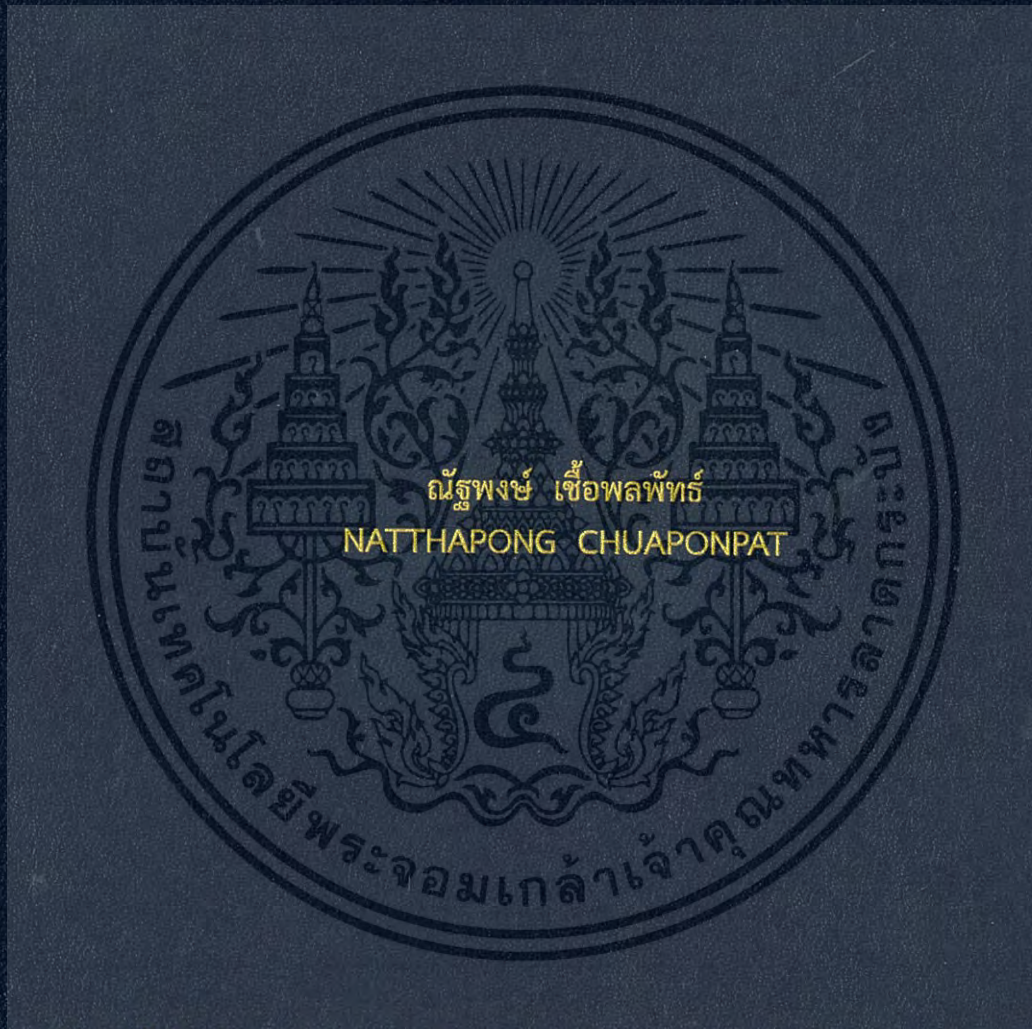


ผลของปัจจัยและสภาวะการขึ้นรูปโฟม
ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์

EFFECTS OF FOAMING PARAMETERS AND CONDITIONS
ON POLYMERIC FOAM MORPHOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-D-228-174

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของปัจจัยและสภาวะการขึ้นรูปโฟม
ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์

EFFECTS OF FOAMING PARAMETERS AND CONDITIONS
ON POLYMERIC FOAM MORPHOLOGY



T148707



ณัฐพงษ์ เชื้อพลพัทธ์

NATTHAPONG CHUAPONPAT

เลขหมู่ 148707
เลขทะเบียน
ในเดือนปี 14 พ.ย. 2560

b. 00267453
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF FOAMING PARAMETERS AND CONDITIONS
ON POLYMERIC FOAM MORPHOLOGY



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

2017

KMITL-2017-EN-D-228-174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017





FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของปัจจัยและสภาวะการขึ้นรูปโฟมต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์
Thesis Title Effects of Foaming Parameters and Conditions on Polymeric Foam Morphology
นักศึกษา นายณัฐพงษ์ เชื้อพลพัทธ์
รหัสประจำตัว 54610302
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-D-228-174

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมหมาย	ผิวสะอาด	
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสร์ณ	
ดร.นริศรา	ทองบุญชู	
รศ.ดร.อัญชสิทธิ์	วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ	
ผศ.ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.30-17.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร CCA ชั้น 4 ห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์** ระบุขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 นี้ที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของปัจจัยและสภาวะการขึ้นรูปโฟมต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์
นักศึกษา	นายณัฐพงษ์ เชื้อพลพัทธ์
รหัสนักศึกษา	54610302
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยและสภาวะการขึ้นรูปโฟมของพอลิเมอร์สองชนิด คือพอลิเมอร์กิ่งผลึกคือไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน และพอลิเมอร์อสัณฐานคือพอลิไวนิลคลอไรด์ สำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเน้นศึกษาสภาพการเป็นผลึกที่ส่งผลต่อเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน งานวิจัยนี้นำข้อมูลสมบัติเชิงความร้อนของทั้งเส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดีพีเอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) มาประยุกต์ใช้กับหลักการของ Avrami แบบอนุกรมมิกซ์ที่ เพื่อวิเคราะห์จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก งานวิจัยเริ่มต้นที่การนำเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ที่มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกเท่ากับ 0.35 เข้ากระบวนการทำเส้นใยที่มีขนาดหัวตาย 900 ไมโครเมตร อนุกรมหัวตาย 190 200 และ 210 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วของรอบเกียร์ปัม 12.5 15 และ 20 รอบ/นาที ผลการทดลองพบว่า เส้นใยพอลิโพรพิลีนมีดีกรีสภาพการเป็นผลึกเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 0.40 จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการเกิดโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ความดันเกิดโฟม 120 บาร์ อนุกรมเกิดโฟม 165 170 และ 175 องศาเซลเซียส เวลาของการละลาย 30 นาที การทดลองพบว่า เส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนมีขนาดฟองโดยเฉลี่ยประมาณ 5 ไมโครเมตร มีสัดส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 1.0 เป็น 1.2 เส้นใยโฟมที่ได้มีดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก 1.1 – 2.3 ซึ่งมีความเบี่ยงเบนออกจากความเป็นโฟมไอโซโทรปิก เส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนมีการขยายตัวตามแนวยาว (1.03 เท่า) มากกว่าการขยายตัวตามแนวรัศมี (1.00 เท่า) ทั้งนี้เส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนมีดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงร้อยละ 10 เส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนมีสภาพการเป็นผลึกที่ดีกว่า คือมีอนุกรมสภาพการเป็นผลึกอยู่ในช่วง 8 - 9 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอนุกรมที่ต่ำกว่าช่วงอนุกรมสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยพอลิโพรพิลีนคือ 9 - 10 องศาเซลเซียส ในขณะที่เส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนใช้เวลาสภาพการเป็นผลึก 0.8 - 1.0 นาที ซึ่งเร็วกว่าในกรณีของเส้นใยพอลิโพรพิลีน ที่ใช้เวลาสภาพการเป็นผลึก 0.8 - 1.1 นาที จากนั้นเตรียมเส้นใยในขั้นตอนที่ 2 เพื่อศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน โดยกำหนดให้ความเร็วของรอบเกียร์ปัมเท่ากับ 10 15 และ 20 รอบ/นาที อนุกรมหัวตายคงที่ 190 องศาเซลเซียส แล้วนำเส้นใยมาขึ้นรูปโฟมที่อนุกรมเกิดโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงที่ 150 องศาเซลเซียส ความดันเกิดโคม 120 150 และ 170 บาร์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ผลการทดลองพบว่าความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้พองมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10 เป็น 120 ไมโครเมตร การขยายตัวสูงขึ้นจากเดิม 1.0 เป็น 2.0 การทำเส้นใยโคมพอลิโพรพิลีนทำให้ดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับเส้นใยพอลิโพรพิลีน จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัณฐานวิทยาของโคมด้วยสัดส่วนช่องว่างและจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก โดยพบว่าสัดส่วนช่องว่างที่มีค่าเข้าใกล้ 1.0 ทำให้ดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงร้อยละ 10 แต่อัตราสภาพการเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเพียงร้อยละ 5 - 10 เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย WAXD (Wide-Angle X-Ray Diffraction) พบว่าทั้งเส้นใยและเส้นใยโคมพอลิโพรพิลีนแสดงตำแหน่งพีคตำแหน่งเดียวกัน นั้นหมายถึงโครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณผลึกของเส้นใยโคมพอลิโพรพิลีนลดลง ในขณะที่การนอร์มอลไลซ์ความเข้มรังสีเอกซ์เรย์ด้วยความหนาแน่น เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากโครงสร้างโคม พบว่าพื้นที่ใต้กราฟหรือดีกรีสภาพการเป็นผลึกมีปริมาณผลึกลดลงเพียงเล็กน้อย ตามการเพิ่มขึ้นของความดัน จากทั้งสองหัวข้อนี้สรุปได้ว่า การเกิดโคมของเส้นใยพอลิโพรพิลีนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เกิดเร็วกว่าการเกิดสภาพการเป็นผลึก เมื่อศึกษาการเกิดโคมด้วยพอลิเมอร์อสัณฐานหรือพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ผลการทดลองพบว่าโคมพอลิไวนิลคลอไรด์มีขนาดพองเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดันเกิดโคม 120 บาร์ แต่ขนาดพองเพิ่มขึ้นในช่วง 5 - 20 ไมโครเมตร เมื่อความดันเกิดโคมเป็น 150 และ 170 บาร์ ผนังพองบาง จึงส่งผลให้ร้อยละการหดตัวมีมากกว่าร้อยละ 50 แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวพบว่า การเพิ่มเวลาในการแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจาก 6 10 เป็น 12 ชั่วโมง ทำให้ความหนาแน่นพองเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 แต่ขนาดพองลดลงร้อยละ 10 เมื่ออุณหภูมิเกิดโคมเพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สัณฐานวิทยาของโคมพอลิไวนิลคลอไรด์คือ ผนังพองหนา และมีโครงสร้างแบบไบโมดอล ดังนั้นจึงส่งผลให้มีร้อยละการหดตัวน้อยกว่าร้อยละ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effects of foaming parameters and conditions on polymeric foam morphology
Student	Mr. Natthapong Chuaponpat
Student ID.	54610302
Degree	Doctoral of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

ABSTRACT

The effects of foaming parameters and conditions on polymeric foam morphology of semicrystalline, i.e., isotactic polypropylene (iPP) and amorphous polymer, i.e., poly(vinyl chloride) (PVC) were studied. iPP is semicrystalline polymer and was used to investigate the effect of crystallization on PP filament foam. Thermal data from DSC (Differential Scanning Calorimeter) of PP filament and its foam was characterized by Avrami equation to investigate isothermal crystallization kinetic. PP pellets were extruded into filament by die diameter of 900 micrometer at die temperature of 190, 200, and 210 °C, and gear pump speed of 12.5, 15 and 20 rpm. iPP pellet obtained 0.35 degree of crystallinity after extruding into filament form, and an average degree of crystallinity of iPP filament foam increased up to 0.40. Then, iPP filaments were foamed by using supercritical carbon dioxide (scCO₂) at 120 bar, 165, 170 and 175 °C and dissolution time of 30 minutes. Average bubble size of iPP filament foams was 5 micrometer and its expansion ratio increased from 1.0 to 1.2. Isotropic foam index of iPP filament foam samples were in the range of 1.1 – 2.3 that means these foam are non-isotropic foam. iPP filament foam favored to expand in longitudinal expansion with expansion ratio of 1.03 than radial expansion with expansion ratio of 1.00. Degree of crystallinity of iPP filament foam decreased about 10%. Crystallization time and temperature of iPP filament foam were in the range of 0.8 - 1.0 minutes and 8 - 9 °C, respectively while crystallization time and temperature of iPP filament were in the range of 0.8 - 1.1 minutes and 9 - 10 °C. To observe effect of solubility of scCO₂ on iPP foam filament morphology on the section 2, iPP pellets were extruded into filament form at gear pump speed of 10, 15, and 20 rpm and die temperature of 190 °C. iPP filament was then soaked with scCO₂ at 120,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

150, 170 bar for 30 minutes, and activated to iPP filament foam at 150 °C. Bubble size of iPP filament foam increased from 10 to 120 micrometer, and the expansion ratio increased from 1.0 to 2.0 as foaming pressure increased. Due to foam formation, degree of crystallinity of iPP filament foam decreased about 10% from iPP filament. Void fraction is represented the iPP filament foam morphology to correlate foam morphology with crystallization kinetics. At high void fraction closed to 1.0, the degree of crystallinity decreased by 10% while the crystallization rate only decreased by 5 – 10%. To observe crystalline structure, iPP filament and its foam were characterized by WAXD (Wide-Angle X-Ray Diffraction). It was found that both iPP filament and its foam had characteristic peaks at the same position, suggesting similar crystalline structure but decreased in degree of crystallinity. To avoid an error from foam structure, intensity of X-ray beam was normalized by density. The result showed that area under the peak, which represented degree of crystallinity, slightly decreased as foaming pressure increased. From these two sections, it can be concluded that foam formation of iPP filament by using scCO₂ occurred faster than crystallization formation. Finally, supercritical and liquid carbon dioxide were employed as physical blowing agents of amorphous polymer, PVC. Bubble size of PVC foam drastically increased from 5 to 100 micrometer at 80 °C and 120 bar while its size only increased from 5 to 20 micrometer at foaming pressure of 150 and 170 bar. PVC foam structure attained thin wall thus degree of shrinkage is more than 50%. On the other hand, for foaming conditions by using liquid carbon dioxide, increase diffusion and dissolution time from 6, 10, and 12 h resulted in 10% increase of bubble density but only 10% decrease in bubble size as the foaming temperature was increased from 70, 80 and 90 °C. The PVC foam morphology consisted of thick wall and bimodal foam structure, thus less than 10% degree of shrinkage.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จได้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบความรู้ คำแนะนำและกรุณาอบรมสั่งสอน อีกทั้งประสบการณ์ในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยโพลีเอททีลีน จำกัด และบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) ในกลุ่มธุรกิจเคมีภัณฑ์ในเครือของบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ที่สำหรับสนับสนุนเงินทุนและวัสดุในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนวิจัย JSPS จากประเทศญี่ปุ่นและขอบคุณ Prof. Hiroshi Ito จาก Yamagata University, Yonezawa Campus, Yamagata, Japan ที่ให้การสนับสนุนและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ให้อุปการะคุณ ส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีการศึกษา ข้าพเจ้านำความรู้ความสามารถที่ได้ศึกษาไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมอย่างสุดความสามารถ และมีสิ่งที่จะตอบแทนพระคุณทุกท่าน

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบที่ให้คำแนะนำและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์นี้มีเนื้อหาสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ครู อาจารย์ทุกท่าน และผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามที่อบรมสั่งสอนและได้มอบความรู้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ ดลบันดาลให้ทุกท่านมีแต่ความสุขและความเจริญยิ่งขึ้นไป

หากเกิดความผิดพลาดใด ในงานวิจัย ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้ และข้าพเจ้ายินดีน้อมรับข้อมูลอันจะมีประโยชน์จากผู้สนใจ คุณประโยชน์อันใดอันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐพงษ์ เชื้อพลพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XI

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 แนวคิดในการศึกษา	2
1.3 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
1.5 ผลที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 โฟม	4
2.1.1 หลักการของการเกิดโฟม	5
2.1.1.1 การเกิดฟองแก๊ส	5
2.1.1.2 การเติบโตฟองแก๊ส	7
2.1.1.3 การคงสภาพของฟองแก๊ส	8
2.1.2 กระบวนการเกิดโฟม	9
2.1.3 สารทำฟู	10
2.2 โฟมพอลิเมอร์คอมโพสิต	12
2.3 โฟมพอลิเมอร์ปิดส	13
2.3.1 ความจุความร้อน	14
2.4 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	15
2.5 ปรากฏการณ์ส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์	17
2.5.1 การแพร่	17
2.5.2 การซึมผ่าน	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 การละลาย.....	19
2.6 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก	22
2.7 สัณฐานวิทยาของโพลี.....	24
2.7.1 ความหนาแน่นฟอง.....	24
2.7.1.1 การกำหนดพื้นที่ผิว.....	25
2.7.1.2 การกำหนดจำนวนฟอง.....	25
2.7.2 สัดส่วนการขยายตัว.....	26
2.7.3 ดัชนีความเป็นโพลีไอโซโทรปิก.....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.9 งานวิจัยและองค์ความรู้ที่ผ่านมา.....	38
2.9.1 สัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีน.....	38
2.9.2 สัณฐานวิทยาของโพลีโพรพิลีน.....	40
2.9.3 สัณฐานวิทยาของโพลีโพรพิลีนบีดส์.....	41
บทที่ 3 การทดลอง.....	43
3.1 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพลีโพรพิลีนขั้นตอนที่ 1.....	43
3.1.1 การเตรียมเส้นใยโพลีโพรพิลีน.....	43
3.1.2 กระบวนการเกิดโพลีแบบกะ.....	43
3.1.3 การวิเคราะห์เชิงความร้อน.....	44
3.2 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพลีโพรพิลีนขั้นตอนที่ 2.....	44
3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีไวนิลคลอไรด์.....	45
3.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีไวนิลคลอไรด์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	45
3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีไวนิลคลอไรด์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว.....	46
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติ และคุณลักษณะของโพลีโพลีเมอร์.....	47
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย WAXD.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	48
4.1 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนชั้นตอนที่ 1	48
4.1.1 การศึกษาเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	48
4.1.2 การศึกษาเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	51
4.2 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนชั้นตอนที่ 2	67
4.2.1 ผลการทดลองของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	67
4.2.2 ผลการทดลองของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	69
4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพรพอลิไวนิลคลอไรด์	77
4.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพรพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	77
4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพรพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	86
5.1 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนชั้นตอนที่ 1	86
5.1.1 การศึกษาเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	86
5.1.2 การศึกษาเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	86
5.2 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนชั้นตอนที่ 2	87
5.2.1 ผลการทดลองของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	87
5.2.2 ผลการทดลองของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	87
5.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพรพอลิไวนิลคลอไรด์	88
5.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาโพรพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	88
5.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพรพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว	88
5.4 องค์ความรู้ที่เกิดจากการศึกษา	88
เอกสารอ้างอิง	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ	99
ภาคผนวก ข การหาความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์	101
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟมด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟ	102
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟมด้วยโปรแกรม Image-J	104
ประวัติ	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่สำหรับความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ของสสารแต่ละชนิด	15
2.2 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหลต่างๆ.....	15
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกายภาพของแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว ของคาร์บอนไดออกไซด์.....	16
2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของแก๊สแต่ละชนิด	18
2.5 ตัวแปรต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิโพรพิลีน	22
2.6 ค่า Avrami บอกถึงการเกิดนิวเคลียสและรูปร่างของสภาพการเป็นผลึก.....	23
3.1 สภาวะในการทดลองเส้นใยพอลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 1	43
3.2 สภาวะในการทดลองเส้นใยพอลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 2.....	44
3.3 สภาวะการขึ้นรูปโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	45
3.4 สภาวะการขึ้นรูปโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว.....	47
4.1 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโฟม 175 องศาเซลเซียส.....	56
4.2 ข้อมูลผลการสแกนแบบหล่อเย็นครั้งที่สองของเส้นใยและเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 175 องศาเซลเซียส.....	60
4.3 ช่วงอุณหภูมิของสภาพการเป็นผลึก	60
4.4 การวิเคราะห์สภาพการเป็นผลึกด้วยวิธีจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก แบบอุณหภูมิคงที่.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างภายในของโฟม.....	4
2.2 พลังงานรวมของการเกิดนิวเคลียส.....	6
2.3 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียวและเนื้อผสม.....	7
2.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สและรัศมีฟอง.....	8
2.5 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ.....	9
2.6 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่อง.....	9
2.7 ขั้นตอนการเกิดโฟม.....	11
2.8 ปัจจัยการควบคุมสมบัติของโฟม.....	12
2.9 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์บีตส์.....	13
2.10 กระบวนการผลิตโฟมบีตส์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีน.....	14
2.11 แผนผังวิภาคของคาร์บอนไดออกไซด์.....	16
2.12 การนับจำนวนฟองด้วยวิธีกำหนดพื้นที่ผิว.....	25
2.13 การนับจำนวนฟองด้วยวิธีกำหนดจำนวนฟอง.....	26
2.14 แสดงขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของการเกิดโฟม.....	28
2.15 แผนภาพแสดงการเกิดสภาพการเป็นผลึกจากคาร์บอนไดออกไซด์.....	29
2.16 โครงสร้างผลึกแบบ Spherulite ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	31
2.17 ภาพไมโครกราฟของโฟมไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโฟม 156 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิหลอมของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนคือ 155 องศาเซลเซียส).....	32
2.18 กระบวนการผลิต Expanded Polymer.....	33
2.19 กระบวนการเกิดโฟม EPP ในระดับแลบสเกล.....	34
2.20 สภาพการเป็นผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่เกิดจากการละลายของ คาร์บอนไดออกไซด์.....	35
2.21 การเสริมสภาพพลาสติก (Plasticization) ของพอลิโพรพิลีนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์.....	35
2.22 ภาพเทอร์โมแกรมแบบอุณหภูมิไม่คงที่ของพอลิเมอร์ผสม ที่ส่วนผสมต่างๆ.....	36
2.23 สันฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสม ที่ส่วนผสมต่างๆ.....	37
2.24 ผลที่ได้จากการจำลองอุณหภูมิและรัศมีของเส้นใยที่อัตราการไหลเชิงมวล 2.2 กรัม/นาที่.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยมีอัตราส่วนผสมของ PE-A ต่อ PE-B เป็นร้อยละโดยมวล มีสารทำฟู 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 200 องศาเซลเซียส.....	39
2.26 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ของ PE-A และ PE-B (80/20) สารทำฟู 3.0 phr และสารเกิดนิวเคลียสด้วยอัตราส่วนต่างๆ	40
2.27 ภาพไมโครกราฟของโฟม PP-A และ PP-B ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 120 บาร์ และเวลา 20 นาที	41
2.28 โฟมพอลิโพรพิลีนปิดส์	41
2.29 กระบวนการผลิตโฟมพอลิโพรพิลีนปิดส์	42
2.30 ภาพไมโครกราฟของโฟม PP-B ปิดส์ ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซน ที่สภาวะเกิดโฟม ความดันเกิดโฟม 170 ± 20 บาร์ อุณหภูมิเกิดโฟม 120 องศาเซลเซียส และเวลา 120 นาที	42
3.1 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	44
3.2 ชุดอุปกรณ์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในพอลิไวนิลคลอไรด์.....	46
4.1 ผลของความเร็วยกของเกียร์บีบต่ออัตราการไหลเชิงมวลของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (●) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■).....	49
4.2 ผลของอุณหภูมิหัวตายต่ออัตราการไหลเชิงมวลของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (●) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■).....	49
4.3 อุณหภูมิหลอมของเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (PP Pellet) และเส้นใยพอลิโพรพิลีน	50
4.4 ดัชนีสภาพการเป็นผลึกของเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (PP Pellet) และเส้นใยพอลิโพรพิลีน	50
4.5 สัดส่วนการขยายตัวของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน	52
4.6 ทิศทางการขยายตัวตามแนวรัศมีและตามแนวยาวของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน.....	52
4.7 สัดส่วนการขยายตามแนวรัศมีและแนวยาวของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 175 องศาเซลเซียส	52
4.8 สัณฐานวิทยาของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน (T190G2) ที่กำลังขยายต่างๆ.....	53
4.9 สัณฐานวิทยาของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ.....	54
4.10 ภาพสัณฐานวิทยาของเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโฟม 175 องศาเซลเซียส	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดฟองของเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อุณหภูมิเกิดโคม 175 องศาเซลเซียส	55
4.12 คุณสมบัติความเป็นโคมไอโซทรอปิกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อุณหภูมิเกิดโคม 175 องศาเซลเซียส	56
4.13 กราฟของเส้นใยโพลีโพรพิลีนรหัส T190G1 เมื่อเส้นที่บนหน้าคือการสแกนแบบให้ความร้อน (Heating Scan) และเส้นที่บนล่างคือการสแกนแบบหล่อเย็น (Cooling Scan)	58
4.14 ดัชนีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีโพรพิลีน (□) ที่อุณหภูมิเกิดโคม 175 องศาเซลเซียส	59
4.15 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิไม่คงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	61
4.16 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิไม่คงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	61
4.17 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	62
4.18 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	62
4.19 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T190G1	63
4.20 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T200G1	63
4.21 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T210G1	64
4.22 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T190G2	64
4.23 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T190G3	65
4.24 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	66
4.25 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	66
4.26 ผลของความเร็รรอบของเกียร์บีบต่ออัตราการไหลเชิงมวลของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (●) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยโพลีโพรพิลีน (■)	68
4.27 อุณหภูมิหลอมของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	68
4.28 ดัชนีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ภาพถ่ายหน้าตัดของเส้นใยโพรพิลีน (PPF2)	70
4.30 ภาพถ่ายหน้าตัดของเส้นใยโพรพิลีน	70
4.31 ผลของความดันเกิดโพรตต่อขนาดฟองของเส้นใยโพรพิลีน	71
4.32 ผลของความดันเกิดโพรตต่อความหนาแน่นฟองของเส้นใยโพรพิลีน	72
4.33 ผลของความดันเกิดโพรตต่อสัดส่วนการขยายตัวของเส้นใยโพรพิลีน	72
4.34 ดัชนีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยและเส้นใยโพรพิลีน	73
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างและดัชนีสภาพการเป็นผลึก ของเส้นใยและเส้นใยโพรพิลีน	74
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างและลอการิทึมของอัตราสภาพการเป็นผลึก ของเส้นใยและเส้นใยโพรพิลีน	74
4.37 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง WAXD ของเส้นใยและเส้นใยโพรพิลีน	76
4.38 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง WAXD ของเส้นใยและเส้นใยโพรพิลีน เมื่อผ่านการนอร์มอลไลซ์	76
4.39 ความหนาแน่นของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่ก่อนบ่ม (เส้นที่บ) และหลังบ่ม (เส้นประ)	78
4.40 ร้อยละการหดตัวของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	78
4.41 สัณฐานวิทยาของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	79
4.42 ขนาดฟองของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	80
4.43 ความหนาแน่นฟองของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต	81
4.44 ความหนาแน่นของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ที่ก่อนบ่ม (เส้นประ) และหลังบ่ม (เส้นที่บ)	82
4.45 ร้อยละการหดตัวของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว	82
4.46 สัณฐานวิทยาของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว	83
4.47 ขนาดฟองของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว	84
4.48 ความหนาแน่นฟองของโพรตไลวไนลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว	85
5.1 หลักการเกิดโพรตของเส้นใยโพรพิลีน (In-situ Filament Foam Mechanism)	89
ก.1 แผนผังกระบวนการเกิดโพรตแบบกะ	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter ; MD-200S).....	101
ค.1 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater.....	102
ค.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น LEO 1455VP	103
ค.3 ตัวอย่างภาพไมโครกราฟของโพลีเมอร์ PP-A	103
ง.1 การเปิดภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image-J	104
ง.2 การกำหนดสเกลให้กับโปรแกรม Image-J	105
ง.3 การกำหนดค่าสเกลและหน่วย.....	105
ง.4 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือขนาดฟอง.....	106
ง.5 การอ่านค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือขนาดฟอง	106
ง.6 การวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟ.....	107
ง.7 การกำหนดพื้นที่ที่ล้อมรอบฟองที่สนใจ.....	108
ง.8 การวิเคราะห์พื้นที่ที่ล้อมรอบฟองที่สนใจ.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การดำรงชีวิตของมนุษย์โดยส่วนใหญ่มีความเกี่ยวข้องกับวัสดุที่เป็นโพลิเมอร์ ซึ่งทำมาจากพอลิเมอร์ หรือเรียกวัดกันว่า โฟมพอลิเมอร์ (Polymeric Foam) อาทิเช่น เบาะรถยนต์ รองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ฟองน้ำ ผนึ่งเก็บเสียง โซฟา ผนึ่งกันความร้อน แผ่นกันกระแทก วัสดุบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น ทั้งนี้สาเหตุที่โฟมพอลิเมอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้านมีเหตุผลหลายประการ อาทิ เช่น น้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ ดูดซับแรงกระแทกได้ดี มีสมบัติด้านฉนวนกันความร้อน มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นต้น การนำโฟมพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้นต้องกำหนดจากคุณสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ซึ่งล้วนเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของโฟม เพราะฉะนั้นการควบคุมกระบวนการผลิตโฟมหรือการเข้าใจถึงหลักการเกิดโฟม ย่อมส่งผลให้สามารถควบคุมหรือปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของโฟมตามที่ต้องการได้

มีปัจจัยหลายๆ อย่างที่ส่งผลต่อโครงสร้างของโฟม เช่น ชนิดของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ความแข็งแรงของการหลอม (Melt Strength) สภาพการเป็นผลึก โครงสร้างของสายโซ่ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล เวลา การหล่อเย็น กระบวนการผลิต การแพร่ของแก๊ส การละลายของแก๊ส เป็นต้น ทั้งนี้สามารถจำแนกปัจจัยหลักๆ ออกได้เป็น 3 ปัจจัยคือ พอลิเมอร์ (Polymer) สารเติมแต่งและสารทำฟู่ (Additive and Blowing Agent) และกระบวนการผลิตโฟม (Foaming Process) ถ้าหากมีการปรับปรุงทั้งสามปัจจัยให้ลงตัว และมีความเหมาะสม (Optimization) จะส่งผลให้ได้โครงสร้างโฟมตามที่ต้องการ เช่น ฟองขนาดใหญ่ ฟองขนาดเล็ก ผนึ่งบาง ฟองเป็นทรงกลม การกระจายตัวของขนาดฟอง ความหนาแน่นฟอง เป็นต้น ดังนั้นการสำรวจองค์ความรู้หรือความเข้าใจในหลักการเกิดโฟม จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาของประเทศไทยในอนาคต

ในอดีตนั้นโฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene Foam) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากพอลิสไตรีนมีราคาถูก ผลิตเป็นโฟมได้โดยง่าย เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน (Amorphous Polymer) จึงทำให้ขั้นตอนการเกิดโฟมนั้นมีการขยายตัวทั่วทุกทิศทาง มีการขยายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีสภาวะในการเกิดโฟมกว้าง อย่างไรก็ตามพอลิสไตรีนมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติก (Aromatic) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นพิษและในขั้นตอนการผลิตโฟมนั้นมีการใช้สารทำฟู่ประเภทสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีการคิดค้นและค้นคว้าวิจัย เพื่อหาพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ มาทดแทนโฟมพอลิสไตรีน เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl Chloride)) พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) พอลิเมทิล

เมทาคริลเลท (Poly(methyl Methacrylate)) เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันการคิดค้นและวิจัยเพื่อหาสารทำพูนชนิดอื่นก็ยังคงดำเนินการควบคู่ไปด้วยกัน โดยงานวิจัยพบว่าสารทำพูนที่สามารถทดแทนสารทำพูนประเภทสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายได้แก่ แก๊สไนโตรเจน (N_2) และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) แต่ข้อเสียของแก๊สสองตัวนี้คือมีค่าการละลายในพอลิเมอร์ต่ำ นักวิจัยจึงได้เลือกใช้แก๊สเหล่านี้แต่อยู่ในอีกสถานะหนึ่งซึ่งเรียกว่า ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid) ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าการละลายอีกทางหนึ่ง เพื่อให้ความสามารถในการเกิดเป็นโพลีเมอร์ตึขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้พอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystallinity Polymer) มาทำเป็นโพลีเมื่อนั้นทำได้ยากเนื่องจากแก๊สละลายได้ดีในส่วนที่เป็นอสัณฐาน อีกทั้งพอลิเมอร์กึ่งผลึกมีสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโพลีที่แคบกว่าพอลิเมอร์อสัณฐาน แต่ข้อดีของผลึกคือทำให้โพลีเมอร์ที่ได้นั้นมีความแข็งแรงกว่าปกติ และส่วนที่เป็นผลึกจะมีผิวที่เรียบกว่าส่วนที่มีโครงสร้างเป็นโพลี

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าความเป็นผลึกส่งผลต่อคุณสมบัติของโพลีที่เกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic Polypropylene) ซึ่งมีดีกรีสภาพการเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ที่มากกว่าพอลิโพรพิลีนทั่วไป แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยการทำเป็นเส้นใยตามสภาวะต่างๆ เพื่อให้มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกในปริมาณที่ต่างกัน จากนั้นนำมาขึ้นรูปโพลีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยกำหนดให้อุณหภูมิเกิดโพลีใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมของเส้นใยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน เพื่อคงสภาพการเป็นผลึกบางส่วน และนำมาศึกษาถึงสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเส้นใยโพลีไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน อีกทั้งยังได้เลือกพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานมาทำเป็นโพลี ด้วยสารทำพูนคือคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของชนิดของสารทำพูนที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีไวนิลคลอไรด์

1.2 แนวคิดในการศึกษา

ความเป็นผลึกส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ จึงเลือกใช้พอลิเมอร์สองชนิดคือ ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีความเป็นผลึกสูง และพอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน เพื่อศึกษาความสามารถในการเป็นโพลีและสัณฐานวิทยาของโพลีทั้งสองชนิด

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษากลไกหรือกระบวนการเกิดโพลี
- 1.3.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างของโพลี
- 1.3.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจต่อกระบวนการผลิตโพลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 พอลิเมอร์ที่นำมาศึกษาคือ ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์
- 1.4.2 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ (Batch Foaming Process)
- 1.4.3 สารทำฟูคือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

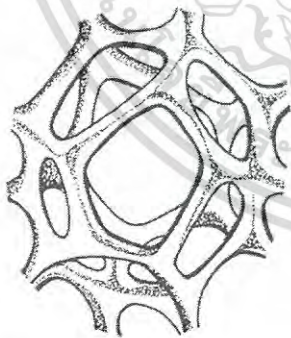
1.5 ผลที่ได้รับ

- สามารถสร้างองค์ความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการเกิดโฟมได้ดี อีกทั้งใช้เป็นแหล่งข้อมูลในการเรียนรู้ในเรื่องของโฟมพอลิเมอร์
- สามารถนำข้อมูลเชิงความร้อนที่ได้จากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ร่วมกับแบบจำลองของ Avrami เพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของทั้งเส้นใยและเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนได้
- สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเกิดโฟม โดยใช้สัดส่วนช่องว่างเพื่อบ่งบอกความสามารถในการเป็นโฟม และจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกได้
- การนอร์มอลไลซ์ (Normalization) ข้อมูลของ WAXD ด้วยความหนาแน่นของตัวอย่างสามารถใช้อธิบายจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของทั้งเส้นใยและเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีนได้

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 โฟม (Foam) [1,2]

โฟม หรือ โฟมพลาสติก หมายถึงวัสดุที่มีโพรงแก๊สเล็กๆ (Cellular Materials) มากมายกระจายในเนื้อพลาสติก โดยแก๊สเกิดขึ้นได้จากสารทำฟู่ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดแก๊สในเนื้อพลาสติก โฟมมีทั้งชนิดแข็ง (Rigid Foam) แข็งปานกลาง (Semirigid Foam) และยืดหยุ่น (Flexible Foam) โดยทั่วไปวัสดุโฟมจะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัฏภาค (Phase) ได้แก่ วัฏภาคที่เป็นของแข็งหรือของเหลว และวัฏภาคแก๊ส ซึ่งวัฏภาคแก๊สจะแทรกตัวอยู่ในวัฏภาคของแข็งหรือของเหลว ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล ความเป็นฉนวน เป็นต้น เมื่อวิเคราะห์ถึงโครงสร้างของโฟมโดยจำแนกประเภทของโฟมตามโครงสร้างของฟอง พบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ โฟมแบบฟองเปิด (Open Bubble) ซึ่งหมายถึง โฟมที่มีโพรงของฟองติดต่อกันจนทำให้แก๊สหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในหมุนเวียนถึงกันได้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (ก) และ โฟมแบบฟองปิด (Close Bubble) หมายถึงโฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือฟองที่ไม่ต่อถึงกันได้โดยมีผนังล้อมรอบฟองที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.1 (ข) สำหรับโฟมแบบฟองปิดนั้นนิยมนำไปทำเป็นโฟมที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทนความร้อน ฉนวนทางด้านไฟฟ้า โฟมสำหรับการก่อสร้าง ชั้นส่วนรถยนต์ วัสดุรองรับแรงกระแทก และอื่นๆ ในขณะที่โฟมแบบฟองเปิดนิยมนำไปทำเป็นฟองน้ำ ของเล่น วัสดุซับเสียง เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่เน้นสมบัติความแข็งแรงเชิงกลเป็นหลัก



(ก) โฟมแบบฟองเปิด



(ข) โฟมแบบฟองปิด

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของโฟม [3]

สำหรับวัสดุที่เรียกว่าโฟมพอลิเมอร์นั้น ส่วนที่เป็นวัฏภาคของแข็งประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว หรือมากกว่าหนึ่งชนิด การผสมของพอลิเมอร์ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป เช่น อุดมทึบหลอม ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 หลักการของการเกิดโฟม (Principles of Foam Formation) [3-5]

การเกิดโฟมเป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางด้านฟิสิกส์และทางด้านเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่หรือสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นที่เข้ามา พื้นฐานสำคัญของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองแก๊ส (Bubble Nucleation) และการเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble Growth) คือ โมเลกุลของแก๊สจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์ และมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันจากภายนอกเพื่อขยายขนาด จึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้น มีลักษณะเป็นฟองฟองตัวออกมา หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics Instability) เกิดขึ้นมาก เท่ากับเป็นการกระตุ้นการเกิดนิวเคลียสทำให้เกิดกลุ่มของฟองจำนวนมากภายในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งวิธีในการทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธี คือการลดความดันหรือการเพิ่มอุณหภูมิ ในขณะที่กระบวนการเกิดโฟมจะประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอนได้แก่

2.1.1.1 การเกิดฟองแก๊ส (Bubble Formation) หรือการเกิดนิวเคลียส (Bubble Nucleation)

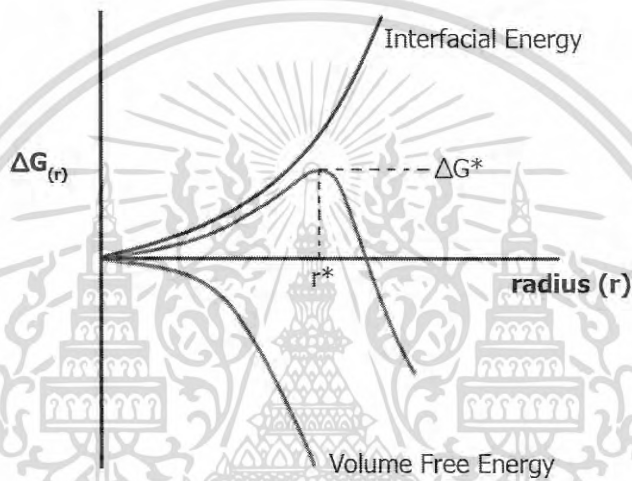
การเกิดฟองแก๊สเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยเมื่อมีการรบกวนระบบหรือก่อกวนให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ กระบวนการดังกล่าวจะไปกระตุ้นให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กหรือนิวเคลียส จำนวนมากกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ นิวเคลียสเหล่านี้จะมีการเจริญเติบโตไปเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ต่อไป ทั้งนี้กลไกการเกิดฟองแก๊สหรือการเกิดนิวเคลียสแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียว (Homogeneous Nucleation) คือ กระบวนการเกิดนิวเคลียสในลักษณะของระบบที่แก๊สละลายเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคของพอลิเมอร์ หรือแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 หากพิจารณาในระดับโมเลกุล พลังงานอิสระ (Free Energy) ของการเกิดนิวเคลียส สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1 โดยพจน์แรกคือ พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (Volume Free Energy) เป็นพลังงานที่ใช้สำหรับการขยายตัวของนิวเคลียส ส่วนพจน์ที่สองคือ พลังงานระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial Energy) เป็นพลังงานในการต้านการขยายตัวของนิวเคลียส โดยพบว่า พลังงานดังกล่าว แปรผันตรงกับแรงตึงผิวระหว่างนิวเคลียสและพอลิเมอร์ (Interfacial Tension) ดังนั้นการเกิดนิวเคลียสต้องทำให้พลังงานอิสระเชิงปริมาตรมากกว่าพลังงานระหว่างผิว

$$\Delta G = -\frac{4\pi r^3}{3} \Delta P + 4\pi r^2 \gamma \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพลอตสมการที่ 2.1 เทียบกับรัศมี (r) ดังรูปที่ 2.2 เส้นตรงกลางคือ พลังงานอิสระ คือพลังงานรวมระหว่างพลังงานอิสระเชิงปริมาตรและพลังงานระหว่างผิวสัมผัส จากกราฟพบว่าพลังงานอิสระเชิงปริมาตรมีค่าลดลงเมื่อรัศมีนิวเคลียสใหญ่ขึ้น แต่พลังงานระหว่างผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้นในปริมาณที่มากกว่า เมื่อพลังงานอิสระเชิงปริมาตรมีปริมาณมากกว่าพลังงานระหว่างผิวสัมผัส จะทำให้กราฟขึ้นถึงจุดสูงสุดแล้วตกลงมา ณ ตำแหน่งสูงสุดนี้คือ ตำแหน่งที่ทำให้อนุพันธ์ (Derivative) เท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ 2.2 โดยตำแหน่งนี้จะได้รับรัศมีวิกฤต (r^*) นั้นหมายความว่า นิวเคลียสต้องมีรัศมีมากกว่ารัศมีวิกฤต เพื่อให้นิวเคลียสขยายตัวใหญ่ขึ้นและกลายเป็นฟองในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 2.2 พลังงานรวมของการเกิดนิวเคลียส [6]

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0; r^* = \frac{2\gamma}{\Delta P} \quad (2.2)$$

ดังนั้นพลังงานอิสระที่น้อยที่สุดสำหรับการเกิดนิวเคลียสสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta G_{hom}^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3\Delta P^2} \quad (2.3)$$

ในขณะที่อัตราการเกิดนิวเคลียส (Rate of Nucleation) สามารถคำนวณได้จากสมการ

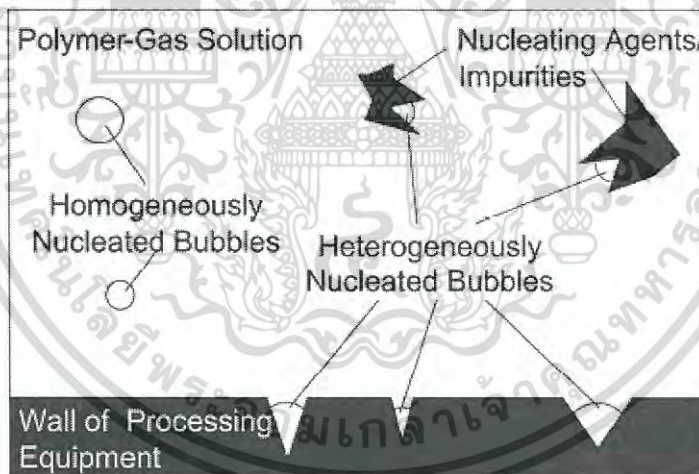
$$N_0 = C_0 f_0 \exp\left(\frac{-\Delta G_{hom}^*}{kT}\right) \quad (2.4)$$

$$f_0 = ZR_{imp}(4\pi r_c^2) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	ΔP	คือ ผลต่างของความดัน
	γ	คือ แรงตึงผิว
	C_0	คือ ความเข้มข้นของของไหลที่ละลายในพอลิเมอร์ (Number of Molecule per Volume)
	k	คือ ค่าคงที่ของ Boltzman
	f_0	คือ Frequency Factor ของแก๊ส
	Z	คือ Zeldovich Factor
	R_{imp}	คือ Rate of Impingement

แบบที่ 2 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อผสม (Heterogeneous Nucleation) เป็นกระบวนการเกิดนิวเคลียสในลักษณะของการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารเกิดนิวเคลียส (Nucleating Agent) หรือเกิดจากสารปนเปื้อน (Impurities) ซึ่งการเติมสารเติมแต่นั้นเป็นการช่วยลดแรงตึงผิว (Surface Tension) ระหว่างพอลิเมอร์และสารเกิดนิวเคลียส ซึ่งส่งผลให้เกิดนิวเคลียสได้ง่ายและเกิดขึ้นบริเวณระหว่างพอลิเมอร์และสารเกิดนิวเคลียส หรือแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียวและเนื้อผสม

2.1.1.2 การเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble Growth) [2, 7]

หลังจากกระบวนการเกิดนิวเคลียส ความดันและความเข้มข้นของแก๊สภายในฟองมีค่าลดลง ทำให้เกิดผลต่างของความเข้มข้นของแก๊สระหว่างภายในฟองและพอลิเมอร์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration Gradient) ด้วยเหตุนี้แก๊สบริเวณข้างเคียงมีการแพร่เข้ามาภายในฟองจึงส่งผลให้นิวเคลียสเหล่านี้มีการขยายขนาดใหญ่ขึ้น จากกฎของเฮนรี (Henry's Law) ความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปทำให้มีความดันต่างกัน ระหว่างความดันของแก๊สในฟอง (P_G) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันของแก๊สในพอลิเมอร์ (P_L) ซึ่งทาง M. A. Shaft และ R. W. Flumerfelt [7] ได้นำเสนอโมเดลสำหรับการเติบโตของฟองแก๊สดังสมการที่ 2.6 และรูปที่ 2.4 เพื่ออธิบายและทำนายการเติบโตของฟองแก๊สที่เวลาต่างๆ ในบางกรณีเมื่อนิวเคลียสเกิดขึ้นแล้ว แต่มีพลังงานไม่เพียงพอในการขยายตัวจะทำให้นิวเคลียสนี้เกิดการยุบตัวและสลายตัวไปในที่สุด จากนั้นแก๊สเหล่านี้จะไหลไปรวมกับนิวเคลียสอื่นๆ หรือเรียกว่า การรวมตัว (Coalescence)

$$\frac{dR}{dt} = \frac{(P_G - P_L)R}{4\eta} - \frac{\sigma}{2\eta} \quad (2.6)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของฟอง
 σ คือ แรงตึงผิว
 η คือ ความหนืด



รูปที่ 2.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สและรัศมีฟอง [7]

2.1.1.3 การคงสภาพของฟองแก๊ส (Bubble Stability)

การคงสภาพของฟองแก๊สเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม เกิดจากการแพร่ของสารทำฟู่ที่อยู่ภายในโฟมแพร่ออกมายังสภาวะบรรยากาศ และในเวลาเดียวกันนั้นอากาศมีการแพร่เข้ามาในโฟมเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราการแพร่ออกของแก๊สจากฟองต้องมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอัตราการแพร่ของอากาศ จึงจะส่งผลให้ที่สภาวะสมดุลนั้นมียุทธศาสตร์เข้าไปในโฟมได้อย่างสมบูรณ์และมีความดันภายในโฟมเท่ากับความดันบรรยากาศ หากโฟมที่มีความหนาแน่นและการกระจายตัวของขนาดฟองที่ดีจะพบการหดตัวน้อย แต่ถ้าโฟมที่มีโครงสร้างไม่เหมาะสมและการกระจายตัวของขนาดฟองไม่ดี จะส่งผลให้โฟมที่เกิดขึ้นนั้นมีการหดตัวสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foaming Process) [8]

กระบวนการเกิดโฟมแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการหลักๆ คือ กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ (Batch Foaming Process) และกระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่อง (Continuous Foaming Process) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

ในขั้นตอนแรกทำการผสมระหว่างสารเกิดนิวเคลียสและพอลิเมอร์ ต่อมาทำให้อิ่มตัวด้วยแก๊สภายใต้สภาวะความดันสูงและอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ (Melting Temperature, T_m) หรืออุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) เมื่อแก๊สละลายในพอลิเมอร์จนเข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นลดความดันลงเพื่อให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) ซึ่งส่งผลให้เกิดนิวเคลียสอย่างรวดเร็วและกลายเป็นโฟมในขั้นตอนสุดท้าย ดังรูปที่ 2.5

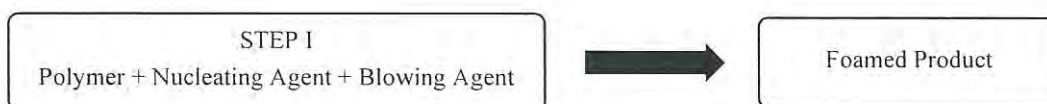


รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

2. กระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่อง

- กระบวนการเกิดโฟมต่อเนื่องโดยใช้สารทำฟู่ทางกายภาพ (Physical Blowing Agent) กระบวนการนี้ใช้หลักการเดียวกับรูปที่ 2.5 โดยต่อระบบป้อนสารทำฟู่ทางกายภาพ หลังจากพอลิเมอร์หลอมและผสมเข้ากันได้ดี จากนั้นแก๊สจะถูกผสมเข้ากับพอลิเมอร์จนกลายเป็นสารละลายเนื้อเดียวอีกครั้ง เมื่อสารละลายไหลผ่านหัวตายภายใต้ความดันบรรยากาศ จึงส่งผลให้เป็นการกระตุ้นให้เกิดโฟม

- กระบวนการเกิดโฟมต่อเนื่องโดยใช้สารทำฟู่ทางเคมี (Chemical Blowing Agent) ทำได้ด้วยการผสมพอลิเมอร์ สารเกิดนิวเคลียสและสารทำฟู่ ลงในเครื่องอัดรีดซึ่งทำให้เกิดการผสมกันของของผสมเหล่านี้ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง จากนั้นสารทำฟู่จะปล่อยแก๊สออกมาให้มีการผสมภายในเครื่องอัดรีด เมื่อของผสมเหล่านี้ไหลผ่านบริเวณหัวตาย จึงทำให้เกิดการลดความดัน ซึ่งส่งผลให้มีเกิดโฟมเกิดขึ้น โดยแผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่องนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 สารทำฟู [3, 4, 9]

การเกิดฟองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ ฟองที่เกิดจากสารทำฟูทางกายภาพ และฟองที่เกิดจากสารทำฟูทางเคมี ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. สารทำฟูทางเคมี

สารทำฟูทางเคมีคือสารเคมีชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการปลดปล่อยให้แก่สอออกมาด้วยการเกิดปฏิกิริยาและ/หรือการสลายโครงสร้างที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature) จากผลของการสลายตัวทางโครงสร้างบางส่วน เพื่อให้แก่สอออกมานั้น จะทำให้มีโครงสร้างที่เหลือกลายเป็นสารตกค้างที่เป็นของแข็งภายในเนื้อโฟม ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำโฟมที่เกิดจากกระบวนการนี้ไปใช้ในบางผลิตภัณฑ์ได้ สารทำฟูทางเคมีสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ แบบที่หนึ่งคือแบบคายความร้อน เช่น อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide) เมื่อมีการสลายโครงสร้างจะทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) แอมโมเนีย (NH_3) ออกซิเจน (O_2) ที่อุณหภูมิ 200 - 230 องศาเซลเซียส เป็นต้น และแบบที่สองคือแบบดูดความร้อน เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate) กรดซิตริก (Citric Acid) เป็นต้น ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้จะมีการสลายตัวให้แก่สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 130 - 170 องศาเซลเซียส และ 110 - 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

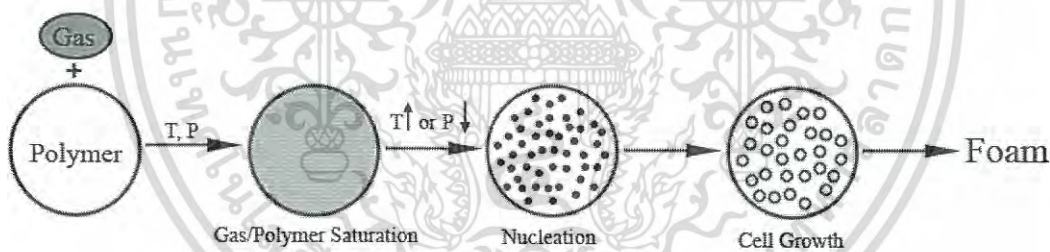
2. สารทำฟูทางกายภาพ

สารทำฟูทางกายภาพทำให้เกิดโฟมด้วยการระเหยหรือการเดือดของของเหลว หรือการขยายตัวของแก๊ส เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิและ/หรือการลดความดัน โดยทั่วไปสารทำฟูทางกายภาพที่เป็นของเหลว จะมีจุดเดือดต่ำและเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายสั้น หรือเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีธาตุตระกูลฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons, CFCs) ไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrochlorofluorocarbons, HCFCs) เป็นต้น สารทำฟูทางกายภาพเหล่านี้ถูกจัดให้อยู่ในจำพวกสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย อย่างไรก็ตามสารประกอบเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemical Reactions) ที่ชั้นบรรยากาศหรือเป็นการทำลายโอโซนนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้มีการศึกษาทางเลือกอื่น เพื่อนำมาทดแทนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นคือแก๊สเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าแก๊สเฉื่อยมีความสามารถในการละลายในพอลิเมอร์ได้น้อย แต่มีความสามารถที่ดีในด้านการแพร่ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนนิยมใช้เป็นสารทำฟูอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าสารประกอบประเภทอื่นๆ และผลิตได้จากการเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรม เพราะฉะนั้นแก๊สเฉื่อยจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารทำฟูทางกายภาพในกระบวนการเกิดโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

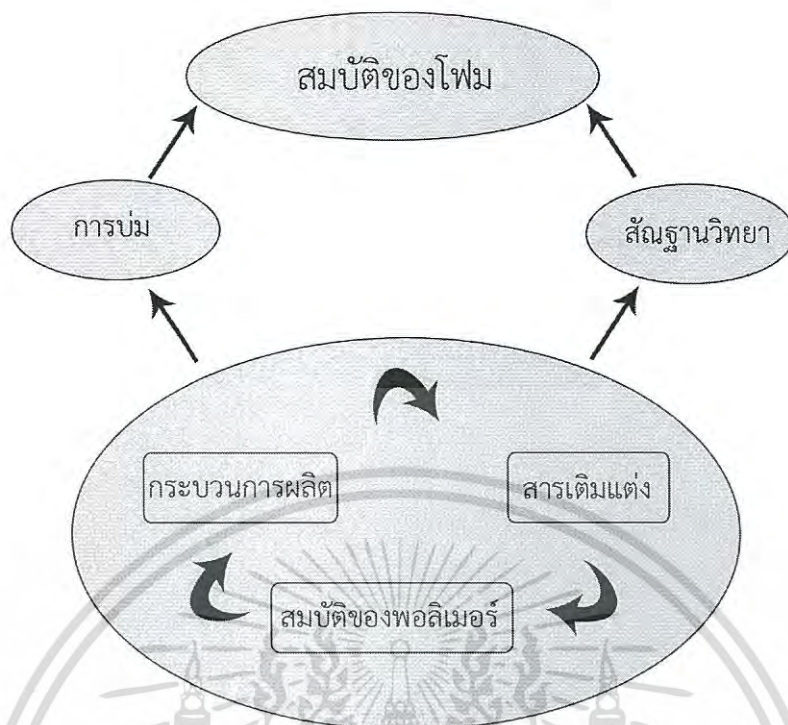
นับตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งข้อดีของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตคือมีความสามารถในการละลาย (Solubility) และการแพร่ (Diffusivity) ในพอลิเมอร์สูงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้กระบวนการผลิตโฟมที่ใช้สารทำฟู่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าสารทำฟู่ที่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ขั้นตอนการเกิดโฟมโดยมีแก๊สเป็นสารทำฟู่สามารถเกิดขึ้นได้รูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้ [10]

1. การละลายของแก๊ส (Gas Dissolution) แก๊สละลายลงในเนื้อพอลิเมอร์และกลายเป็นสารละลายของแก๊สและพอลิเมอร์
2. การเกิดนิวเคลียส (Bubble Nucleation) เมื่อถึงเวลาอิ่มตัว (Saturated Time) ระบบจะถูกรบกวนสมดุลด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์คือ เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิและ/หรือลดความดันของระบบอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างแก๊สและพอลิเมอร์
3. การเติบโตของฟอง (Bubble Growth) เกิดจากการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนของฟองแก๊สจากบริเวณข้างเคียง
4. การคงสภาพของฟอง (Bubble Stabilization) ฟองเกิดการหยุดการเติบโตเองโดยธรรมชาติหรือมีแรงขับ (Driving Force) ของการเติบโตของฟองไม่เพียงพอ



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเกิดโฟม

จากหลักการเกิดโฟมสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งอธิบายได้ว่า สมบัติของโฟมและ/หรือการนำไปประยุกต์ใช้ (Application) ขึ้นกับโครงสร้างหรือสัณฐานวิทยาและการบ่ม โดยที่โครงสร้างหรือสัณฐานวิทยานั้นสามารถควบคุมได้จากสามปัจจัยหลักคือ สมบัติของพอลิเมอร์ กระบวนการผลิต และสารเติมแต่ง เพราะฉะนั้นการทำโฟมให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ จึงเป็นการหาจุดที่เหมาะสมและความพอดีของตัวแปรเหล่านี้



รูปที่ 2.8 ปัจจัยการควบคุมสมบัติของโฟม [5]

2.2 โฟมพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composite Foam) [11-14]

พอลิเมอร์คอมโพสิตประกอบด้วยอย่างน้อยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นเมทริกซ์หรือพอลิเมอร์ และอีกส่วนหนึ่งคือตัวเติม (Filler) ซึ่งการจำแนกประเภทของตัวเติมนี้สามารถจำแนกได้หลายประเภทคือ จำแนกตามลักษณะรูปร่าง เช่น มีลักษณะยาวหรือสั้น เส้นใย แผ่น ทรงกลม เป็นต้น จำแนกตามประเภทของสารเคมี ได้แก่ ตัวเติมประเภทสารอินทรีย์ (Organic Filler) เช่น ทัลค์ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) แบเรียมซัลเฟต (Barium Sulfate) เคาลิน (Kaolin) เป็นต้น ตัวเติมประเภทสารอนินทรีย์ (Mineral Fillers) เช่น เส้นใยไม้ ปอ ฝ้าย เป็นต้น และจำแนกตามความสามารถในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ตัวเติมที่ทำหน้าที่ในส่วนของส่วนเสริมแรง (Reinforced) ตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการนำความร้อน เป็นต้น

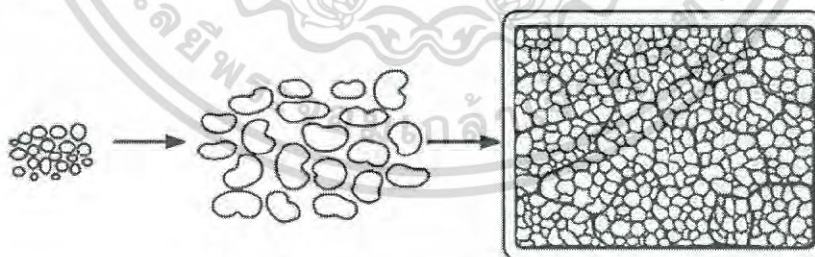
สำหรับกระบวนการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นสามารถเตรียมได้จากการนำพอลิเมอร์ผสมสารเติมแต่งและตัวเติม ด้วยกระบวนการผสมแบบกะหรือแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) หรือเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder) ที่ถูกออกแบบให้หัวดายมีลักษณะต่างๆ ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ยังพบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (Compatibiliser) ยังช่วยให้เมทริกซ์ของพอลิเมอร์มีแรงยึดติดบนผิวของส่วนของตัวเติมได้ดีขึ้น เช่น การเติมสารพอลิโพรพิลีนร่วมกราฟต์เมลลิกแอนไฮไดรด์ (Poly(propylene-Graft-Maleic Anhydride) Copolymer, MA-g-PP) ในกระบวนการผลิตพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากนำพอลิเมอร์คอมโพสิตเข้าสู่กระบวนการเกิดโฟม จะทำให้เกิดโฟมพอลิเมอร์คอมโพสิต คือมีวิวัฒนาการแก๊สเข้าไปกระจายและแทรกอยู่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งส่งผลให้ โฟมพอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรงเชิงกลเทียบกับมวล (Specific Mechanical Property) ดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิต

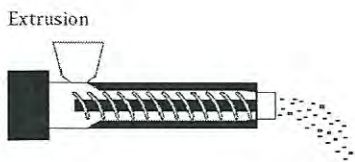
2.3 โฟมพอลิเมอร์บีดส์ (Expanded Polymer Foam Beads) [14-15]

โฟมพอลิเมอร์บีดส์ คือ บีดส์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็กของโฟมพอลิเมอร์ชนิดเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic Polymers) ซึ่งในกระบวนการเกิดโฟมเริ่มต้นด้วยการทำให้พอลิเมอร์อิมิตัวด้วยสารทำฟู่ทางกายภาพหรือสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น บิวเทน (C_4H_{10}) เพนเทน (C_5H_{12}) เฮกเซน (C_6H_{14}) เป็นต้น เมื่อถึงเวลาอิมิตัวจึงครบคุณสมบัติของระบบ จะทำให้ได้โฟมพอลิเมอร์บีดส์ที่มีความสามารถในการขยายตัวสูงถึง 35 - 40 เท่า และในขั้นตอนสุดท้ายคือการนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Mold) ทำให้โฟมพอลิเมอร์บีดส์มีการขยายตัวและหลอมติดกันระหว่างผิวของโฟมพอลิเมอร์บีดส์ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถแสดงกระบวนการอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.9 สำหรับกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมนั้นสามารถยกตัวอย่างได้จากกระบวนการผลิตโฟมบีดส์ของพอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) ระหว่างพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีน ซึ่งเริ่มต้นด้วยการผลิตพอลิเอทิลีน ดังในรูปที่ 2.10 (ก) จากนั้นนำพอลิเอทิลีนเข้าสู่กระบวนการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ด้วยสไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene Monomer) ดังรูปที่ 2.10 (ข) ต่อจากนั้นจึงนำพอลิเมอร์ผสม เข้าสู่กระบวนการเกิดโฟมด้วยสารทำฟู่ทางกายภาพ ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ผสมแขวนลอยอยู่ในน้ำ ดังรูปที่ 2.10 (ค) ถัดจากนั้นจึงนำโฟมบีดส์ที่ได้มาใส่น้ำด้วยกระบวนการทำแห้ง ดังรูปที่ 2.10 (ง) หลังจากนั้นจึงทำการขนส่งเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามต้องการดังรูปที่ 2.10 (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ

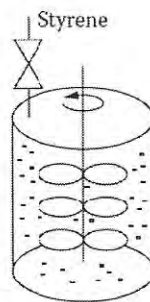


รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์บีดส์

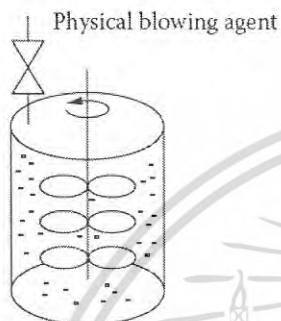
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



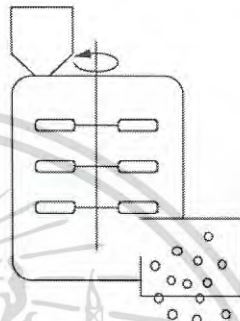
(ก) การผลิตพอลิเอทิลีน



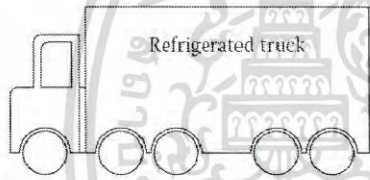
(ข) การเกิดพอลิเมอร์ด้วยสไตรีนมอนอเมอร์



(ค) การเกิดโฟม



(ง) การทำแท่ง



(จ) การขนส่ง



(ฉ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโฟมบีตส์

รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตโฟมบีตส์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีน

2.3.1 ความจุความร้อน (Heat Capacity) [16]

พลังงานความร้อนเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของการหลอมของพอลิเมอร์ ในกระบวนการผลิตโฟม ซึ่งพลังงานความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์แสดงได้ด้วยค่าของความจุความร้อน หรือหมายถึงพลังงานความร้อนที่ทำให้สสารมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ความจุความร้อนนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ แบบที่หนึ่งคือความจุความร้อนเมื่อปริมาตรคงที่ (Constant-Volume Heat Capacity, C_v) และแบบที่สองคือความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ (Constant-Pressure Heat Capacity, C_p) สำหรับค่าของความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ในสภาวะของแก๊สอุดมคติสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่ที่ขึ้นกับชนิดของสสาร และอุณหภูมิสัมบูรณ์ ดังสมการ

$$C_p/R = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของของผสมนั้นสามารถหาค่าความจุความร้อนของของผสม ($C_{P,mix}$) เมื่อความดันคงที่ได้จากผลรวมของสัดส่วนโดยโมลของสารใดๆ (y_i) หรือสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{P,mix} = \sum_{i=1}^n (y_i \times C_{P,i}) \quad (2.8)$$

เมื่อค่าคงที่ของสารแต่ละชนิดสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สำหรับความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ของสารแต่ละชนิด

สารเคมี	A	$10^3 B$	$10^6 C$	$10^{-5} D$
นอร์มอลเพนเทน (n-Pentane)	2.464	45.351	-14.111	-
นอร์มอลเฮกเซน (n-Hexane)	3.025	53.722	-16.791	-
อากาศ (Air)	3.355	0.575	-	-0.016
คาร์บอนไดออกไซด์	5.457	1.045	-	-1.157

2.4 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [17]

ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid) คือของไหลที่มีสถานะอุณหภูมิและความดันสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature, T_c) และความดันวิกฤต (Critical Pressure, P_c) ของของไหลนั้นๆ ของไหลเหนือวิกฤตมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลวและแก๊ส โดยตัวอย่างของอุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหล สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.2 และผลจากการที่ของไหลเหนือวิกฤตมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลวและแก๊สส่งผลให้ของไหลเหนือวิกฤตมีคุณสมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties) เช่น ความหนาแน่น ความหนืด การแพร่ เป็นต้น มีค่าอยู่ระหว่างแก๊สและของเหลว ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหลต่างๆ

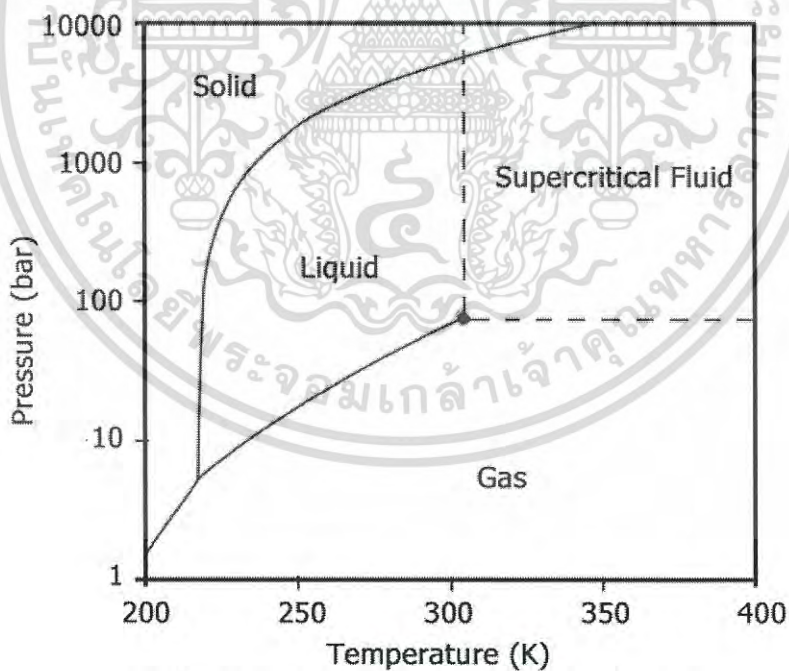
ของไหล	อุณหภูมิวิกฤต (เคลวิน)	ความดันวิกฤต (บาร์)
แอมโมเนีย	508.1	47.0
คาร์บอนไดออกไซด์	304.1	73.8
มีเทน	293.0	30.6
เมทานอล	512.6	80.9
น้ำ	647.3	221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกายภาพของแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤตและของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์

สมบัติทางกายภาพ	แก๊ส	ของไหลเหนือวิกฤต	ของเหลว
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	1	100 - 800	1,000
ความหนืด (ปาสคาล-วินาที)	0.001	0.005 - 0.01	0.05 - 0.1
การแพร่ (ตารางเมตร/วินาที)	1×10^{-5}	1×10^{-7}	1×10^{-9}

คาร์บอนไดออกไซด์นิยมนำมาใช้ในกระบวนการต่างๆ เนื่องจากมีสภาวะวิกฤตที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบสภาวะวิกฤตของสารชนิดอื่น จึงส่งผลให้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ มีราคาไม่สูงมาก มีความเป็นพิษต่ำ ไม่ติดไฟ และสามารถแยกออกจากระบบได้ง่าย อาทิเช่น การลดความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมายังสภาวะบรรยากาศ จึงส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นแก๊ส และสามารถปล่อยเข้าสู่บรรยากาศได้ ดังแผนผังวิภูภาค (Phase Diagram) รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังวิภูภาคของคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปรากฏการณ์การส่งผ่าน (Transport Phenomena) ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ [14, 18, 19]

ปรากฏการณ์การส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ได้แก่ การแพร่ (Diffusion) และการซึมผ่าน (Permeation) มีความเกี่ยวข้องทั้งในระหว่างขั้นตอนการเกิดโฟมและหลังการเกิดโฟม โดยเริ่มต้นจากการที่แก๊สจากพอลิเมอร์แพร่เข้ามาภายในฟองแก๊ส ในขั้นตอนของการเจริญเติบโตของฟองแก๊ส เนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของฟองแก๊สเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อแก๊สแพร่เข้ามาจนทำให้ฟองเต็มไปด้วยแก๊ส จึงส่งผลให้ขั้นตอนของการคงสภาพฟองนั้น แก๊สมีการแพร่ออกจากฟองและในขณะเดียวกันนั้นอากาศจากภายนอกจะเข้ามาแทนที่จนเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง กระบวนการของแก๊สที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การซึมผ่าน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถของแก๊สที่สามารถได้ละลายในพอลิเมอร์หรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การละลาย (Solubility) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาของปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

2.5.1 การแพร่

โดยปกติแก๊สโดยทั่วไป อาทิเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ฮีเลียม (He) ไนโตรเจน มีเทน (CH_4) เป็นต้น มีแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์น้อย จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและเวลา แต่แปรผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์เท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์จากสมการของ Arrhenius ดังนี้

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (2.9)$$

ในกรณีของอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพคล้ายยางสามารถคำนวณค่าของ E_D ได้จากสมการ

$$10^{-3} \frac{E_D}{R} = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}}\right)^2 \left[7.5 - \left(2.5 \times 10^{-4} (298 - T_g)^2\right)\right] \pm 0.6 \quad (2.10)$$

เมื่อ T_g คือ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (K)

σ_x คือ ขนาดโมเลกุลของแก๊ส x ซึ่งแก๊สบางชนิดแสดงค่าได้ดังตารางที่ 2.4

ในขณะที่ D_0 หาได้จากสมการ

$$\log D_0 = \frac{-E_D \times 10^{-3}}{R} - 4.0 \pm 0.4 \quad (2.11)$$

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของแก๊สแต่ละชนิด

แก๊ส	ε/k (เคลวิน)	σ_x (นาโนเมตร)
N ₂	71.4	37.98
CO ₂	195.2	39.41
O ₂	106.7	34.67
CH ₄	148.6	37.58

เวลาเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการเกิดโพลีเมอร์แบบกะ ซึ่งเป็นเวลาของแก๊สที่ใช้ในการแพร่และละลายในพอลิเมอร์จนเข้าสู่สมดุล โดยความสัมพันธ์ของสัดส่วนของค่าการละลายที่เวลาใดๆ เทียบกับค่าการละลายที่เวลามากเกินพอ เป็นฟังก์ชันกับ สัมประสิทธิ์การแพร่ เวลา และความหนา ดังสมการ [20]

$$\frac{\Delta w_{CO_2}(t)}{\Delta w_{CO_2}(t=\infty)} = 1 - \sum_n \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ $\Delta w_{CO_2}(t)$ คือ น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์ที่เวลา t ใดๆ (กรัม)
 $\Delta w_{CO_2}(t=\infty)$ คือ น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์เมื่อเวลามากเกินพอ (กรัม)
 L คือ ความหนาของตัวอย่าง (เซนติเมตร)
 t คือ เวลาในการละลาย (วินาที)
 n คือ จำนวนเต็มตั้งแต่ 1 จนถึงอนันต์

2.5.2 การซึมผ่าน

การซึมผ่านของแก๊สในพอลิเมอร์จะบ่งบอกถึงปริมาณของแก๊สที่ผ่านพื้นผิวหน้าตัดของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ต่อเวลาและความดัน การซึมผ่านสามารถแบ่งออกได้เป็นสามขั้นตอนประกอบด้วย ขั้นตอนแรกคือ การละลายของแก๊สที่บริเวณผิวของพอลิเมอร์ ขั้นตอนที่สองคือแก๊สเกิดการแพร่จนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ซึ่งมีแรงขับจากผลต่างของความเข้มข้นของแก๊ส และขั้นตอนที่สามคือเกิดการระเหยของแก๊สบริเวณที่ผิวอีกด้านหนึ่งของพอลิเมอร์ ทั้งนี้สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeation Coefficient, P) คำนวณได้จากผลคูณของสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) และสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility Coefficient, S) ดังสมการ

$$P \equiv DS \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จากสมการ

$$P = P_0 \exp\left(\frac{-E_P}{RT}\right) = D_0 S_0 \exp\left(\frac{-(E_D + \Delta H_S)}{RT}\right) \quad (2.14)$$

- เมื่อ ΔH_S คือ พลังงานความร้อนของการละลาย (Solubility) (จูล/โมล)
 E_D คือ พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) ของการแพร่ (จูล/โมล)
 E_P คือ พลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างพลังงานกระตุ้นของการแพร่และพลังงานความร้อนเชิงโมล (จูล/โมล)
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูล/โมล เคลวิน)

สัมประสิทธิ์การละลายมีหน่วยคือ ลูกบาศก์เซนติเมตร (STP)/ลูกบาศก์เซนติเมตร ปาสคาล และสัมประสิทธิ์การแพร่มีหน่วยคือ ตารางเซนติเมตร/วินาที เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีหน่วยคือ ลูกบาศก์เซนติเมตร (STP) ตารางเซนติเมตร/ลูกบาศก์เซนติเมตร ปาสคาล วินาที สำหรับการคำนวณกรณีของอีลาสโตเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพคล้ายยางสามารถคำนวณค่าของ P_0 ได้จากสมการ

$$\log P_0 = -10.1 + 10^{-3} \frac{E_P}{R} \pm 0.25 \quad (2.15)$$

2.5.3 การละลาย [18]

การละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ สามารถแสดงได้จากค่าการละลายหรือแสดงในพจน์ของสัมประสิทธิ์การละลาย ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณของแก๊สที่สามารถละลายในพอลิเมอร์ได้มากที่สุด ณ สภาวะสมดุล ซึ่งการละลายของแก๊สนี้เป็นไปตามกฎของเฮนรี โดยสัมประสิทธิ์การละลายหาได้จากสมการ

$$S = S_0 \exp\left(\frac{\Delta H_S}{RT}\right) \quad (2.16)$$

สำหรับอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพคล้ายยางสามารถคำนวณค่าของพลังงานความร้อนของการละลายหาได้จากสมการ

$$10^{-3} \frac{\Delta H_S}{R} = 1.0 - 0.010 \frac{E}{k} \pm 0.5 \quad (2.17)$$

$$\log S_0 = -5.5 - 0.005 \frac{E}{k} \pm 0.8 \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ε/k คือ อุณหภูมิของ Lennard-Jones ซึ่งหาได้จากตารางที่ 2.4 มีหน่วยคือ เคลวิน

จากสมการสัมประสิทธิ์การละลายตามหัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ เป็นสมการอย่างง่ายเพื่อหาความสามารถในการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามมีการศึกษาสมการที่มีความเหมาะสมต่อการทำนายค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ จากการศึกษาของ Zhen-hua Chen และคณะ [21] พบว่าสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe (Sanchez-Lacombe Equation of State) มีความเหมาะสมและแม่นยำ ในการทำนายค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนที่สภาวะความดันและอุณหภูมิสูง โดยเบื้องต้นนั้นที่สภาวะสมดุลระบบของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์คือการที่ศักย์เคมี (Chemical Potential) ของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สมีค่าเท่ากับศักย์เคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของพอลิเมอร์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [20]

$$\mu_1^G = \mu_1^P \quad (2.19)$$

$$\frac{\mu_1^G}{RT} = r_1 \left[\frac{-\tilde{p}_1 + \tilde{P}_1 \tilde{v}_1}{\tilde{T}_1} + \tilde{v}_1 \left((1 - \tilde{p}_1) \ln(1 - \tilde{p}_1) + \frac{\tilde{p}_1}{r_1} \ln \tilde{p}_1 \right) \right] \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\mu_1^P}{RT} = \ln \phi_1 + \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right) \phi_2 + r_1 \tilde{\rho} \chi_{12} \phi_2^2 \frac{v_1^*}{v^*} \\ + r_1 \left[\frac{-\tilde{p} + \tilde{P} \tilde{v}}{\tilde{T}} + \tilde{v} \left((1 - \tilde{p}) \ln(1 - \tilde{p}) + \frac{\tilde{p}}{r_1} \ln \tilde{p} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

เมื่อตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe ดังนี้

$$\tilde{p}^2 + \tilde{P} + \tilde{T} \left[\ln(1 - \tilde{p}) + \left(1 - \frac{1}{r}\right) \tilde{p} \right] = 0 \quad (2.22)$$

$$\tilde{P} = \frac{P}{P^*}, \tilde{T} = \frac{T}{T^*}, \tilde{p} = \frac{p}{p^*}, \tilde{p} \cong \frac{\bar{M}w}{v^*}, r = \frac{P^* v^*}{RT^*} = \frac{P^*}{RT^* \rho^*} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{\rho}$ คือ ความดันรีดิวซ์ อุณหภูมิรีดิวซ์ และความหนาแน่นรีดิวซ์ ตามลำดับ
 r คือ ไซส์พารามิเตอร์ (Size Parameter)
 P^*, T^*, v^*, ρ^* คือ คุณสมบัติความดัน อุณหภูมิ ปริมาตร และความหนาแน่น
 (Characteristic Pressure, Temperature Volume and Density)

ในกรณีการคำนวณคุณสมบัติต่างๆ ของของผสมที่ใช้ควบคู่กับสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe หาได้ดังนี้

$$v^* = \phi_1^0 v_1^* + \phi_2^0 v_2^* \quad (2.24ก)$$

$$\phi_i^0 = \frac{\hat{\phi}_i}{\hat{\phi}_1 + (v_1^*/v_2^*)\hat{\phi}_2} \quad \text{เมื่อ } i = 1 \text{ และ } 2 \quad (2.24ข)$$

$$\hat{\phi}_i = \frac{m_i/\rho_i^*}{m_1/\rho_1^* + m_2/\rho_2^*} \quad \text{เมื่อ } i = 1 \text{ และ } 2 \quad (2.24ค)$$

$$\hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2 = 1 \quad (2.24ง)$$

$$P^* = \hat{\phi}_1 P_1^* + \hat{\phi}_2 P_2^* - \frac{RT}{v^*} \hat{\phi}_1 \hat{\phi}_2 \chi_{12} \quad (2.24จ)$$

$$\chi_{12} = \frac{(P_1^* + P_2^* - 2(P_1^* P_2^*)^{1/2} (1 - k_{12})) v^*}{RT} \quad (2.24ฉ)$$

$$T^* = \frac{P^* v^*}{R} \quad (2.24ช)$$

$$r = x_1 r_1 + x_2 r_2 \quad (2.24ซ)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (2.24ด)$$

$$1/\rho^* = m_1/\rho_1^* + m_2/\rho_2^* \quad (2.24ณ)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ k_{12} คือ ไบนารีอินเตอร์แอคชัน (Binary Interaction Parameter)
 x_1, x_2 คือ สัดส่วนโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์
 m_1, m_2 คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์
 v_1^*, v_2^* คือ คุณสมบัติปริมาตรเชิงโมล (Molar Volume) ของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์
 \bar{v}_1, \bar{v}_2 คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์
 ρ_1^*, ρ_2^* คือ คุณสมบัติความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์

สำหรับตัวแปรและค่าคงที่ต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิโพรพิลีนแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิโพรพิลีน

ตัวแปร	ρ^* (กรัม/ซม ³)	P^* (บาร์)	T^* (เคลวิน)	ช่วงความดัน (บาร์)
CO ₂	1.2530	3691	341.2	0 - 200
PP	0.8817	2852	683.1	0 - 500

สำหรับค่าการละลายของของไหลเหนือวิกฤตในการทดลองสามารถหาได้จากหลายๆ วิธี เช่น การวิเคราะห์เชิงน้ำหนัก (Gravimetric Techniques) ซึ่งอาศัยหลักการลอยตัวของพอลิเมอร์ ที่เกิดการขยายตัวอันเนื่องมาจากของไหลเหนือวิกฤต ภายใต้สภาวะของไหลเหนือวิกฤต ปริมาตรที่เกิดจากการบวมสามารถนำไปเปรียบเทียบกับสมการของ Sanchez-Lacombe เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าการละลายที่เกิดขึ้นได้ การใช้ความถี่ที่เปลี่ยนไปของพอลิเมอร์ การใช้วิธีวัดความดันที่เปลี่ยนไปของของไหลเหนือวิกฤต เป็นต้น

2.6 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก (Crystallization Kinetic)

ดีกรีสภาพการเป็นผลึก (Degree of Crystallinity, X_c) [22] สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณความร้อนที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึก (Crystal) หรือเรียกว่าเอนทัลปีของการหลอม ณ อุณหภูมิหลอม ($\Delta H_f(T_m)$) เทียบกับเอนทัลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ ณ อุณหภูมิสมดุล ($\Delta H_f^0(T_m^0)$) สำหรับพอลิโพรพิลีนมีค่าเท่ากับ 207.1 จูล/กรัม [23] ดังสมการ

$$X_c = \Delta H_f(T_m) / \Delta H_f^0(T_m^0) \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Avrami [24-26] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Crystallization Kinetic) และสร้างความสัมพันธ์ผ่านตัวแปรของการเกิดผลึกสัมพัทธ์ (Relative Crystallization, X_t) อัตราสภาพการเป็นผลึก (Crystallization Rate, Z) เวลาของการสภาพการเป็นผลึก (t) และค่า Avrami (n) ดังสมการที่ 2.26 หากนำสมการดังกล่าวไปพลอตเป็นเส้นตรง โดยแกนตั้งคือ $\log(-\ln(1 - X_t))$ แกนนอนคือ $\log(t)$ ดังนั้นจะได้ว่าความชันมีค่าเท่ากับค่า Avrami และจุดตัดแกนตั้งจะได้ค่าของ $\log(Z)$ ทั้งนี้ค่า Avrami จะบ่งบอกถึงชนิดของผลึกซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

$$\log(-\ln(1 - X_t)) = n \log(t) + \log(Z) \quad (2.26)$$

ตารางที่ 2.6 ค่า Avrami บอกลักษณะการเกิดนิวเคลียสและรูปร่างของสภาพการเป็นผลึก [27]

ค่า Avrami	รูปร่างการเติบโตของผลึก	การเกิดนิวเคลียส
1	แท่ง (Rod)	แบบเนื้อผสม
2		แบบเนื้อเดียว
2	แผ่น (Disc)	แบบเนื้อผสม
3		แบบเนื้อเดียว
3	ทรงกลม (Sphere)	แบบเนื้อผสม
4		แบบเนื้อเดียว
5	มัด (Sheaf)	แบบเนื้อผสม
6		แบบเนื้อเดียว

สำหรับจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-Isothermal Crystallization Kinetic) ทางทีมวิจัยของ N. Pengfei [28] ได้ศึกษางานวิจัยของ Avrami และนำเสนอสมการของการประยุกต์ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่และแบบไม่คงที่ ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้จากอนุพันธ์พลังงานขณะหล่อเย็นเทียบกับอุณหภูมิ (dH_c/dT) ตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_0) ถึงอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดผลึก (T_∞) ดังสมการ

$$X_t = \frac{\int_{T_0}^T (dH_c/dT) dT}{\int_{T_0}^{T_\infty} (dH_c/dT) dT} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเวลาของการตกผลึกหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิใดๆ (T) และอัตราการหล่อเย็น (q) ดังสมการ

$$t = \frac{T_0 - T}{q} \quad (2.28)$$

2.7 สัณฐานวิทยาของโฟม (Foam Morphology)

เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของโฟมมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของโครงสร้างของโฟมหรือเรียกว่า สัณฐานวิทยาของโฟม เช่น ขนาดของฟอง ความหนาแน่นฟอง การกระจายตัวของฟอง สัดส่วนการขยายตัว ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam Index) เป็นต้น เพราะฉะนั้นจึงมีการศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมที่เกิดขึ้น ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) และนำมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

2.7.1 ความหนาแน่นฟอง (Bubble Density) [29]

สมมติฐานเบื้องต้นคือกำหนดให้ฟองมีขนาดเป็นทรงกลม และมีการกระจายตัวของฟองอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง หรือเรียกโฟมที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า โฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam) ซึ่งลักษณะและโครงสร้างแบบนี้ส่งผลให้โฟมที่ได้มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง ในขณะที่จำนวนฟอง (N) สามารถรายงานผลได้สองประเภทคือ ความหนาแน่นฟอง (N_F) คือจำนวนของฟองต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโฟม (V_F) และอีกประเภทหนึ่งคือความหนาแน่นนิวเคลียส (Nucleus Density, N_0) คือจำนวนของฟองต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของพอลิเมอร์ (V_P) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.29) และ (2.30) ตามลำดับ

$$N_F = \frac{N}{V_F} \quad (2.29)$$

$$N_0 = \frac{N}{V_P} \quad (2.30)$$

หรือความหนาแน่นฟองสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_F = \left[\frac{n}{A} \right]^2 \quad (2.31)$$

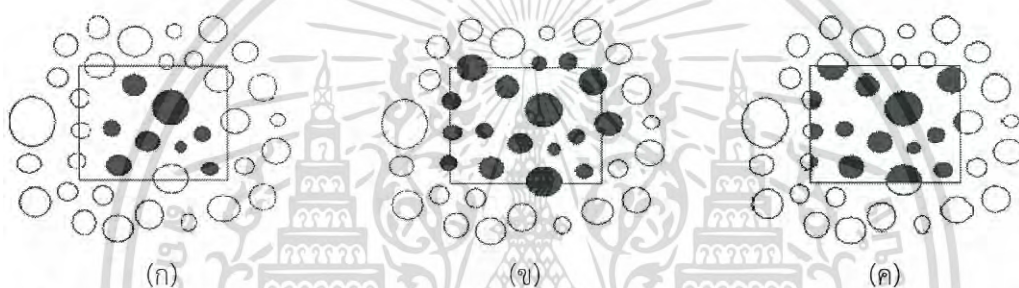
เมื่อ n คือ จำนวนฟองหรือฟองที่นับได้จากภาพไมโครกราฟ (ฟอง)
 A คือ พื้นที่ในการนับจำนวนฟอง (ตารางเซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้การนับจำนวนฟองที่ได้จากภาพไมโครกราฟสามารถหาได้จาก 2 วิธี คือ การกำหนดพื้นที่ผิวและการกำหนดจำนวนฟอง หรือสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.7.1.1 การกำหนดพื้นที่ผิว

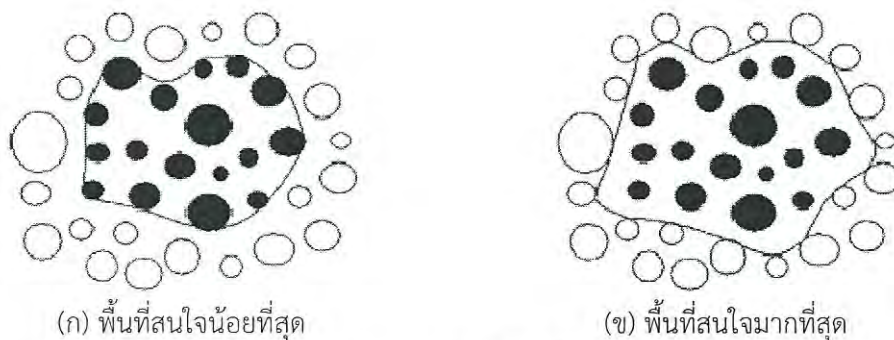
1. พิจารณาเฉพาะฟองที่อยู่ในพื้นที่ที่สนใจแบบเต็มฟอง วิธีนี้จะทำให้การนับนั้นน้อยกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.12 (ก) มีจำนวนฟองเท่ากับ 8 ฟอง
2. พิจารณาฟองทั้งหมดทั้งที่แบบเต็มฟองและแบบคาบเกี่ยวของพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้มีการนับจำนวนมากกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.12 (ข) มีจำนวนฟองเท่ากับ 17 ฟอง
3. พิจารณาพื้นที่ผิวของฟองที่อยู่ภายในพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งการนับฟองที่อยู่บริเวณขอบให้ถือเป็นครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.12 (ค) พบว่าจำนวนฟองเฉลี่ยคือ 12.5 ฟอง



รูปที่ 2.12 การนับจำนวนฟองด้วยวิธีกำหนดพื้นที่ผิว (ก) การนับจำนวนฟองแบบเต็มฟอง (ข) การนับจำนวนฟองแบบเต็มฟองและแบบคาบเกี่ยว (ค) การนับจำนวนฟองแบบเฉลี่ย

2.7.1.2 การกำหนดจำนวนฟอง

1. กรณีพื้นที่ที่สนใจมีขนาดน้อยที่สุด กำหนดโดยขอบนอกของฟองที่ถูกนับ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 (ก) วิธีนี้จะทำให้พื้นที่ผิวที่นับได้น้อยกว่าพื้นที่ผิวจริง ดังนั้นจะทำให้ได้ความหนาแน่นฟองมากกว่าความเป็นจริง
2. กรณีพื้นที่ที่สนใจมีขนาดมากที่สุด ซึ่งถูกจำกัดโดยเส้นภายในรอยต่อของฟองที่อยู่ล้อมรอบ ดังรูปที่ 2.13 (ข) เทคนิคนี้จะทำให้ค่าพื้นที่ผิวที่ได้มากกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นฟองน้อยกว่าความเป็นจริง



(ก) พื้นที่สนใจน้อยที่สุด

(ข) พื้นที่สนใจมากที่สุด

รูปที่ 2.13 การนับจำนวนฟองด้วยวิธีกำหนดจำนวนฟอง

2.7.2 สัดส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio, ϕ)

สัดส่วนการขยายตัวนิยามได้จากปริมาตรของโฟม (V_F) ที่ขยายตัวหลังจากการเกิดโฟม ต่อปริมาตรของพอลิเมอร์ (V_P) หรือคำนวณได้จากสมการ

$$\phi = \frac{V_F}{V_P} = \frac{(\tilde{m}_P + \tilde{m}_G)/\rho_F}{\tilde{m}_P/\rho_P} \quad (2.32)$$

เมื่อ \tilde{m}_P คือ น้ำหนักพอลิเมอร์ (กรัม)
 \tilde{m}_G คือ น้ำหนักแก๊ส (กรัม)
 ρ_F คือ ความหนาแน่นโฟม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 ρ_P คือ ความหนาแน่นพอลิเมอร์ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

กำหนดให้น้ำหนักของแก๊สน้อยมาก จะส่งผลให้สัดส่วนการขยายตัวคำนวณได้จากสมการ

$$\phi = \rho_P/\rho_F \quad (2.33)$$

2.7.3 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam Index, η) [30]

ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก สามารถบ่งบอกถึงลักษณะของโฟมที่เกิดขึ้นที่เบี่ยงเบนไปจากโฟมไอโซโทรปิก ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \log \left(\frac{N_{F,MB}}{N_F^0} \right) \quad (2.34)$$

เมื่อ $N_{F,MB}$ คือ ความหนาแน่นฟองที่คำนวณมาจากพื้นฐานของสมดุลมวลสาร ซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์ของสัดส่วนการขยายตัว (ϕ) และขนาดของฟองเฉลี่ย (d) ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{F,MB} = \frac{6}{\pi(d)^3} \left(1 - \frac{1}{\phi}\right) \quad (2.35)$$

ในขณะที่ N_F^0 คือความหนาแน่นฟองอ้างอิง โดยคิดเทียบจากโฟมไอโซโทรปิก ($\eta=0$) ดังสมการ

$$N_F^0 = \varphi_0 \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2} \quad (2.36)$$

เมื่อ n คือ จำนวนฟองหรือฟองที่นับได้จากภาพไมโครกราฟ (ฟอง)
 A คือ พื้นที่ในการนับจำนวนฟอง (ตารางเซนติเมตร)

กำหนดให้ไอโซโทรปิกแฟกเตอร์ (Isotropic Factor, φ_0) ของโฟมความหนาแน่นต่ำมีค่าเท่ากับ 0.1453

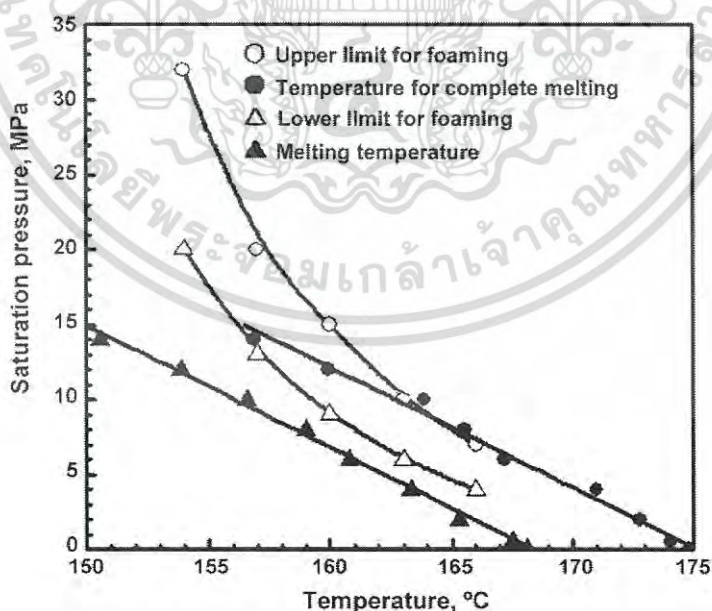
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

U.K. Dwivedi และ Navin Chand [31] ศึกษาผลของปริมาณของ MA-g-PP คือร้อยละ 0 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทนต่อการขัดสี (Abrasive) และคุณสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ผลการศึกษาพบว่าการเติม MA-g-PP ทำให้พื้นผิวเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนมีการยึดติดกับพื้นผิวของเส้นใยสับปะรดได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ที่ดีขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ MA-g-PP ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการทนต่อการขัดสีได้ดีในช่วงแรงขัดต่ำคือ 1 และ 3 นิวตัน และปริมาณของ MA-g-PP ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการทนต่อการขัดสีได้มากในช่วงแรงขัดสูงคือ 5 และ 7 นิวตัน

N. Sombatsompop และคณะ [32] ศึกษาผลของชนิด (MZ203D MD353D และ MD411D) และปริมาณ (ร้อยละ 0 2.0 4.2 6.4 8.7 และ 11.1 โดยน้ำหนักของซีลี้อย) ของ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงซีลี้อย (ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) ได้แก่ มอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus) ความต้านทานแรงดึง และความยืด (Elongation) ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ MA-g-PP ของทั้งสามชนิด ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อปริมาณของ MA-g-PP เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของซีลี้อย แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าทำให้ความยืดลดลงและคงที่เมื่อปริมาณของ MA-g-PP เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของซีลี้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhi-Mei Xu และคณะ [9] ศึกษาพฤติกรรมกระบวนการเกิดโฟมของโพลีโพรพิลีนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ได้มีการศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิ ความดัน (Saturation Pressure) และอัตราการปล่อยความดัน (Depressurization Rate) ที่ส่งผลต่อโครงสร้างของโฟมและสัดส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร (Volume Expansion Ratio) ในทำนองเดียวกันได้มีการศึกษาช่วงของการเกิดโฟม (Likely Foaming Zone) ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งหาได้จากขีดจำกัดบน (Upper Limit) และขีดจำกัดล่าง (Lower Limit) ของอุณหภูมิและความดันของการเกิดโฟม การหาขีดจำกัดบนของการเกิดโฟม (Upper Limit for Foaming) สามารถหาได้จากความแข็งแรงของการหลอม (Melt Strength) ของโพลีโพรพิลีน ในทำนองเดียวกันขีดจำกัดล่างของการเกิดโฟม (Lower Limit for Foaming) สามารถหาได้จากความสามารถของการเปลี่ยนสภาพ (Deformability) ของโพลีโพรพิลีน จากการวิเคราะห์ช่วงของการเกิดโฟมพบว่า ช่วงอุณหภูมิของการเกิดโฟมมีค่ามากที่สุดเพียง 4 องศาเซลเซียส ที่ความดันอิ่มตัว (Saturation Pressure) 200 บาร์ ในขณะที่อุณหภูมิกงที่ 155 องศาเซลเซียส มีช่วงความดันอิ่มตัวกว้างที่สุดคือ 200 – 330 บาร์ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกิดโฟมส่งผลต่อความสามารถในการเกิดโฟม ตรงข้ามกับการเพิ่มขึ้นของความดันในการเกิดโฟม คือสภาวะเกิดโฟมที่อุณหภูมิโฟมต่ำ ความดันสูง ส่งผลให้โฟมมีความสม่ำเสมอมากกว่าการเกิดโฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมสูง ความดันต่ำ ในขณะที่อัตราการลดความดันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โฟมที่ได้นั้นมี ความหนาแน่นพองสูงขึ้น แต่สำหรับขนาดพองและสัดส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตร จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง และจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการปล่อยความดัน

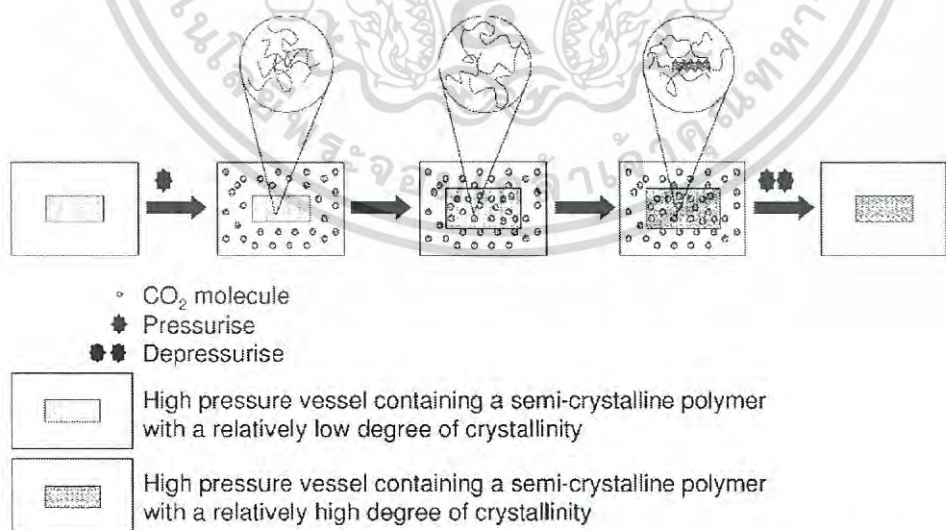


รูปที่ 2.14 แสดงขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของการเกิดโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhen-hua Chen และคณะ [21] ศึกษาสมการสถานะของ CK-SAFT Perturbed-Chain SAFT (PC-SAFT) Sanchez-Lacombe (SL) และ Sako-Wu-Prausnitz (SWP) เพื่อใช้ในการทำนายและเปรียบเทียบค่าการละลายที่ได้จากการทดลองของแก๊สไนโตรเจน เอทิลีน (C_2H_4) บิวเทน ไอโซบิวเทน ($iso-C_4H_{10}$) และคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ สำหรับในกรณีของสารที่มีองค์ประกอบมากกว่าหนึ่งชนิดได้มีการนำ Mixing Rule ของ van der Waals มาประยุกต์ใช้กับสมการสถานะข้างต้น จากผลการวิเคราะห์พบว่าสมการสถานะของทั้ง PC-SAFT และ SL มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ อีกทั้งยังพบว่าสมการสถานะของ SL นั้นมีความแม่นยำในการทำนายค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์กึ่งผลึก มากกว่าในกรณีของพอลิเมอร์อสัณฐาน

Maartjie F. Kemmere และ Thierry Meyer [17] ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของระบบที่ประกอบด้วยของไหลเหนือวิกฤตและพอลิเมอร์ ในการศึกษาระบบของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์พบว่า ปัจจัยแรกๆที่ควรคำนึงถึงคือการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ ซึ่งจะส่งผลต่อการกำหนดสถานะที่ใช้ในระบบ อีกทั้งจากผลการศึกษายังพบว่า คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนทางโครงสร้างของพอลิเมอร์คือ ทำให้พอลิเมอร์มีปริมาณของผลึกเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.15 โดยเริ่มแรกระบบประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกน้อย เมื่อเวลาผ่านไปคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่และละลายเข้าไปในพอลิเมอร์จึงทำให้เกิดการขยับของสายโซ่ (Chain Mobility) หากมีเวลามากเกินพอสายโซ่ของพอลิเมอร์จะจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบ ซึ่งก็คือการเกิดสภาพการเป็นผลึก ทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมีดีกรีสภาพการเป็นผลึกสูงขึ้น



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการเกิดสภาพการเป็นผลึกจากคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ryan Gosselin และ Denis Rodrigue [29] ศึกษาโฟมพอลิโพลีเอทิลีนที่ถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด (Extrusion) และการฉีด (Injection) เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณจำนวนฟองเชิงพื้นที่ผิว ในขณะที่เดียวกันเป็นการหาวิธีในการแปลงจำนวนฟองเชิงพื้นที่ผิวไปเป็นจำนวนฟองในเชิงปริมาตร วิธีการสองวิธีในการคำนวณหาจำนวนฟองเชิงพื้นที่ผิวคือ วิธีแรกเป็นการกำหนดพื้นที่ผิว จากนั้นนับจำนวนฟองที่อยู่ภายในพื้นที่นั้น อีกวิธีหนึ่งคือ การกำหนดจำนวนฟอง จากนั้นจึงหาพื้นที่ที่ล้อมรอบฟองที่กำหนดไว้ จากผลการทดลองพบว่า ทั้งสองวิธีให้ความหนาแน่นฟองเชิงพื้นที่ผิวและความหนาแน่นฟองของโฟมที่ได้จากการฉีดนั้นความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 และในขณะที่ใช้ในการศึกษาหาความหนาแน่นฟองคือเป็นการหาความหนาแน่นฟองต่อหน่วยปริมาตรโฟม ประกอบไปด้วยสามวิธี ซึ่งมีหลักการบนพื้นฐานของรูปทรงของฟองทรงกลมหรือทรงไข่ ผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีทั้งสามนี้ ให้ผลที่คล้ายคลึงกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ที่โฟมที่ได้จากการฉีด จะได้ฟองที่มีลักษณะเป็นทรงกลม แต่จะมีความแตกต่างกันเมื่อขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีการอัดรีด ซึ่งจะได้ฟองที่มีลักษณะเป็นทรงรีหรือทรงรูปไข่

Ying-Hsiao Li และคณะ [33] ศึกษาสมดุลวัฏภาคของไอและของเหลว (Vapor and Liquid Equilibrium, VLE) ของระบบที่ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนที่อุณหภูมิต่างๆ กันคือ 40 80 และ 120 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นส่งผลให้ความดันวิกฤตเทียบของของผสมเพิ่มสูงขึ้น คือเพิ่มขึ้นเป็น 1,085 1,546 และ 1,682 ปอนด์/ตารางนิ้ว

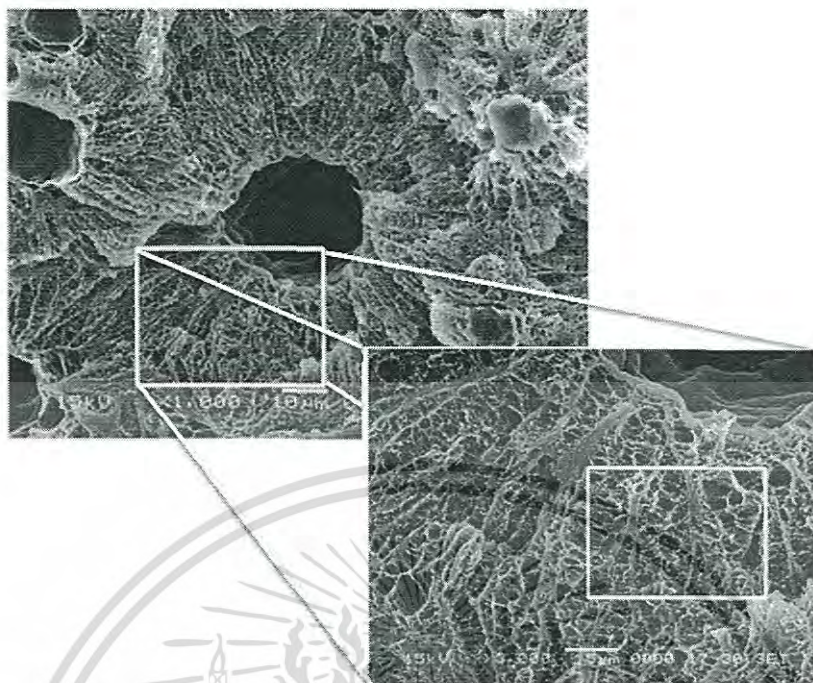
Deming Mao และคณะ [34] ศึกษาโมเดลในกระบวนการถ่ายเทมวลของการเจริญเติบโตของฟองในขั้นตอนการเกิดโฟม โดยสมมติฐานสำหรับรูปแบบของความเข้มข้น (Concentration Profile) ของ IVA นี้ใช้ได้กับกรณีที่มีความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียง 5% เท่านั้น อย่างไรก็ตามวิธี IVA นำไปประยุกต์ใช้กับการเกิดโฟมด้วยทางเคมีได้ยาก เนื่องจากระบุรูปแบบความเข้มข้นของแก๊สในระบบได้ยาก งานวิจัยนี้ศึกษาการเจริญเติบโตของฟองด้วยการเกิดโฟมทางกายภาพ ซึ่งการเจริญเติบโตนี้เป็นผลจากอัตราการเกิดนิวเคลียส และแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ แบบที่หนึ่งคือการขยายตัวอิสระ (Free Expansion) ในขั้นตอนนี้ถูกกำหนดให้มีการเกิดนิวเคลียสของฟอง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดความดันจากสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated State) มาถึงความดันต่ำ ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊สมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และแบบที่สองคือ การขยายตัวไม่อิสระ (Limited Expansion) ซึ่งจะเกิดการถ่ายเทมวลเนื่องจากความต่างของความเข้มข้นของแก๊ส เป็นผลให้เกิดการเจริญเติบโตของฟอง โดยที่ความดันเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากคำอธิบายเบื้องต้นนี้สามารถสรุปได้ว่า ในขั้นตอนการขยายตัวอิสระเกิดจากผลต่างของความดันระหว่างฟองและพอลิเมอร์และเกิดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น ในขณะที่การขยายตัวไม่อิสระเป็นผลมาจากผลต่างของความเข้มข้นและเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานกว่าในขั้นตอนการขยายตัวอิสระ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X. L. Jiang และคณะ [35] ศึกษาการเกิดโพลีเมอร์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (iPP) ที่มีโครงสร้างผลึกต่างๆ กันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมของ iPP หรือเรียกว่า Solid-State จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของ iPP พบว่าส่วนใหญ่มีโครงสร้างผลึกเป็น Spherulite ซึ่งประกอบด้วย Lamellae ที่แผ่ออกไปรอบข้างและ Interlamellar ดังรูปที่ 2.16 และเมื่อพิจารณาสัญญาณวิทยาของโพลีเมอร์ iPP พบว่าโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านและละลายในโครงสร้างของอสัณฐานของ iPP เท่านั้น จึงทำให้ฟองที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ อีกทั้งยังสรุปได้ว่า ฟองที่มีขนาดระดับไมโครสามารถเกิดขึ้นทั้งบริเวณแกนกลางของ Spherulite บริเวณโครงสร้างอสัณฐาน บริเวณรอยต่อระหว่าง Spherulite และ Spherulite และบริเวณ Interlamellar ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 โครงสร้างผลึกแบบ Spherulite ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน [36]

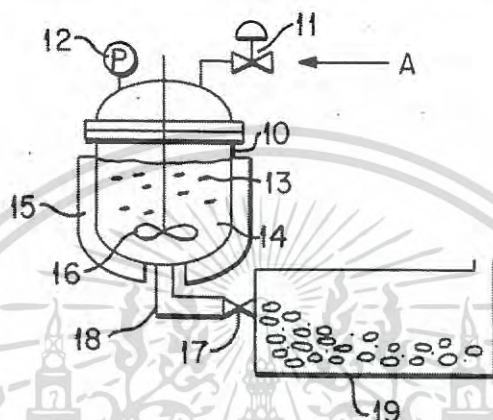


รูปที่ 2.17 ภาพไมโครกราฟของโฟมไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโฟม 156 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิหลอมของไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนคือ 155 องศาเซลเซียส)

M.R. Holl และคณะ [37] ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเป็นไมโครเซลล์ลาร์ โฟมของพีวีซี โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณของสารเติมแต่งในพีวีซีและอุณหภูมิเกิดโฟมช่วง 65 – 90 องศาเซลเซียส พีวีซีที่ใช้ทดสอบมี 3 ชนิดคือ PVC-A เป็นพีวีซีที่มีการใส่สารเติมแต่งในปริมาณสูง PVC-B และ PVC-C ไม่ใส่สารเติมแต่ง เพื่อให้สมบัติใกล้เคียงกับพีวีซีเรซิน แต่จะมีการเติมสารหล่อลื่นภายในที่ต่างชนิดกัน ความดันอัดตัวที่ใช้เกิดโฟมคือ 60 บาร์ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 องศาเซลเซียส และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำฟู่ พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ละลายใน PVC-A ได้น้อยกว่า PVC-B และ PVC-C เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนียววิกฤตละลายในสารเติมแต่งและพลาสติกไซเซอร์น้อยกว่าละลายในพีวีซีเรซิน พีวีซีที่มีสารเติมแต่งมากจะได้โฟมที่เป็นฟองเปิดมากขึ้น และมีการกระจายตัวของขนาดฟองมาก เนื่องจากสารเติมแต่งเหล่านี้ คือสารช่วยเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อผสม สำหรับ PVC-B และ PVC-C เกิดเป็นโฟมได้เป็นฟองปิด มีการกระจายตัวของขนาดฟองน้อย การเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมมีผลทำให้ได้ฟองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

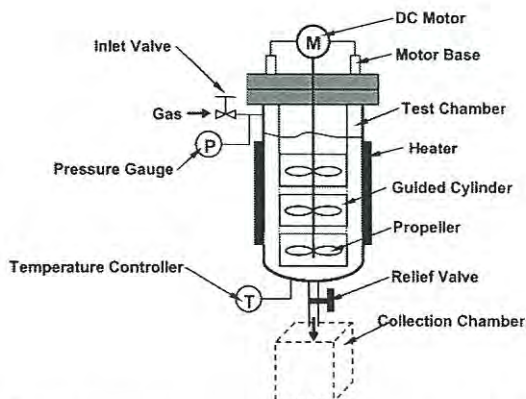
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yoshimura และคณะ [38] ศึกษาการผลิต Expanded Polymer ด้วยการใช้แก๊สเฉื่อยที่ประกอบด้วยไนโตรเจนผสมน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร โดยมีขนาดเม็ดพลาสติกเริ่มต้น 0.5 - 3 มิลลิเมตร จากนั้นผสมกับน้ำและสาร Anti-Fusing แล้วนำของผสมบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ดังรูป 2.18 ถัดมาจึงให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ แล้วบ้อนแก๊สเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อพอลิเมอร์อิมัตว์ด้วยแก๊ส จึงปล่อยของผสมออกทางหมายเลข 18 เพื่อเข้าสู่ถังเก็บ หมายเลข 19 ที่ความดันบรรยากาศ ในขณะที่เดียวกันคงความดันของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่



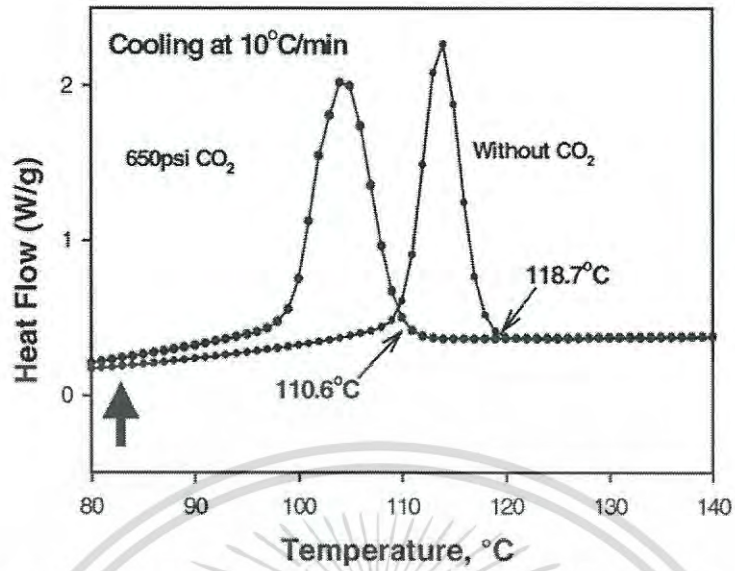
รูปที่ 2.18 กระบวนการผลิต Expanded Polymer เมื่อหมายเลข 10 คือ เครื่องปฏิกรณ์ หมายเลข 11 คือ วาล์ว หมายเลข 12 คือ Pressure Gauge หมายเลข 13 คือ พอลิเมอร์ หมายเลข 14 คือ Dispersing Medium หมายเลข 15 คือ เครื่องกำเนิดความร้อน หมายเลข 16 คือ ใบพัด หมายเลข 17 คือ วาล์ว หมายเลข 18 คือ ท่อ และ 19 คือ ถังเก็บ

Y. Guo และคณะ [39] ศึกษากระบวนการผลิตโฟม EPP ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับแล็บสเกล (Lab-Scale) การศึกษาเบื้องต้นพบว่าในการปั่นกวนควรให้มีกระแสวน (Vortex) ของของผสม ภายในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อป้องกันการเกาะติดกันของเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน ด้วยการใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมและใช้ใบพัด (Propeller) ที่มีลักษณะเป็นสามชั้น เพื่อช่วยให้เกิดกระแสวน ทั้งนี้มีการศึกษาการเกิดโฟม EPP ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันเกิดโฟม 800 ปอนด์/ตารางนิ้ว อุณหภูมิเกิดโฟม 130 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 20 นาที โดยใช้วิธีลดความดันด้วยการปล่อยของผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ลงออกทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.19 ผลการทดลองพบว่า โฟม EPP ที่ได้นั้นมีสัดส่วนการขยายตัวสูงถึง 16 เท่า

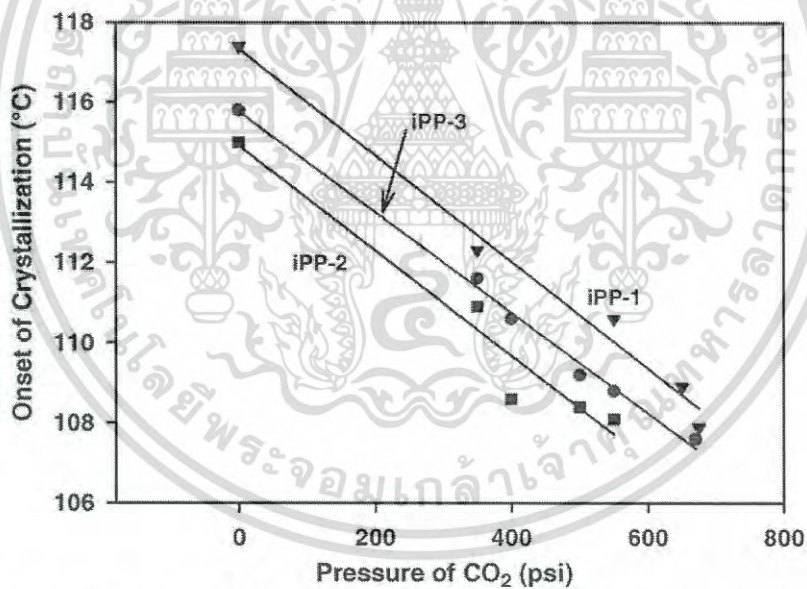


รูปที่ 2.19 กระบวนการเกิดโพลีเมอร์ EPP ในระดับแลบสเกล

Manika Varma-Nair และคณะ [40] ศึกษาจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของพอลิเมอร์กิ่งอสัณฐานคือไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่เกิดจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ รูปที่ 2.20 แสดงผลของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่ถูกหล่อเย็นด้วยอัตราการหล่อเย็น 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้สภาวะแก๊สเฉื่อย พบว่ามีอุณหภูมิเริ่มต้นของสภาพการเป็นผลึกเท่ากับ 118.7 องศาเซลเซียส เมื่อหล่อเย็นภายใต้สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 650 ปอนด์/ตารางนิ้ว พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของสภาพการเป็นผลึกลดลงเป็น 110.6 องศาเซลเซียส ซึ่งนั่นหมายความว่า ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีสภาพการเป็นผลึกง่ายกว่ากรณีไม่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ อนึ่งเมื่อพิจารณาผลของปริมาณการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยการปรับความดันต่ออุณหภูมิเริ่มต้นของสภาพการเป็นผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนดังรูปที่ 2.21 พบว่าเมื่อความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วง 0 - 600 ปอนด์/ตารางนิ้ว ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของสภาพการเป็นผลึกเฉลี่ยลดลงจาก 116 องศาเซลเซียสเป็น 108 องศาเซลเซียส นั่นหมายถึงปริมาณการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้นส่งผลให้มีสภาพการเป็นผลึกง่ายขึ้น



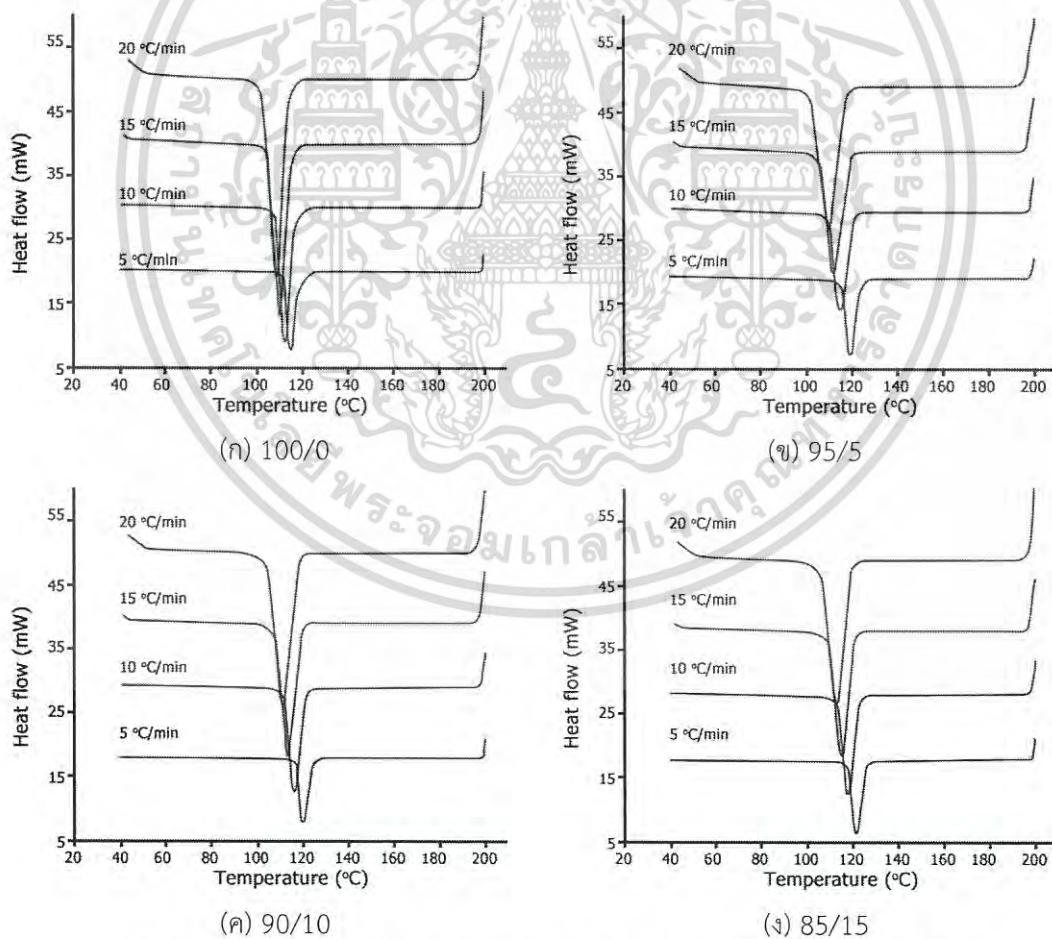
รูปที่ 2.20 สภาพการเป็นผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่เกิดจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.21 การเสริมสภาพพลาสติก (Plasticization) ของพอลิโพรพิลีนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

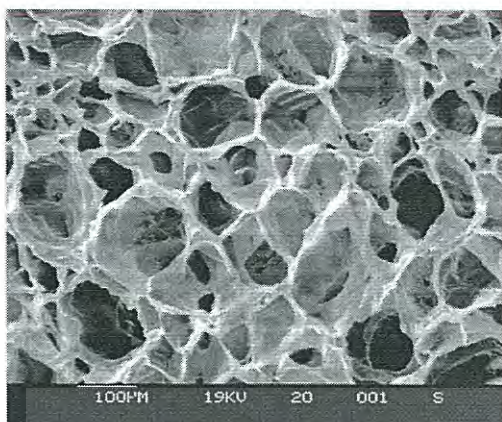
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chunling Xin และคณะ [41] ทำการศึกษาสภาพการเป็นผลึกที่ส่งผลต่อสมบัติของ โฟมพอลิโพรพิลีน งานวิจัยนี้เลือกใช้ Ultra-high Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) ผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อปรับสภาพการเป็นผลึก โดยมีอัตราส่วนพอลิโพรพิลีน/UHMWPE คือ 100/0 95/5 90/10 และ 85/15 (ร้อยละโดยมวล) ข้อมูลของการศึกษาสภาพการเป็นผลึกคือ อุณหภูมิหลอมดังรูปที่ 2.22 จากรูปพบว่า การเพิ่มขึ้นของ UHMWPE จากร้อยละ 0 เป็น 5 10 และ 15 โดยมวล ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิหลอมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 117 เป็น 119 120 และ 122 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นั่นหมายถึงการเติม UHMWPE ส่งผลให้มีสภาพการเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้น สันฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสมแตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.23 ที่ส่วนผสม 100/0 (รูป 2.23 (ก)) มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกน้อยที่สุดจึงมีฟองขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร และมีลักษณะคล้าย โฟมแบบฟองเปิด แต่เมื่อเพิ่มส่วนผสมของ UHMWPE เป็นร้อยละ 5 10 และ 15 โดยมวล หรืออีกนัยสำคัญคือเป็นการเพิ่มดีกรีสภาพการเป็นผลึก พบว่าโฟมพอลิเมอร์ผสมมีขนาดฟองเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร โดยประมาณ

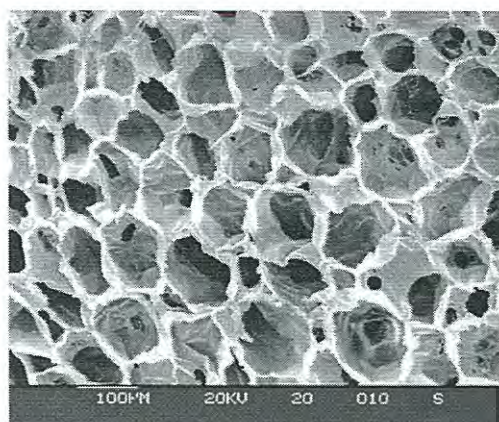


รูปที่ 2.22 ภาพเทอร์โมแกรมแบบอุณหภูมิตั้งที่ของพอลิเมอร์ผสม ที่ส่วนผสมต่างๆ

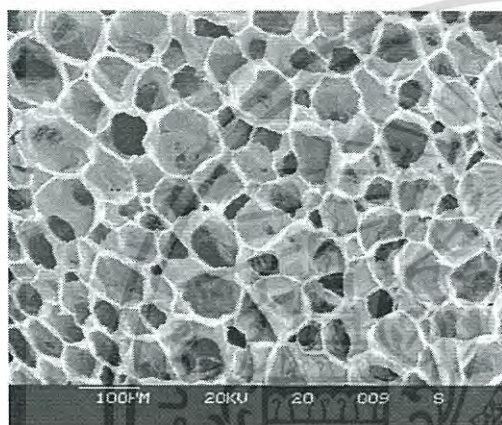
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



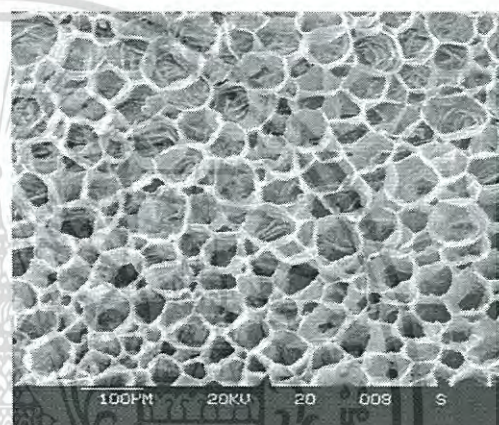
(ก) 100/0



(ข) 95/5



(ค) 90/10

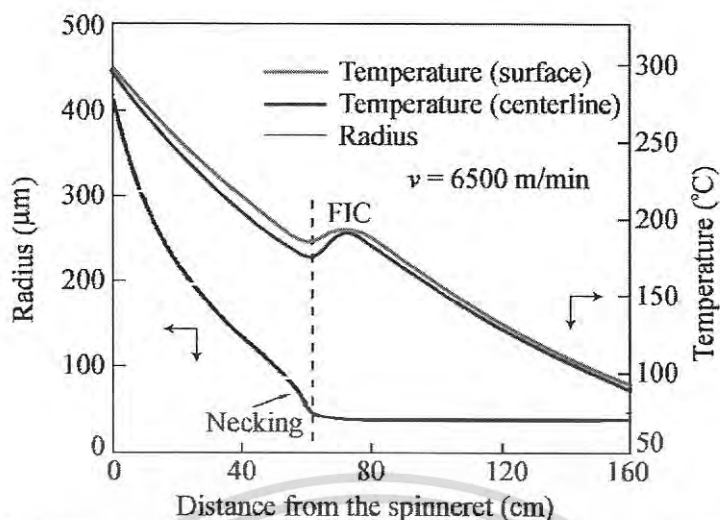


(ง) 85/15

รูปที่ 2.23 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสม ที่ส่วนผสมต่างๆ

Hong Zheng และคณะ [42] ได้จำลองอุณหภูมิของเส้นใยตามระยะห่างจากหัวตาย ผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งอธิบายได้ว่าระยะ 0 - 80 เซนติเมตร อุณหภูมิที่บริเวณผิวต่ำกว่าอุณหภูมิบริเวณแกนกลาง อันเนื่องมาจากบริเวณผิวมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าบริเวณแกนกลาง จึงทำให้บริเวณผิวมีอุณหภูมิต่ำกว่า แต่เมื่อระยะห่างจากหัวตายมากกว่า 80 เซนติเมตร การถ่ายเทความร้อนทั้งบริเวณผิวและแกนกลางใกล้เคียงกัน จึงทำให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลการจำลองนี้พบว่าการที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ส่งผลให้สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยย้อมแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



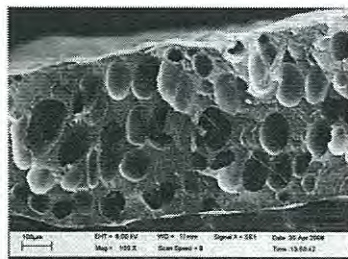
รูปที่ 2.24 ผลที่ได้จากการจำลองอุณหภูมิและรัศมีของเส้นใยที่อัตราการไหลเชิงมวล 2.2 กรัม/นาที

2.9 งานวิจัยและองค์ความรู้ที่ผ่านมา

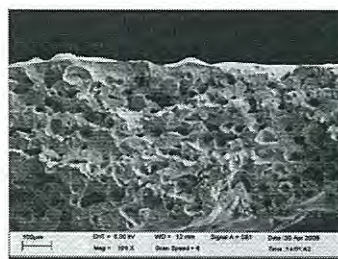
2.9.1 สันฐานวิทยาของโพลิเอทิลีน

2.9.1.1 ผลของพอลิเมอร์ผสมต่อสันฐานวิทยาของโพลิเอทิลีน

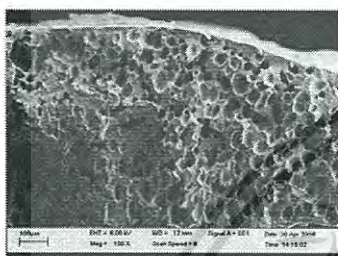
หัวข้อนี้เลือกใช้พอลิเอทิลีนสองชนิดคือ PE-A และ PE-B แล้วนำมาผสมกันที่อัตราส่วนต่างๆ (PE-A/PE-B) ดังนี้ 100/0 95/5 90/10 85/15 และ 80/20 (ร้อยละโดยมวล) จากนั้นใส่สารทำฟูทางเคมีคือ อะโซไดคาร์โบนาไมด์ 3 phr และสารเกิดนิวเคลียสคือทัลค์ 0.5 phr ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.25 โฟม PE-A (2.25 (ก)) เกิดฟองขนาดใหญ่ประมาณ 100 ไมโครเมตร เมื่อเติม PE-B อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยมวล โฟมพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นมีฟองขนาดเล็กลงอย่างชัดเจน แต่การกระจายตัวของฟองยังไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนของ PE-B เป็นร้อยละ 10 15 และ 20 โดยมวล พบว่าพอลิเมอร์เกิดเป็นโฟมได้ดีขึ้น ฟองที่ได้มีลักษณะเป็นวงกลมและมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น อีกทั้งยังพบว่าการเพิ่มปริมาณของ PE-B ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยมวล ทำให้ฟองมีขนาดเล็กลง (เล็กกว่า 50 ไมโครเมตร) ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมสามารถช่วยให้ความสามารถในการเป็นโฟมที่ดีขึ้น



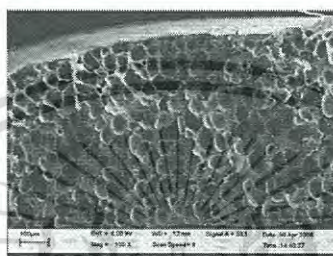
(ก) 100 : 0



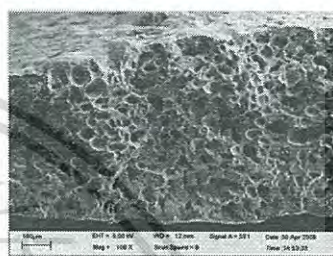
(ข) 95 : 5



(ค) 90 : 10



(ง) 85 : 15



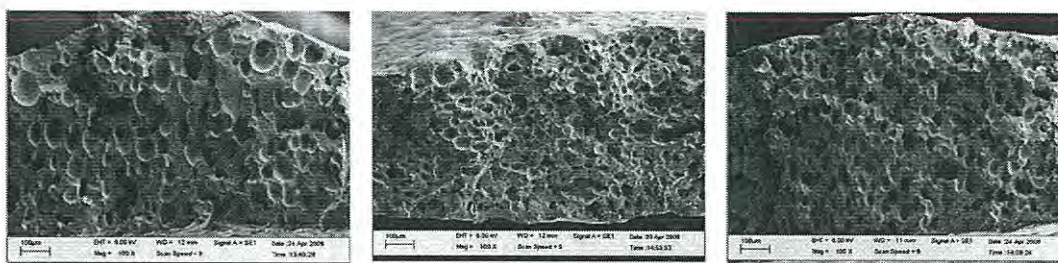
(จ) 80 : 20

รูปที่ 2.25 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยมีอัตราส่วนผสมของ PE-A ต่อ PE-B เป็นร้อยละโดยมวล มีสารทำฟู่ 3 phr และสารเกิดนิวเคลียส 0.5 phr ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 200 องศาเซลเซียส

2.9.1.2 ผลของสารเกิดนิวเคลียสต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเอทิลีน

จากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนของ PE-A/PE-B ที่ 80/20 ให้ฟองขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำไปทำเป็นสายไฟ ดังนั้นจึงนำมาศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนสารเกิดนิวเคลียสคือ 0, 0.5 และ 1.0 phr ผลคือโฟมพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารเกิดนิวเคลียส (0 phr) มีฟองเกิดขึ้นน้อย การกระจายตัวของฟองยังไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งฟองมีขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร) ดังรูปที่ 2.26 (ก) เมื่อเพิ่มสารเกิดนิวเคลียสเป็น 0.5 phr และ 1.0 phr ดังรูปที่ 2.26 (ข) และ (ค) ตามลำดับ พบว่าฟองเกิดมากขึ้น มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นและฟองมีขนาดเล็กลง (เล็กกว่า 50 ไมโครเมตร) เนื่องจากสารเกิดนิวเคลียสมีหน้าที่ลดพลังงานและเพิ่มพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ทำให้นิวเคลียสเกิดได้มากขึ้น [43-44] และขยายตัวจนกลายเป็นฟองขนาดเล็กจำนวนมาก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารเกิดนิวเคลียสจึงส่งผลให้ความหนาแน่นฟองเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 0.0 phr

(ข) 0.5 phr

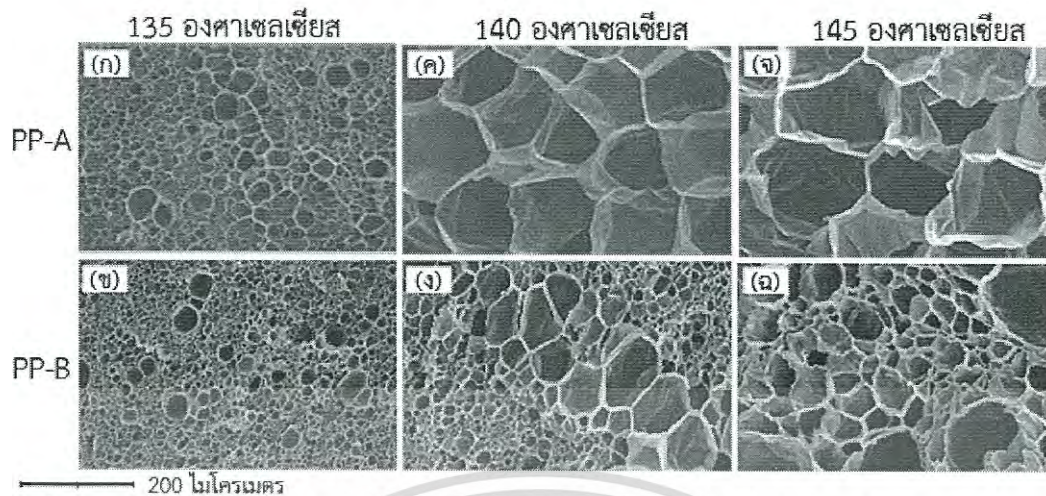
(ค) 1.0 phr

รูปที่ 2.26 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ของ PE-A และ PE-B (80/20) สารทำฟู่ 3.0 phr และสารเกิดนิวเคลียสด้วยอัตราส่วนต่างๆ

2.9.2 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิโพรพิลีน

หัวข้อนี้ใช้พอลิโพรพิลีนสองชนิดคือ PP-A และ PP-B โดย PP-A คือพอลิเมอร์เอกพันธ์ (Homopolymer) ที่มีอุณหภูมิหลอม 139 องศาเซลเซียส แต่ PP-B คือพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) จึงทำให้มีอุณหภูมิหลอมสองตำแหน่งคือ 136 และ 139 องศาเซลเซียส เมื่อนำพอลิโพรพิลีนทั้งสองชนิดนี้ไปขึ้นรูปโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ที่สภาวะความดันเกิดโฟม 120 บาร์ เวลา 20 นาที เวลาการลดความดันน้อยกว่า 5 วินาที พบว่าโฟม PP-A และ PP-B ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 135 องศาเซลเซียส มีขนาดฟองที่เกิดขึ้นเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิหลอม จึงส่งผลให้พอลิโพรพิลีนหลอมเพียงเล็กน้อยและคาร์บอนไดออกไซด์ละลายได้น้อยเช่นกัน ดังรูป 2.27 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 140 องศาเซลเซียส พบว่าโฟม PP-A มีขนาดฟองใหญ่ (ประมาณ 100 ไมโครเมตร) ฟองกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และฟองมีความเป็นระเบียบ ดังรูปที่ 2.27 (ค) เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟมมากกว่าอุณหภูมิหลอม พอลิโพรพิลีนจึงมีความแข็งแรงของการหลอมที่เหมาะสม แต่สำหรับในกรณีของ PP-B โฟม นั้นเกิดโฟมที่มีลักษณะแบบไบโมดอล (Bimodal) คือโครงสร้างโฟมที่สามารถแบ่งขนาดฟองเฉลี่ยได้เป็นสองขนาด ดังรูปที่ 2.27 (ง) และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมสูงถึง 145 องศาเซลเซียส พบว่าทั้งโฟม PP-A และ PP-B มีขนาดฟองใหญ่ (ประมาณ 100 ไมโครเมตร) และฟองที่เกิดขึ้นมีรูปทรงที่ไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากที่อุณหภูมิเกิดโฟมนี้สูงกว่าอุณหภูมิหลอมของพอลิโพรพิลีนทั้งสองชนิด จึงทำ ความแข็งแรงของการหลอมน้อย ฟองที่ได้นั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ไม่สามารถคงสภาพฟองได้ดีเท่าที่ควร ดังรูปที่ 2.27 (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ

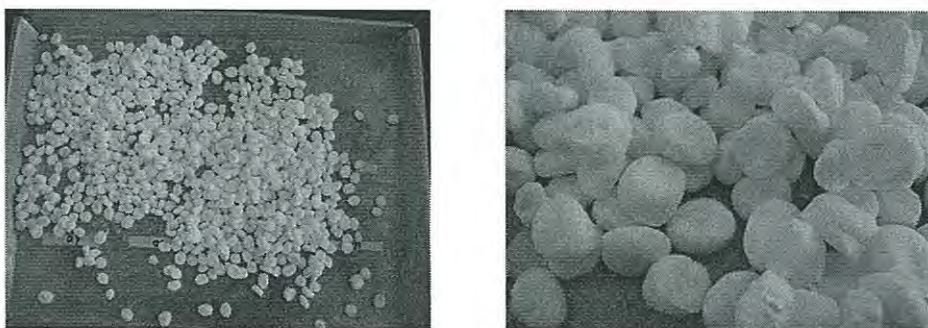
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ภาพไมโครกราฟของโฟม PP-A และ PP-B ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 120 บาร์ และเวลา 20 นาที

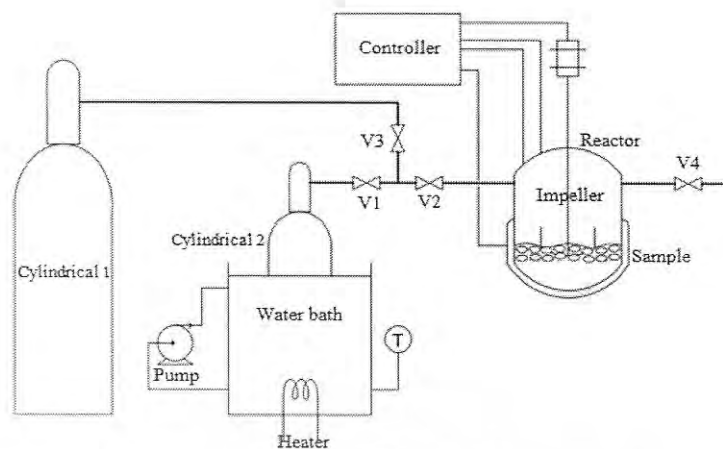
2.9.3 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิโพรพิลีนบีดส์ (Expanded Polypropylene Beads)

เนื่องจาก PP-B เป็นพอลิเมอร์ร่วม จึงมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับทำโฟมคือ 135 - 140 องศาเซลเซียส จึงนำมาศึกษาโฟมพอลิโพรพิลีนบีดส์ (ดังรูปที่ 2.28) กระบวนการผลิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.29 ประกอบด้วยเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (PP-B) น้ำกลั่น สารเติมแต่ง คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และเฮกเซน* โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงขนาด 4 ลิตร (High Pressure Vessel) (สูงกว่า 100 บาร์) ที่ความดันเกิดโฟม 170 บาร์ อุณหภูมิเกิดโฟม 120 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที เวลาลดความดัน 15 วินาที ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.30 โฟมที่เกิดขึ้นมีความเป็นระเบียบ ขนาดฟองมีความสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนของเฮกเซนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.02 เป็น 0.04 และ 0.08 โดยโมล ส่งผลให้ฟองที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ โดยเพิ่มจากขนาดประมาณ 100 ไมโครเมตร เป็น 500 ไมโครเมตร ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเฮกเซนทำให้มีการกระจายความร้อนที่ดี อีกทั้งที่สภาวะดังกล่าวระบบคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนเป็นสภาวะวิกฤตเทียม (สภาวะวิกฤตเทียม 117 บาร์ 120 องศาเซลเซียส [33]) จึงทำให้ของไหลเหนือวิกฤตมีการแพร่และการละลายที่ดีขึ้น

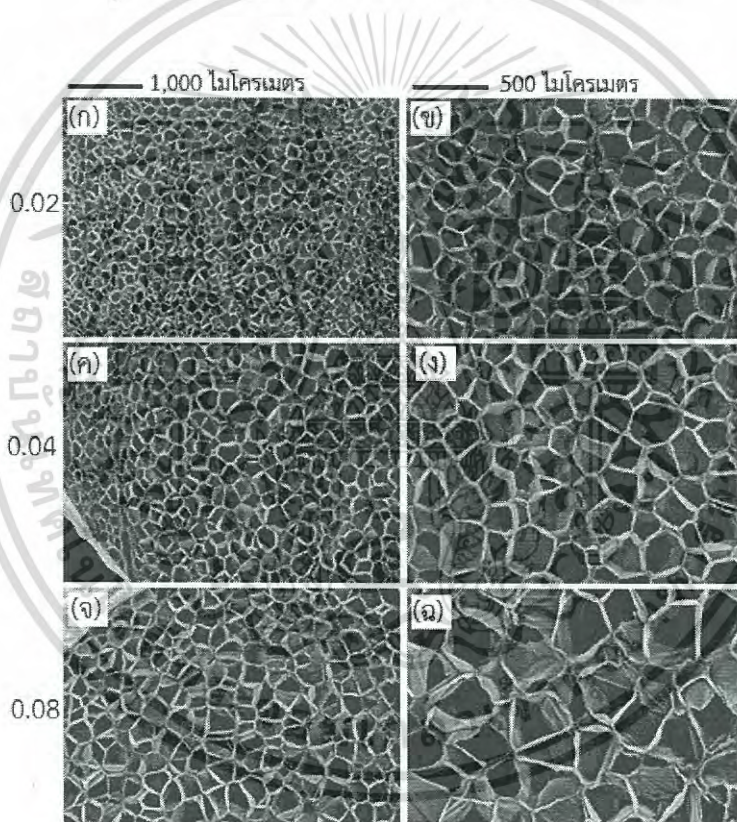


รูปที่ 2.28 โฟมพอลิโพรพิลีนบีดส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 กระบวนการผลิตโฟมพอลิโพรพิลีนบีดส์



รูปที่ 2.30 ภาพไมโครกราฟของโฟม PP-B บีดส์ ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ ของเฮกเซน ที่สภาวะเกิดโฟม ความดันเกิดโฟม 170 ± 20 บาร์ อุณหภูมิเกิดโฟม 120 องศาเซลเซียส และเวลา 120 นาที

*หมายเหตุ สารทำฟู่สามารถใช้ได้ทั้งไอโซบิวเทนและเฮกเซน แต่เนื่องจากความปลอดภัย จึงเลือกใช้เฮกเซนเนื่องจากมีการติดไฟเบอร์ 3 แต่ไอโซบิวเทนมีการติดไฟเบอร์ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยพอลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 1

3.1.1 การเตรียมเส้นใยพอลิโพรพิลีน

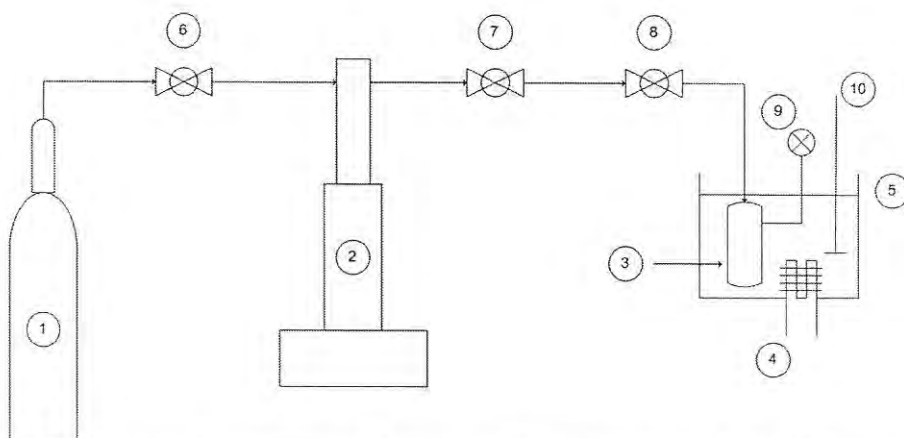
นำเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (MFI เท่ากับ 11 กรัม/10 นาที ความหนาแน่น 0.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่ซื้อจากบริษัท Japan Polypropylene Corporation (JPP) จำกัด มาเข้ากระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (KZW15TW-30MG-NH (-700)) ของบริษัท Technovel Corporation จำกัด รายละเอียดเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ประกอบด้วย หัวดายขนาด 900 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวคือ 15 มิลลิเมตร (อัตราส่วน L/D คือ 45) ความเร็วรอบเกลียวคือ 95 รอบต่อนาที และอุณหภูมิเท่ากับ 170 170 180 190 170 180 และ 180 องศาเซลเซียส การทดลองในหัวข้อนี้ทำการปรับสภาวะตามตารางที่ 3.1 เส้นใยที่ได้ถูกปล่อยให้ไหลลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลกและหล่อเย็นด้วยอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการทดลองเส้นใยพอลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 1

โค้ด	อุณหภูมิหัวดาย (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบของเกียร์ปัม (รอบต่อนาที)
T190G1	190	12.5
T200G1	200	12.5
T210G1	210	12.5
T190G2	190	15
T190G3	190	20

3.1.2 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

นำเส้นใยพอลิโพรพิลีนใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงขนาด 18 มิลลิลิตร และติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.1 โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารทำฟู่ที่สภาวะความดันเกิดโฟม 120 บาร์ อุณหภูมิเกิดโฟม 165 170 และ 175 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เวลาลดความดันน้อยกว่า 5 วินาที



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| (1) ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ | (2) ปุ่มแรงดันสูง |
| (3) เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง | (4) เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) |
| (5) อ่างซิลิโคน (Silicone Bath) | (6) วาล์วหมายเลข 1 |
| (7) วาล์วหมายเลข 2 | (8) วาล์วหมายเลข 3 |
| (9) เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) | (10) ไขไฟ |

3.1.3 การวิเคราะห์เชิงความร้อน

เส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโฟมพอลิโพรพิลีน ถูกนำไปวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ NETZSCH DSC 204 F1 ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 - 190 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนและหล่อเย็นคงที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที

3.2 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยพอลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 2

การทดลองอ้างอิงจากหัวข้อ 3.1.1 โดยมีการเปลี่ยนแปลงสถานะการทำเส้นใยตามตารางที่ 3.2 จากนั้นนำไปขึ้นรูปโฟมที่อุณหภูมิเกิดโฟม 150 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ที่ความดันเกิดโฟม 120 150 และ 170 บาร์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ตารางที่ 3.2 สถานะในการทดลองเส้นใยพอลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 2

โค้ด	อุณหภูมิหัวตาย (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบของเกียร์ปัม (รอบ/นาที)
PP1	190	10
PP2		15
PP3		20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์

3.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตตัดแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์ (จากบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด) ให้มีขนาด $0.5 \times 0.5 \times 1$ เซนติเมตร จากนั้นนำแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์ขนาดดังกล่าว บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง (ตามรูปที่ 3.1) โดยกำหนดสภาวะเกิดโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์ตามตารางที่ 3.3 ใช้เวลาอิมิตัว 30 นาที หลังจากนั้นลดความดันเกิดโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์อย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่า 5 วินาที นำตัวอย่างโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์ที่ได้ มาวัดความหนาแน่นโพลีเอทิลีน ด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter) เป็นจำนวนสามครั้งเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ย แล้วบันทึกความหนาแน่นก่อนบ่ม (Before Aging Density) จากนั้นนำโพลีเอทิลีนเข้าสู่กระบวนการบ่มด้วยสภาวะความดันบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างโพลีเอทิลีนเกิดการคงสภาพ เมื่อครบกำหนดจึงทำการวัดความหนาแน่นโพลีเอทิลีนสามครั้งแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นโพลีเอทิลีนหลังบ่ม (After Aging Density)

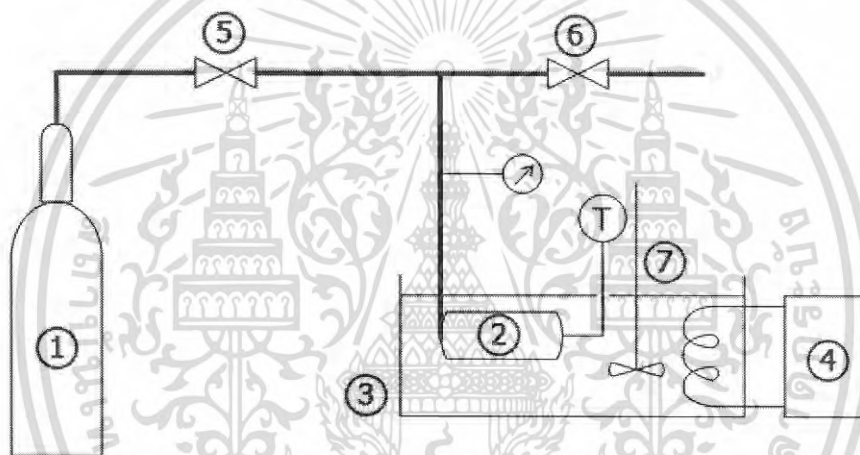
ตารางที่ 3.3 สภาวะการขึ้นรูปโพลีเอทิลีนไลนัลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ความดันเกิดโพลีเอทิลีน (บาร์)	อุณหภูมิเกิดโพลีเอทิลีน (องศาเซลเซียส)
120	40
	60
	80
150	40
	60
	80
170	40
	60
	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีพอลิไวนิลคลอไรด์โพลีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

เตรียมตัวอย่างแผ่นพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ตามหัวข้อที่ 3.3.1 จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ดังกล่าวบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ความดัน ที่ถูกติดตั้งตามรูปที่ 3.2 อัดคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ เมื่อครบกำหนดเวลาในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ตามตารางที่ 3.4 แล้วจึงเปิดวาล์วเบอร์ 6 เพื่อลดความดันลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เติมไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ ไปจุ่มลงในอ่างซีลีโคนร้อนที่ถูกกำหนดอุณหภูมิเกิดโพลีต่างๆ ตามตารางที่ 3.4 เป็นเวลา 5 วินาที เพื่อกระตุ้นให้เกิดโพลีด้วยการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเซ็ดตัวอย่างโพลีพอลิไวนิลคลอไรด์ให้แห้งสนิท แล้วนำไปวัดความหนาแน่นก่อนบ่ม ด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการบ่มตามหัวข้อที่ 3.3.1 แล้ววัดความหนาแน่นโพลีหลังบ่ม



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในพอลิไวนิลคลอไรด์

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| (1) ถังบรรจุ CO ₂ เหลว | (5) วาล์วขาเข้า |
| (2) เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง | (6) วาล์วขาออก |
| (3) อ่างเครื่องทำความเย็น | (7) ไบพัส |
| (4) เครื่องทำความเย็น | |

ตารางที่ 3.4 สภาวะการขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

เวลาแช่คาร์บอนไดออกไซด์เหลว (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเกิดโพลี (องศาเซลเซียส)
6	70
	80
	90
10	70
	80
	90
12	70
	80
	90

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติ และคุณลักษณะของโพลีโพรพิลีน

- นำโพลีโพรพิลีนและโพรพิลีน ไปวัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ บันทึกค่าที่ได้
- ตัดโพลีโพรพิลีนให้มีขนาดประมาณ 1×3 เซนติเมตร บากตัวอย่างเพียงเล็กน้อย นำไปแช่ไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 30 - 60 วินาที เพื่อให้โพลีโพรพิลีนแข็งตัวและเปราะ แล้วหักโพลีโพรพิลีนในขณะอยู่ในไนโตรเจนเหลว เก็บชิ้นโพลีโพรพิลีนในช่องพลาสติกเพื่อนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
- นำภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมาวัดขนาดฟองแก๊สและคำนวณหาความหนาแน่นฟอง บันทึกและทำซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากหลายๆ ตำแหน่งของภาพ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลหรือลดความคลาดเคลื่อน

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย WAXD

เครื่อง WAXD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อผ่านวัสดุ แล้วนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์โครงสร้างผลึก เครื่อง WAXD รุ่น RINT-RAPID/S จากบริษัท Rigaku จำกัด โดยมีสภาวะการวิเคราะห์ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดหลังรังสีเอกซ์เรย์คือ $\text{CuK}\alpha$ กำลังไฟฟ้า 30 กิโลวัตต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ องศาการสแกน (2θ) เท่ากับ 10 - 30 องศา ภายในเวลา 600 วินาที

ตารางที่ 3.4 สภาวะการขึ้นรูปโพลีเมอร์ไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

เวลาแช่คาร์บอนไดออกไซด์เหลว (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเกิดโพลี (องศาเซลเซียส)
6	70
	80
	90
10	70
	80
	90
12	70
	80
	90

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติ และคุณลักษณะของโพลีเมอร์

- นำโพลีเมอร์และพอลิเมอร์ ไปวัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ บันทึกค่าที่ได้
- ตัดโพลีให้มีขนาดประมาณ 1×3 เซนติเมตร บากตัวอย่างเพียงเล็กน้อย นำไปแช่ไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 30 - 60 วินาที เพื่อให้โพลีแข็งตัวและเปราะ แล้วหักโพลีในขณะที่อยู่ในไนโตรเจนเหลว เก็บชิ้นโพลีในช่องพลาสติกเพื่อนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
- นำภาพถ่ายขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมาวัดขนาดฟองแก๊สและคำนวณหาความหนาแน่นฟอง บันทึกและทำซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากหลายๆ ตำแหน่งของภาพ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลหรือลดความคลาดเคลื่อน

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย WAXD

เครื่อง WAXD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์เมื่อผ่านวัสดุ แล้วนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์โครงสร้างผลึก เครื่อง WAXD รุ่น RINT-RAPID/S จากบริษัท Rigaku จำกัด โดยมีสภาวะการวิเคราะห์ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดหลังรังสีเอ็กซ์เรย์คือ $\text{CuK}\alpha$ กำลังไฟฟ้า 30 กิโลวัตต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ องศาการสแกน (2θ) เท่ากับ 10 - 30 องศา ภายในเวลา 600 วินาที

บทที่ 4

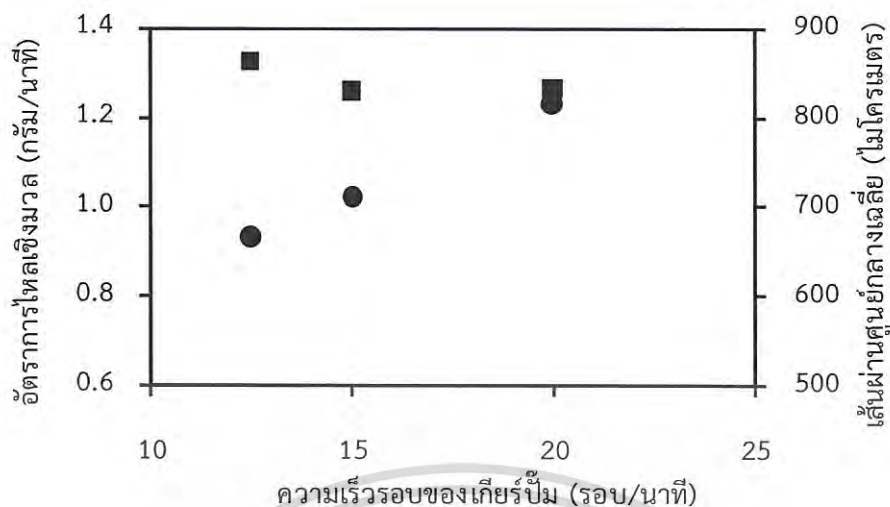
ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพลิเมอร์พอลิพรพิลีนชั้นตอนที่ 1

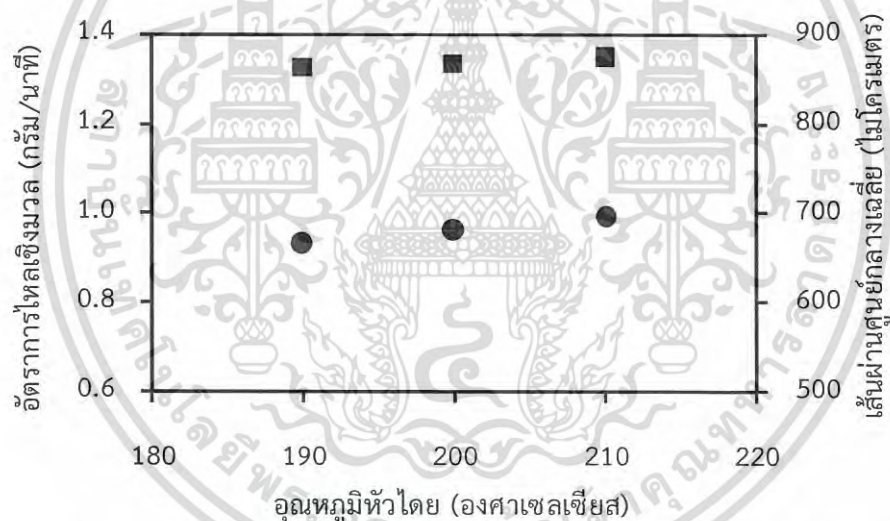
การทดลองนี้เลือกใช้ไอโซแทกติกพอลิพรพิลีนเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงกว่าพอลิพรพิลีนทั่วไป นำมาเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นเส้นใยเพื่อเพิ่มปริมาณผลึก จากนั้นนำเส้นใยพอลิพรพิลีนมาขึ้นรูปโพลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เพื่อศึกษาปริมาณผลึกที่ส่งผลต่อเส้นใยโพลิเมอร์พอลิพรพิลีน โดยทั่วไปการศึกษาจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก (Crystallization Kinetic) ของพอลิเมอร์ นิยมใช้หลักการของ Avrami มาประยุกต์ใช้ [45-54] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้หลักการของ Avrami เพื่ออธิบายถึงจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของทั้งเส้นใยพอลิพรพิลีนและเส้นใยโพลิเมอร์พอลิพรพิลีน เช่น ดีกรีสภาพการเป็นผลึก อัตราสภาพการเป็นผลึก รูปลักษณะของผลึก เป็นต้น [47-50, 53, 54]

4.1.1 การศึกษาเส้นใยพอลิพรพิลีน

ผลเบื้องต้นของการทำเส้นใยพอลิพรพิลีน คืออัตราการไหลเชิงมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิพรพิลีน เมื่อเพิ่มความเร็วยกของเกียร์บีบจาก 12.5, 15 และ 20 รอบ/นาที ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.93, 1.02 และ 1.23 กรัม/นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นไปตามหน้าที่ของเกียร์บีบคือ ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดอัตราการไหลของการผลิต อนึ่ง อัตราการไหลเชิงมวลมากขึ้นในช่วง 0.9 - 1.3 กรัม/นาที ทำให้เส้นใยพอลิพรพิลีนมีแนวโน้มของขนาดเล็กลงเพียงเล็กน้อยจาก 862 เป็น 829 และ 832 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าไม่มีระดับนัยสำคัญของการทดลอง เมื่อทำการเปลี่ยนสภาวะการขึ้นรูปเส้นใยพอลิพรพิลีนด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหัวตายจาก 190 เป็น 200 และ 210 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 0.9 - 1.0 กรัม/นาที ดังรูปที่ 4.2 อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิหัวตาย ส่งผลให้ความแข็งแรงของการหลอม (Melt Strength) ลดลง [55] ซึ่งหมายถึงเส้นใยพอลิพรพิลีนมีความสามารถในการไหลได้ดีขึ้น จึงมีแนวโน้มของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิพรพิลีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 862 เป็น 867 และ 874 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นในช่วง 860 - 880 ไมโครเมตร เป็นการเพิ่มขึ้นแบบไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า การเปลี่ยนความเร็วยกของเกียร์บีบ 12.5 - 20 รอบ/นาที และ อุณหภูมิหัวตาย 190 - 210 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเปลี่ยนแปลงในช่วงที่แคบคือ 0.9 - 1.3 กรัม/นาที แล้วส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยพอลิพรพิลีน โดยผลการจำลองของงานวิจัยของ Z. Bo [56] พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลต่างกันมากกว่า 2 เท่า จึงทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิเมอร์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.1 ผลของความเร็วรอบของเกียร์บีบต่ออัตราการไหลเชิงมวลของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (●) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■)

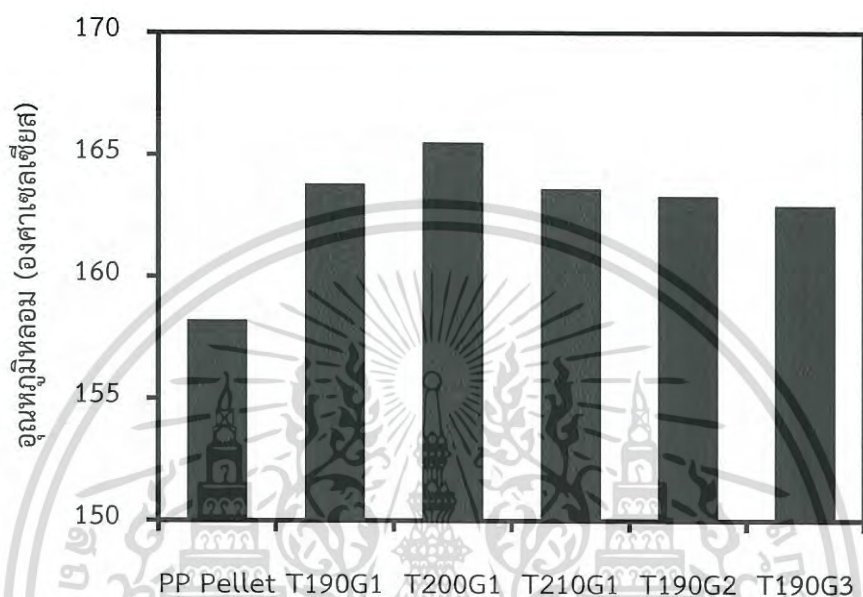


รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิหัวโดยต่ออัตราการไหลเชิงมวลของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (●) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■)

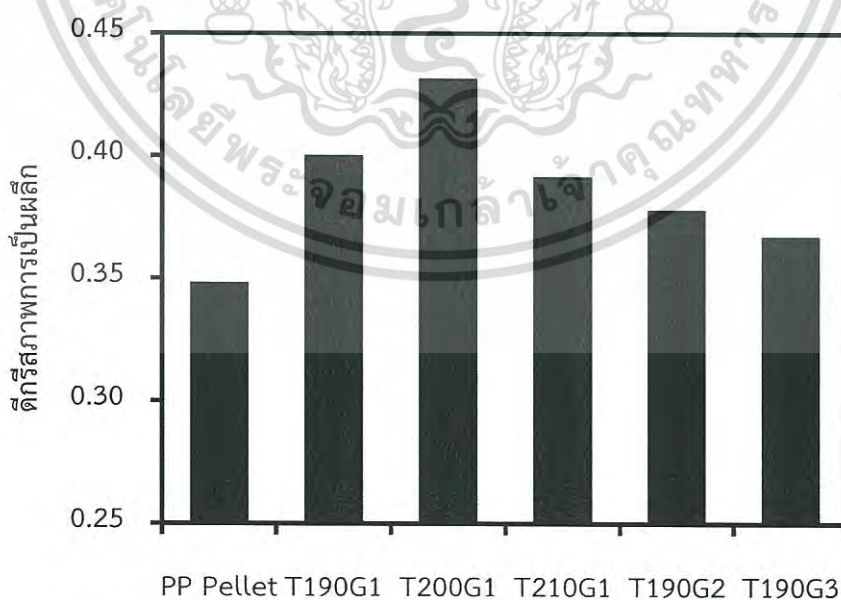
นำเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (PP Pellet) และเส้นใยพอลิโพรพิลีนที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิหลอมและดิกิริสภาพการเป็นผลึก พบว่าเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอม 158.1 องศาเซลเซียส เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการทำเส้นใยพบว่า เส้นใยพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยมากกว่า 163 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.3 นั้นหมายถึงกระบวนการทำเส้นใยทำให้ดิกิริสภาพการเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลการคำนวณดังรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 จากหัวข้อที่ผ่านมาเน้นการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเกียร์บี้มและอุณหภูมิหัวตาย ส่งผลเพียงเล็กน้อยในระดับมาโคร (Macroscopic Scale) หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิโพรพิลีน แต่เมื่อพิจารณาในระดับไมโคร (Microscopic Scale) ทั้งสองปัจจัยนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหลอมและตกรีสภาพการเป็นผลึกอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมของเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (PP Pellet) และเส้นใยพอลิโพรพิลีน

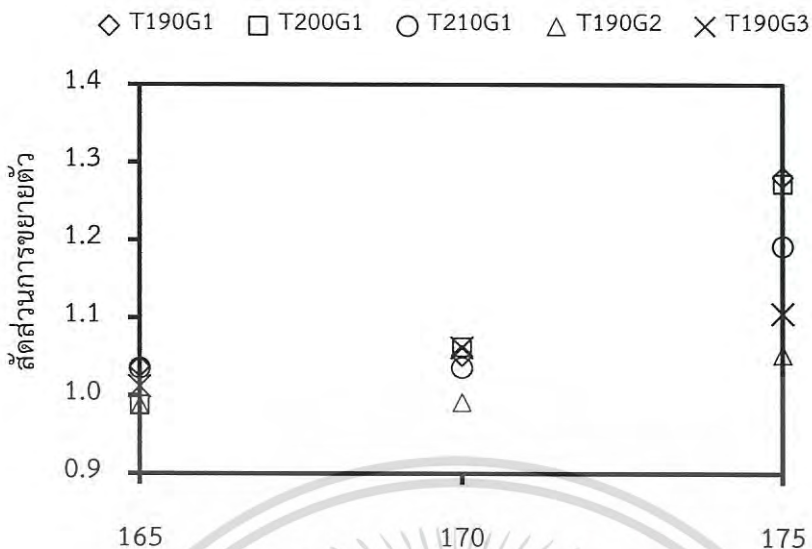


รูปที่ 4.4 ตกรีสภาพการเป็นผลึกของเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (PP Pellet) และเส้นใยพอลิโพรพิลีน

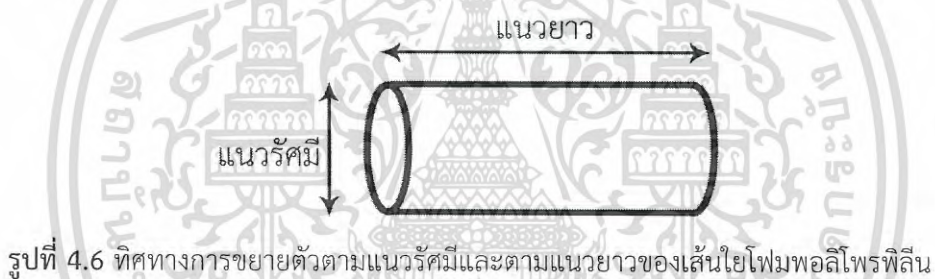
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การศึกษาเส้นใยโพลิโพรพิลีน

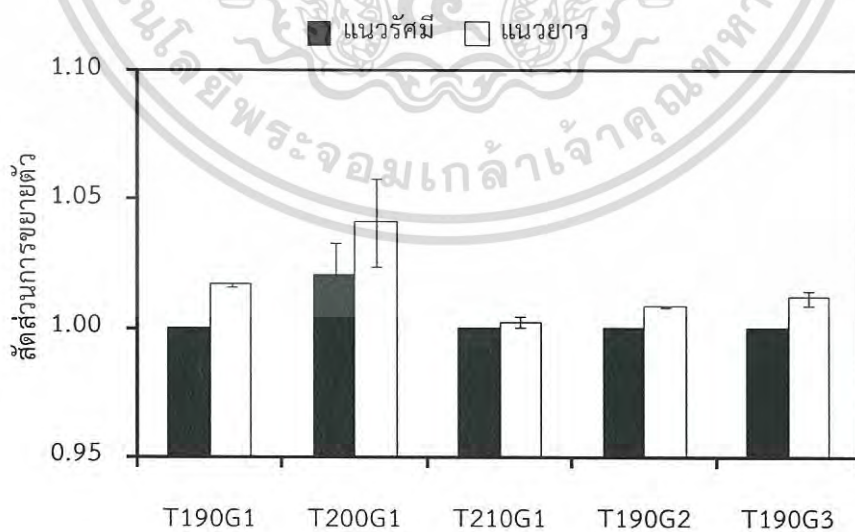
เนื่องจากอุณหภูมิหลอมของเส้นใยโพลิโพรพิลีนอยู่ในช่วง 163 - 166 องศาเซลเซียส ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโพลิโพรพิลีน โดยทำลายผลึกของเส้นใยให้น้อยที่สุด คือ 165 - 170 และ 175 องศาเซลเซียส โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารทำฟู ที่ความดันเกิดโพลิโพรพิลีน 120 บาร์ เวลา 30 นาที และเวลาการลดความดันน้อยกว่า 5 วินาที ผลการทดลองเบื้องต้นของกระบวนการเกิดโพลิโพรพิลีนคือ สัดส่วนการขยายตัวตามสมการที่ 2.32 (การขยายตัวเชิงปริมาตร) โดยสมมติให้เส้นใยโพลิโพรพิลีนมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก จึงทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและความยาว เพื่อคำนวณปริมาตรของเส้นใยโพลิโพรพิลีน เมื่อผ่านกระบวนการเกิดโพลิโพรพิลีนแล้วจึงวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวอีกครั้งหนึ่ง เพื่อคำนวณปริมาตรของเส้นใยโพลิโพรพิลีน จากนั้นจึงคำนวณสัดส่วนการขยายตัวซึ่งแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.5 โดยพบว่าที่อุณหภูมิเกิดโพลิโพรพิลีน 165 องศาเซลเซียส เส้นใยโพลิโพรพิลีนมีสัดส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกับ 1.0 นั้นหมายถึงมีความเป็นโพลิโพรพิลีนน้อยจึงมีการขยายตัวต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโพลิโพรพิลีนเป็น 170 และ 175 องศาเซลเซียส พบว่าสัดส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 1.05 และ 1.20 ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เส้นใยโพลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงของการหลอมลดลง จึงส่งผลให้เป็นโพลิโพรพิลีนได้ดี โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ H. C. Lau [55] ที่พบว่าความแข็งแรงของการหลอมของโพลิโพรพิลีนลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเลือกผลการทดลองของเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโพลิโพรพิลีน 175 องศาเซลเซียส มาพิจารณาโดยคาดว่า มีการขยายตัวตามแนวรัศมี (Radial Expansion) และตามแนวยาว (Longitudinal Expansion) ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแตกต่างจากการขยายตัวของโพลิโพรพิลีนทั่วไปคือ มีการขยายตัวทุกทิศทาง เมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโพลิโพรพิลีนและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโพลิโพรพิลีน จะได้ว่าค่าสัดส่วนการขยายตัวตามแนวรัศมี และถ้าเทียบอัตราส่วนความยาวของเส้นใยโพลิโพรพิลีนและความยาวของเส้นใยโพลิโพรพิลีน จะได้ว่าค่าสัดส่วนการขยายตัวตามแนวยาว ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 จากรูปพบว่าเส้นใยโพลิโพรพิลีนทั้งห้าตัวอย่าง มีสัดส่วนการขยายตัวตามแนวรัศมีใกล้เคียงกับ 1.0 ซึ่งหมายถึงมีการขยายตัวน้อยมากหรืออาจเปรียบได้ว่า ไม่มีการขยายตัวตามแนวรัศมี แต่เส้นใยโพลิโพรพิลีนทั้งห้าตัวอย่างนั้น มีสัดส่วนการขยายตัวตามแนวยาวมากกว่า 1.0 นั้นหมายถึงเส้นใยโพลิโพรพิลีนมีความสามารถในการขยายตัวตามแนวยาวมากกว่าตามแนวรัศมี ซึ่งอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากการขึ้นรูปให้เป็นเส้นใยนั้น ทำให้โมเลกุลของโพลิโพรพิลีนมีการจัดเรียงตัวตามแนวยาวจึงทำให้ผลึกมีแนวโน้มเรียงตัวตามแนวยาวเช่นกัน [57] เมื่อคงสภาพการเป็นผลึกในระหว่างขั้นตอนการเกิดโพลิโพรพิลีน จึงเกิดการขัดขวางของการขยายตัวตามแนวรัศมี แต่ทำให้มีการขยายตัวตามแนวยาว



อุณหภูมิเกิดไฟม (องศาเซลเซียส)
รูปที่ 4.5 สัดส่วนการขยายตัวของเส้นใยโพลิโพรพิลีน



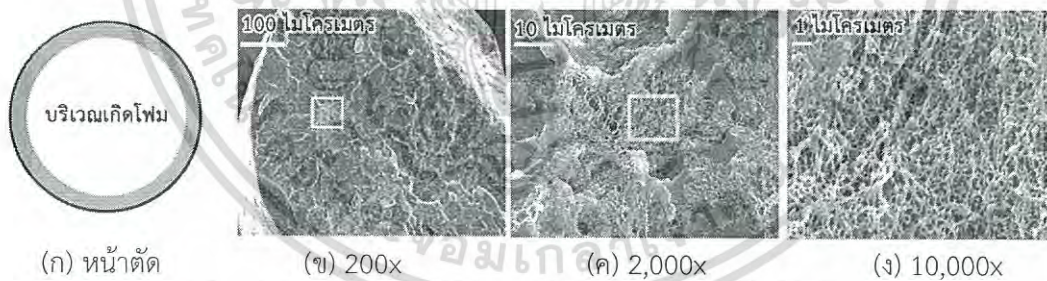
รูปที่ 4.6 ทิศทางการขยายตัวตามแนวรัศมีและตามแนวยาวของเส้นใยโพลิโพรพิลีน



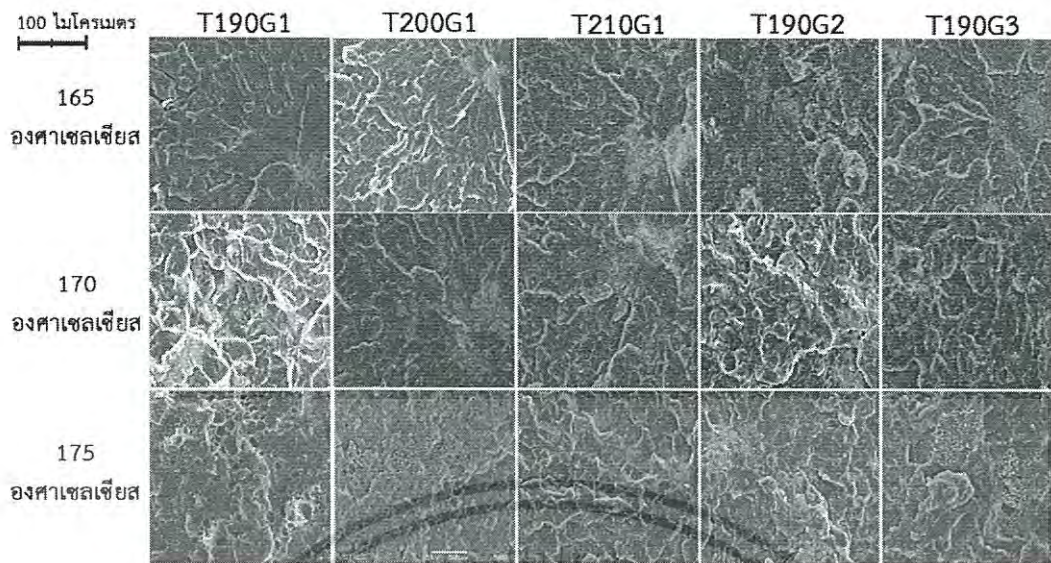
รูปที่ 4.7 สัดส่วนการขยายตามแนวรัศมีและแนวยาวของเส้นใยโพลิโพรพิลีน
ที่อุณหภูมิเกิดไฟม 175 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำหน้าตัดของเส้นใยโพลิพรพิลีนมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ 4.8 พบว่า บริเวณหน้าตัดแบ่งได้เป็นสองบริเวณคือบริเวณผิว (สีเทา) และบริเวณเกิดโพลิพร (สีขาว) ดังรูป 4.8 (ก) โดยที่บริเวณผิวไม่พบการเกิดโพลิพรเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์หนีออกเร็ว เปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากเส้นใยโพลิพรพิลีนอย่างรวดเร็ว โดยไม่ทำให้เกิดโพลิพรในบริเวณผิว แต่ที่บริเวณเกิดโพลิพรนั้นมีโอกาสที่จะพบโครงสร้างโพลิพรที่เป็นฟองมากกว่าบริเวณผิว เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้น ตามรูปที่ 4.8 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างโพลิพรที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายโครงสร้างที่เป็นรูพรุน (Porous) ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างโพลิพรของงานวิจัยของ X. L. Jiang และคณะ [35] โดยบริเวณดังกล่าวคือโพลิพรที่เกิดขึ้นบริเวณ Interlamellar ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างผลึกที่เรียกว่า Spherulite ประกอบด้วย แกนกลาง (Core) และ Lamellar แผ่ขยายออกจากแกนกลาง บริเวณที่เป็นอสัณฐานคือ แกนกลาง Interlamellar และรอยต่อระหว่าง Spherulite ทั่วไปพบว่าไอโซเทกติกโพลิพรพิลีนมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Spherulite เมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาของเส้นใยโพลิพรพิลีนตามรูปที่ 4.9 พบว่าที่อุณหภูมิเกิดโพลิพร 165 องศาเซลเซียส ไม่พบลักษณะที่เป็นฟองหรือโพรงอากาศ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำซึ่งมีความแข็งแรงของการหลอมสูง [55] จึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หนีออกเร็ว ไม่สามารถแพร่และละลายเข้าไปได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโพลิพรเป็น 170 องศาเซลเซียส พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับฟองอากาศเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิเกิดโพลิพรเป็น 175 องศาเซลเซียส พบฟองเกิดขึ้นและสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน นั่นหมายถึงอุณหภูมิเกิดโพลิพร 175 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมที่จะทำให้เกิดโพลิพร พร้อมทั้งคงสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลิพรพิลีน

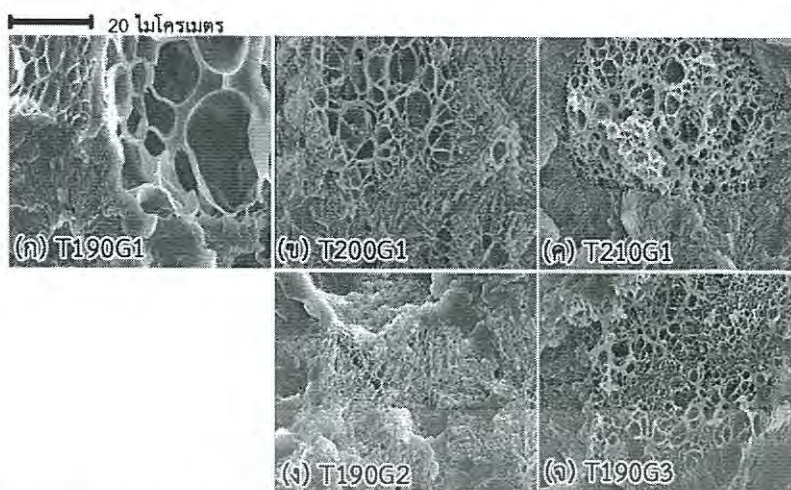


รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของเส้นใยโพลิพรพิลีน (T190G2) ที่กำลังขยายต่างๆ

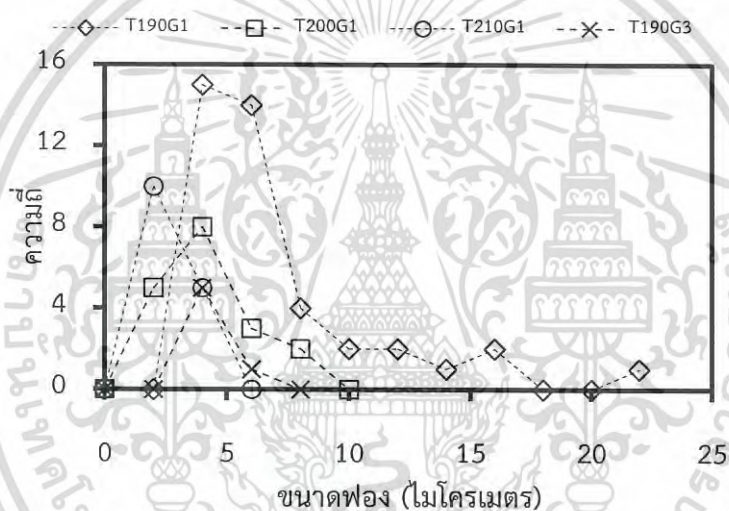


รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ

เมื่อศึกษาภาพไมโครกราฟที่กำลังขยาย 2000 เท่า ดังรูปที่ 4.10 พบว่าสัณฐานวิทยาของเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีทั้งฟองขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยฟองขนาดใหญ่อาจเกิดในบริเวณที่เป็นอสังฐานของเส้นใยโพลีโพรพิลีน และแกนกลางของผลึกซึ่งมีความเป็นอสังฐานสูง ในขณะที่บริเวณรอบข้างของนิวเคลียสนี้เรียกว่า Interlamellar เกิดฟองที่มีขนาดเล็กในระดับอังสตรอม (Angstrom) เนื่องจากงานวิจัยของ K. G. Gatos [36] พบว่าชั้นของ Interlamellar มีขนาดประมาณ 500 อังสตรอม ดังนั้นขนาดฟองในบริเวณ Interlamellar จึงควรอยู่ในระดับอังสตรอมเช่นเดียวกัน ผลของสัณฐานวิทยาที่ได้นี้ให้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยของ X. L. Jiang [35] ที่ศึกษาผลของโครงสร้างผลึกของไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีน ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เมื่อวิเคราะห์ฟองที่มีขนาดใหญ่และสังเกตได้อย่างชัดเจนบนภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image-J พบว่าฟองมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 3 - 5 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.11 นั้นแสดงให้เห็นว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีโครงสร้างแบบโฟมไมโครเซลลูลาร์ (Microcellular Foam) โดยโฟมชนิดนี้มีขนาดฟองเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร [5, 58] ทั้งนี้ยังพบว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีน T190G1 มีขนาดฟองกระจายตัวอยู่ในช่วงที่กว้างคือ 2 - 20 ไมโครเมตร แต่ในขณะที่เส้นใยโพลีโพรพิลีนอื่นๆ มีขนาดฟองกระจายอยู่ในช่วงแคบๆ คือ 1 - 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.10 ภาพสัณฐานวิทยาของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโคม 175 องศาเซลเซียส

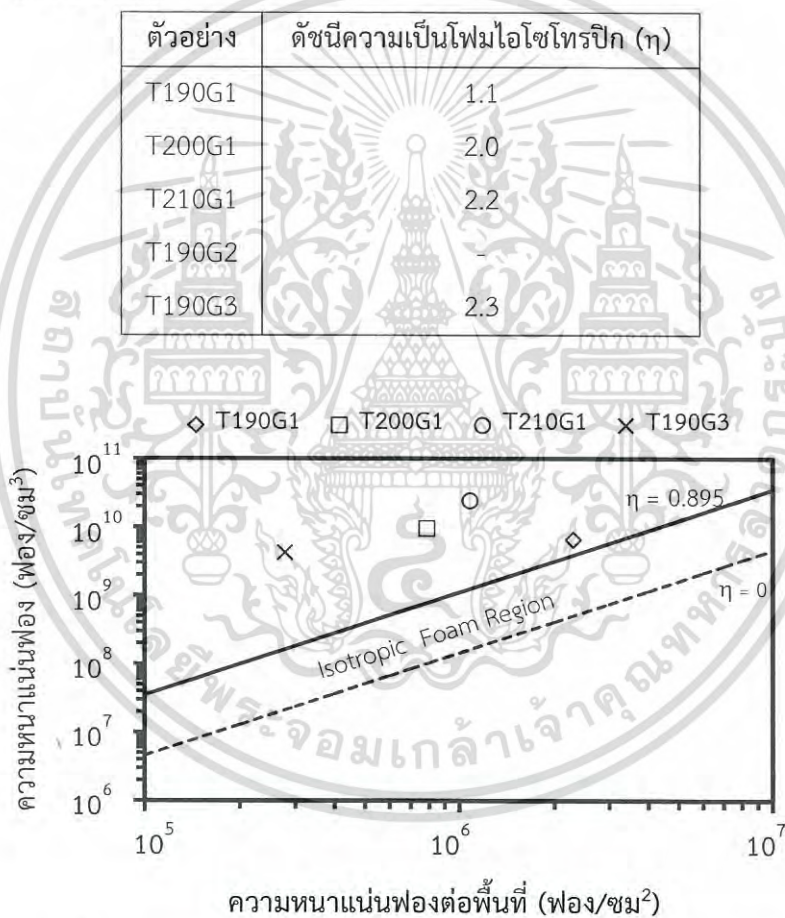


รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดพองของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโคม 175 องศาเซลเซียส

พองที่เกิดขึ้นในเส้นใยโพลีโพรพิลีนนั้นเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งมีขนาดพองเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีความเป็นไปได้สูงที่เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีการเบี่ยงเบนไปจากความเป็นโคมไอโซโทรปิก ซึ่งโคมไอโซโทรปิกคือ โคมที่มีพองเป็นทรงกลม มีพองกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีความสมมาตรของชิ้นงาน [29] จากงานวิจัยของ P. Buahom และ S. Areerat [30] ได้นำเสนอดัชนีเพื่อชี้วัดการเบี่ยงเบนออกจากความเป็นโคมไอโซโทรปิก หรือเรียกว่า ดัชนีความเป็นโคมไอโซโทรปิก โดยมีแนวคิดคือการวิเคราะห์โครงสร้างโคมที่เป็นแบบสามมิติ เพื่อชี้วัดความเป็นโคมไอโซโทรปิกนั้นทำได้ยาก จึงนำข้อมูลที่ได้จากสองมิติคือ ขนาดพอง ความหนาแน่นพองต่อพื้นที่ที่ได้จากภาพไมโครกราฟของ SEM ร่วมกับสัดส่วนการขยายตัวและความหนาแน่นพอง ซึ่งเป็นข้อมูลแบบสามมิติ มาวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ได้คิดค้นและพัฒนา พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลจากการ

ทดลองของงานวิจัยต่างๆ มาประมวลผลและพบว่า โฟมไอโซโทรปิก มีดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก ในช่วง 0 - 0.895 สำหรับผลการคำนวณดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 พบว่าดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกมีค่ามากกว่า 1.1 ซึ่งอยู่นอกช่วงของ โฟมไอโซโทรปิก และพลอตกราฟด้วยความหนาแน่นฟองบนพื้นผิวและความหนาแน่นฟองของ เส้นใยโพลีโพรพิลีนจะพบว่า เส้นใยโพลีโพรพิลีนอยู่นอกบริเวณที่เป็นโฟมไอโซโทรปิก ดังรูป ที่ 4.12 เนื่องจากเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีสัณฐานวิทยาที่ไม่สม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของฟองไม่ สม่ำเสมอ

ตารางที่ 4.1 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 175 องศาเซลเซียส

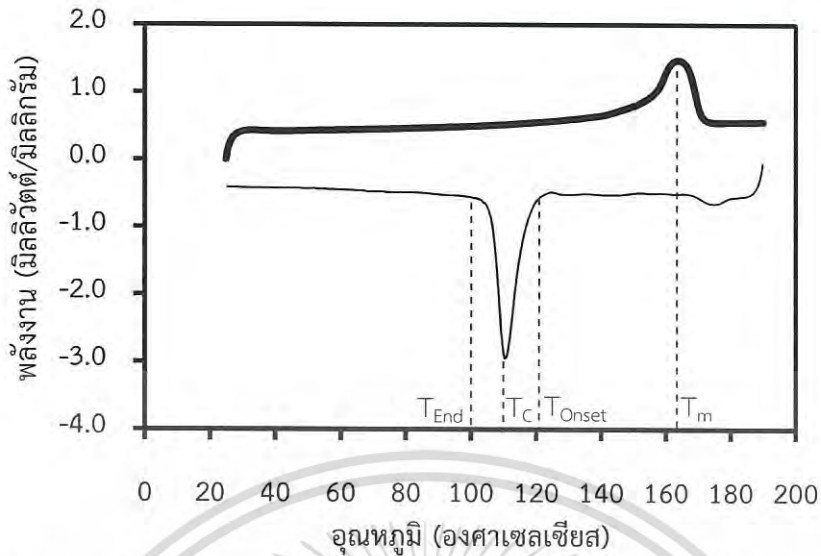


รูปที่ 4.12 คุณสมบัติความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 175 องศาเซลเซียส [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

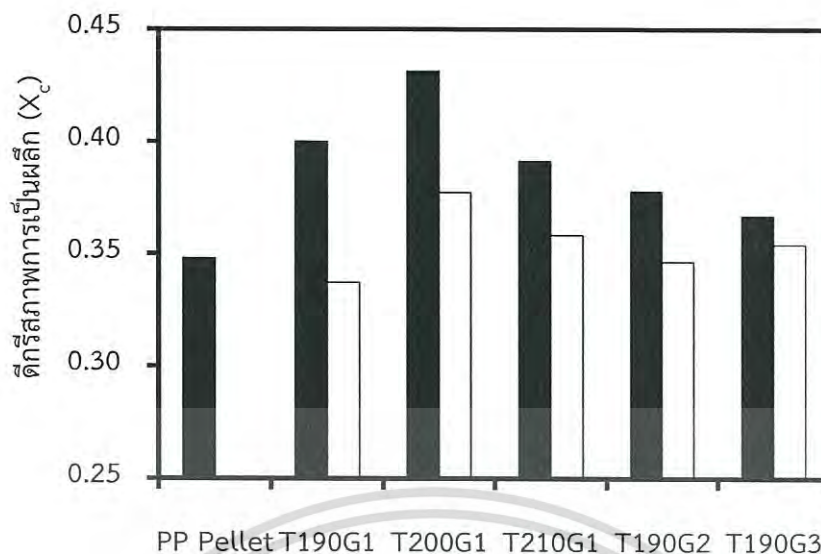
เนื่องด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในโครงสร้างพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลหรือทำให้เกิดผลึกอีกครั้ง (Recrystallization) [41, 59] จึงควรมีการวิเคราะห์สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน โดยศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนหรือวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ จากนั้นใช้หลักการของ Avrami เพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์ของสภาพการเป็นผลึกหลังกระบวนการเกิดโพลี ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ทางผู้วิจัยได้นำเสนอเพื่ออธิบายกระบวนการเกิดโพลีและจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก จากงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา [35, 41, 50, 60-63] พบว่ามีการศึกษาสภาพการเป็นผลึกต่อสัมพัทธ์ของโพลีโพลีเมอร์ แต่ยังไม่พบบางงานวิจัยที่อธิบายจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกภายหลังกระบวนการเกิดโพลี ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ทางผู้วิจัยหวังว่า จะสามารถนำไปใช้อธิบายจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกภายหลังกระบวนการเกิดโพลีได้

หลักการการทำงานของเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์คือ ระบบเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นระบบเพิ่มความร้อนด้วยอัตราการที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายคือ 190 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งรักษาอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) จากนั้นระบบจะลดอุณหภูมิลงไปยังอุณหภูมิเริ่มต้นคือ 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที และรักษาอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจะดำเนินการสแกนรอบที่สอง โดยผลแบบสแกนครั้งที่สองของเส้นใยโพลีโพรพิลีน แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 เส้นใยโพลีโพรพิลีนจะได้รับความร้อนและเริ่มหลอมเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิหลอม (T_m) เท่ากับ 163.8 องศาเซลเซียส คือตำแหน่งของอุณหภูมิที่มีพลังงานสูงสุดของการสแกนแบบให้ความร้อน จากนั้นพลังงานความร้อนจะลดลงและมีค่าเกือบคงที่ ซึ่งหมายถึงผลึกได้ถูกหลอมอย่างสมบูรณ์แล้ว ต่อมาระบบจะรักษาอุณหภูมิให้คงที่ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ก่อนทำการสแกนแบบหล่อเย็นด้วยอัตราการลดอุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของสภาพการเป็นผลึก (T_{Onset}) มีค่าเท่ากับ 116.6 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายถึงโพลีโพรพิลีนที่หลอม จะเริ่มแข็งตัวและเริ่มต้นสภาพการเป็นผลึก หากพลังงานความร้อนลดลงจนถึงจุดต่ำสุดจะเรียกอุณหภูมิต่าแหน่งนี้ว่า อุณหภูมิสภาพการเป็นผลึก (Crystallization Temperature หรือ T_c) และสภาพการเป็นผลึกดังกล่าวนี้จะสิ้นสุดเมื่อถึงอุณหภูมิสุดท้ายของสภาพการเป็นผลึก (T_{End}) เท่ากับ 106.6 องศาเซลเซียส จากนั้นการหล่อเย็นจะดำเนินต่อไปจนอุณหภูมิของระบบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 กราฟของเส้นใยโพลีโพรพิลีนรหัส T190G1 เมื่อเส้นทึบหนาคือการสแกนแบบให้ความร้อน (Heating Scan) และเส้นทึบบางคือการสแกนแบบหล่อเย็น (Cooling Scan)

ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการสแกนแบบให้ความร้อนคือพื้นที่ใต้กราฟ ณ อุณหภูมิหลอม หรือหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ซึ่งสามารถคำนวณและแสดงผลตีกีรสภาพการเป็นผลึกของทั้งเส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโคม 175 องศาเซลเซียส ได้ดังรูปที่ 4.14 จากข้อมูลพบว่า เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีตีกีรสภาพการเป็นผลึกเฉลี่ย 0.40 มีค่ามากกว่าเม็ดพลาสติกไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีนที่มีเพียง 0.35 แต่ภายหลังจากกระบวนการเกิดโคมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ทำให้เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีตีกีรสภาพการเป็นผลึกลดลงมากกว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า มีการแข่งขันระหว่างการเกิดโคมและสภาพการเป็นผลึก ซึ่งปรากฏว่ากระบวนการเกิดโคมเกิดขึ้นได้เร็วกว่ากระบวนการสภาพการเป็นผลึก จึงทำให้มีตีกีรสภาพการเป็นผลึก ในเส้นใยโพลีโพรพิลีนน้อยลงเมื่อเทียบกับเส้นใยโพลีโพรพิลีน เนื่องจากในขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสด้วยการลดความดัน คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในโพลีโพรพิลีนได้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส ซึ่งเป็นกระบวนการดูดความร้อนจึงส่งผลให้อุณหภูมิของเส้นใยโพลีโพรพิลีนลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วผ่านอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของสภาพการเป็นผลึกอย่างรวดเร็ว ทำให้ผลึกหยุดการเติบโตอย่างรวดเร็วเช่นกัน



รูปที่ 4.14 ดักรัสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน (□) ที่อุณหภูมิเกิดโพร 175 องศาเซลเซียส

เมื่อรวบรวมข้อมูลการสแกนแบบหล่อเย็นครั้งที่สอง (Second Cooling Scan) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 จากตารางพบว่าทั้งเส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนให้อุณหภูมิสภาพการเป็นผลึกที่ใกล้เคียงกันประมาณ 111 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิของสภาพการเป็นผลึก ด้วยผลต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสิ้นสุดของสภาพการเป็นผลึกแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 พบว่า เส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนมีช่วงอุณหภูมิของสภาพการเป็นผลึกแคบกว่าช่วงอุณหภูมิของเส้นใยพอลิโพรพิลีน ซึ่งอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากการที่เส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์มาแล้ว ทำให้เกิดผลึกได้ง่ายกว่าและใช้ช่วงอุณหภูมิที่แคบกว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีนซึ่งไม่ผ่านการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองนี้ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Manika Varma-Nair และคณะ [40] ซึ่งศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน แล้วพบว่า การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วยให้มีความสภาพการเป็นผลึกง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลการสแกนแบบหล่อเย็นครั้งที่สองของเส้นใยและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน ที่อุณหภูมิเกิดโพร 175 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	เส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน			เส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน		
	T _C (°ซ)	T _{Onset} (°ซ)	T _{End} (°ซ)	T _C (°ซ)	T _{Onset} (°ซ)	T _{End} (°ซ)
T190G1	110.5	116.6	106.6	111.6	116.6	108.5
T200G1	115.0	120.1	109.9	112.0	118.0	108.4
T210G1	111.2	116.5	107.7	111.3	116.3	108.1
T190G2	110.3	115.4	106.4	110.5	115.6	107.0
T190G3	111.0	116.6	107.3	111.0	116.4	107.3

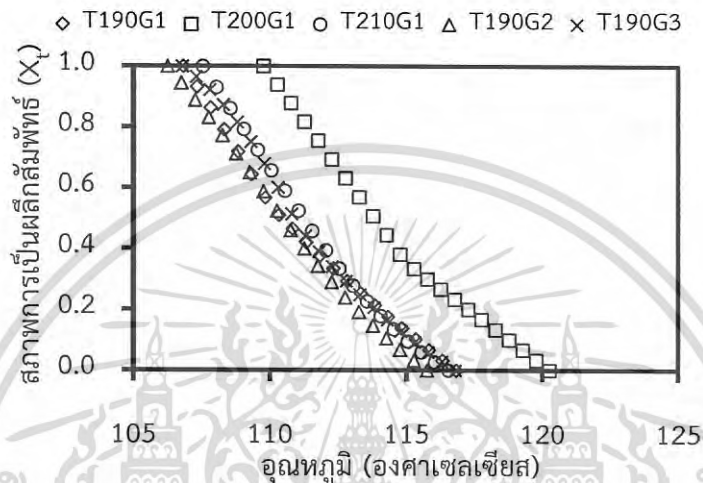
ตารางที่ 4.3 ช่วงอุณหภูมิของสภาพการเป็นผลึก

ตัวอย่าง	ช่วงอุณหภูมิของสภาพการเป็นผลึก (T _{Onset} -T _{End}) (องศาเซลเซียส)	
	เส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	เส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน
T190G1	10.0	8.1
T200G1	10.2	9.6
T210G1	8.8	8.2
T190G2	9.0	8.6
T190G3	9.3	9.1

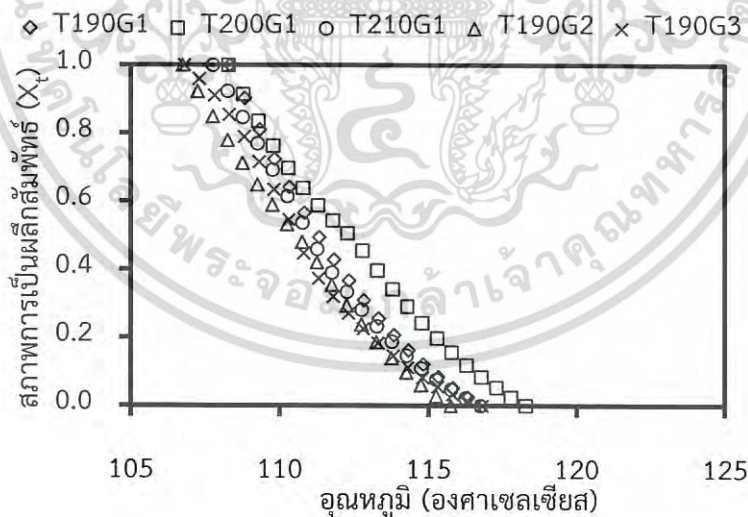
การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิไม่คงที่ของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน ดังรูปที่ 4.15 พบว่าผลึกของเส้นใยเริ่มเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า 120 องศาเซลเซียสและสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 107 องศาเซลเซียส ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิของการเกิดสภาพการเป็นผลึกเท่ากับ 8 - 11 องศาเซลเซียส แต่สำหรับผลึกของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียสและสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 107 องศาเซลเซียส นั่นคือมีช่วงของการเกิดสภาพการเป็นผลึกประมาณ 8 - 10 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.16 เมื่อวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของสภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ ของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนดังรูปที่ 4.17 พบว่าเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนใช้เวลาสภาพการเป็นผลึกประมาณ 0.9 - 1.1 นาที แต่สำหรับเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนใช้เวลาเร็วกว่าในการเป็นสภาพการเป็นผลึกประมาณ 0.8 - 1.0 นาที ดังรูปที่ 4.18 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ของทั้งเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนในแต่ละสภาวะ จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 - 4.23 จะสังเกตได้ว่าเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน (O) ซึ่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้สภาพการเป็นผลึกที่เร็วกว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■) ซึ่งไม่ผ่านการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ อนึ่งถึงแม้ว่าทั้งเส้นใยและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนใช้เวลาต่างกันในระดับวินาที แต่ในขั้นตอนของการเกิดโพรพอนั้น อุณหภูมิมีการลดลงอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้มีสภาพการเป็นผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นพร้อมๆกัน อีกทั้งกระบวนการทั้งสองนี้เกิดขึ้นในระดับไมโคร ถึงแม้ว่าเวลาต่างกันในระดับวินาทีแต่สามารถสร้างผลลัพท์ที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน

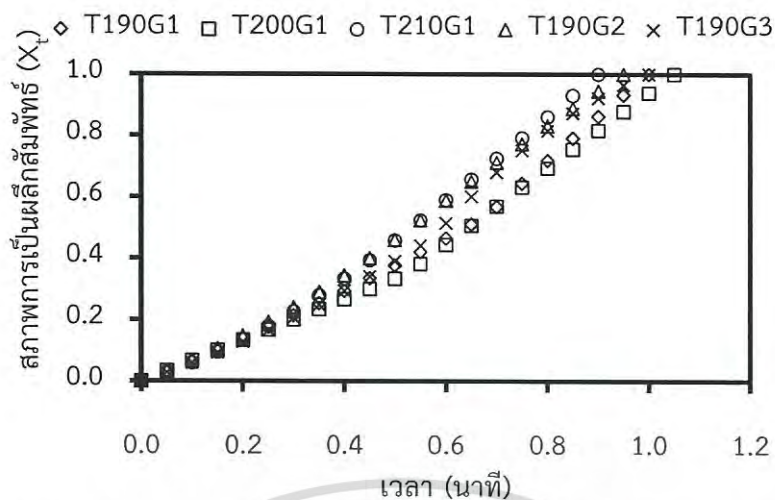


รูปที่ 4.15 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิไม่คงที่ของเส้นใยพอลิโพรพิลีน

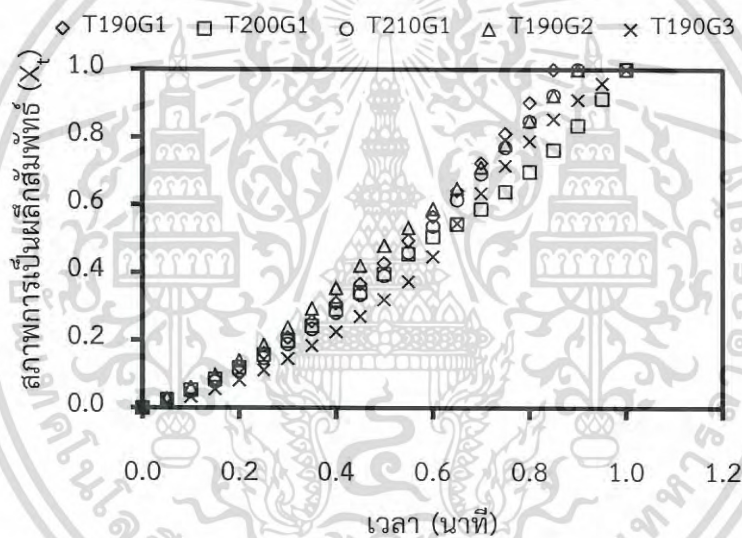


รูปที่ 4.16 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิไม่คงที่ของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

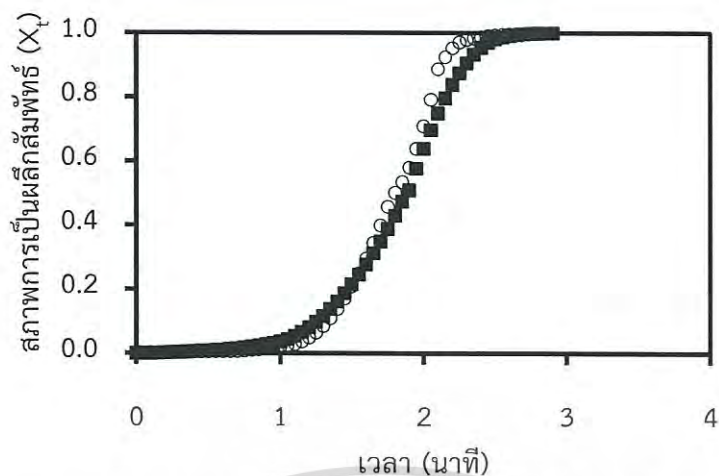


รูปที่ 4.17 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุนทงุมคิงที่ของเส้นใยพอลิโพรพิลีน

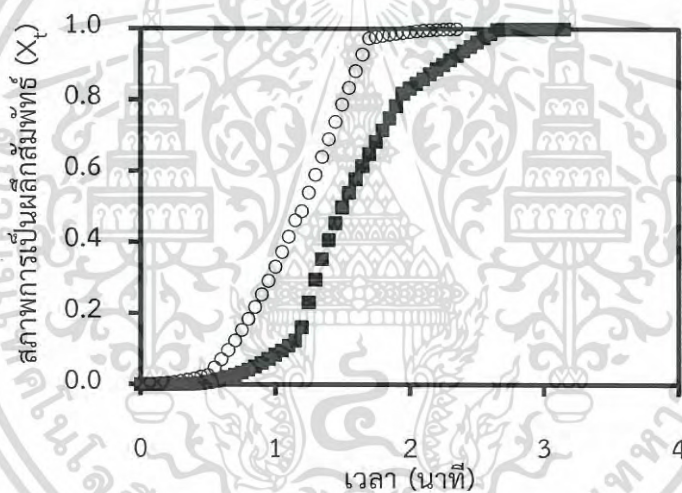


รูปที่ 4.18 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุนทงุมคิงที่ของเส้นใยโพนพอลิโพรพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

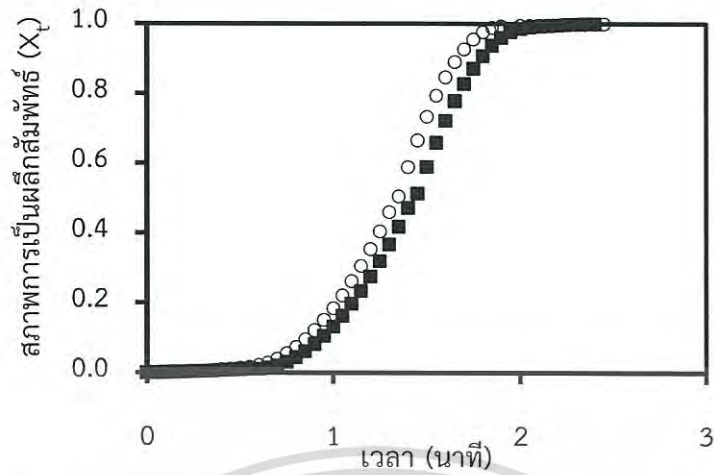


รูปที่ 4.19 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอนุกรมคั้งที่ของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีพอลิโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T190G1

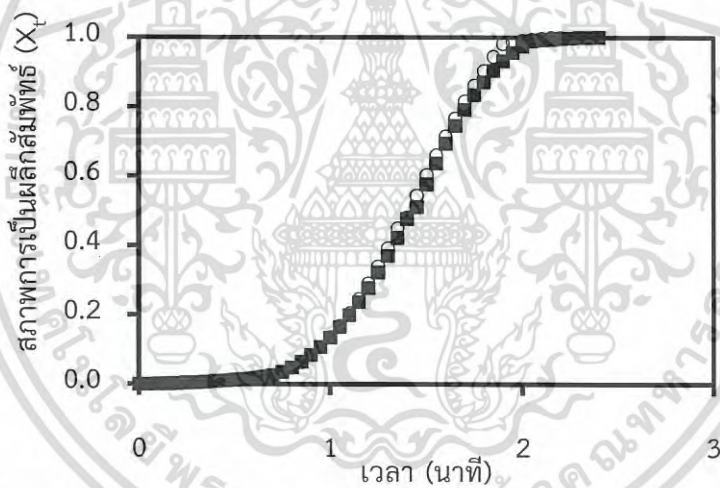


รูปที่ 4.20 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอนุกรมคั้งที่ของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีพอลิโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T200G1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

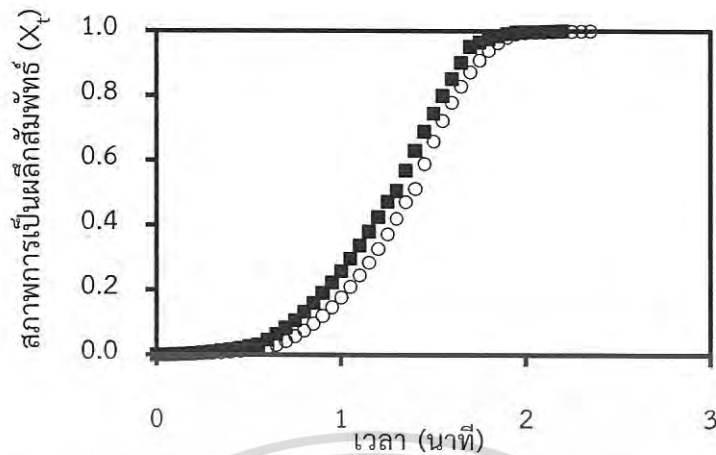


รูปที่ 4.21 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอนุกรมคิงที่ของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีเอทิลีนทเรท (○) ของตัวอย่าง T210G1



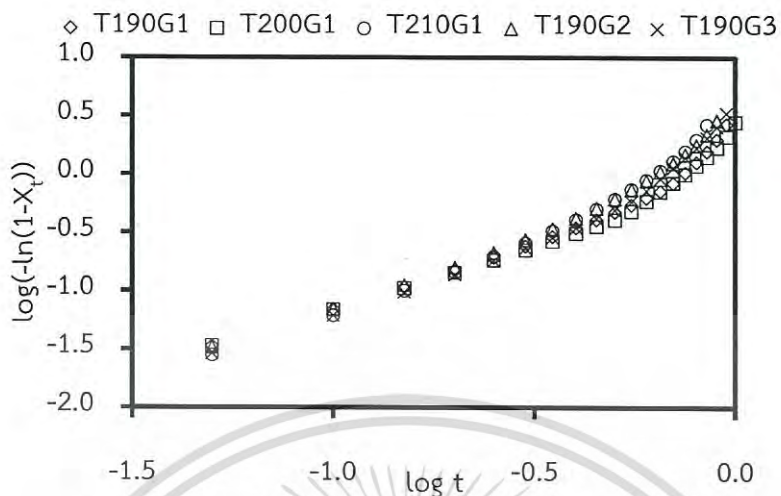
รูปที่ 4.22 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอนุกรมคิงที่ของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพลีเอทิลีนทเรท (○) ของตัวอย่าง T190G2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

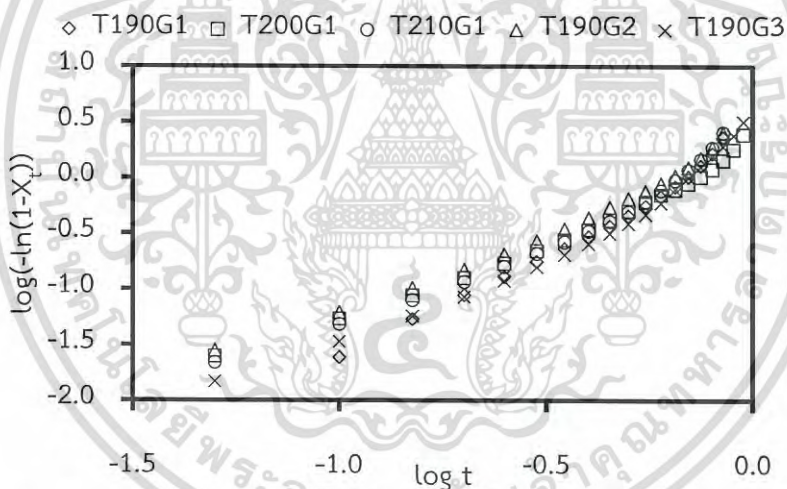


รูปที่ 4.23 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอูณหภูมิกึ่งที่ของเส้นใยพอลิโพรพิลีน (■) และเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน (○) ของตัวอย่าง T190G3

หากพลอตกราฟสมการที่ 2.26 ของทั้งเส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนจะสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ จากรูปภาพทั้งสองนี้บ่งบอกได้ว่าทุกตัวอย่างของเส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนมีความชันและจุดตัดแกนตั้งใกล้เคียงกัน นั่นคือค่า Avrami และค่าของ $\log(Z)$ ซึ่งหมายถึงโครงสร้างของผลึกและอัตราสภาพการเป็นผลึกที่ใกล้เคียงกันตามลำดับ เมื่อรวบรวมข้อมูลแล้วแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.4 พบว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีนที่เตรียมได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิหัวตายคือ T190G1 T200G1 และ T210G1 มีค่า Avrami และอัตราสภาพการเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [64] เมื่อพิจารณาเส้นใยพอลิโพรพิลีน T190G1 T190G2 และ T190G3 พบว่าการปรับความเร็วรอบของเกียร์ปัมในช่วง 12.5 - 20 รอบ/นาที ส่งผลให้ทั้งค่า Avrami และอัตราสภาพการเป็นผลึกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน คือ 1.4 - 1.6 และ 1.5 - 2.1 วินาที¹ ตามลำดับ อนึ่งเมื่อนำเส้นใยพอลิโพรพิลีนไปขึ้นรูปเป็นโพรพบว่าค่า Avrami เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่าง T190G1 ที่เพิ่มขึ้นจาก 1.6 เป็น 2.0 ในขณะที่อัตราสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน ยังคงมีแนวโน้มที่เร็วกว่ากรณีเส้นใยพอลิโพรพิลีนจากผลดังกล่าวนี้อาจพอสรุปได้ว่ากระบวนการเกิดโพรที่ใช่คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารทำฟูส่งผลต่อสภาพการเป็นผลึก คือ สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นได้ง่าย แต่มีปริมาณผลึกน้อย มีช่วงอุณหภูมิของสภาพการเป็นผลึกแคบและใช้เวลาในการเป็นสภาพการเป็นผลึกที่เร็วกว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 4.24 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 4.25 จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สภาพการเป็นผลึกด้วยวิธีจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกแบบอุณหภูมิคงที่

ตัวอย่าง	เส้นใยพอลิโพรพิลีน		เส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน	
	ค่า Avrami (n_{filament})	อัตราสภาพการเป็นผลึก (ต่อวินาที)	ค่า Avrami (n_{foam})	อัตราสภาพการเป็นผลึก (ต่อวินาที)
T190G1	1.4	1.5	2.0	2.1
T200G1	1.4	1.5	1.5	1.6
T210G1	1.6	2.1	1.6	1.9
T190G2	1.5	2.1	1.6	2.1
T190G3	1.6	2.0	1.8	1.8

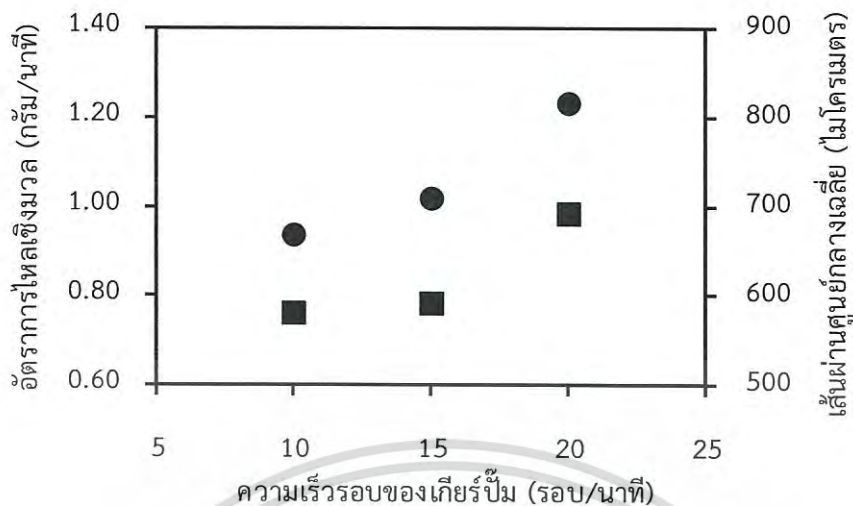
4.2 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 2

การศึกษาในหัวข้อนี้ใช้หลักการและสภาวะการขึ้นรูปเส้นใยพอลิโพรพิลีนตามหัวข้อที่ 4.1 แต่เปลี่ยนความเร็วรอบของเกียร์บีบเป็น 10 (PP1) 15 (PP2) และ 20 (PP3) รอบ/นาที โดยกำหนดให้อุณหภูมิหัวตายคงที่ 190 องศาเซลเซียส เนื่องจากการศึกษาในหัวข้อ 4.1 พบว่าอุณหภูมิหัวตายส่งผลต่อสภาพการเป็นผลึกน้อยกว่าผลจากการเพิ่มความเร็วรอบของเกียร์บีบ จากนั้นนำมาเข้าสู่กระบวนการเกิดโฟมที่สภาวะความดันเกิดโฟม 120 140 และ 160 บาร์ ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 150 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ด้วยเวลาลดความดันน้อยกว่า 5 วินาที จากนั้นนำเส้นใยพอลิโพรพิลีน (PP) และเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน (PPF) มาวิเคราะห์จลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก

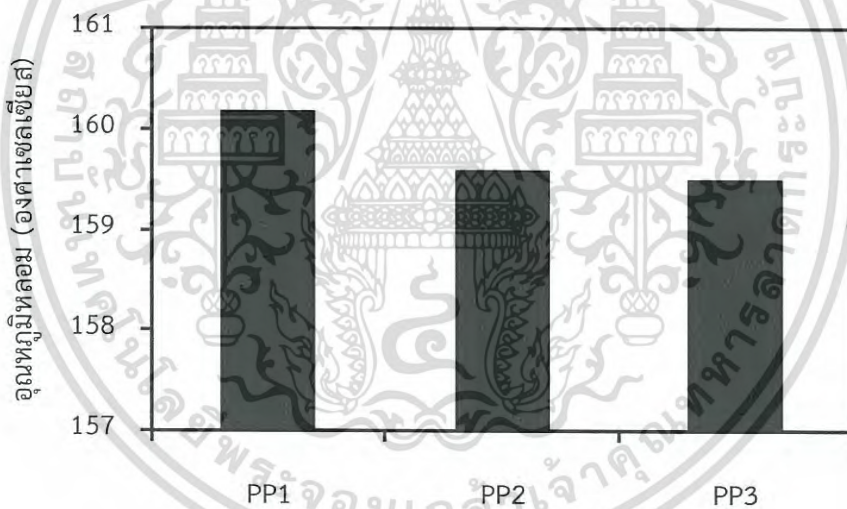
4.2.1 ผลการทดลองของเส้นใยพอลิโพรพิลีน

การเพิ่มความเร็วรอบของเกียร์บีบจาก 10 เป็น 15 และ 20 รอบ/นาที ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.92 1.03 และ 1.25 กรัม/นาที ดังนั้นจึงทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 580 - 690 ไมโครเมตร เมื่อนำเส้นใยพอลิโพรพิลีนไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนพบว่าความเร็วรอบของเกียร์บีบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ทั้งอุณหภูมิหลอมลดลงจาก 160.2 เป็น 150.5 องศาเซลเซียส (รูป 4.27) และดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงจาก 0.28 เป็น 0.23 (รูป 4.28) ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากอัตราการไหลเชิงมวลมากขึ้นเปรียบเสมือนมีแรงดึงเส้นใยมากเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีการหล่อเย็นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Jinan และคณะ [65] ที่พบว่า การดึงเส้นใยให้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิหัวตาย 210 องศาเซลเซียส ทำให้ดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

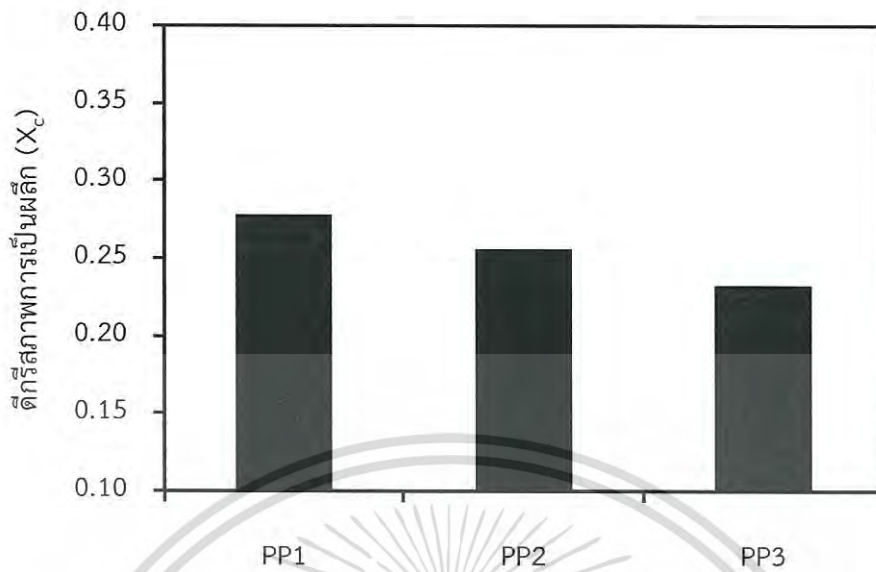


รูปที่ 4.26 ผลของความเร็วรอบของเกียร์ปั๊มต่ออัตราการไหลเชิงมวลของเส้นใยพอลิพรพิลีน (●) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิพรพิลีน (■)



รูปที่ 4.27 อุณหภูมิหลอมของเส้นใยพอลิพรพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



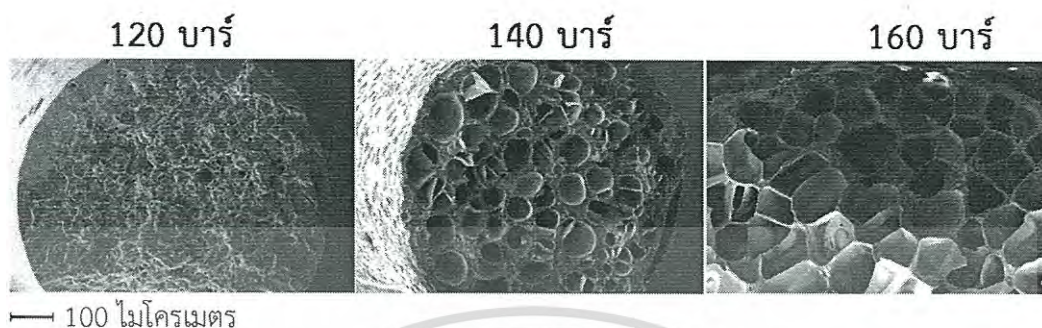
รูปที่ 4.28 ดัชนีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีโพรพิลีน

4.2.2 ผลการทดลองของเส้นใยโพลีโพรพิลีน

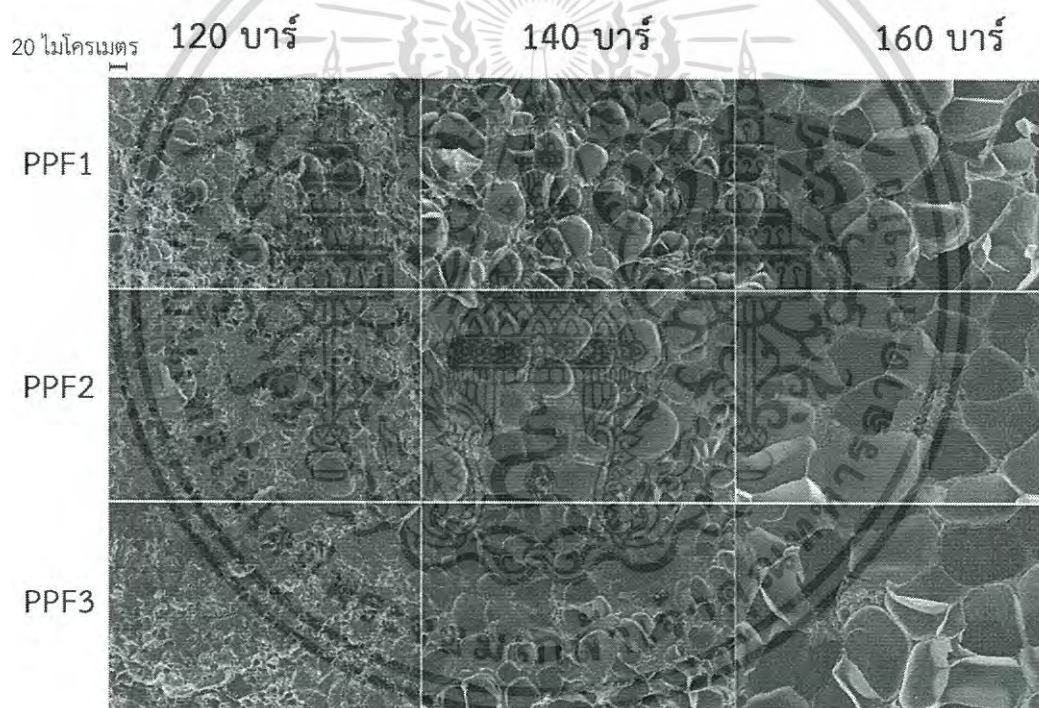
นำเส้นใยโพลีโพรพิลีน PP1 PP2 และ PP3 มาทำการศึกษาปัจจัยของสภาวะการเกิดโพลีเมอร์ด้วยการเปลี่ยนความดันเกิดโพลีเมอร์จาก 120 เป็น 140 และ 160 บาร์ ตามลำดับ เนื่องจากรูปที่ 4.27 เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมประมาณ 160 องศาเซลเซียส แต่ถ้าหากคาร์บอนไดออกไซด์ละลายได้มากขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิหลอมลดลง [41, 59, 66] จึงเลือกอุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส เพื่อคงสภาพการเป็นผลึกให้ได้มากที่สุดและสามารถสังเกตผลของผลึกต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยโพลีโพรพิลีนได้ชัดเจน ผลการทดลองพบว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่ความดันเกิดโพลีเมอร์ 120 บาร์ พองเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากเป็นสภาวะที่คาร์บอนไดออกไซด์เห็นวีกฤตละลายได้น้อย จึงทำให้เกิดเป็นโพลีเมอร์ได้ยาก ดังรูปที่ 4.29 แต่เมื่อเพิ่มค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เห็นวีกฤต ด้วยการเพิ่มความดันเกิดโพลีเมอร์เป็น 140 บาร์ พบว่าในบริเวณเกิดโพลีเมอร์มีพองเพิ่มขึ้น มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีผนังพองที่หนา และเมื่อเพิ่มความดันเกิดโพลีเมอร์เป็น 160 บาร์ พบว่าพองมีขนาดใหญ่ประมาณ 100 ไมโครเมตร พร้อมทั้งมีผนังพองที่บาง เมื่อพิจารณาเส้นใยโพลีโพรพิลีนของ PPF1 PPF2 และ PPF3 ที่ความดัน 120 140 และ 160 บาร์ ดังรูปที่ 4.30 พบว่าพฤติกรรมเกิดโพลีเมอร์คล้ายคลึงกับรูปที่ 4.29 ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าที่ความดันเกิดโพลีเมอร์ต่ำ 120 บาร์ เส้นใยโพลีโพรพิลีน PPF1 PPF2 และ PPF3 ให้สัณฐานวิทยาใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มความดันเกิดโพลีเมอร์เป็น 140 และ 160 บาร์ พบว่า PPF3 มีพองเกิดได้ดี มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ให้ผนังพองที่บาง มีพื้นที่ของโพลีโพรพิลีนให้เกิดโพลีเมอร์น้อยกว่าทั้ง PPF1 และ PPF2 ซึ่งอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากสองประการคือเส้นใยโพลีโพรพิลีน PP3 มีดัชนีสภาพการเป็นผลึกน้อยที่สุด และเมื่อพบกับสภาวะความดันเกิดโพลีเมอร์สูงที่ 160 บาร์ คาร์บอนไดออกไซด์เห็นวีกฤตละลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปริมาณที่มาก อุณหภูมิหลอมจึงลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงของการหลอมลดลง จึงได้โฟมที่มีฟองขนาดใหญ่และกระจายตัวสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายหน้าตัดของเส้นใยโพลีพรพิลีน (PPF2)

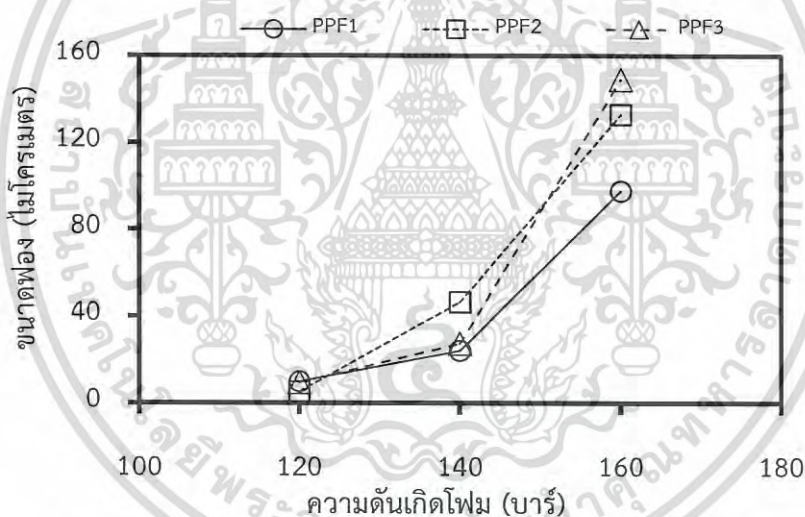


รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายหน้าตัดของเส้นใยโพลีพรพิลีน

เมื่อวิเคราะห์ภาพสัณฐานวิทยาด้วยโปรแกรม Image-J พบว่าการเพิ่มความดันเกิดโฟมจาก 120 เป็น 160 บาร์ ทำให้ฟองมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน คือเพิ่มจาก 10 เป็นประมาณ 120 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.31 เนื่องจากความแข็งแรงของการหลอมลดลง เนื่องจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ จึงส่งผลให้ฟองขยายตัวได้ดีขึ้น และจะเห็นได้ว่า PPF3 มีขนาดฟองใหญ่ที่สุด ประมาณ 150 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายในย่อหน้าก่อนหน้า ในทำนองเดียวกันนี้

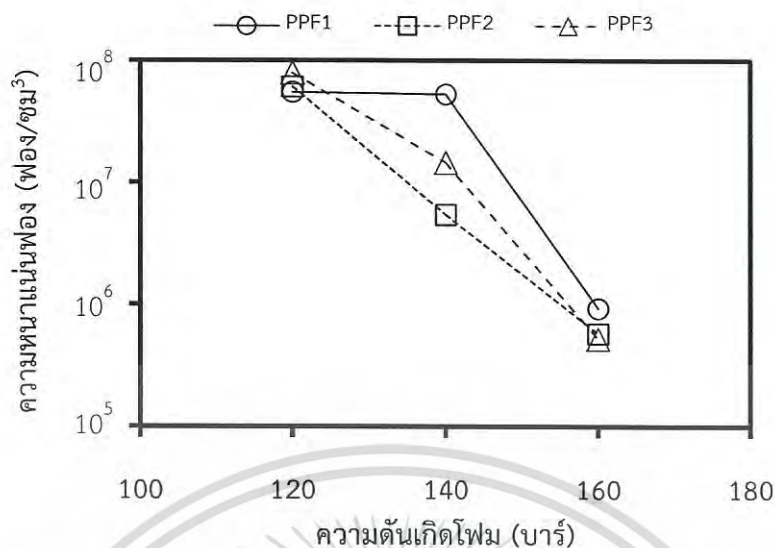
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดฟองที่ใหญ่ขึ้นทำให้ความหนาแน่นฟองลดน้อยลงจาก 10^8 เป็น 10^6 ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.32 จากการที่ขนาดฟองของเส้นใยโพลีโพรพิลีนใหญ่ขึ้นตามความดันเกิดโคมที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีการขยายตัวมากขึ้นดังรูปที่ 4.33 โดยที่เส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ความดันเกิดโคม 120 บาร์ เกิดเป็นโคมได้น้อยจึงมีการขยายตัวยากหรือมีค่าสัดส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกับ 1.0 แต่เมื่อความดันเกิดโคมเพิ่มขึ้น 140 และ 160 บาร์ พบว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนเกิดเป็นโคมได้ดีขึ้น มีสัดส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเป็น 1.3 และ 2.0 ตามลำดับ ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าที่ความดันเกิดโคม 160 บาร์ PPF3 มีสัดส่วนการขยายตัวสูงสุด รองลงมาคือ PPF2 และ PPF1 ตามลำดับ อาจเป็นผลอันเนื่องมาจาก PP1 มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกมากที่สุด ในขณะที่ PP3 มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกน้อยที่สุด จึงส่งผลให้มีอัตราการแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ดีกว่า กรณีของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกมาก ซึ่งอ้างอิงผลจากงานวิจัยของ S. Doroudiani และคณะ [63] ซึ่งได้ศึกษาการแพร่และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในโพลีโพรพิลีนที่มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกต่างๆ

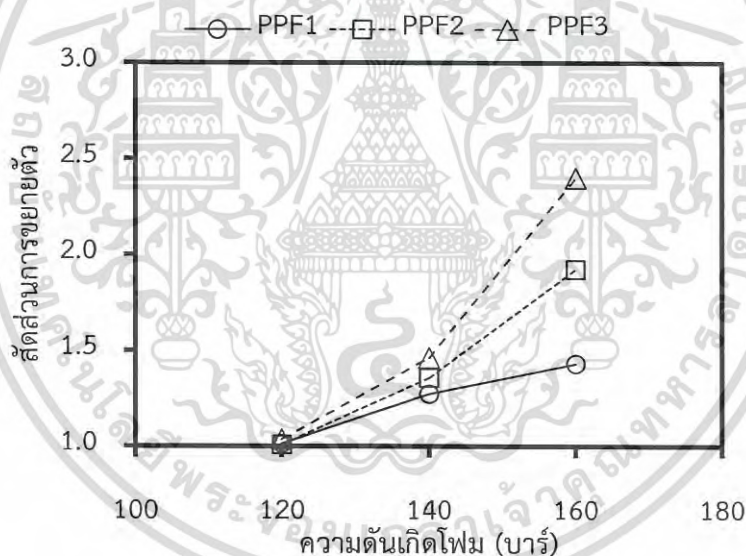


รูปที่ 4.31 ผลของความดันเกิดโคมต่อขนาดฟองของเส้นใยโพลีโพรพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ผลของความดันเกิดไพบต่อความหนาแน่นฟองของเส้นใยโพลีพรพิลีน

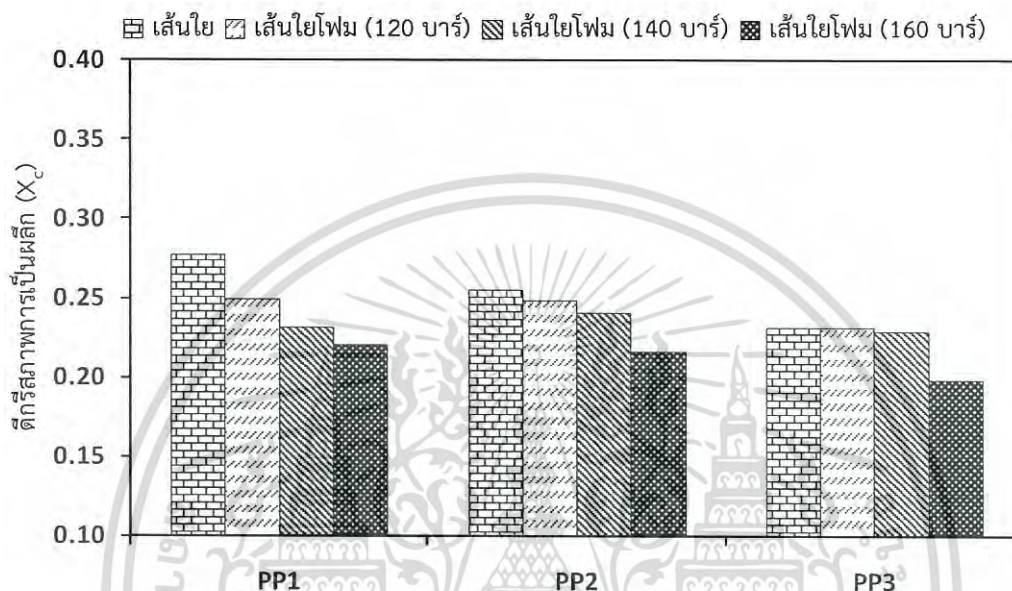


รูปที่ 4.33 ผลของความดันเกิดไพบต่อสัดส่วนการขยายตัวของเส้นใยโพลีพรพิลีน

เมื่อนำชิ้นงานเส้นใยโพลีพรพิลีนและเส้นใยโพลีพรพิลีนไปวิเคราะห์สภาพการเป็นผลึกด้วยวิธีเชิงความร้อน พบว่าดีกรีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีพรพิลีนมีปริมาณน้อยกว่าเส้นใยโพลีพรพิลีนอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาความดันเกิดไพบที่เพิ่มขึ้นในช่วง 120 - 160 บาร์ พบว่าดีกรีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลีพรพิลีนลดลงร้อยละ 10 - 15 โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความดันเกิดไพบ 160 บาร์ เส้นใยโพลีพรพิลีนเกิดเป็นโพบได้ดี มีสัดส่วนการขยายตัวสูง ฟองขนาดใหญ่ ผนังบาง จึงมีพื้นที่ในการเกิดสภาพการเป็นผลึกน้อย เบื้องต้นอาจสรุปได้ว่า การลดความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตส่งผลให้เส้นใยโพลีพรพิลีนมีกระบวนการเกิดโพบได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่ากระบวนการสภาพการเป็นผลึก จึงทำให้มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลง อย่างไรก็ตาม กระบวนการที่เกิดขึ้นของทั้งสองกระบวนการนี้มีการแข่งขันกันในเวลาอันรวดเร็วจึงจำเป็นต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเกิดโพลีเมอร์และสภาพการเป็นผลึก เพื่ออธิบายพฤติกรรมหรือผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.34 ดีกรีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยและเส้นใยโพลีโพรพิลีน

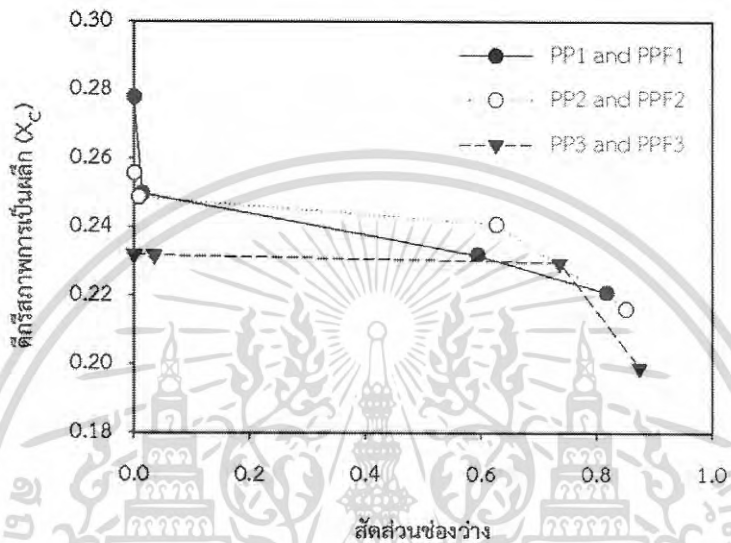
เนื่องจากการติดตามผลและการวิเคราะห์ในระหว่างกระบวนการทั้งสองกระบวนการนั้นทำได้ยาก จึงเลือกใช้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการดังกล่าวแล้วนั้นคือ สันฐานวิทยาของโพลีเมอร์และจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึก โดยเลือกใช้สัดส่วนช่องว่าง (Void Fraction, ε) หรือปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรทั้งหมดของชิ้นงาน เป็นตัวแทนหรือดัชนีที่บ่งบอกความสามารถในการเป็นโพลีเมอร์ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสัดส่วนการขยายตัว (ϕ) [28] ดังสมการ

$$\varepsilon = 1 - 1/\phi \quad (4.1)$$

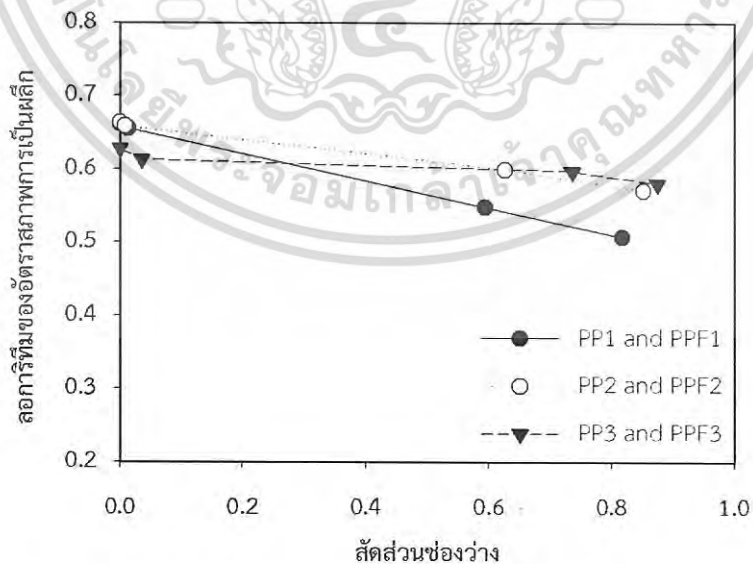
เมื่อสัดส่วนช่องว่างมีค่าเท่ากับ 0.0 นั้นหมายถึงเส้นใยโพลีโพรพิลีน แต่ถ้าสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากกว่า 0.0 แต่น้อยกว่า 1.0 หมายถึงเส้นใยโพลีโพรพิลีน จากรูปที่ 4.35 พบว่าที่สัดส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.0 เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีค่าดีกรีสภาพการเป็นผลึกสูงเฉลี่ยถึง 0.25 แต่เมื่อนำไปขึ้นรูปโพลีเมอร์ จึงทำให้สัดส่วนช่องว่างมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.6 และ 0.8 ส่งผลให้ดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงเหลือประมาณ 0.23 และ 0.20 ตามลำดับ หากพิจารณาความสัมพันธ์ของสัดส่วนช่องว่างและอัตราสภาพการเป็นผลึกดังรูปที่ 4.36 พบว่าสัดส่วนช่องว่าง 0.0 หรือเส้นใยโพลีโพรพิลีนมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอกการิทึมอัตราสภาพการเป็นผลึกของมีค่าประมาณ 0.65 วินาที^{-1} แต่ถ้าเป็นเส้นใยพอลิโพรพิลีนโพรหรือสัดส่วนช่องว่างเป็น 0.6 และ 0.8 พบว่าค่าลอกการิทึมอัตราสภาพการเป็นผลึกลดลงอยู่ในช่วง $0.5 - 0.6 \text{ วินาที}^{-1}$ คือสภาพการเป็นผลึกเกิดได้ช้าถึงแม้ว่าจะมีดิกิริสภาพการเป็นผลึกน้อยกว่าก็ตาม ซึ่งหมายถึงเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีนที่มีการขยายตัวสูง (สัดส่วนการขยายตัวประมาณ 2) ฟองใหญ่ มีกระบวนการเกิดโพรที่เร็วกว่ากระบวนการสภาพการเป็นผลึก



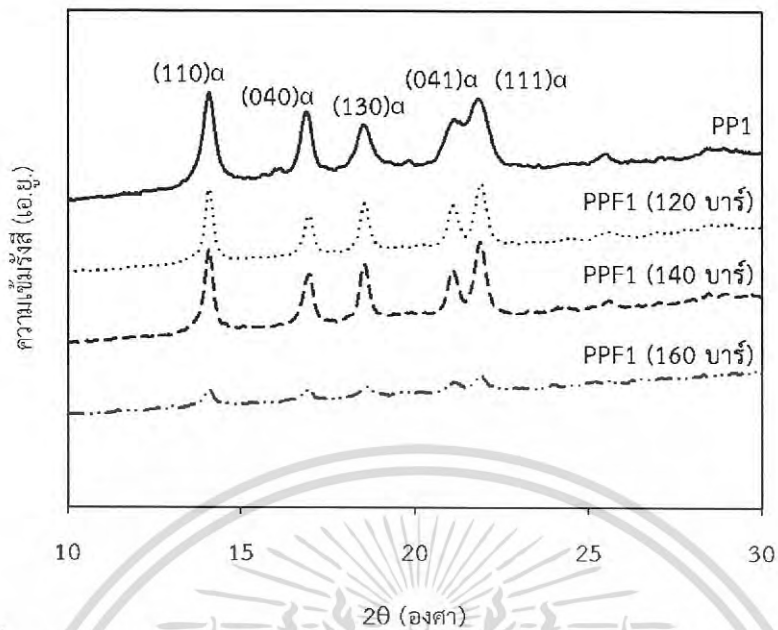
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างและดิกิริสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน



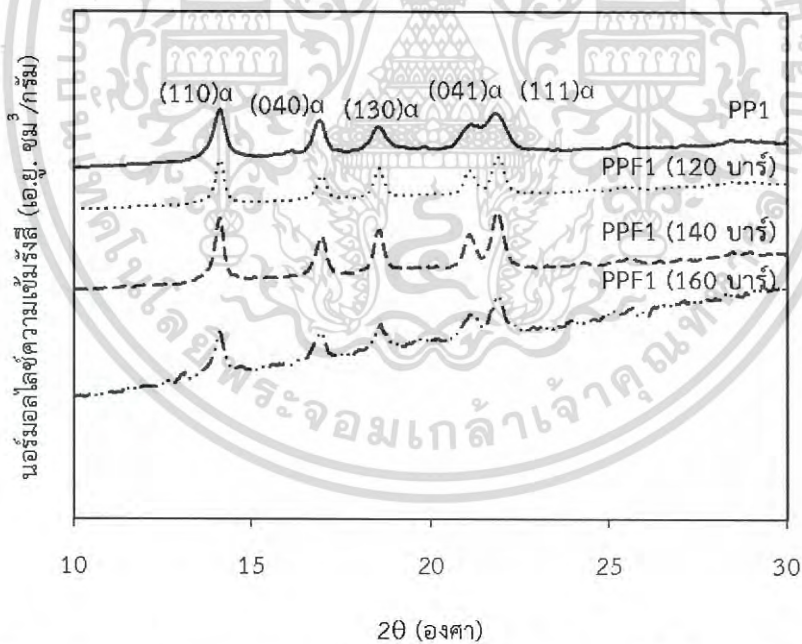
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างและลอกการิทึมของอัตราสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นการยืนยันอีกทางหนึ่งว่าการเกิดโพลีเมอร์ของเส้นใยพอลิโพรพิลีนส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลงและไม่ทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนไป จึงนำชิ้นงานทั้งเส้นใยและเส้นใยโพลีโพรพิลีนไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง WAXD เครื่องนี้จะวัดปริมาณการเลี้ยวเบนของแสง เมื่อผ่านโครงสร้างของผลึกและวัดค่าองศาที่เบี่ยงเบนไป ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโพลีโพรพิลีนปรากฏพีคของกราฟที่ตำแหน่งเดียวกันคือ $(110)\alpha$ $(040)\alpha$ $(130)\alpha$ $(041)\alpha$ และ $(111)\alpha$ นั่นคือตำแหน่งพีคของผลึกของพอลิโพรพิลีน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [35, 37] ซึ่งสรุปได้ว่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก เพียงแต่การเป็นโพลีเมอร์ที่ดีขึ้นส่งผลให้มีดีกรีสภาพการเป็นผลึกน้อยลงหรือพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณา PP1 และ PPF1 ที่ความดันเกิดโพลีเมอร์ 160 บาร์ พบว่าพื้นที่ใต้กราฟลดลงหรือดีกรีสภาพการเป็นผลึกที่ลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ตามจากการค้นคว้าที่ผ่านมาพบว่าการวิเคราะห์ด้วย WAXD ส่วนใหญ่แล้วนิยมทำกับวัสดุที่เป็นเมทริกซ์ต่อเนื่องกันหรือวัสดุประเภทของแข็ง เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกได้โดยตรง แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำวัสดุที่เป็นโพลีเมอร์ที่มีฟองอากาศไปทดสอบด้วย WAXD จึงอาจทำให้เกิดการเบี่ยงเบนหรือผลกระทบจากอากาศที่อยู่ในวัสดุ ทางผู้วิจัยจึงนำเสนอแนวคิดและวิธีในการลดผลกระทบจากโครงสร้างของอากาศหรือโพลีเมอร์ด้วยการนอร์มอลไลซ์ (Normalization) ข้อมูลจากรูปที่ 4.37 โดยการเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีและความหนาแน่นของตัวอย่างนั้นๆ แล้วจึงสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.38 โดยพบว่าทั้งเส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโพลีโพรพิลีนยังคงแสดงตำแหน่งพีคของกราฟที่ตำแหน่งเดิม ในขณะที่พื้นที่ใต้กราฟมีปริมาณใกล้เคียงกันหรืออีกนัยสำคัญก็คือ การนอร์มอลไลซ์ด้วยความหนาแน่นเป็นการวิเคราะห์ถึงสภาพการเป็นผลึกต่อน้ำหนักเมื่อนำเส้นใยพอลิโพรพิลีนมาขึ้นรูปโพลีเมอร์แล้ว สภาพการเป็นผลึกต่อน้ำหนักของทั้งเส้นใยพอลิโพรพิลีนและเส้นใยโพลีโพรพิลีนควรมีค่าใกล้เคียงกันหรือลดลงเนื่องจากผลกระทบจากกระบวนการขึ้นรูปโพลีเมอร์



รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง WAXD ของเส้นใยและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง WAXD ของเส้นใยและเส้นใยโพรพอลิโพรพิลีน เมื่อผ่านการนอร์มอลไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

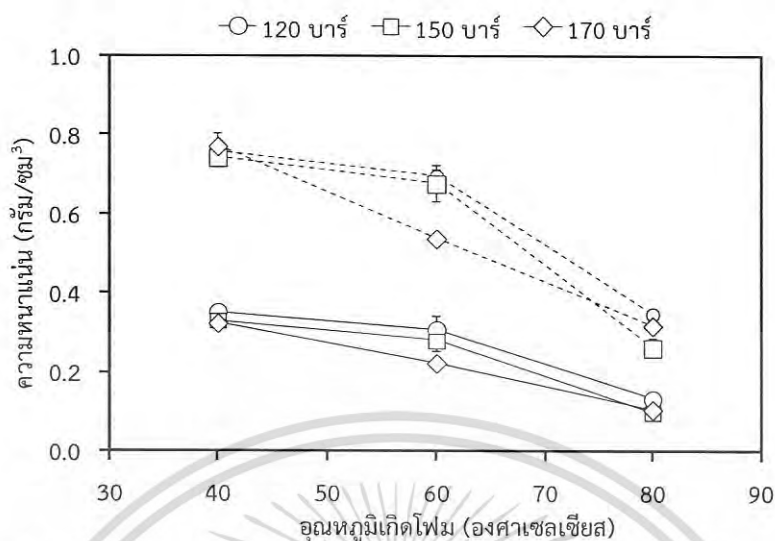
4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์

4.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

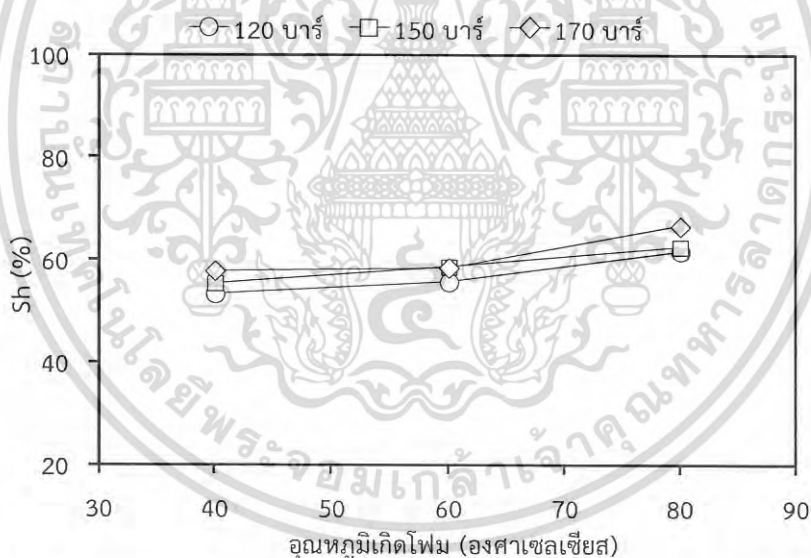
จากประสบการณ์ที่ผ่านมาของผู้วิจัยพบว่า กระบวนการทำโฟมโดยใช้พอลิเมอร์กึ่งผลึกได้แก่ โฟมพอลิเอทิลีน โฟมพอลิโพรพิลีน และ โฟมคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน มีการหดตัวของโฟมน้อยหรือน้อยมาก อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากโฟมดังกล่าว มีสภาพการเป็นผลึกจึงทำให้มีความแข็งแรง และไม่เกิดการหดตัว [66] แต่ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยเลือกใช้พอลิเมอร์อสัณฐานหรือพอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ พร้อมทั้งสังเกตการหดตัวของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอตัวแปรที่ใช้ในการบ่งบอกถึงการหดตัวของโฟมนั้นคือ ร้อยละการหดตัว (Percentage of Shrinkage, Sh) โดยมีนิยามคือปริมาตรที่สูญหายไประหว่างการบ่ม โดยการนำปริมาตรก่อนบ่ม (V_{Before}) เทียบกับปริมาตรหลังบ่ม (V_{After}) แล้วเทียบอัตราส่วนกับปริมาตรก่อนบ่ม แต่อย่างไรก็ตามการวัดหรือการหาปริมาตรของชิ้นงานนั้นทำได้ยาก และพบว่าปริมาตรสัมพันธ์กับความหนาแน่นและมวล จึงสมมติฐานว่ามวลของแก๊สน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ดังนั้นร้อยละการหดตัวจึงสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นก่อนบ่ม (ρ_{Before}) และหลังบ่ม (ρ_{After}) ดังสมการที่ 4.2 เมื่อนำโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เพิ่งผ่านกระบวนการเกิดโฟมไปวัดความหนาแน่นจะพบว่าโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์มีความหนาแน่นก่อนบ่มค่าประมาณ 0.10 - 0.35 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้การที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 60 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ ทำให้เข้าใกล้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 64.1 และ 91.6 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้พอลิไวนิลคลอไรด์มีความยืดหยุ่นสูงและมีโอกาสเกิดเป็นโฟมได้ดีขึ้น ความหนาแน่นก่อนบ่มจึงมีค่าลดลงจาก 0.35 เป็น 0.1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำโฟมเข้ากระบวนการบ่มที่สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดังกล่าวจึงนำชิ้นงานโฟมพอลิโพรพิลีนวัดความหนาแน่นอีกครั้งหนึ่งซึ่งพบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.3 - 0.8 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เท่า เมื่อเทียบกับความหนาแน่นก่อนบ่ม ดังรูปที่ 4.39 จากผลดังกล่าวอาจวิเคราะห์ได้ว่า การหดตัวที่เพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุจากโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงของโฟมและ/หรือมีผนังบาง จึงส่งผลให้การแพร่ซึมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศเกิดขึ้นได้เร็ว อย่างไรก็ตามจากงานวิจัย Merkel และคณะ [67] พบว่าอัตราการแพร่ซึมของคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เร็วกว่าทั้งไนโตรเจนและออกซิเจน (องค์ประกอบหลักของอากาศ) เกือบ 10 เท่า จึงส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ได้เร็วกว่า โครงสร้างโฟมภายในจึงเปรียบเสมือนเป็นสุญญากาศจึงส่งผลให้เกิดการหดตัวและมีร้อยละการหดตัวมากกว่าร้อยละ 50 ดังรูปที่ 4.40

$$Sh = \left(\frac{V_{Before} - V_{After}}{V_{Before}} \right) \times 100 = \left[1 - \left(\frac{\rho_{After} - \rho_{Before}}{\rho_{Before}} \right) \right] \times 100 \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ก่อนบ่ม (เส้นทึบ) และหลังบ่ม (เส้นประ)

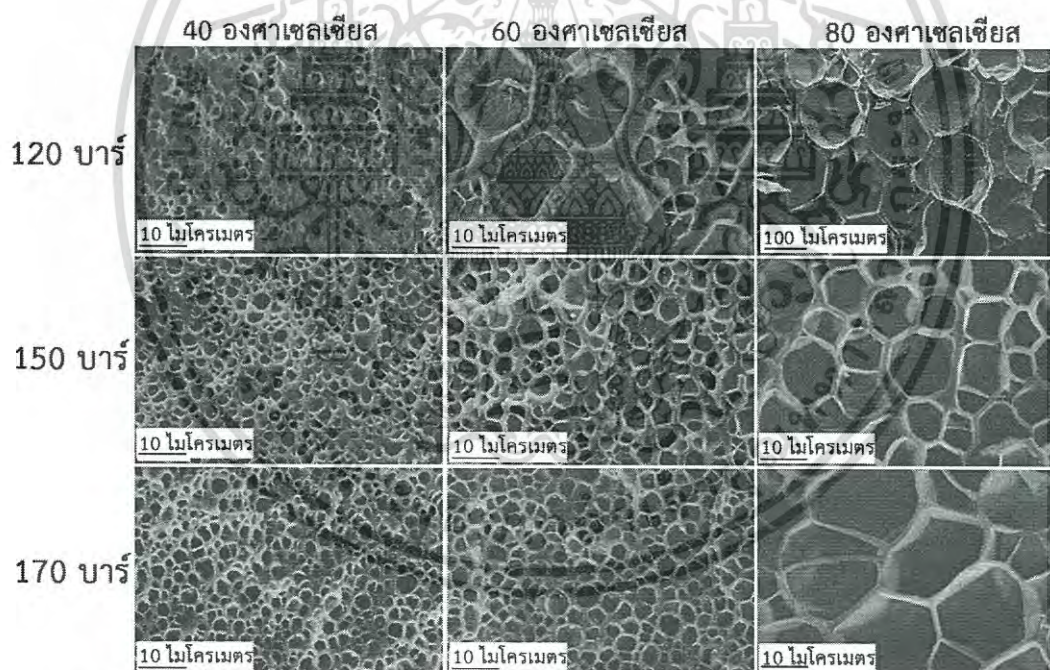


รูปที่ 4.40 ร้อยละการหดตัวของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การอธิบายพฤติกรรมของการเกิดโพลีเมอร์หรือผลจากสภาวะการทดลองต้องอาศัยฐานวิทยาศาสตร์ของโพลีเมอร์ เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเกิดโพลีเมอร์ ภาพสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตแสดงได้ดังรูปที่ 4.41 อธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์ 40 องศาเซลเซียส ฟองของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตทุกความดันเกิดโพลีเมอร์มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว นั่นหมายถึงโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตเมทริกซ์มีความยืดหยุ่นน้อย คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจึงละลายได้ยากและขยายตัวเป็นโพลีเมอร์ที่มีฟองขนาดใหญ่ได้ยาก เมื่ออุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

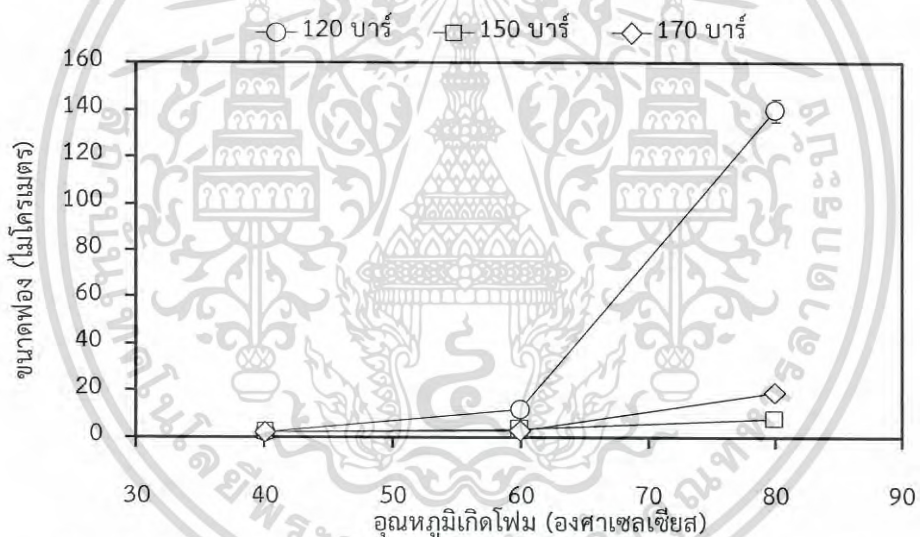
เพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส ฟองของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์มีแนวโน้มใหญ่ขึ้นประมาณ 5 ไมโครเมตร จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 80 องศาเซลเซียส ฟองที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นมาก โดยมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร แต่สำหรับที่สภาวะความดันเกิดโฟม 120 บาร์และอุณหภูมิเกิดโฟม 80 องศาเซลเซียส โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์มีขนาดฟองใหญ่ประมาณ 100 ไมโครเมตร เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์-เหนือวิกฤตละลายได้น้อย จึงมีพื้นที่ในการขยายตัวได้มาก คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายอยู่ในพอลิไวนิลคลอไรด์มีกรรมตัวกันหรือเรียกว่าการรวมตัว กลายเป็นฟองขนาดใหญ่ แทนที่จะเกิดเป็นนิวเคลียสแล้วขยายตัวเป็นฟองแบบอิสระหรือแยกออกจากกัน อนึ่งหากพิจารณาการเพิ่มความดันเกิดโฟมในช่วง 120 - 170 บาร์ ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ คือ 40 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าความดันเกิดโฟมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากเมทริกซ์ของพอลิไวนิลคลอไรด์คงสภาพความแข็งแรงไว้ได้ดี จึงทำให้ฟองขยายตัวได้ยาก แต่ถ้าหากอุณหภูมิเกิดโฟมใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วคือ 80 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของความดันเกิดโฟมเป็นการเพิ่มค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [68, 69] จึงทำให้มีปริมาณฟองเกิดขึ้นมากและมีขนาดเล็กประมาณ 10 ไมโครเมตร



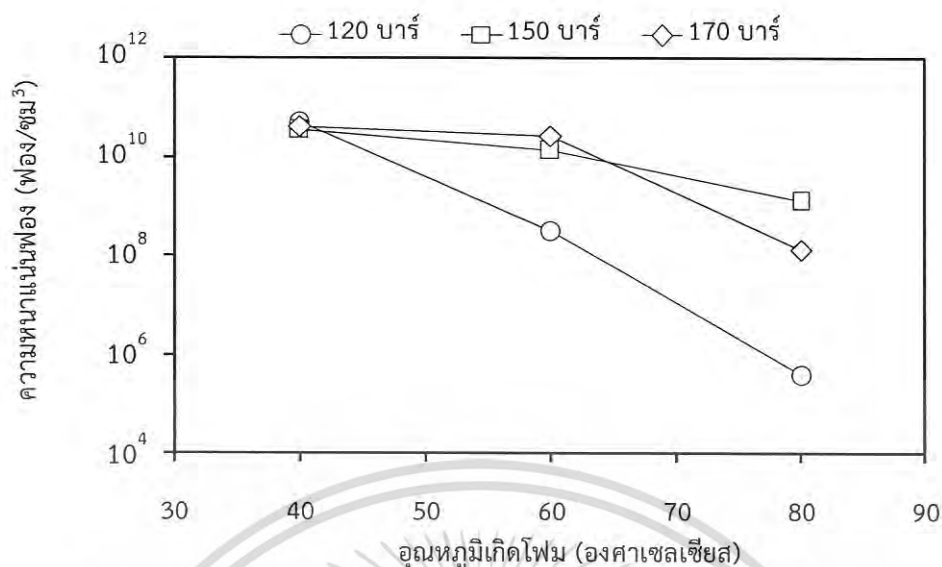
รูปที่ 4.41 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำภาพไมโครกราฟของรูปที่ 4.41 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image-J พบว่าที่อุณหภูมิเกิดโคม 40 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วทำให้ขนาดฟองที่ได้มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร สำหรับโคมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่อุณหภูมิเกิดโคม 80 องศาเซลเซียส ความดันเกิดโคม 120 บาร์ มีขนาดฟองประมาณ 140 ไมโครเมตร แต่ถ้าความดันเกิดโคมเป็น 150 และ 170 บาร์ ส่งผลให้ขนาดฟองมีขนาดเล็กประมาณ 20 ไมโครเมตร เนื่องจากค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ในทำนองเดียวกันนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ส่งผลให้ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตลดลง [68, 69] จึงส่งผลให้ความหนาแน่นฟองลดลงอย่างชัดเจนคือลดลงจาก 10^{10} เป็นประมาณ 10^6 ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิเกิดโคม 80 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันเกิดโคมในช่วง 120 - 170 บาร์ ให้ความหนาแน่นฟองเพิ่มขึ้นจาก 10^6 เป็น 10^{10} ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตละลายได้มากขึ้น [69] อีกทั้งการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วลดลง [70] จึงทำให้การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและเกิดเป็นโคมได้ดีขึ้น



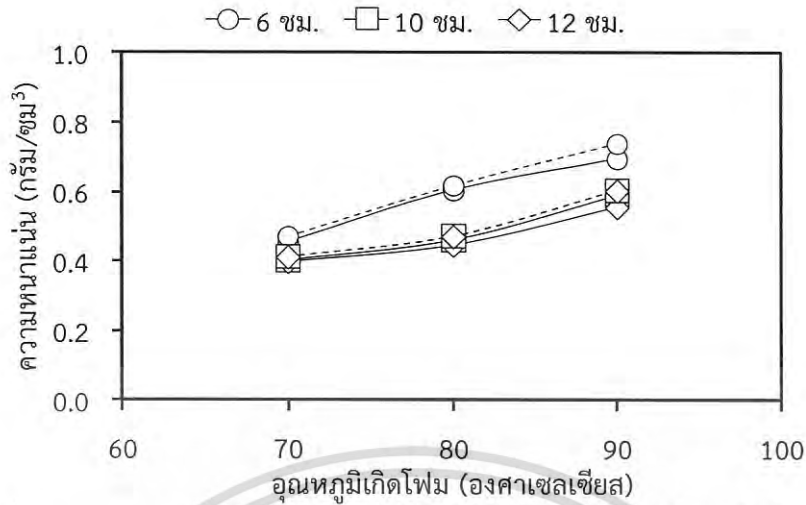
รูปที่ 4.42 ขนาดฟองของโคมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต



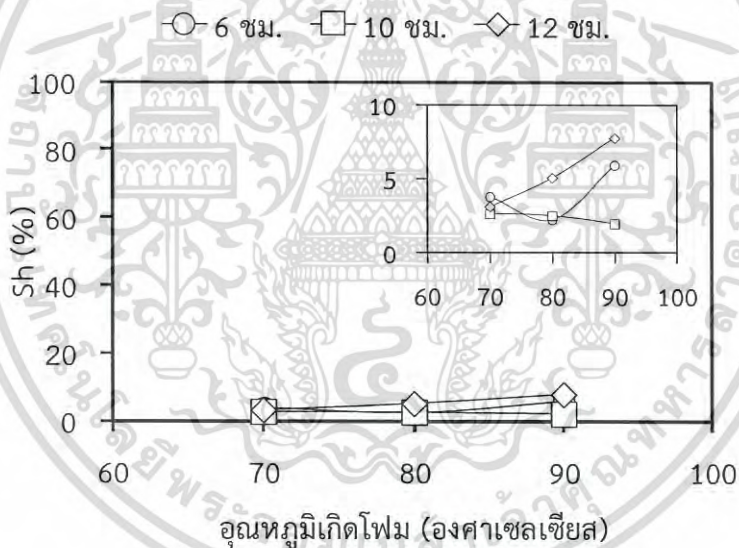
รูปที่ 4.43 ความหนาแน่นฟองของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

หัวข้อที่ผ่านมาพบว่าโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีร้อยละการหดตัวสูงถึง 60 จึงส่งผลให้หัวข้อนี้เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวและใช้การเกิดโฟมแบบเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการหดตัวของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ถูกแช่ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว 6 ชั่วโมง มีความหนาแน่นก่อนการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 0.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามอุณหภูมิเกิดโฟมที่เพิ่มขึ้นในช่วง 70 – 90 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.44 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการแช่คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็น 10 และ 12 ชั่วโมง พบว่าความหนาแน่นก่อนการบ่มลดลงมาอยู่ในช่วง 0.4 – 0.6 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร นั่นอาจเป็นเพราะคาร์บอนไดออกไซด์เหลว สามารถแพร่และละลายเข้าไปในพอลิไวนิลคลอไรด์ได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาความหนาแน่นหลังการบ่มพบว่า ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นั่นหมายถึงโครงสร้างของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์มีการหดตัวเพียงเล็กน้อยหรือคิดเป็นร้อยละการหดตัวที่ต่ำกว่า 10 ดังรูปที่ 4.45 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าการเกิดโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวให้ร้อยละการหดตัวของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์น้อยกว่าการเกิดโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต จากนั้นจึงต้องศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ได้จากคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เพื่ออธิบายถึงเหตุผลที่การหดตัวจึงลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.44 ความหนาแน่นของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ที่ก่อนบ่ม (เส้นทึบ) และหลังบ่ม (เส้นประ)

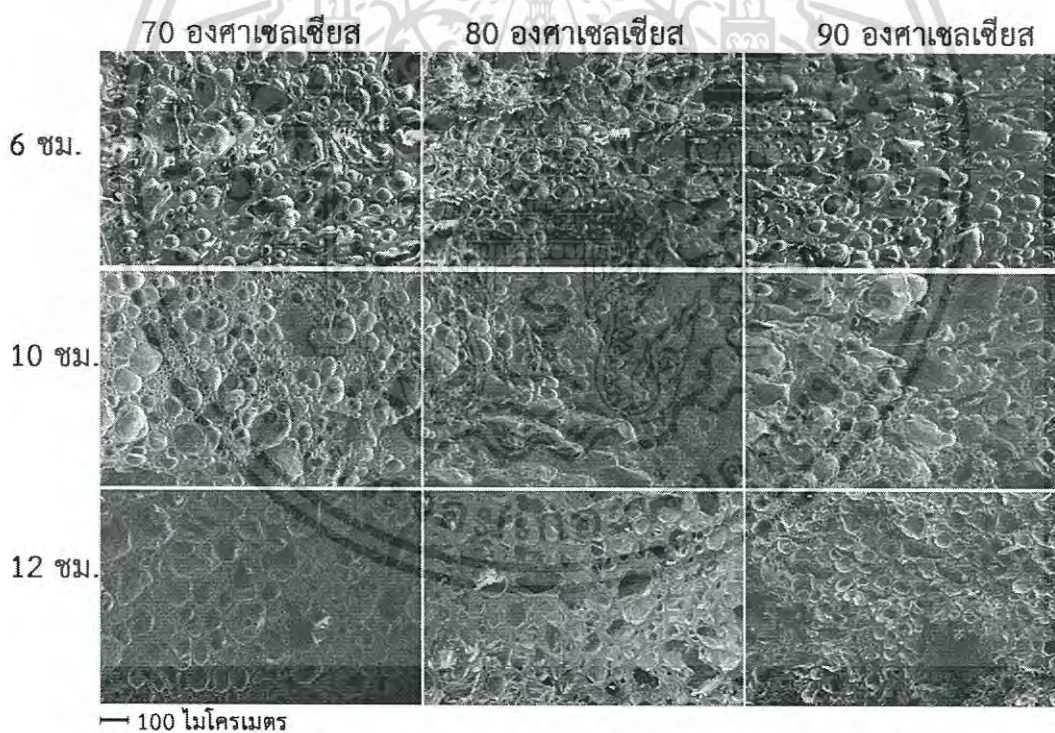


รูปที่ 4.45 ร้อยละการหดตัวของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

เมื่อพิจารณาภาพรวมของสัญญาณวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ตามรูปที่ 4.46 พบว่าโฟมที่ได้นั้นมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ คือมีทั้งฟองขนาดใหญ่และขนาดเล็ก สาเหตุอาจเกิดจากที่ในขั้นตอนการกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสด้วยการจุ่มตัวอย่างลงในอ่างร้อนเพียง 5 วินาที ที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนไม่ทั่วชิ้นงาน อีกทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำหรือมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เพียง 0.19 วัตต์/เมตร เคลวิน [71] จึงทำให้มีการกระตุ้นการเกิดนิวเคลียสในขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสไม่พร้อมกันทั้งชิ้นงาน ฟองที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

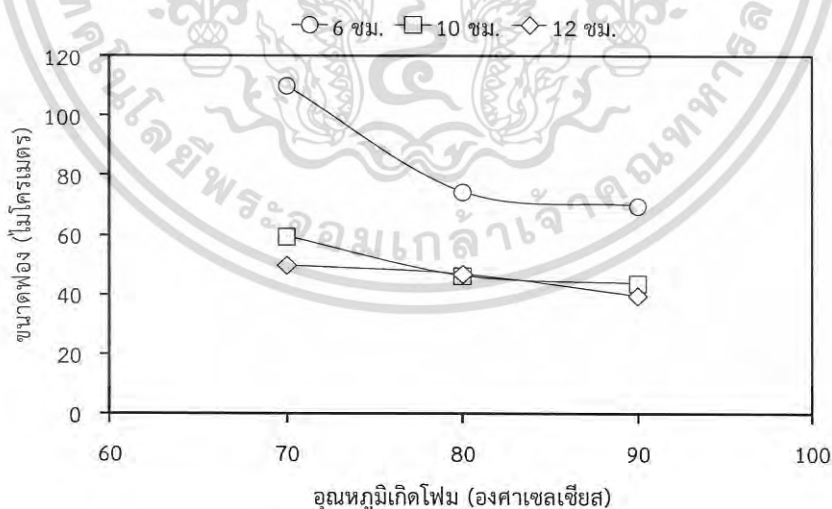
เกิดขึ้นจึงมีขนาดไม่สม่ำเสมอ การแช่คาร์บอนไดออกไซด์เหลว 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 70 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดโฟมได้ดีแต่มีผนังระหว่างฟองค่อนข้างหนา อีกทั้งยังมีพื้นที่ให้เกิดฟองได้อีก นั้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นก่อนบ่มมีค่าค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากคาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีเวลาในการแพร่และละลายได้น้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมจึงเกิดเป็นโฟมที่มีสัณฐานวิทยาที่ใกล้เคียงกัน หากเพิ่มเวลาในการแพร่คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็น 10 และ 12 ชั่วโมง ปรากฏว่าโฟมเกิดได้ดีขึ้น เกิดเป็นโฟมได้ทั่วทั้งชิ้นงานและมีผนังบางลง เนื่องจากเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวแพร่และละลายในพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ดีขึ้นจึงมีแนวโน้มในการเกิดโฟมได้ดีขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเกิดโฟมเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานในการแยกเฟส (Phase Separation) หรือพลังงานกระตุ้นของการเกิดนิวเคลียสของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวและพอลิไวนิลคลอไรด์ จึงส่งผลให้ฟองมีขนาดเล็กและมีปริมาณที่มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 90 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.46 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

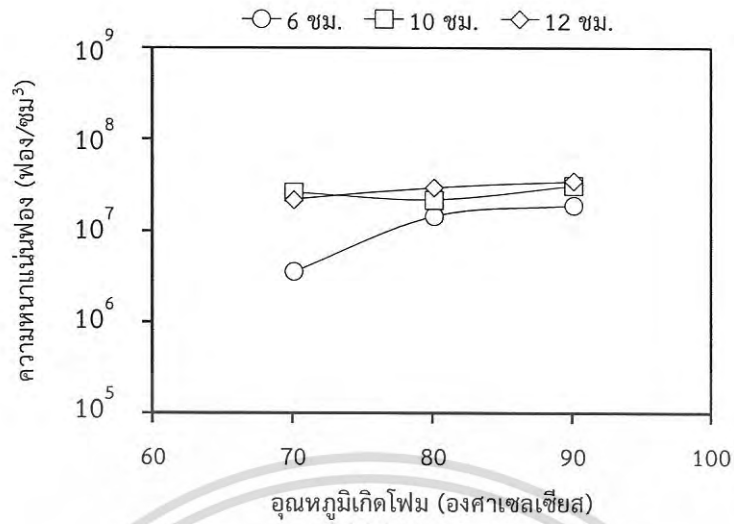
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำภาพสัณฐานวิทยาของโคมพอลิไวนิลคลอไรด์มาวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพองหรือขนาดพองดังรูปที่ 4.47 พบว่า โคมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่แช่คาร์บอนไดออกไซด์เหลว 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเกิดโคม 70 องศาเซลเซียส มีขนาดพองประมาณ 110 ไมโครเมตร และลดลงเป็น 75 และ 70 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโคมเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกิดโคม เป็นการกระตุ้นให้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ละลายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิไวนิลคลอไรด์กลายเป็นแก๊ส ซึ่งทำให้เกิดพองในพอลิไวนิลคลอไรด์มากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาของการแพร่คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็น 10 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเกิดโคม 70 องศาเซลเซียส พบว่าพองที่ได้มีขนาดเล็กลงประมาณ 50 ไมโครเมตร และ 40 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโคมเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดคือความหนาแน่นพองดังรูปที่ 4.48 พบว่าที่การแช่ 6 ชั่วโมง โคมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นพองเพียง 3×10^6 พอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อให้พลังงานเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดการกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสและกลายเป็นพองได้มากขึ้น โดยมีความหนาแน่นพองประมาณ 2×10^7 พอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าหากเพิ่มเวลาในการแพร่และการละลายเป็น 10 และ 12 ชั่วโมง พบว่าความหนาแน่นพองเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโคม 70 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเกิดโคม 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าความหนาแน่นพองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหลวอาจใช้เวลาเพียง 10 ชั่วโมง ในการแพร่และการละลายในพอลิไวนิลคลอไรด์ เมื่อเพิ่มเวลาให้นานขึ้นจึงไม่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของโคมพอลิไวนิลคลอไรด์



รูปที่ 4.47 ขนาดพองของโคมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 ความหนาแน่นฟองของโฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพลีโพรพิลีนชั้นตอนที่ 1

5.1.1 การศึกษาเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ความเร็วรอบของเกียร์บีบเพิ่มขึ้นจาก 12.5 เป็น 20 รอบ/นาที ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นในช่วง 0.9 - 1.3 กรัม/นาที ส่งผลให้มีแนวโน้มของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเล็กลงจาก 860 ไมโครเมตร เป็น 830 ไมโครเมตร แต่ผลการทดลองนี้ถือว่ามี การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

- อุณหภูมิหัวตาย 190 200 และ 210 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นในช่วง 0.9 - 1.3 กรัม/นาที และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 860 เป็น 874 ไมโครเมตร แต่ถือว่าทั้งอัตราการไหลเชิงมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

- ไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีนที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเส้นใยมีตีกริสภาพการเป็นผลึกเพิ่มขึ้นจาก 0.35 โดยเฉลี่ยเป็น 0.40

5.1.2 การศึกษาเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ลักษณะทางกายภาพทางหน้าตัดของเส้นใยโพลีโพรพิลีนแบ่งออกได้เป็นสองกรณีคือ

กรณีที่ 1 เส้นใยโพลีโพรพิลีนขยายตัวต่ำ (สัดส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรประมาณ 1.0) ที่สภาวะความดันเกิดโพลี 120 บาร์ อุณหภูมิเกิดโพลี 165 และ 170 องศาเซลเซียส คือ โพลีสามารถเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่เป็น อสัณฐาน นิวเคลียสของ Spherulite และ Interlamellar เท่านั้น

กรณีที่ 2 เส้นใยโพลีโพรพิลีนขยายตัวสูง (สัดส่วนการขยายตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 1.2) ที่สภาวะความดันเกิดโพลี 120 บาร์ อุณหภูมิเกิดโพลี 175 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเกิดโพลีที่สูงกว่ากรณีที่ 1 พบว่า เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีหน้าตัดที่ประกอบด้วยสองส่วนคือ ชั้นผิว (Skin Layer) ซึ่งไม่เกิดโพลีหรือเกิดน้อยมาก และแกนกลาง (Core) เป็นส่วนที่พองเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเนื่องจากสภาพการเป็นผลึกลดลง จึงทำให้มีการขยายตัวและขยายตัวตามแนวยาว เนื่องจากถูกกำหนดด้วยชั้นผิว มีขนาดพองโดยเฉลี่ยเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร มีสัดส่วนการขยายตัวตามแนวยาว 1.03 ซึ่งมากกว่าสัดส่วนการขยายตัวตามแนวรัศมี ที่มีค่าเท่ากับ 1.00

- เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีดัชนีความเป็นโพลีไอโซทรอปิกอยู่ในช่วง 1.1 - 2.3 ซึ่งเบี่ยงเบนออกจากความเป็นโพลีไอโซทรอปิก ที่มีดัชนีความเป็นโพลีไอโซทรอปิกอยู่ในช่วง 0 - 0.895 [29]

- เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีตีกริสภาพการเป็นผลึกน้อยกว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนประมาณ 10% และใช้เวลาในการเป็นสภาพการเกิดผลึกอยู่ในช่วง 0.8 - 1.0 นาที เร็วกว่าในกรณีที่

เป็นเส้นใยพอลิโพรพิลีนคืออยู่ในช่วง 0.8 - 1.1 นาที ซึ่งแสดงถึงดีกรีสภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลิโพรพิลีนมีปริมาณน้อยกว่าเส้นใยพอลิโพรพิลีน

- ค่า Avrami ของเส้นใยโพลิโพรพิลีนอยู่ในช่วง 1.5 - 2.0 (-) และค่า Avrami ของเส้นใยพอลิโพรพิลีนอยู่ในช่วง 1.4 - 1.6 (-) ซึ่งถือว่ามีโครงสร้างผลึกใกล้เคียงกัน ในขณะที่อัตราสภาพการเป็นผลึกอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันคือ 1.5 - 2.1 วินาที¹

5.2 การศึกษาผลของผลึกต่อเส้นใยโพลิโพรพิลีนขั้นตอนที่ 2

5.2.1 ผลการทดลองของเส้นใยพอลิโพรพิลีน

- ความเร็วรอบของเกียร์บีบเพิ่มขึ้น (10 - 20 รอบ/นาที) ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น (0.9 - 1.2 กรัม/นาที) และมีแนวโน้มของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยใหญ่ขึ้น (580 - 700 ไมโครเมตร)

- เส้นใยพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมลดลงจาก 161 เป็น 159 องศาเซลเซียส และดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงจาก 0.28 เป็น 0.23 ตามความเร็วรอบของเกียร์บีบที่เพิ่มขึ้น

5.2.2 ผลการทดลองของเส้นใยโพลิโพรพิลีน

- การเพิ่มความดันเกิดโพลิเมอร์ ในช่วง 120 - 170 บาร์ ทำให้เส้นใยพอลิโพรพิลีนเป็นโพลิเมอร์ที่ดีขึ้น และมีขนาดฟองใหญ่ขึ้นจาก 10 ไมโครเมตร เป็น 120 ไมโครเมตร ส่งผลให้ความหนาแน่นฟองลดลงจาก 10^8 เป็น 10^6 ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีสัดส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 เท่า

- เส้นใยโพลิโพรพิลีนมีดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงประมาณ 10 - 15% เมื่อเทียบกับเส้นใยพอลิโพรพิลีน

- การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัณฐานวิทยาของโพลิเมอร์ด้วยสัดส่วนช่องว่างและจลนพลศาสตร์สภาพการเป็นผลึกของเส้นใยโพลิโพรพิลีน พบว่าสัดส่วนช่องว่างเข้าใกล้ 1 ทำให้ดีกรีสภาพการเป็นผลึกลดลงประมาณ 10 - 15% แต่อัตราสภาพการเป็นผลึกลดลงเพียง 5 - 10%

- การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในเส้นใยโพลิโพรพิลีนไม่ส่งผลให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยพอลิโพรพิลีน ซึ่งยืนยันผลได้ด้วย WAXD

- การวิเคราะห์ด้วย WAXD นิยมใช้กับวัสดุที่เป็นของแข็ง งานวิจัยนี้วิเคราะห์ WAXD ด้วยโพลิเมอร์ จึงเสนอวิธีการนอร์มอลไลซ์เพื่อลดผลกระทบจากโครงสร้างโพลิเมอร์ ด้วยการเทียบอัตราส่วนของความเข้มรังสีและความหนาแน่น ผลที่ได้พบว่าพื้นที่ใต้กราฟซึ่งบอกถึงปริมาณผลึก มีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นการนอร์มอลไลซ์จึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถอธิบายการวิเคราะห์ตัวอย่างโพลิเมอร์ด้วย WAXD ได้

5.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีไวนิลคลอไรด์

5.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

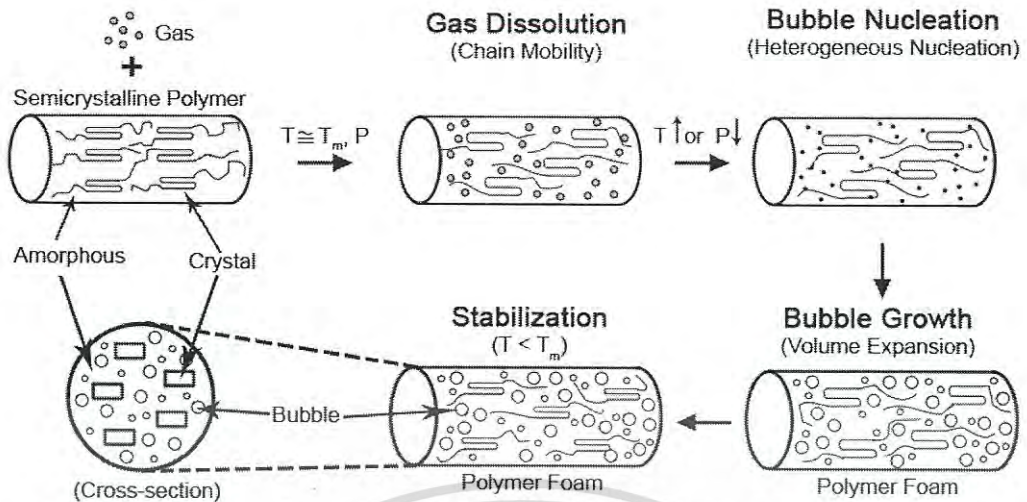
การทำโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ได้ฟองที่มีขนาดเล็ก เล็กกว่า 20 ไมโครเมตร ผนังฟองบาง แต่มีความหนาแน่นฟองสูงถึง $10^8 - 10^{11}$ ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีร้อยละการหดตัวมากกว่า 50

5.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

การทำโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ได้ฟองที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 40 - 60 ไมโครเมตร ผนังฟองหนา มีความหนาแน่นฟองต่ำประมาณ $10^6 - 10^8$ ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่มีร้อยละสัดส่วนการหดตัวน้อยกว่า 10%

5.4 องค์ความรู้ที่เกิดจากการศึกษา

โดยทั่วไปแล้วหลักการเกิดโพลีเมอร์อสัณฐาน (Amorphous Polymer) และ/หรือโพลีเมอร์หลอม (Fully Molten Polymer) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ การแพร่และการละลายของแก๊สในโพลีเมอร์ การเกิดนิวเคลียส (Bubble Nucleation) การเจริญเติบโตของฟอง (Bubble Growth) และการคงสภาพ (Stabilization) อย่างไรก็ตามสำหรับเส้นใยโพลีเอทิลีนกึ่งผลึกและ/หรือโพลีเมอร์หลอมบางส่วน (Partially Molten Polymer) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเกิดโพลีไกล์เคียงกับอุณหภูมิหลอม จะแตกต่างออกไปหรือแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งอธิบายได้ว่าความร้อนจะส่งผลให้โครงสร้างผลึกบางส่วนเสียหาย นั่นหมายถึงพื้นที่ในการละลายของแก๊สเพิ่มมากขึ้น เมื่อแก๊สละลายในโพลีเมอร์ส่งผลให้เกิดปริมาตรอิสระ (Free Volume) และการเคลื่อนที่ของสายโซ่ (Chain Mobility) หลังจากนั้นเมื่อแก๊สละลายจนเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว ระบบจะถูกกระตุ้นหรือรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Instability) ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหรือการลดความดันอย่างรวดเร็ว นั่นคือเป็นการกระตุ้นทำให้เกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation) ถัดมานิวเคลียสจะขยายตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ถ้าหากนิวเคลียสนั้นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤต (Critical Radius) จะทำให้มีการขยายตัวต่อเนื่องและกลายเป็นฟองภายในโครงสร้างของโพลีเมอร์ จากการที่ผลึกเรียงตัวตามแนวยาวของเส้นใย ส่งผลให้เส้นใยโพลีเกิดการขยายตัวตามแนวยาวมากกว่าตามแนวรัศมี จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการคงสภาพของฟองและทำให้เกิดโครงสร้างของโพลีเมอร์ในที่สุด ซึ่งในขั้นตอนนี้แก๊สที่แพร่ออกจากโพลีเมอร์ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมจะส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางโมเลกุลใหม่ (Reorientation) ภายในโครงสร้างของโพลีเมอร์



รูปที่ 5.1 หลักการเกิดโฟมของเส้นใยพอลิเมอร์ (In-situ Filament Foam Mechanism)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จีราวรรณ หาญวัฒนกุล. โฟมพลาสติกชนิดพอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน (Polyurethane and Polystyrene Plastic Foams). [Online]. Available: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/bla_4_2550_foams.pdf. 2008.
- [2] พงศ์ประภาส ปิยมโนชา. “การทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โฟมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [3] D. Klemfner and K. C. Frisch. Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. New York : Hanser Publishers. 1991.
- [4] Siu Ning Sunny 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.
- [5] S.T. Lee and N.S. Ramesh. Polymer Foams: Mechanisms and Materials. New York : CRC PRESS. 2004.
- [6] The Zang Research Group. Homogeneous Nucleation. [Online]. Available: <http://www.eng.utah.edu/~lzang/images/lecture-10.pdf>. 2017.
- [7] M.A. Shafi and R.W. Flumerfelt. “Initial bubble growth in polymer foam processes” Chemical Engineering Science. Vol. 52. July 1996. pp. 627-633.
- [8] Jaakko I. Raukola. “A new technology to manufacture polypropylene foam sheet and biaxially oriented foam film.” Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 361. 1998.
- [9] David Eaves. Handbook of Polymer Foams. Crewe : The Printing House. 2004.
- [10] Zhi-Mei Xu, Xiu-Lei Jiang, Tao Liu, Guo-Hua Hu, Ling Zhao, Zhong-Nan Zhu and Wei-Kang Yaun. “Foaming of polypropylene with supercritical carbon dioxide” Journal of Supercritical Fluids. Vol. 41. 2007. pp 299-310.
- [11] L.J. Lee, C. Zeng, X. Cao, X. Han, J. Shen and G. Xu. “Polymer nanocomposites foam” Composites Science and Technology. Vol. 65. 2005. pp 2344-2363.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] A.K. Bledzki and O. Faruk. "Injection moulded microcellular wood fibre-polypropylene composites" *Composites: Part A*. Vol. 37. 2006. pp. 1358-1367.
- [13] Domasius Nwabunma and Thein Kyu. *Polyolefin Composites*. New York : John Wiley & Sons, Inc . 2007.
- [14] Shau-Tarng Lee, Chul B. Park and N.S. Ramesh. *Polymeric Foams: Science and Technology*. United States of America : Taylor & Francis. 2007.
- [15] Robin Britton. *Update on Mouldable Particle Foam Technology*. Shrewsbury : iSmithers. 2009.
- [16] J.M. Smith, H.C. Van Ness and M.M. Abbott. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. 7th Edition. Singapore : McGraw-Hill. 2005.
- [17] Maartjie F. Kemmere and Thierry Meyer. *Supercritical Carbon Dioxide in Polymer Reaction Engineering*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2005.
- [18] Donald G. Baird and Dimitris I. Collias. *Polymer Processing: Principle and Design*. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1998
- [19] R.Scheichl, M.-H. Klopffer, Z.Benjelloun-Dabaghi and B. Flaconnèche. "Permeation of gases in polymers: parameter identification and nonlinear regression analysis" *Journal of Membrane Science*. Vol. 254. 2005. pp 275-293.
- [20] Surat Areerat, Eita Funami, Yusuke Hayata, Dai Nakagawa and Mashimaro Ohshima. "Measurement and prediction of diffusion coefficients of supercritical CO₂ in molten polymers" *Polymer Engineering and Science*. Vol. 44. October 2004. pp 1915-1924.
- [21] Zhen-hua Chen, Kun Cao, Zhen Yao and Zhi-ming Huang. "Modeling solubilities of subcritical and supercritical fluids in polymers with cubic and non-cubic equations of state" *Journal of Supercritical Fluids*. Vol. 49. 2009. pp 143-153.
- [22] Y. Kong, J. N. Hay, "The measurement of the crystallinity of polymers by DSC", *Polymer.*, Vol. 43. 2002. pp 3873-3878.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] J. Karger-Kocsis: **Polypropylene structure, blends and composites: Vol. 2 Copolymers and blends**, 1st Edition, Chapman and Hall Publisher: London. 1995.
- [24] Melvin Avrami, “Kinetics of Phase Change. I General Theory”, **J. Chem. Phy.** Vol. 7, 1929. pp. 1103-1112.
- [25] Melvin Avrami, “Kinetics of Phase Change. II Transformation Time Relations for Random Distribution of Nuclei”, **J. Chem. Phy.** Vol. 8, 1940. pp. 212-224.
- [26] Melvin Avrami, “Granulation, Phase Change, and Microstructure Kinetics of Phase Change III”, **J. Chem. Phy.** Vol. 9, 1941. pp. 177-184.
- [27] Raghavendra Ratnakar Hegde. **Structure and Properties of Nanoclay Reinforced Polymer Films, Fibers and Nonwovens**. [Online]. Available: http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1069&context=utk_graddiss. 2017.
- [28] Niu Pengfei, Wang Xiaojun, Liu Baoying, Long Shengru, Yang Jie, “Melting and nonisothermal crystallization behavior of polypropylene-hemp fiber composites”, **J. Compos. Mater.**, Vol. 46. 2011 pp. 203-210.
- [29] Ryan Gosselin and Denis Rodrigue. “Cell morphology analysis of high density polymer foams” **Polymer Testing**. Vol. 24. 2005. pp 1027-1035.
- [30] Piyapong Buahom and Surat Areerat. “Characterization of foam cell density with principle of critical bubble lattice” **Proceeding of the Polymer Processing Society 26th Annual Meeting**, G10-640. 2010.
- [31] U.K. Dwivedi and Navin Chand. “Influence of MA-g-PP on abrasive wear behavior of chopped sisal fibre reinforced polypropylene composites” **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 209. 2009. pp 5371-5375.
- [32] N.Sombatsompop, C.Yotinwattanakumtorn and C. Thongpin. “Influence of Type and Concentration of Maleic Anhydride Grafted Polypropylene and Impact Modifiers on Mechanical Properties of PP/Wood Sawdust Composites” **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 97. 2005. pp 475-484.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [33] Ying-Hsiao Li, Kenneth H. Dillard and Robert L. Robinson, Jr. "Vapor-Liquid Phase Equilibrium for Carbon Dioxide-n-Hexane at 40, 80 and 120°C" *Journal of Chemical and Engineering Data*. Vol. 26. 1981. pp 53-55.
- [34] Deming Mao, Jack R. Edwards and Albert Harvey, "Prediction of foam growth and its nucleation in free and limited expansion" *Chemical Engineering Science*. Vol. 61. 2006. pp. 1836-1845.
- [35] X. L. Jiang, T. Liu, Z. M. Xu, L. Zhao, G. H. Hu and W. K. Yuan, "Effects of crystal structure on the foaming of isotactic polypropylene supercritical carbon dioxide as a foaming agent", *Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 48, 2009, pp. 167-175.
- [36] Konstantinos G. Gatos, Chrysa Minogianni and Costas Galiotis, "Quantifying Crystalline Fraction within Polymer Spherulites", *Macromolecules*, Vol. 40, 2007, pp. 786-789.
- [37] 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.
- [38] Shohei Yoshimura, Tomioka; Toru Yamaguchi, Utsunomiya; Masato Kanbe, Hiratsuka; Hide Kuwabara, Hadano. Process for the production of expanded particles of a polymeric material. Japan, 4704239. 3 November 1987.
- [39] Y. Guo, N. Hossieny, C.B. Park and N.Q. Zhou. "Bead Foaming in the autoclave-based EPP process" ANTEC. PENG-11-2010-0517.R1. 2011
- [40] Manika Varma-Nair, Paul Y. Handa, Aspy K. Mehta and Pawan Agarwal, "Effect of compressed CO₂ on crystallization and melting behavior of isotactic polypropylene", *Thermochimica Acta*, Vol. 396, 2003, pp. 57-65.
- [41] Manika Varma-Nair, Paul Y. Handa, Aspy K. Mehta and Pawan Agarwal, "Effect of compressed CO₂ on crystallization and melting behavior of isotactic polypropylene", *Thermochimica Acta*, Vol. 396, 2003, pp. 57-65.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] Chunling Xin, Yadong He, Qingchun Li, Yingzhu Huang, Baorui Yan and Xiaodong Wang, "Crystallization Behavior and Foaming Properties of Polypropylene Containing Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Under Supercritical Carbon Dioxide", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 119, 2011, pp. 1275-1286.
- [42] Hong Zheng, Chixing Zhou, Wei Yu and Hongbin Zhang, "Numerical Simulation of Fiber Spinning Process with Structure Evolution of Polymer Chains", *RJTV*, Vol. 10, 2006, pp. 14-25.
- [43] C. Wang, S. N. Leung, M. Bussmann*, W. T. Zhai, and C. B. Park, "Numerical Investigation of Nucleating-Agent-Enhanced Heterogeneous Nucleation", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 49, 2010, pp. 12783-12792.
- [44] Siu N. Leung, Anson Wong, Chul B. Park, and Jin Ho Zong, "Ideal surface geometries of nucleating agents to enhance cell nucleation in polymeric foaming processes", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108, 2008, pp. 3997-4003.
- [45] Richard J. Ciora, Jr., and Joseph H. Magill, "A Study of the Isothermal Crystallization Kinetics of Polyphosphazene Polymers. 2. Poly[bis(trifluoroethoxy)phosphazene]", *Macromolecules*, Vol. 23, 1990, pp. 2350-2359.
- [46] Hiroki Takeshita, Tomoo Shiomi, Katsuhiko Takenaka and Fuminori Arai, "Crystallization and higher-order structure of multicomponent polymeric systems", *Polymers*, Vol. 54, 2013, pp. 4776-4789.
- [47] Hiroki Takeshita, Tomoo Shiomi, Katsuhiko Takenaka and Fuminori Arai, "Crystallization and higher-order structure of multicomponent polymeric systems", *Polymers*, Vol. 54, 2013, pp. 4776-4789.
- [48] Kilwon Cho, Fengkui Li and Jaeseung Choi, "Crystallization and melting behavior of polypropylene and maleated polypropylene blends", *Polymers*, Vol. 40, 1999, pp. 1719-1729.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [49] Gu-Su Jang, Won-Jei Cho and Chang-Sik Ha, "Crystallization Behavior of Polypropylene with or without Sodium Benzoate as a Nucleating Agent", *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 39, 2001, pp. 1001-1016.
- [50] Sheng-Fei Hu, Xian-Bing Zhu, Wei Hu, Ling Yan and Chang Cai, "Crystallization behaviors and foaming properties of diatomite-filled polypropylene composites", *Polymer Bulletin*, Vol. 70, 2013, pp. 517-533.
- [51] A. K. Gupta, S. K. Rana and B. L. Deopura, "Crystallization Kinetics of High-Density Polyethylene/Linear Low-Density Polyethylene Blend", *Journal of Polymer Science*, Vol. 51, 1994, pp. 231-239.
- [52] T. Ozawa, "Kinetics of non-isothermal crystallization", *Polymer*, Vol. 12, 1971, pp. 150-158.
- [53] K. S. K. Rao Patnaik, K. Sirisha Devi and V. Kiran Kumar, "Non-isothermal Crystallization Kinetics of Polypropylene (PP) and Polypropylene (PP)/Talc Nanocomposite", *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, Vol. 1, 2010, pp. 346-353.
- [54] Yue-fai Zhang and Zhong Xin, "Isothermal and Nonisothermal Crystallization Kinetics of Isotactic Polypropylene Nucleated with Substituted Aromatic Heterocyclic Phosphate Salts", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 101, 2006, pp. 3307-3316.
- [55] H. C. Lau, S. N. Bhattacharya and G. J. Field, "Melt Strength of Polypropylene: Its Relevance to Thermoforming", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, 1998, pp. 1915-1923.
- [56] Zhao Bo, "Effects of Processing Parameters on the Filament Fiber Diameter of Spunbonded Nonwoven Fabrics", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 47, 2007, pp. 510-515.
- [57] Rudolf Hufenus, Felix A. Reifler, Maria P. Fernández-Ronco, and Manfred Heuberger, "Molecular orientation in melt-spun poly(3-hydroxybutyrate) fibers: Effect of additives, drawing and stress-annealing", *European Polymer Journal*, Vol. 71, 2015, pp. 12-26.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [58] S.T. Lee, C. B. Park and N. S. Ramesh. **Polymeric Foams: Science and Technology**. New York: CRC PRESS. 2007.
- [59] Lei Li, Tao Liu, Ling Zhao and Wei-kang Yuan, "Effect of compressed CO₂ on the melting behavior and β -recrystallization of β -form in isotactic polypropylene", **Journal of Supercritical Fluids**, Vol. 60, 2011, pp. 137-143.
- [60] Lin-Qiong Xu and Han Xiong Huang, "Foaming of Poly(lactic acid) Using Supercritical Carbon Dioxide as Foaming Agent: Influence of Crystallinity and Spherulite Size on Cell Structure and Expansion Ratio", **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Vol. 53, 2014, pp. 2277-2286.
- [61] Wentao Zhai, Yoorim Ko, Wenli Zhu, Anson Wong and Chul B. Park, "A Study of the Crystallization, Melting, and Foaming Behaviors of Polylactic Acid in Compressed CO₂", **International Journal of Molecular Sciences**, Vol. 10, 2009, pp. 5381-5397.
- [62] Jin-Biao Bao, Tao Liu, Ling Zhao, Danielle Barth and Guo-Hua Hu, "Supercritical Carbon Dioxide Induced Foaming of Highly Oriented Isotactic Polypropylene", **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Vol. 50, 2011, pp. 13387-13395.
- [63] Saeed Doroudiani, Chul B. Park and Mark T. Kortschot, "Effect of the Crystallinity and Morphology on the Microcellular Foam Structure of Semicrystalline Polymers", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 36, 1996, pp. 2645-2662.
- [64] Bhagwan F. Jogi, Mayur Swant, P. K. Brahmkar, D. Ratna and M. C. Tarhekar, "Study of Mechanical and Crystalline Behavior of Polyamide 6/Hytrel/Carbon Nanotubes (CNT) Based Polymer Composites", **Procedia Materials Science**, Vol. 6, 2014, pp. 805-811.
- [65] Cao Jinan, Takeshi Kikutani, Akira Takaku and Jiro Shimizu, "Nonisothermal Orientation-Induced Crystallization in Melt Spinning of Polypropylene", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 37, 1989, pp. 2683-2697.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [66] Mitsuko Takada, Masataka Tanigaki and Masahiro Oshima, "Effect of CO₂ on Crystallization Kinetics of Polypropylene", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 41, 2001, pp. 1983-1946.
- [67] T. C. Markel, V. I. Bondar, K. Nagal, B. D. Freeman and I. Pinnau, "Gas Sorption, Diffusion, and Permeation in Poly(dimethylsiloxane)", *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 38, 2000, pp. 415-434.
- [68] Ioannis Tsivintzelis, Georgia Sanxaridou, Eleni Pavlidou and Costas Panayiotou, "Foaming of polymers with supercritical fluids: A thermodynamic investigation", *Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 110, 2016, pp. 240-250.
- [69] O. Muth, Th. Hirth and H. Vogel, "Investigation of sorption and diffusion of supercritical carbon dioxide into poly(vinyl chloride)", *Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 19, 2001, pp. 299-306.
- [70] Ozhiyi Zhang and Y. Paul Handa, "CO₂-Assisted Melting of Semicrystalline Polymers", *Macromolecules*, Vol. 30, 1997, pp. 8505-8507.
- [71] W. Ariyawiriyanan, T. Meekaew, M. Tamphang, P. Tuenpusa, J. Boonwan, N. Euaphantasate, P. Muangchareon and S. Chungpaibulpatana, "Thermal Efficiency of Solar Collector Made From Thermoplastics", *Energy Procedia*, Vol. 34, 2013, pp. 500-505.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



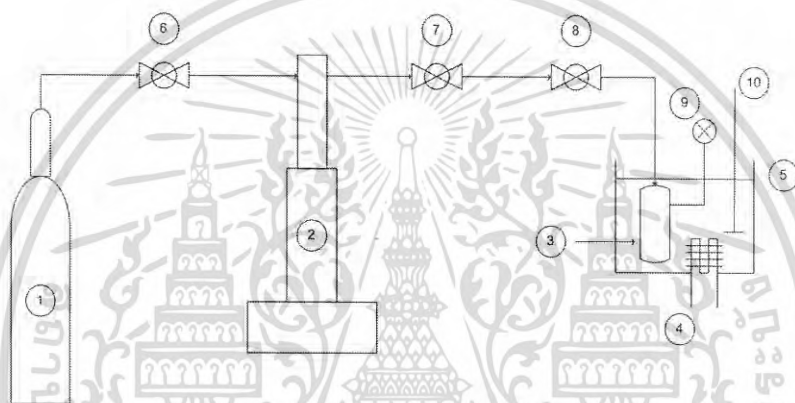
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

ก.1 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

1. ตั้งอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดความร้อนตามที่ต้องการ พร้อมทั้งเปิดไบทัดเพื่อให้มีการกระจายความร้อนได้ทั่วทั้งอ่างซิลิโคน
2. นำตัวอย่างพอลิเมอร์ จำนวน 3 ชิ้น แล้วยัดไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียมเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับปั๊มแรงดันสูงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| (1) ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ | (2) ปั๊มแรงดันสูง |
| (2) เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง | (4) เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) |
| (3) อ่างซิลิโคน (Silicone Bath) | (6) วาล์วหมายเลข 1 |
| (4) วาล์วหมายเลข 2 | (8) วาล์วหมายเลข 3 |
| (5) เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) | (10) ไบทัด |

3. ทำการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปั๊มแรงดันสูงเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง จนมีความดันประมาณ 10 บาร์ และทิ้งไว้สักครู่ จากนั้นไล่อากาศออกทางบริเวณท้ายของเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงโดยให้ความดันสุดท้ายมีมากกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อป้องกันอากาศไหลย้อนเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง

4. อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปอีกครั้งโดยใช้ความดันเกิดโฟมตามการทดลอง และเมื่ออุณหภูมิของอ่างซิลิโคนได้ตามที่ต้องการ จึงนำเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงไปจุ่มลงในอ่างซิลิโคน และทิ้งไว้ตามเวลาที่ต้องการ

5. เมื่อทิ้งระบบไว้ตามเวลาที่ต้องการจึงปิดวาล์วหมายเลข 2 และ 3 (เบอร์ (7) และ (8) ตามลำดับ) จากนั้นถอดเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงตั้งแต่วาล์วหมายเลข 3 หลังจากนั้นทำให้เกิดโฟมด้วยวิธีลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ด้วยการเปิดวาล์วหมายเลข 3 โดยที่ความดันจะลดลงจากความดันที่ตั้งค่าไว้ มายังความดันบรรยากาศ เป็นเวลาน้อยกว่า ๓ s

6. นำตัวอย่างโฟมพอลิเมอร์ที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

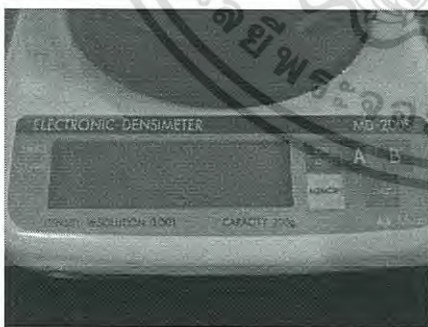
ภาคผนวก ข

การหาความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์

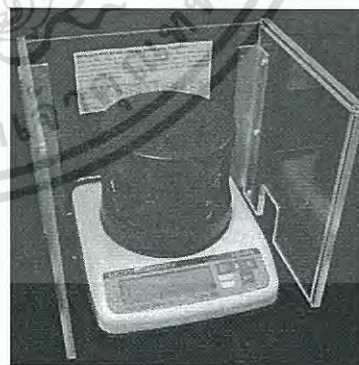
เครื่องมือวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์อาศัยหลักการแทนที่น้ำหรือหลักการของอาคิมิตีส โดยมีวิธีการวัดดังต่อไปนี้

1. ตั้งค่าจอแสดงผลของเครื่องวัดให้เป็นศูนย์ (Set zero) ดังรูปที่ ข.1 (ก)
2. ชั่งตัวอย่างโพรพอลิเมอร์บริเวณด้านบนบนของตัวเครื่องดังรูปที่ ข.1 (ข) กดปุ่ม MEMORY เพื่อทำการบันทึกค่าให้กับเครื่อง
3. นำตัวอย่างโพรพอลิเมอร์ไปจุ่มในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำและเมทานอลโดยมีอัตราส่วน 2 ต่อ 1 โดยปริมาตร เพียงชั่วขณะเพื่อลดแรงตึงผิวของโพรพอลิเมอร์ซึ่งจะทำให้เกิดฟองอากาศในขณะที่ชั่งในน้ำ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างโพรพอลิเมอร์ในน้ำ (หากมีฟองอากาศเกาะติดอยู่ขึ้นงานให้พยายามกำจัดออก) ถัดมากดปุ่ม MEMORY เพื่อให้เครื่องคำนวณค่าความหนาแน่นของโพรพอลิเมอร์
4. เครื่องซึ่งจะแสดงผลค่าความหนาแน่นในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตรได้ โดยการกดปุ่ม A)
5. นำชิ้นงานโพรพอลิเมอร์ออกจากเครื่อง

หมายเหตุ : ในการนำชิ้นตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้คีมจับ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นออกมาทำความเสียหายให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



(ก) หน้าจอ



(ข) ตัวเครื่อง

รูปที่ ข.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter ; MD-2005)

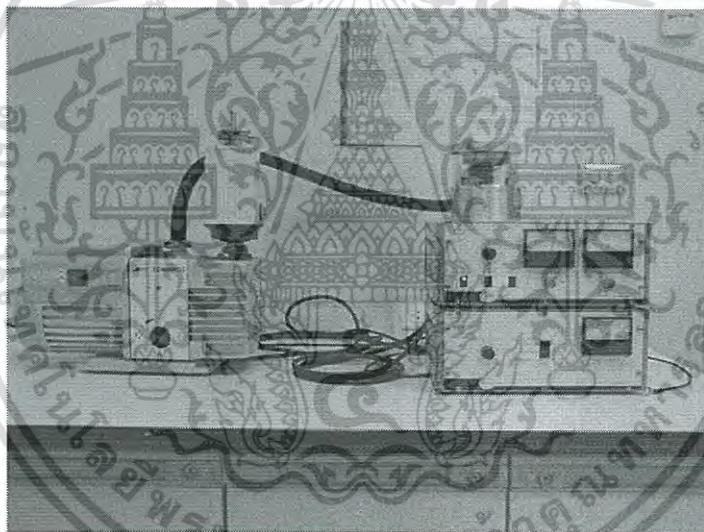
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟ

นำโพลีเมอร์ที่ได้จากกระบวนการเกิดโพลีเมอร์แบบกะมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

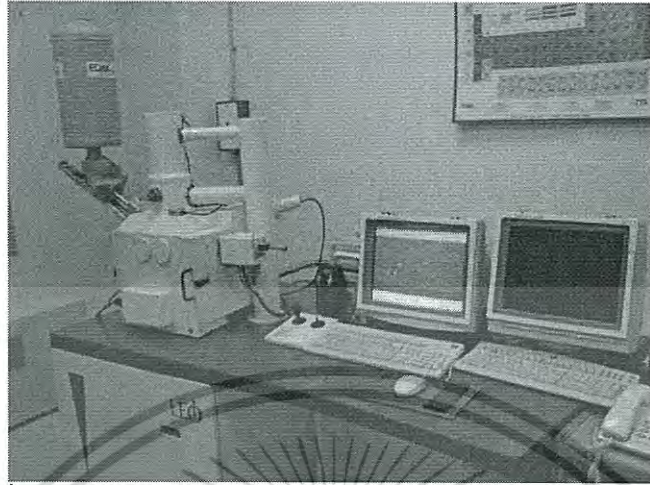
1. ทำการบากด้านข้างตามแนวขวางบริเวณตรงกลางของชิ้นงานโพลีเมอร์เพียงเล็กน้อย
2. แช่ตัวอย่างโพลีเมอร์ลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้โพลีเมอร์มีความแข็งและเปราะซึ่งสามารถหักได้ง่าย จากนั้นทำการหักโพลีเมอร์ ตอนที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว โดยจะทำให้เกิดการหักบริเวณที่เกิดการบากบนชิ้นงาน จากนั้นเก็บตัวอย่างของโพลีเมอร์สำหรับศึกษาสัณฐานวิทยา
3. นำตัวอย่างโพลีเมอร์ที่ได้ไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเพื่อให้โพลีเมอร์มีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater

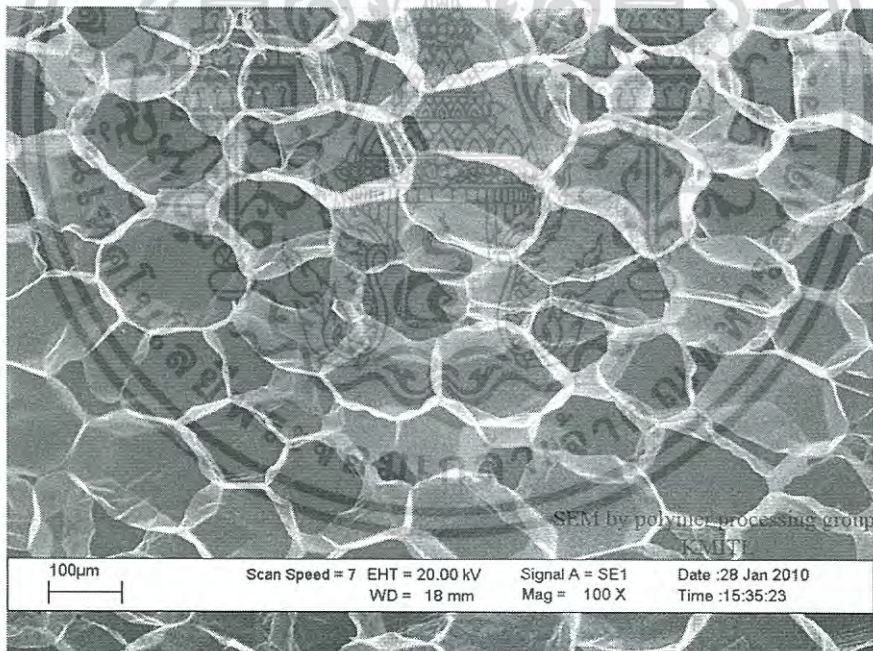
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ถ่ายภาพไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น LEO 1455VP

5. ตัวอย่างภาพไมโครกราฟที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 ตัวอย่างภาพไมโครกราฟของโฟม PP-A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

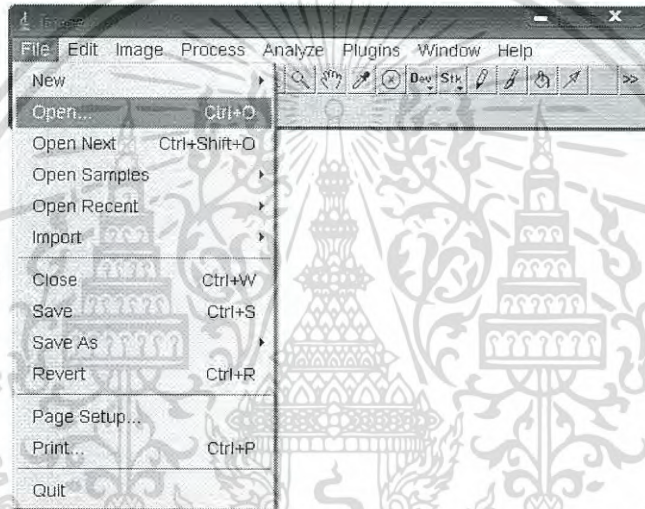
ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์สัญญาณวิทยาของโฟมด้วยโปรแกรม Image-J

การวิเคราะห์สัญญาณวิทยาแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือการวิเคราะห์ขนาดฟองและความหนาแน่นฟอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ง.1 การวิเคราะห์ขนาดฟอง

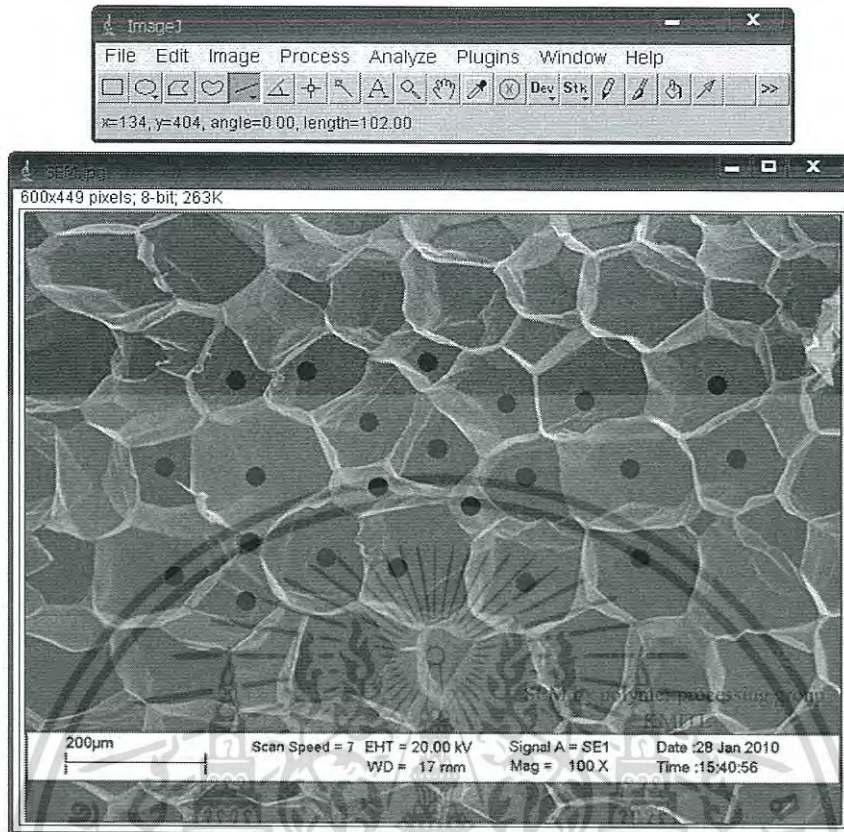
1. เปิดโปรแกรม Image-J จากนั้นเลือกภาพไมโครกราฟตามที่ต้องการด้วยการเข้าไปที่ FILE ต่อด้วย OPEN ดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 การเปิดภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image-J

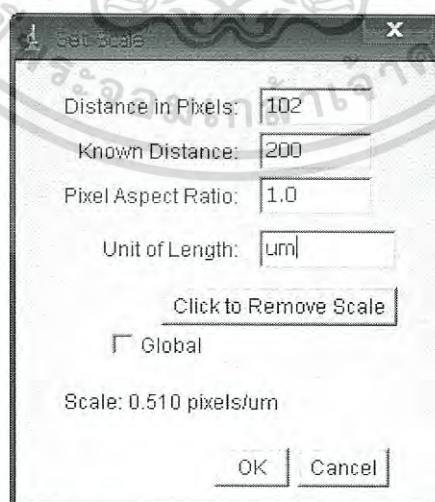
2. จากนั้นเลือกเครื่องมือเส้นตรง บนแถบเครื่องมือ ดังรูปที่ ง.2 ถัดมาให้ลากเส้นตรงบนแถบสเกลบนภาพไมโครกราฟ โดยให้ลากให้เป็นเส้นตรงคือมีค่า $\text{angle} = 0.00$ (บริเวณแถบเครื่องมือ) และจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ $\text{length} = 102.00$ นั้นหมายถึงถ้าโปรแกรมอ่านค่าความยาวได้ 102 จะมีความยาวเท่ากับ 200 ไมโครเมตร

หมายเหตุ ภาพไมโครกราฟนี้ต้องถูกกำหนดจุดไว้บนภาพก่อน เพื่อง่ายต่อการนับจำนวนฟอง



รูปที่ ง.2 การกำหนดสเกลให้กับโปรแกรม Image-J

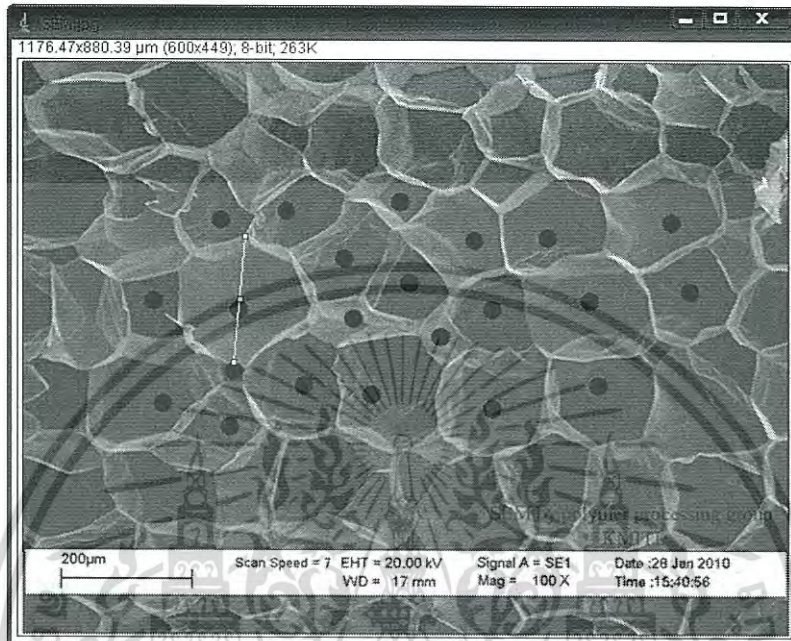
3. เมื่อเครื่องบันทึกความยาวแล้วให้เข้าไปที่แถบเครื่องมือและคลิกที่ ANALYZE และคลิกที่ SET SCALE อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ง.3 และกำหนดตัวเลขในช่อง KNOW DISTANCE และกำหนดหน่วยที่ทราบในช่อง UNIT OF LENGTH จากนั้นกด OK



รูปที่ ง.3 การกำหนดค่าสเกลและหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ต่อมาเลือกเครื่องมือเส้นตรงอีกครั้งหนึ่ง และลากเส้นลงบนภาพไมโครกราฟที่ได้ถูกกำหนดจุดไว้แล้ว ดังรูปที่ ง.4 โดยกำหนดให้ฟองเป็นทรงกลมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดฟองเท่ากับเส้นตรงที่ถูกลากเส้นบนภาพไมโครกราฟ



รูปที่ ง.4 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือขนาดฟอง

5. ถัดจากนั้นไปที่แถบเครื่องมือโดยเลือก ANALYZE และคลิกคำว่า MEASURE ซึ่งโปรแกรมจะบันทึกขนาดของเส้นตรงที่ได้ลากไว้ ที่คอลัมน์ LENGTH ดังรูปที่ ง.5 จากรูปพบว่าฟองที่วัดนั้นมีขนาดฟอง 193.0 ไมโครเมตร

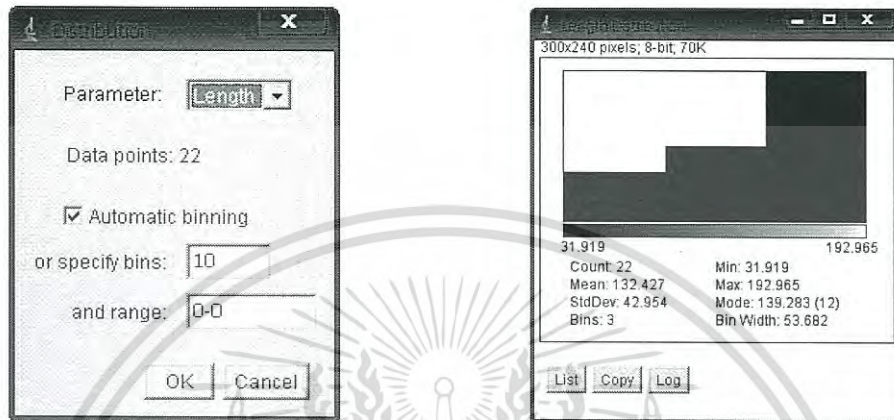
The screenshot shows the ANALYZE software window with a table of measurement data. The table has columns for Area, Mean, Min, Max, Angle, and Length. The first row shows a measurement with a length of 192.965.

	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	99	94.020	0	132.633	-95.247	192.965

รูปที่ ง.5 การอ่านค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองหรือขนาดฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4 และ 5 จนครบตามจำนวนฟองที่นับไว้ จากนั้นไปที่แถบเครื่องมือเลือก คำว่า ANALYZE และคลิกที่ DISTRIBUTION จะมีหน้าต่างปรากฏดังรูปที่ ง.6 (ก) จากนั้นกำหนด ช่อง PARAMETER เป็น LENGTH ถัดมากด OK และจะได้ค่าเฉลี่ยของขนาดฟองเป็น 132.4 ไมโครเมตร ดังรูปที่ ง.6 (ข)



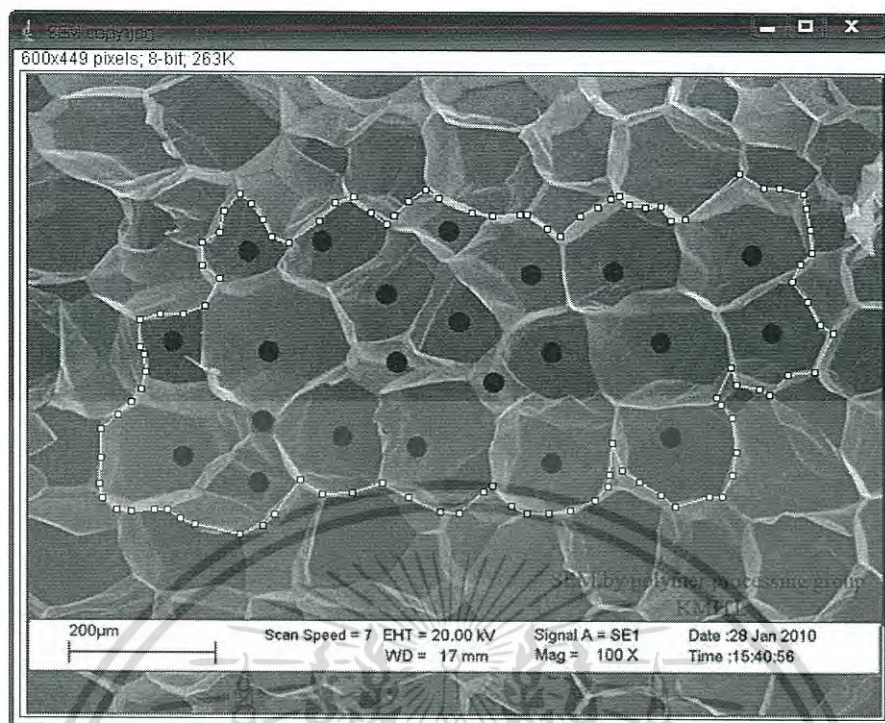
(ก) การกำหนดตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ (ข) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากภาพไมโครกราฟ

รูปที่ ง.6 การวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟ

ง.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟอง

การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟองใช้วิธีกำหนดจำนวนฟอง จากนั้นจึงวิเคราะห์หาพื้นที่ที่ล้อมรอบจำนวนฟองที่สนใจ หรืออธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

1. เลือกแถบเครื่องมือรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) จากนั้นลากพื้นที่ที่ล้อมรอบฟองที่สนใจ ดังรูปที่ ง.7



รูปที่ ง.7 การกำหนดพื้นที่ที่ล้อมรอบฟองที่สนใจ

- จากนั้นไปที่แถบเครื่องมือเลือกคำว่า ANALYZE และคลิกคำว่า MEASURE จะได้พื้นที่เท่ากับ 341,633.99 ตารางไมโครเมตร ดังรูปที่ ง.8

	Area	Mean	Min	Max
1	341633.987	101.197	0	255

รูปที่ ง.8 การวิเคราะห์พื้นที่ที่ล้อมรอบฟองที่สนใจ

- นำข้อมูลของจำนวนฟองและพื้นที่ที่ล้อมรอบฟองที่สนใจ คำนวณตามสมการ 2.31 ดังตัวอย่างเช่น ฟองที่สนใจคือ 22 ฟอง และมีพื้นที่ 341,633.99 ตารางไมโครเมตร เมื่อนำเข้าสู่สูตรการคำนวณความหนาแน่นฟองจะได้ว่า

$$N_F = \left[\frac{n}{A} \right]^{\frac{3}{2}} = \left[\frac{22}{341,633.99 \times 10^{-8}} \right]^{\frac{3}{2}} = 5.2 \times 10^5 \text{ ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เพราะฉะนั้นความหนาแน่นฟองคือ 5.2×10^5 ฟอง/ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล ญัฐพงษ์ เชื้อพลพัทธ์
สถานศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อีเมล looney_babe@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

- 2554 – 2560 วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
หัวข้องานวิจัย: ผลของปัจจัยและสภาวะการขึ้นรูปโฟมต่อลักษณะสัณฐาน
วิทยาของโฟมพอลิเมอร์
- 2552 – 2554 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
หัวข้องานวิจัย: การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิต
โฟม โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและเฮกเซน
- 2548 – 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
หัวข้องานวิจัย: การศึกษาปัจจัยสำหรับการเตรียมไมโครเซลล์ลาร์โฟม

ประสบการณ์ด้านการวิจัย

- 2016 – 2017 Cooperative project to develop “High Pressure
Mold” with Siam Sanitary Ware Industry Co. Ltd.
(SCG Chemical Groups)
- September 2015 Visiting Kyoto University, Katsura campus, Kyoto,
Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2013 – 2015 Cooperative project to develop “PVC Foam” with Thai Plastics and Chemicals (TPC) Co. Ltd.
- August – September 2011 Participate in the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) conference at Yamagata University, Yonezawa campus, Japan and research in the topic of polypropylene fiber spinning
- November 2010 Visiting Department for Polymer Engineering, University of Bayreuth, German
Visited the International Trade Fair No.1 for Plastics and Rubber Worldwide (K 2010), Dusseldorf, and Department for Polymer Engineering, University of Bayreuth, introduced the topic of “EPP Foam Beads and Molded EPP Foam” to Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt and staff.
- June 2009 – 2010 Cooperative project to develop “Polypropylene Foam” with Compounding Technology Department, Thai Polyethylene (TPE) Co. Ltd., SCG-Chemicals Group;
- March – May 2010 Study the influence of MA-g-PP on foam morphology of sisal fiber reinforced polypropylene composite foams;
- 2008 – 2009 Study the effect of foaming parameters on foam morphology of HDPE, HDPE blends and HDPE/LDPE blends foams for wire and cable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

applications, cooperated with Engineering and Development Department, Thai Polyethylene (TPE) Co. Ltd., SCG-Chemicals Group.

April 2008 – April 2009

Student Intern as a Researcher, Thai Polyethylene (TPE) , Rayong

Studied continuous foaming process by using extruder and chemical blowing agents.

การตีพิมพ์และการประชุมวิชาการ

- N. Chuaponpat, V.Trisattayawej, P. Supphasirungjaroen, and S. Areerat, “Effect of co-blowing agents and foaming conditions on plasticized PVC foam morphology,” 13th International Conference on Advances in Foam Materials & Technology, Kyoto, Japan, September 10 –11, 2015.
- N. Chuaponpat, S. Thaigird, S. Areerat, and H. Ito, “Correlation of crystallization and foam morphology of i-PP mono-filament modified with silicon dioxide,” 13th International Conference on Advances in Foam Materials & Technology, Kyoto, Japan, September 10 –11, 2015.
- N. Chuapon, O. Naithanom, Y. Sato, S. Areerat, and H. Ito, “Thermal properties and morphology characteristics of a PP mono-filament and its foam,” *International polymer Processing*, Vol. 29, No. 5 (2014): 579-587.
- N. Chuapon, O. Naithanom, S. Areerat, and H. Ito, “Polypropylene mono-filament foam using sc-CO₂,” 10th International Conference on Advances in Foam Materials & Technology, Barcelona, Spain, September 12 –13, 2013.

- พีรพจน์ เพทายพนาภิจ, ณัฐพงศ์ เชื้อพล, และ สุรัตน์ อารีรัตน์, “การศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกของเส้นใยและโฟมพอลิโพรพิลีน,” ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, ขอนแก่น, ประเทศไทย, 17-18 ตุลาคม, 2013.
- วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์, ณัฐพงศ์ เชื้อพล, ปิยวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ และ สุรัตน์ อารีรัตน์, “การศึกษาความเป็นโฟมของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์,” ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, ขอนแก่น, ประเทศไทย, 17-18 ตุลาคม, 2013.
- N. Chuapon, O. Naithanom, S. Areerat, P. Piyamanocha, T. Sedláček, and P. Sába, “Extrusion foamed poly(lactic) acid/polypropylene blended”, Proceedings of the Polymer Processing Society 28th Annual Meeting (PPS-28), Pattaya, Thailand, December 11 - 15, 2012.
- P. Piyamanocha, P. Michaela, J. Prokeš, N. Chuapon, and S. Areerat, “Electrical and mechanical properties of ethylene-butyl-acrylate/carbon black foams,” TiChe International Conference, Nakornratchasima, Thailand, October 25 - 26, 2012.
- O. Naithanom, N. Chuapon, P. Piyamanocha, T. Sedláček, P. Sába and S. Areerat, “sc-CO₂ foamed high molecular weight and high melt strength PP blends,” Asian Workshop on Polymer Process, Kyoto, Japan, August 28 - 31, 2012.
- N. Chuapon, O. Naithanom, Y. Sato, S. Areerat, and H. Ito, “Effect of crystallization kinetic on polypropylene mono-filament foam using sc-CO₂,” Asian Workshop on Polymer Processing, Kyoto, Japan, August 28 - 31, 2012.
- N. Chuapon, P. Buahom, W. Tanthapanichakoon, and S. Areerat, “Effect of Parameters of Batch Foaming Process on Polypropylene Foam Morphology,” Proceedings of the 17th Regional Symposium on Chemical Engineering, RSCE 2010, Bangkok, Thailand, November 22–23, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อนุรักษ์ เชื้อพล, ปิยพงศ์ บัวโหม, รัฐพล ตั้งนพคุณ, วุฒิพงษ์ รังสีสันติวานนท์, และ สุรัตน์ อาริรัตน์ “การศึกษาผลของ MA-g-PP ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของโพรพอลิโพรพิลีนเสริมแรงเส้นใยสับปะรด,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2553, หน้า 49-54.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้