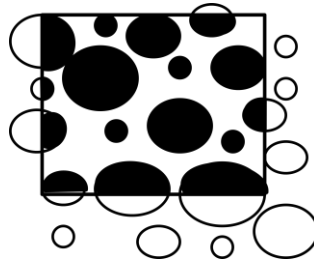
โดยที่ A คือพื้นที่ในการนับจำนวนฟอง (cm^2)

ทั้งนี้การนับจำนวนฟองจากภาพไมโครกราฟสามารถหาได้ 2 วิธีคือ การกำหนดพื้นที่ผิวและการกำหนดจำนวนฟองโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.5.2.1 การกำหนดพื้นที่ผิว

การกำหนดพื้นที่ผิวของฟองที่อยู่ภายในพื้นที่ที่สนใจและนับจำนวนฟองแบบเฉลี่ยโดยนับฟองที่อยู่บริเวณขอบให้ถือเป็นครึ่งหนึ่ง วิธีนี้จะทำให้การนับจำนวนฟองใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดแสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การนับจำนวนฟองด้วยวิธีกำหนดพื้นที่ผิวและนับจำนวนฟองแบบเฉลี่ย

2.5.2.2 การกำหนดจำนวนฟอง

การกำหนดจำนวนฟองด้วยขอบนอกของฟองที่ถูกนับ วิธีนี้จะทำให้พื้นที่ผิวที่นับได้น้อยกว่าพื้นที่ผิวจริง ดังนั้นจะทำให้ได้ความหนาแน่นฟองที่มากกว่าความเป็นจริง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.11 การนับจำนวนฟองด้วยวิธีการกำหนดจำนวนฟอง

2.5.3 สัดส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio, \emptyset)

สัดส่วนการขยายตัวนิยามจากปริมาตรของโฟม (V_F) ต่อปริมาตรของพอลิเมอร์ (V_P) ดังสมการ (2.6)

$$\emptyset = \frac{V_F}{V_P} \quad (2.6)$$

หรือ

$$\emptyset = \frac{(m_p + m_g) / \rho_F}{m_p / \rho_P} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

m_p คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ (g)

m_g คือ น้ำหนักของแก๊ส (g)

ρ_F คือ ความหนาแน่นของโฟม (g/cm^3)

ρ_P คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (g/cm^3)

กำหนดให้น้ำหนักของแก๊สมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสัดส่วนการขยายตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$\phi = \frac{\rho_P}{\rho_F} \quad (2.8)$$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shu-Kai Yeh และคณะ [1] ศึกษาการใช้น้ำเป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเกิดโฟมแบบอัดรีดผ่านเกรียว (Extrusion Foaming Process) ของโฟมพอลิสไตรีนที่เป็นฉนวนความร้อน พบว่าน้ำที่ใช้เป็นสารเกิดฟองนั้นมีผลทำให้สัณฐานวิทยาของโฟมที่ได้ดีขึ้น ขนาดฟองใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นโฟมลดลง อีกทั้งยังเป็นฉนวนทางความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องจากการฉีดน้ำในกระบวนการอัดรีดผ่านเกรียวมีผลทำให้เม็ดโฟมพอลิสไตรีนขยายตัว ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นโฟมจึงทำให้ได้ฟองใหญ่ขึ้น

Na Zhao และคณะ [2] ศึกษาการเกิดเป็นโฟมของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol) และ Microfibrillated Cellulose หรือ MFC โดยการใช้น้ำเป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนียววิกฤตร่วมกับน้ำเป็นสารเกิดฟองร่วมในกระบวนการเกิดโฟมแบบอัดรีดผ่านเกลียวอย่างต่อเนื่อง ทำการทดลองโดยนำเม็ดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับน้ำทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง หลังจากนั้นผสมกับสารละลาย MFC เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่า MFC มีการกระจายตัวดีในคอมโพสิต จากผลของ DSC พบว่าการเติม MFC ส่งผลต่อพฤติกรรมทางความร้อน อีกทั้งยังส่งผลต่อขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของฟองแก๊สในกระบวนการเกิดโฟม โดยน้ำที่ทำหน้าที่เป็นสารเกิดฟองร่วมนั้นทำให้โครงสร้างของโฟมดีและมีความหนาแน่นฟองสูง ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นโฟมและสัณฐานวิทยาของโฟมคือ ปริมาณของ MFC ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เหนียววิกฤตและอุณหภูมิบริเวณตาย

S. T. Cui และคณะ [23] ศึกษาสมดุลวัฏภาคของไอและของเหลว (Vapor and Liquid Equilibrium, VLE) ของระบบที่ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซน (n-Hexane) ที่อุณหภูมิ 40 และ 80°C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความดันวิกฤตเทียบของของผสมเพิ่มสูงขึ้น

T. Merker และคณะ [24] ศึกษาสมดุลวัฏภาคของไอและของเหลว (Vapor and Liquid Equilibrium, VLE) ของระบบที่ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไซโคลเฮกซาโนน (Cyclohexanone) ที่อุณหภูมิ 40 และ 80°C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความดันวิกฤตเทียบของของผสมเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. Marcilla และ M. Beltran [26] ศึกษาการกระทำระหว่างโมเลกุลของพีวีซีและพลาสติกไซเซอรในระหว่างการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซีเหลว (PVC Plastisol) ด้วย Thermogravimetric หรือ TGA ภายใต้สภาวะไนโตรเจน และศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร 8 ชนิดคือ DBP, DIBP, DHP, DOP, DINP, DIDP, DOA และ DNA โดยพีวีซีเหลวประกอบด้วย พีวีซีเรซินและพลาสติกไซเซอร 65 phr พบว่า พีวีซีเรซินอาจเกิดการหลอมตัวเป็นเจลในกระบวนการ Gelation ทำให้พีวีซีเรซินมีการกระทำระหว่างโมเลกุลและแรงเสียดทานต่อพลาสติกไซเซอรมากขึ้นทำให้พลาสติกไซเซอรมี Slovating Power เพิ่มขึ้นดังนั้นจึงละลายเข้ากันได้มาก จากผลของ Derivative curves พบว่าพลาสติกไซเซอรเกิดการสลายตัวออกไปในขั้นตอนแรกพร้อมกับแก๊สไฮโดรคลอริก ซึ่งยืนยันโดยการทดสอบด้วย FTIR และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของพลาสติกไซเซอรจากผลของ TGA และ DTG พบว่าพลาสติกไซเซอรที่มี Slovating Power สูงจะเกิดการระเหยเป็นไอน้ำมากในที่นี้คือ DIBP, DBP และ DOA มีอุณหภูมิในการสลายตัวคือ 178, 188 และ 218°C ตามลำดับ และหากพลาสติกไซเซอรอยู่ในพีวีซีเหลวพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้นคือ 192, 197 และ 226°C ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าพลาสติกไซเซอรเกิดการสลายตัวในช่วงแรก 20 % ของน้ำหนักทั้งหมด

Vipin Kumar และคณะ [27] ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเป็นไมโครเซลล์ลาร์โอมของพีวีซี โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมและอุณหภูมิเกิดโม่ช่วง 65 - 90°C พีวีซีที่ใช้ทดสอบมี 3 ชนิดคือ PVC - A เป็นพีวีซีที่มีการใส่สารเติมแต่งในปริมาณสูง PVC - B และ PVC - C ไม่ใส่สารเติมแต่ง เพื่อให้สมบัติใกล้เคียงกับพีวีซีเรซิน แต่จะมีการเติมสารหล่อลื่นภายในที่ต่างชนิดกัน ความดันอิมพัลส์ที่ใช้เกิดโม่คือ 6 MPa อุณหภูมิเกิดโม่ 40°C และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารเกิดฟอง พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ละลายใน PVC - A ได้ต่ำกว่า PVC - B และ PVC - C เนื่องจากค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในสารเติมแต่งและพลาสติกไซเซอรต่ำกว่าค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพีวีซีเรซิน การใช้สารเติมแต่งมากเมื่อเกิดเป็นโม่แล้วทำให้ได้โม่ที่เป็นเซลล์เปิดมากขึ้นและมีการกระจายตัวของฟอง (Polydisperse) มาก เนื่องจากสารเติมแต่งเหล่านี้คือสารก่อนิวเคลียสแบบเนื้อผสม (Heterogeneous Nucleation) สำหรับ PVC - B และ PVC - C เกิดเป็นโม่ได้เป็นเซลล์ปิด มีการกระจายตัวของฟองน้อย (Monodisperse) การเพิ่มอุณหภูมิเกิดโม่มีผลทำให้ได้ฟองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

Vadim V. Krongauz และคณะ [28] ศึกษาการผลของตัวทำละลายในการสกัดเอาพลาสติกไซเซอรในกลุ่มพลาทาเลตออกจากพีวีซี วิเคราะห์ด้วย Gas Chromatography หรือ GC พลาสติกไซเซอรที่ใช้ทดลองคือ Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) ตัวทำละลายที่ใช้คือ เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl Ethyl Ketone, MEK) พบว่าตัวทำละลายทั้งสองชนิดสามารถสกัดเอาพลาสติกไซเซอรออกมาจากพีวีซีได้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1

3.1 การศึกษาสถานะเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

3.1.1 สารเคมี

3.1.1.1 แผ่นพีวีซีชนิดยืดหยุ่นจากบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์จำกัด (มหาชน) มีสมบัติ ดังนี้

ความหนาแน่นของพีวีซี	1.241 g/cm ³
ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (T _g)	88.6 °C

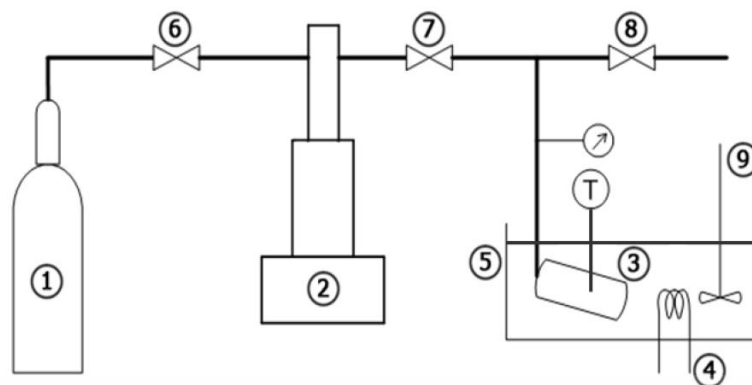
3.1.1.2 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.95% จากบริษัท United Industrial Gas

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.2.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองขึ้นรูปโฟมแบบกะดังรูปที่ 3.1

3.1.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

ตัดแผ่นพีวีซีชนิดยืดหยุ่นให้มีขนาด 0.5 cm × 0.5 cm × 1 cm จากนั้นนำแผ่นพีวีซีขนาดดังกล่าวบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 18 ml ที่ถูกติดตั้งตามรูปที่ 3.1 โดยกำหนดสถานะเกิดโฟมของพีวีซีดังตารางที่ 3.1 เมื่อครบกำหนดของเวลาเกิดโฟมทำการลดความดันลงมาสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 5 - 7 s นำตัวอย่างโฟมพีวีซีที่ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาโดยวัดความหนาแน่นโฟมด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ แสดงเป็นค่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่ม (Before Aging) จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างโฟมพีวีซีโดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 hr เพื่อให้โครงสร้างโฟมเกิดการคงสภาพ เมื่อครบกำหนดทำการวัดความหนาแน่นโฟมอีกครั้งแสดงเป็นค่าความหนาแน่นโฟมหลังบ่ม (After Aging) และนำโฟมพีวีซีไปศึกษาสัณฐานวิทยาอื่นๆต่อไป



- | | |
|--|--------------------------|
| (1) ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ | (6) วาล์วตำแหน่งที่หนึ่ง |
| (2) ป้อนอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D) | (7) วาล์วตำแหน่งที่สอง |
| (3) ถังปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง ปริมาตร 18 ml (Taiatsu Techno) | (8) วาล์วตำแหน่งที่สาม |
| (4) ขดลวดความร้อน | (9) เครื่องปั่นกวาน |
| (5) อ่างน้ำมันซิลิโคน | |

รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปพีวีซีโฟมแบบกะ

ตารางที่ 3.1 สภาวะเกิดโฟมที่ใช้ในการทดลอง

สภาวะเกิดโฟม		
อุณหภูมิเกิดโฟม (°C)	ความดันอัดตัว (bar)	เวลาเกิดโฟม (min)
40	120	30
	150	
	170	
60	120	30
	150	
	170	
80	120	30
	150	
	170	
95	120	30
		60
		90
		120
115	120	30
		60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		90
		120

ตารางที่ 3.1 สภาวะเกิดโฟมที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

สภาวะเกิดโฟม		
อุณหภูมิเกิดโฟม (°C)	ความดันอิมิตัว (bar)	เวลาเกิดโฟม (min)
135	120	30
		60
		90
		120
145	120	30
		60
		90
		120

ตอนที่ 2

3.2 การศึกษาชนิดของสารเกิดฟองร่วมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของพีวีซี

3.2.1 สารเคมี

3.2.1.1 แผ่นพีวีซีชนิดยีนหยุ่นจากบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์จำกัด (มหาชน) มีสมบัติ

ดังนี้

ความหนาแน่นของพีวีซี 1.241 g/cm³

ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (T_g) 88.6°C

3.2.1.2 เฮกเซน (n-Hexane) เกรดการค้า

น้ำหนักโมเลกุล 86.18 g/mol

ความหนาแน่นที่ 25°C 0.659 g/ml

3.2.1.3 ไซโคลเฮกซานอน (Cyclohexanone) เกรดการค้า

น้ำหนักโมเลกุล 98.14 g/mol

ความหนาแน่นที่ 25°C 0.947 g/ml

3.2.1.4 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.95% จากบริษัท United Industrial Gas

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองขึ้นรูปโฟมแบบกะดังรูปที่ 3.1

3.2.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

เติมเฮกเซนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมตามสัดส่วนโดยโมลที่แสดงดังตารางที่ 3.2 ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 18 ml ที่ติดตั้งตามรูปที่ 3.1 จากนั้นนำแผ่นพีวีซีชนิดยืดหยุ่นขนาด $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าว โดยกำหนดสภาวะเกิดโฟมของพีวีซีดังตารางที่ 3.2 เมื่อครบกำหนดของเวลาเกิดโฟมทำการลดความดันลงมาสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 5 - 7 s จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของสารเกิดฟองร่วมเป็นไซโคลเฮกซาโนน สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนและสภาวะเกิดโฟมแสดงดังตารางที่ 3.3 นำตัวอย่างโฟมพีวีซีที่ได้วัดความหนาแน่นโฟมก่อนบ่ม (Before Aging) จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างโฟมพีวีซีโดยทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 hr เพื่อให้โครงสร้างโฟมเกิดการคงสภาพ เมื่อครบกำหนดทำการวัดความหนาแน่นโฟมอีกครั้งแสดงเป็นค่า ความหนาแน่นโฟมหลังบ่ม (After Aging) และนำโฟมพีวีซีไปศึกษาสัณฐานวิทยาอื่นๆต่อไป

ตารางที่ 3.2 สภาวะเกิดโฟมที่ใช้เฮกเซนเป็นสารเกิดฟองร่วมในการทดลอง

ชนิดของสารเกิดฟองร่วม	สภาวะเกิดโฟม			
	อุณหภูมิเกิดโฟม (°C)	ความดันอิมตัว (bar)	เวลาเกิดโฟม (min)	สัดส่วนโดยโมล
เฮกเซน	40	170	30	0
				0.02
				0.05
				0.1
				0.2
	60	170	30	0
				0.02
				0.05
				0.1
				0.2
เฮกเซน	115	170	30	0
				0.02
				0.05
				0.1
				0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สภาวะเกิดโคมที่ใช้ไซโคลเฮกซาโนนเป็นสารเกิดฟองร่วมในการทดลอง

ชนิดของสารเกิดฟองร่วม	สภาวะเกิดโคม				
	อุณหภูมิเกิดโคม (°C)	ความดันอิมัตว์ (bar)	เวลาเกิดโคม (min)	สัดส่วนโดยโมล	
	40	170	30	0	
				0.02	
				0.05	
				0.1	
				0.2	
	ไซโคลเฮกซาโนน	60	170	30	0
					0.02
					0.05
					0.1
					0.2
	115	170	30	0	
				0.02	
				0.05	
				0.1	
				0.2	

ตอนที่ 3

3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

3.3.1 สารเคมี

3.3.1.1 ไนโตรเจนเหลว จากบริษัท ลินด์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.2.1 เครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter) รุ่น MD-200S

3.3.2.2 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater

3.3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากบริษัท ZEISS รุ่น MA10

3.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

3.3.3.1 นำตัวอย่างพีวีซีโคมที่ได้วัดความหนาแน่นโคมด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น

อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 หักตัวอย่างพีวีซีโฟมด้วยไนโตรเจนเหลวป้องกันการถูกทำลายของโครงสร้าง เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นที่หน้าตัดของโฟม จากนั้นนำไปเคลือบด้วยทองเพื่อให้ตัวอย่างโฟมมีสภาพนำไฟฟ้าได้ดีและนำไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.3.3 นำภาพไมโครกราฟที่ได้มาวิเคราะห์หาสัณฐานวิทยาของโฟมเช่น ขนาดฟอง ความหนาแน่นฟอง การกระจายตัวของฟองและความเป็นไอโซโทรปิกของโฟมด้วยโปรแกรม Image - J

ตอนที่ 4

3.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมพีวีซี

3.4.1 สารเคมี

3.4.1.1 แผ่นพีวีซีชนิดยืดหยุ่นจากบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์จำกัด (มหาชน)

3.4.1.2 พีวีซีโฟมที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 และ 145 °C ความดันอิมิตัว 120 bar เวลาเกิดโฟม 120 min

3.4.1.3 พีวีซีโฟมที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 และ 60 °C ความดันอิมิตัว 170 bar เวลาเกิดโฟม 30 min สัดส่วนโมลของเอกเซนและไซโคลเฮกซาโนน 0.2 โดยโมล

3.4.1.4 ไนโตรเจนเหลว

3.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.4.2.1 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) จากบริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 วิเคราะห์ตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 30 - 600 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน

3.4.2.2 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากบริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond DSC วิเคราะห์ตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 25 - 200 °C ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน

บทที่ 4

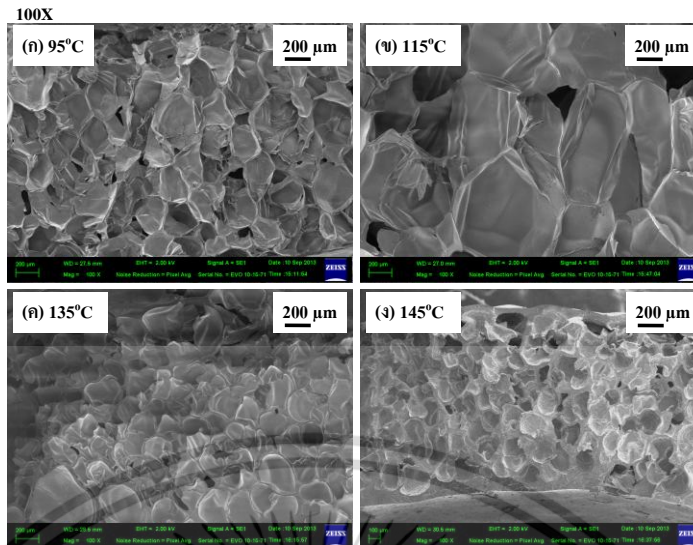
ผลการทดลอง

ตอนที่ 1

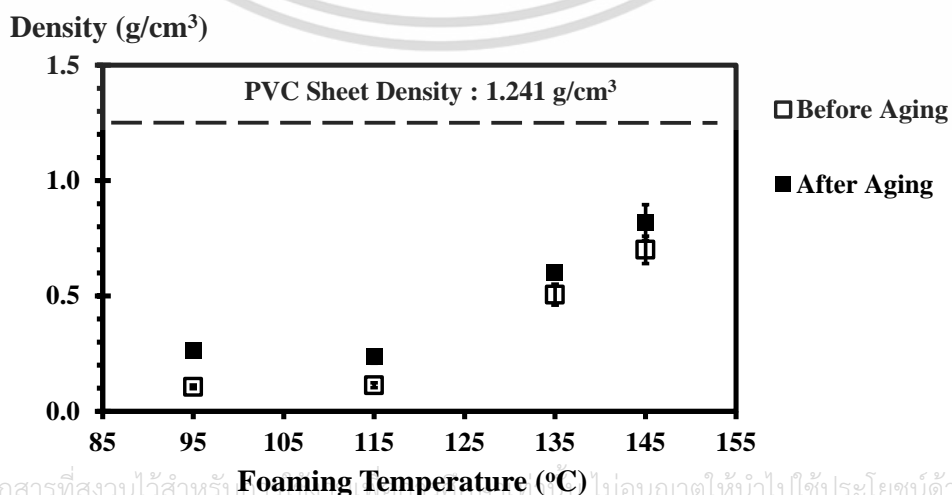
4.1 การศึกษาสภาวะเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโฟมสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

จากข้อมูลของอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีคือ 88.6°C ดังนั้นจึงเลือกเตรียมโฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วคือ 95 115 135 และ 145°C ความดันอิมพัลส์ 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min เนื่องจาก สภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงทำให้ง่ายต่อการเกิดเป็นโฟม จากผลการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมที่เลือกศึกษาพบว่าพีวีซีเกิดการขยายตัวเป็นโฟมได้ดี เนื่องจากพีวีซีมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะเกิดการแพร่เข้าไปละลายในส่วนที่เป็นโครงสร้างอสัณฐานนี้ อีกทั้งคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตยังทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในระบบทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วและความหนืดลดลง ดังนั้นจึงได้โฟมที่ขยายตัวได้ดี จากสัณฐานวิทยาโฟมพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95°C พบว่าฟองมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.1 (ก) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 115°C พบว่าฟองมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.1 (ข) การเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมมีผลให้เมทริกซ์ของพีวีซีอ่อนตัวลงและความหนืดของพีวีซีลดต่ำลง ดังนั้นฟองแก๊สจึงเกิดการขยายขนาดได้ดีในขั้นตอนการเติบโตของฟองแก๊ส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 135°C และ 145°C พบว่าขนาดฟองเล็กลงและมีการกระจายตัวของฟองมาก แสดงดังรูปที่ 4.1 (ค) และ (ง) ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการสลายตัวของพลาสติกไซเซอร์ออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม มีผลทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งขึ้น ฟองแก๊สจึงขยายตัวยาก



รูปที่ 4.1 ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C ความดันอิมพัลส์ 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min ที่กำลังขยาย 100 เท่า แผ่นพีวีซีมีความหนาแน่น 1.241 g/cm³ เมื่อผ่านกระบวนการเกิดโฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C พบว่าความหนาแน่นโฟมหลังผ่านกระบวนการเกิดโฟมลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.106 g/cm³ และเมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโฟมสูงขึ้นเป็น 0.264 g/cm³ ดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากเมื่อผ่านกระบวนการบ่มเป็นเวลา 12 h จะเกิดการคงสภาพของขนาดฟองและโครงสร้างโฟมในขั้นตอนการคงสภาพของฟองแก๊สซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างแก๊สที่อยู่ภายในฟองและอากาศภายนอก ทำให้เกิดความสมดุลของอากาศ เป็นผลให้โครงสร้างฟองเกิดการหดตัวลง ดังนั้นความหนาแน่นโฟมหลังบ่มจึงสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 115 °C พบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มประมาณ 0.113 g/cm³ และเมื่อผ่านการบ่มพบว่าความหนาแน่นโฟมสูงขึ้นเป็น 0.236 g/cm³ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 135 °C และ 145 °C พบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มสูงขึ้นเป็น 0.506 g/cm³ และ 0.709 g/cm³ เมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h ความหนาแน่นโฟมหลังบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 0.601 g/cm³ และ 0.818 g/cm³ ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

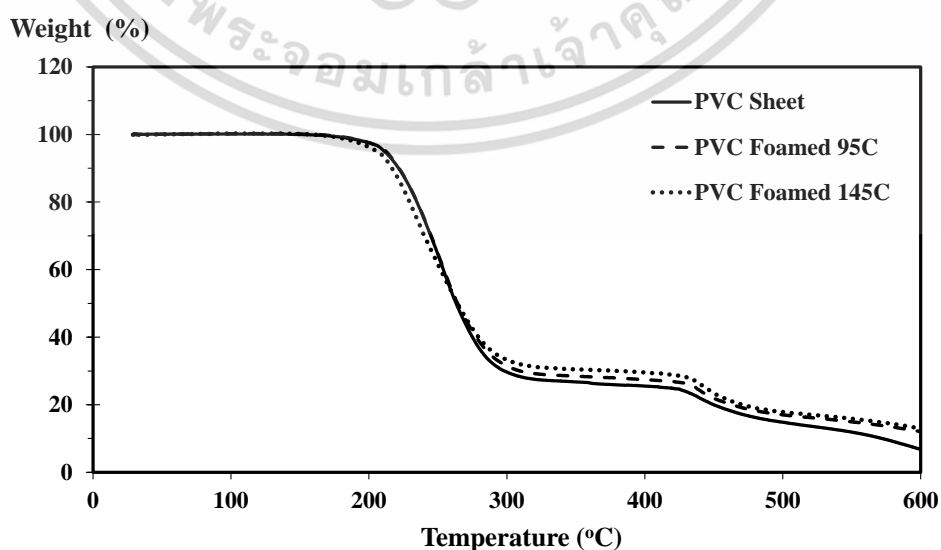
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่ม (Before Aging) และหลังบ่ม (After Aging) เป็นเวลา 12 h ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอัดตัว 120 bar เวลาเกิดโฟม 120 min

จากข้อมูลความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มพบว่าโฟมที่เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C และ 145 °C เมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h โครงสร้างโฟมเกิดการหดตัวต่ำกว่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 115 °C เนื่องจากเมทริกซ์ของพีวีซีแข็งและมีผนังฟองหนา ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C และ 145 °C มีความหนาแน่นโฟมที่สูงขึ้นอาจเนื่องมาจากพลาสติกไฮเซออร์สลายตัวออกไปทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งเป็นผลให้ฟองแก๊สขยายตัวได้ยาก จึงยืนยันสมมติฐานด้วย TGA แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าพีวีซีเมื่อผ่านกระบวนการเกิดโฟมแล้วทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง โดยโฟมพีวีซีเกิดการสลายตัวทางความร้อนออกเป็น 3 ช่วง ประกอบด้วย [11]

ช่วงที่หนึ่ง คือ เกิดการสลายตัวของแก๊สไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ช่วงอุณหภูมิ 180 - 320 °C เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอนและคลอรีนต่ำกว่าบริเวณตำแหน่งอื่น ดังนั้นอะตอมของคลอรีนจึงเกิดการแตกตัวออกมาก่อน จากนั้นจะดึงอะตอมของไฮโดรเจนข้างเคียงให้หลุดออกมา กลายเป็นแก๊สไฮโดรคลอริก

ช่วงที่สอง คือ เกิดการสลายตัวของสายโซ่หลักที่ช่วงอุณหภูมิ 420 - 500 °C โดยเมื่อแก๊สไฮโดรคลอริกเกิดการสลายตัวออกไปจะทำให้เกิดพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวอย่างต่อเนื่องที่เรียกว่า "Polyconjugate" โครงสร้างดังกล่าวทำให้ง่ายต่อการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน

ช่วงที่สาม คือ เกิดการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ (Inorganic Compounds) ซึ่งจะใช้อุณหภูมิสูงในการสลายตัวคือ ตั้งแต่ 500 °C เป็นต้นไป เปอร์เซ็นต์ของการสลายตัวในแต่ละช่วงของพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 และ 145 °C แสดงดังตารางที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

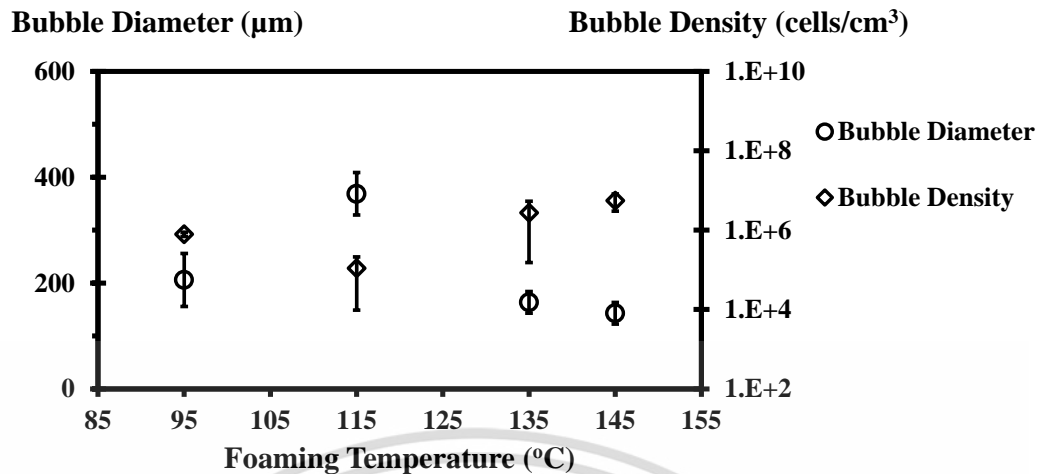
รูปที่ 4.3 TGA curve ของพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 145 °C ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซนต์ของการสลายตัวแต่ละช่วงของพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 145 °C ตามลำดับ

ชนิดพีวีซี	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของการสลายตัว (%)		
	ช่วงที่หนึ่ง	ช่วงที่สอง	ช่วงที่สาม
PVC Sheet	74	18	8
PVC Foamed 95°C	72	15	13
PVC Foamed 145°C	69	16	12

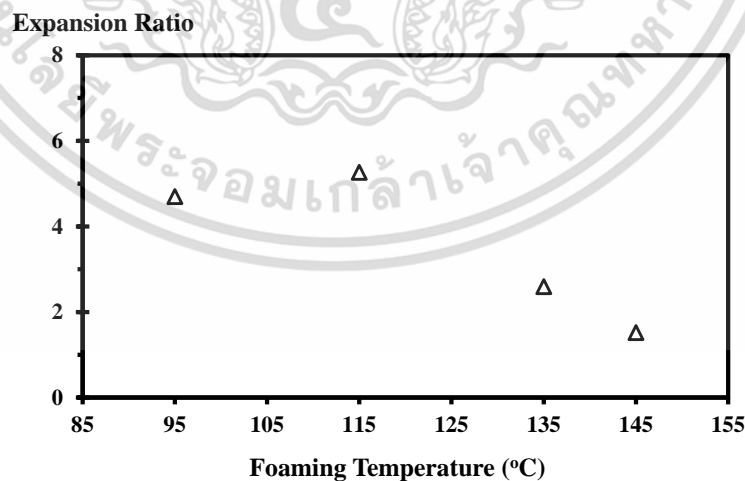
จากตารางที่ 4.1 พบว่าโฟมพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 145°C เกิดการสลายตัวทางความร้อนในช่วงที่หนึ่งน้อยกว่าพีวีซีที่ไม่ผ่านกระบวนการเกิดโฟม จากงานวิจัยของ Marcilla A. และคณะ [26] กล่าวว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของพลาสติกไซเซออร์ประมาณ 178°C แต่ไอของพลาสติกไซเซออร์จะเกิดการระเหยออกจากโครงสร้างในช่วงที่หนึ่งของการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซีและจะเกิดการสลายตัวอย่างต่อเนื่องต่อไปยังช่วงที่สองจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกไซเซออร์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 145°C เกิดการระเหยเป็นไอของพลาสติกไซเซออร์ออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟมเป็นผลทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็ง ฟองแก๊สในขั้นตอนการเติบโตของฟองแก๊สจึงขยายตัวได้ยากซึ่งสอดคล้องกับสัณฐานวิทยารูปที่ 4.1 พบว่าฟองมีขนาดเล็ก

เมื่อวิเคราะห์ขนาดฟองและความหนาแน่นฟองจากภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image J พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมจาก 95 °C เป็น 115 °C ทำให้ขนาดฟองใหญ่ขึ้นจาก 205.83 µm เป็น 368.63 µm ดังรูปที่ 4.4 และผลของขนาดฟองที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ความหนาแน่นฟองลดลงจาก $7.90 \times 10^5 \text{ cell/cm}^3$ เป็น $1.10 \times 10^5 \text{ cell/cm}^3$ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมส่งผลให้เมทริกซ์ของพีวีซีอ่อนตัวลงดังนั้นฟองแก๊สจึงสามารถขยายตัวได้ดี โดยการขยายตัวอาจเกิดการรวมกันของสองฟองแก๊สขึ้นไปจึงทำให้ได้ฟองแก๊สขนาดใหญ่และมีปริมาณฟองลดลง แต่หากเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 135 °C และ 145 °C พบว่าเกิดการสลายไอของพลาสติกไซเซออร์ออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟมทำให้เมทริกซ์แข็ง ฟองจึงขยายตัวได้ยากดังนั้นจะเห็นได้ว่าได้ขนาดฟองเล็กประมาณ 163.55 µm และ 142.89 µm ตามลำดับ และมีความหนาแน่นฟองสูงประมาณ $2.75 \times 10^6 \text{ cell/cm}^3$ และ $5.58 \times 10^6 \text{ cell/cm}^3$ ตามลำดับดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองและความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอิมพัลส์ 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min

เมื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากความหนาแน่นโฟมเทียบกับความหนาแน่นของพีวีซีสามารถแสดงเป็นค่าสัดส่วนการขยายตัวของโฟมพีวีซีดังรูปที่ 4.5 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมส่งผลให้สัดส่วนการขยายตัวของโฟมพีวีซีสามารถขยายตัวได้มากขึ้นและขยายตัวได้สูงสุดที่ 5.26 เท่า ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C แต่การเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมสูงเกินไปเป็นผลให้อิทธิพลของพลาสติกไซเซอร์เกิดการระเหยออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม ทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งขึ้น โฟมขยายตัวได้ยากทำให้สัดส่วนการขยายตัวต่ำและขยายตัวต่ำสุดที่ 1.51 เท่า ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 145 °C

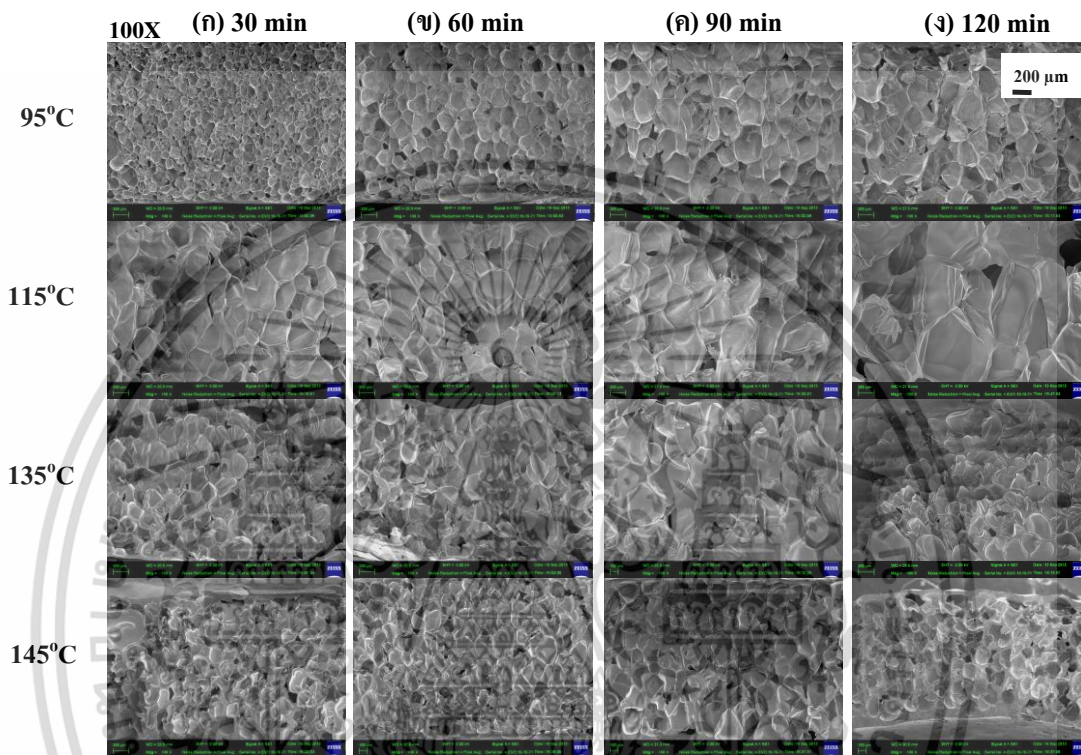


รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของพีวีซีโฟมที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอิมพัลส์ 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min

4.1.2 การศึกษาผลของเวลาเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

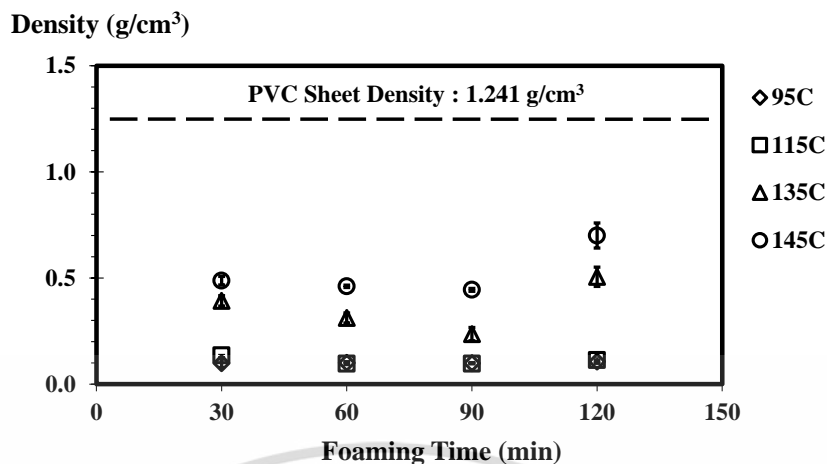
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาเกิดโฟมที่เหมาะสม คือระยะเวลาที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเกิดการละลายและแพร่เข้าสู่เมทริกซ์พีวีซีอย่างสมบรูณ์ ดังนั้นจึงเลือกศึกษาผลของเวลาเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี โดยสภาวะเกิดโฟมที่เลือกศึกษาคือ เวลาเกิดโฟม 30 60 90 และ 120 min ความดันอิ่มตัว 120 bar และอุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C สัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ เวลาเกิดโฟม (ก) 30 (ข) 60 (ค) 90 และ (ง) 120 min อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิ่มตัว 120 bar ที่กำลังขยาย 100 เท่า

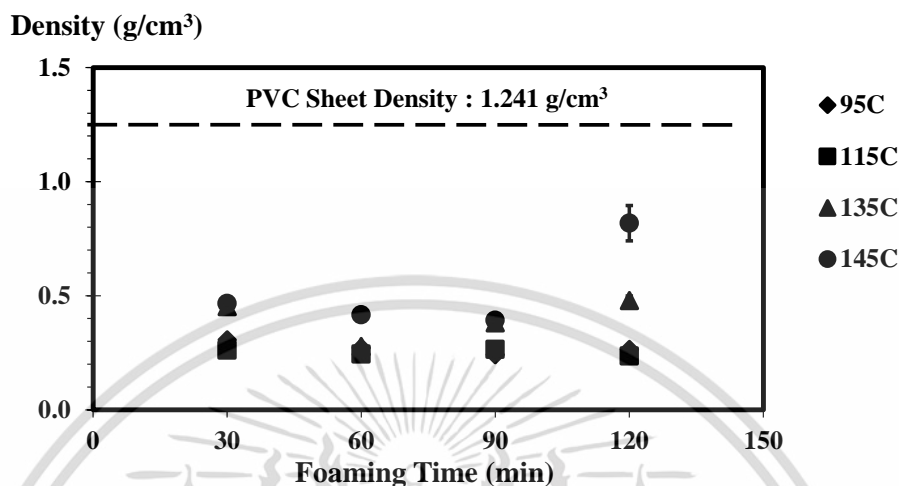
จากการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 115 °C การเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 120 min พบว่าขนาดฟองใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.6 (ก) - (ง) เนื่องจากการเพิ่มเวลาเกิดโฟมทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถละลายและแพร่เข้าสู่เมทริกซ์ของพีวีซีได้มาก ฟองแก๊สจึงสามารถขยายตัวได้มากขึ้นในขั้นตอนการเติบโตของฟองแก๊ส แต่ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C พบว่าเมื่อเวลาเกิดโฟมมากขึ้น ได้ฟองแก๊สขนาดใกล้เคียงกัน สำหรับที่อุณหภูมิเกิดโฟม 145 °C ได้ฟองแก๊สขนาดเล็กลงเนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมสูงส่งผลให้พลาสติกไอโซเซอร์เกิดการสลายตัวออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟมและหากในกระบวนการใช้เวลาเกิดโฟมที่นาน มีผลทำให้พลาสติกไอโซเซอร์มีโอกาสสลายตัวออกไปได้มาก ทำให้เมทริกซ์แข็งขึ้นฟองจึงขยายตัวได้ยาก



รูปที่ 4.7 ผลของเวลาเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C ความดันอิมิตัว 120 bar

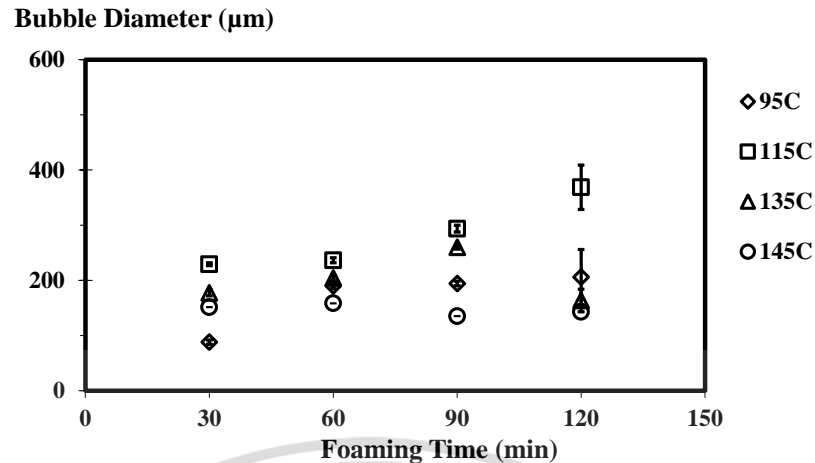
ณ สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 120 min พบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มมีแนวโน้มใกล้เคียงกันประมาณ 0.099 g/cm³ ถึง 0.106 g/cm³ ดังรูปที่ 4.7 และเมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโฟมหลังบ่มเพิ่มขึ้นแต่ยังคงใกล้เคียงกันประมาณ 0.242 g/cm³ ถึง 0.307 g/cm³ ดังรูปที่ 4.8 เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 120 min ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมพบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มใกล้เคียงกันประมาณ 0.097 g/cm³ ถึง 0.135 g/cm³ และเมื่อผ่านการบ่มความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้นแต่ยังคงใกล้เคียงกันประมาณ 0.236 g/cm³ ถึง 0.261 g/cm³ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 90 min พบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มใกล้เคียงกันประมาณ 0.236 g/cm³ ถึง 0.393 g/cm³ แต่เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมเป็น 120 min ความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มสูงขึ้นเป็น 0.506 g/cm³ และเมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโฟมหลังบ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยและยังคงใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.382 g/cm³ ถึง 0.452 g/cm³ และความหนาแน่นโฟมหลังบ่มสูงที่สุดคือ 0.601 g/cm³ ที่เวลาเกิดโฟม 120 min เนื่องจากมากเวลาเกิดโฟมนานและอุณหภูมิเกิดโฟมสูงเกินไปทำให้พลาสติกไซเซออร์เกิดการระเหยออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม เป็นผลทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งฟองแก๊สขยายตัวได้ยาก ความหนาแน่นโฟมจึงเพิ่มขึ้น ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 145 °C เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 90 min พบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มใกล้เคียงกันประมาณ 0.444 g/cm³ ถึง 0.488 g/cm³ แต่เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมเป็น 120 min พบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มสูงขึ้นเป็น 0.709 g/cm³ เมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโฟมหลังบ่มใกล้เคียงกับความหนาแน่นก่อนบ่มคือประมาณ 0.393 g/cm³ ถึง 0.466 g/cm³ และความหนาแน่นโฟมหลังบ่มสูงที่สุดคือ 0.818 g/cm³ ที่เวลาเกิดโฟม 120 min จากข้อมูลของความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มจะเห็นได้ว่าโฟมที่เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C และ 145 °C เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งและมีผนังฟองหนากว่าโฟมที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 115 °C ดังนั้นจึงเกิดการหดตัวต่ำเมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h

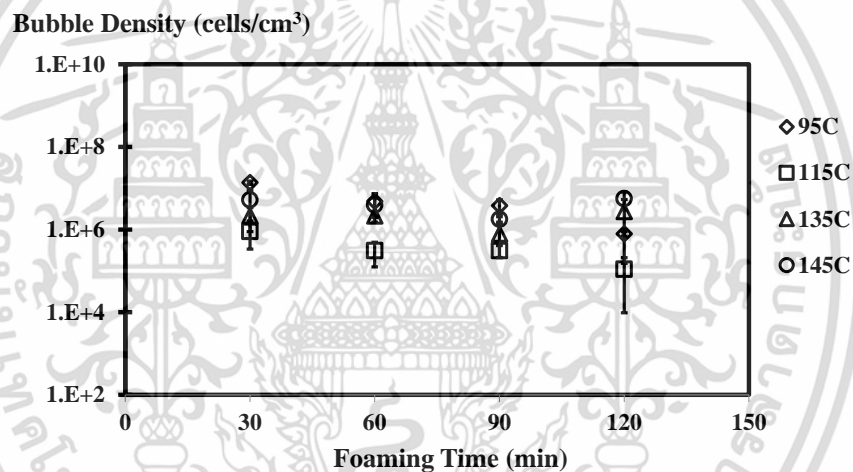


รูปที่ 4.8 ผลของเวลาเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมหลังบ่มเป็นเวลา 12 h ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C ความดันอิมพัลส์ 120 bar

การเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 120 min ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95°C ขนาดฟองเพิ่มขึ้นจาก 87.97 μm เป็น 205.83 μm ดังรูปที่ 4.9 ในทางกลับกันความหนาแน่นฟองลดลงจาก $1.37 \times 10^7 \text{ cells/cm}^3$ เป็น $7.90 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$ ดังรูปที่ 4.10 ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C ขนาดฟองเพิ่มขึ้นจาก 229.19 μm เป็น 368.63 μm ความหนาแน่นฟองลดลงจาก $9.00 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$ เป็น $1.10 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C การเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 90 min ขนาดฟองเพิ่มขึ้นจาก 177.45 μm เป็น 260.12 μm ความหนาแน่นฟองลดลงจาก $2.15 \times 10^6 \text{ cells/cm}^3$ เป็น $7.80 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$ และเมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมเป็น 120 min ขนาดฟองลดลงเป็น 163.55 μm และความหนาแน่นฟองเพิ่มขึ้นเป็น $2.75 \times 10^6 \text{ cells/cm}^3$ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 145 °C เมื่อเพิ่มเวลาเกิดโฟมพบว่าขนาดฟองเล็กใกล้เคียงกันประมาณ 151.39 μm ถึง 142.90 μm และความหนาแน่นฟองสูงใกล้เคียงกันประมาณ $5.20 \times 10^6 \text{ cells/cm}^3$ ถึง $5.58 \times 10^6 \text{ cells/cm}^3$ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มเวลาเกิดโฟมส่งผลให้ขนาดฟองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและความหนาแน่นฟองที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเวลาเกิดโฟมที่เหมาะสมสำหรับให้พีวีซีเกิดการอิมพัลส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตอย่างสมบูรณ์คือเวลา 30 min



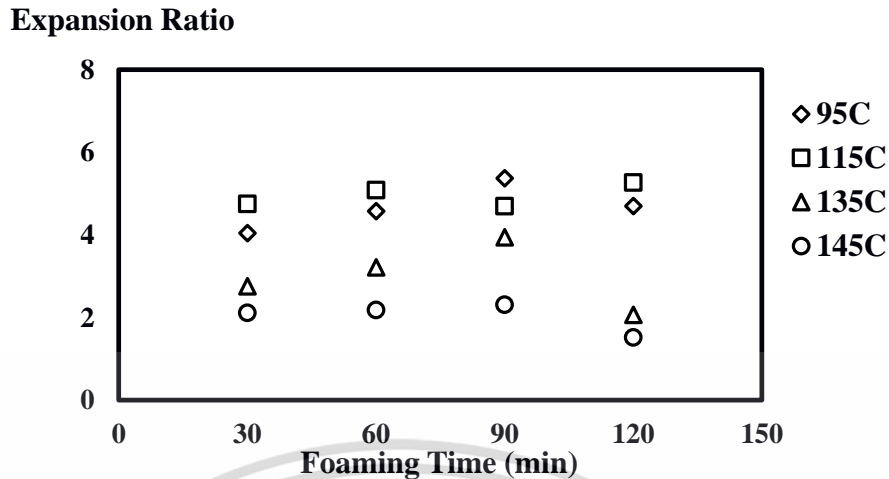
รูปที่ 4.9 ผลของเวลาเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิมตัว 120 bar



รูปที่ 4.10 ผลของเวลาเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิมตัว 120 bar

การเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min ถึง 120 min พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 115 °C โฟมที่ได้มีสัดส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกันประมาณ 4 - 5 เท่า ดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C โฟมขยายตัวได้ดีส่งผลให้มีสัดส่วนการขยายตัวสูง สำหรับที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C และ 145 °C โฟมที่ได้มีสัดส่วนการขยายตัวต่ำใกล้เคียงกันประมาณ 2 - 3 เท่า เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟมทั้งสองค่ามีผลทำให้ไอของพลาสติกไซเซออร์สลายตัวระเหยออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟมทำให้เมทริกซ์แข็งขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นโฟมสูง การเพิ่มเวลาเกิดโฟมส่งผลให้ความหนาแน่นโฟม ขนาดฟองและความหนาแน่นฟองแตกต่างกันไม่มากนักจึงทำให้ค่าสัดส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



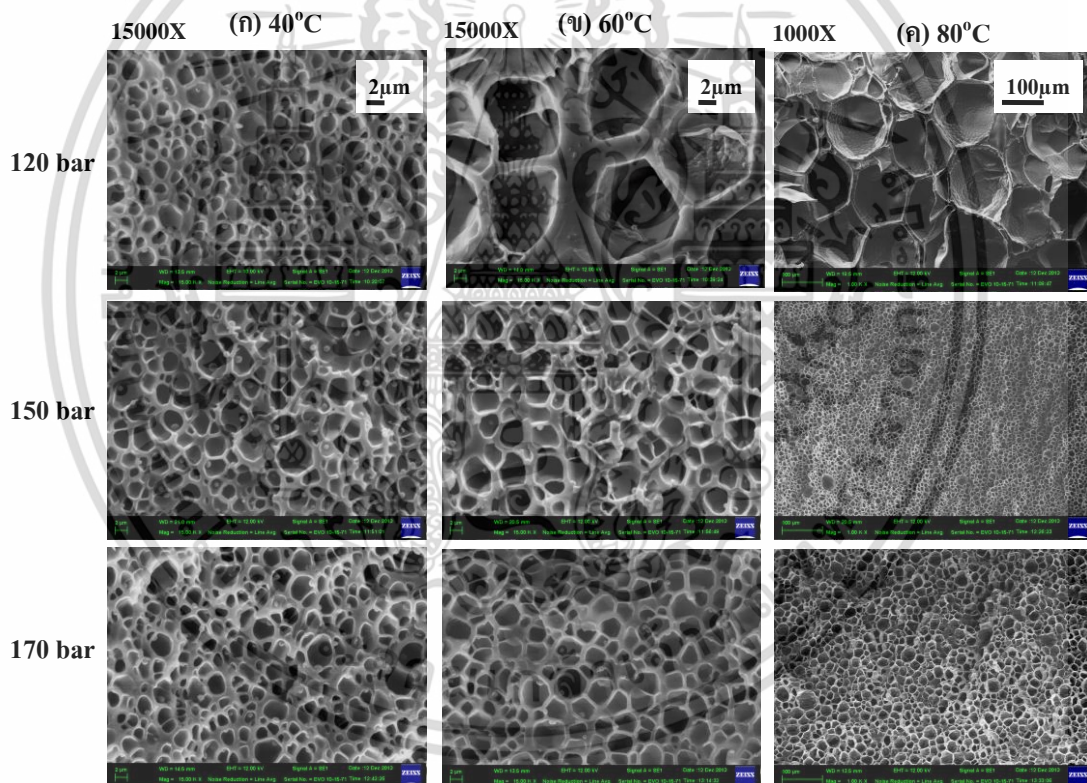
รูปที่ 4.11 ผลของเวลาเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของสภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C และความดันอิมพัลส์ 120 bar

4.1.3 การศึกษาผลของความดันอิมพัลส์ที่ส่งผลต่อลักษณะวิทยาของโฟมพีวีซี

โฟมประเภทไมโครเซลลูลาร์เกิดที่สภาวะความดันอิมพัลส์สูงและอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซี ดังนั้นจึงส่งผลให้ได้ลักษณะโครงสร้างฟองเป็นเซลล์ปิด ขนาดฟองเล็กประมาณ 1 - 10 μm และความหนาแน่นฟองสูงประมาณ $10^7 - 10^9$ cells/cm³ ด้วยลักษณะโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้โฟมประเภทนี้มีสมบัติเชิงกลที่เท่ากันทุกทิศทาง อีกทั้งคุณสมบัติเด่นคือรับแรงกดอัดได้ดีและสมบัติด้านการเป็นฉนวนความร้อนเป็นต้น ดังนั้นการศึกษาในหัวข้อนี้จึงเลือกศึกษาความสามารถในการเป็นไมโครเซลลูลาร์โฟมของพีวีซี โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะวิทยาของโฟมประเภทนี้คือ ความดันอิมพัลส์และอุณหภูมิเกิดโฟม ปริมาณของความดันอิมพัลส์สัมพันธ์กับค่าความสามารถในการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายในเมทริกซ์ของพีวีซีซึ่งส่งผลต่อลักษณะวิทยาของโฟมที่เตรียมได้ สภาวะเกิดโฟมที่เลือกศึกษาคือ ความดันอิมพัลส์ 120 150 และ 170 bar อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 80 °C และเวลาเกิดโฟม 30 min จากการทดลองที่สภาวะเกิดโฟมที่กำหนดพบว่าโฟมพีวีซีที่เตรียมได้มีขนาดฟองเล็กประมาณ 2 - 100 μm ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C การเพิ่มความดันอิมพัลส์จาก 120 bar ถึง 170 bar พบว่าขนาดฟองเล็กใกล้เคียงกันประมาณ 2 μm ที่กำลังขยาย 15000 เท่าดังรูปที่ 4.12 (ก) การเพิ่มความดันอิมพัลส์คือการเพิ่มปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตให้ละลายในเมทริกซ์ของพีวีซีส่วนที่เป็นโครงสร้างอสังฐานได้มากขึ้น เมื่อทำการบวกรวมสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้เกิดนิเวศลีสจำนวนที่มากขึ้น โดยที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C เป็นอุณหภูมิเกิดโฟมที่ดำเนินไป เมทริกซ์ของพีวีซีมีความแข็งแรงจึงทำให้ฟองแก๊สจึงเกิดการขยายตัวได้ยาก ดังนั้นขนาดฟองที่ได้จึงเล็กใกล้เคียงกัน และมีการกระจายตัวของฟองใกล้เคียงกัน เมื่อเพื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 60 °C ทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีอ่อนตัวลง ที่สภาวะความดันอิมพัลส์ 120 bar จึงเห็นว่าฟองแก๊สขยายตัวได้ดีดังรูปที่ 4.12 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์อันดีแก่การศึกษามากกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

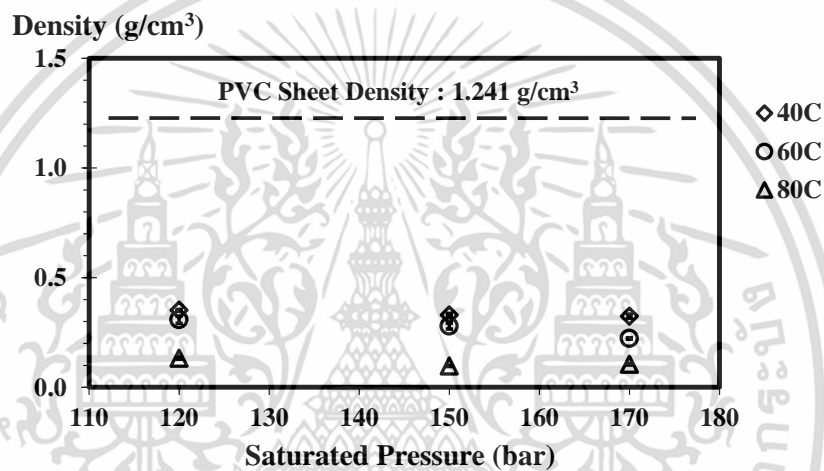
แต่เมื่อเพิ่มความดันอิมิตัวเป็น 150 bar และ 170 bar จะเห็นว่าปริมาณฟองแก๊สมากขึ้นและมีขนาดฟองแก๊สเล็กลงเนื่องมาจากปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายในเมทริกซ์ของพีวีซีเพิ่มขึ้น เมื่อทำการรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์จึงทำให้เกิดนิวเคลียสในปริมาณที่มาก แต่อุณหภูมิเกิดโคมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วจึงทำให้เมทริกซ์ของพีวีซียังคงแข็ง ดังนั้นขั้นตอนการขยายตัวของฟองแก๊สเกิดได้ไม่ดีพอ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโคมเป็น 80 °C ที่สภาวะความดันอิมิตัว 120 bar ที่กำลังขยาย 1000 เท่าดังรูปที่ 4.12 (ค) พบว่าฟองแก๊สมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายตัวของฟองแก๊สลดลง เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิเกิดโคมดังกล่าวใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีคือ 88.6 °C ซึ่งที่สภาวะอุณหภูมินี้สายโซ่พอลิเมอร์เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ได้ดังนั้นฟองแก๊สจึงสามารถขยายขนาดได้มาก เมื่อเพิ่มความดันอิมิตัวเป็น 150 bar และ 170 bar พบว่าได้ฟองแก๊สขนาดเล็กและมีปริมาณฟองที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์หนาแน่นเพิ่มขึ้น



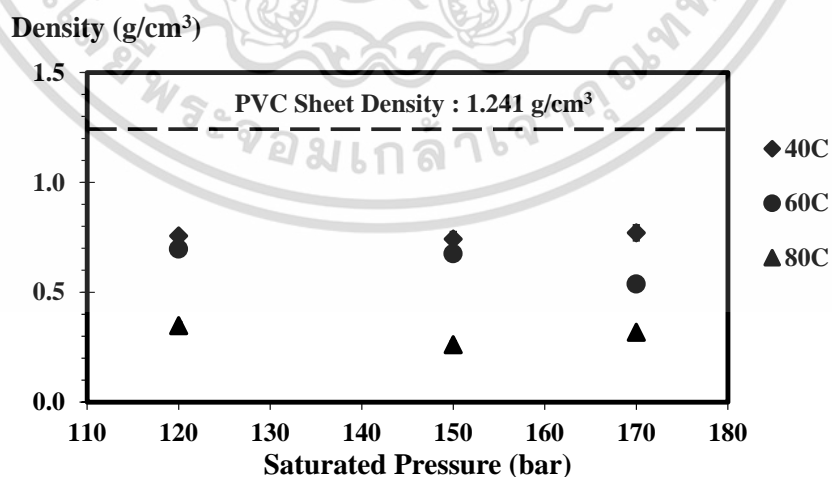
รูปที่ 4.12 ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สภาวะความดันอิมิตัว 120, 150 และ 170 bar ที่สภาวะเกิดโคมคือ อุณหภูมิเกิดโคม (ก) 40°C (ข) 60°C ที่กำลังขยาย 15000 เท่า และ (ค) 80°C ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เวลาเกิดโคม 30 min

ณ สภาวะอุณหภูมิเกิดโคม 40 °C เมื่อเพิ่มความดันอิมิตัวจาก 120 bar ถึง 170 bar พบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.324 g/cm³ ถึง 0.352 g/cm³ ดังรูปที่ 4.13 เมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโฟมหลังบ่มสูงขึ้นแต่ยังคงใกล้เคียงกันประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.742 g/cm³ ถึง 0.771 g/cm³ ดังรูปที่ 4.14 ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 60 °C เมื่อเพิ่มความดันอิมิตัวพบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.223 g/cm³ ถึง 0.308 g/cm³ เมื่อผ่านการบ่มความหนาแน่นโฟมหลังบ่มสูงขึ้นแต่ยังคงใกล้เคียงกันประมาณ 0.538 g/cm³ ถึง 0.696 g/cm³ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 80 °C เมื่อเพิ่มความดันอิมิตัวพบว่าความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.098 g/cm³ ถึง 0.133 g/cm³ เมื่อผ่านการบ่มพบว่าความหนาแน่นโฟมหลังบ่มสูงขึ้นแต่ยังคงใกล้เคียงกันประมาณ 0.262 g/cm³ ถึง 0.348 g/cm³ จะเห็นได้ว่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว การเพิ่มความดันอิมิตัวจาก 120 bar ถึง 170 bar ความหนาแน่นโฟมทั้งก่อนและหลังบ่มไม่แตกต่างกันมากนัก



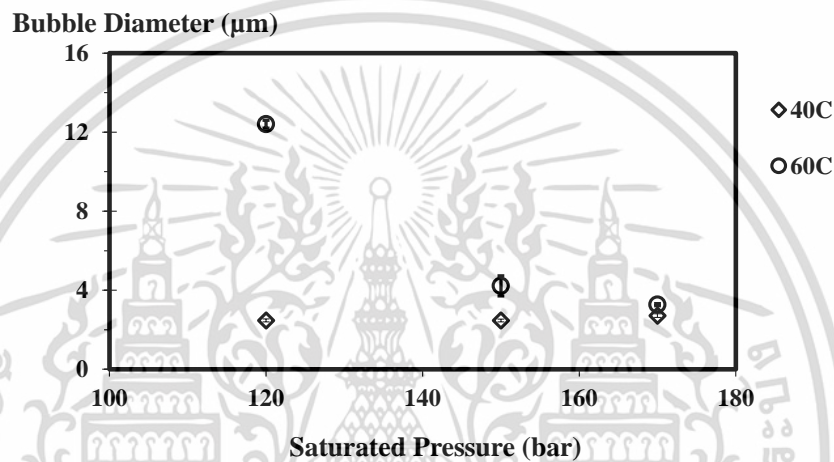
รูปที่ 4.13 ผลของความดันอิมิตัวที่สภาวะต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโฟม 30 min



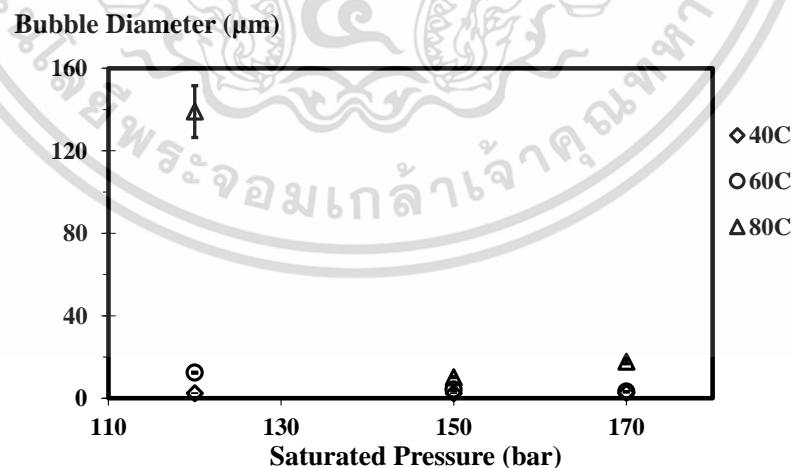
รูปที่ 4.14 ผลของความดันอิมิตัวที่สภาวะต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโฟม 30 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

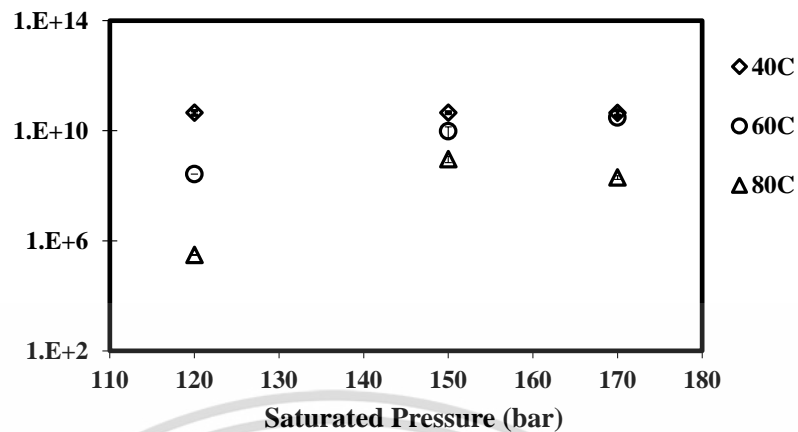
โพลีที่เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 40 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวจาก 120 bar ถึง 170 bar พบว่าขนาดฟองเล็กใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2.47 - 2.72 μm ดังรูปที่ 4.15 ความหนาแน่นฟองสูงใกล้เคียงกันประมาณ 4.50×10^{10} cells/cm³ ดังรูปที่ 4.17 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโพลีเป็น 60 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวมีผลทำให้ขนาดฟองเล็กลงจาก 12.41 μm เป็น 3.27 μm ในทางกลับกันความหนาแน่นฟองเพิ่มขึ้นจาก 2.70×10^8 cells/cm³ เป็น 3.00×10^{10} cells/cm³ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโพลีเป็น 80 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวส่งผลให้ขนาดฟองลดลงจาก 139.03 μm เป็น 17.79 μm ดังรูปที่ 4.16 ความหนาแน่นฟองเพิ่มขึ้นจาก 3.09×10^5 cells/cm³ เป็น 2.0×10^8 cells/cm³ ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโพลีคือ อุณหภูมิเกิดโพลี 40 °C และ 60 °C เวลาเกิดโพลี 30 min

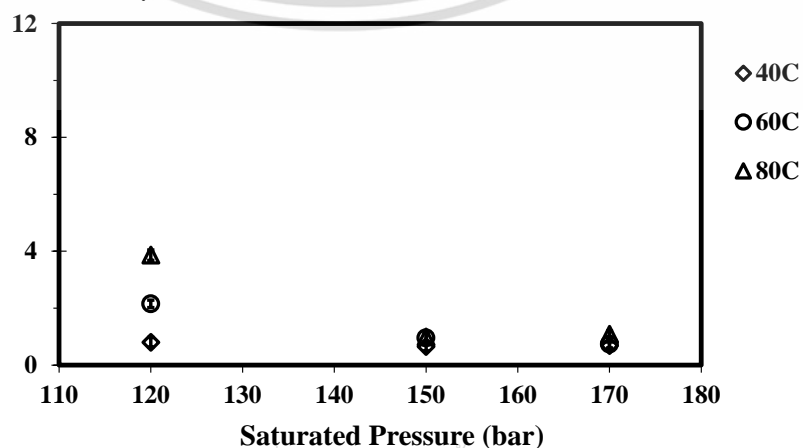


รูปที่ 4.16 ผลของความดันอิมิตัวต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโพลีคือ อุณหภูมิเกิดโพลี 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโพลี 30 min

Bubble Density (cells/cm³)

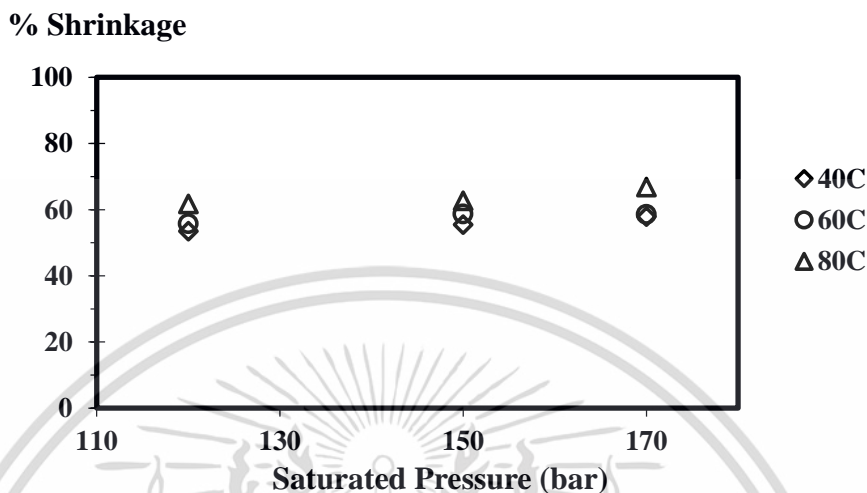
รูปที่ 4.17 ผลของความดันอิมิตัวต่างๆที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิ เกิดโฟม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโฟม 30 min

ณ สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวจาก 120 bar ถึง 170 bar พบว่า ผนังฟองหนาใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.653 μm ถึง 0.804 μm ดังรูปที่ 4.18 ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 60 °C ความดันอิมิตัว 120 bar พบว่าผนังฟองหนา 2.153 μm และเมื่อเพิ่มความดันอิมิตัว เป็น 150 bar ถึง 170 bar พบว่าผนังฟองหนาเป็น 0.956 μm และ 0.731 μm ตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 80 °C ความดันอิมิตัว 120 bar พบว่าผนังฟองหนา 3.864 μm และเมื่อเพิ่มความดันอิมิตัวเป็น 150 bar ถึง 170 bar พบว่าผนังฟองหนาเป็น 0.988 μm และ 1.084 μm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่สภาวะความดันอิมิตัว 120 bar มีผนังฟองหนากว่าที่ความดันอิมิตัว 150 bar และ 170 bar เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายในเมทริกซ์ของพีวีซีน้อยกว่าจึงส่งผลต่อการเกิดนิวเคลียสในปริมาณน้อยดังนั้นจึงทำให้มีผนังฟองหนา โดยโฟมที่เตรียมจากสภาวะเกิดโฟมดังกล่าว โฟมที่ได้เกิดการหดตัวใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.19 เนื่องจากโฟมที่ได้มีขนาดของผนังฟองใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.18

Bubble Wall (μm)

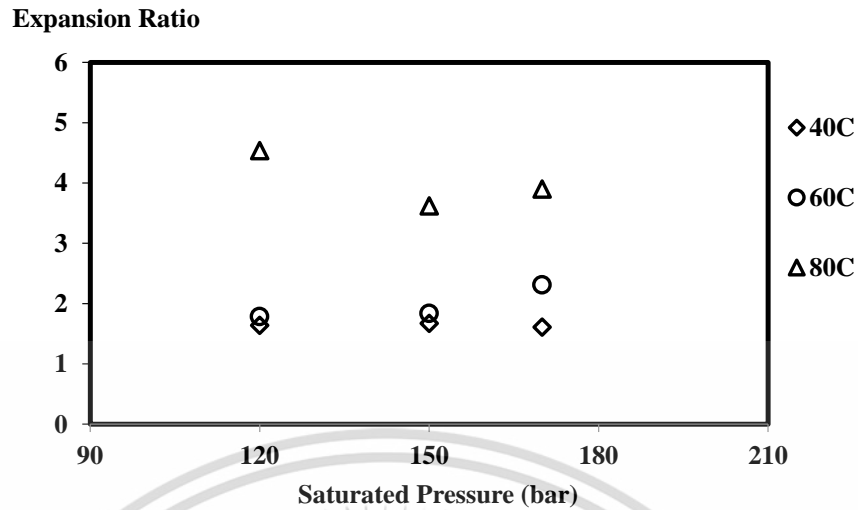
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 ผลของความดันอิมิตัวต่างๆที่ส่งผลต่อความหนาของผนังฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโฟม 30 min



รูปที่ 4.19 ผลของความดันอิมิตัวต่างๆที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโฟม 30 min

สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวจาก 120 bar ถึง 170 bar พบว่า สัดส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกันประมาณ 1.61 เท่าถึง 1.67 เท่า ดังรูปที่ 4.20 เนื่องจากเป็นอุณหภูมิเกิดโฟมที่ต่ำเกินไป ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 60 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวส่งผลให้สัดส่วนการขยายตัวลดลงเนื่องจากการเพิ่มความดันอิมิตัวจะทำให้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายในพีวีซีเพิ่มขึ้น และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free Volume) ในสายโซ่ของพีวีซีทำให้ความหนืดลดลง เมื่อรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยการลดความดัน จะทำให้ฟองแก๊สขยายตัวได้เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว ซึ่งสายโซ่ของพีวีซีไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตั้งนั้นขั้นตอนการขยายเติบโตของฟองแก๊สจึงเป็นไปได้ยาก ทำให้ได้ขนาดฟองเล็ก ความหนาแน่นฟองสูงและมีสัดส่วนการขยายตัวต่ำใกล้เคียงกันประมาณ 1.78 เท่าถึง 2.30 เท่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 80 °C ความดันอิมิตัว 120 bar มีสัดส่วนการขยายตัวสูงสุดประมาณ 4.54 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของการมีขนาดฟองที่ใหญ่และความหนาแน่นฟองต่ำ และเมื่อเพิ่มความดันอิมิตัวเป็น 150 bar และ 170 bar พบว่าสัดส่วนการขยายตัวลดลงเป็น 3.62 เท่า และ 3.89 เท่าตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ผลของความดันอิ่มตัวต่างๆที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 80 °C เวลาเกิดโฟม 30 min

ตอนที่ 2

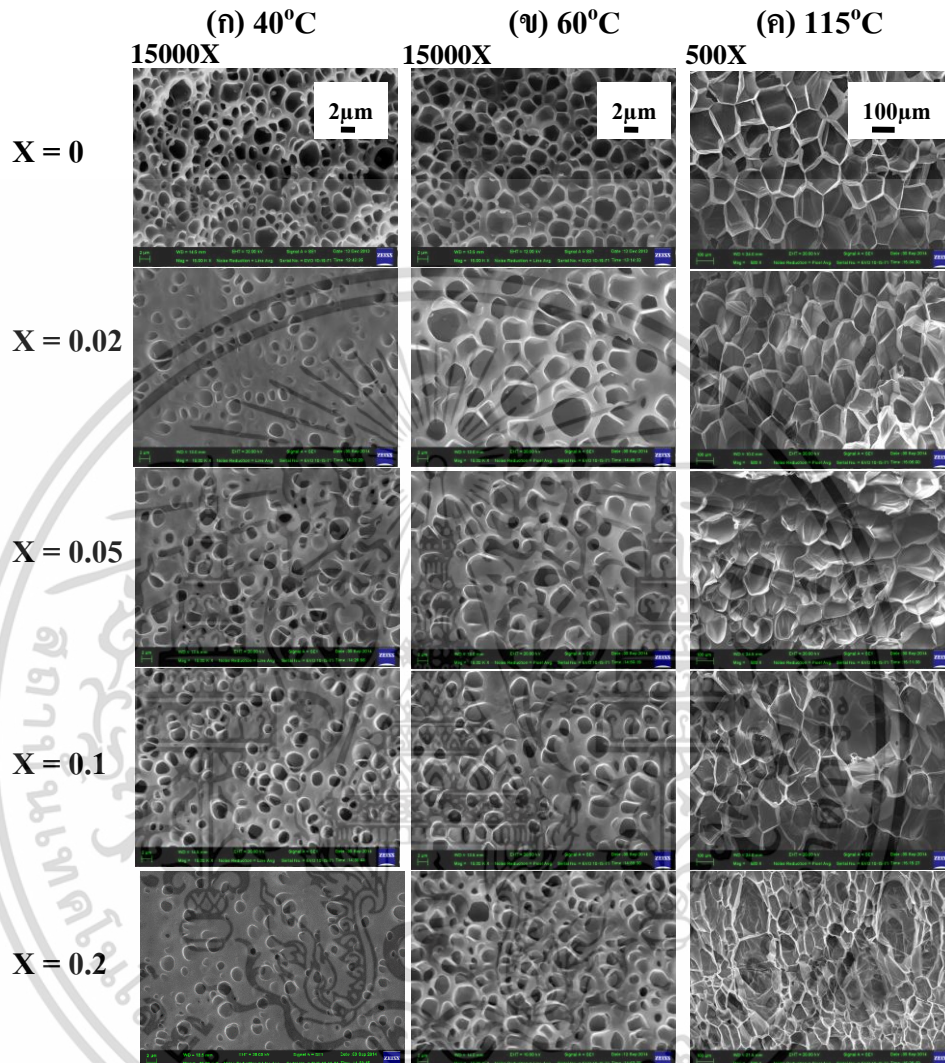
4.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

4.2.1 การศึกษาผลของปริมาณเฮกเซนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

เฮกเซนจัดเป็นสารเกิดฟองอีกประเภทหนึ่งดังนั้นจึงทำการศึกษ ปริมาณของเฮกเซนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะเกิดโฟมที่เลือกศึกษาคือ สัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนคือ 0.02 0.05 0.1 และ 0.2 ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min

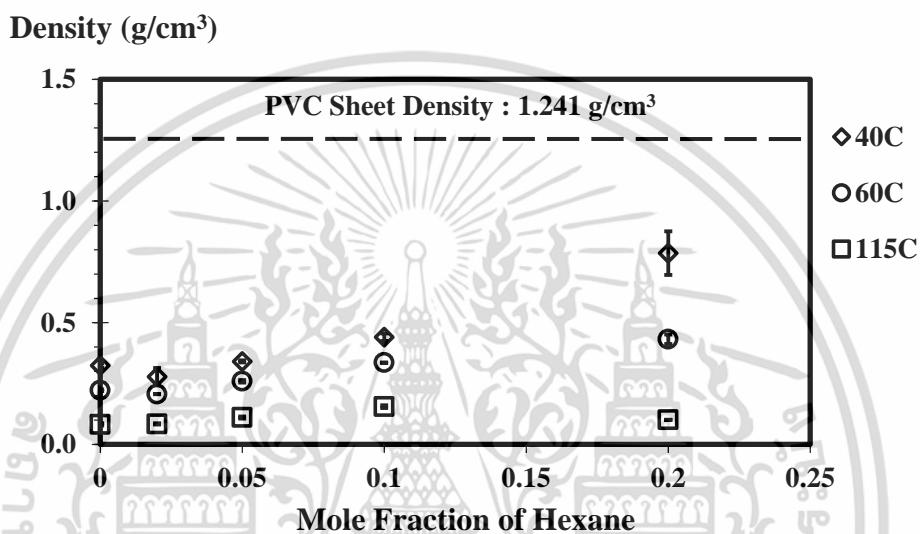


รูปที่ 4.21 ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซน ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม (ก) 40°C (ข) 60°C ที่กำลังขยาย 15000 เท่า และ (ค) 115°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า ความดันอิมิตัว 170 bar เวลาเกิดโฟม 30 min

จากการทดลองพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ความดันอิมิตัว 170 bar การเพิ่มปริมาณสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนพบว่าขนาดฟองมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งปริมาณฟองลดลง ดังรูปที่ 4.21 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยจาก Richard [29] อธิบายว่าพลาสติกไอโซไซเมอร์มีแรงกระทำกับพอลิเมอร์ต่ำ ดังนั้นที่สภาวะการเกิดโฟมของผสมระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสภาวะของไหลเหนือวิกฤตร่วม แผนภาพวัฏภาคไอและของเหลวแสดงดังรูปที่ 2.7 จึงส่งผลให้สกัดเอาพลาสติกไอโซไซเมอร์ออกไปได้ง่าย ทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งขึ้น นิวเคลียสเกิดได้น้อยและฟองแก๊สขยายตัวได้ต่ำจึงได้ฟองแก๊สขนาดเล็ก และหากเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนพบว่าพลาสติกไอโซไซเมอร์

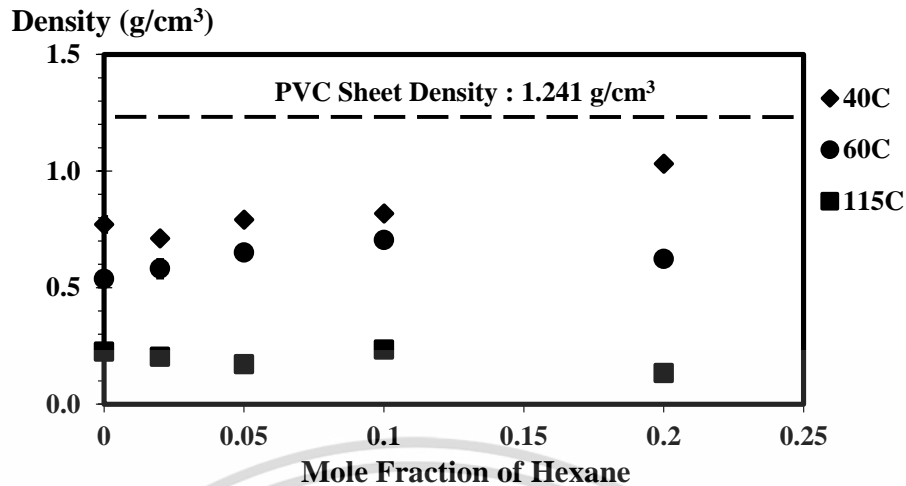
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอกาสถูกสกัดออกไปได้มากขึ้น ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 115 °C พบว่าการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของ เฮกเซนจาก 0.02 เป็น 0.05 ส่งผลให้ขนาดฟองใกล้เคียงกัน ฟองแก๊สยังคงความเป็นระเบียบเช่นเดิม ดังรูปที่ 4.21 (ค) แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลเป็น 0.1 และ 0.2 พบว่าฟองแก๊สมีขนาดเล็กลง ผนังฟอง บางลง การกระจายตัวของขนาดฟองกว้าง (Polydisperses) เนื่องจากเกิดการรวมกันของสองฟอง แก๊สขึ้นไปจึงทำให้ความเป็นระเบียบของฟองแก๊สลดลง เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการคงสภาพของฟองแก๊สจึง เกิดการแลกเปลี่ยนกับอากาศภายนอกมากเป็นผลให้โครงสร้างฟองเกิดการยุบตัวลง



รูปที่ 4.22 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโพลีก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโพลีคือ อุณหภูมิเกิดโพลี 40 60 และ 115 °C ความดันอัดตัว 170 bar และเวลาเกิดโพลี 30 min

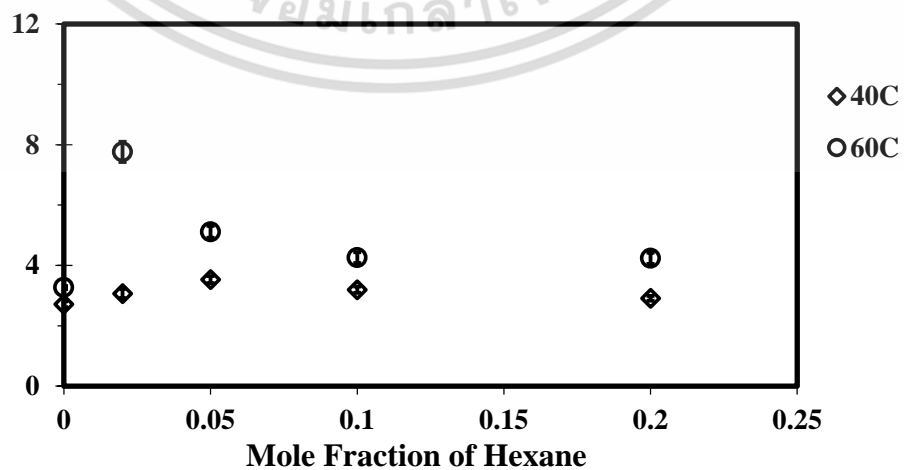
เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนจาก 0.02 ถึง 0.2 พบว่าความหนาแน่นโพลีก่อนบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.278 g/cm³ เป็น 0.786 g/cm³ ดังรูปที่ 4.22 และเมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโพลีหลังบ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนเพิ่มขึ้นพบว่าความหนาแน่นโพลีหลังบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.711 g/cm³ ถึง 1.031 g/cm³ ดังรูปที่ 4.23 ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 60 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนพบว่าความหนาแน่นโพลีก่อนบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.206 g/cm³ เป็น 0.432 g/cm³ และความหนาแน่นโพลีหลังบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.581 g/cm³ เป็น 0.704 g/cm³ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 115 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลพบว่าความหนาแน่นโพลีก่อนบ่มใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.084 g/cm³ ถึง 0.101 g/cm³ และความหนาแน่นโพลีหลังบ่มใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.133 g/cm³ ถึง 0.234 g/cm³



รูปที่ 4.23 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโฟมหลังบ่มที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมพัลส์ 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min

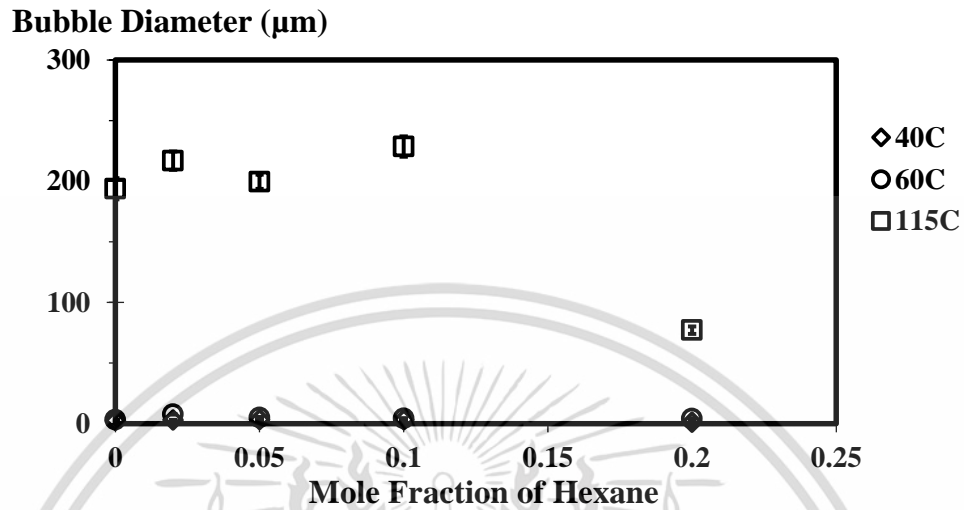
เมื่อวิเคราะห์ขนาดฟองและความหนาแน่นฟองด้วยโปรแกรม Image J พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนพบว่าขนาดฟองเล็กลง 2.72 μm เป็น 1.89 μm ดังรูปที่ 4.24 และความหนาแน่นฟองลดลงเล็กน้อยจาก 5.59×10^{10} cells/cm³ เป็น 8.89×10^9 cells/cm³ ดังรูปที่ 4.26 สำหรับที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 60 °C ขนาดฟองเล็กลงจาก 3.27 μm เป็น 2.15 μm ความหนาแน่นฟองลดลงจาก 3.55×10^{10} cells/cm³ เป็น 1.47×10^{10} cells/cm³ และที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C การเพิ่มสัดส่วนโดยโมลจาก 0.02 ถึง 0.1 ขนาดฟองมีแนวโน้มใกล้เคียงกันคือ 193.76 μm ถึง 171.22 μm และความหนาแน่นฟองเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยช่วง 3.29×10^5 cells/cm³ ถึง 2.59×10^5 cells/cm³ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลเป็น 0.2 พบว่าขนาดฟองลดลงเป็น 118.96 μm ดังรูปที่ 4.25 และความหนาแน่นฟองเป็น 6.82×10^5 cells/cm³ ดังรูปที่ 4.26

Bubble Diameter (μm)

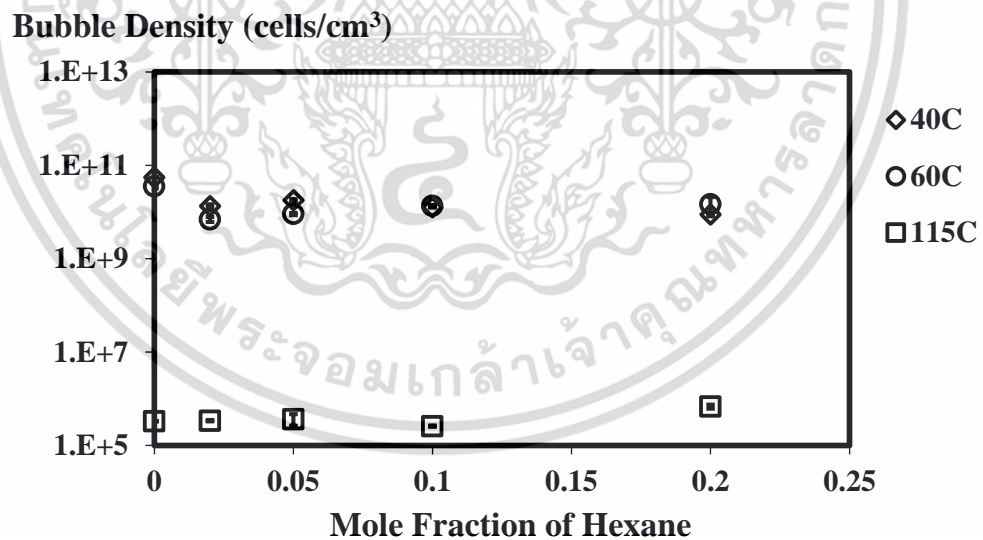


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min



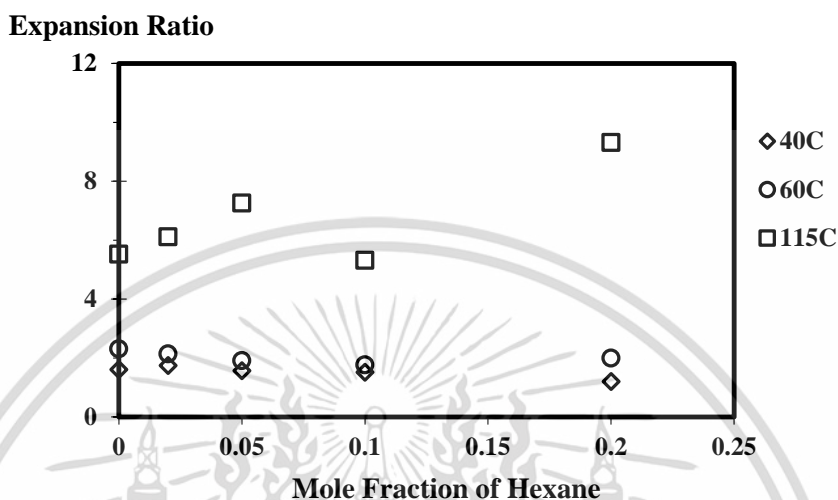
รูปที่ 4.25 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min



รูปที่ 4.26 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนการขยายตัวของโฟมที่เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C เมื่อสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนเพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 0.2 พบว่าสัดส่วนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายตัวใกล้เคียงกันประมาณ 1.75 เท่า และ 2.30 เท่าตามลำดับดังรูปที่ 4.27 แต่ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C พบว่าการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนเพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 0.2 พบว่าสัดส่วนการขยายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 6.11 เท่า เป็น 9.31 เท่าเนื่องจากเกิดการรวมกันของสองฟองแก๊สขึ้นไปเป็นผลให้เกิดการขยายตัวได้มาก



รูปที่ 4.27 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซนที่ส่งผลสัดส่วนการขยายตัวที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min

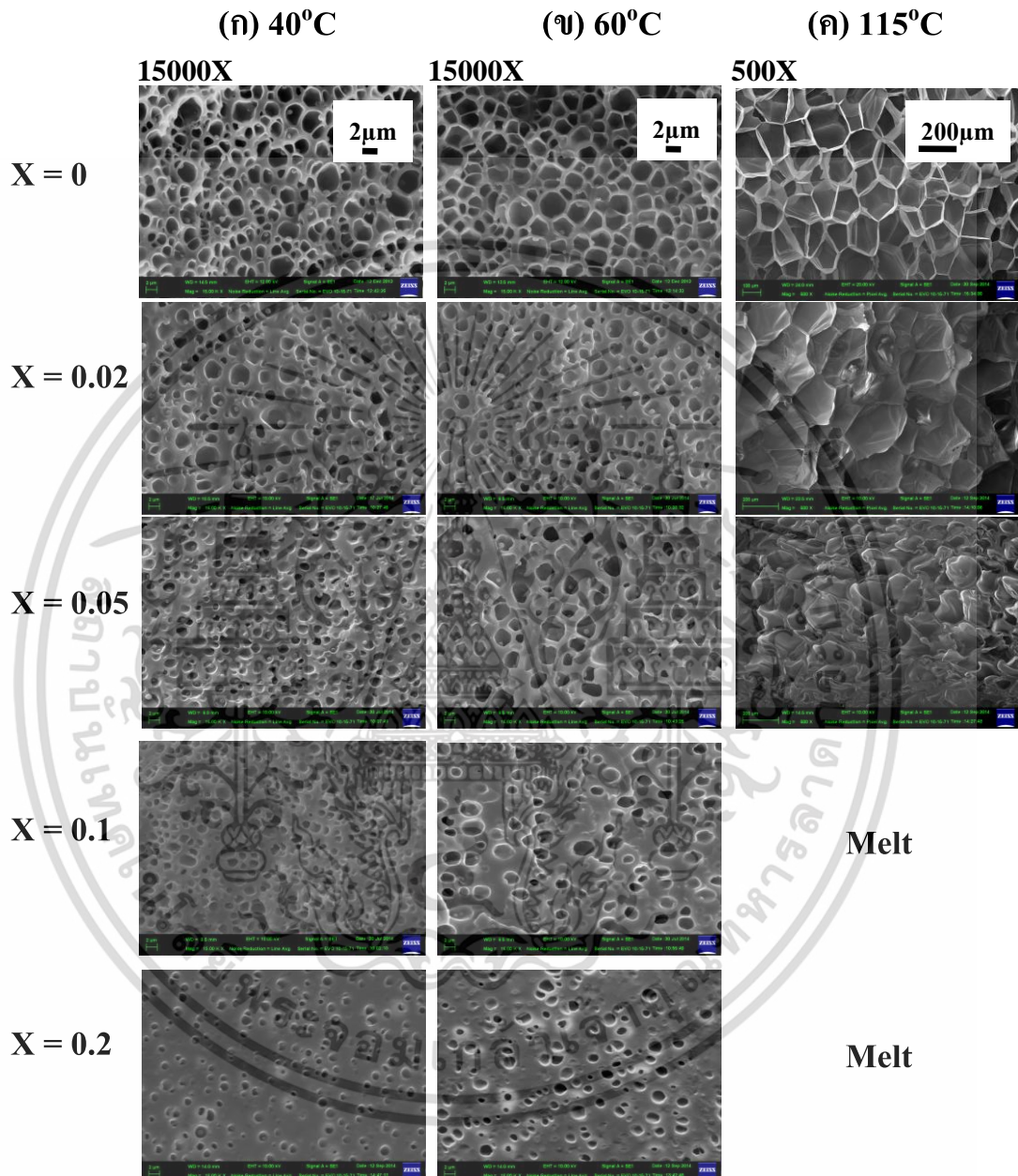
4.2.2 การศึกษาผลของปริมาณไซโคลเฮกซาโนนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัมพันธภาพของโฟมพีวีซี

ไซโคลเฮกซาโนนนิยมใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับพีวีซี ดังนั้นจึงเลือกศึกษาปริมาณของไซโคลเฮกซาโนนที่ทำหน้าที่เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเพื่อส่งผลต่อสัมพันธภาพของโฟมพีวีซี สภาวะที่ทำการศึกษาคือ สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.02 0.05 0.1 และ 0.2 สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C การเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนจาก 0.02 ถึง 0.2 พบว่าขนาดฟองเล็กลงและปริมาณฟองลดลง ดังรูปที่ 4.28 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยพลาสติกไซเซอร์ถูกสกัดออกจากเมทริกซ์ของพีวีซีได้ง่าย [29] ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งขึ้น ส่งผลให้นิวเคลียสเกิดได้ยากและขยายตัวได้ต่ำ จึงได้ขนาดฟองแก๊สเล็กลงและปริมาณฟองแก๊สลดลง โดยการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนเพิ่มขึ้นส่งผลให้พลาสติกไซเซอร์ถูกสกัดออกจากเมทริกซ์มากขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าที่สัดส่วนโดยโมลเป็น 0.2 พบว่าขนาดฟองเล็กและมีปริมาณฟองน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมสูงขึ้นเป็น 115 °C เป็นผลให้เมทริกซ์ของพีวีซีอ่อนตัวลงจึงทำให้ฟองแก๊สสามารถขยายตัวได้ดี ที่สัดส่วน

โดยโมลเป็น 0.02 พบว่าขนาดฟองใหญ่ขึ้นและมีผนังฟองบางลงดังรูปที่ 4.28 (ค) เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมลเป็น 0.05 พบว่าเมทริกซ์แข็งขึ้นและมีขนาดฟองเล็กลง หากเพิ่มสัดส่วนโดยโมลเป็น 0.1 และ 0.2 พบว่าพีวีซีเกิดการหลอมเหลวเป็นฟิล์มจนไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้

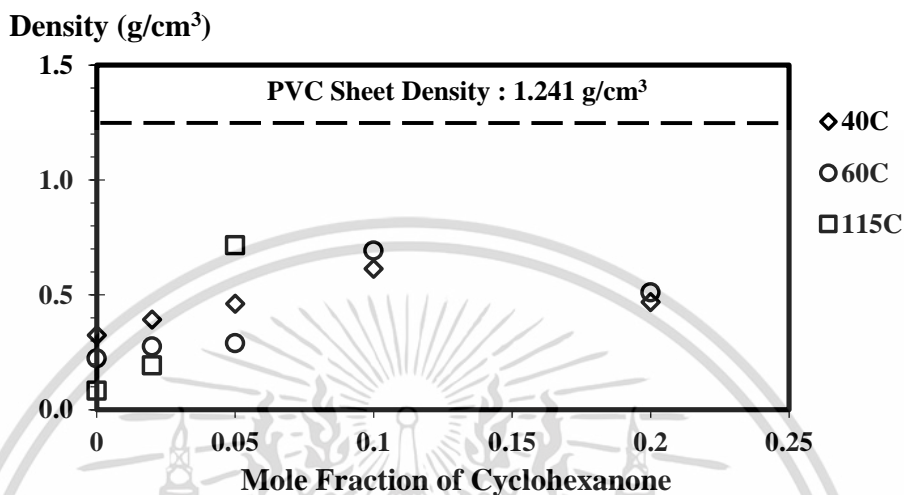


รูปที่ 4.28 ภาพไมโครกราฟของโฟมพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนน ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม (ก) 40°C (ข) 60°C ที่กำลังขยาย 15000 เท่า และ (ค) 115°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า ความดันอัดตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min

ณ สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนจาก 0.02 ถึง 0.2 พบว่าความหนาแน่นก่อนบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.393 g/cm³ ถึง 0.614 g/cm³ ดังรูปที่ 4.29

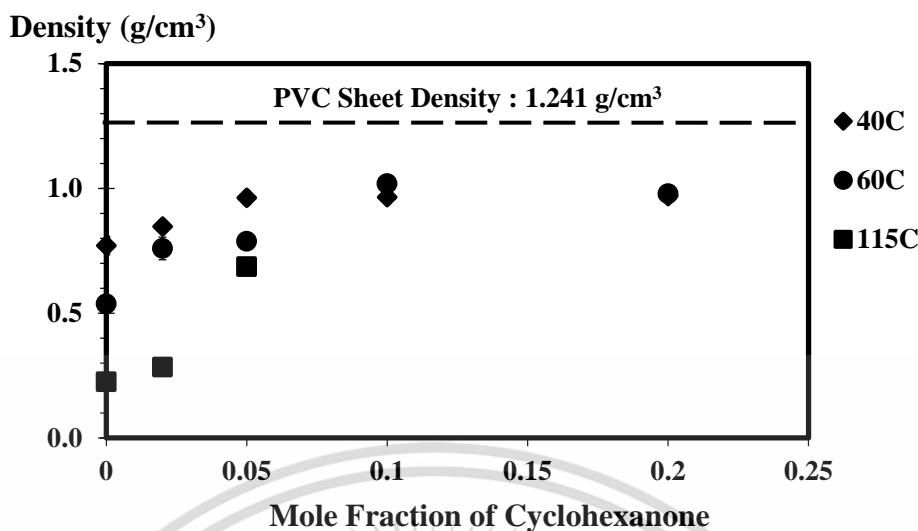
และเมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโฟมหลังบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.848 g/cm³ ถึง 1.012 g/cm³ ดังรูปที่ 4.30 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนมากขึ้น จะทำให้โฟมมีลักษณะที่แข็งและเปราะมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ไซโคลเฮกซาโนนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกินไป ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนที่มากเกินไป ซึ่งส่งผลให้โฟมมีลักษณะที่เปราะและแตกหักง่าย

g/cm³ ถึง 0.969 g/cm³ ดังรูปที่ 4.30 ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์ 60 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซานอนพบว่าความหนาแน่นโพลีเมอร์ก่อนบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.275 g/cm³ ถึง 0.692 g/cm³ และเมื่อผ่านการบ่มพบว่าความหนาแน่นโพลีเมอร์หลังบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.759 g/cm³ ถึง 1.019 g/cm³



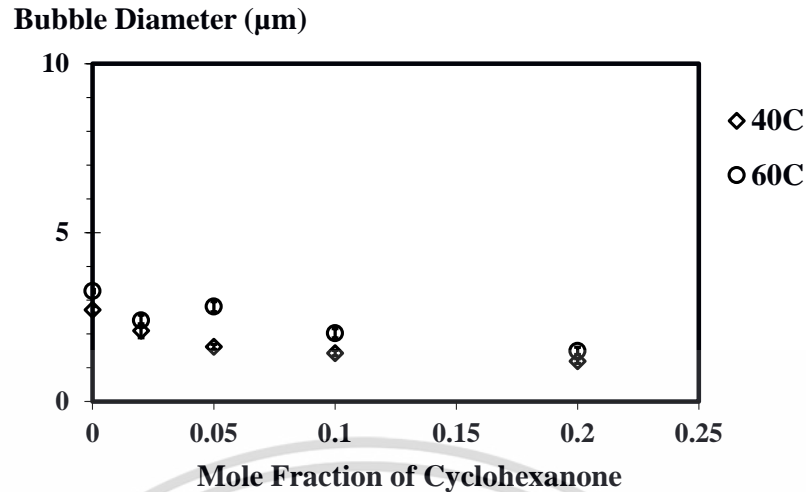
รูปที่ 4.29 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซานอนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโพลีเมอร์ก่อนบ่มที่สภาวะเกิดโพลีเมอร์คือ อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์ 40 60 และ 115 °C ความดันอัดตัว 170 bar และเวลาเกิดโพลีเมอร์ 30 min

ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์ 115 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซานอนจาก 0.02 ถึง 0.05 พบว่าความหนาแน่นก่อนบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 0.193 g/cm³ ถึง 0.716 g/cm³ และเมื่อผ่านการบ่มเป็นเวลา 12 h พบว่าความหนาแน่นโพลีเมอร์หลังบ่มใกล้เคียงกับความหนาแน่นโพลีเมอร์ก่อนบ่มคือประมาณ 0.2837 g/cm³ ถึง 0.726 g/cm³ ตามลำดับ เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์สูงคือ 115 °C พลาสติกไซเซอรูถูกสกัดออกไปได้มากเป็นผลให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งขึ้น ดังนั้นฟองแก๊สขยายตัวได้ยาก จากสัณฐานวิทยาที่ 4.28 (ค) จะเห็นว่าโครงสร้างโพลีเมอร์ที่ได้มีเมทริกซ์แข็งและมีผนังฟองหนา ดังนั้นโพลีเมอร์ที่สภาวะเกิดโพลีเมอร์ดังกล่าวจึงมีความหนาแน่นโพลีเมอร์ก่อนและหลังบ่มที่ใกล้เคียงกันนั้นคือโพลีเมอร์สภาวะดังกล่าวเกิดการหดตัวต่ำ

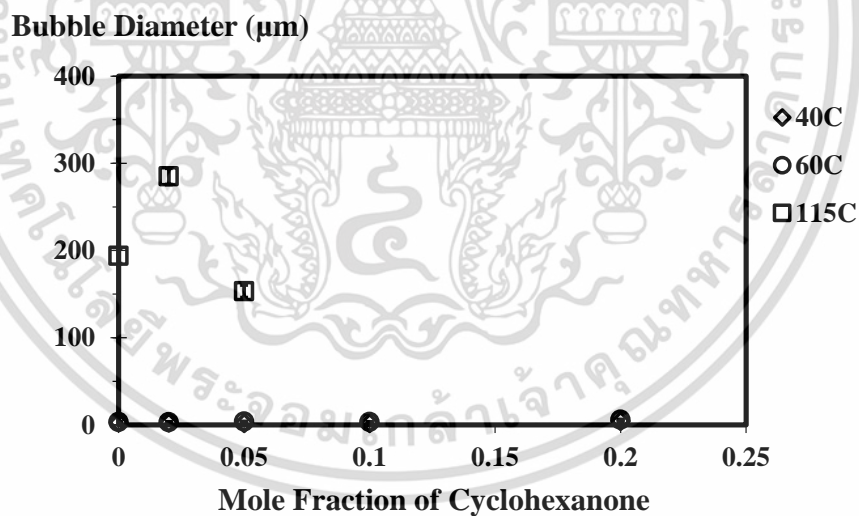


รูปที่ 4.30 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นโพลีเมอร์หลังบ่มที่สภาวะเกิดโพลีคือ อุณหภูมิเกิดโพลี 40 60 และ 115 °C ความดันอัดตัว 170 bar และเวลาเกิดโพลี 30 min

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 40 °C การเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนมีผลทำให้ขนาดพองลดลงจาก 2.72 μm เป็น 1.20 μm ดังรูปที่ 4.31 แต่ความหนาแน่นพองลดลงจาก $4.48 \times 10^{10} \text{ cell/cm}^3$ เป็น $8.69 \times 10^9 \text{ cell/cm}^3$ ดังรูปที่ 4.33 ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 60 °C การเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนมีผลทำให้ขนาดพองลดลงจาก 3.27 μm เป็น 1.50 μm ในขณะที่ความหนาแน่นพองมีแนวโน้มลดลงจาก $3.00 \times 10^{10} \text{ cell/cm}^3$ เป็น $3.22 \times 10^9 \text{ cell/cm}^3$ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 115 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนพบว่าขนาดเล็กลงจาก 193.76 μm เป็น 143.06 μm ดังรูปที่ 4.32 ความหนาแน่นพองใกล้เคียงกันในช่วง $3.29 \times 10^5 \text{ cell/cm}^3$ ถึง $4.02 \times 10^5 \text{ cell/cm}^3$ ดังรูปที่ 4.33 เพื่อเป็นการยืนยันผลการสกัดพลาสติกไซเซอร้ออกจากเมทริกซ์ของพีวีซีด้วยตัวทำละลาย จึงทำการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนด้วย TGA

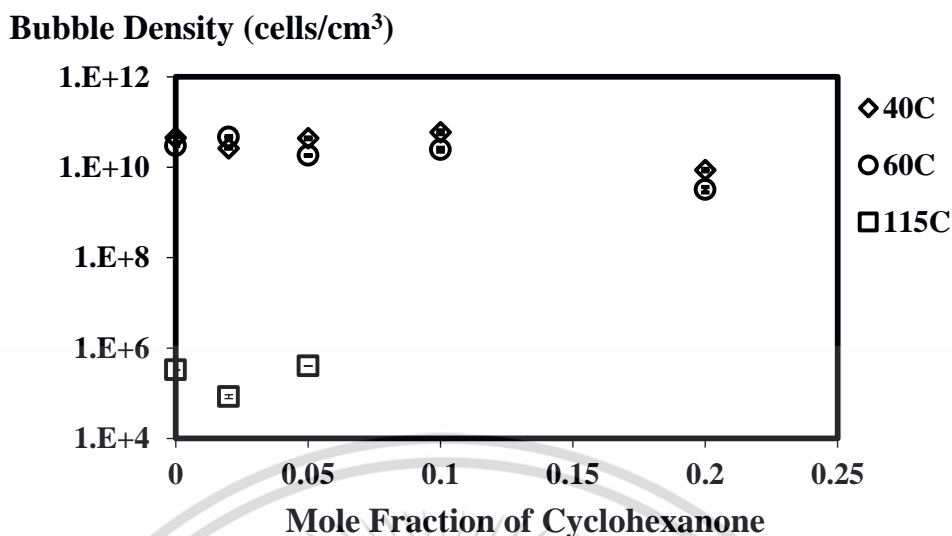


รูปที่ 4.31 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ความดันอิมพัลส์ 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min



รูปที่ 4.32 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อขนาดฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40, 60 และ 115 °C ความดันอิมพัลส์ 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟองที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C ความดันอิ่มตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min

เมื่อนำพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ที่มีสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.2 มาทำการทดสอบด้วย TGA แสดงดังรูปที่ 4.34 พบว่าพีวีซีเมื่อผ่านกระบวนการเกิดโฟมที่สภาวะดังกล่าวมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากไซโคลเฮกซาโนนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะของไหลเหนือวิกฤตร่วม แผนภาพวัฏภาคไอและของเหลวแสดงดังรูปที่ 2.8 สก๊อตเอาพลาสติไซเซอร์และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม [29] ดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ส่งผลให้โฟมที่ได้มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง โดยโฟมพีวีซีเกิดการสลายตัวทางความร้อนออกเป็น 3 ช่วง ประกอบด้วย

ช่วงที่หนึ่ง พีวีซีโฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวคือ 160 - 300 °C ซึ่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นพีวีซีที่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวคือ 210 - 320 °C เนื่องจากถูกสกัดสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนออกไปส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง

ช่วงที่สอง พีวีซีโฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวคือ 300 - 460 °C สำหรับแผ่นพีวีซีที่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวคือ 320 - 500 °C

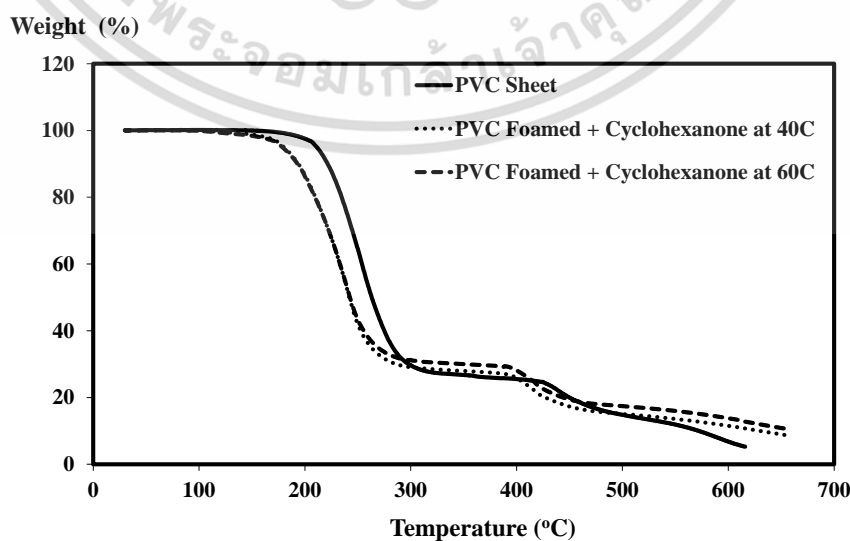
ช่วงที่สาม พีวีซีโฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวคือ ตั้งแต่ 460 °C เป็นต้นไป และสำหรับแผ่นพีวีซีที่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวคือ ตั้งแต่ 500 °C เป็นต้นไป

จากตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของการสลายตัวแต่ละช่วงของพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ที่สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนน 0.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์ของการสลายตัวแต่ละช่วงของพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C ที่สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนน 0.2 ตามลำดับ

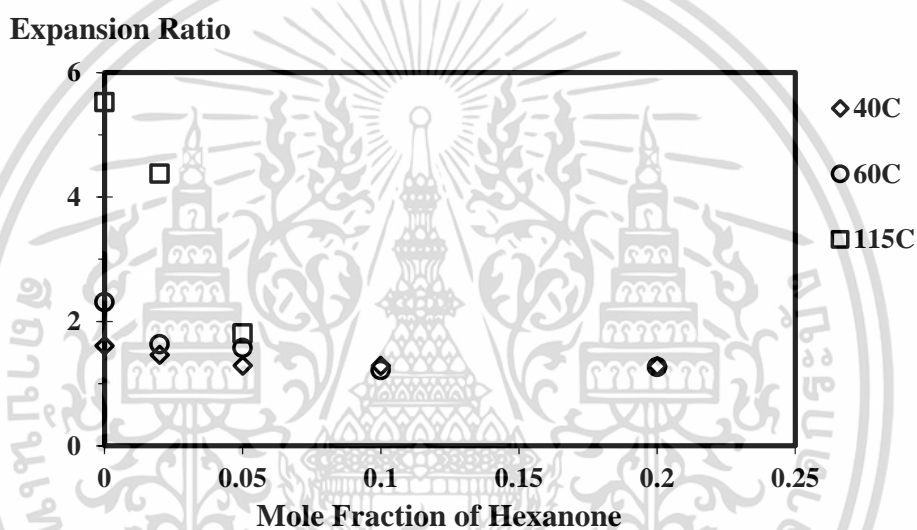
ชนิดพีวีซี	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของการสลายตัว (%)		
	ช่วงที่หนึ่ง	ช่วงที่สอง	ช่วงที่สาม
PVC Sheet	74	18	8
PVC Foamed+Cyclohexanone at 40 °C	73	13	14
PVC Foamed+Cyclohexanone at 60 °C	70	14	16

จากตารางที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมจาก 40 °C เป็น 60 °C ส่งผลให้พลาสติกไซเซอร์และสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อนถูกสกัดออกไปได้มากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ถึงปริมาณของสารที่ถูกสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤตร่วมพบว่าโฟมพีวีซีที่เตรียมจากอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C มีปริมาณสารที่ถูกสกัดออกไปประมาณ 2.70% และโฟมพีวีซีที่เตรียมจากอุณหภูมิเกิดโฟม 60 °C มีปริมาณสารที่ถูกสกัดออกไปประมาณ 5.41% ซึ่งสอดคล้องกับภาพไมโครกราฟรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของของไหลเหนือวิกฤตร่วมพบว่าพลาสติกไซเซอร์และสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อนถูกสกัดออกจากเมทริกซ์ของพีวีซีมากขึ้น ทำให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งนิวเคลียสจึงเกิดได้ยากทำให้ได้ฟองแก๊สขนาดเล็กและมีปริมาณฟองลดลง สำหรับที่อุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C ที่สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.1 และ 0.2 พบว่าเกิดการหลอมเหลวจนไม่สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมได้นั้นเนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟมสูงและสัดส่วนของไซโคลเฮกซาโนนมากทำให้พลาสติกไซเซอร์และสารเพิ่มความเสถียรภาพทางความร้อนถูกสกัดออกจากเมทริกซ์ได้มาก เป็นผลให้เมทริกซ์ทนความร้อนได้ต่ำจึงเกิดการหลอมเหลวเป็นฟิล์มใสขณะผ่านกระบวนการเกิดโฟม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.34 TGA เทอร์โมแกรมของแผ่นพีวีซีและโพลีพีวีซีที่สกัดด้วยโมลของไซโคลเฮกซาโนน 0.2 ที่สภาวะเกิดโพลีคือ อุณหภูมิเกิดโพลี 40 °C และ 60 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และ เวลาเกิดโพลี 30 min อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน เมื่อพิจารณาสัดส่วนการขยายตัวเมื่อมีการใช้ไซโคลเฮกซาโนนเป็นสารเกิดฟองร่วมกับ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตพบว่าสภาวะอุณหภูมิเกิดโพลี 40 °C และ 60 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดย โมลของไซโคลเฮกซาโนนจาก 0.02 ถึง 0.2 พบว่าสัดส่วนการขยายตัวลดลงและคงที่ประมาณ 1.28 เท่าดังรูปที่ 4.35 เมื่อสกัดด้วยโมลเป็น 0.1 สำหรับอุณหภูมิเกิดโพลี 115 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดย โมลพบว่าสัดส่วนการขยายตัวลดลงจาก 5.52 เท่า เป็น 1.81 เท่าเนื่องจากขนาดฟองที่เล็กลงอีกทั้ง เมทริกซ์ของพีวีซีมีความแข็งขึ้นจึงทำให้ฟองแก๊สแก๊สขยายตัวได้ยาก



รูปที่ 4.35 ผลของสัดส่วนโดยโมลต่างๆของไซโคลเฮกซาโนนที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวที่สภาวะ เกิดโพลีคือ อุณหภูมิเกิดโพลี 40 60 และ 115 °C ความดันอิมิตัว 170 bar และเวลา เกิดโพลี 30 min

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ตอนที่ 1

5.1 การศึกษาสภาวะเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

5.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโฟมสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 115 135 และ 145 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีพบว่า พีวีซีเกิดเป็นโฟมได้ง่ายและขยายตัวได้ดี ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C ได้ขนาดฟองใหญ่ที่สุดประมาณ 368.63 μm ความหนาแน่นฟองต่ำที่สุดประมาณ $1.10 \times 10^5 \text{ cell/cm}^3$ เป็นผลให้มีสัดส่วนการขยายตัวสูงที่สุดคือ 5.26 เท่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 135 °C และ 145 °C ได้ขนาดฟองเล็กประมาณ 163.55 μm และ 142.89 μm ตามลำดับ และมีความหนาแน่นฟองสูงประมาณ $2.75 \times 10^6 \text{ cell/cm}^3$ และ 5.58 cell/cm^3 ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าไอของพลาสติกไซเซอร์เกิดการระเหยออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟมเป็นผลให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งขึ้น ฟองแก๊สจึงขยายตัวได้ยากทำให้ได้ฟองแก๊สขนาดเล็กและมีความหนาแน่นฟองสูง สัดส่วนการขยายตัวต่ำและต่ำสุดที่ 1.51 เท่าที่อุณหภูมิเกิดโฟม 145 °C

5.1.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 80 °C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีพบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C และ 60 °C พีวีซีเกิดเป็นโฟมได้ยากเนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมดังกล่าว เมทริกซ์ของพีวีซีแข็ง สายโซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันแน่นและไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการเกิดโฟมจึงเกิดเป็นโฟมได้ยาก ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 80 °C พบว่าเกิดเป็นโฟมได้ง่ายขึ้นเนื่องจากสภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมดังกล่าวใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพีวีซี ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เริ่มเกิดการเคลื่อนที่และอยู่ห่างกันเป็นผลให้เมทริกซ์อ่อนตัวจึงเกิดเป็นโฟมได้ง่ายขึ้น

5.1.3 การศึกษาผลของเวลาเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพีวีซี

สภาวะเวลาเกิดโฟม 30 60 90 และ 120 min พบว่าเวลาเกิดโฟมนานขึ้นเป็นผลทำให้ฟองแก๊สสามารถขยายตัวได้ดี ขนาดฟองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ความหนาแน่นฟองและสัดส่วนการขยายตัวไม่แตกต่างกันมากนัก โดยพบว่าพีวีซีเกิดการอิมมัตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตอย่าง

สมบูรณ์ที่เวลาเกิดโฟม 30 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 การศึกษาผลของความดันอิมิตัวที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพรพิริซี

สภาวะความดันอิมิตัว 120 150 และ 170 bar ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพร 40 60 และ 80 °C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีริซีพบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพร 40 °C และ 60 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวจาก 120 bar ถึง 170 bar พบว่าสามารถเกิดเป็นโพรประเภทไมโครเซลลูลาร์ได้ การเพิ่มความดันอิมิตัวทำให้ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตละลายในพีริซีสูงขึ้น เป็นผลให้เกิดนิวเคลียสในปริมาณสูง ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพร 40 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวส่งผลให้ได้ขนาดฟองเล็กใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 2.47 - 2.72 μm ความหนาแน่นฟองสูงใกล้เคียงกันประมาณ 4.50×10^{10} cells/cm³ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพร 60 °C การเพิ่มความดันอิมิตัวมีผลทำให้ขนาดฟองเล็กลงจาก 12.41 μm เป็น 3.27 μm ความหนาแน่นฟองเพิ่มขึ้นจาก 2.70×10^8 cells/cm³ เป็น 3.00×10^{10} cells/cm³ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพร 80 °C ขนาดฟองเล็กจาก 139.03 μm เป็น 17.79 μm ความหนาแน่นฟองเพิ่มขึ้นจาก 3.09×10^5 cells/cm³ เป็น 2.0×10^8 cells/cm³ การเพิ่มความดันอิมิตัวส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวเพียงเล็กน้อย

ตอนที่ 2

5.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพรพีริซี

5.2.1 การศึกษาผลของปริมาณเฮกเซนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพรพีริซี

สัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนคือ 0.02 0.05 0.1 และ 0.2 พบว่าการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนส่งผลให้พลาสติกไซเซอร์ถูกสกัดออกมากขึ้น เป็นผลให้เมทริกซ์ของพีริซีแข็งขึ้นดังนั้นนิวเคลียสจึงเกิดได้ยากและขยายตัวได้ต่ำ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพร 40 °C ขนาดฟองเล็กลงจาก 2.72 μm เป็น 1.89 μm ความหนาแน่นฟองลดลงจาก 5.59×10^{10} cells/cm³ เป็น 8.89×10^9 cells/cm³ ที่อุณหภูมิเกิดโพร 60 °C ขนาดฟองลดลงจาก 3.27 μm เป็น 2.15 μm ความหนาแน่นฟองลดลงจาก 3.55×10^{10} cells/cm³ เป็น 1.47×10^{10} cells/cm³ สัดส่วนการขยายตัวลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพร 115 °C ขนาดฟองเล็กลง มีการกระจายตัวของขนาดฟองหลายขนาดเนื่องจากเกิดการรวมกันของสองฟองแก๊สขึ้นไปทำให้ความเป็นระเบียบของฟองแก๊สลดลงจึงทำให้มีสัดส่วนการขยายตัวสูงและสูงที่สุดคือ 9.31 เท่า

5.2.2 การศึกษาผลของปริมาณไซโคลเฮกซาโนนที่ใช้เป็นสารเกิดฟองร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพรพีริซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนคือ 0.02 0.05 0.1 และ 0.2 ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 115 °C การเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนส่งผลให้ความหนาแน่นโฟมสูงขึ้น ได้ขนาดฟองเล็กลงและความหนาแน่นฟองลดลง เมื่อศึกษาด้วย TGA พบว่าไซโคลเฮกซาโนนเป็นตัวทำละลายจะสกัดพลาสติกไซเซอร์และสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อนออกจากพีวีซีในระหว่างกระบวนการเกิดโฟมเป็นผลให้เมทริกซ์ของพีวีซีแข็งขึ้น ฟองแก๊สเกิดการขยายตัวได้ยาก ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลพบว่าขนาดฟองลดลงจาก 2.72 μm เป็น 1.20 μm แต่ความหนาแน่นฟองลดลงจาก 4.48×10^{10} cells/cm³ เป็น 8.69×10^9 cells/cm³ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 60 °C ขนาดฟองลดลงจาก 3.27 เป็น 1.50 ความหนาแน่นฟองลดลงจาก 3.00×10^{10} cell/cm³ เป็น 3.22×10^9 cell/cm³ ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 115 °C สัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.1 และ 0.2 พบว่าพีวีซีเกิดการหลอมเหลวไม่สามารถเกิดเป็นโฟมได้ เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์และสารเพิ่มความเสถียรภาพทางความร้อนถูกสกัดออกจากเมทริกซ์ของพีวีซีได้มาก ดังนั้นเมทริกซ์ของพีวีซีจึงมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลงดังนั้นจึงเกิดการหลอมเหลวเป็นฟิล์ม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมที่เตรียมจากสภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 60 และ 80 °C ความดันอัดตัว 170 bar เวลาเกิดโฟม 30 min เพื่อรองรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ

5.3.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลในการทำให้โฟมที่มีลักษณะเป็นเซลล์เปิดเพื่อเพิ่มการประยุกต์การใช้งานให้มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Yeh, J. Yang, N. Chiou, T. Daniel, L. Lee, "Introducing Water as a Coblowing Agent in the Carbon Dioxide Extrusion Foaming Process for Polystyrene Thermal Insulation Foams", **Polymer Engineer and Science**, Vol. 50, 2010, pp. 1577-1584.
- [2] N. Zhao, L. Mark, C. Zhu, B. Park, Q. Li, R. Glenn, T. Thompson, "Foaming Poly (vinyl alcohol)/Microfibrillated Cellulose Composites with CO₂ and Water as Co-blowing Agents", **Industrial & Engineer Chemistry Research**, Vol. 53, 2014, pp. 11962-11972.
- [3] H. Demir, M. Sipahiog˘lu, D. Balko˘se, S. U˘ lku, Effect of additives on flexible PVC foam formation, **J. materials processing technology**, Res. 195, 2008, 144-153
- [4] B.Y Yu, A. R Lee, S. YKwak, "Gelation/fusion behavior of PVC plastisol with a cyclodextrin derivative and an anti-migration plasticizer in flexible PVC", **J.European Polymer**, Res. 48, 2012, pp. 885–895.
- [5] L.C. Uitenham, and P.H Geil, "Processing, Morphology and Properties of PVC", **Journal of Macromolecul Science - Physics**, Vol.20, No. 4, 1981, pp. 593-622.
- [6] J.A Brydson, **Plastics Materials**, 5th ed., Anchor Press, London, 1989, pp. 291-341.
- [7] R. Symoneaux, S. Chollet, R. Bauduin, J.M. Le Quéré, A. Baron, "Impact of Apple Procyanidins on Sensory Perception in Model Cider (part 2): Degree of Polymerization and Interactions with the Matrix Components", **LWT - Food Science and Technology**, Vol. 57, 2014, pp. 28-34.
- [8] M. Chanda, and K.R. Salil, **Plastics Technology Handbook**. 3rd ed., Marcel Dekker, New York, 1998, pp. 310-320.
- [9] บริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์จำกัด มหาชน. คู่มือการใช้งานพีวีซีเรซิน (PVC Resin User Manual), 183 อาคารรัตนการ ชั้น 14 ถนนสาทรใต้ แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120.
- [10] P. Benjamin, "The Influence of the Extrusion Process on the Quality of Unplasticized Polyvinyl Chloride (UPVC) Pressure Pipe", **Journal of vinyl Technology**, 1980, Vol. 2, pp. 254-258.
- [11] C. McNeil, L. Memetea, J. Cole, "A Study of the Products of PVC Thermal Degradation", **Polymer Degradation and Stability**, 1995, Vol. 49, pp. 181-191.
- [12] E. Jesse, **Plastics Additive and Modifiers Handbook**, Van Nostrand Prinhold, New York, 1992, pp. 3-55.
- [13] W.V. Titow, **PVC Plastics: Properties, Processing and Application**, **Elsevier Applied Science**, New York, 1990, pp. 62-333.
- [14] J. Siepmann, O. Paeratakul, R. Bodmeier, "Modeling plasticizer uptake in aqueous polymer dispersions", **Int. J. Pharm.** Vol. 165, 1998, pp. 191–200.
- [15] S. T .Lee, Park, N. S. Ramesh, **Polymeric Foams Science and Technology**, United States of America : Taylor & Franics. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] D. Klemper and K. C. Frisch. **Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology**. New York : Hanser Publishers. 1991.
- [17] foamandform.com/technical-minutes/microcellular-foams [Internet]. Sherwood Technologies, Microcellular foam [update 2014 Jun 14]. Available from: <http://www.foamandform.com/technical-minutes/microcellular-foams>
- [18] S. Ning and S. Leung. "Mechanisms of cell Nucleation, growth, and coarsening in plastics foaming: theory, simulation, and experiment." Graduate Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 2009.
- [19] R. Pantani, V. Volpe, G. Titomanlio, "Foam injection molding of poly(lactic acid) with environmentally friendly physical blowing agents", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 214, 2014, pp. 3098–3107.
- [20] D. Eaves. **Handbook of Polymer Foams**. Crewe : The Printing House. 2004.
- [21] Z. Bin, Z. Weibin, Y. Jintao, Z. Cailiang, L. James, Layered-silicate based polystyrene nanocomposite microcellular foam using supercritical carbon dioxide as blowing agent, **J. Polymer .Res** 51, 2010, pp. 2177-2184.
- [22] M. F. Kemmere and T. Meyer. **Supercritical Carbon Dioxide**. Weinheim : WILEY-VCH. 2005.
- [23] S. T. Cui, H. D. Cochran, P. T. Cummings, "Vapor-Liquid Phase Coexistence of Alkane-Carbon Dioxide and Perfluoroalkane-Carbon Dioxide Mixtures", **Journal of Phys. Chem. B**, Vol. 103, 1999, pp. 4485-4491.
- [24] T. Merker, J. Vrabeck, H. Hasse, "Molecular simulation study on the solubility of Carbon Dioxide in mixtures of Cyclohexane + Cyclohexanone", **Fluid Phase Equilibria**, Vol. 315, 2012, pp. 77–83.
- [25] R. Gosselin and D. Rodrigue. "Cell Morphology Analysis of High Density Polymer Foams" **Polymer Testing**. Vol. 24. 2005. pp 1027-1035.
- [26] A. Marcilla and M. Beltran, "PVC-Plasticizer Interactions during the Thermal Decomposition of PVC Plasticsols. Influence of the Type of Plasticizer and Resin", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 53, 1996, pp. 261-268.
- [27] M. R. Holl, V. Kumar, M. Ma, R. Kwapisz. "The Effect of Additives on PVC Solid State Microcellular Foams". **ANTEC Proceedings, Plastics Saving Planet Earth**; April 27-May 2; Toronto: Society of Plastics Engineers; 1997.
- [28] V. Krongauz, T. K. Ling, F. Connell, " Measuring the concentration of phthalate plasticizers in poly(vinyl chloride)", **Society of Plastics Engineers, Plastics Research Online**.
- [29] Richard F. Grossman. **Handbook of vinyl formulating**. Wiley series on plastics engineering and technology.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

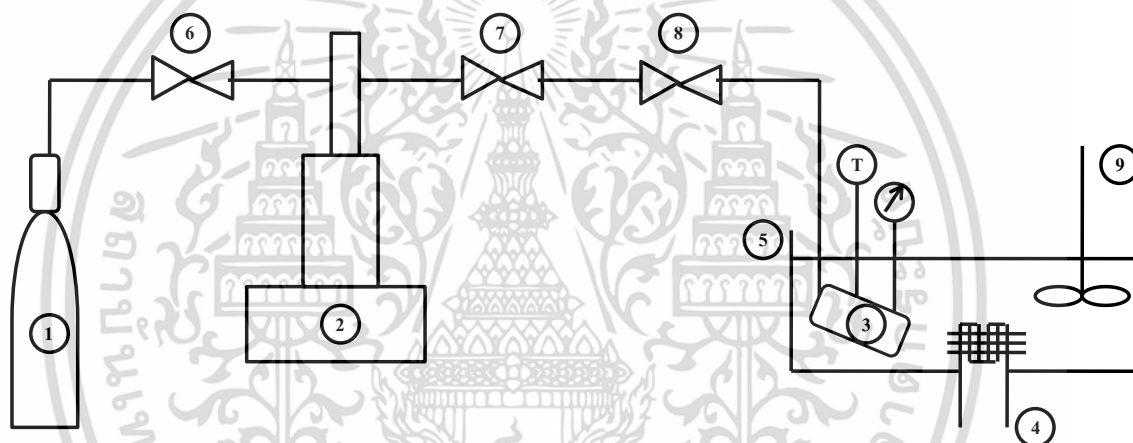
ภาคผนวก ก

กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

ก.1 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

1. กำหนดอุณหภูมิที่เครื่องกำเนิดความร้อนตามสภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมที่ทำการศึกษา พร้อมทั้งเปิดใบพัดเพื่อให้มีการกระจายความร้อนทั่วทั้งอ่างซิลิโคน

2. นำฟิวซีขนาด $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ จำนวน 3 ชิ้นบรรจุลงในตะแกรงลวด จากนั้นบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับปั๊มอัดแรงดันดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปฟิวซีโฟมแบบกะ

- | | |
|--|--------------------------|
| (1) ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ | (6) วาล์วตำแหน่งที่หนึ่ง |
| (2) ปั๊มอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D) | (7) วาล์วตำแหน่งที่สอง |
| (3) ถังปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง ปริมาตร 18 ml (Taiatsu Techno) | (8) วาล์วตำแหน่งที่สาม |
| (4) ขดลวดความร้อน | (9) เครื่องปั่นกวน |
| (5) อ่างน้ำมันซิลิโคน | |

3. ทำการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปั๊มแรงดันเข้าไปในถังปฏิกรณ์ทนแรงดันจนมีความดันประมาณ 200 psig และทิ้งไว้สักครู่ จากนั้นทำการไล่อากาศออกจากบริเวณท้ายของถังปฏิกรณ์ทนแรงดันโดยให้ความดันสุดท้ายมีมากกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อป้องกันอากาศไหลย้อนเข้ามาในถังปฏิกรณ์ทนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปอีกครั้งโดยกำหนดความดันของระบบตามสภาวะความดันอิมพัลส์ที่ศึกษา และเมื่ออุณหภูมิของอ่างซิลิโคนได้ตามที่กำหนด จึงนำถังปฏิกรณ์ทนแรงดันจุ่มลงในอ่างซิลิโคนและกำหนดเวลาตามสภาวะเวลาอิมพัลส์ที่ศึกษา

5. เมื่อครบกำหนดเวลาทำการปิดวาล์วตำแหน่งที่สองและสาม (หมายเลข (7) และ (8) ตามลำดับ) จากนั้นถอดถังปฏิกรณ์ทนแรงดันตั้งแต่วาล์วหมายเลข 3 หลังจากนั้นทำให้เกิดโฟมด้วยวิธีการลดความดันอย่างรวดเร็วจากความดันที่กำหนดมาด้วยความดันบรรยากาศด้วยการเปิดวาล์วหมายเลขสามเป็นเวลา 5 - 7 s

6. นำตัวอย่างโฟมพีวีซีที่ได้ไปทำวิเคราะห์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การหาความหนาแน่นโฟมด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น อิเล็กทรอนิกส์

เครื่องมือวัดความหนาแน่นโฟมแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยหลักการการแทนที่ในน้ำหรือหลักการของอาคิมิติส โดยมีวิธีการวัดดังนี้

1. ตั้งค่าจอแสดงผลของเครื่องวัดให้เป็นศูนย์ โดยกดปุ่ม "ZERO" ดังรูปที่ ค.1
2. ชั่งตัวอย่างโฟมพีวีซีในอากาศด้วยการวางตัวอย่างโฟมบริเวณด้านบนของตัวเครื่อง จากนั้นกด "MEMORY" เพื่อให้เครื่องทำการบันทึกค่าไว้
3. นำตัวอย่างโฟมพีวีซีจุ่มลงในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำและเมทานอลในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 โดยปริมาตร เพียงชั่วคราวเพื่อลดแรงตึงผิวของโฟมซึ่งจะทำให้เกิดฟองอากาศในขณะที่ชั่งในน้ำ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างโฟมพีวีซีในน้ำ (หากมีฟองอากาศเกาะติดอยู่ให้ทำการกำจัดออก) จากนั้นกดปุ่ม "MEMORY" อีกครั้ง เพื่อให้เครื่องทำการคำนวณค่าความหนาแน่นโฟมของโฟมพีวีซี
4. เครื่องซึ่งจะแสดงผลค่าความหนาแน่นในหน่วย g/cm^3 (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตรได้โดยการกดปุ่ม A)
5. นำตัวอย่างโฟมพีวีซีออกจากเครื่องวัด



รูปที่ ข.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter ; MD-200S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขั้นตอนการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเกิดโพลีเมอร์แบบกะมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ทำการบากตัวอย่างโพลีเมอร์ตามขวางบริเวณส่วนกลางของตัวอย่างเพื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ภายในภาคตัดขวาง
2. ทำการหักโพลีเมอร์โดยการแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 min เพื่อให้โพลีเมอร์มีความแข็งเปราะทำให้ง่ายต่อการหักและไม่ทำให้สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์เสียหาย
3. นำตัวอย่างโพลีเมอร์ที่ถูกหักแล้วมาเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเพื่อให้โพลีเมอร์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ ค.1
4. นำตัวอย่างโพลีเมอร์ที่ผ่านการเคลือบทองเข้าเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น MA10 เพื่อถ่ายภาพไมโครกราฟวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ ดังรูปที่ ค.2



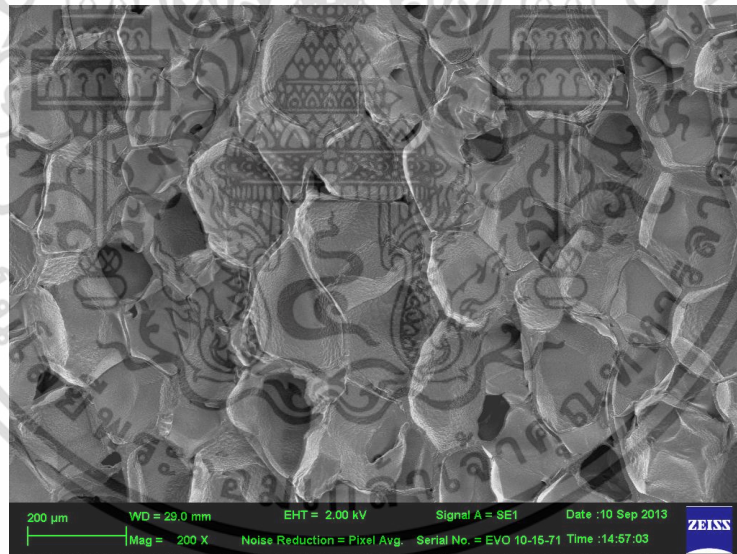
รูปที่ ค.1 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ ZEISS รุ่น MA10

5. ตัวอย่างไมโครกราฟที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 ตัวอย่างภาพไมโครกราฟของพีวีซีโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

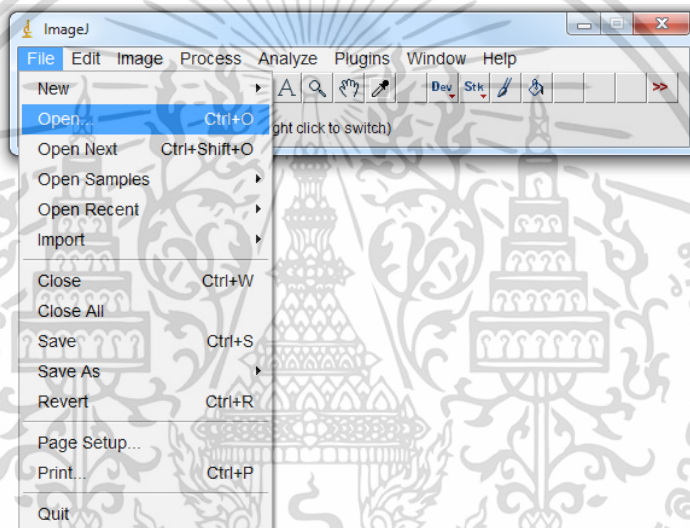
ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยโปรแกรม Image - J

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยโปรแกรม Image - J สามารถวิเคราะห์ขนาดฟองและความหนาแน่นฟอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

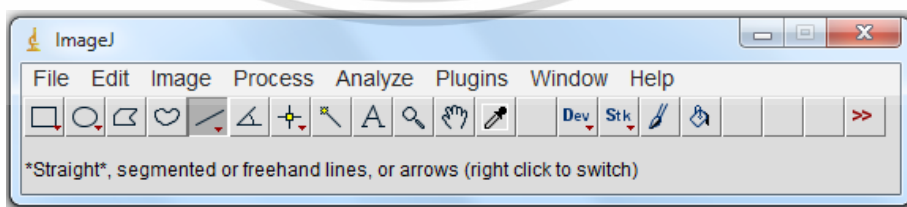
ง.1 การวิเคราะห์ขนาดฟอง

1. เลือกโปรแกรม Image - J จากนั้นเลือกเปิดภาพไมโครกราฟที่ต้องการโดยเลือกที่ "File" จากนั้นกด "Open" ดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 การเลือกเปิดภาพไมโครกราฟจากโปรแกรม Image - J

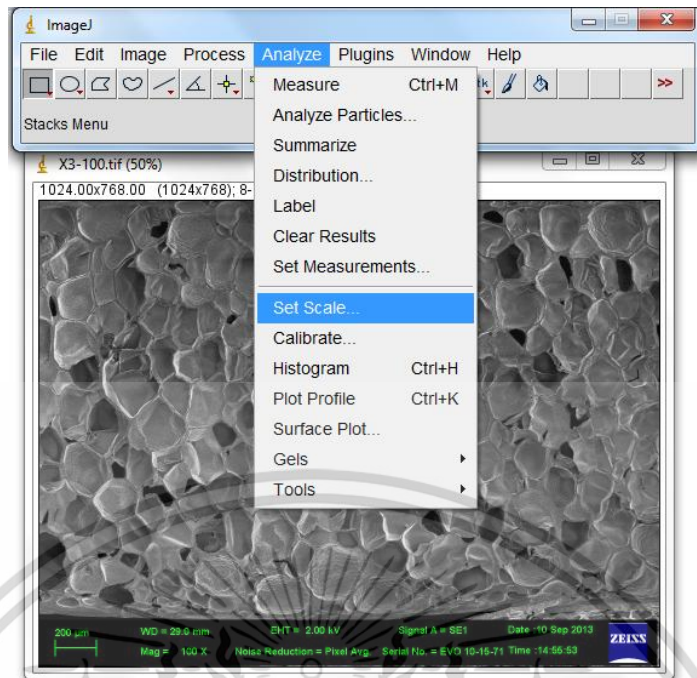
2. เลือกเครื่องมือเส้นตรง "Straight" บนแถบเครื่องมือจากนั้นวาดเส้นตรงให้มีความยาวเท่ากับเส้นแสดงหน่วยวัด (Scale Bar) ดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 การเลือกเครื่องมือเส้นตรงบนแถบเครื่องมือ

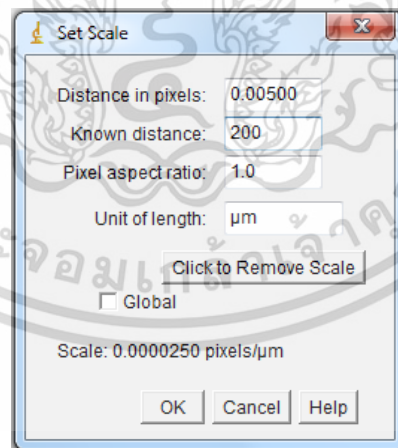
3. ทำการตั้งค่าหน่วยวัดโดยเลือก "Analyze" จากนั้นเลือก "Set Scale" ดังรูปที่ ง.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.3 การตั้งค่าหน่วยวัด

4. กรอกข้อมูลในช่อง "Know Distance" ตามข้อมูล Scale Bar ที่ระบุในภาพไมโครกราฟ และกรอกหน่วยความยาวในช่อง "Unit of Length" ตัวอย่างในที่นี้ทำการกรอกข้อมูลในช่อง Know Distance เป็น 200 และกรอกหน่วยความยาวในช่อง Unit of Length เป็น μm ดังรูปที่ ง.4



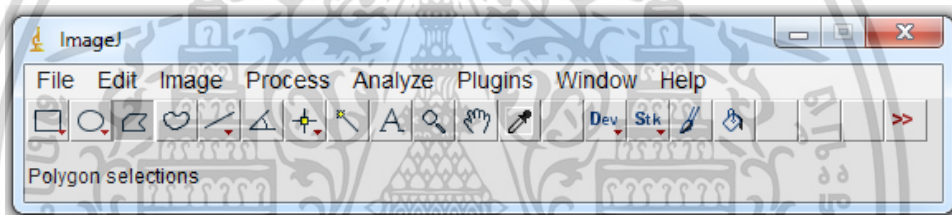
รูปที่ ง.4 การกรอกข้อมูลตั้งค่าหน่วยวัด

5. ทำการวัดขนาดฟองโดยการลากเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊สจากนั้นกด Ctrl+M เพื่อให้โปรแกรมทำการวัดขนาดและแสดงเป็นค่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

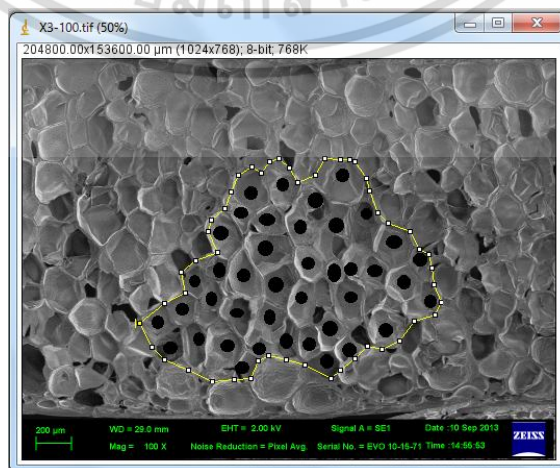
ง.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟอง

1. เลือกโปรแกรม Image - J จากนั้นเลือกเปิดภาพไมโครกราฟที่ต้องการโดยเลือกที่ "File" จากนั้นกด "Open" ดังรูปที่ ง.1
2. เลือกเครื่องมือเส้นตรงบนแถบเครื่องมือ จากนั้นวาดเส้นตรงให้มีความยาวเท่ากับเส้นแสดงหน่วยวัด (Scale Bar) ดังรูปที่ ง.2
3. ทำการตั้งค่าหน่วยวัดโดยเลือก "Analyze" จากนั้นเลือก "Set Scale" ดังรูปที่ ง.3
4. กรอกข้อมูลในช่อง "Know Distance" ตามข้อมูล Scale Bar ที่ระบุในภาพไมโครกราฟ และกรอกหน่วยความยาวในช่อง "Unit of Length" ตัวอย่างในที่นี้ทำการกรอกข้อมูลในช่อง Know Distance เป็น 200 และกรอกหน่วยความยาวในช่อง Unit of Length เป็น μm ดังรูปที่ ง.4
5. เลือกเครื่องมือที่ชื่อว่า "Polygon" ดังรูปที่ ง.5



รูปที่ ง.5 การเลือกเครื่องมือ "Polygon" บนแถบเครื่องมือ

6. ทำการวาดเส้นกำหนดขอบเขตของฟองแก๊สจากนั้นกด "Ctrl+m" เพื่อให้โปรแกรมคำนวณวัดขนาดของพื้นที่ในหน่วย cm^2 และทำการนับจำนวนฟองแก๊สในหน่วย cells ดังรูปที่ ง.6 ในที่นี้ขนาดของพื้นที่ที่วัดได้คือ $6.30 \times 10^9 \text{ cm}^2$ และจำนวนฟองที่นับได้คือ 42 cells จากนั้นนำค่าทั้งสองแทนลงในสมการ 2.3 ได้เป็นค่าความหนาแน่นฟอง



รูปที่ ง.6 การกำหนดขอบเขตในการหาพื้นที่และการนับจำนวนฟองแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้บุคคลภายนอกโดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพีวีซีด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry, DSC

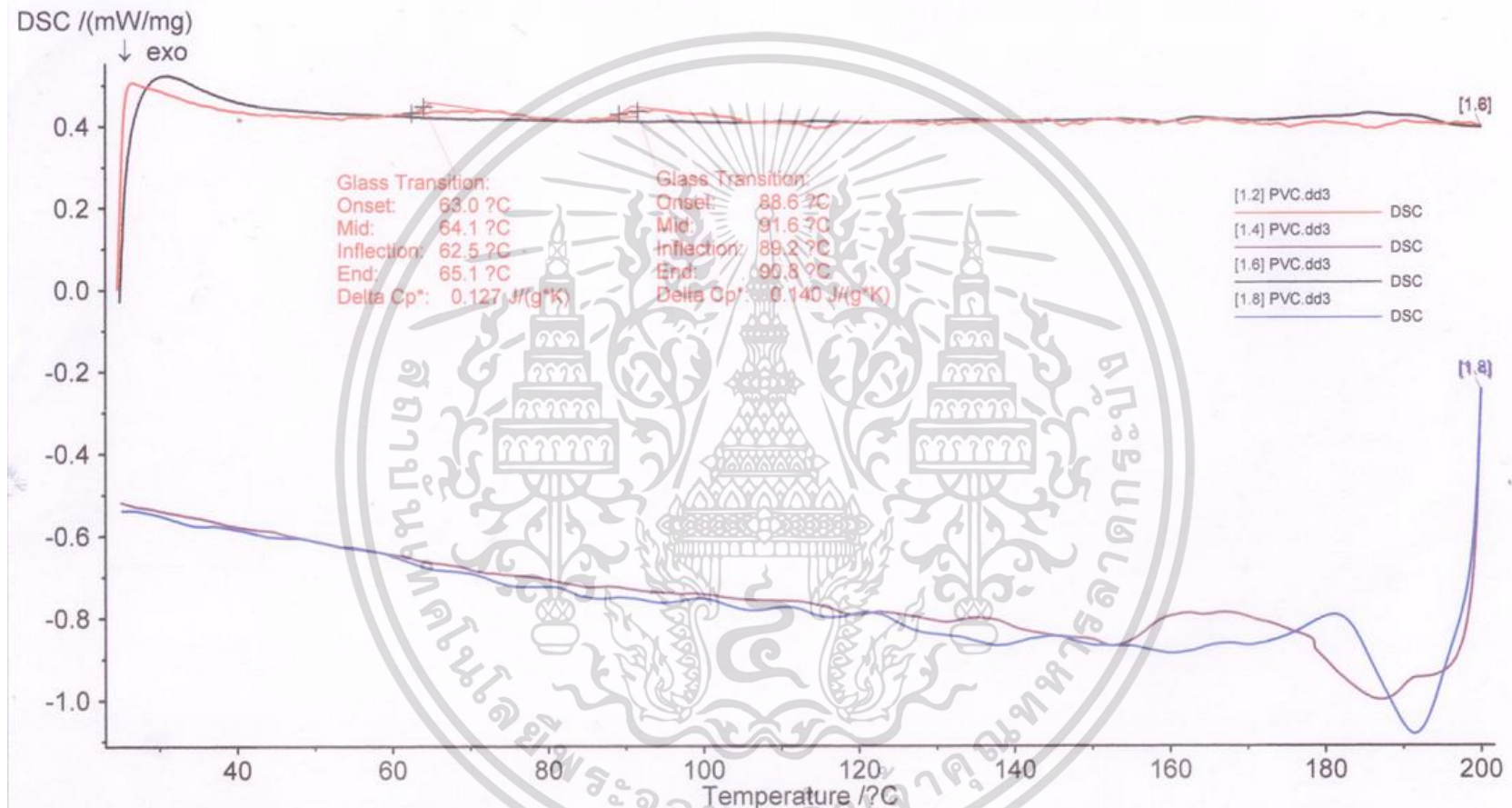
DSC เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิงซึ่งเป็นจานอะลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่าง ภายใต้สภาวะเดียวกัน

ความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบ

1. วิเคราะห์จุดหลอมเหลว (Melting points)
2. วิเคราะห์ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
3. วิเคราะห์ค่าพลศาสตร์ (Kinetics)
4. วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของวัสดุ (Purity of materials)
5. วิเคราะห์ความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal stability)
6. วิเคราะห์การเปลี่ยนสถานะ (Phase transition)
7. วิเคราะห์สภาพเป็นผลึก (Crystallinity)
8. วิเคราะห์สารที่มีหลายโครงสร้าง (Polymorphism)
9. การดูด หรือคายพลังงาน (Desorption/Adsorption)
10. การระเหย (Vaporization)

ผลของการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพีวีซีชนิดยืดหยุ่นด้วยเครื่อง DSC แสดงดังรูปที่

จ.1

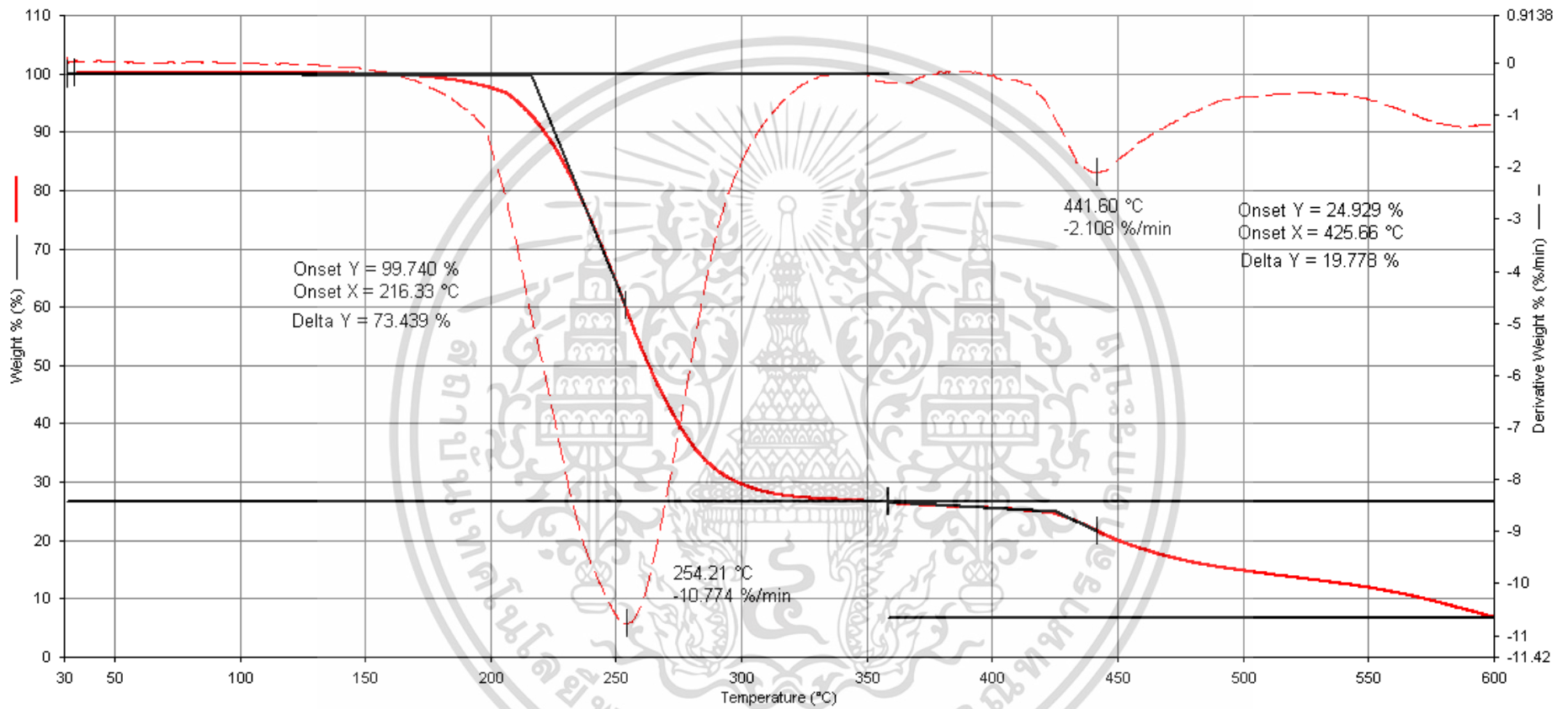


รูปที่ จ.1 DSC ของพีวีซีช่วงอุณหภูมิ 25 - 200 °C ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน

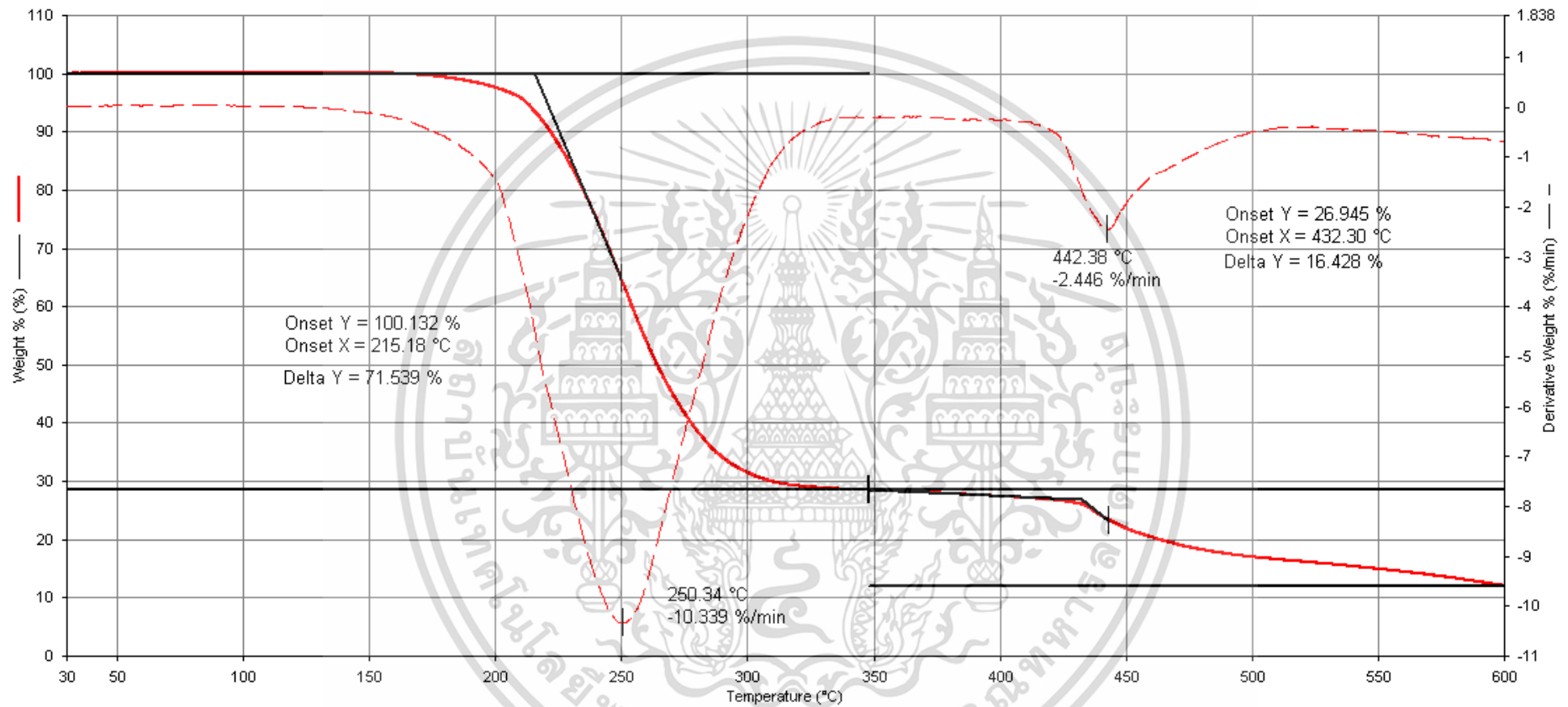
ภาคผนวก ฉ

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพีวีซีและโพลีพีวีซีด้วย เครื่อง Thermogravimetric Analysis, TGA

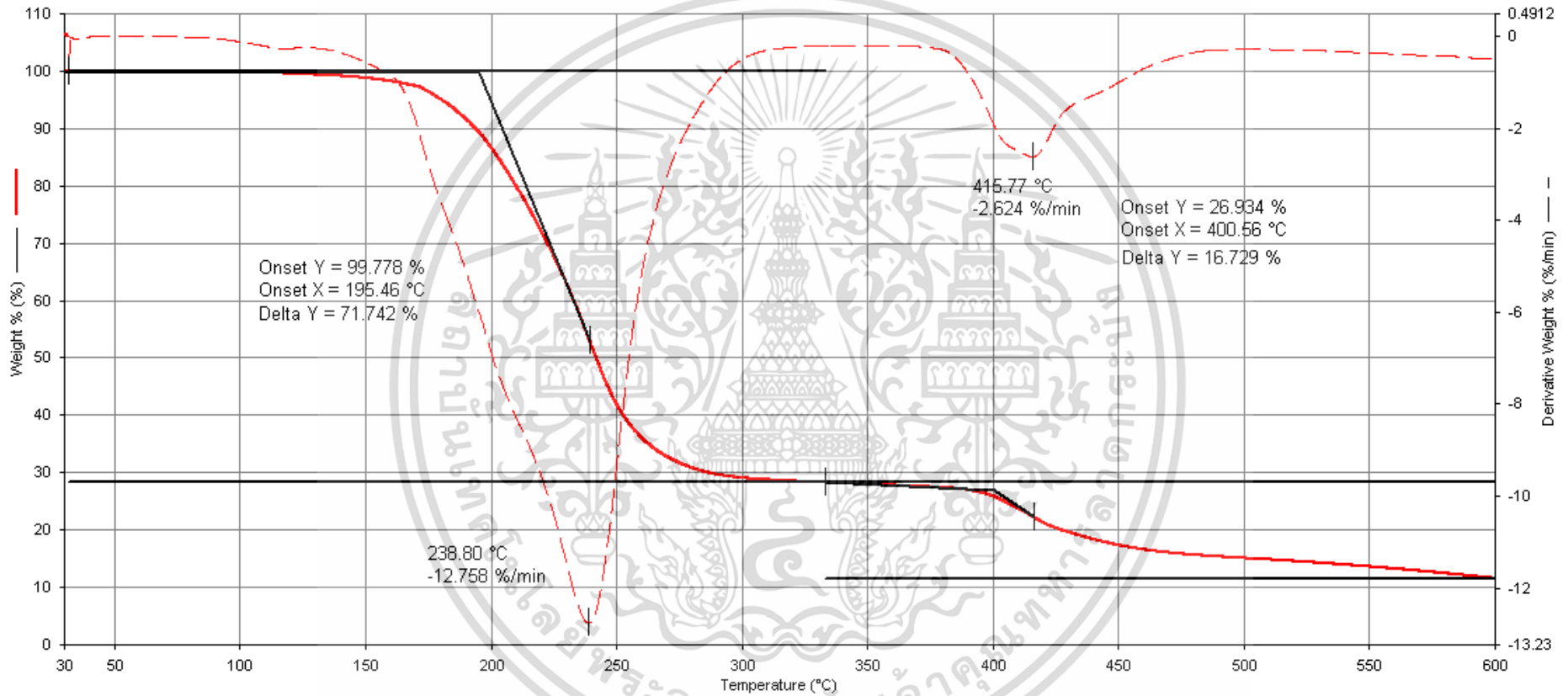
TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ สำหรับข้อมูลการสลายตัวทางความร้อนของพีวีซีและโพลีพีวีซีที่สภาวะเกิดโพลีเมอร์ต่างๆในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ ฉ.1 ถึง ฉ.5



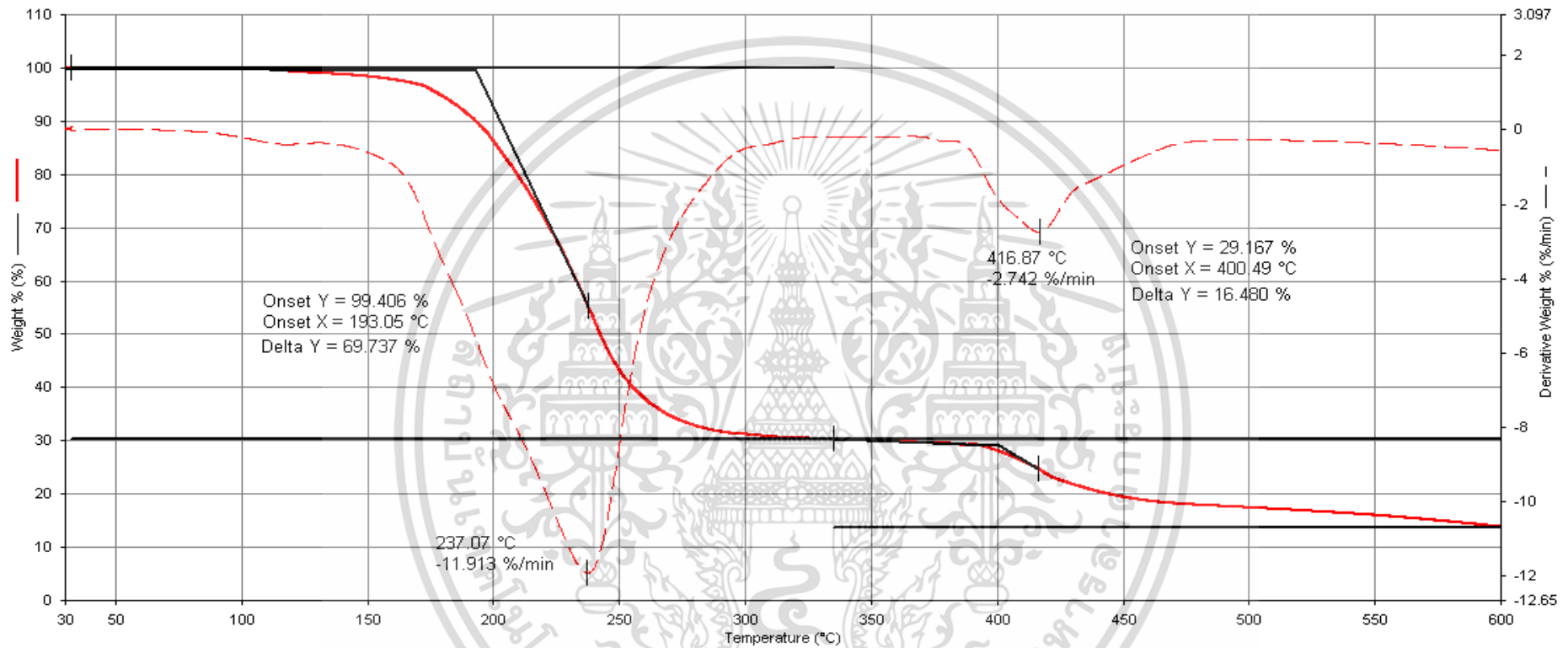
รูปที่ ๑.1 TGA curve ของแผ่นพีวีซีที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สถานะแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ ๑.2 TGA curve ของโพลีอีพอกซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C ความดันอิมตัว 120 bar และเวลาเกิดโฟม 120 min อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน



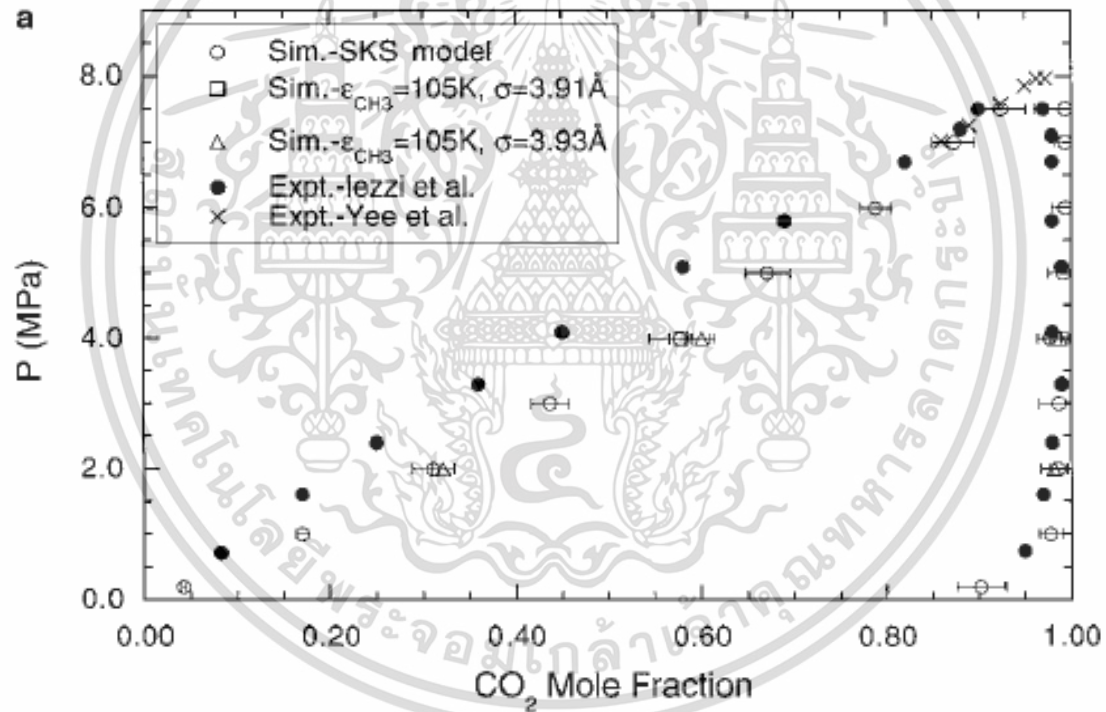
รูปที่ ๑.4 TGA curve ของแผ่นพีวีซีและโพลีพีวีซีที่สัดส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนคลอไรด์เป็น 0.2 ที่สภาวะเกิดโพลีคือ อุณหภูมิเกิดโพลี 40 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโพลี 30 min อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน



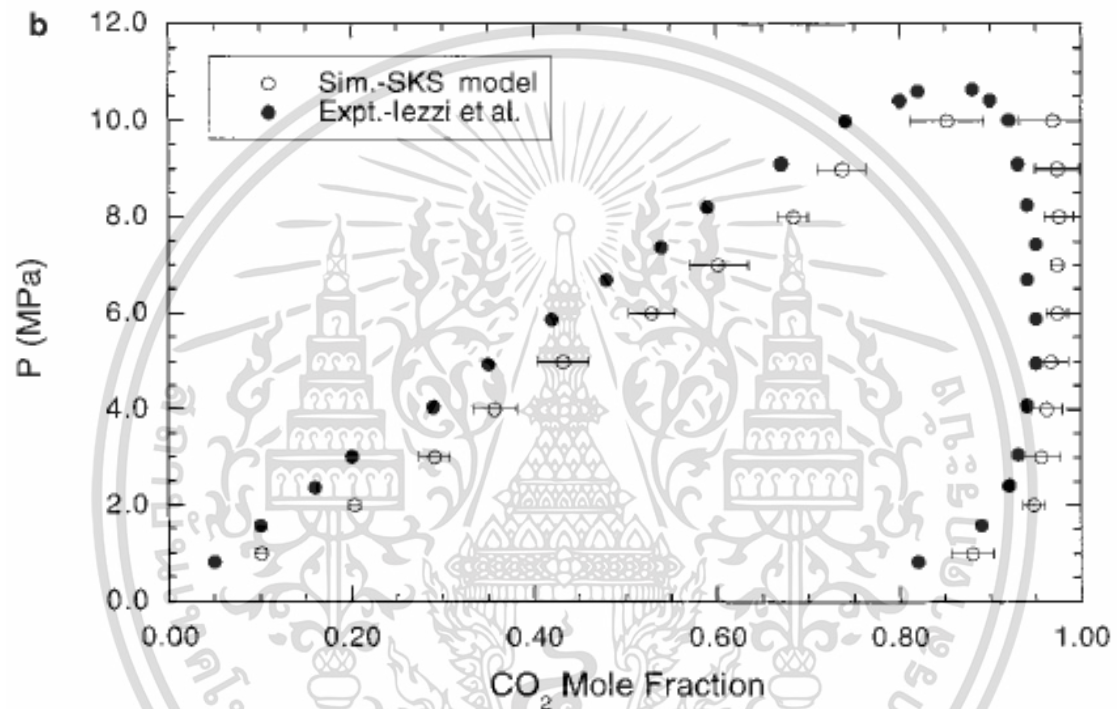
รูปที่ ๑.5 TGA curve ของแผ่นพีวีซีและโฟมพีวีซีที่สกัดส่วนโดยโมลของไซโคลเฮกซาโนนเป็น 0.2 ที่สภาวะเกิดโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟม 60 °C ความดันอิมตัว 170 bar และเวลาเกิดโฟม 30 min อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

ภาคผนวก ข

แผนผังวิภูภาคไอ - ของเหลวของของผสมระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์

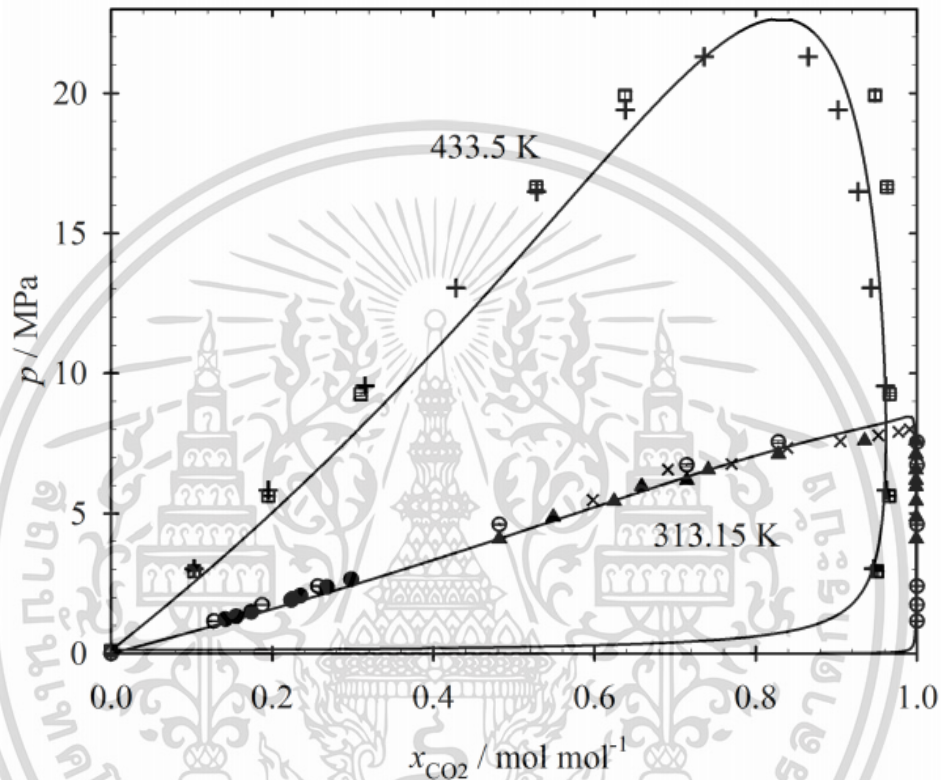


รูปที่ ข.1 แผนภาพวิภูภาคไอ - ของเหลวระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C สัญลักษณ์วงกลมทึบคือข้อมูลจากการทดลองของ lezzi และคณะ สัญลักษณ์กากบาทคือข้อมูลจากการทดลองของ Yee และคณะ สัญลักษณ์โปร่งคือข้อมูลจากการใช้ SKS model [23]



รูปที่ ข.2 แผนภาพวัฏภาคไอ - ของเหลวระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 °C สัญลักษณ์วงกลมทึบคือข้อมูลจากการทดลองของ lezzi และคณะ สัญลักษณ์วงกลมโปร่งคือข้อมูลจากการใช้ SKS model [23]

ภาคผนวก ซ
 แผนผังวัฏภาคไอ - ของเหลว
 ระหว่างไซโคลเฮกซานอนและคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ ซ.1 แผนภาพวัฏภาคไอ - ของเหลวระหว่างไซโคลเฮกซานอนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C และ 160 °C โดยที่ สัญลักษณ์ + คือข้อมูลการทดลองของ Laugier และ Richon, สัญลักษณ์ x คือ ข้อมูลการทดลองของ Esmelindro และคณะ สัญลักษณ์ ▲ คือข้อมูลการทดลองของ Feng และคณะ สัญลักษณ์ ● คือข้อมูลการทดลองของ Merker และคณะ สัญลักษณ์เส้นตรงคือข้อมูลจากการใช้สมการ Peng-Robinson EOS โดยใช้ค่า $k_{ij} = 0.0325$ [24]

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์
 วันเดือนปีเกิด 14 กันยายน 2531
 ที่อยู่ 862 หมู่ 1 ตำบลเมืองพาน อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120
 อีเมล varintorn686@gmail.com

ประวัติการศึกษา

2554 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ในการทำงาน

พ.ศ. 2553 ฝึกงานที่บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) (IRPC) สังกัดแผนก LUBE DISTILLATION & ASPHAL SECTION (แผนกกลั่นแยกน้ำมันหล่อลื่นและผลิตยางมะตอย) ระยะเวลาการฝึกงานระหว่างวันที่ 23 มีนาคม ถึง 27 พฤษภาคม 2553

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

พ.ศ. 2556 งานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 "ก้าวเข้าสู่ยุคใหม่แห่งการจัดการพลังงานทางเลือกและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน" ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น ระหว่างวันที่ 17 - 18 ตุลาคม 2556 ในหัวข้อเรื่อง "การศึกษาความเป็นโพลีเมอร์ของพอลิไวนิลคลอไรด์โพลีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต"

พ.ศ. 2557 วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์ ณิชพงศ์ เชื้อพล ปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ และ สุรัตน์ อารีรัตน์ "การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โพลีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง" วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 31 ฉบับที่ 3 กันยายน 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์
 วันเดือนปีเกิด 14 กันยายน 2531
 อีเมล varintorn686@gmail.com

ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปีที่สำเร็จการศึกษา	ชื่อสถาบันศึกษา
วท.บ. สาขาเคมีอุตสาหกรรม	2554	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ในการทำงาน

- ฝึกงานที่บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) (IRPC) สังกัดแผนก LUBE DISTILLATION & ASPHAL SECTION (แผนกกลั่นแยกน้ำมันหล่อลื่นและผลิตยางมะตอย) ระยะเวลาในการฝึกงาน ตั้งแต่วันที่ 23 มีนาคม 2553 ถึง วันที่ 27 พฤษภาคม 2553

ผลงานวิชาการ

- งานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 "ก้าวเข้าสู่ยุคใหม่แห่งการจัดการพลังงานทางเลือกและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน" ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น ระหว่างวันที่ 17 - 18 ตุลาคม 2556 ในหัวข้อเรื่อง "การศึกษาความเป็นพิษของพอลิไวนิลคลอไรด์โพลีเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต"
- วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์ ณิชพงษ์ เชื้อพล ปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ และ สุรัตน์ อารีรัตน์ "การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โพลีเมอร์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง" วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 31 ฉบับที่ 3 กันยายน 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้