

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิตโพรพ
โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและเฮกเซน

STUDY ON FOAM MORPHOLOGY OF POLYPROPYLENE
AND ITS COMPOSITE BY USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE AND HEXANE



T123215



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 123215
วัน,เดือน,ปี 19 ต.ค. 2555

b. 12478159
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2011-EN-M-220-074 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON FOAM MORPHOLOGY OF POLYPROPYLENE
AND ITS COMPOSITE BY USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE AND HEXANE**



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

2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **KMITL-2011-EN-M-220-074** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิตโฟม โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและเฮกเซน
นักศึกษา	นายณัฐพงศ์ เชื้อพล
รหัสนักศึกษา	52611406
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนโฟมสามชนิด โดยสองชนิดแรก ได้แก่ พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรดและพอลิโพรพิลีนโฟม ด้วยกระบวนการเกิดโฟมแบบกะซึ่งใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพ และชนิดที่สามคือพอลิโพรพิลีนโฟมปิดส โดยเลือกใช้กระบวนการเกิดโฟมแบบกะซึ่งมีของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังนี้ ตอนที่ 1 ศึกษาพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด 20 phr จากการทดลองพบว่าพอลิโพรพิลีนโฟมที่ไม่ผสม MA-g-PP และเส้นใยสับปะรดโฟมที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบไบโมดอล (Bimodal) ในขณะที่การผสมเส้นใยสับปะรดเข้าไปในพอลิโพรพิลีนส่งผลให้คอมโพสิตโฟมไม่เกิดโครงสร้างแบบไบโมดอล และมีการกระจายตัวของเซลล์อย่างสม่ำเสมอ เมื่อผสมปริมาณ MA-g-PP เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 0 2 5 และ 10 โดยน้ำหนัก) ทำให้สัดส่วนการขยายตัวและความหนาแน่นเซลล์ลดลง นอกจากนี้ได้มีการทดสอบความเป็นโฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam) ของคอมโพสิตโฟม พบว่าการผสมเส้นใยสับปะรดและ MA-g-PP ทำให้คอมโพสิตโฟมมีสมบัติเบี่ยงเบนไปจากไอโซโทรปิกโฟม ตอนที่ 2 ศึกษาพอลิโพรพิลีนโฟมสองชนิดคือ PP-A และ PP-B โฟม ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า PP-A และ PP-B โฟม มีสัดส่วนการขยายตัวสูงสุดคือ 24.6 และ 20.5 เท่า ตามลำดับ ที่สภาวะเกิดโฟมเดียวกันคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 140°C และเวลา 10 min ซึ่งที่สภาวะเกิดโฟมนี้ส่งผลให้ PP-A และ PP-B โฟม มีขนาดเซลล์ 155.8 μm และ 73.1 μm ตามลำดับ และมีความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม เท่ากับ 5.28×10^5 cells/cm³ และ 3.15×10^8 cells/cm³ ตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของ PP-A และ PP-B โฟม พบว่า PP-A โฟม มีดัชนีความเป็นโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซโทรปิกอยู่ในช่วง $-0.492 - 2.178$ ซึ่งมีช่วงที่กว้างกว่าในกรณีของ PP-B โฟม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0.716 - 1.714$ หรือสามารถบ่งบอกถึง PP-B โฟม มีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกมากกว่า PP-A โฟม แต่ PP-A โฟมยังคงใกล้เคียงกับความเป็นโฟมไอโซโทรปิกเช่นกัน เนื่องจากเหตุนี้จึงเลือกใช้ PP-B ในการนำมาศึกษาการเกิด PP-B โฟมบีคส์ ตอนที่ 3 ศึกษาพอลิโพรพิลีนโฟมบีคส์ โดยใช้ของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพ ซึ่งผสมในสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนคือ 0.02 0.04 และ 0.08 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของเฮกเซนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนเพิ่มขึ้น จาก 45.31 J/mol.K เป็น 53.51 J/mol.K และส่งผลทำให้ขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นจาก $147.7 \mu\text{m}$ เป็น $307.4 \mu\text{m}$ ในขณะที่ปริมาณของเฮกเซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคืออยู่ในช่วง $10^4 - 10^5 \text{ cells/cm}^3$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study on Foam Morphology of Polypropylene and its Composite by Using Supercritical Carbon Dioxide and Hexane
Student	Mr. Natthapong Chuapon
Student ID.	52611406
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2011
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

Abstract

This research had studied foam morphologies of three polypropylene (PP) foams which were sisal fiber reinforced composite foam, PP-A and PP-B foams, and expanded polypropylene (EPP) foam beads producing via batch foaming process with supercritical carbon dioxide as a physical blowing agent. The experiment were divided into 3 parts; part 1 was a study of MA-g-PP blend with 20 phr sisal fiber reinforced. The result shown that the morphology of PP foam without MA-g-PP and sisal fiber contained bimodal cell structure while MA-g-PP blended sisal fiber reinforce PP foam had homogeneous cell distribution. The expansion ratios and cell densities were decreased when the amount of MA-g-PP was increased. Moreover, it was found that the sisal fiber and MA-g-PP mixing diverted the isotropic foam of prepared foam. In part 2, the morphology of PP-A and PP-B foams were compared at 12 MPa, 140°C and 10 min. The result shown that PP-A and PP-B foams had the maximum expansion ratios of 24.6 and 20.5 times, cell sizes of 155.8 μm and 73.1 μm , and cell densities of 5.28×10^5 cells/cm³ and 3.15×10^8 cells/cm³, respectively. The isotropic test of foam samples was indicated that the PP-A had wider isotropic foam index (-0.492 - 2.178) than PP-B foam (0.716 - 1.714). Thus, PP-B was selected to prepare bead foam in part 3 by using hexane with supercritical carbon dioxide as a blowing agent, with mole fraction of hexane 0.02, 0.04 and 0.08. From result obtained, cell sizes of foam bead were increased as an amount of hexane increased while the cell densities were varied up to 10 times.

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยโพลีเอททีลีน จำกัด ในกลุ่มธุรกิจเคมีภัณฑ์ในเครือของบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) สำหรับสนับสนุนเงินทุนและวัสดุในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณปิยพงศ์ บัวโสม และนักศึกษากายใต้การดูแลของ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ในการช่วยเหลือและให้คำปรึกษาดำเนินงานวิจัย อีกทั้งกำลังใจที่คอยผลักดันให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว ผู้ให้อุปการคุณ ที่ช่วยส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีการศึกษา ข้าพเจ้านำความรู้ความสามารถที่ได้ศึกษาไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมอย่างสุดความสามารถ และมีสิ่งที่จะตอบแทนพระคุณทุกท่าน

ทั้งนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครู อาจารย์ ทุกท่าน และผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามที่อบรมสั่งสอนและได้มอบความรู้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าจึงขอคุณพระศรีรัตนตรัย ดลบันดาลให้ทุกท่านมีแต่ความสุขและความเจริญยิ่งขึ้นไป

หากเกิดความผิดพลาดใด ในงานวิจัย ข้าพเจ้าขออ้อมรับไว้ ณ ที่นี้ และข้าพเจ้ายินดีที่จะนำข้อมูลอันจะมีประโยชน์จากผู้สนใจ สามารถนำไปใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้า เพื่อเป็นประโยชน์ในวันข้างหน้า ข้าพเจ้าจักยินดียิ่ง คุณประโยชน์อันใดอันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐพงศ์ เชื้อพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XII
สัญลักษณ์	XVII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 แนวคิดในการศึกษา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 โฟม.....	4
2.1.1 หลักการเกิด โฟม	5
2.1.1.1 การเกิดฟองแก๊ส	5
2.1.1.2 การเติบโตฟองแก๊ส	6
2.1.1.3 การสภาพของฟองแก๊ส.....	7
2.1.2 กระบวนการเกิดโฟม.....	7
2.1.3 สารเกิดฟอง.....	8
2.2 พอลิเมอร์คอม โพลิต โฟม.....	9
2.3 พอลิเมอร์โฟมบีคส์	10
2.3.1 ความจุความร้อน	11
2.4 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....	12
2.5 ปรากฏการณ์ส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์	13
2.5.1 การแพร่.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การซึมผ่าน	15
2.5.3 การละลาย	16
2.6 สัณฐานวิทยาของโฟม	19
2.6.1 ความหนาแน่นเซลล์.....	19
2.6.1.1 การกำหนดพื้นที่ผิว	20
2.6.1.2 การกำหนดจำนวนเซลล์	20
2.6.2 สัดส่วนการขยายตัว.....	21
2.6.3 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก.....	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 การทดลอง	25
ตอนที่ 1	
3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟม เสริมแรงเส้นใยสับปะรด	25
3.1.1 สารเคมี	25
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	25
3.1.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ	25
ตอนที่ 2	
3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน โฟม.....	27
3.2.1 สารเคมี	27
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	27
3.2.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ	27
ตอนที่ 3	
3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน โฟมบีคส์.....	28
3.3.1 สารเคมี	28
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	28
3.3.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา.....	29
3.4.1 สารเคมี.....	29
3.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	29
3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
ตอนที่ 1	
4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอม โพลีดีโพลิม เสริมแรงเส้นใยสับปะรด.....	31
4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัว ของ PP โฟม.....	31
4.1.2 การศึกษาผลของเส้นใยสับปะรดที่ส่งผลต่อ พอลิโพรพิลีนคอม โพลีดีโพลิม.....	32
4.1.3 การศึกษาผลของปริมาณ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อ พอลิโพรพิลีนคอม โพลีดีโพลิมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด.....	34
4.1.4 การวิเคราะห์ความเป็น โฟมไอโซโทรปิกของ พอลิโพรพิลีนคอม โพลีดีโพลิมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด.....	37
ตอนที่ 2	
4.2 ปฏิกิริยาการส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน.....	38
4.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในพอลิโพรพิลีน.....	38
4.2.2 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน.....	40
4.2.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในพอลิโพรพิลีน.....	43
4.3 ผลการเกิด โฟมของพอลิโพรพิลีน โฟม.....	43
4.3.1 การศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิด โฟมแบบกะ.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิด โฟมที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิด โฟม แบบกะ	46	
4.3.3 ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โฟม	48	
4.3.4 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โฟม	51	
4.3.5 การวิเคราะห์ความเป็น โฟมไอโซโทรปิกของ PP-A และ PP-B โฟม	53	
ตอนที่ 3		
4.4 ผลการเกิด โฟมของพอลิโพรพิลีน โฟมบีดส์	54	
4.4.1 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิด โฟมที่เหมาะสมต่อการเกิด โฟมของ PP-B โฟมบีดส์	54	
4.4.2 การศึกษาการปั่นกววนของกระบวนการผลิต PP-B โฟมบีดส์	55	
4.4.3 ผลของปริมาณเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์	56	
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง		60
ตอนที่ 1		
5.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอม โพลีดี โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด...60		
5.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP โฟม	60	
5.1.2 การศึกษาผลของเส้นใยสับปะรดที่ส่งผลต่อ พอลิโพรพิลีนคอม โพลีดี โฟม	60	
5.1.3 การศึกษาผลของปริมาณ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อพอลิโพรพิลีน คอม โพลีดี โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด	60	
5.1.4 การวิเคราะห์ความเป็น โฟมไอโซโทรปิกของพอลิโพรพิลีน คอม โพลีดี โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด	60	
ตอนที่ 2		
5.2 ปรากฏการณ์การส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	61	
5.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในพอลิโพรพิลีน	61	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2	ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	61
5.2.3	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในพอลิโพรพิลีน	61
5.3	ผลการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีน โฟม	61
5.3.1	การศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ	61
5.3.2	การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสมต่อ กระบวนการเกิด โฟมแบบกะ	62
5.3.3	ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โฟม	62
5.3.4	ผลของเวลาที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โฟม	62
5.3.5	การวิเคราะห์ความเป็น โฟมไอโซโทรปิกของ PP-A และ PP-B โฟม.....	62
ตอนที่ 3		
5.4	ผลการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีน โฟมบีดส์	62
5.4.1	การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิด โฟมที่เหมาะสมต่อการเกิด โฟมของ PP-B โฟมบีดส์.....	62
5.4.2	การศึกษาการปั่นกววนของกระบวนการผลิต PP-B โฟมบีดส์.....	62
5.4.3	ผลของปริมาณเฮกเซนที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์.....	63
5.5	ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง		64
ภาคผนวก		67
ภาคผนวก ก	การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนด้วยวิธีบีบอัดด้วยความร้อน	68
ภาคผนวก ข	กระบวนการเกิด โฟมแบบกะ	70
ภาคผนวก ค	การหาความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์	72
ภาคผนวก ง	การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ โฟมด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟ.....	73
ภาคผนวก จ	การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ โฟมด้วยโปรแกรม Image-J.....	75
ภาคผนวก ฉ	ผลการทดลองของการเกิดพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟม	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ช แบบจำลองปรากฏการณ์การส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ในพอลิโพรพิลีน	84
ภาคผนวก ซ ผลการทดลองของการเกิดพอลิโพรพิลีน โฟม	99
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองของการเกิด PP-B โฟมบีคส์	105
ประวัติผู้เขียน	108



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่สำหรับความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ของสสารแต่ละชนิด.....	12
2.2 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหลต่างๆ	12
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกายภาพของแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว	13
2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของแก๊สแต่ละชนิด	14
2.5 ตัวแปรต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิโพรพิลีน	19
3.1 อัตราส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนคอม โพลีลิต	26
3.2 สภาวะที่ใช้ในการเกิดโฟมของ PP-A	27
3.3 สภาวะที่ใช้ในการเกิดโฟมของ PP-B	28
ฉ.1 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อ PP โฟม.....	81
ฉ.2 ผลของปริมาณเส้นใยสับปะรดต่อสัดส่วนการขยายตัว	82
ฉ.3 ผลจากการวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟของพอลิโพรพิลีนคอม โพลีลิต โฟม.....	83
ฉ.4 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของพอลิโพรพิลีนคอม โพลีลิต โฟม	83
ช.1 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	93
ช.1 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัดส่วนวิทยาของ PP-A โฟม ที่สภาวะความดันเกิด โฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิด โฟม 140°C.....	100
ช.2 ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนวิทยาของ PP-A โฟม ที่สภาวะเกิด โฟมคือ ความดันเกิด โฟม 12 MPa และเวลา 20 min	101
ช.3 ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนวิทยาของ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิด โฟมคือ ความดันเกิด โฟม 12 MPa และเวลา 20 min	102
ช.4 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัดส่วนวิทยาของ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิด โฟม 140°C	102
ช.5 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของ PP-A โฟม	103
ช.6 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของ PP-B โฟม	104
ฉ.1 ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อ PP-B โฟมบีดส์ ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 10±2 MPa และเวลา 120 min	105
ฉ.2 ผลของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัดส่วนวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์ ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 17±2 MPa และเวลา 120 min	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างภายในของโฟม.....	4
2.2 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียวและเนื้อผสม.....	6
2.3 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สและรัศมีฟอง.....	6
2.4 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ.....	7
2.5 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่อง.....	7
2.6 ขั้นตอนการเกิดโฟม.....	9
2.7 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์โฟมบีดส์.....	10
2.8 กระบวนการผลิตโฟมบีดส์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอททีลินและพอลิสไตรีน.....	11
2.9 แผนผังวิภาคของคาร์บอนไดออกไซด์.....	13
2.10 การนับจำนวนเซลล์ด้วยวิธีกำหนดพื้นที่ผิว.....	20
2.11 การนับจำนวนเซลล์ด้วยวิธีกำหนดจำนวนเซลล์.....	21
3.1 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ.....	26
3.2 แบบจำลองกระบวนการผลิตพอลิโพรพิลีนโฟมบีดส์.....	29
4.1 ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการขยายตัวของ PP โฟม ที่ความดันเกิด โฟม 12 MPa และเวลา 120 min.....	31
4.2 ภาพไมโครกราฟของ PP โฟม ที่ความดันเกิด โฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 165 °C และเวลา 120 min.....	32
4.3 ผลของการไม่เติม (PP) และเติม (PPF) เส้นใยสับปะรดที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการขยายตัวของพอลิโพรพิลีน โฟม ที่ความดันเกิด โฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 165 °C และเวลา 120 min.....	33
4.4 ภาพไมโครกราฟของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่ผสม MA-g-PP ในปริมาณต่างๆ ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 165 °C และเวลา 120 min.....	35
4.5 ปริมาณของ MA-g-PP ที่ส่งผลกระทบต่อฐานานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่สภาวะเกิด โฟมมีดังนี้ ความดันเกิด โฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 165 °C และเวลา 120 min.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ปริมาณของ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นเซลล์ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโพลีเมรีเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่สภาวะเกิดโพลีคือ ความดันเกิดโพลี 12 MPa อุณหภูมิเกิดโพลี 165°C และเวลา 120 min	36
4.7 ปริมาณ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโพลีเมรีเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่สภาวะเกิดโพลีคือ ความดันเกิดโพลี 12 MPa อุณหภูมิเกิดโพลี 165°C และเวลา 120 min	37
4.8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเซลล์บนพื้นผิวและความหนาแน่นเซลล์ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.25 ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโพลีเมรีเสริมแรงเส้นใยสับปะรด.....	38
4.9 ความสัมพันธ์ของ $\ln D$ และ $1/T$ ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	39
4.10 สัดส่วนปริมาณการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	40
4.11 แผนผังการคำนวณค่าการละลายด้วยสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe	40
4.12 ค่าการละลายที่ได้จากการทดลอง [31] และจากการวิเคราะห์รีเกรสชันหาค่า k_{12}	41
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์	41
4.14 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตใน PP-A	42
4.15 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตใน PP-B	42
4.16 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	43
4.17 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โพลี ที่เวลาต่างๆ และมีสภาวะเกิดโพลีคือความดันเกิดโพลี 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโพลี 140°C	44
4.18 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัญญาณวิทยาของ PP-A โพลี ที่สภาวะความดันเกิดโพลี 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโพลี 140°C.....	45
4.19 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A โพลี ที่ความดันเกิดโพลี 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโพลี 140°C.....	45
4.20 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โพลี ที่อุณหภูมิเกิดโพลีต่างๆ ที่สภาวะคือความดันเกิดโพลี 12 MPa และเวลา 20 min.....	46
4.21 ผลของอุณหภูมิเกิดโพลีที่ส่งผลต่อสัญญาณวิทยาของ PP-A โพลี ที่สภาวะเกิดโพลีคือความดันเกิดโพลี 12 MPa และเวลา 20 min	47
4.22 ผลของอุณหภูมิเกิดโพลีที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A โพลี ที่สภาวะความดันเกิดโพลี 12 MPa และเวลา 20 min	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min.....	49
4.24 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อขนาดเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min.....	50
4.25 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิด โฟม 12 MPa และเวลา 20 min	50
4.26 ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa และเวลา 20 min	51
4.27 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่เวลาต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิด โฟม 140°C.....	51
4.28 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อขนาดเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิด โฟม 140°C.....	52
4.29 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิด โฟม 140°C.....	52
4.30 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิด โฟม 140°C.....	53
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเซลล์บนพื้นผิวและความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม	54
4.32 ผลของอุณหภูมิเกิด โฟมที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของ PP-B โฟมบีดส์ ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 10±2 MPa และเวลา 120 min	55
4.33 แผนภาพจำลองตำแหน่งขององค์ประกอบแต่ละชนิดในเครื่องปฏิกรณ์	56
4.34 ภาพไมโครกราฟของ PP-B โฟมบีดส์ ที่สัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซน ที่สภาวะเกิด โฟมความดันเกิด โฟม 17±2 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 120°C และเวลามากกว่า 120 min	57
4.35 ผลของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์ ที่สภาวะเกิด โฟมคือ ความดันเกิด โฟม 17±2 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 120°C และเวลามากกว่า 120 min	57
4.36 ผลของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่ส่งผลต่อค่าความจุความร้อนและขนาดเซลล์	58
4.37 ผลของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัว	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ถูกบรรจุในแม่พิมพ์.....	68
ก.2 เครื่องบีบอัดด้วยความร้อน.....	68
ก.3 แผ่นพอลิโพรพิลีน.....	69
ข.1 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ.....	70
ค.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S)	72
ง.1 เครื่องเคลือบทองรูป SC7620 Sputter Coater.....	73
ง.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น LEO 1455VP	74
ง.3 ตัวอย่างภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม.....	74
จ.1 การเปิดภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image-J.....	75
จ.2 การกำหนดสเกลให้กับโปรแกรม Image-J.....	76
จ.3 การกำหนดค่าสเกลและหน่วย.....	76
จ.4 การวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์หรือขนาดเซลล์	77
จ.5 การอ่านค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์หรือขนาดเซลล์.....	77
จ.6 การวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟ.....	78
จ.7 การกำหนดพื้นที่ที่ล้อมรอบเซลล์ที่สนใจ	79
จ.8 การวิเคราะห์พื้นที่ที่ล้อมรอบเซลล์ที่สนใจ.....	79
ฉ.1 ภาพไมโครกราฟของ PP โฟม ที่ความดันเกิด โฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 165 °C และเวลา 120 min	81
ฉ.2 ภาพไมโครกราฟของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่ผสม MA-g-PP ในปริมาณต่างๆ ที่สภาวะเกิด โฟมคือความดันเกิด โฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 165 °C และเวลา 120 min.....	82
ช.1 ความสัมพันธ์ของ $\ln D$ และ $1/T$ ของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	85
ช.2 สัดส่วนปริมาณการละลายของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายในพอลิโพรพิลีน ...	86
ช.3 เปรียบเทียบค่าการละลายที่ได้จากการทดลอง [31] และจากการลองผิดลองถูกค่า k_{12}	95
ช.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์	95
ช.5 ค่าการละลายของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ PP-A	96
ช.6 ค่าการละลายของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ PP-B.....	96
ช.7 สัมประสิทธิ์การละลายของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช.8 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน	98
ช.1 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม ที่เวลาต่างๆ ที่มีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C	99
ช.2 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min	100
ช.3 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟม คือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min.....	101
ช.4 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่เวลาต่างๆ และคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C	102
ฉ.1 ภาพไมโครกราฟของ PP-B โฟมบีดส์ ที่ตัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซน ที่สภาวะเกิดโฟม ความดันเกิดโฟม 17±2 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 120°C และเวลามากกว่า 120 min	102

สัญลักษณ์

ตัวอักษร

A	พื้นที่ในการนับจำนวนเซลล์
C_p	ความจุความร้อน
d	ขนาดเซลล์เฉลี่ย
D	สัมประสิทธิ์การแพร่
E_D	พลังงานกระตุ้น
E_p	พลังงานกระตุ้นของการซึมผ่าน
ΔH_s	พลังงานความร้อนของการละลาย
k_{12}	ไบนารีอินเตอร์แอคชัน
m	สัดส่วนโดยน้ำหนัก
n	น้ำหนัก
n	จำนวนฟองหรือเซลล์ที่นับได้จากภาพไมโครกราฟ
N	จำนวนเซลล์
N_F	ความหนาแน่นเซลล์
N_0	ความหนาแน่นนิวเคลียส
$N_{F,MB}$	ความหนาแน่นเซลล์ที่คำนวณมาจากพื้นฐานของสมดุลมวลสาร
N_F^0	ความหนาแน่นของเซลล์อ้างอิง
P	ความดัน
P^*	คุณลักษณะความดัน
\bar{P}	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
\tilde{P}	ความดันรีดิวซ์
r	ไซส์พารามิเตอร์
R	ค่าคงที่ของแก๊ส
S	สัมประสิทธิ์การละลาย
T	อุณหภูมิเกิดโฟม
T_g	อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว
T^*	คุณลักษณะอุณหภูมิ
\tilde{T}	อุณหภูมรีดิวซ์
χ	คุณลักษณะปริมาตรเชิงโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v^*	คุณลักษณะปริมาตร
V	ปริมาตร
w	น้ำหนัก
x	สัดส่วนโดยโมลในวัฏภาคของเหลว
y	สัดส่วนโดยโมลในวัฏภาคของแก๊ส

ตัวอักษรกรีก

ϵ/k	อุณหภูมิของ Lennard-Jones
\emptyset	สัดส่วนการขยายตัว
$\hat{\emptyset}$	สัดส่วนโดยปริมาตร
η	ดัชนีความเป็นโพลีไอโซโทรปิก
ρ	ความหนาแน่น
$\tilde{\rho}$	ความหนาแน่นรีดิวซ์
ρ^*	คุณลักษณะความหนาแน่น
σ	ขนาดโมเลกุลของแก๊ส
μ	ศักย์เคมี
φ_0	ไอโซโทรปิกแฟกเตอร์

ตัวห้อย

i	องค์ประกอบของของผสม
F	พอลิเมอร์โพลี
P	พอลิเมอร์
x	ชนิดของแก๊ส
g	แก๊ส
$g\text{-cal}$	แก๊สที่ได้จากการคำนวณ

ตัวยก

G	วัฏภาคแก๊ส
P	วัฏภาคพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การดำรงชีวิตของมนุษย์โดยส่วนใหญ่มีความเกี่ยวข้องกับวัสดุที่เป็นโฟม ซึ่งทำมาจากพอลิเมอร์ หรือเรียกวัดนี้ว่า พอลิเมอร์โฟม (Polymer Foam) อาทิเช่น เบาะรถยนต์ รองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ฟองน้ำ ผงเก็บเสียง โซฟา ผงกันความร้อน แผ่นกันกระแทก วัสดุบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น ทั้งนี้สาเหตุของการที่พอลิเมอร์โฟมถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้านมีเหตุผลหลายประการ อาทิเช่น น้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ ดูดซับแรงกระแทกได้ดี มีความสามารถในด้าน การเป็นฉนวนความร้อนและความต้านทานทางไฟฟ้า ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นต้น อนึ่ง กระบวนการเกิดพอลิเมอร์โฟมโดยส่วนใหญ่ใช้นิยมนำสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) เป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดโฟมและช่วยให้โฟมมีคุณสมบัติตามที่ ต้องการตามการนำไปประยุกต์ใช้งาน หรือเรียกสารประเภทนี้ว่า สารเกิดฟอง (Blowing Agents)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ได้หันมาให้ความสนใจและให้ความสำคัญในเรื่องของสภาวะแวดล้อมมากยิ่งขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม โดยประเด็นที่ได้รับการพิจารณาและความสนใจเป็นพิเศษในระดับอุตสาหกรรมนั้นมีมากมาย เช่น การลดปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลีกเลียงหรือลดการใช้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ลดปริมาณหรือบำบัดของเสียก่อนปล่อยสู่บรรยากาศหรือแม่น้ำ หาวัดที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติมาทดแทนวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เป็นต้น ทั้งนี้ประเด็นที่ได้รับความสนใจในระดับอุตสาหกรรมเกิดโฟมคือ หลีกเลียงหรือลดปริมาณการใช้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้เมื่อถูกปลดปล่อยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศแล้วจะส่งผลกระทบต่อ ชั้นบรรยากาศของโลกคือ เป็นการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ ซึ่งโอโซนนี้จะทำหน้าที่ในการ ป้องกันไม่ให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดบี (UV-B) ที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ทะลุเข้ามาในโลกซึ่งเป็น อันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นและค้นคว้าหาสารชนิดอื่นที่มีความสามารถในการ ช่วยทำให้เกิดโฟมได้ดีมาทดแทนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย และจากการค้นคว้าวิจัยพบว่าสาร ที่มีคุณสมบัติเป็นสารเกิดโฟมได้ดีและเป็นหนึ่งในตัวเลือกสำหรับกระบวนการเกิดโฟมคือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide, scCO₂)

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากการแยกออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมที่ เกี่ยวกับปิโตรเคมีหรือเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงของปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ จากนั้นจึง นำมาเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ขึ้น จากกระบวนการเหล่านี้ส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นั้นมีข้อได้เปรียบคือมีราคาถูก เมื่อนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่กระบวนการเกิดโฟมนั้น

นอกจากนี้ ยังมีข้อได้เปรียบคือมีราคาถูก เมื่อนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่กระบวนการเกิดโฟมนั้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเพิ่มอุณหภูมิและความดันจนมีสถานะที่สูงกว่าสถานะวิกฤตจึงเรียกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้ว่า คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต สถานะนี้เป็นสถานะที่คาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นทั้งแก๊สและของเหลว ซึ่งไม่สามารถแยกสถานะทั้งสองสถานะนี้ได้ด้วยตาเปล่า ทั้งนี้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของเหลวจึงส่งผลให้มีค่าการละลายในพอลิเมอร์หลอมใกล้เคียงกัน อีกทั้งคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งช่วยให้มีการกระจายตัวในเรื่องของความร้อนภายในระบบได้ดีขึ้น หรือถ้าหากเปรียบเทียบคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและของไหลเหนือวิกฤตชนิดอื่น พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตนั้นมีความปลอดภัยในด้านความเป็นพิษน้อยกว่าสารชนิดอื่น เป็นสารไม่ติดไฟ อีกทั้งมีสถานะวิกฤตที่ต่ำกว่าสารชนิดอื่นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเลือกใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาเป็นสารเกิดฟองสำหรับในกระบวนการเกิดโฟม

1.2 แนวคิดในการศึกษา

โครงการนี้เป็นการศึกษาความสามารถการเป็นโฟม (Foamability) ของพอลิโพรพิลีนโฟมสามชนิดซึ่งมีพอลิโพรพิลีนเป็นเรซินหลัก ได้แก่ พอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด พอลิโพรพิลีนโฟมสองชนิด และพอลิโพรพิลีนโฟมบีดส์ (Expanded Polypropylene Foam Beads, EPP Foam Beads) โดยเลือกใช้กระบวนการเกิดโฟมแบบกะซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพของกระบวนการเกิดโฟมที่มีเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 18 ml หรือใช้สำหรับในกระบวนการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด และพอลิโพรพิลีนโฟมสองชนิด และอีกกรณีหนึ่งคือใช้ของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 4.1 หรือใช้ในการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนโฟมบีดส์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนโฟมด้วยโปรแกรม Image-J เพื่อพิจารณาถึงตัวแปรและสถานะเกิดโฟมต่างๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของโฟมที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam Index) เพื่อบ่งบอกถึงโฟมที่เกิดขึ้นถึงความใกล้เคียงกับโฟมไอโซโทรปิก

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษากลไกหรือกระบวนการเกิดโฟมแบบกะของสารเกิดฟองทางกายภาพสองชนิดคือคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซน

1.3.2 ศึกษาสภาวะเกิดโฟมที่เหมาะสมซึ่งทำให้พอลิโพรพิลีนโฟมมีสัดส่วนการขยายตัวอยู่ในช่วงประมาณ 15-25 เท่า

1.3.3 เพื่อวิเคราะห์ความเป็นโฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam)

1.3.4 เลือกพอลิโพรพิลีนจากสองชนิด (PP-A และ PP-B) ที่มีความสามารถและความเป็นไปได้ที่จะนำไปผลิตเป็นพอลิโพรพิลีนโฟมบีดส์

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษากระบวนการเกิดโฟมแบบกะโดยเลือกใช้สารเกิดฟองทางกายภาพสองชนิดคือคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และอีกหนึ่งชนิดคือของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซน

1.4.2 ศึกษาความสามารถการเป็นโฟมของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 18 ml ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 135-170°C เวลา 10-120 min และกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการลดความดันคือ 2-3 s

1.4.3 ศึกษาความสามารถการเป็นโฟมด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 4 l ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 10-20 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 120-130°C เวลา 120 min และกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการลดความดันคือ 120 s

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สร้างองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการเกิดโฟมแบบกะด้วยสารเกิดฟองทางกายภาพสองชนิดคือคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซน

1.5.2 เป็นการสร้างทางเลือกอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ โดยไม่ใช้หรือใช้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง

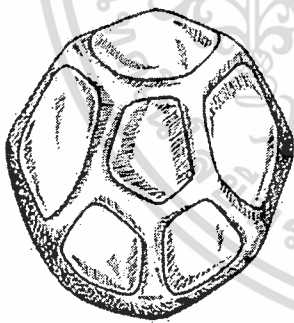
1.5.3 ช่วยยืดอายุของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นการใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดก่อนที่จะถูกปล่อยเข้าสู่บรรยากาศโดยทันทีทันใดเมื่อผลิตได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

บทที่ 2

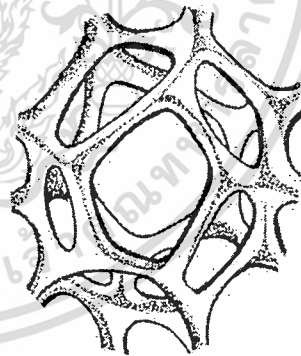
ทฤษฎี

2.1 โฟม (Foam) [1,2]

โฟม หรือ โฟมพลาสติก หมายถึงวัสดุที่มีโพรงแก๊สเล็กๆ (Cellular Materials) มากมายกระจายในเนื้อพลาสติก โดยแก๊สเกิดขึ้นได้จากสารเกิดฟองซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดแก๊สในเนื้อพลาสติก โฟมมีทั้งชนิดแข็ง (Rigid Foam) แข็งปานกลาง (Semirigid Foam) และยืดหยุ่น (Flexible Foam) โดยทั่วไปวัสดุโฟมจะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัฏภาค (Phase) ได้แก่วัฏภาคที่เป็นของแข็งหรือของเหลวและวัฏภาคแก๊ส ซึ่งวัฏภาคแก๊สจะแทรกตัวอยู่ในวัฏภาคของแข็งหรือของเหลว ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล ความเป็นฉนวน เป็นต้น เมื่อวิเคราะห์ถึงโครงสร้างของโฟมโดยจำแนกตามประเภทของโฟมตามโครงสร้างของฟองหรือเซลล์ พบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ โฟมแบบเซลล์เปิด (Open Cell) ซึ่งหมายถึงโฟมที่มีโพรงของเซลล์ติดต่อกันจนทำให้แก๊สหรืออากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในหมุนเวียนถึงกันได้ ดังรูปที่ 2.1 (ก) และ โฟมแบบเซลล์ปิด (Close Cell) หมายถึงโฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ที่ไม่ต่อกันได้ โดยมีผนังล้อมรอบเซลล์ที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.1 (ข)



(ก) โฟมแบบเซลล์ปิด



(ข) โฟมแบบเซลล์เปิด

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของโฟม [3]

สำหรับวัสดุที่เรียกว่าพอลิเมอร์โฟมนั้น ส่วนที่เป็นวัฏภาคของแข็งอาจประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียงชนิดหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งชนิด เช่นในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปโฟม เป็นต้น การผสมของพอลิเมอร์ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป เช่น อุณหภูมิหลอม ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

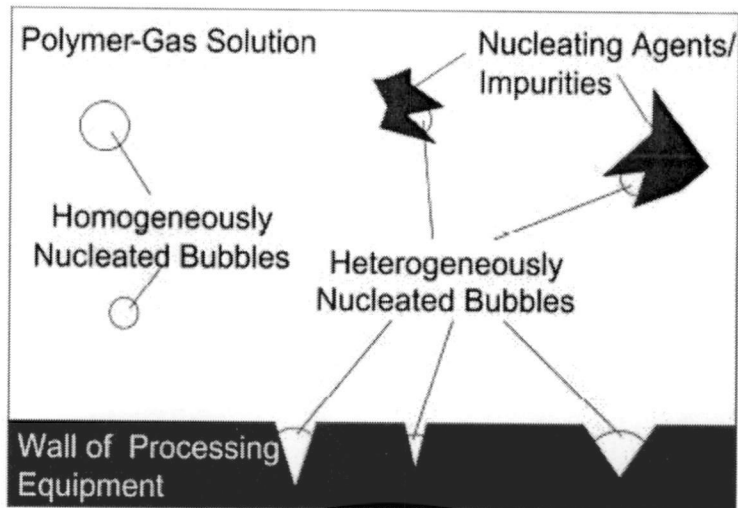
การเกิดโฟมเป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางด้านฟิสิกส์และทางด้านเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่หรือสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นที่เข้ามา พื้นฐานสำคัญของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองแก๊ส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

2.1.1.1 การเกิดฟองแก๊ส (Bubble Formation)

การเกิดฟองแก๊สเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยเมื่อมีการรบกวนระบบหรือก่อกวนให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ กระบวนการดังกล่าวจะไปกระตุ้นให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กหรือนิวเคลียส จำนวนมากกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ นิวเคลียสเหล่านี้จะมีการเจริญเติบโตไปเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ต่อไป ทั้งนี้กลไกการเกิดฟองแก๊สหรือการเกิดนิวเคลียสแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียว (Homogeneous Nucleation) การเกิดนิวเคลียสในลักษณะแบบนี้เกิดขึ้นจากระบบที่แก๊สละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับวัฏภาคของพอลิเมอร์หรือแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

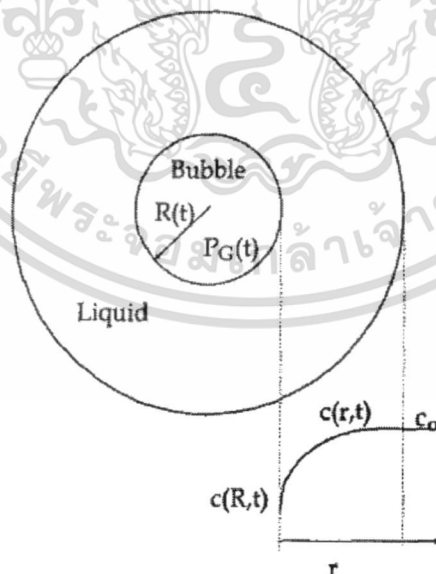
2 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อผสม (Heterogeneous Nucleation) การเกิดนิวเคลียสในลักษณะแบบนี้เกิดได้จากการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารเกิดนิวเคลียส (Nucleating Agents) หรือเกิดจากสารปนเปื้อน (Impurities) ซึ่งการเติมสารเติมแต่งนั้นเป็นการช่วยลดแรงตึงผิว (Surface Tension) ระหว่างพอลิเมอร์และสารเกิดนิวเคลียส ซึ่งส่งผลให้เกิดนิวเคลียสได้ง่ายและเกิดขึ้นบริเวณระหว่างพอลิเมอร์และสารเกิดนิวเคลียส หรือแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียวและเนื้อผสม

2.1.1.2 การเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble Growth) [2,6]

หลังจากกระบวนการเกิดนิวเคลียส ความดันและความเข้มข้นของแก๊สภายในฟองมีค่าลดลง ทำให้เกิดผลต่างของความเข้มข้นของแก๊สระหว่างภายในฟองและพอลิเมอร์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แกรเดียนต์ของความเข้มข้น (Concentration Gradient) เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.3 ด้วยเหตุนี้แก๊สบริเวณข้างเคียงมีการแพร่เข้ามาภายในฟอง จึงส่งผลให้นิวเคลียสเหล่านี้มีการขยายขนาดเพิ่มขึ้น และในบางกรณีการขยายตัวของฟองแก๊สอาจเกิดจากการรวมตัวกันของแก๊ส (Coalescence) ที่มากกว่า 2 ฟองได้เช่นกัน ทั้งนี้การเติบโตของแก๊สยังขึ้นกับแรงตึงผิวและความหนืดอีกด้วย



รูปที่ 2.3 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สและรัศมีฟอง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 การคงสภาพของฟองแก๊ส (Bubble Stability)

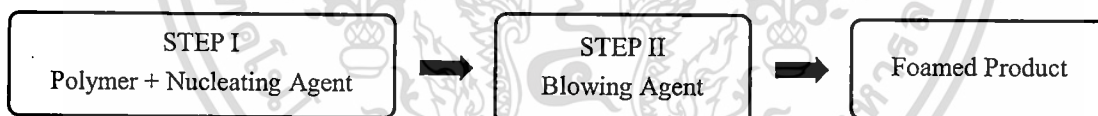
การคงสภาพของฟองแก๊สเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม ในขั้นตอนนี้จะมีการคงสภาพของโฟม ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากของขนาดโฟมและขนาดฟอง และเกิดการแพร่ของสารเกิดฟองที่อยู่ภายในโฟมแพร่ออกมายังสภาวะบรรยากาศและในเวลาเดียวกันนั้นอากาศเกิดการแพร่เข้ามาในโฟมเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้ที่สภาวะสมดุลนั้นมีการอากาศเข้าไปในโฟมได้อย่างสมบูรณ์และมีความดันภายในโฟมเท่ากับความดันบรรยากาศ

2.1.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foaming Process) [7]

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

1. กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

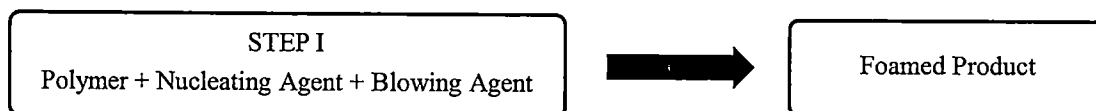
ในขั้นตอนแรกทำการผสมระหว่างสารเกิดนิวเคลียสและพอลิเมอร์ ต่อมาทำให้อิมิตัวด้วยแก๊สภายใต้สภาวะความดันสูงและอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ (Melt Temperature) เมื่อแก๊สละลายในพอลิเมอร์จนเข้าสู่สภาวะสมดุลจากนั้นลดความดันลงเพื่อให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะอิมิตัวยิ่งยวด (Supersaturated) ซึ่งส่งผลให้เกิดนิวเคลียสอย่างรวดเร็วและกลายเป็นโฟมในขั้นตอนสุดท้าย ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงเป็นแผนผังอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

2. กระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่อง

ทำการผสมพอลิเมอร์ สารเกิดนิวเคลียสและสารเกิดฟอง ผ่านเครื่องอัดรีดซึ่งจะทำให้เกิดการผสมกันของของผสมเหล่านี้ เมื่อของผสมเหล่านี้ไหลผ่านบริเวณหัวตายและเกิดการลดลงของความดันจึงส่งผลให้เกิดโฟมเกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงแผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่องได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบต่อเนื่อง

2.1.3 สารเกิดฟอง [3,4,8]

การเกิดโฟมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ โฟมที่เกิดจากสารเกิดฟองทางกายภาพ (Physical Blowing Agents) และโฟมที่สารเกิดฟองทางเคมี (Chemical Blowing Agents) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. สารเกิดฟองทางเคมี

สารเกิดฟองทางเคมีคือสารเคมีชนิดหนึ่งซึ่งมีการปลดปล่อยให้แก่สอออกมาด้วยการเกิดปฏิกิริยาและ/หรือการสลายโครงสร้างที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature) จากผลของการสลายโครงสร้างเพื่อให้เกิดสอออกมานั้น จะทำให้มีสารหลงเหลือหรือสารตกค้างที่เป็นของแข็งภายในเนื้อโฟม ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำโฟมที่เกิดจากกระบวนการนี้ไปใช้ในบางผลิตภัณฑ์ได้ สารเกิดฟองทางเคมีสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ แบบคายความร้อน เช่น อะโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide) เมื่อมีการสลายโครงสร้างจะทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แอมโมเนีย (NH₃) และออกซิเจน (O₂) ที่อุณหภูมิ 200-230°C เป็นต้น และแบบดูดความร้อน เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate) กรดซิตริก (Citric Acid) เป็นต้น ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้จะมีการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ที่อุณหภูมิ 130-170°C และ 110-150°C ตามลำดับ

2. สารเกิดฟองทางกายภาพ

สารเกิดฟองทางกายภาพทำให้เกิดโฟมด้วยการระเหยหรือการเดือดของของเหลวหรือการขยายตัวของแก๊สเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิและ/หรือการลดความดัน โดยทั่วไปสารเกิดฟองทางกายภาพที่เป็นของเหลวจะมีจุดเดือดต่ำและเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายสั้นหรือเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีธาตุตระกูลฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons, CFCs) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrochlorofluorocarbons, HCFCs) เป็นต้น สารเกิดฟองทางกายภาพเหล่านี้ถูกจัดให้อยู่ในจำพวกสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemical Reactions) ที่ชั้นบรรยากาศหรือเป็นการทำลายโอโซนนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้มีการศึกษาทางเลือกอื่นเพื่อนำมาทดแทนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นคือแก๊สเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไนโตรเจน (N₂) อาร์กอน (Ar) และฮีเลียม (He) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าแก๊สเฉื่อยมีความสามารถในการละลายในพอลิเมอร์ได้น้อยแต่มีความสามารถที่ดีในด้านการแพร่เข้าไปในพอลิเมอร์ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนนิยมใช้เป็นสารเกิดฟองอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าสารประกอบประเภทอื่นๆ และผลิตได้จากการเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรม เพราะฉะนั้นแก๊สเฉื่อยจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารเกิดฟองทางกายภาพในกระบวนการเกิดโฟมนั้น ไม่นานมานี้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

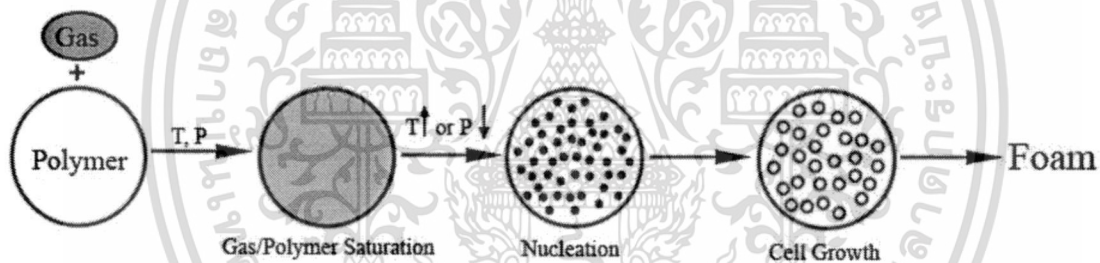
นับตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งข้อดีของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตคือมีความสามารถในการละลาย (Solubility) และการแพร่ (Diffusivity) ในพอลิเมอร์สูงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้กระบวนการผลิตโฟมที่ใช้สารเกิดฟองเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าสารเกิดฟองที่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ขั้นตอนการเกิดโฟมโดยมีแก๊สเป็นสารเกิดฟองสามารถเกิดขึ้นได้รูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้ [9]

1. การละลายของแก๊ส (Gas Dissolution) แก๊สละลายลงในเนื้อของพอลิเมอร์และเกิดเป็นสารละลายของแก๊สและพอลิเมอร์

2. การเกิดเซลล์ (Cell Nucleation) เกิดจากการรบกวนสมดุลของระบบด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์คือเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิและ/หรือลดความดันของระบบอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างแก๊สและพอลิเมอร์

3. การเติบโตของเซลล์ (Cell Growth) เกิดจากการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อน

4. การคงสภาพของเซลล์ (Cell Stabilization) เซลล์เกิดการหยุดการเติบโตเองโดยธรรมชาติหรือมีแรงขับ (Driving force) ของการเติบโตของเซลล์ไม่เพียงพอ



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเกิดโฟม

2.2 พอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม (Polymer Composite Foam) [10-13]

พอลิเมอร์คอมโพสิตประกอบด้วยอย่างน้อยสองส่วนคือส่วนที่เป็นเมทริกซ์หรือพอลิเมอร์ และอีกส่วนหนึ่งคือตัวเติม (Filler) ซึ่งการจำแนกประเภทของตัวเติมนี้สามารถจำแนกได้หลายประเภท คือ จำแนกตามลักษณะรูปทรง เช่น มีลักษณะยาวหรือสั้น เส้นใย แผ่น ทรงกลม เป็นต้น จำแนกตามประเภทของสารเคมี ได้แก่ ตัวเติมประเภทสารอินทรีย์ (Organic Fillers) เช่น ทัลค์ (talc) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) แบเรียมซัลเฟต (Barium Sulfate) เคาลิน (Kaolin) เป็นต้น ตัวเติมประเภทสารอนินทรีย์ (Mineral Fillers) เช่น เส้นใยไม้ ปอ ฝ้าย เป็นต้น และจำแนกตามความสามารถในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ตัวเติมที่ทำหน้าที่ในส่วนของส่วนเสริมแรง (Reinforced) ตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการนำความร้อน เป็นต้น

สำหรับกระบวนการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นสามารถเตรียมได้จากการนำพอลิเมอร์ผสมสารเติมแต่งและตัวเติมด้วยกระบวนการผสมแบบกะหรือแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดแบบ

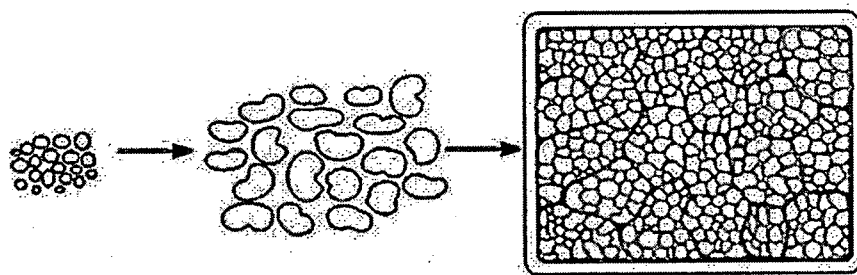
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) หรือเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder) ที่ถูกออกแบบให้หัวดาวยมีลักษณะต่างๆ ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ยังพบว่าการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (Compatibiliser) ยังช่วยให้เมตริกซ์ของพอลิเมอร์มีแรงยึดติดบนผิวของส่วนของตัวเติมได้ดีขึ้น เช่น การเติมสารพอลิพรพิลีนกราฟต์เมทาลิกแอนไฮไดรด์ (Poly(Propylene-graft-Maleic Anhydride) Copolymer, MA-g-PP) ในกระบวนการผลิตพอลิพรพิลีนคอมโพสิต เป็นต้น

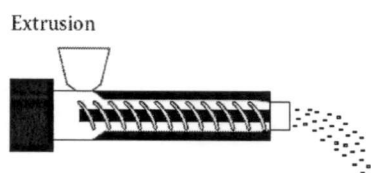
หากนำพอลิเมอร์คอมโพสิตเข้าสู่กระบวนการเกิดโฟมจะทำให้เกิดพอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม คือมีวัฏภาคแก๊สเข้าไปกระจายตัวและแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตโฟมมีความแข็งแรงเชิงกลเทียบเท่ากับมวล (Specific Mechanical Property) ดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิต

2.3 พอลิเมอร์โฟมบีดส์ (Expanded Polymer Foam Beads) [13-14]

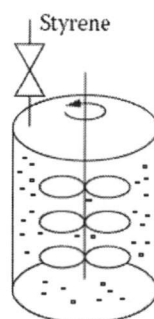
พอลิเมอร์โฟมบีดส์ คือ บีดส์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็กของพอลิเมอร์โฟมชนิดเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic Polymers) ซึ่งในกระบวนการเกิดโฟมเริ่มต้นด้วยการทำให้พอลิเมอร์อิมัลชันด้วยสารเกิดฟองทางกายภาพหรือสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น บิวเทน (C_4H_{10}) เพนเทน (C_5H_{12}) เฮกเซน (C_6H_{14}) เป็นต้น จากนั้นรบกวนสมดุลของระบบซึ่งจะทำให้ได้พอลิเมอร์โฟมบีดส์ที่มีความสามารถในการขยายตัวสูงถึง 35-40 เท่า และในขั้นตอนสุดท้ายคือการนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Mold) ทำให้พอลิเมอร์โฟมบีดส์มีการขยายตัวและหลอมติดกันระหว่างผิวของพอลิเมอร์โฟมบีดส์ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถแสดงกระบวนการอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.7 สำหรับกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมนั้นสามารถยกตัวอย่างได้ด้วยกระบวนการผลิตโฟมบีดส์ของพอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) ระหว่างพอลิเอททิลีนและพอลิสไตรีน ซึ่งเริ่มต้นด้วยการผลิตพอลิเอททิลีน ดังในรูปที่ 2.8 (ก) จากนั้นนำพอลิเอททิลีนเข้าสู่กระบวนการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ด้วยสไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene Monomer) ดังรูปที่ 2.8 (ข) ต่อจากนั้นมาจึงนำพอลิเมอร์ผสม เข้าสู่กระบวนการเกิดโฟมด้วยสารเกิดฟองทางกายภาพ ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ผสมแขวนลอยอยู่ในน้ำ ดังรูปที่ 2.8 (ค) ถัดจากนั้นจึงนำโฟมบีดส์ที่ได้มาไล่น้ำด้วยกระบวนการทำแห้ง ดังรูปที่ 2.8 (ง) หลังจากนั้นจึงทำการขนส่งเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามต้องการดังรูปที่ 2.8 (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ



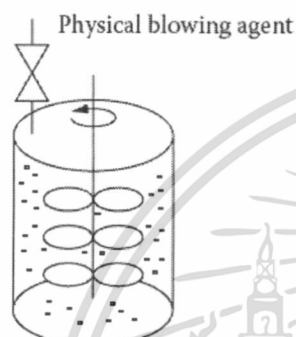
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์โฟมบีดส์ ภาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



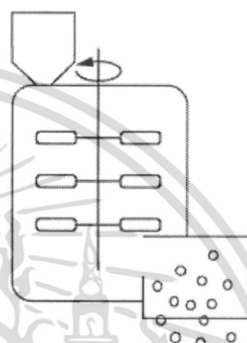
(ก) การผลิตพอลิเอททีลีน



(ข) การเกิดพอลิเมอร์ด้วยสไตรีนมอนอเมอร์



(ค) การเกิดโฟม



(ง) การทำแห้ง



(จ) การขนส่ง



(ฉ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโฟมบีคส์

รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตโฟมบีคส์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอททีลีนและพอลิสไตรีน

2.3.1 ความจุความร้อน (Heat Capacity) [15]

พลังงานความร้อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของการหลอมของพอลิเมอร์ในกระบวนการผลิตโฟม ซึ่งพลังงานความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถแสดงได้ด้วยค่าของความจุความร้อน หรือหมายถึงพลังงานความร้อนที่ทำให้สสารมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ความจุความร้อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ แบบที่หนึ่งคือความจุความร้อนเมื่อปริมาตรคงที่ (Constant-volume Heat Capacity, C_v) และแบบที่สองคือความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ (Constant-pressure Heat Capacity, C_p) สำหรับค่าของความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ในสถานะแก๊สอุดมคติสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่ที่ขึ้นกับชนิดของสสารและอุณหภูมิสัมบูรณ์ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$C_p/R = A + BT + CT^2 + DT^{-2}$$
 (2.1)
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากในกรณีของของผสมนั้นสามารถหาค่าความจุความร้อนของของผสม ($C_{P,mix}$) เมื่อความดันคงที่ ได้จากผลรวมของสัดส่วนโดยโมลของสารใดๆ (y_i) หรือสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{P,mix} = \sum_{i=1}^n (y_i \times C_{P,i}) \quad (2.2)$$

เมื่อค่าคงที่ของสารแต่ละชนิดสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สำหรับความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่ของสารแต่ละชนิด

Chemical Species	A	$10^3 B$	$10^6 C$	$10^{-5} D$
n-Pentane	2.464	45.351	-14.111	-
n-Hexane	3.025	53.722	-16.791	-
Air	3.355	0.575	-	-0.016
Carbon Dioxide	5.457	1.045	-	-1.157

2.4 การบ่อนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [16]

ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid) คือของไหลที่มีสถานะอุณหภูมิสูงและความดันสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature, T_c) และสูงกว่าความดันวิกฤต (Critical Pressure, P_c) ของของไหลนั้นๆ ของไหลเหนือวิกฤตมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลวและแก๊ส โดยตัวอย่างของอุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหลสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.2 และผลจากการที่ของไหลเหนือวิกฤตมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลวและแก๊สส่งผลให้ของไหลเหนือวิกฤตมีคุณสมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties) เช่น ความหนาแน่น ความหนืด การแพร่ เป็นต้น มีค่าอยู่ระหว่างแก๊สและของเหลว ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของของไหลต่างๆ

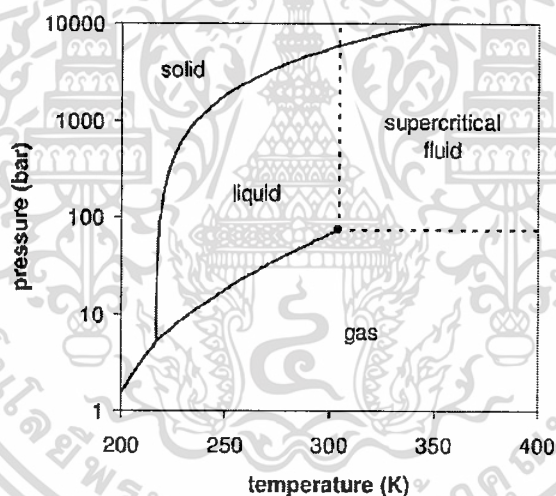
Fluids	T_c (K)	P_c (MPa)
NH ₃	508.1	4.70
CO ₂	304.1	7.38
CH ₄	293.0	3.06
CH ₃ OH	512.6	8.09
H ₂ O	647.3	22.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกายภาพของแก๊ส ของไหลเหนือวิกฤตและของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์

Physical Properties	Gas	Supercritical	Liquid
Density (kg/m^3)	1	100-800	1000
Viscosity (Pa.s)	0.001	0.005-0.01	0.05-0.1
Diffusion (m^2/s)	1×10^{-5}	1×10^{-7}	1×10^{-9}

คาร์บอนไดออกไซด์นิยมนำมาใช้ในกระบวนการต่างๆ เนื่องจากมีสภาวะวิกฤตที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสภาวะวิกฤตของสารชนิดอื่น จึงส่งผลให้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ มีราคาไม่สูงมาก มีความเป็นพิษต่ำ ไม่ติดไฟ และสามารถแยกออกจากระบบได้ง่าย อาทิเช่น การลดความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมายังสภาวะบรรยากาศ จึงส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นแก๊สและสามารถปล่อยเข้าสู่บรรยากาศได้ ดังแผนผังวัฏภาค (Phase Diagram) รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอน ไดออกไซด์

2.5 ปรากฏการณ์การส่งผ่าน (Transport Phenomena) ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ [13,17,18]

ปรากฏการณ์การส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ได้แก่ การแพร่ (Diffusion) และการซึมผ่าน (Permeation) มีความเกี่ยวข้องทั้งในขั้นตอนการเกิดโฟมและกระบวนการหลังการเกิดโฟม โดยเริ่มต้นจากการที่แก๊สจากพอลิเมอร์มีการแพร่เข้ามาภายในฟองแก๊สในขั้นตอนการเจริญเติบโตของฟองแก๊ส เนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของฟองแก๊สเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อแก๊สแพร่เข้ามาจนทำให้ฟองแก๊สหรือเซลล์เต็มไปด้วยแก๊ส จึงส่งผลให้ขั้นตอนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคงสภาพเซลล์นั้นแก๊สมีการแพร่ออกจากเซลล์และในขณะที่เดียวกันนั้นอากาศจากภายนอกจะเข้ามาแทนที่จนเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่อีกครั้งหนึ่ง 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 มีแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์มีค่าน้อยจึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและเวลา แต่แปรผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์เท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์จากสมการของ Arrhenius ดังนี้

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (2.3)$$

ในกรณีของอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพคล้ายยางสามารถคำนวณค่าของ E_D ได้จากสมการ

$$10^{-3} \frac{E_D}{R} = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}}\right)^2 \left[7.5 - (2.5 \times 10^{-4} (298 - T_g)^2)\right] \pm 0.6 \quad (2.4)$$

เมื่อ T_g คือ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (K)
 σ_x คือ ขนาดโมเลกุลของแก๊ส x ซึ่งแก๊สบางชนิดแสดงค่าได้ดังตารางที่ 2.4

ในขณะที่ D_0 หาได้จากสมการ

$$\log D_0 = \frac{-E_D \times 10^{-3}}{R} - 4.0 \pm 0.4 \quad (2.5)$$

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของแก๊สแต่ละชนิด

Gas	ϵ/k (K)	σ_x (nm)
N_2	71.4	37.98
CO_2	195.2	39.41
O_2	106.7	34.67
CH_4	148.6	37.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการเกิดโพลีเมอร์แบบกะนั้นเวลาเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการ ซึ่งเป็นเวลาของแก๊สที่ใช้ในการละลายในพอลิเมอร์จนเข้าสู่สมดุล โดยความสัมพันธ์ของสัดส่วนของค่าการละลายที่เวลาใดๆ ต่อค่าการละลายที่เวลา ∞ สมดุลและสัมประสิทธิ์การแพร่แสดงได้ดังนี้ [19]

$$\frac{\Delta w_{CO_2}(t)}{\Delta w_{CO_2}(t = \infty)} = 1 - \sum_n \frac{8}{(2n + 1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2n + 1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ $\Delta w_{CO_2}(t)$	คือ น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์ที่เวลา t ใดๆ (g)
$\Delta w_{CO_2}(t=\infty)$	คือ น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์เมื่อเวลาเข้าสู่สมดุล (g)
L	คือ ความหนาของตัวอย่าง (cm)
t	คือ เวลาในการละลาย (s)
n	คือ จำนวนเต็มตั้งแต่ 1 จนถึงอนันต์

2.5.2 การซึมผ่าน

การซึมผ่านของแก๊สในพอลิเมอร์จะบ่งบอกถึงปริมาณของแก๊สที่ผ่านพื้นผิวหน้าตัดของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ต่อเวลาและความดัน การซึมผ่านสามารถแบ่งออกได้เป็นสามขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนแรกคือการละลายของแก๊สที่บริเวณผิวของพอลิเมอร์ ขั้นตอนที่สองคือแก๊สเกิดการแพร่จนเข้าสู่ภาวะอิ่มตัวซึ่งมีแรงขับจากผลต่างของความเข้มข้นของแก๊ส และขั้นตอนที่สามคือเกิดการระเหยของแก๊สบริเวณที่ผิวอีกด้านหนึ่งของพอลิเมอร์ ทั้งนี้สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeation Coefficient, P) หาได้จากผลคูณของสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) และสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility Coefficient, S) ดังสมการ

$$P \equiv DS \quad (2.7)$$

หรือสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จากสมการ

$$P = P_0 \exp \left(\frac{-E_P}{RT} \right) = D_0 S_0 \exp \left(\frac{-(E_D + \Delta H_S)}{RT} \right) \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	ΔH_s	คือ พลังงานความร้อนของการละลาย (Solubility) (J/mol)
	E_D	คือ พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) ของการแพร่ (J/mol)
	E_p	คือ พลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างพลังงานกระตุ้นของการแพร่และพลังงานความร้อนเชิงโมล (J/mol)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol.K)

ในกรณีสัมประสิทธิ์การละลายมีหน่วยคือ $\text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3.\text{Pa}$ และสัมประสิทธิ์การแพร่มีหน่วยคือ cm^2/s เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีหน่วยคือ $\text{cm}^3(\text{STP}).\text{cm}^2/\text{cm}^3.\text{s}.\text{Pa}$ สำหรับการคำนวณกรณีของอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพคล้ายยางสามารถคำนวณค่าของ P_0 ได้จากสมการ

$$\log P_0 = -10.1 + 10^{-3} \frac{E_p}{R} \pm 0.25 \quad (2.9)$$

2.5.3 การละลาย [17]

การละลายของแก๊สในพอลิเมอร์สามารถแสดงได้จากค่าการละลายหรือแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การละลายซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณของแก๊สที่สามารถละลายในพอลิเมอร์ได้มากที่สุด ณ สถานะสมดุล ซึ่งการละลายของแก๊สนี้เป็นไปตามกฎของ Henry โดยสัมประสิทธิ์การละลายหาได้จากสมการ

$$S = S_0 \exp\left(\frac{\Delta H_s}{RT}\right) \quad (2.10)$$

สำหรับอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพคล้ายยางสามารถคำนวณค่าของพลังงานความร้อนของการละลายหาได้จากสมการ

$$10^{-3} \frac{\Delta H_s}{R} = 1.0 - 0.010 \frac{\epsilon}{k} \pm 0.5 \quad (2.11)$$

$$\log S_0 = -5.5 - 0.005 \frac{\epsilon}{k} \pm 0.8 \quad (2.12)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการสัมประสิทธิ์การละลายตามหัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ เป็นสมการอย่างง่าย เพื่อหาความสามารถในการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามจึงได้มีการศึกษาสมการที่มีความเหมาะสมต่อการทำนายค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ จากการศึกษาของ Zhen-hua Chen และคณะ [20] พบว่าสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe (Sanchez-Lacombe Equation of State) มีความเหมาะสมและแม่นยำในการทำนายค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนที่สภาวะความดันและอุณหภูมิสูง โดยเบื้องต้นนั้นที่สภาวะสมดุลระบบของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์คือการที่ศักย์เคมี (Chemical Potential) ของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคแก๊สมีค่าเท่ากับศักย์เคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของพอลิเมอร์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [19]

$$\mu_1^G = \mu_1^P \quad (2.13)$$

$$\frac{\mu_1^G}{RT} = r_1 \left[\frac{-\tilde{p}_1 + \tilde{P}_1 \tilde{v}_1}{\tilde{T}_1} + \tilde{v}_1 \left((1 - \tilde{\rho}_1) \ln(1 - \tilde{\rho}_1) + \frac{\tilde{p}_1}{r_1} \ln \tilde{\rho}_1 \right) \right] \quad (2.14)$$

$$\frac{\mu_1^P}{RT} = \ln \Phi_1 + \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right) \Phi_2 + r_1 \tilde{\rho} \chi_{12} \Phi_2^2 \frac{v_1^*}{v^*} + r_1 \left[\frac{-\tilde{p} + \tilde{P}_1 \tilde{v}}{\tilde{T}_1} + \tilde{v} \left((1 - \tilde{\rho}) \ln(1 - \tilde{\rho}) + \frac{\tilde{p}}{r_1} \ln \tilde{\rho} \right) \right] \quad (2.15)$$

เมื่อตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe ดังนี้

$$\tilde{\rho}^2 + \tilde{P} + \tilde{T} \left[\ln(1 - \tilde{\rho}) + \left(1 - \frac{1}{r} \right) \tilde{\rho} \right] = 0 \quad (2.16)$$

$$\tilde{P} = \frac{P}{P^*}, \tilde{T} = \frac{T}{T^*}, \tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho^*}, \tilde{\rho} \cong \frac{\bar{M}w}{v^*}, r = \frac{P^* v^*}{RT^*} = \frac{P^*}{RT^* \rho^*} \quad (2.17)$$

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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดทอนหรือทำซ้ำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีการคำนวณคุณสมบัติต่างๆ ของของผสมที่ใช้ควบคู่กับสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe หาได้ดังนี้

$$v^* = \phi_1^0 v_1^* + \phi_2^0 v_2^* \quad (2.18a)$$

$$\phi_i^0 = \frac{\hat{\phi}_i}{\hat{\phi}_1 + (v_1^*/v_2^*)\hat{\phi}_2} \quad \text{เมื่อ } i = 1 \text{ และ } 2 \quad (2.18b)$$

$$\hat{\phi}_i = \frac{m_i/\rho_i^*}{m_1/\rho_1^* + m_2/\rho_2^*} \quad \text{เมื่อ } i = 1 \text{ และ } 2 \quad (2.18c)$$

$$\hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_2 = 1 \quad (2.18d)$$

$$P^* = \hat{\phi}_1 P_1^* + \hat{\phi}_2 P_2^* - \frac{RT}{v^*} \hat{\phi}_1 \hat{\phi}_2 \chi_{12} \quad (2.18e)$$

$$\chi_{12} = \frac{(P_1^* + P_2^* - 2(P_1^* P_2^*)^{1/2} (1 - k_{12})) v^*}{RT} \quad (2.18f)$$

$$T^* = \frac{P^* v^*}{R} \quad (2.18g)$$

$$r = x_1 r_1 + x_2 r_2 \quad (2.18h)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (2.18i)$$

$$1/\rho^* = m_1/\rho_1^* + m_2/\rho_2^* \quad (2.18j)$$

- 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
- $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์
- ρ_1^*, ρ_2^* คือ คุณสมบัติความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวแปรและค่าคงที่ต่างๆ ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิโพรพิลีนแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิโพรพิลีน

ตัวแปร	ρ^* (g/cm ³)	P^* (MPa)	T^* (K)	Pressure Range (MPa)
CO ₂	1.2530	369.1	341.2	0-20
PP	0.8817	285.2	683.1	0-50

สำหรับค่าการละลายของของไหลเหนือวิกฤตในการทดลองสามารถหาได้จากหลายๆ วิธี เช่น การวิเคราะห์เชิงน้ำหนัก (Gravimetric Techniques) ซึ่งอาศัยหลักการลอยตัวของพอลิเมอร์ที่เกิดการขยายตัวอันเนื่องมาจากของไหลเหนือวิกฤต ภายใต้สภาวะของไหลเหนือวิกฤต ปริมาตรที่เกิดจากการบวมสามารถนำไปเปรียบเทียบกับสมการของ Sanchez-Lacombe เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่าการละลายที่เกิดขึ้นได้ หรือค่าการละลายสามารถหาได้จากวิธีโดยใช้ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ หรือวิธีวัดความดันที่เปลี่ยนแปลงของของไหลเหนือวิกฤต เป็นต้น

2.6 สัณฐานวิทยาของโฟม (Foam Morphology)

เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของโฟมมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของโครงสร้างของโฟมหรือเรียกว่า สัณฐานวิทยา เช่น ขนาดของฟองหรือขนาดเซลล์ ความหนาแน่นของฟองหรือเซลล์ สัดส่วนการขยายตัว ดังนั้นความเป็นโฟมไอโซโทรปิก เป็นต้น เพราะฉะนั้นจึงมีการศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมที่เกิดขึ้น ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้ด้วยการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) และนำมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

2.6.1 ความหนาแน่นเซลล์ (Cell Density) [21]

สมมติฐานเบื้องต้นคือกำหนดให้เซลล์มีขนาดเป็นทรงกลม และมีการกระจายตัวของเซลล์อย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทางหรือเรียกโฟมที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า โฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam) ซึ่งลักษณะและโครงสร้างแบบนี้ส่งผลให้โฟมที่ได้มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง ในขณะที่จำนวนของเซลล์ (N) สามารถรายงานผลได้สองประเภทคือ ความหนาแน่นเซลล์ (N_p) คือจำนวนของเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโฟม (V_p) และอีกประเภทหนึ่งคือความหนาแน่นนิวเคลียส (Nucleus Density, N_0) คือ จำนวนของเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของพอลิเมอร์ (V_p) ซึ่งคำนวณได้จาก

เอกสาร (2.19) และ (2.20) ตามลำดับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_F = \frac{N}{V_F} \quad (2.19)$$

$$N_0 = \frac{N}{V_P} \quad (2.20)$$

หรือความหนาแน่นเซลล์สามารถคำนวณได้จากสมการ

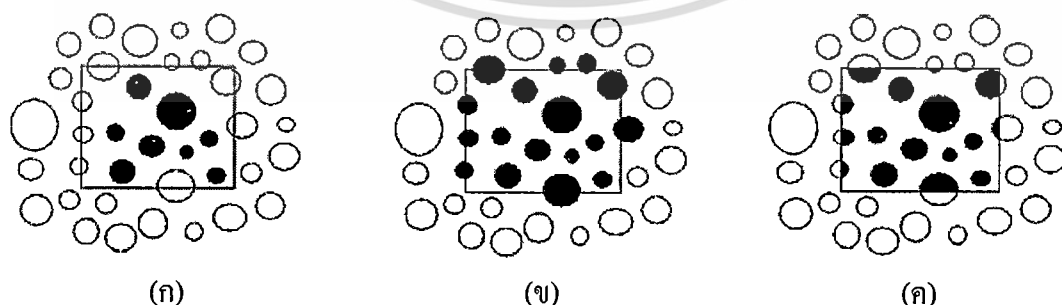
$$N_F = \left[\frac{n}{A} \right]^2 \quad (2.21)$$

เมื่อ n คือ จำนวนฟองหรือเซลล์ที่นับได้จากภาพไมโครกราฟ (cells)
 A คือ พื้นที่ในการนับจำนวนเซลล์ (cm^2)

ทั้งนี้การนับจำนวนเซลล์ที่ได้จากภาพไมโครกราฟสามารถหาได้จาก 2 วิธี คือ การกำหนดพื้นที่ผิวและการกำหนดจำนวนเซลล์ หรือสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.6.1.1 การกำหนดพื้นที่ผิว

1. พิจารณาเฉพาะเซลล์ที่อยู่ในพื้นที่ที่สนใจแบบเต็มเซลล์ วิธีนี้จะทำให้การนับน้อยกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.10 (ก) จำนวนเซลล์ที่ต่ำที่สุดคือ 8 เซลล์
2. พิจารณาเซลล์ทั้งหมดทั้งที่แบบเต็มเซลล์และแบบคาบเกี่ยวของพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้เกิดการนับเกินจากความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.10 (ข) จำนวนเซลล์ที่มากที่สุดคือ 17 เซลล์
3. พิจารณาพื้นที่ผิวของเซลล์ที่อยู่ภายในพื้นที่ที่สนใจ วิธีนี้จะทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งการนับเซลล์ที่อยู่บริเวณขอบให้ถือเป็นครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.10 (ค) พบว่าจำนวนเซลล์เฉลี่ยคือ 12.5 เซลล์

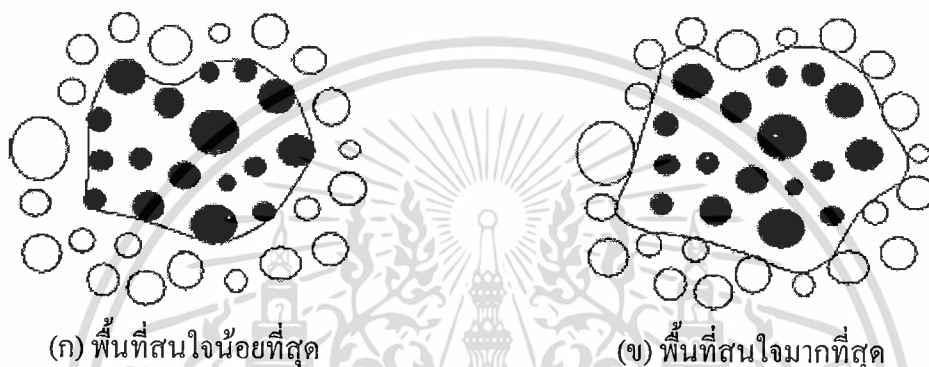


รูปที่ 2.10 การนับจำนวนเซลล์ด้วยวิธีกำหนดพื้นที่ผิว (ก) การนับจำนวนเซลล์แบบเต็มเซลล์ (ข) การนับจำนวนเซลล์แบบเต็มเซลล์และแบบคาบเกี่ยว (ค) การนับจำนวนเซลล์แบบเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.2 การกำหนดจำนวนเซลล์

1. กรณีพื้นที่ที่สนใจมีน้อยที่สุดกำหนดโดยขอบนอกของเซลล์ที่ถูกนับ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 (ก) วิธีนี้จะทำให้พื้นที่ผิวที่นับได้น้อยกว่าพื้นที่ผิวจริง ดังนั้นจะทำให้ได้ความหนาแน่นเซลล์มากกว่าความเป็นจริง
2. กรณีพื้นที่ที่มีขนาดที่สนใจมากที่สุด ซึ่งถูกจำกัดโดยเส้นภายในของรอยต่อของเซลล์ที่อยู่ล้อมรอบ ดังรูปที่ 2.11 (ข) เทคนิคนี้จะทำให้ค่าพื้นที่ผิวที่ได้มากกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นเซลล์น้อยกว่าความเป็นจริง



(ก) พื้นที่สนใจน้อยที่สุด

(ข) พื้นที่สนใจมากที่สุด

รูปที่ 2.11 การนับจำนวนเซลล์ด้วยวิธีกำหนดจำนวนเซลล์

2.6.2 สัดส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio, \emptyset)

สัดส่วนการขยายตัวนิยามได้จากปริมาตรของโฟม (V_F) ที่ขยายตัวหลังจากการเกิดโฟมต่อปริมาตรของพอลิเมอร์ (V_P) หรือคำนวณได้จากสมการ

$$\emptyset = \frac{V_F}{V_P} = \frac{(\tilde{m}_P + \tilde{m}_G)/\rho_F}{\tilde{m}_P/\rho_P} \quad (2.22)$$

เมื่อ	\tilde{m}_P	คือ น้ำหนักพอลิเมอร์ (g)
	\tilde{m}_G	คือ น้ำหนักแก๊ส (g)
	ρ_F	คือ ความหนาแน่นโฟม (g/cm^3)
	ρ_P	คือ ความหนาแน่นพอลิเมอร์ (g/cm^3)

กำหนดให้น้ำหนักของแก๊สน้อยมาก จะส่งผลให้สัดส่วนการขยายตัวคำนวณได้จากสมการ

$$\emptyset = \rho_P/\rho_F \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก (Isotropic Foam Index, η) [22]

ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิก สามารถบ่งบอกถึงลักษณะของโฟมที่เกิดขึ้นที่เบี่ยงเบนไปจากโฟมไอโซโทรปิก ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \log \left(\frac{N_{F,MB}}{N_F^0} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ $N_{F,MB}$ คือ ความหนาแน่นเซลล์ที่คำนวณมาจากพื้นฐานของสมการมวลสาร ซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์ของสัดส่วนการขยายตัว (ϕ) และขนาดของเซลล์เฉลี่ย (d) ดังสมการ

$$N_{F,MB} = \frac{6}{\pi(d)^3} \left(1 - \frac{1}{\phi} \right) \quad (2.25)$$

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

$$N_F^0 = \phi_0 \left(\frac{n}{A} \right)^{3/2} \quad (2.26)$$

เมื่อ n คือ จำนวนฟองหรือเซลล์ที่นับได้จากภาพไมโครกราฟ (cells)
 A คือ พื้นที่ในการนับจำนวนเซลล์ (cm^2)

กำหนดให้ไอโซโทรปิกแฟกเตอร์ (Isotropic Factor, ϕ_0) ของโฟมความหนาแน่นต่ำมีค่าเท่ากับ 0.1453

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

U.K. Dwivedi และ Navin Chand [23] ศึกษาผลของปริมาณของ MA-g-PP คือร้อยละ 0 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทนต่อการขัดสี (Abrasive) และคุณสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ผลการศึกษาพบว่า การเติม MA-g-PP ทำให้พื้นผิวเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนมีการยึดติดกับพื้นผิวของเส้นใยสับปะรดได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ที่ดีขึ้น ในขณะที่ปริมาณของ MA-g-PP ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการทนต่อการขัดสีได้ดีในช่วงแรงที่ค่อนข้างต่ำ (1 และ 3 N) และปริมาณของ MA-g-PP ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการทนต่อการขัดสีได้มากในช่วงแรงที่ค่อนข้างสูง (5 และ 7 N) ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะของ SL นั้นมีความแม่นยำในการทำนายค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline Polymer) มากกว่าในกรณีของพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous Polymer)

Maartjie F. Kemmere และ Thierry Meyer [16] ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของระบบที่ประกอบด้วยของไหลเหนือวิกฤตและพอลิเมอร์ ในการศึกษาระบบของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์พบว่าปัจจัยแรกๆที่ควรคำนึงถึงคือการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ ซึ่งจะส่งผลต่อการกำหนดสภาวะที่ใช้ในระบบ อีกทั้งจากผลการศึกษายังพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนทางโครงสร้างของพอลิเมอร์คือทำให้พอลิเมอร์มีปริมาณของผลึกเพิ่มขึ้น

Ryan Gosselin และ Denis Rodrigue [21] ศึกษาพอลิโอฟีนส์โฟมที่ถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด (Extrusion) และการฉีด (Injection) ในกระบวนการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาการศึกษาหาวิธีการคำนวณหาจำนวนเซลล์เชิงพื้นที่ผิว ในขณะที่เดียวกันเป็นการหาวิธีในการแปลงจำนวนเซลล์เชิงพื้นที่ผิวไปเป็นจำนวนเซลล์ในเชิงปริมาตร วิธีการสองวิธีในการคำนวณหาจำนวนเซลล์เชิงพื้นที่ผิวคือ วิธีแรกเป็นการกำหนดพื้นที่ผิว จากนั้นจึงนับจำนวนเซลล์ที่อยู่ภายในพื้นที่นั้น อีกวิธีหนึ่งคือเป็นการกำหนดจำนวนเซลล์ จากนั้นจึงหาพื้นที่ที่ล้อมรอบเซลล์ที่กำหนดไว้ จากผลการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีให้ความหนาแน่นเซลล์เชิงพื้นที่ผิวและความหนาแน่นเซลล์ของโฟมที่ได้จากการฉีดนั้นความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 และในขณะที่วิธีที่ใช้ในการศึกษาหาความหนาแน่นเซลล์คือเป็นการหาความหนาแน่นเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรโฟมประกอบไปด้วยสามวิธี ซึ่งคิดบนพื้นฐานของรูปทรงของฟองทรงกลมหรือทรงไข่ ผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีทั้งสามนี้ให้ผลที่คล้ายคลึงกันเมื่อทำการวิเคราะห์โฟมที่ได้จากการฉีดซึ่งจะได้เซลล์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม แต่จะมีความแตกต่างกันเมื่อขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีการอัดรีด ซึ่งจะได้เซลล์ที่มีลักษณะเป็นทรงรีหรือทรงรูปไข่

Ying-Hsiao Li และคณะ [25] ศึกษาสมดุลวัฏภาคของไอและของเหลว (Vapor and Liquid Equilibrium, VLE) ของระบบที่ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนที่อุณหภูมิต่างๆกันคือ 40 80 และ 120°C ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นส่งผลให้ความดันวิกฤตเทียมของผสมเพิ่มสูงขึ้น คือเพิ่มขึ้นเป็น 1,085 1,546 และ 1,682 psia

บทที่ 3

การทดลอง

ตอนที่ 1

3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

3.1.1 สารเคมี

- เม็ดพอลิโพรพิลีน (PP) ชนิด Moplen HP 500NA (บริษัท HMC Polymer)

อุณหภูมิหลอม 160°C

ความหนาแน่น 0.900 g/cm^3

ดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index, MFI) 12 g/10min

- เส้นใยสับปะรด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 μm

ความยาวของเส้นใย 3 mm

- สาร MA-g-PP

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal Mixer)
- เครื่องบีบอัดด้วยความร้อน (Compression Molding)
- อุปกรณ์ในการทดสอบการเกิดโฟมดังรูปที่ 3.1 (ภาคผนวก ข)

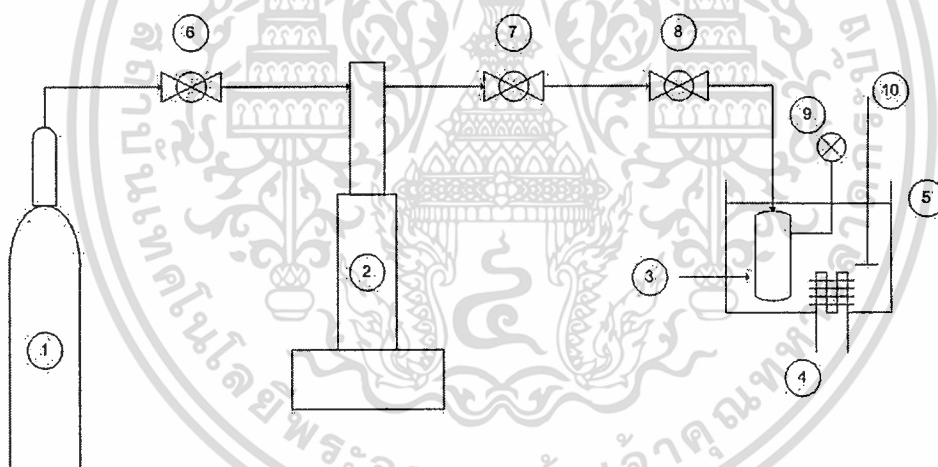
3.1.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

ผสมเม็ด PP เส้นใยสับปะรดและ MA-g-PP ด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 190°C ความเร็วรอบ 80 rpm ระยะเวลาในการผสม 10 min ในขณะที่อัตราส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 หลังจากได้ทำการผสมแล้วนำชิ้นงานไปขึ้นรูปด้วยเครื่องบีบอัด การขึ้นรูปชิ้นงานใช้อุณหภูมิ 230°C และเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 45 min ต่อชิ้นงาน

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

Sample	Sisal Fiber (phr)	MA-g-PP (%)
PP	0	0
PPF	20	0
PPFG2	20	2
PPFG5	20	5
PPFG10	20	10

ถัดจากนั้นนำพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตไปตัดเพื่อให้ได้แผ่นที่มีขนาดประมาณ 1x2 cm จากนั้นนำแผ่นพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตขนาดเล็กที่ถูกยึดไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 18 ml ที่ถูกติดตั้งตามรูปที่ 3.1 ทั้งนี้กำหนดสภาวะเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตคือความดันเกิดโฟมคงที่ 12 MPa เวลาในการลดความดันจาก 12 MPa ลดลงมาสู่ความดันบรรยากาศประมาณ 2-3 s และอุณหภูมิเกิดโฟมคือ 160 165 และ 170°C



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

- | | |
|---|------------------------------------|
| (1) ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ | (2) ปั๊มแรงดันสูง |
| (3) เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง ปริมาตร 18 ml | (4) เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) |
| (5) อ่างซิลิโคน (Silicone Bath) | (6) วาล์วหมายเลข 1 |
| (7) วาล์วหมายเลข 2 | (8) วาล์วหมายเลข 3 |
| (9) เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) | (10) ไบพัส |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2

3.2 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนโฟม

3.2.1 สารเคมี

1. เม็ดพอลิโพรพิลีน A (PP-A) ขนาด 3-4 mm (บริษัท ไทยโพลิเอททีลีน จำกัด)

อุณหภูมิหลอม 139°C

ความหนาแน่น 0.910 g/cm^3

2. เม็ดพอลิโพรพิลีน B (PP-B) ขนาด 3-4 mm (บริษัท ไทยโพลิเอททีลีน จำกัด)

อุณหภูมิหลอม 136 และ 139°C

ความหนาแน่น 0.910 g/cm^3

3. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.95%

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องบีบอัดด้วยความร้อน (Hot Compression Molding) (ภาคผนวก ก)

2. อุปกรณ์ในการทดสอบการเกิดโฟมดังรูปที่ 3.1 (ภาคผนวก ข)

3.2.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

เบื้องต้นทำการขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนด้วยวิธีบีบอัดด้วยความร้อน (Hot Compression) ซึ่งทำให้ได้แผ่นพอลิโพรพิลีนที่มีขนาดประมาณ $13 \times 13 \text{ cm}$ และมีความหนา $2-3 \text{ mm}$ จากนั้นนำไปตัดเพื่อให้ได้แผ่นพอลิโพรพิลีนขนาดประมาณ $1 \times 2 \text{ cm}$ จากนั้นนำแผ่นพอลิโพรพิลีนขนาดเล็กที่ถูกยึดไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 18 ml ที่ถูกติดตั้งตามรูปที่ 3.1 ทั้งนี้สภาวะที่ใช้ในการเกิดโฟมของ PP-A และ PP-B แสดงได้ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยให้ความดันเกิดโฟมคงที่ 12 MPa และเวลาในการลดความดันจาก 12 MPa ลดลงสู่ความดันบรรยากาศประมาณ $2-3 \text{ s}$

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการเกิดโฟมของ PP-A

Foaming Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Time (min)
135	20
	10
	20
140	30
	45
	60
145	20

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการเกิดโฟมของ PP-B

Foaming Temperature (°C)	Time (min)
135	20
	10
140	20
	30
145	20

ตอนที่ 3

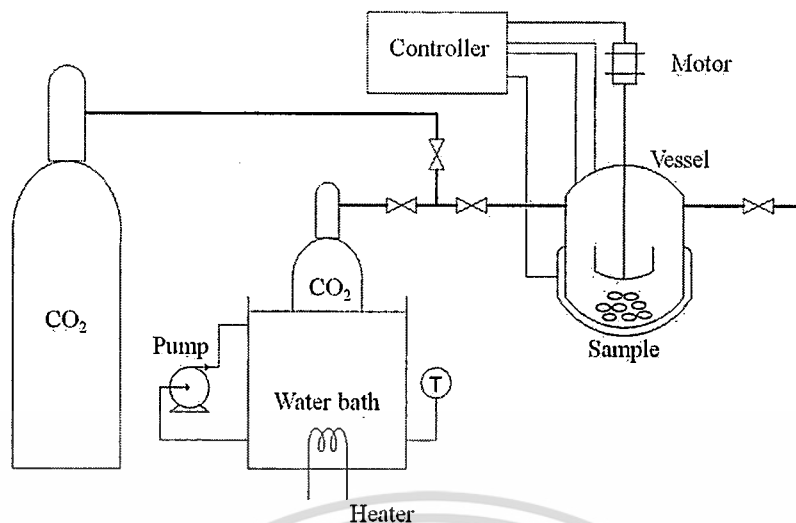
3.3 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนโฟมปิดส

3.3.1 สารเคมี

- เม็ดพอลิโพรพิลีน B (PP-B) ขนาด 3-4 mm
อุณหภูมิหลอม 136 และ 139°C
ความหนาแน่น 0.910 g/cm³
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.95%
- เฮกเซน (ชนิด AR)
- สารเติมแต่ง
- น้ำรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องมือและอุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.2
- เตาอบยี่ห้อ Memmert



รูปที่ 3.2 แบบจำลองกระบวนการผลิตพอลิโพรพิลีน โฟมปิดส์

3.3.3 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

เริ่มต้นด้วยการนำส่วนผสมต่างๆ ใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 4 l และติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.2 ส่วนผสมต่างๆ จะถูกกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 195 rpm จากนั้นทำการกำหนดอุณหภูมิเกิดโฟมของเครื่องปฏิกรณ์พร้อมทั้งอัดแก๊สเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์และปล่อยทิ้งไว้ตามเวลาที่ต้องการ เนื่องจากระบบนี้เป็นระบบปิดและปริมาตรคงที่ จึงส่งผลให้ความดันในระบบเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อได้เวลาตามที่ต้องการจึงทำการปล่อยความดันออกสู่ความดันบรรยากาศ ถัดมาจึงเก็บตัวอย่างไปอบเพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 120 min และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ต่อไป

3.4 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา

3.4.1 สารเคมี

1. น้ำรีเวอร์สออสโมซิส
2. เมทานอล (Methanol) ความบริสุทธิ์ 99.95%
3. ไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen)

3.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter) (ภาคผนวก ค)
2. เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater (ภาคผนวก ง)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น LEO 1455VP (ภาคผนวก ง)

3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หลักฐานวิทยา

1. นำตัวอย่างมาวัดความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์
2. ทำการหักตัวอย่างเพื่อศึกษาพื้นที่หน้าตัดของโฟมด้วยวิธีแบบเย็นยิ่งยวด (Cryogenic Cracking) คือ นำตัวอย่างจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว และทำการหักตัวอย่างซึ่งจะได้พื้นผิวหน้าตัดที่ไม่ถูกทำลายโครงสร้าง จากนั้นนำไปเคลือบด้วยทองหรือแพลตตินัมเพื่อให้ตัวอย่างมีสภาพนำไฟฟ้าได้ดีและนำไปวิเคราะห์หลักฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด
3. นำภาพไมโครกราฟที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image-J (ภาคผนวก จ) เพื่อศึกษาลักษณะวิทยาของตัวอย่าง เช่น ขนาดเซลล์ การกระจายตัวของขนาดเซลล์ ความหนาแน่นเซลล์ ความโพร่งเป็นไอโซโทรปิก เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

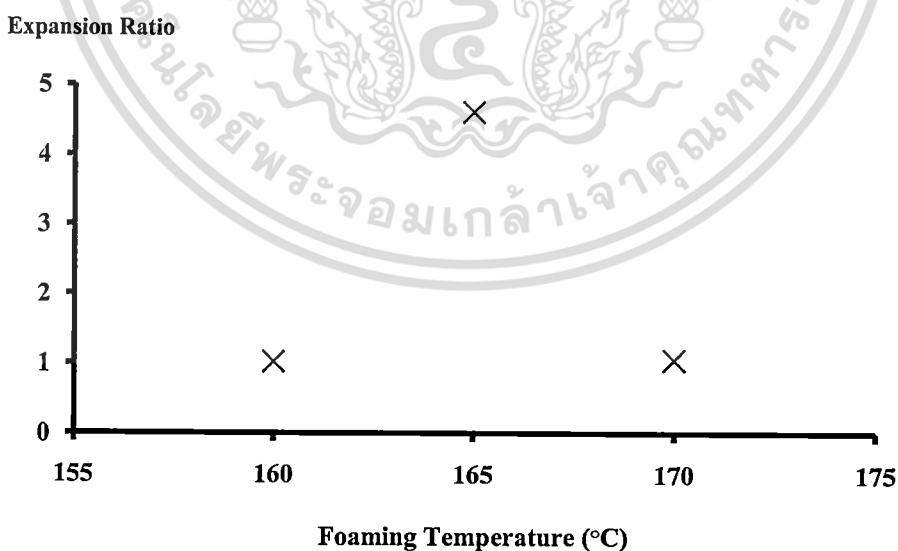
ผลการทดลอง

ตอนที่ 1

4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP โฟม

เบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิหลอมของ PP คือ 160°C และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสม โดยการเตรียมที่อุณหภูมิเกิดโฟม 160 165 และ 170°C ผลการทดลองสามารถแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าการเตรียมโฟมที่อุณหภูมิเกิดโฟม 165°C ส่งผลให้มีสัดส่วนการขยายตัวมากกว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟม 160 และ 170°C ประมาณ 4 เท่า ทั้งนี้เนื่องจาก PP โฟมยังไม่หลอมตัวที่ 160°C ทำให้ความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเข้าไปใน PP ได้ช้า จึงส่งผลให้มีการละลายได้น้อย และจากการที่ PP ยังไม่หลอมตัวจึงทำให้การขยายตัวของเซลล์เกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่วนการเตรียมโฟมที่อุณหภูมิเกิดโฟม 170°C อาจทำให้ PP หลอมตัวมากจนมีความหนืดน้อยเกินไปซึ่งทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่เข้าไปละลายอยู่ใน PP แพร่ผ่านออกสู่ภายนอกมากขึ้นในขั้นตอนการเติบโตของเซลล์และส่งผลให้มีการขยายตัวของเซลล์เกิดขึ้นได้ไม่ดี ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมคอมโพสิตโฟมในการศึกษาครั้งนี้คือ 165°C

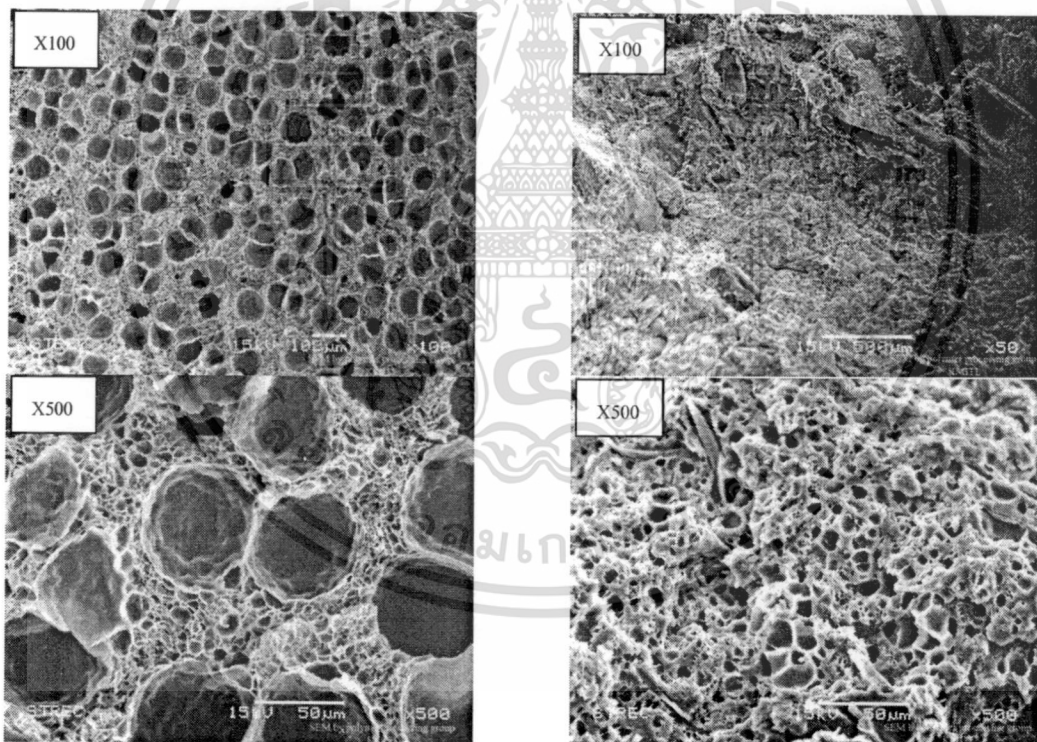


รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP โฟม ที่ความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 120 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การศึกษาผลของเส้นใยสับปะรดที่ส่งผลต่อพอลิพรพิลีนคอมโพสิตโฟม

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเพื่อเปรียบเทียบผลของการผสมเส้นใยสับปะรด 20 phr พบว่า PP โฟมที่ไม่ผสมเส้นใยสับปะรดมีลักษณะโครงสร้างของโฟมเป็นแบบไบโมดอล (Bimodal) คือ ลักษณะของโครงสร้างโฟมที่สามารถแบ่งขนาดเซลล์ออกได้เป็นสองกลุ่มที่สังเกตได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.2 (ก) โดยเซลล์ขนาดเล็กมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 μm และเซลล์ขนาดใหญ่มีขนาดเฉลี่ย 77.4 μm ส่วนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยสับปะรดในปริมาณ 20 phr พบว่ามีขนาดเซลล์ 6.2 μm มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.2 (ข) ซึ่งใกล้เคียงกับเซลล์ขนาดเล็กของ PP โฟมที่ไม่ผสมเส้นใย ทั้งนี้การผสมเส้นใยสับปะรดซึ่งมีเส้นใยยาวเป็นส่วนประกอบอาจช่วยทำให้การแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเกิดขึ้นได้ทั่วส่วนของเมทริกซ์ และการกระจายตัวของเส้นใยจะช่วยทำให้ PP ยึดติดกัน โดยเส้นใยบางส่วนทำหน้าที่เป็นสารเกิดนิวเคลียส ซึ่งการผสมเส้นใยมีผลต่อความหนืดในขณะหลอมเหลวเพิ่มขึ้น [26] จึงทำให้การเกิดเซลล์และการเติบโตของเซลล์เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและไม่เกิดสัณฐานแบบไบโมดอล



(ก) เส้นใยสับปะรด 0 phr

(ข) เส้นใยสับปะรด 20 phr

รูปที่ 4.2 ภาพไมโครกราฟของ PP โฟม ที่ความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 165 °C และเวลา 120 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

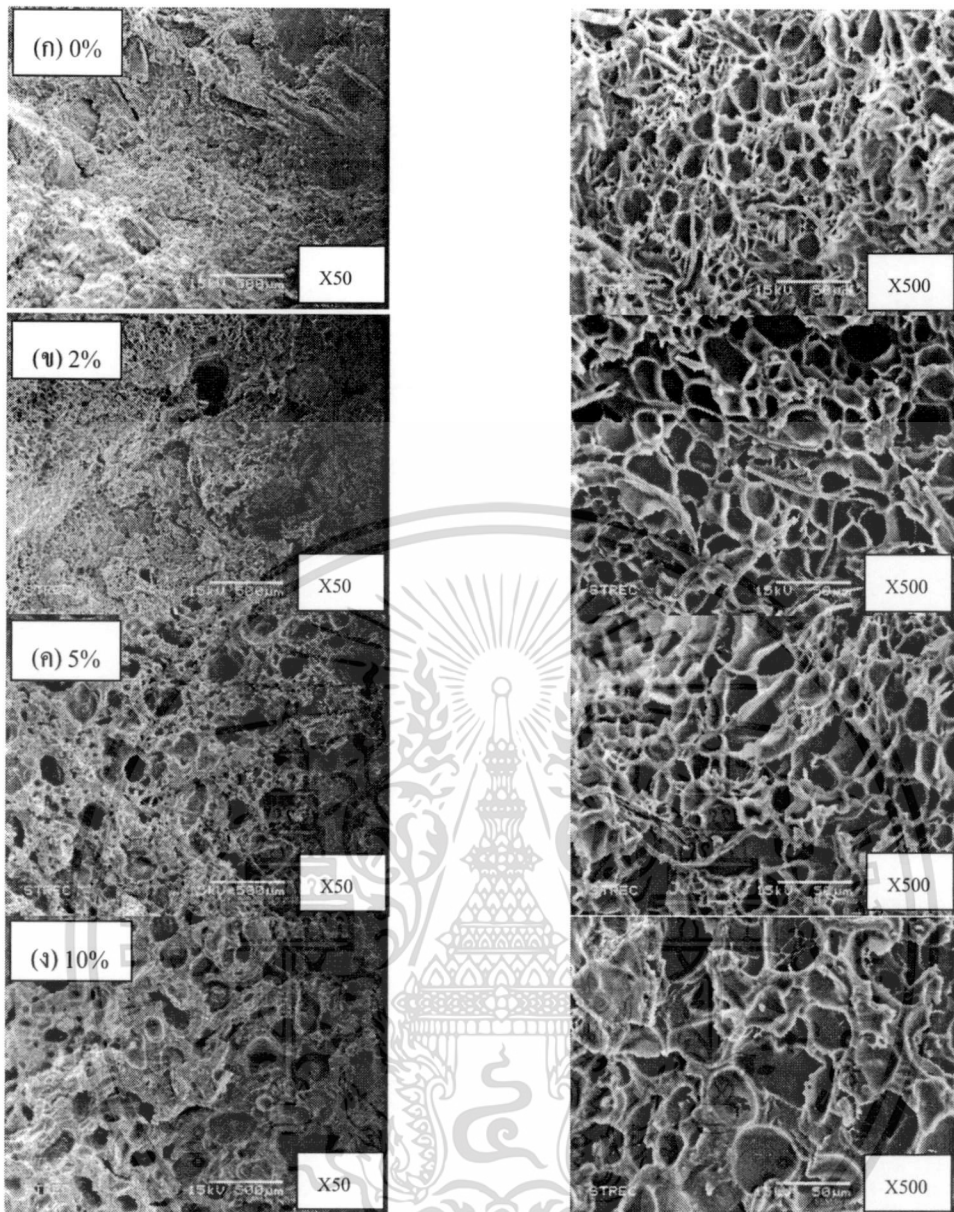
เมื่อพิจารณาสัดส่วนการขยายตัวของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใย สับปะรด 20 phr ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 15-35 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า พบว่าเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมที่ทำให้พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตนั้นมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [27] จึงส่งผลให้มีความสามารถในการขยายตัวในขั้นตอนการเกิดโฟมได้น้อยลง นั่นคือมีสัดส่วนการขยายตัวลดลง ประมาณ 4 เท่า จาก PP โฟมที่ไม่ผสมเส้นใยสับปะรด โดยสัดส่วนการขยายตัวที่ลดลงอาจเป็นผลจากโครงสร้างของโฟมที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการผสมเส้นใยสับปะรดทำให้โฟมไม่เกิดเซลล์ขนาดใหญ่แบบไบโมดอล ซึ่งสัดส่วนการขยายตัวของโฟมมีค่าลดลงตามขนาดเซลล์ที่ลดลง [28]



รูปที่ 4.3 ผลของการไม่เติม (PP) และเติม (PPF) เส้นใยสับปะรดที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของพอลิโพรพิลีน โฟม ที่ความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 165 °C และเวลา 120 min

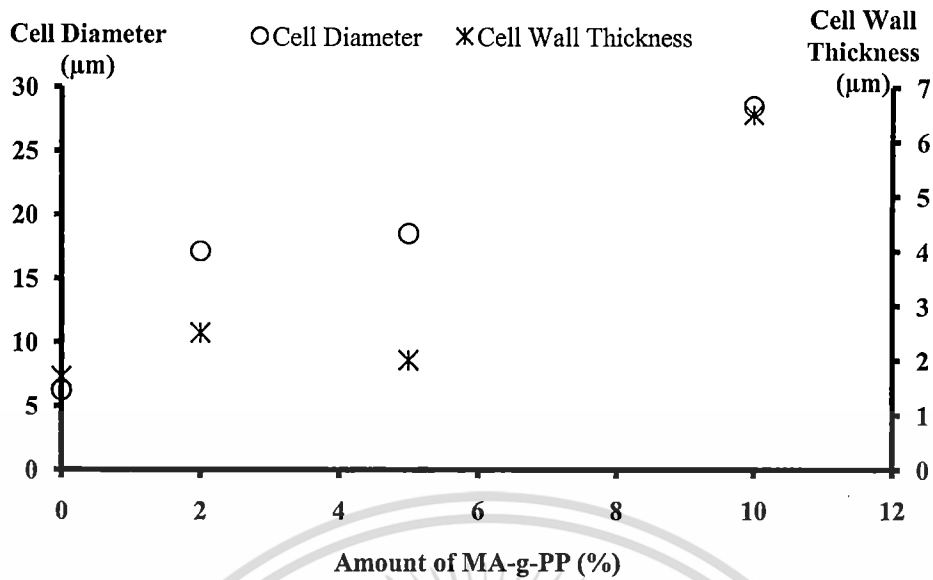
4.1.3 การศึกษาผลของปริมาณ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโพลิเมอริซึมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

ผลการศึกษาศักฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโพลิเมอริซึมเสริมแรงเส้นใยสับปะรดและมีปริมาณ MA-g-PP ผสมในสัดส่วน ร้อยละ 0 2.5 และ 10 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่าการผสม MA-g-PP ทำให้เกิดโครงสร้างแบบไบโมดอล อีกทั้งยังพบว่าขนาดเซลล์และความหนาของผนังเซลล์ (Cell Wall Thickness) เพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ MA-g-PP ดังรูปที่ 4.5 เนื่องจาก MA-g-PP มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเซลล์โกลสบนเส้นใยและเมทริกซ์แอนไฮโดรคาร์บอนแบบพันธะเคมีและ MA-g-PP มีแรงยึดเหนี่ยวกับพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์จึงทำให้ความหนืดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ MA-g-PP [29] จึงส่งผลต่อไปยังความสามารถในการขยายตัวของเซลล์ลดลง จึงมีโอกาที่เซลล์บางส่วนยุบตัวและคาร์บอนไดออกไซด์หนีอวกฤตในเซลล์ดังกล่าวแพร่ผ่านไปรวมตัวกับเซลล์ข้างเคียงซึ่งจะทำให้เกิดเป็นเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้เมื่อศึกษาศักฐานวิทยาที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณของ MA-g-PP และความหนาของผนังเซลล์มีขนาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MA-g-PP ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์หนีอวกฤตละลายใน MA-g-PP ได้น้อยกว่าพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ MA-g-PP ที่ผสมในพอลิโพรพิลีนส่งผลต่อการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์หนีอวกฤตในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์โดยรวมลดลง ทำให้ผนังเซลล์ซึ่งเป็นส่วนที่ละลายคาร์บอนไดออกไซด์หนีอวกฤตได้น้อยมีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 1.7 μm เป็น 6.5 μm (รูปที่ 4.5) ซึ่งส่งผลต่อโอกาสของการเกิดนิวเคลียสที่กระจายอยู่ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ลดลง ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.6 อีกทั้งการเพิ่มปริมาณของ MA-g-PP ทำให้ความหนืดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การขยายตัวของเซลล์เกิดได้ลดลง ซึ่งอาจทำให้เซลล์บางส่วนที่ความดันภายในไม่สามารถเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ได้ เซลล์เหล่านั้นเกิดการยุบตัวและคาร์บอนไดออกไซด์หนีอวกฤตแพร่ผ่านไปเซลล์ข้างเคียง ทำให้เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 6.2 μm เป็น 28.5 μm (รูปที่ 4.5) และความหนาแน่นเซลล์ลดลงจาก 9.5×10^9 cells/cm³ เป็น 4.1×10^7 cells/cm³ (รูปที่ 4.6)

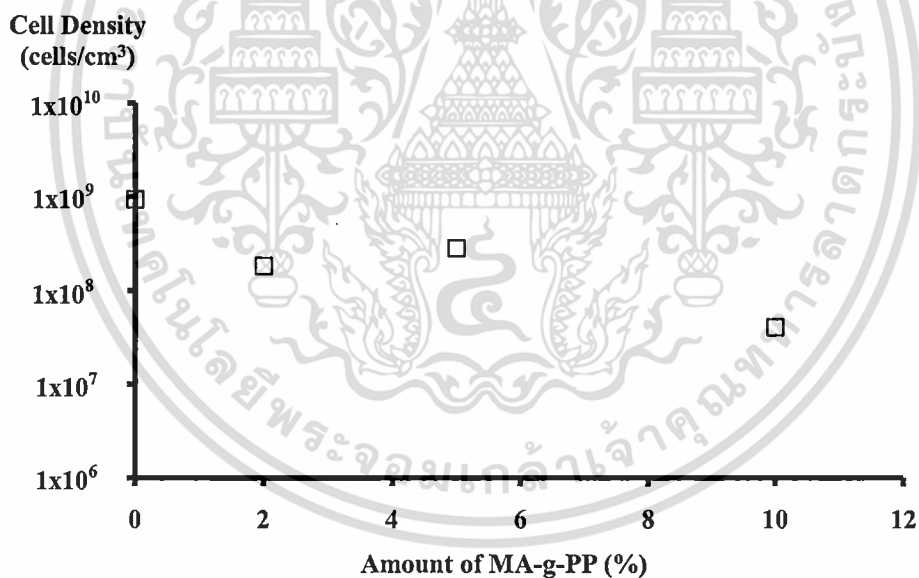


รูปที่ 4.4 ภาพไมโครกราฟของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่ผสม MA-g-PP ในปริมาณต่างๆ ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 165°C และเวลา 120 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

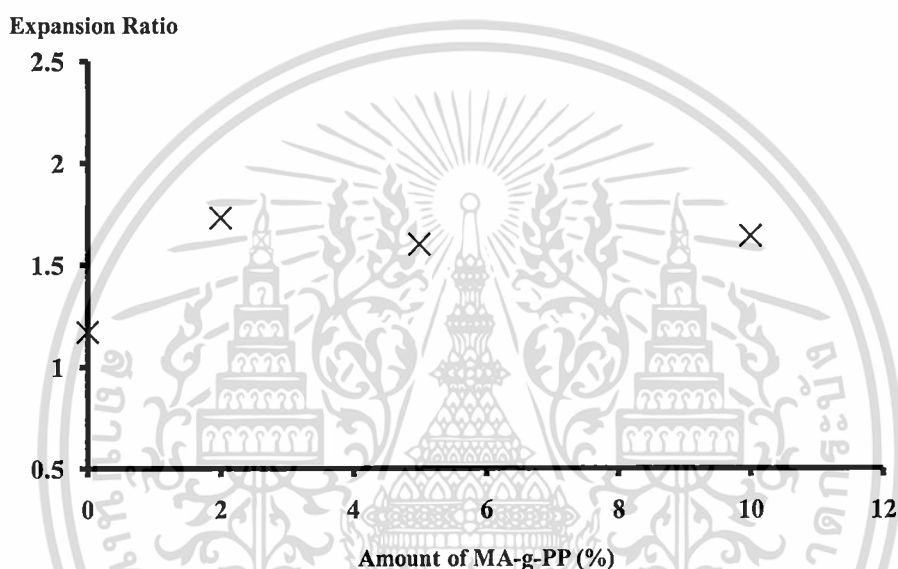


รูปที่ 4.5 ปริมาณของ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่สภาวะเกิดโฟมมีดังนี้ ความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 165°C และเวลา 120 min



รูปที่ 4.6 ปริมาณของ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นเซลล์ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 165°C และเวลา 120 min

ในขณะที่การผสม MA-g-PP ลงในพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยสับปะรด มีสัดส่วนการขยายตัวที่ใกล้เคียงกันประมาณ 1.6 เท่า ทำให้โฟมขยายตัวได้มากกว่าไม่เติม MA-g-PP ซึ่งมีสัดส่วนการขยายตัว 1.17 มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.4 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 การเพิ่มปริมาณของ MA-g-PP ทำให้ความหนืดของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้น [30] จนกระทั่งความดันของแก๊สที่ขยายตัวจากนิวเคลียสไม่สามารถเอาชนะแรงตึงผิวจากอิทธิพลของความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากการผสม MA-g-PP ทำให้แก๊สเกิดการยุบตัวและแก๊สแพร่ผ่านผนังเซลล์ไปยังแก๊สข้างเคียงมีมากขึ้น



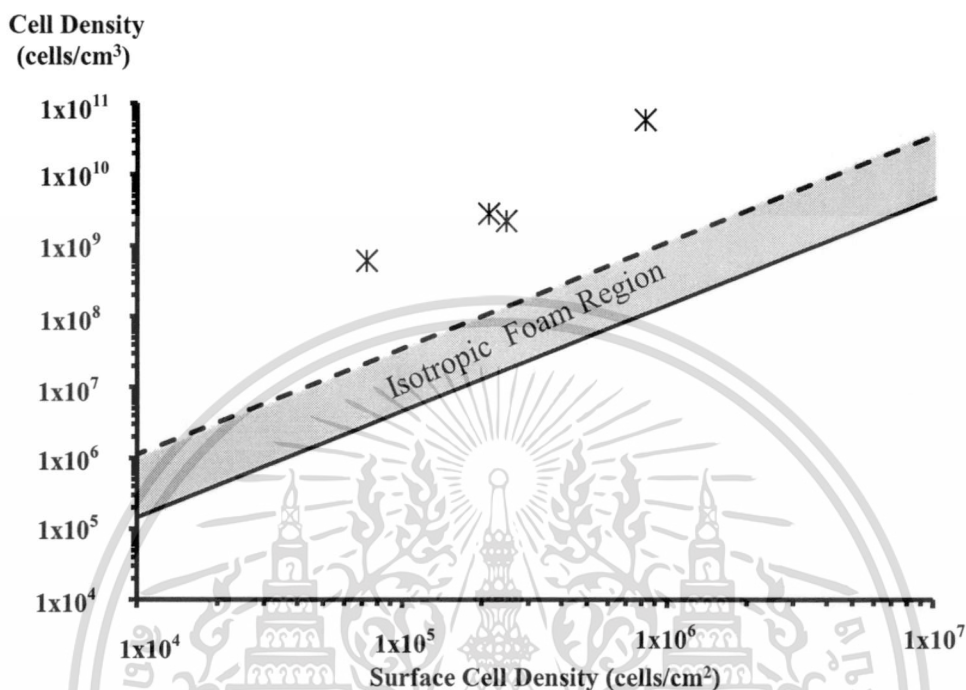
รูปที่ 4.7 ปริมาณ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่สภาวะเกิด โฟมคือ ความดันเกิด โฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิด โฟม 165°C และเวลา 120 min

4.1.4 การวิเคราะห์ความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

หากนำผลวิเคราะห์ที่ได้จากภาพไมโครกราฟหรือเรียกว่า ความหนาแน่นเซลล์บนพื้นผิว (Surface Cell Density) มาพลอตกราฟคู่กับความหนาแน่นเซลล์ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์และสัดส่วนการขยายตัว ดังแสดงในสมการที่ 2.25 พบว่า โฟมที่มีโครงสร้างหรือคุณสมบัติเช่นเดียวกับโฟมไอโซโทรปิกควรอยู่ในบริเวณสี่เทาของรูปที่ 4.8 หรือมีดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกอยู่ในช่วง 0 - 0.895 และเมื่อนำพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรดมาวิเคราะห์ความเป็นโฟมไอโซโทรปิกพบว่าดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกมีค่าอยู่ในช่วง 0.91 ถึง 2.74 นั่นคือพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต โฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรดที่เตรียมใน

เอกสารนี้มีความเกี่ยวข้องไปจากความเป็นโฟมไอโซโทรปิก ซึ่งอาจเป็นผลจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ หรือการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจเป็นผลจากการดำเนินการที่ไม่ทั่วถึงทุกจุด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นในแนวการเรียงตัวของเส้นใยสับปะรด ตลอดจนโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของ โฟมที่เปลี่ยนแปลงไปที่เกิดขึ้นจากการผสม MA-g-PP ด้วย



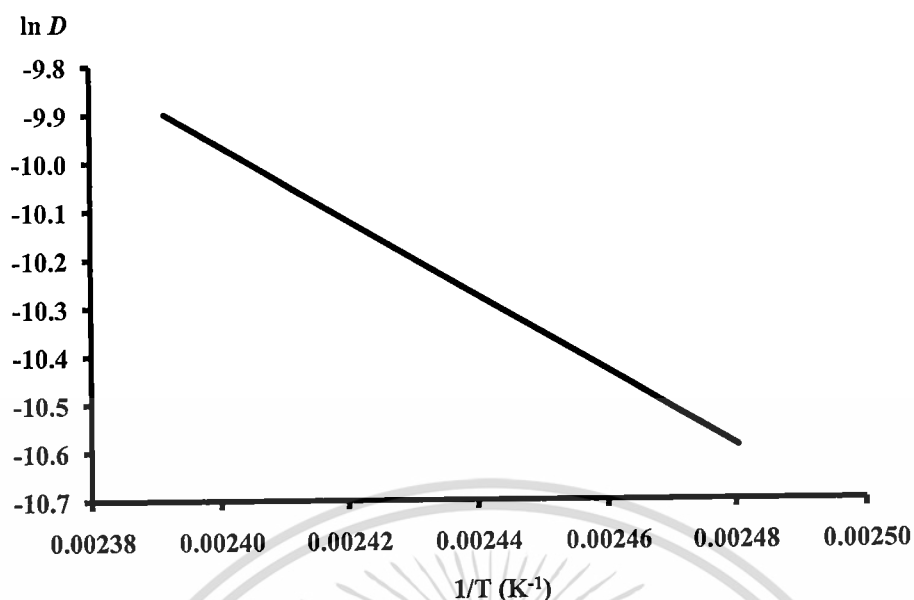
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเซลล์บนพื้นผิวและความหนาแน่นเซลล์ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.25 ของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

ตอนที่ 2

4.2 ปรากฏการณ์การส่งผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

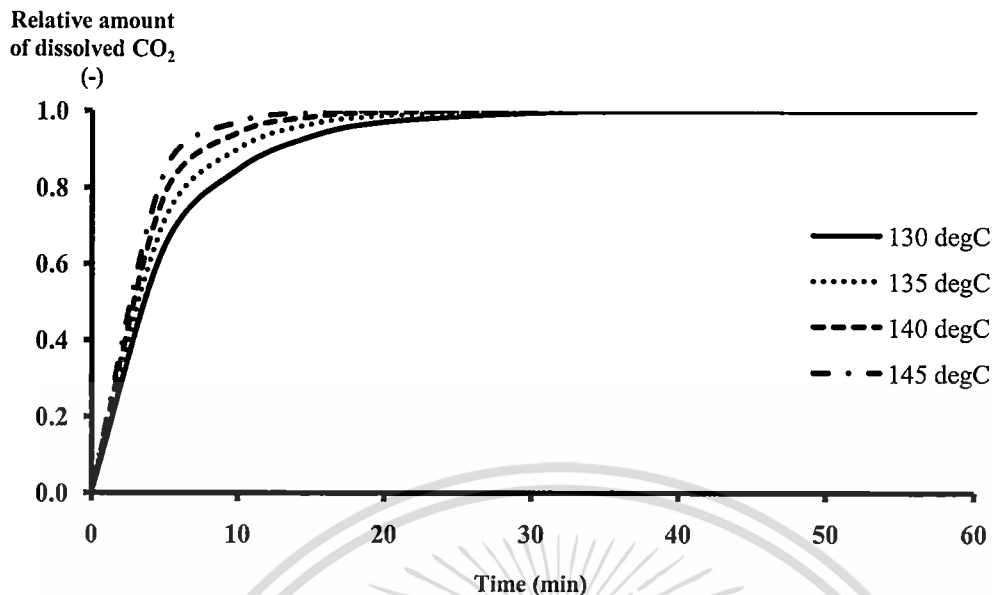
4.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

ในกระบวนการเกิดโฟมแบบกะนั้นเวลาเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการ จึงส่งผลให้ในเบื้องต้นนั้นมีการศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่แพร่เข้าไปในพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆกัน จากผลการคำนวณด้วยสมการที่ 2.3-2.5 พบว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่นั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln D$ และ $1/T$ เนื่องจากผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นทำให้เกิดได้รับพลังงานความร้อนและทำให้มีพลังงานจลน์มากขึ้นจึงส่งผลให้เกิดมีการเคลื่อนที่ได้เร็วมากขึ้น



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของ $\ln D$ และ $1/T$ ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

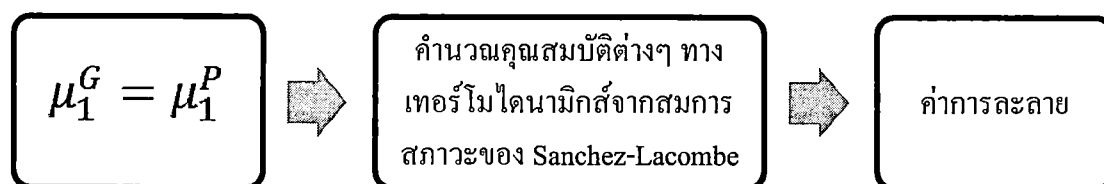
เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมาวิเคราะห์หาเวลาของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สามารถแพร่เข้าไปในพอลิโพรพิลีนจนถึงเวลาอิ่มตัวด้วยการคำนวณจากสมการที่ 2.6 ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ โดยที่แผ่นพอลิโพรพิลีนมีความหนา 3 mm และผลการคำนวณพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิเกิดโฟม 130°C ใช้เวลาในการแพร่จนเข้าสู่สภาวะสมดุลมากกว่า 60 min และเมื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 135 140 และ 145°C พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากโมเลกุลได้รับพลังงานที่สูงขึ้นจึงส่งผลต่อเนื่องมาที่เวลาของการแพร่จนเข้าสู่สภาวะสมดุลนั้นใช้เวลาน้อยลงประมาณ 50 40 และ 30 min ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สัดส่วนปริมาณการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

4.2.2 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

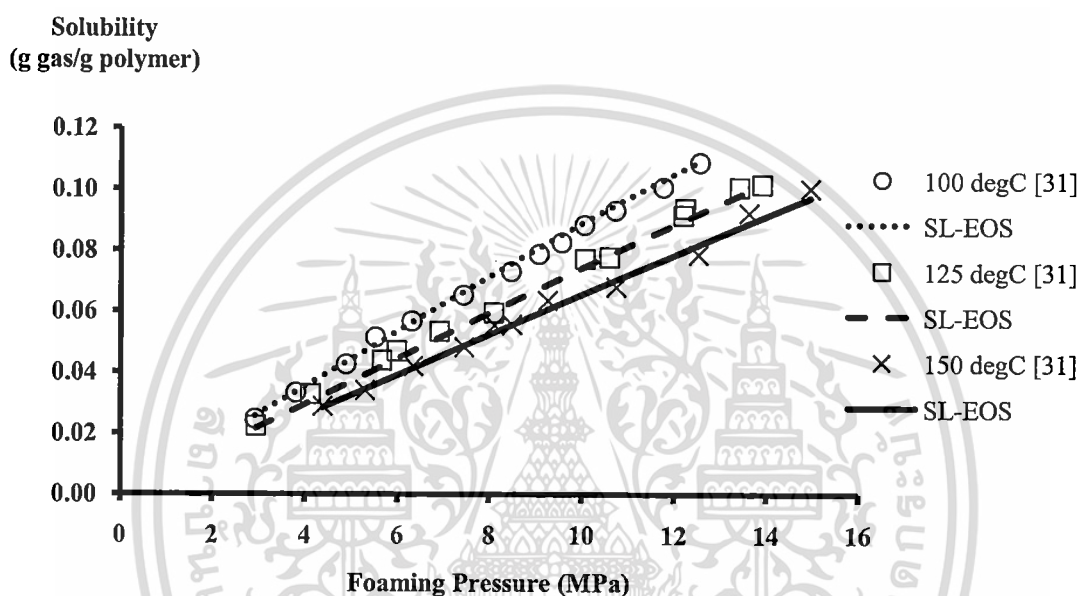
การคำนวณค่าการละลายสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลหรือการเท่ากันของศักย์เคมีของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในสองระบบคือ ระบบในวัฏภาคแก๊ส (G) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบเพียงชนิดเดียวคือคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และอีกระบบหนึ่งคือระบบในวัฏภาคของเหลวซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบสองชนิดคือคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้คุณสมบัติต่างๆ ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของทั้งสองระบบนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe (สมการ 2.16) ถัดมาจึงคำนวณสัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ($\bar{\phi}_1$) ที่ละลายในพอลิโพรพิลีนเพื่อคำนวณเป็นค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้แผนผังการคำนวณค่าการละลายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



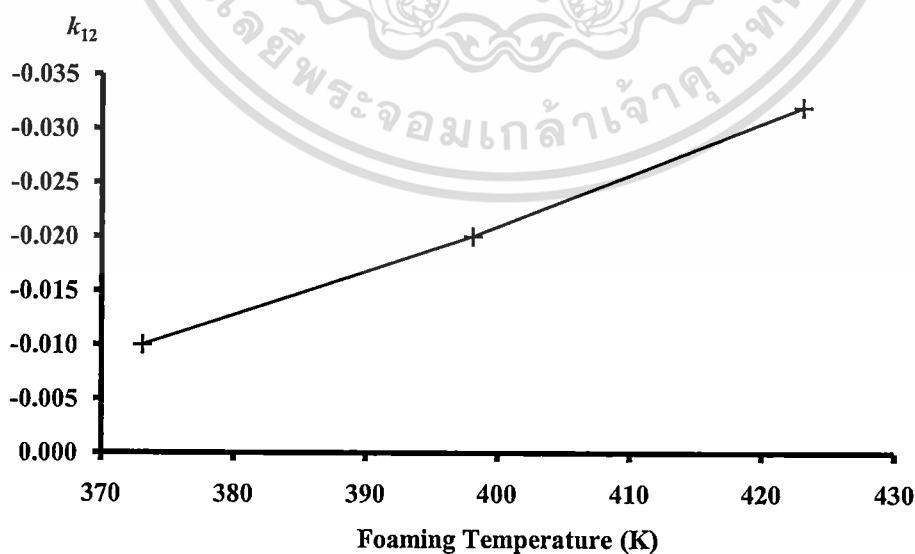
รูปที่ 4.11 แผนผังการคำนวณค่าการละลายด้วยสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก k_{12} เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิจึงได้นำค่าการละลายที่ได้จากการทดลองของ Da-chao Li และคณะ [31] มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์หรีเกรสชัน (Regression Analysis) โดยอ้างอิงแบบจำลองจากสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe ซึ่งผลการวิเคราะห์หรีเกรสชันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองและเมื่อทำการวิเคราะห์หรีเกรสชันระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่า k_{12} ลดลง



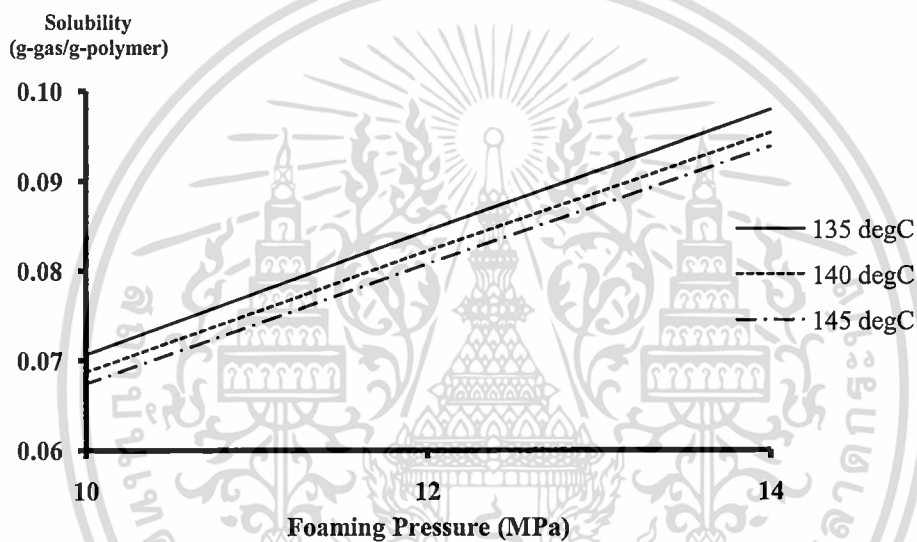
รูปที่ 4.12 ค่าการละลายที่ได้จากการทดลอง [31] และจากการวิเคราะห์หรีเกรสชันหาค่า k_{12}



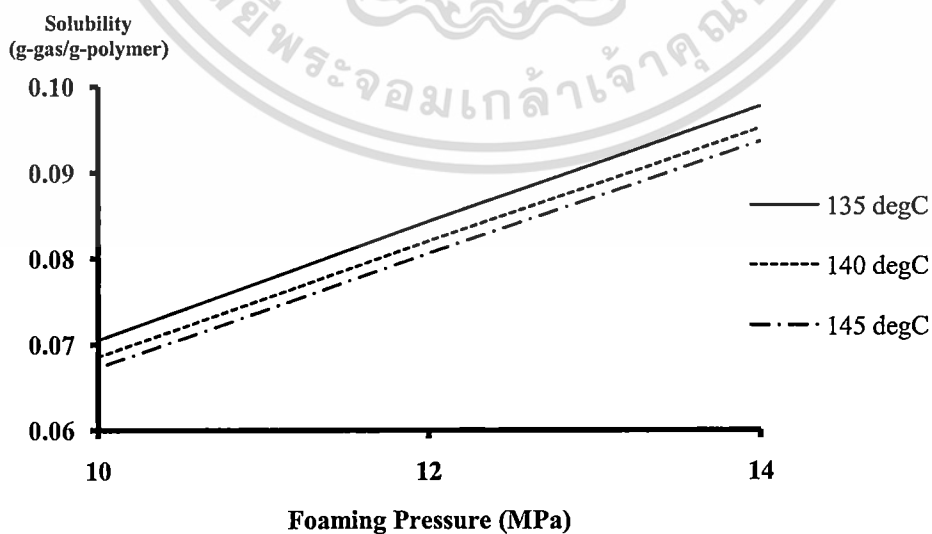
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์มาประยุกต์ใช้กับสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe โดยเลือกใช้คุณสมบัติของ PP-A และ PP-B และกำหนดสภาวะเกิดโฟมที่ใช้ในการทดลองคือ กำหนดให้ความดันเกิดโฟมคงที่ 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟมของ PP-A และ PP-B คือ 135 140 และ 145°C โดยผลการคำนวณค่าการละลายของ PP-A และ PP-B แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ จากแบบจำลองทั้งสองพบว่าเมื่อความดันเกิดโฟมเพิ่มขึ้นที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมและเวลาคงที่ ส่งผลให้ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของ Henry แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าเมื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มขึ้นที่สภาวะความดันเกิดโฟมและเวลาคงที่ส่งผลให้ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนลดลง



รูปที่ 4.14 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตใน PP-A

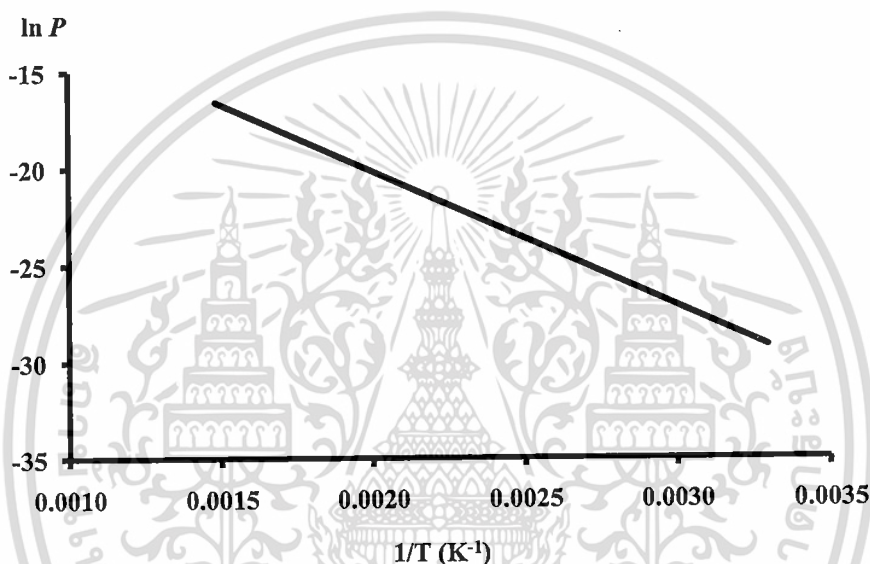


รูปที่ 4.15 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตใน PP-B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านเป็นตัวแปรที่เกิดจากผลคูณของสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลาย (จากสมการของ Henry) โดยผลการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมากขึ้นหรืออธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟมสูงขึ้นส่งผลให้ในขั้นตอนของการคงสภาพของฟองแก๊สนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความสามารถในการซึมผ่านออกจากพอลิโพรพิลีนโฟมได้ดีหรือเร็วกว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่ำ ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลในขั้นตอนการคงสภาพของฟองแก๊สน้อยลง



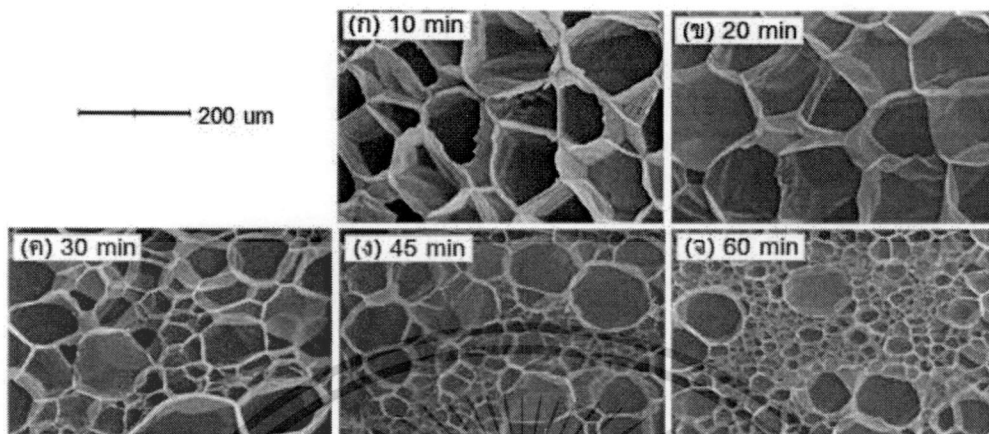
รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

4.3 ผลการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนโฟม

4.3.1 การศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

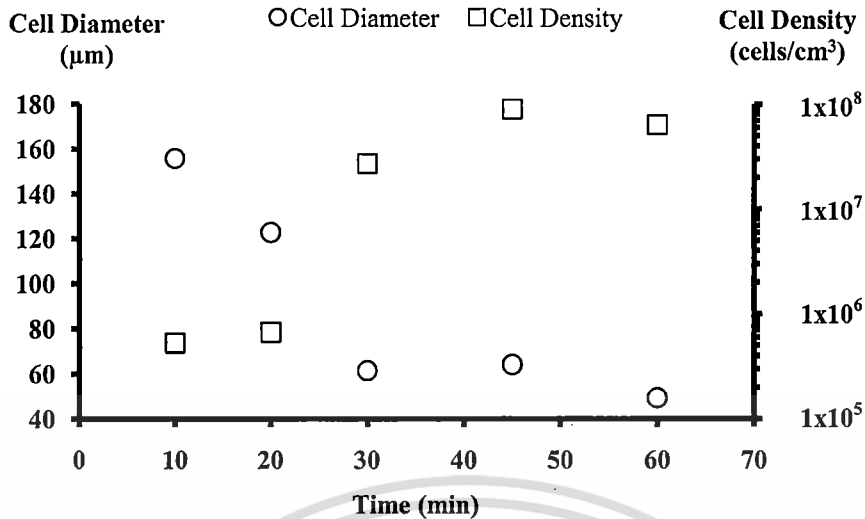
เวลาเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเกิดโฟมแบบกะและยังส่งผลต่อลักษณะวิทยาของพอลิโพรพิลีนโฟม จึงเป็นเหตุให้มีการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ โดยเวลาที่ใช้ในการศึกษาคือ 10 20 30 45 และ 60 นาที ซึ่งผลการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยภาพไมโครกราฟจากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลให้ PP-A โฟมมีขนาดเซลล์เล็กลง และจะสังเกตเห็นได้ว่าที่เวลา 30 45 และ 60 min ดังรูปที่ 4.17 (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ โฟมที่ได้มีลักษณะโครงสร้างแบบไบโมดอล ทั้งนี้อาจเกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายเข้าไปในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์แล้วทำให้โครงสร้างของพอลิโพรพิลีนเกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดการสั่นจนทำให้มีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่กลายเป็นโครงสร้างแบบผลึก

(Crystalline) [9,16] ซึ่งโครงสร้างแบบผลึกนี้มีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) จึงทำให้ขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความแตกต่างซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจน



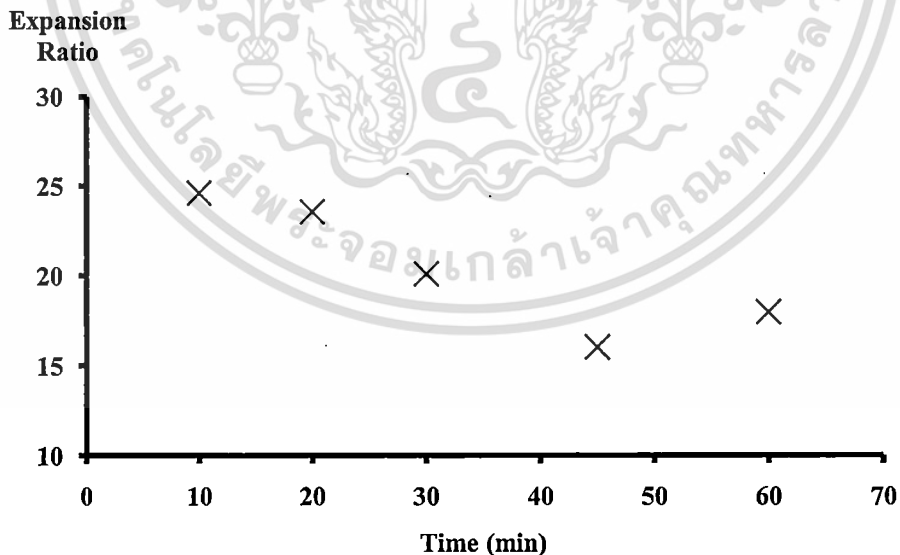
รูปที่ 4.17 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม ที่เวลาต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

เมื่อนำภาพไมโครกราฟมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image-J พบว่า ขนาดเซลล์มีแนวโน้มลดลงจาก 155.8 μm เป็น 49.3 μm ตามเวลาเพิ่มขึ้น แต่ในทำนองกลับกันพบว่าความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งเกิดจากการที่ในช่วงเวลา 10-30 min พอลิโพรพิลีนยังไม่อึดตัวจากการละลายของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต แต่เมื่อเวลานานขึ้นจึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีเวลาเพียงพอที่จะสามารถแพร่และละลายเข้ามาในพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้นและเริ่มอึดตัวในช่วงเวลาประมาณ 45 min เป็นต้นไป เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตละลายในพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้นจึงส่งผลให้เซลล์มีพื้นที่ในการเกิดน้อยลงในขั้นตอนการเกิดเซลล์ จึงส่งผลให้เซลล์มีขนาดเล็กแต่ความหนาแน่นเซลล์มากขึ้นโดยความหนาแน่นเซลล์ที่ได้นี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาเช่นเดียวกับแบบจำลองปริมาณการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายในพอลิโพรพิลีนที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C ดังรูป 4.10



รูปที่ 4.18 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A โฟม ที่สภาวะความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

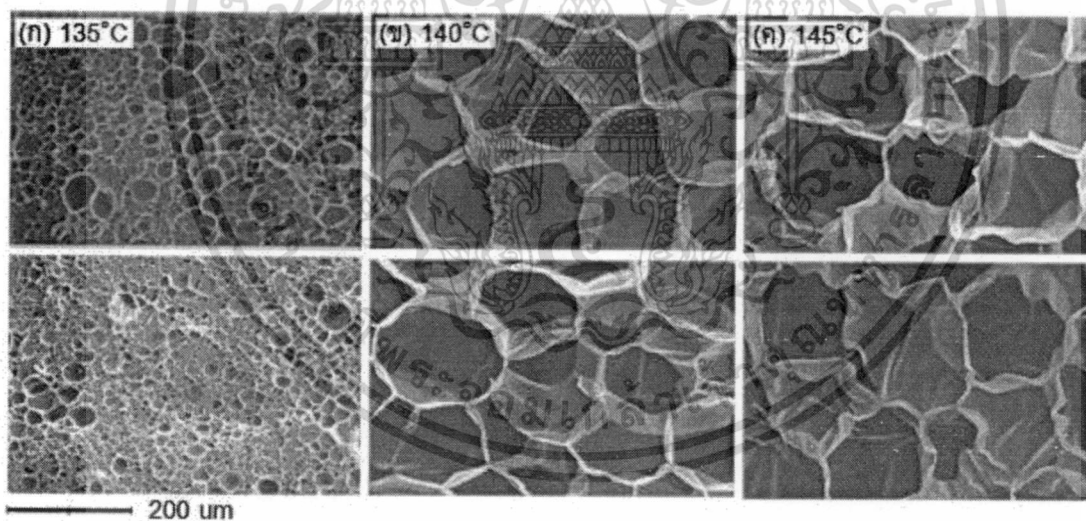
จากผลของขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวพบว่า ช่วงแรกคือ 10-30 min โฟมที่ได้มีความสามารถในการขยายตัวค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 20-25 เท่า แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 40-60 min กลับส่งผลให้มีสัดส่วนการขยายตัวลดลง ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างที่เป็นผลึกจึงทำให้มีความแข็งแรงมากและทำส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวที่น้อยลง



รูปที่ 4.19 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A โฟม ที่ความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

4.3.2 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

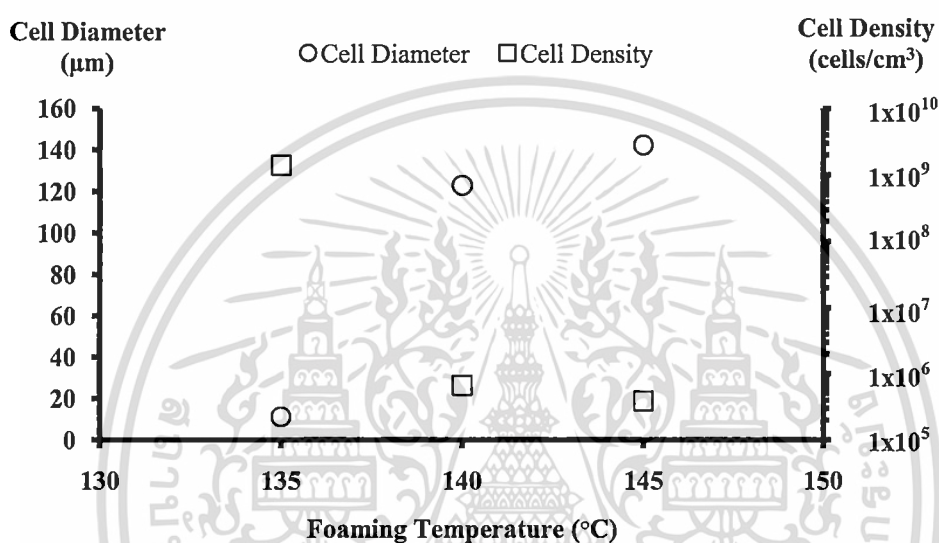
จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโฟมคือ 10 20 และ 30 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่ส่งผลให้โฟมมีสัดส่วนการขยายตัวที่ค่อนข้างสูงคืออยู่ในช่วง 20-25 เท่า ถัดมาจึงทำการศึกษาช่วงของอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสม คือ 135 140 และ 145°C ซึ่งผลการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟ ดังรูปที่ 4.20 ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบว่าเมื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของการหลอมลดลงหรืออีกนัยหนึ่งคือพอลิโพรพิลีนมีความนิ่มมากขึ้นจึงทำให้ในขั้นตอนของการเติบโตของเซลล์ เซลล์มีความสามารถในการขยายตัวได้ดีและทำให้เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น และจะสามารถสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟม 145°C เซลล์ที่เกิดขึ้นมีรูปทรงที่ไม่เป็นระเบียบมากกว่าอุณหภูมิเกิดโฟม 135 และ 140°C ดังรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิเกิดโฟม 145°C เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมของ PP-A ถึง 6°C จึงส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงของการหลอมน้อยเกินไป ทำให้ในขั้นตอนการคงสภาพเซลล์นั้นเซลล์มีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่จะคงสภาพเซลล์ได้ดีเท่าที่ควร อีกทั้งยังส่งผลให้ผนังเซลล์มีการหดตัวมากกว่าอุณหภูมิเกิดโฟมที่ต่ำกว่า 145°C อีกด้วย



รูปที่ 4.20 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่สภาวะคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

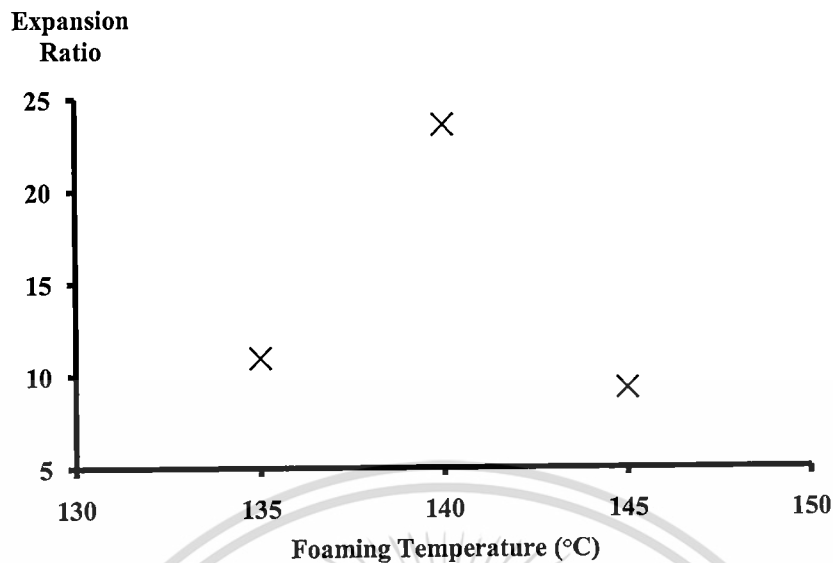
เมื่อนำภาพไมโครกราฟที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image-J พบว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟมสูงขึ้นส่งผลให้ขนาดเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 11.2 μm เป็น 142.3 μm ดังรูปที่ 4.21 และผลของขนาดเซลล์ที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ส่งผลให้ความหนาแน่นเซลล์หรือปริมาณเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโฟมลดลงซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนคือมีการลดลงจาก 1.4×10^9 cells/cm³ ลงมาที่ 3.9×10^5 cells/cm³ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่สามารถละลายในพอลิโพรพิลีนได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นดังแบบจำลองค่าการละลายรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิด โฟม 12 MPa และเวลา 20 min

ถัดมาวิเคราะห์สัดส่วนการขยายตัวของพอลิโพรพิลีน โฟม ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่อสัดส่วนการขยายตัวได้ดังรูปที่ 4.22 โดยสามารถอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟม 135 °C นั้นมีสัดส่วนการขยายตัวต่ำ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมของ PP-A จึงทำให้พอลิโพรพิลีนมีความนิ่มไม่เหมาะสม จึงมีการขยายตัวได้ค่อนข้างต่ำ เมื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มขึ้นเป็น 140 °C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมพบว่า มีสัดส่วนการขยายตัวที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้สาเหตุอันเนื่องมาจากการที่พอลิโพรพิลีนมีความนิ่ม ความหนาแน่นและขนาดเซลล์ที่เหมาะสมจึงทำให้มีการขยายตัวที่ค่อนข้างสูง แต่เมื่ออุณหภูมิเกิด โฟมสูงถึง 145 °C กลับพบว่า โฟมที่ได้นั้นมีสัดส่วนการขยายตัวลดลง เนื่องจากอุณหภูมิเกิด โฟมที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมทำให้พอลิโพรพิลีนมีความนิ่มมากเกินไป จึงส่งผลให้คาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้เร็วเกินไปและพอลิโพรพิลีน ไม่สามารถคงสภาพของเซลล์ได้จึงส่งผลให้มีสัดส่วนการขยายตัวลดลง

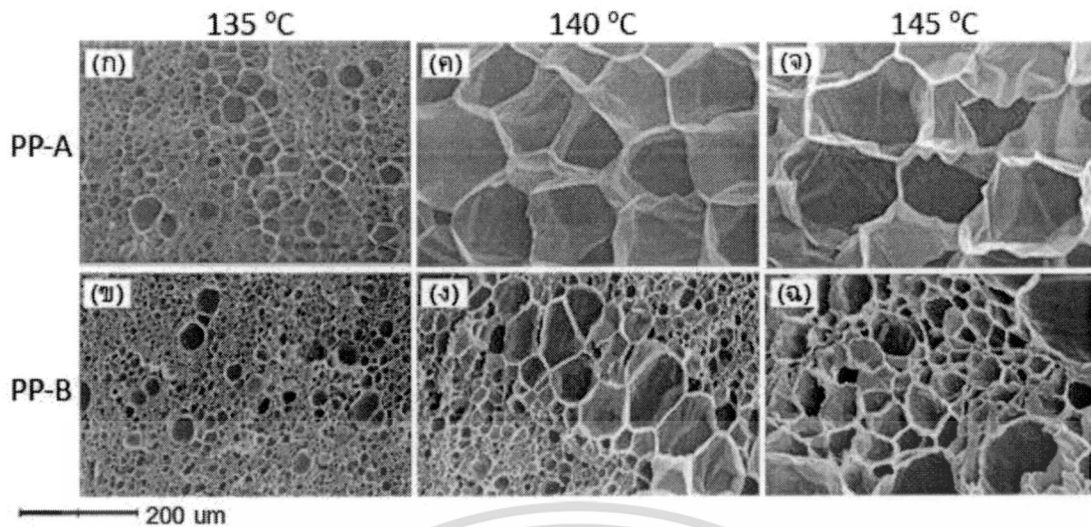
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A โฟม ที่สภาวะความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

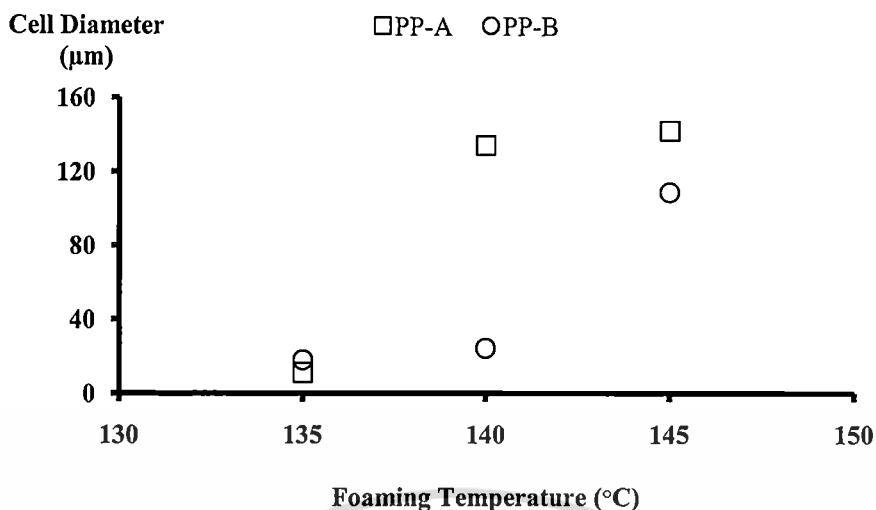
4.3.3 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อลักษณะของ PP-A และ PP-B โฟม

เมื่อนำภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 135°C มาทำการวิเคราะห์พบว่า ทั้ง PP-A และ PP-B โฟม มีขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นเล็กกว่า 50 μm ดังรูป 4.23 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 140°C พบว่า PP-A โฟม มีขนาดเซลล์ที่ใหญ่และเซลล์มีรูปทรงที่เป็นระเบียบ ดังรูปที่ 4.23 (ค) แต่สำหรับในกรณีของ PP-B โฟม นั้นเกิดโฟมที่มีลักษณะแบบไบโมดอล ดังรูปที่ 4.23 (ง) และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมสูงถึง 145°C พบว่า PP-A และ PP-B โฟม มีขนาดเซลล์ใหญ่และเซลล์ที่เกิดขึ้นมีรูปทรงที่เริ่มไม่เป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิเกิดโฟมนี้นี้สูงกว่าอุณหภูมิหลอมตัวของพอลิโพรพิลีนทั้งสองชนิด จึงทำให้เซลล์ที่ได้นั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.23 (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ

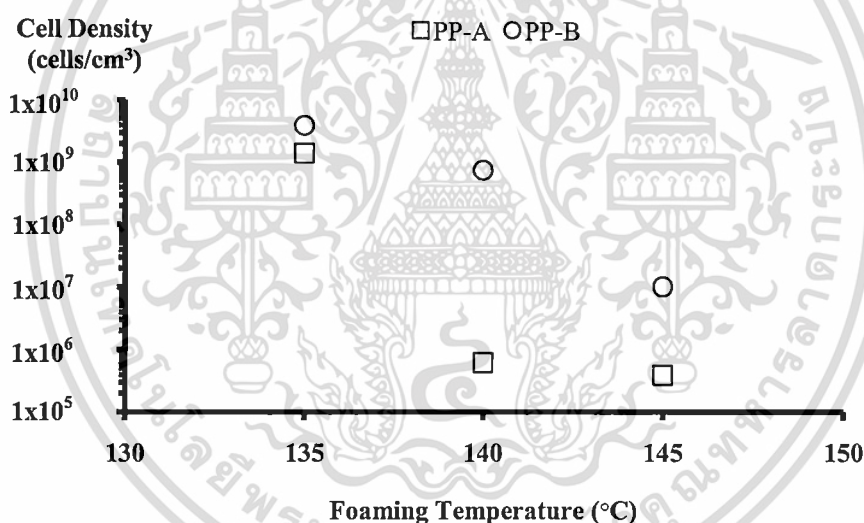


รูปที่ 4.23 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ และมีสถานะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

เมื่อนำภาพไมโครกราฟมาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่อขนาดเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม พบว่าพอลิโพรพิลีน โฟมทั้งสองชนิดมีแนวโน้มของขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของ PP-B โฟม นั้นพบว่ามีความสามารถในการรักษาและคงขนาดเซลล์ไว้ที่ระดับน้อยกว่า $40 \mu\text{m}$ ได้ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิเกิดโฟมจะเพิ่มสูงถึง 140°C ก็ตาม ดังรูปที่ 4.24 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากโครงสร้างหรือชนิดของเรซินที่นำมาผสม (Blend) กับพอลิโพรพิลีน จึงส่งผลให้มีอุณหภูมิหลอมสองตำแหน่ง ทำให้โครงสร้างบางส่วนมีความแข็งแรงของการหลอมเพียงพอที่จะรักษาและคงขนาดเซลล์ไว้ได้ระดับหนึ่ง และเมื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มขึ้นเป็น 145°C พบว่า PP-A และ PP-B โฟม ให้ขนาดเซลล์ค่อนข้างใหญ่คือมีขนาดมากกว่า $120 \mu\text{m}$ แต่ในทางกลับกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้ความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.25 ทั้งนี้สังเกตได้ว่า PP-B โฟม ยังคงรักษาความหนาแน่นเซลล์ไว้ในช่วง 10^9 ถึง 10^{10} cells/cm³ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มขึ้นจาก 135°C เป็น 140°C ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเซลล์ของ PP-B โฟม มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ค่อนข้างแคบจึงส่งผลต่อความหนาแน่นเซลล์เปลี่ยนแปลงน้อยมากเช่นกัน



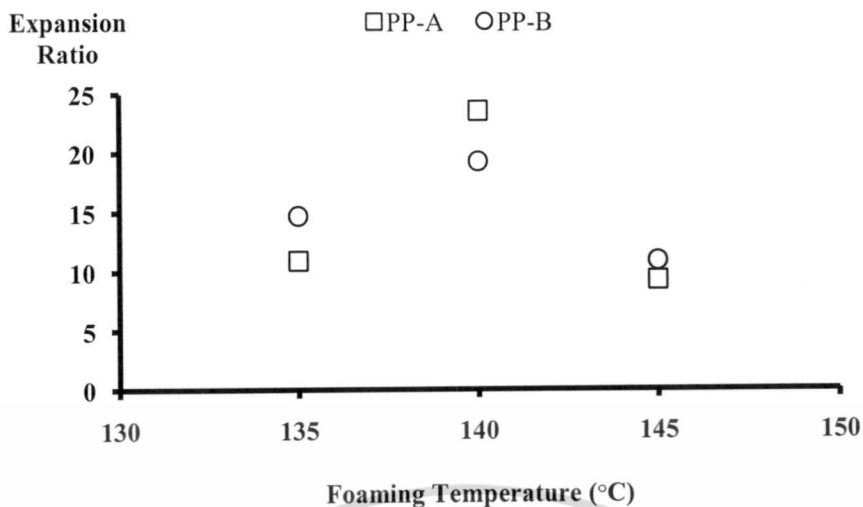
รูปที่ 4.24 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อขนาดเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min



รูปที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

เมื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากขนาดและความหนาแน่นเซลล์ที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A และ PP-B โฟม พบว่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนการขยายตัวของทั้ง PP-A และ PP-B โฟม สามารถขยายตัวได้มากขึ้นและขยายตัวสูงสุด 23.5 และ 19.3 เท่า ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 140°C แต่หลังจากนั้นความสามารถในการขยายตัวจะลดลง ดังรูปที่ 4.26 เนื่องจากที่อุณหภูมิเกิดโฟม 145°C นั้นสูงกว่าอุณหภูมิหลอมของพอลิโพรพิลีนทั้งสองชนิดจึงทำให้ความแข็งแรงของการหลอมนั้นไม่เพียงพอหรือมีความนิ่มมากเกินไปต่อการขยายตัวของเซลล์ที่เกิดขึ้น

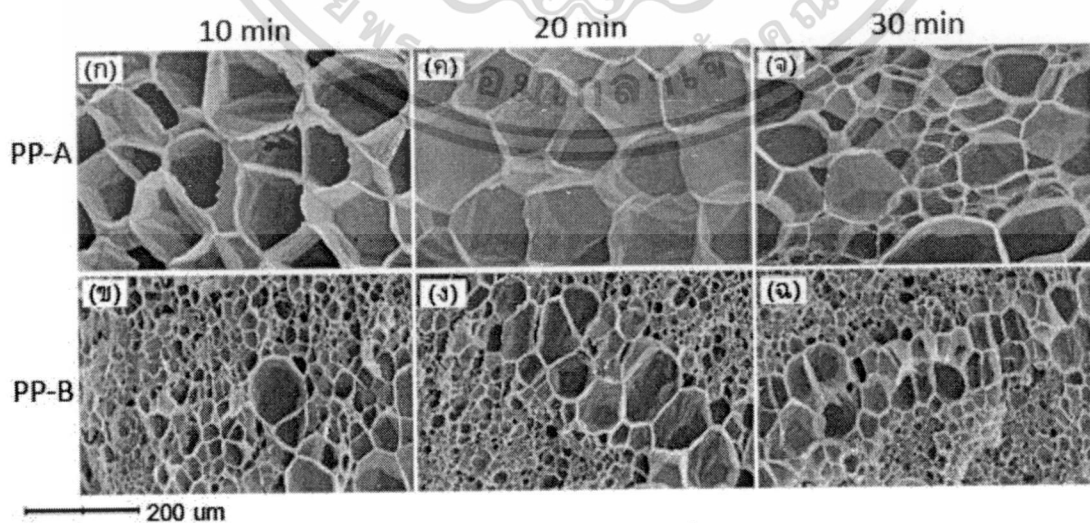
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

4.3.4 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โฟม

หากทำการวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่เวลาต่างๆ กันพบว่า โฟมทั้งสองชนิดนี้ให้ขนาดเซลล์ที่เล็กลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.27 ทั้งนี้หากสังเกตจากภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม ที่เวลา 20 และ 30 min หรือรูปที่ 4.27 (ค) และ (จ) ตามลำดับพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโฟมที่สังเกตได้อย่างชัดเจนคือเซลล์เปลี่ยนแปลงจากขนาดใหญ่ไปเป็นเซลล์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลของการเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนจนมีโครงสร้างเป็นผลึก จึงทำให้สังเกตเห็นเซลล์ที่มีขนาดเล็กกว่าปกติ แต่ในกรณีของ PP-B โฟม นั้นสังเกตได้ไม่ชัดเจน



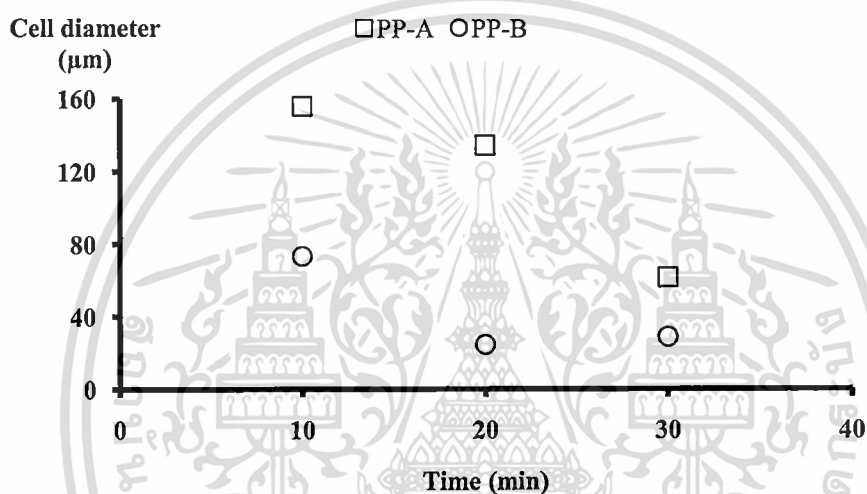
รูปที่ 4.27 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่เวลาต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟมคือ

ความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

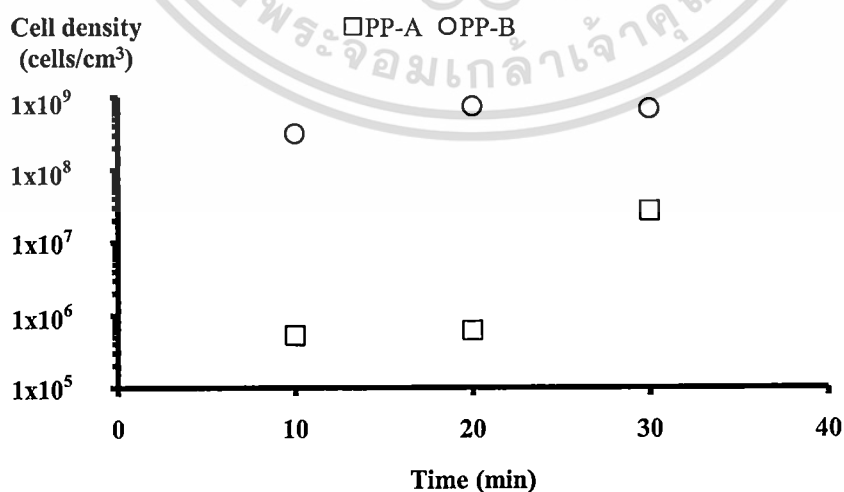
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image-J แสดงได้ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 จากรูปที่ 4.28 พบว่าขนาดเซลล์ของทั้ง PP-A และ PP-B โฟม มีขนาดเล็กลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีเวลามากเพียงพอที่จะแพร่เข้ามาในพอลิโพรพิลีน จึงส่งผลให้ในขั้นตอนของการเกิดเซลล์นั้นมีนิวเคลียสเกิดขึ้นจำนวนมากและเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกัน จึงทำให้เซลล์มีพื้นที่ในการขยายตัวน้อยส่งผลให้เซลล์ที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดเล็กและจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถแพร่และละลายเข้ามายังพอลิโพรพิลีน ได้มากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.10 จึงส่งผลให้ปริมาณของเซลล์ที่เกิดขึ้นหรือความหนาแน่นเซลล์ของทั้ง PP-A และ PP-B โฟม เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.29

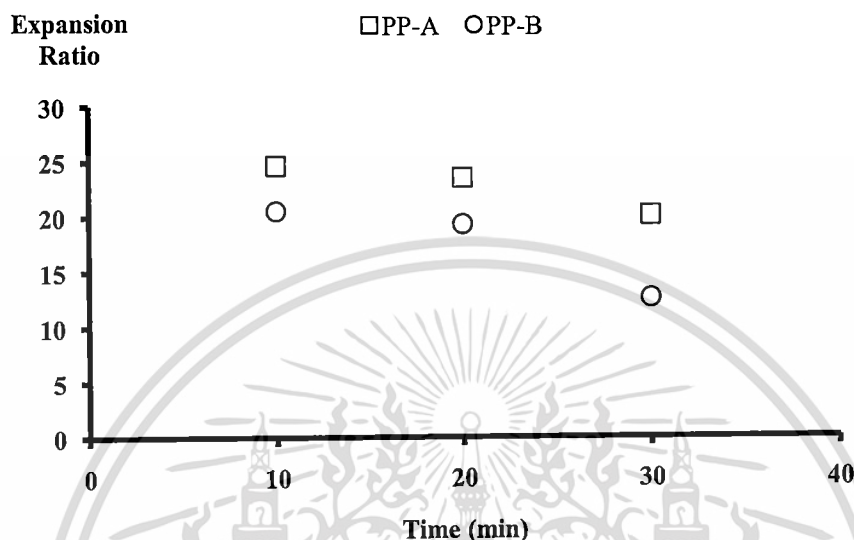


รูปที่ 4.28 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อขนาดเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C



รูปที่ 4.29 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม ที่สภาวะเอกสารนี้เป็เกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C ดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณาความสามารถในการขยายตัวของโพลีเมอร์ในช่วงเวลาที่เหมาะสมที่ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนโพลีทั้งสองชนิดมีส่วนการขยายตัวสูงหรือมีส่วนการขยายตัวมากกว่า 20 เท่า คือเวลาอยู่ในช่วง 10-20 min ดังรูปที่ 4.30

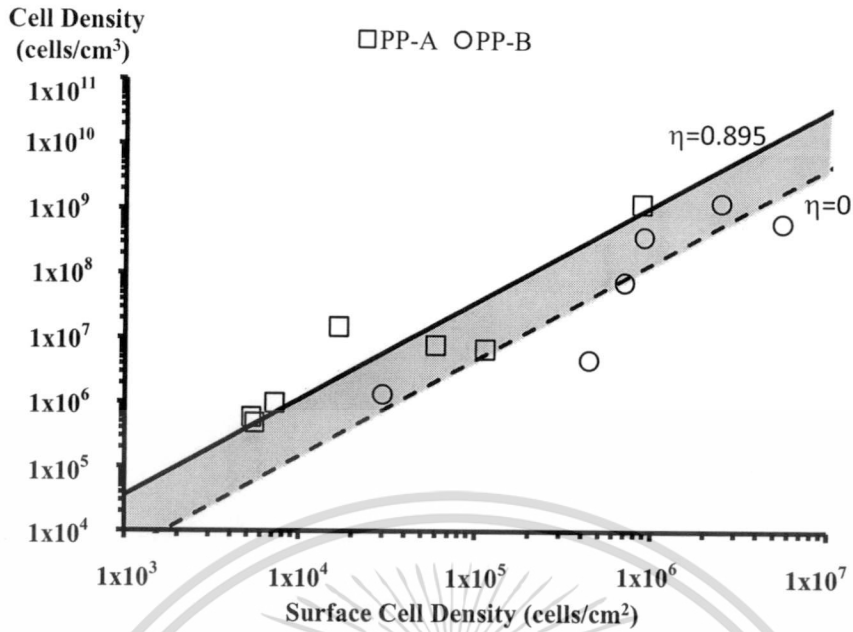


รูปที่ 4.30 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP-A และ PP-B โพลี ที่สภาวะเกิดโพลีคือความดันเกิดโพลี 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโพลี 140°C

4.3.5 การวิเคราะห์ความเป็นโพลีไอโซโทรปิกของ PP-A และ PP-B โพลี

จากการศึกษาของ Piyapong Buahom และ Surat Areerat [22] พบว่าโพลีที่มีโครงสร้างหรือคุณสมบัติใกล้เคียงกับโพลีไอโซโทรปิกควรมีค่าของดัชนีความเป็นโพลีไอโซโทรปิกอยู่ในช่วง 0-0.895 หรืออยู่ในบริเวณสีเทาของรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเซลล์บนพื้นผิว (Surface Cell Density) และความหนาแน่นเซลล์ที่ได้จากการคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเซลล์และสัดส่วนการขยายตัวหรือสมการที่ 2.25 เมื่อนำผลการวิเคราะห์ PP-A และ PP-B โพลี ที่สภาวะของการเกิดโพลีต่างๆ มาพลอตกราฟลงในรูปที่ 4.31 พบว่า PP-B โพลี มีคุณสมบัติของความเป็นโพลีไอโซโทรปิกมากกว่า PP-A โพลี ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ PP-B โพลี มีขนาดเซลล์ที่เล็กจึง ทำให้ขนาดเซลล์ที่ปรากฏบนภาพไมโครกราฟมีความใกล้เคียงกับขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าในกรณีของโพลีที่มีขนาดเซลล์ใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามโพลีที่สภาวะอื่นๆ ที่ไม่ใช่โพลีไอโซโทรปิกนั้นก็ยังคงมีความใกล้เคียงกับโพลีไอโซโทรปิกเช่นกัน ทั้งนี้ผลการคำนวณพบว่าดัชนีความเป็นโพลีไอโซโทรปิกของ PP-A โพลี มีค่าอยู่ในช่วง 0.085-1.674 และ PP-B โพลี อยู่ในช่วง -0.962-0.481

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเซลล์บนพื้นผิวและความหนาแน่นเซลล์ของ PP-A และ PP-B โฟม

ตอนที่ 3

4.4 ผลการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนโฟมบีดส์

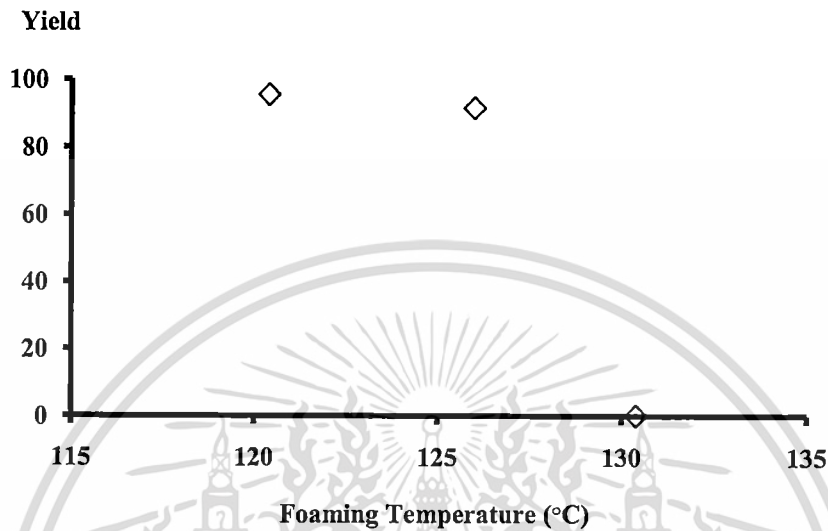
การศึกษาการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนโฟมพบว่า PP-A และ PP-B โฟม มีสัดส่วนการขยายตัวมากกว่า 15 เท่า ในกรณีของ PP-A มีสภาวะที่เหมาะสมคืออุณหภูมิเกิดโฟม 140°C เวลา 10-20 min และในกรณีของ PP-B พบว่ามีสภาวะที่เหมาะสมคืออุณหภูมิเกิดโฟม 135-140°C เวลา 10-20 min จะสังเกตได้ว่าสำหรับ PP-B นั้นมีช่วงของอุณหภูมิเกิดโฟมกว้างกว่ากรณีของ PP-A และ PP-B โฟม นั้นมีความใกล้เคียงกับความเป็น โฟม ไอโซโทรปิกมากกว่า PP-A โฟม ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการเลือก PP-B ในการนำมาศึกษาการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนโฟมบีดส์

4.4.1 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสมต่อการเกิดโฟมของ PP-B โฟมบีดส์

เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเกิดโฟม จึงได้มีการศึกษาอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเกิดโฟมของ PP-B โฟมบีดส์ ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของช่วงอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ (Percentage of Yield) ของ PP-B โฟมบีดส์ โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิเกิดโฟม 120 125 และ 130°C ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟม 120°C มีร้อยละผลได้เท่ากับร้อยละ 95.7 แต่เมื่ออุณหภูมิเกิดโฟมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 125 และ 130°C กลับส่งผลให้ร้อยละผลได้ลดลงเป็นร้อยละ 91.9 และ 0 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.32 ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากระบบให้ความร้อนจากด้านนอกผ่านผนังที่มีความหนาเป็นพิเศษและตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) อยู่ห่างจากตำแหน่งของระบบให้ความร้อนพอสมควร จึงทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลและผนังของเครื่องปฏิกรณ์แตกต่างกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์สูงมากเกินไปจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของการหลอมของ PP-B ลดลงและส่งผลให้เกิดการติดกันของ PP-B ซึ่งทำให้ให้ร้อยละผลได้ลดลงตามอุณหภูมิเกิด โฟมที่เพิ่มสูงขึ้น



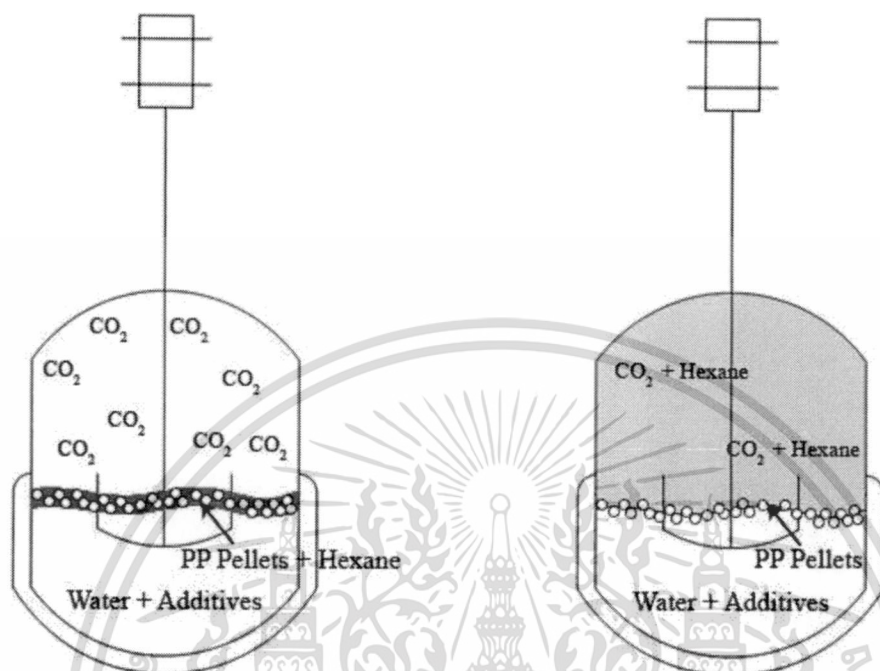
รูปที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของ PP-B โฟมบีคส์ ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 10 ± 2 MPa และเวลา 120 min

4.4.2 การศึกษาการปั่นกววนของกระบวนการผลิต PP-B โฟมบีคส์

ในเครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการผลิต PP-B โฟมบีคส์ประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ คือ น้ำ สารเติมแต่ง เม็ด PP-B เสกเซน และคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วย 4 วัฏภาคคือ วัฏภาคของสารแขวนลอยของน้ำและสารเติมแต่ง วัฏภาคของแข็งของเม็ด PP-B วัฏภาคของเหลวของเสกเซน และวัฏภาคของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ หรือสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.33 (ก) จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าเม็ด PP-B จะลอยรวมอยู่ชั้นเดียวกับเสกเซน เนื่องจากคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำและความไม่มีขั้วของพอลิโพรพิลีน เมื่อระบบเกิดการปั่นกววนจะพบว่าชั้นของเสกเซนและเม็ด PP-B จะถูกปั่นกววนไปด้วยกันในบริเวณระหว่างวัฏภาคของสารแขวนลอยของน้ำและสารเติมแต่ง และวัฏภาคของแก๊สของคาร์บอน ไดออกไซด์ จากผลที่เกิดขึ้นนี้จึงส่งผลให้การแพร่ของเสกเซนมายังเม็ด PP-B ซึ่งเป็นการแพร่จากวัฏภาคของเหลวไปยังของแข็งมีอัตราที่ช้ากว่าในกรณีของการแพร่จากวัฏภาคแก๊สไปยังของแข็ง และจากการศึกษาของ Ying-Hsiao Li และคณะ [25] พบว่าของผสมระหว่างคาร์บอน ไดออกไซด์และเสกเซนที่อุณหภูมิเกิดโฟม 120°C มีความดันวิกฤตเทียบเท่ากับ 11.7 MPa ซึ่งที่สภาวะนี้ส่งผลให้คาร์บอน ไดออกไซด์และเสกเซนมีสถานะเป็นของไหลเหนือวิกฤต

นั่นหมายถึงการลดจำนวนวัฏภาคของเหลวของเสกเซนโดยไปเข้าเพิ่มในส่วนของวัฏภาคของไหลเหนือวิกฤตของคาร์บอน ไดออกไซด์และเสกเซนดังรูปที่ 4.33 (ข) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การแพร่และการค้าไม่ว่การณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเฮกเซนมีอัตราการแพร่ที่เพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการเกิด PP-B โฟมบีดส์ น้อยลง



(ก) กรณี 4 วัฏภาค

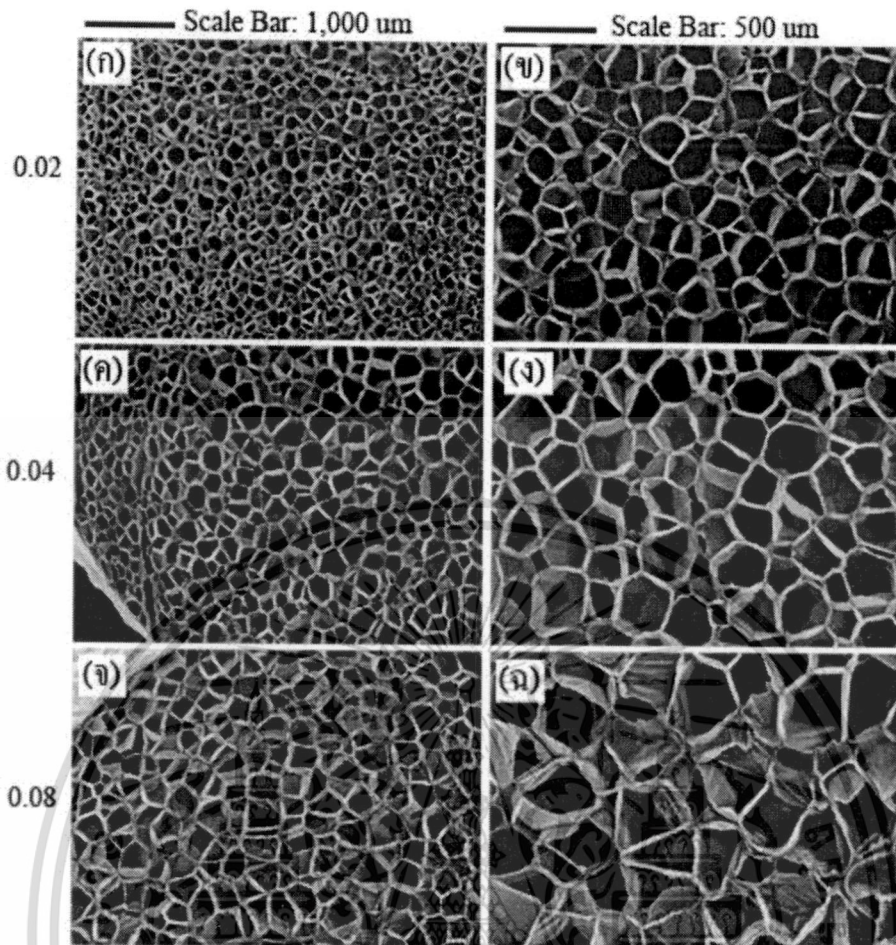
(ข) กรณี 3 วัฏภาค

รูปที่ 4.33 แผนภาพจำลองตำแหน่งขององค์ประกอบแต่ละชนิดในเครื่องปฏิกรณ์

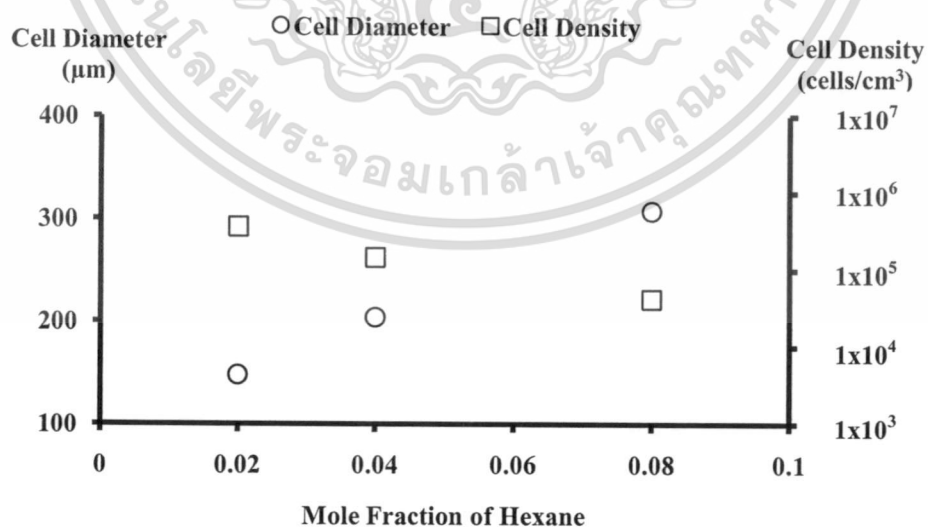
4.4.3 ผลของปริมาณเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัดส่วนวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์

เนื่องด้วยเฮกเซนเป็นสารเกิดฟองอีกชนิดหนึ่งจึงได้มีการศึกษาปริมาณของเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัดส่วนวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์ โดยทำการศึกษาสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนคือ 0.02 0.04 และ 0.08 ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 17 ± 2 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 120°C และเวลามากกว่า 120 min จากการทดลองพบว่าสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเซลล์มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันเซลล์ยังคงความเป็นระเบียบเช่นเดิม ดังรูปที่ 4.34 แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image-J พบว่าสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เซลล์มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจาก $148 \mu\text{m}$ เป็น $307 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 4.35 แต่ในขณะที่ความหนาแน่นเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคือเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 10^4 - 10^5 cells/cm³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



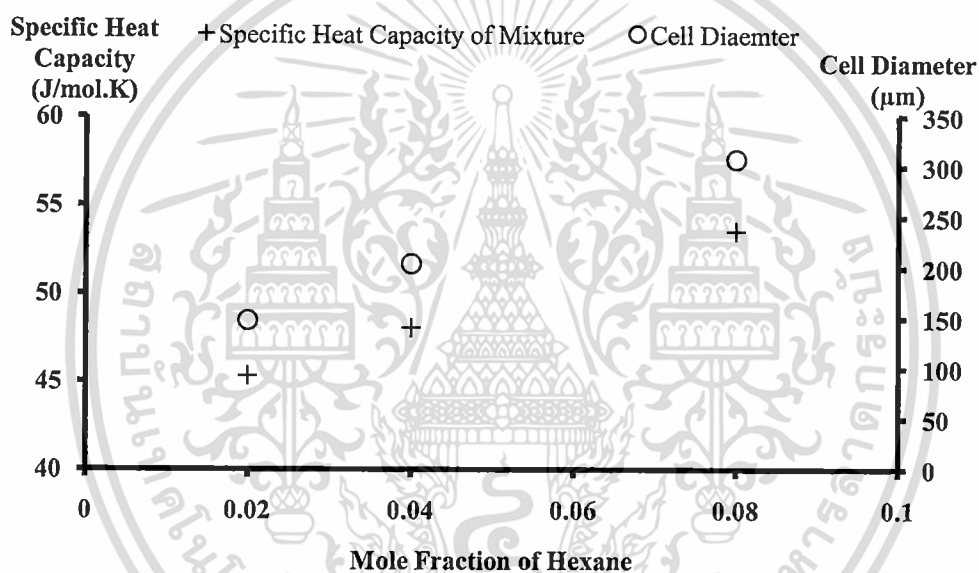
รูปที่ 4.34 ภาพไมโครกราฟของ PP-B โฟมบีดส์ ที่ตัดส่วนโดยโมลต่างๆของเฮกเซน ที่สภาวะเกิดโฟม ความดันเกิดโฟม 17 ± 2 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 120°C และเวลามากกว่า 120 min



รูปที่ 4.35 ผลของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์ ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 17 ± 2 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 120°C

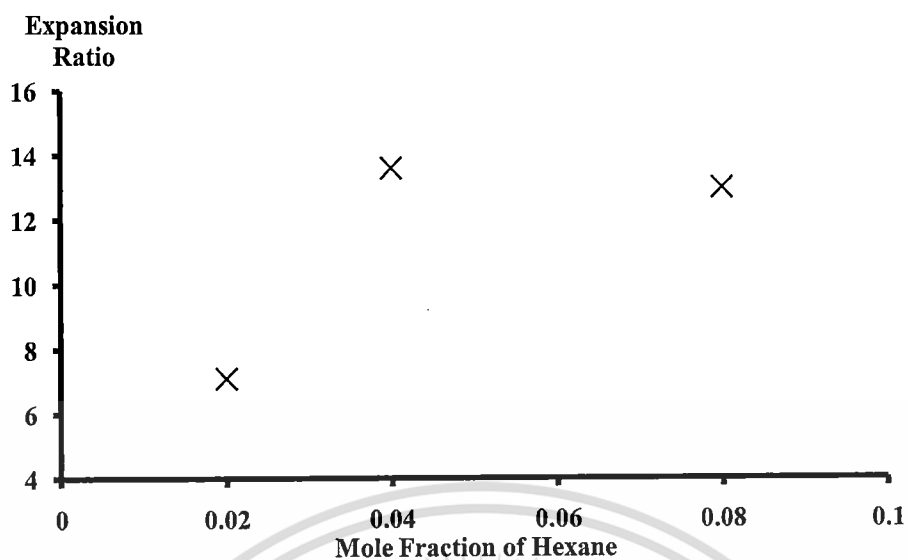
และเวลามากกว่า 120 min. ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดได้จากขั้นตอนการเติบโตของเซลล์นั้นพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์มีความแข็งแรงของการหลอมเพียงพอที่จะทำให้เซลล์สามารถขยายตัวได้เต็มที่และสามารถคงสภาพของเซลล์ไม่ให้เกิดการยุบตัว ทั้งนี้พลังงานความร้อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนเมทริกซ์มีความแข็งแรงของการหลอม จึงได้มีการคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) ของของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซน และจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงขึ้นจาก 45.31 เป็น 53.51 J/mol.K ซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีขึ้น และส่งผลต่อพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์มีความแข็งแรงของการหลอมเพียงพอที่ทำให้ขนาดเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 147.7 เป็น 307.4 μm ดังรูปที่ 4.36

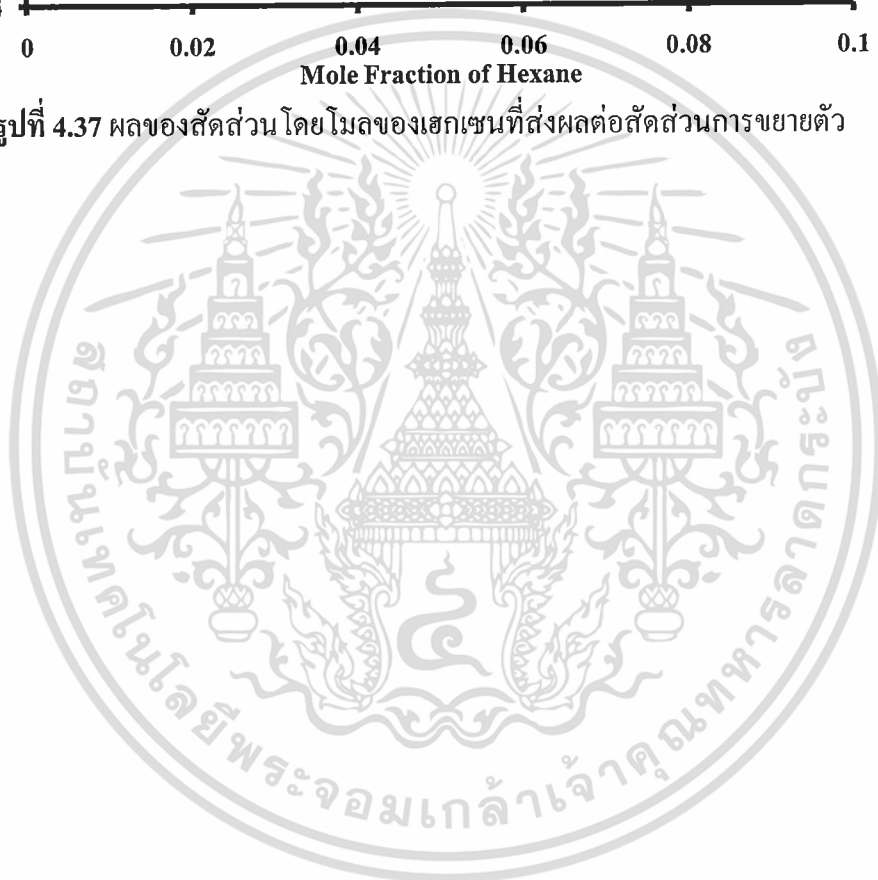


รูปที่ 4.36 ผลของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่ส่งผลต่อค่าความจุความร้อนและขนาดเซลล์

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนการขยายตัวพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนจาก 0.02 เป็น 0.04 พบว่ามีสัดส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 7 เท่า เป็น 13.6 เท่า แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนเป็น 0.08 ยังคงสัดส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกับสัดส่วนโดยโมล 0.04 คือมีสัดส่วนการขยายตัว 13 เท่า ดังรูปที่ 4.37 เพราะฉะนั้นปริมาณหรือสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่มีความเหมาะสมคือ 0.04



รูปที่ 4.37 ผลของสัดส่วนโดยโมลของเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ตอนที่ 1

5.1 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

5.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP โฟม

ข้อมูลเบื้องต้นพบว่า PP มีอุณหภูมิหลอมเท่ากับ 160°C จึงได้มีการศึกษาอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสมคือ 160 165 และ 170°C ผลการทดลองพบว่า การเตรียมโฟมที่อุณหภูมิเกิดโฟม 165°C มีสัดส่วนการขยายตัวมากกว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟม 160 และ 170°C ประมาณ 4 เท่า

5.1.2 การศึกษาผลของเส้นใยสับปะรดที่ส่งผลต่อพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟม

PP โฟมที่ไม่ผสมเส้นใยสับปะรดมีลักษณะโครงสร้างของโฟมเป็นแบบใบโมดอล แต่ในขณะที่คอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยสับปะรดในปริมาณ 20 phr มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของขนาดเซลล์ อีกทั้งการผสมเส้นใยสับปะรดยังส่งผลให้สัดส่วนการขยายตัวลดลงประมาณ 4 เท่า จาก PP โฟมที่ไม่ผสมเส้นใยสับปะรด

5.1.3 การศึกษาผลของปริมาณ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

การผสม MA-g-PP ในสัดส่วนร้อยละ 0 2 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดโครงสร้างแบบใบโมดอล อีกทั้งยังพบว่าขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นจาก $6.2\ \mu\text{m}$ เป็น $28.5\ \mu\text{m}$ และความหนาของผนังเซลล์ (Cell Wall Thickness) เพิ่มขึ้นจาก $1.7\ \mu\text{m}$ เป็น $6.5\ \mu\text{m}$ เช่นกัน แต่การผสมของ MA-g-PP ในสัดส่วนร้อยละ 2 5 และ 10 โดยน้ำหนัก นั้นส่งผลให้สัดส่วนการขยายตัวมากกว่าการไม่ผสม MA-g-PP

5.1.4 การวิเคราะห์ความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด

โฟมไอโซโทรปิกควรมีดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกอยู่ในช่วง 0 - 0.895 และเมื่อทำการศึกษาพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรดมาวิเคราะห์ถึงความเป็นโฟมไอโซโทรปิกพบว่าดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกมีค่าอยู่ในช่วง 0.91 ถึง 2.74 หรือหมายถึงพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรดมีความเบี่ยงเบนไปจากคุณสมบัติของความเป็นโฟมไอโซโทรปิก

ตอนที่ 2

5.2 ปฏิกิริยาการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

5.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่แพร่เข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการแพร่จนถึงสภาวะอิ่มตัวลดลงจากมากกว่า 60 min มาเป็น 30 min ที่อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นจาก 130°C เป็น 145°C

5.2.2 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

จากสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe และความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิ สัมบูรณ์พบว่า เมื่อความดันเกิดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์และเวลาคงที่ ส่งผลให้ค่าของการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น แต่ในทำนองตรงกันข้ามพบว่าเมื่ออุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นที่สภาวะความดันเกิดโพลีเมอร์และเวลาคงที่ส่งผลให้ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนลดน้อยลง

5.2.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

ที่อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมากขึ้นหรืออธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์สูงขึ้นนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความสามารถรวมของทั้งการละลายและการแพร่ได้ดีและเร็วกว่าที่อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์ต่ำ ซึ่งเป็นผลดีต่อขั้นตอนการคงสภาพของเซลล์

5.3 ผลการเกิดโพลีเมอร์ของพอลิโพรพิลีนโพลีเมอร์

5.3.1 การศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโพลีเมอร์แบบกะ

เบื้องต้นเป็นการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของกระบวนการเกิด PP-A โพลีเมอร์ และจากการทดลองพบว่าเวลาเพิ่มมากขึ้นคือ 10 20 30 45 และ 60 min ส่งผลให้ PP-A โพลีเมอร์มีขนาดเซลล์ลดลงจาก $155.8 \mu\text{m}$ เป็น $49.3 \mu\text{m}$ แต่ให้ความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้นจาก $5.28 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$ เป็น $6.39 \times 10^7 \text{ cells/cm}^3$ ในขณะที่สัดส่วนการขยายตัวที่เวลา 10-30 min ทำให้ PP-A โพลีเมอร์ที่ได้มีความสามารถในการขยายตัวค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 20-25 เท่า

5.3.2 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโพลีเมอร์แบบกะ

เมื่ออุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นจาก 135°C ถึง 145°C ส่งผลให้ PP-A โพลีเมอร์มีขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นจาก $11.2 \mu\text{m}$ เป็น $142.3 \mu\text{m}$ แต่ในทำนองตรงกันข้ามพบว่ามีความหนาแน่นเซลล์ลดลงจาก $1.4 \times 10^9 \text{ cells/cm}^3$ เป็น $3.88 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$ และหากพิจารณาในเทอมของสัดส่วนการขยายตัวพบว่าที่อุณหภูมิเกิดโพลีเมอร์ 140°C มีสัดส่วนการขยายตัวสูงที่สุดคือ 23.5 เท่า

5.3.3 ผลของอุณหภูมิเกิดโพลีที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โพลี

หากวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิเกิดโพลีคือ 135 140 และ 145°C ส่งผลให้ขนาดเซลล์ของพอลิโพรพิลีน โพลีทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยจากภาพไมโครกราฟพบว่า PP-A โพลี มีขนาดเซลล์ที่ใหญ่และเซลล์มีรูปทรงที่เป็นระเบียบกว่า PP-B โพลี และพบว่า PP-B โพลี มีลักษณะโครงสร้างแบบไบโมดอล ในขณะที่ความหนาแน่นเซลล์มีแนวโน้มลดลงตามค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนของทั้งสองชนิด แต่สำหรับ PP-B โพลี นั้นยังคงรักษาความหนาแน่นเซลล์ไว้ในช่วง 10^8 ถึง 10^9 cells/cm³ เมื่ออุณหภูมิเกิดโพลีเพิ่มขึ้นจาก 135°C เป็น 145°C ทำให้ PP-A และ PP-B โพลี มีสัดส่วนการขยายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเกิดโพลี 140°C

5.3.4 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โพลี

หากวิเคราะห์ผลของเวลาคือ 10 20 และ 30 min พบว่า PP-A โพลี มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโพลีที่สังเกตได้อย่างชัดเจนคือมีขนาดเซลล์เล็กลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลของการเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ของพอลิโพรพิลีนจนมีโครงสร้างเป็นผลึก จึงทำให้สังเกตเห็นเซลล์ที่มีขนาดเล็กกว่าปกติ แต่ในกรณีของ PP-B โพลี นั้นสังเกตได้ไม่ชัดเจน จากผลของเวลาที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้นของพอลิโพรพิลีน โพลีทั้งสองชนิด ในขณะที่เวลา 10-20 min ส่งผลให้พอลิโพรพิลีน โพลีทั้งสองชนิดนี้มีสัดส่วนการขยายตัวมากกว่า 20 เท่า และมีสัดส่วนการขยายตัวสูงที่สุดคือที่เวลา 10 min

5.3.5 การวิเคราะห์ความเป็นโพลีไอโซโทรปิกของ PP-A และ PP-B โพลี

จากผลการวิเคราะห์พบว่า PP-B โพลี มีคุณสมบัติของความเป็นโพลีไอโซโทรปิกมากกว่า PP-A โพลี แต่อย่างไรก็ตามโพลีที่สภาวะอื่นๆ ที่ไม่ใช่โพลีไอโซโทรปิกนั้นก็ยังคงมีความใกล้เคียงกับโพลีไอโซโทรปิกเช่นกัน

ตอนที่ 3

5.4 ผลการเกิดโพลีของพอลิโพรพิลีนโพลีบีดส์

5.4.1 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิดโพลีที่เหมาะสมต่อการเกิดโพลีของ PP-B โพลีบีดส์

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเกิดโพลี 120°C ให้อ้อยละผลได้เท่ากับร้อยละ 95.7 แต่เมื่ออุณหภูมิเกิดโพลีเพิ่มสูงขึ้นเป็น 125 และ 130°C กลับส่งผลให้อ้อยละผลได้ลดลงเป็นร้อยละ 91.9 และ 0 ตามลำดับ

5.4.2 การศึกษาการปั่นกววนของกระบวนการผลิต PP-B โพลีบีดส์

การปั่นกววนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ คือ น้ำ สารเติมแต่ง เม็ด PP-B เสกเซน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วย 4 วัฏภาคคือ วัฏภาคของสารแขวนลอยของน้ำ และสารเติมแต่ง วัฏภาคของแข็งของเม็ด PP-B วัฏภาคของเหลวของเสกเซน และวัฏภาคของแก๊สเอกซอสเป็นเอกซอสที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการบีบกดทำให้เม็ด PP-B จะลอยรวมอยู่ชั้นเดียวกับเฮกเซน จึงมีการลดวิฤภาคของเหลวของเฮกเซนด้วยการใช้สภาวะเกิดโฟมคืออุณหภูมิเกิดโฟม 120°C และความดันเกิดโฟมมากกว่า 11.7 MPa ซึ่งที่สภาวะนี้ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนมีสถานะเป็นของไหลเหนือวิกฤต

5.4.3 ผลของปริมาณเฮกเซนที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-B โฟมบีดส์

ปริมาณของเฮกเซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของไหลเหนือวิกฤตระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 45.31 เป็น 53.51 J/mol.K ซึ่งทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้ขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 147.7 เป็น $307.4\text{ }\mu\text{m}$ แต่ปริมาณของเฮกเซนที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความเป็นระเบียบของเซลล์ภายใน PP-B โฟมบีดส์ และเมื่อวิเคราะห์ถึงความหนาแน่นเซลล์กลับพบว่าปริมาณของเฮกเซนส่งผลให้ความหนาแน่นเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคือมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $10^4\text{-}10^5\text{ cells/cm}^3$

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 ควรศึกษาเวลาอิมมัตวของพอลิโพรพิลีนคอม โพลิตเสริมแรงเส้นใยสับปะรด เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการทดลองและเพื่อลดปริมาณการเกิดผลึกใหม่ภายในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

5.5.2 ควรมีการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของผลึกที่เพิ่มขึ้นของพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ เพื่อวิเคราะห์ถึงการเกิดผลึกใหม่จากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

5.5.3 ควรเพิ่มตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อวัดอุณหภูมิที่แท้จริงภายในเครื่องปฏิกรณ์หรือเป็นอุณหภูมิที่แท้จริงที่ใช้ในการเกิดโฟม

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. Klemperer 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] M.A. Shafi and R.W. Flumerfelt. “Initial bubble growth in polymer foam processes” **Chemical Engineering Science**. Vol. 52. July 1996. pp. 627-633.
- [7] 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.
- [8] David Eaves. **Handbook of Polymer Foams**. Crewe : The Printing House. 2004.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] A.K. Bledzki and O. Faruk. “Injection moulded microcellular wood fibre-polypropylene composites” **Composites: Part A**. Vol. 37. 2006. pp. 1358-1367.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Domasius Nwabunma and Thein Kyu. **Polyolefin Composites**. New York : John Wiley & Sons, Inc . 2007.
- [13] Shau-Tarng Lee, Chul B. Park and N.S. Ramesh. **Polymeric Foams: Science and Technology**. United States of America : Taylor & Francis. 2007.
- [14] Robin Britton. **Update on Mouldable Particle Foam Technology**. Shrewsbury : iSmithers. 2009.
- [15] J.M. Smith, H.C. Van Ness and M.M. Abbott. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**. 7th Edition. Singapore : McGraw-Hill. 2005.
- [16] Maartjie F. Kemmere and Thierry Meyer. **Supercritical Carbon Dioxide in Polymer Reaction Engineering**. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2005.
- [17] Donald G. Baird and Dimitris I. Collias. **Polymer Processing: Principle and Design**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1998
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Ryan Gosselin and Denis Rodrigue. “Cell morphology analysis of high density polymer foams” **Polymer Testing**. Vol. 24. 2005. pp 1027-1035.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Jarrod J Schemenauer, Tim A. Osswald, Anand R. Sanadi and Daniel F. Caulfield. “Melt rheological properties of natural fiber-reinforced polypropylene” **ANTEC2000 Society of Plastic Engineers Conference**. 2000. pp 2206-2210.
- [27] Krishnan Jayaraman. “Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation” **Composites Science and Technology**. Vol. 63. 2003. pp 367-374.
- [28] Reverchon E. and Cardea S.. “Production of controlled polymeric foams by supercritical CO₂” **Journal of Supercritical Fluids**. Vol. 40. 2007. pp 144-152.
- [29] P.V. Joseph, Marcelo S. Rabello, L.H.C. Mattoso, Kuruvilla Joseph and Sabu Thomas. “Environment effects on the degradation behavior of sisal fibre reinforced polypropylene composites” **Composites Science and Technology**. Vol. 62. 2002. pp 1357-1372.
- [30] Shucai Li, Pentti K. Järvelä and Pirkko A. Järvelä. “Melt rheological properties of polypropylene-Maleated polypropylene blends. II. Dynamic viscoelastic properties” **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 71. 1999. pp 1649-1656.
- [31] Da-chao Li, Tao Liu, Ling Zhao and Wei-kang Yuan. “Solubility and diffusivity of carbon dioxide in solid-state isotactic polypropylene by the pressure-decay method” **Industrial & Engineering Chemistry Research**. Vol. 48. 2009. pp 7117-7124.



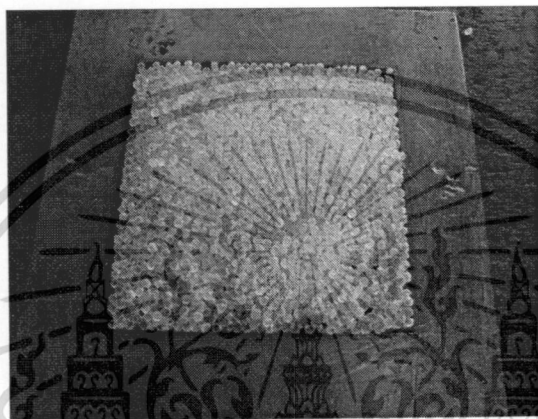
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

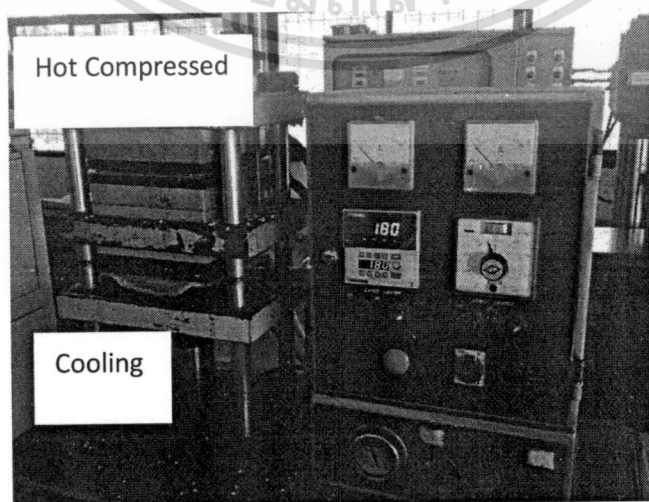
การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนด้วยวิธีบีบอัดด้วยความร้อน

1. นำเม็ดพอลิโพรพิลีนใส่แม่พิมพ์แบบแผ่นจำนวน 2 แผ่น ซึ่งที่ทำมาจากเหล็กให้ทั่ว จากนั้นเกลี่ยให้มีความสูงเสมอกับแม่พิมพ์ ดังรูปที่ ก.1



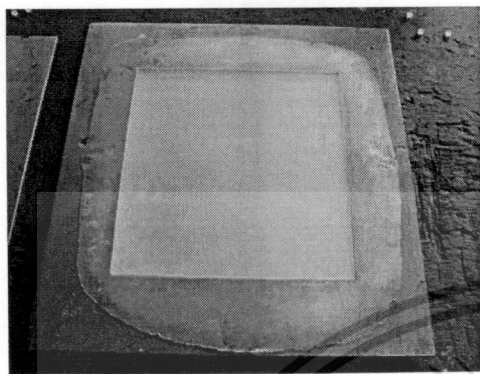
รูปที่ ก.1 เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ถูกบรรจุในแม่พิมพ์

2. นำแม่พิมพ์แผ่นที่สามมาประกบซึ่งจะได้แม่พิมพ์ที่มีลักษณะคล้ายแซนดวิช ต่อจากนั้นนำเข้าไปวางที่บริเวณด้านบนเครื่องบีบอัดด้วยความร้อน ดังรูปที่ ก.2 ซึ่งได้ถูกตั้งอุณหภูมิให้เกินอุณหภูมิหลอมคือที่อุณหภูมิ 180°C จากนั้นทำการบีบอัดพอลิโพรพิลีนเป็นเวลา 2 min
3. เมื่อครบ 2 min จึงนำแม่พิมพ์ออกและนำมาวางไว้บริเวณด้านล่างของเครื่องบีบอัดด้วยความร้อนเพื่อทำการหล่อเย็นด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 2 min ดังรูปที่ ก.2

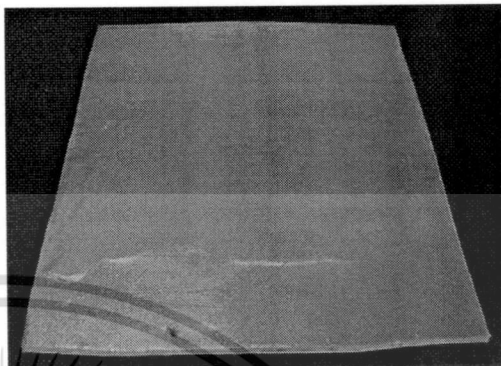


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ก.2 เครื่องบีบอัดด้วยความร้อน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องซึ่งจะได้แผ่นพอลิโพรพิลีนดังรูปที่ ก.3 (ก) จากนั้นทำการตัดขอบแผ่นพอลิโพรพิลีนและจะได้แผ่นพอลิโพรพิลีนที่มีขนาด 13x13 cm และมีความหนา 2-3 cm ดังรูปที่ ก.3 (ข)



(ก) หลังผ่านการบีบอัดด้วยความร้อน



(ข) หลังผ่านการตกแต่งขอบ

รูปที่ ก.3 แผ่นพอลิโพรพิลีน



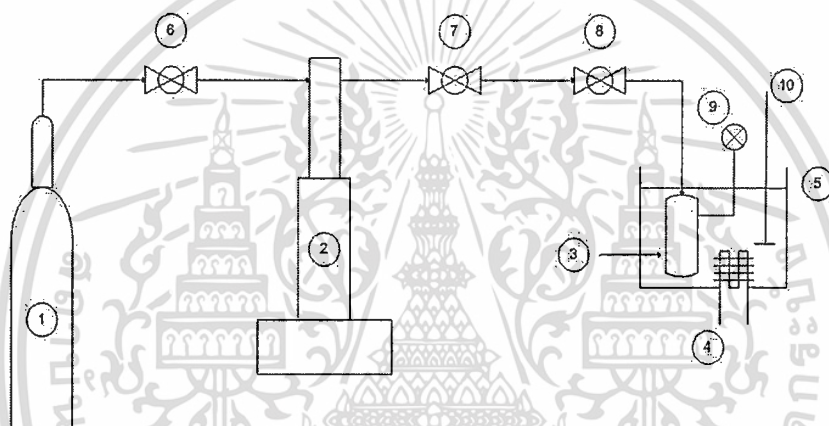
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

ข.1 กระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

1. ตั้งอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดความร้อนตามที่ต้องการ พร้อมทั้งเปิดไบพัตเพื่อให้มีการกระจายความร้อนได้ทั่วทั้งอ่างซิลิโคน
2. นำพอลิโพรพิลีนแบบแผ่น จำนวน 3 แผ่น ที่ถูกยึดไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียมเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับปั๊มแรงดันสูงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แผนผังกระบวนการเกิด โฟมแบบกะ

- | | |
|---|------------------------------------|
| (1) ถังแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ | (2) ปั๊มแรงดันสูง |
| (3) เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง ปริมาตร 18 ml | (4) เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) |
| (5) อ่างซิลิโคน (Silicone Bath) | (6) วาล์วหมายเลข 1 |
| (7) วาล์วหมายเลข 2 | (8) วาล์วหมายเลข 3 |
| (9) เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) | (10) ไบพัต |

3. ทำการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปั๊มแรงดันสูงเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง จนมีความดันประมาณ 200 psig และทิ้งไว้สักครู่ จากนั้นใส่อากาศออกทางบริเวณท้ายของเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง โดยให้ความดันสุดท้ายมีมากกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อป้องกันอากาศไหลย้อนเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง

4. อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปอีกครั้งโดยกำหนดให้ความดันของระบบคือ 12 MPa และเมื่ออุณหภูมิของอ่างซิลิโคนได้ตามที่ต้องการ จึงนำเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูงไปจุ่มลงในอ่างซิลิโคน และทิ้งไว้ตามเวลาที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เมื่อทิ้งระบบไว้ตามเวลาที่ต้องการจึงปิดวาล์วหมายเลข 2 และ 3 (เบอร์ (7) และ (8) ตามลำดับ) จากนั้นถอดเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูงตั้งแต่วาล์วหมายเลข 3 หลังจากนั้นทำให้เกิดโฟมด้วยวิธีลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ด้วยการเปิดวาล์วหมายเลข 3 โดยที่ความดันจะลดลงจาก 12 MPa มายังความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 2-3 s

6. นำตัวอย่างพอลิโพรพิลีนโฟมที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

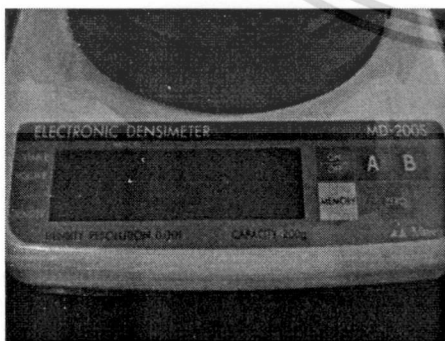
ภาคผนวก ค

การหาความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์

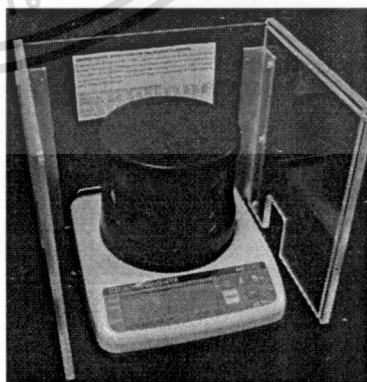
เครื่องมือวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์อาศัยหลักการแทนที่น้ำหรือหลักการของอาคิมิดีส โดยมีวิธีการวัดดังต่อไปนี้

1. ตั้งค่าจอแสดงผลของเครื่องวัดให้เป็นศูนย์ (Set zero) ดังรูปที่ ค.1 (ก)
2. ชั่งตัวอย่างพอลิเมอร์โพลีเมอร์บริเวณด้านบนบนของตัวเครื่องดังรูปที่ ค.1 (ข) กดปุ่ม MEMORY เพื่อทำการบันทึกค่าให้กับเครื่อง
3. นำตัวอย่างพอลิเมอร์โพลีเมอร์ไปจุ่มในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำและเมทานอลโดยมีอัตราส่วน 2 ต่อ 1 โดยปริมาตร เพียงชั่วขณะเพื่อลดแรงตึงผิวของพอลิเมอร์โพลีเมอร์ซึ่งจะทำให้เกิดฟองอากาศในขณะที่ชั่งในน้ำ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างพอลิเมอร์โพลีเมอร์ในน้ำ (หากมีฟองอากาศเกาะติดอยู่ชิ้นงานให้พยายามกำจัดออก) ถัดมากดปุ่ม MEMORY เพื่อให้เครื่องคำนวณค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์โพลีเมอร์
4. เครื่องจะแสดงผลค่าความหนาแน่นในหน่วย g/cm^3 (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตรได้ โดยการกดปุ่ม A)
5. นำชิ้นงานพอลิเมอร์โพลีเมอร์ออกจากเครื่อง

หมายเหตุ: ในการนำชิ้นตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้คีมจับ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นออกมาทำความเสียหายให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



(ก) หน้าจอ



(ข) ตัวเครื่อง

รูปที่ ค.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S)

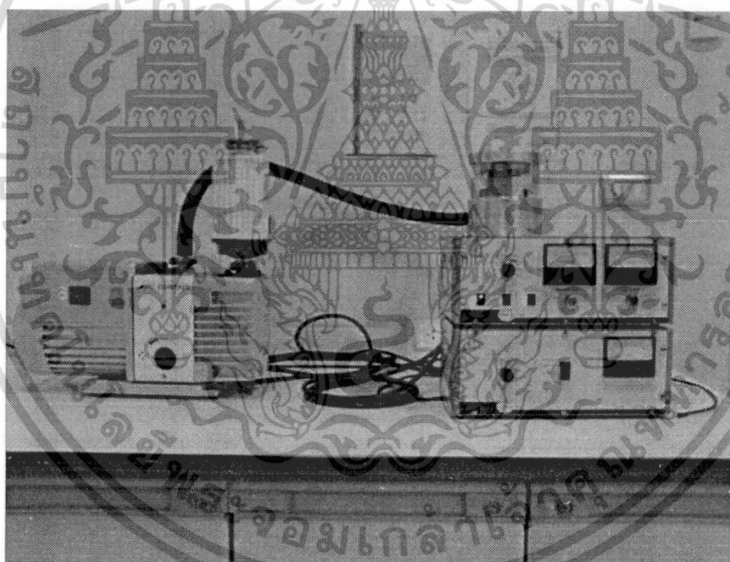
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟ

นำโพลีเมอร์ที่ได้จากกระบวนการเกิดโพลีเมอร์แบบกะมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

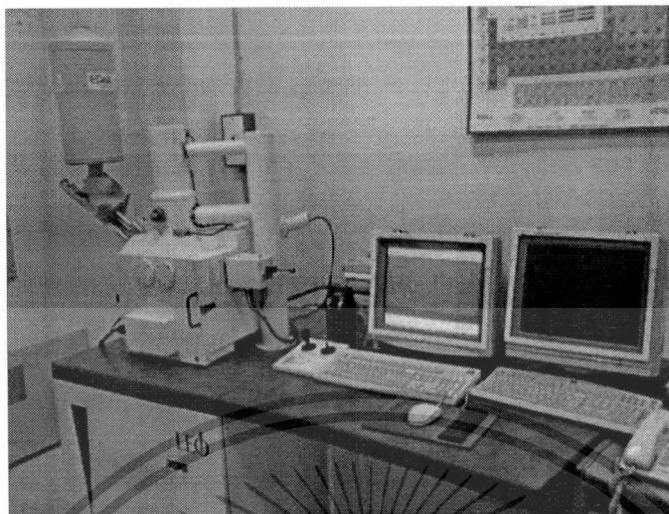
1. ทำการบากด้านข้างตามแนวขวางบริเวณตรงกลางของชิ้นงานโพลีเมอร์เพียงเล็กน้อย
2. แช่ตัวอย่างโพลีเมอร์ลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 min เพื่อให้โพลีเมอร์มีความแข็งและเปราะซึ่งสามารถหักได้ง่าย จากนั้นทำการหักโพลีเมอร์ ตอนที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว โดยจะทำให้เกิดการหักบริเวณที่เกิดการบากบนชิ้นงาน จากนั้นเก็บตัวอย่างของโพลีเมอร์สำหรับศึกษาสัณฐานวิทยา
3. นำตัวอย่างโพลีเมอร์ที่ได้ไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเพื่อให้โพลีเมอร์มีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 เครื่องเคลือบทองรุ่น SC7620 Sputter Coater

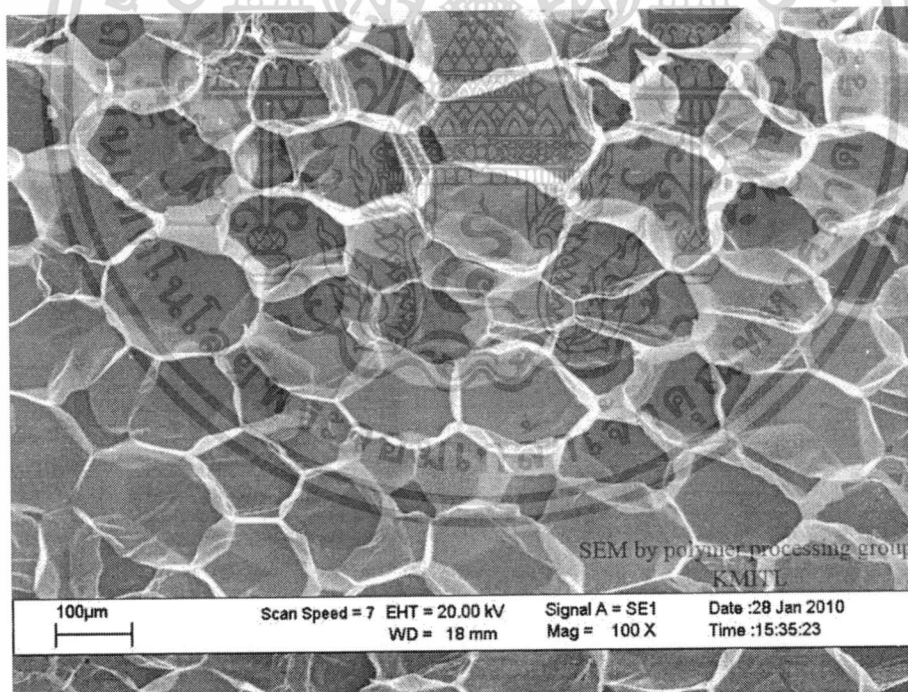
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ถ่ายภาพไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น LEO 1455VP

5. ตัวอย่างภาพไมโครกราฟที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังรูปที่ ง.3



รูปที่ ง.3 ตัวอย่างภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

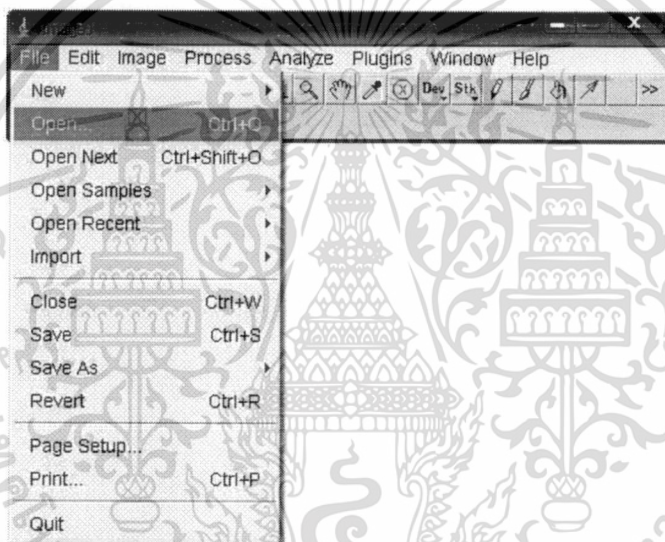
ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยโปรแกรม Image-J

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือการวิเคราะห์ขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

จ.1 การวิเคราะห์ขนาดเซลล์

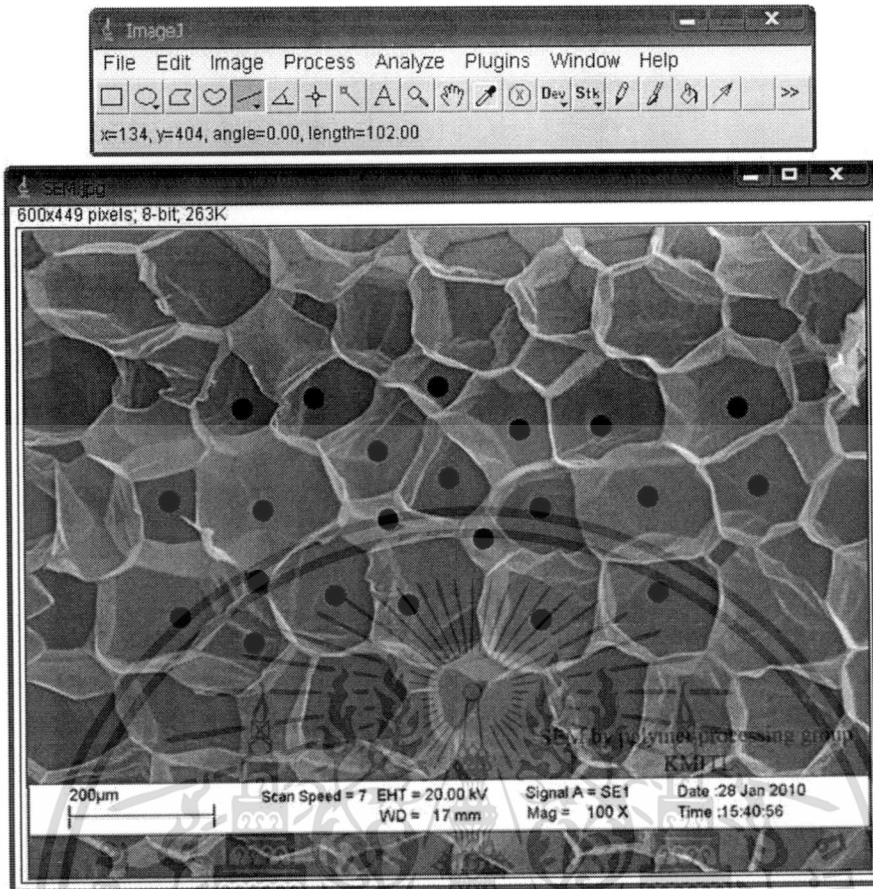
1. เปิดโปรแกรม Image-J จากนั้นเลือกภาพไมโครกราฟตามที่ต้องการด้วยการเข้าไปที่ FILE ต่อด้วย OPEN ดังรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 การเปิดภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image-J

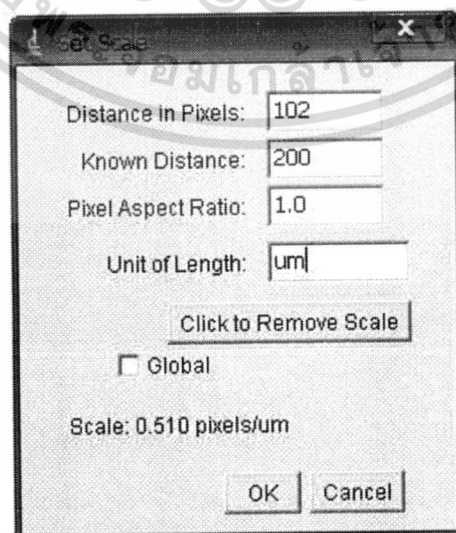
2. จากนั้นเลือกเครื่องมือเส้นตรง บนแถบเครื่องมือ ดังรูปที่ จ.2 ถัดมาให้ลากเส้นตรงบนแถบสเกลบนภาพไมโครกราฟ โดยให้ลากให้เป็นเส้นตรงคือมีค่า $angle = 0.00$ (บริเวณแถบเครื่องมือ) และจะสังเกตได้ว่าที่ $length = 102.00$ นั้นหมายถึงถ้าโปรแกรมอ่านค่าความยาวได้ 102 จะมีความยาวเท่ากับ $200 \mu m$

หมายเหตุ: ภาพไมโครกราฟนี้ต้องถูกกำหนดจุดไว้บนภาพก่อน เพื่อต่อการนับจำนวนเซลล์



รูปที่ จ.2 การกำหนดสเกลให้กับโปรแกรม Image-J.

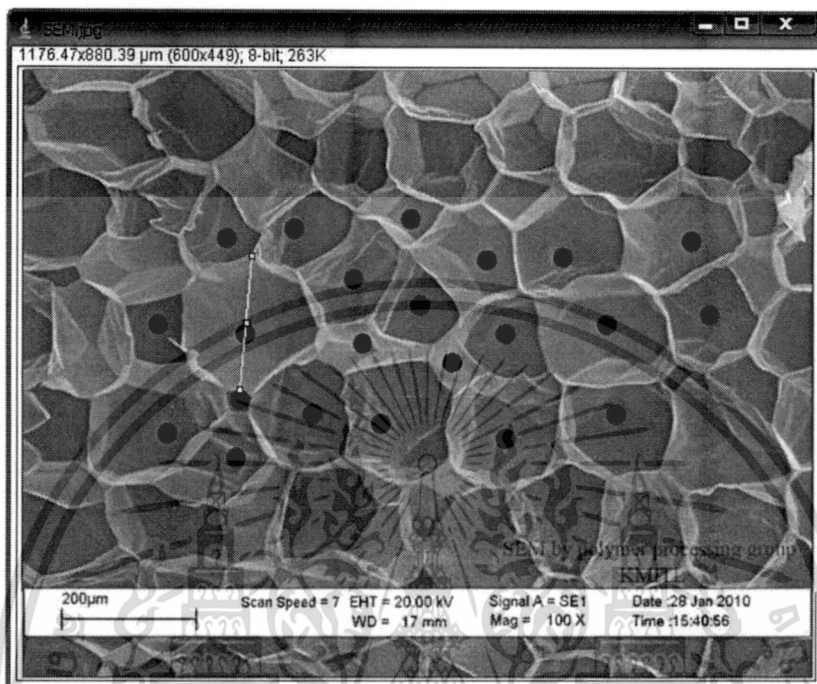
3. เมื่อเครื่องบันทึกความยาวแล้วให้เข้าไปที่แถบเครื่องมือและคลิกที่ ANALYZE และคลิกที่ SET SCALE อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ จ.3 และกำหนดตัวเลขในช่อง KNOW DISTANCE และกำหนดหน่วยที่ทราบในช่อง UNIT OF LENGTH จากนั้นกด OK



รูปที่ จ.3 การกำหนดค่าสเกลและหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ต่อมาเลือกเครื่องมือเส้นตรงอีกครั้งหนึ่ง และลากเส้นลงบนภาพไมโครกราฟที่ได้ถูกกำหนดจุดไว้แล้ว ดังรูปที่ จ.4 โดยกำหนดให้เซลล์เป็นทรงกลมและมีเส้นผ่าศูนย์กลางหรือขนาดเซลล์เท่ากับเส้นตรงที่ถูกลากเส้นบนภาพไมโครกราฟ



รูปที่ จ.4 การวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์หรือขนาดเซลล์

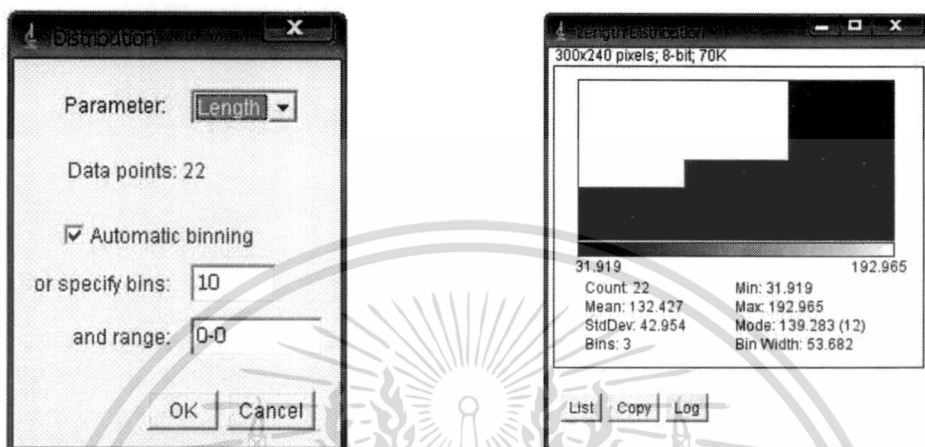
5. ถัดจากนั้นไปที่แถบเครื่องมือโดยเลือก ANALYZE และคลิกคำว่า MEASURE ซึ่งโปรแกรมจะบันทึกขนาดของเส้นตรงที่ได้ลากไว้ ที่คอลัมน์ LENGTH ดังรูปที่ จ.5 จากรูปพบว่าเซลล์ที่วัดนั้นมีขนาดเซลล์ 193.0 μm

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

รูปที่ จ.5 การอ่านค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์หรือขนาดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 4 และ 5 จนครบตามจำนวนเซลล์ที่นับไว้ จากนั้นไปที่แถบเครื่องมือ เลือกคำว่า ANALYZE และคลิกที่ DISTRIBUTION จะมีหน้าต่างปรากฏดังรูปที่ จ.6 (ก) จากนั้น กำหนดช่อง PARAMETER เป็น LENGTH กดปุ่ม OK และจะได้ค่าเฉลี่ยของขนาดเซลล์เป็น $132.4 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ จ.6 (ข)



(ก) การกำหนดตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ (ข) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากภาพไมโครกราฟ

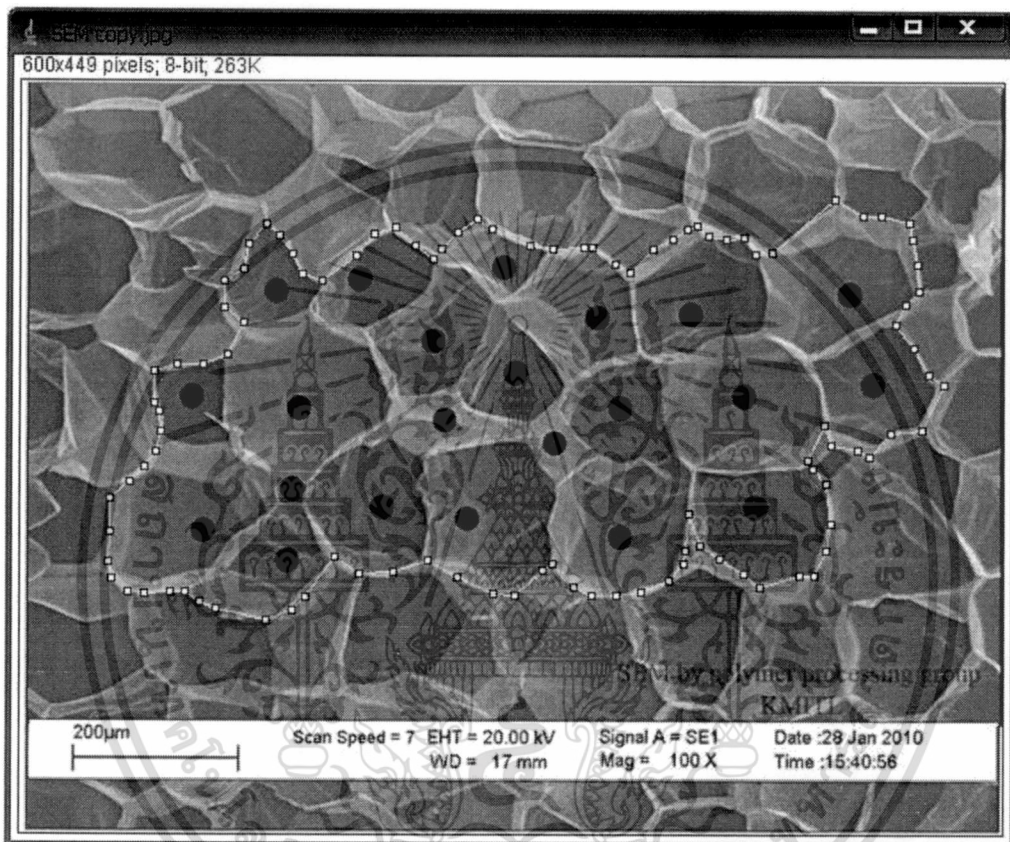
รูปที่ จ.6 การวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นเซลล์

การวิเคราะห์ความหนาแน่นเซลล์ใช้วิธีกำหนดจำนวนเซลล์ จากนั้นจึงวิเคราะห์หาพื้นที่ที่ล้อมรอบจำนวนเซลล์ที่สนใจ หรืออธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

1. เลือกแถบเครื่องมือรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) จากนั้นลากพื้นที่ที่ล้อมรอบเซลล์ที่สนใจ ดังรูปที่ จ.7



รูปที่ จ.7 การกำหนดพื้นที่ที่ล้อมรอบเซลล์ที่สนใจ

2. จากนั้นไปที่แถบเครื่องมือเลือกคำว่า ANALYZE และคลิกคำว่า MEASURE จะได้พื้นที่เท่ากับ $341,633.99 \text{ um}^2$ ดังรูปที่ จ.8

	Area	Mean	Min	Max
1	341633.987	101.197	0	255

รูปที่ จ.8 การวิเคราะห์พื้นที่ที่ล้อมรอบเซลล์ที่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำข้อมูลของจำนวนเซลล์และพื้นที่ที่ล้อมรอบเซลล์ที่สนใจ คำนวณตามสมการ 2.21 ดังตัวอย่างเช่น เซลล์ที่สนใจคือ 22 cells และมีพื้นที่ 341,633.99 μm^2 เมื่อนำเข้าสู่สูตรการคำนวณความหนาแน่นเซลล์จะได้ว่า

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

เพราะฉะนั้นความหนาแน่นเซลล์คือ $5.2 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองของการเกิดฟอติโพรพิลีนคอมโพสิตโฟม

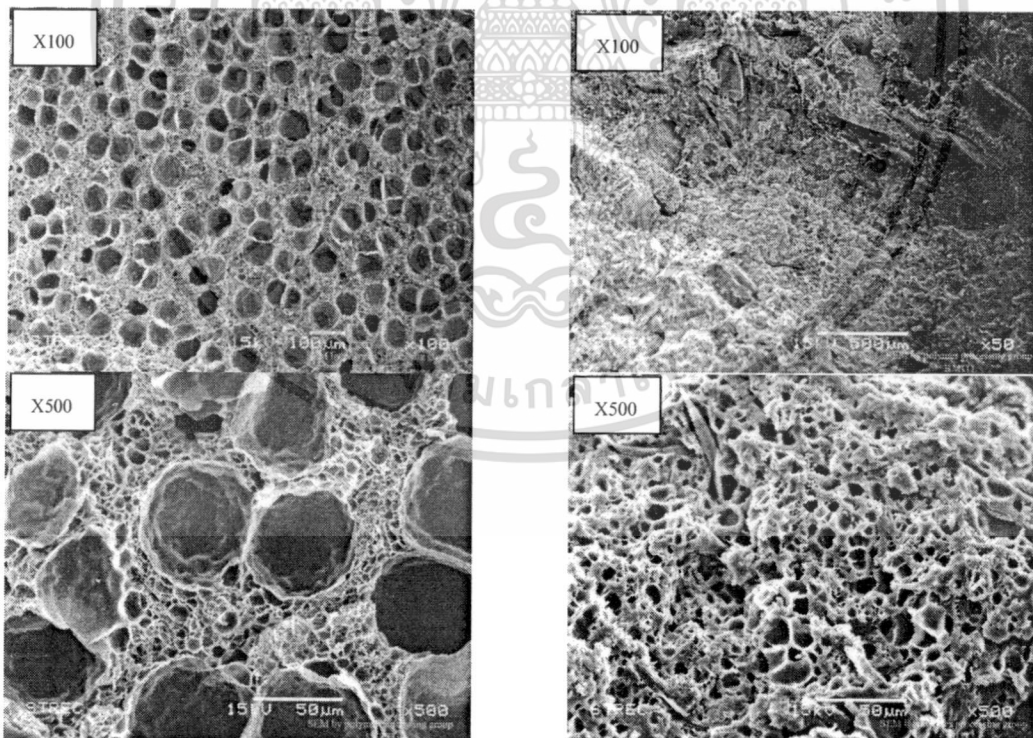
ฉ.1 ผลการเกิดโฟมของ PP โฟม

ฉ.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัดส่วนการขยายตัวของ PP โฟม
ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ฉ.1

ตารางที่ ฉ.1 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อ PP โฟม

Foaming Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Expansion Ratio
160	1.02
165	4.61
170	1.05

ฉ.1.2 การศึกษาผลของเส้นใยสับปะรดที่ส่งผลต่อฟอติโพรพิลีนคอมโพสิตโฟม



(ก) เส้นใยสับปะรด 0 phr

(ข) เส้นใยสับปะรด 20 phr

รูปที่ ฉ.1 ภาพไมโครกราฟของ PP โฟม ที่ความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 165 $^{\circ}\text{C}$ และ

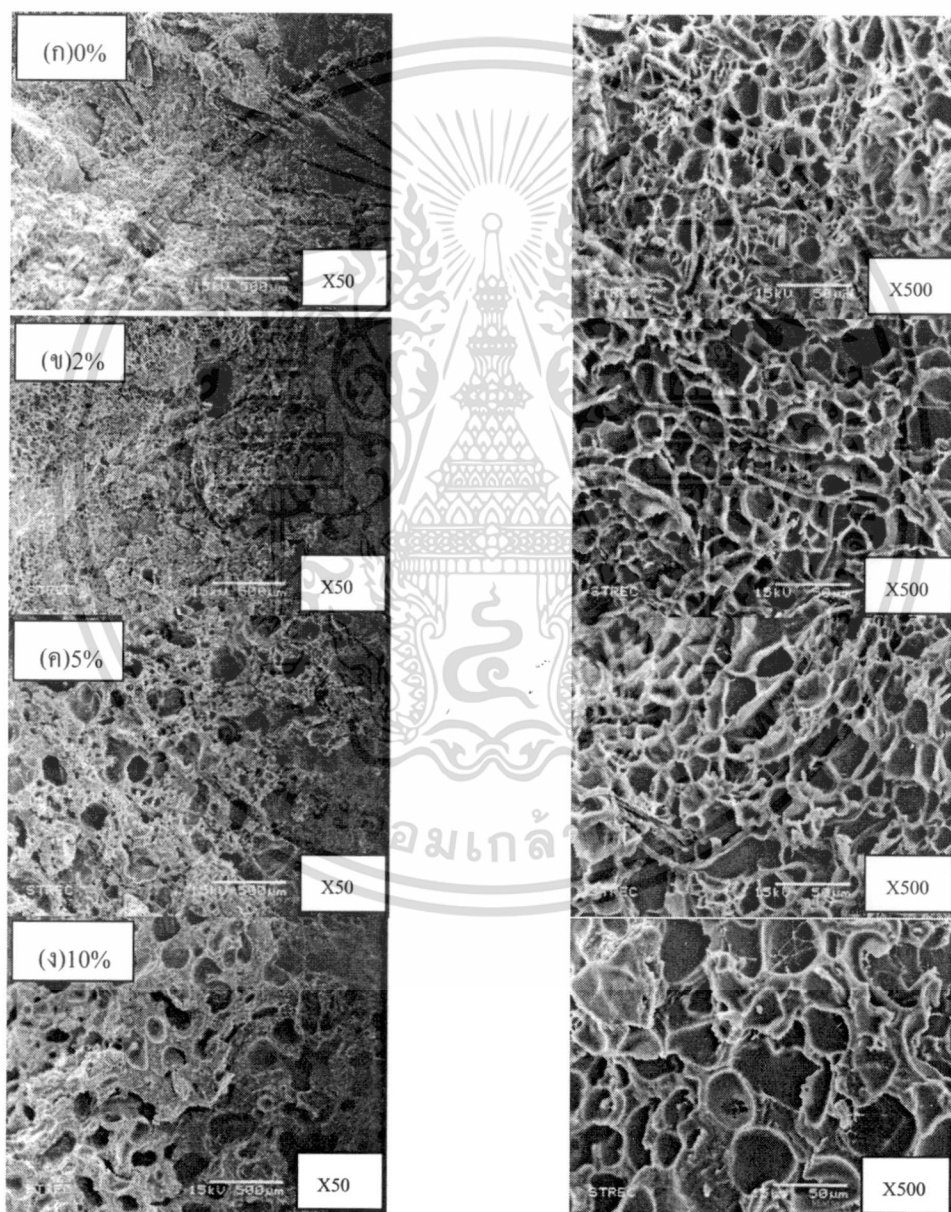
เวลา 120 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.๒ ผลของปริมาณเส้นใยสับปะรดต่อสัดส่วนการขยายตัว

Sisal Fiber (phr)	Expansion Ratio
0	4.52
20	1.17

๓.1.3 การศึกษาผลของปริมาณ MA-g-PP ที่ส่งผลต่อพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด



รูปที่ ๓.๒ ภาพไมโครกราฟของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด ที่ผสม MA-g-PP ในปริมาณต่างๆ ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม

165°C และเวลา 120 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 ผลจากการวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟม

Sample	Cell Diameter (μm)	Cell Wall Thickness (μm)	Cell Density (cells/cm ³)	Expansion Ratio
PPF	6.2	1.7	9.36×10^8	1.17
PPFG2	17.1	2.5	1.83×10^8	1.73
PPFG5	18.5	2	2.83×10^8	1.60
PPFG10	28.5	6.5	4.08×10^7	1.64

๓.1.4 การวิเคราะห์ความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยลัมบ์ประด

ตารางที่ ๓.4 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟม

Sample	Isotropic Foam index
PPF	2.74
PPFG2	2.30
PPFG5	2.10
PPFG10	2.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แบบจำลองปรากฏการณ์การส่งผ่าน

ข.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์แพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนมีการเลือกใช้สมการที่ 2.4 เพื่อคำนวณหาค่า E_D โดยเบื้องต้นกำหนดให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนคือ -10°C หรือ 263.15 K ดังนี้

$$10^{-3} \frac{E_D}{8.314} = \left(\frac{39.41}{37.98} \right)^2 [7.5 - (2.5 \times 10^{-4} (298 - 263.15)^2)]$$

$$E_D = 64,420.85 \text{ J/mol}$$

นำค่า E_D ที่ได้มาคำนวณหาค่า D_0 จากสมการที่ 2.5 ดังนี้

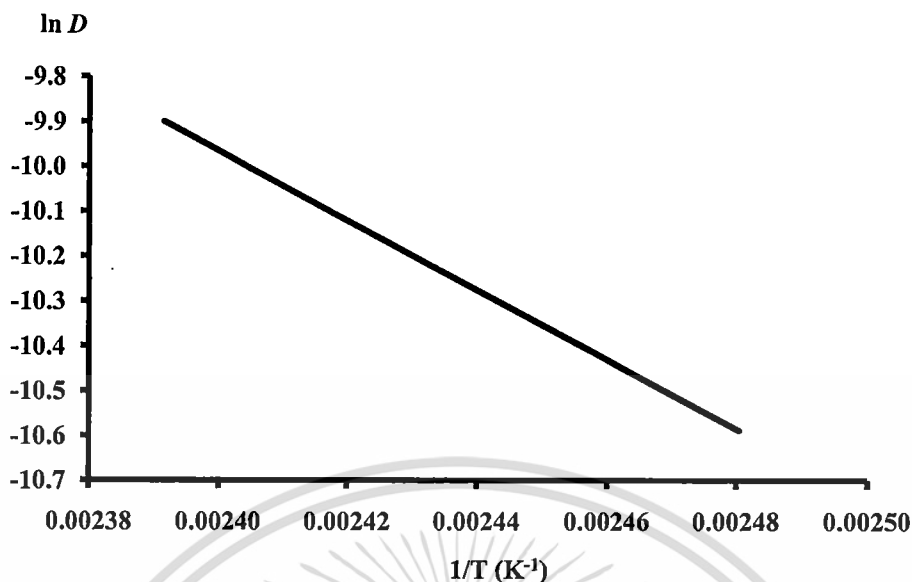
$$\log D_0 = \frac{-64420.85 \times 10^{-3}}{8.314} - 4.0, D_0 = 5.6 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$$

สมมติอุณหภูมิเกิดโพลีมีร์เท่ากับ 140°C เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 2.3 มีค่าเท่ากับ

$$D = 5.6 \times 10^3 \exp\left(\frac{-644420.85}{8.314 \times 413.15}\right)$$

$$D = 4.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

ในขณะที่ผลการคำนวณของสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิเกิดโพลีมีร์ต่างกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข.1



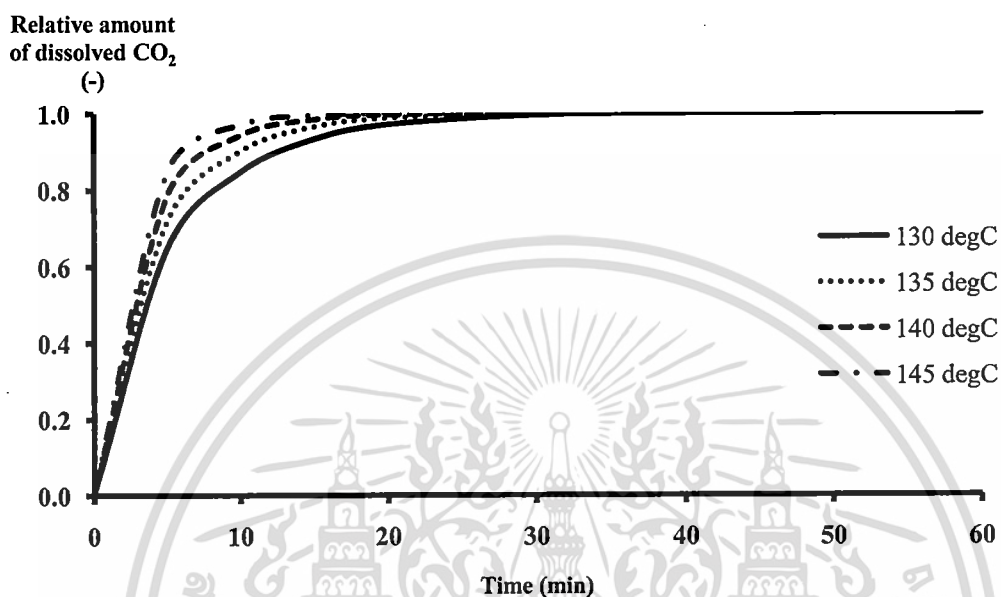
รูปที่ ๑.๑ ความสัมพันธ์ของ $\ln D$ และ $1/T$ ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

ในกระบวนการเกิด โฟมแบบกะนั้นจำเป็นต้องมีการประมาณเวลาอิมิตัวของการที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถแพร่เข้าไปในพอลิโพรพิลีนจนถึงสภาวะอิมิตัวด้วยการคำนวณจากสมการที่ 2.6 โดยกำหนดให้แผ่นพอลิโพรพิลีนมีความหนา 0.2 cm อุณหภูมิเกิด โฟมคือ 140°C ที่เวลา 20 min (1200 s) ซึ่งการคำนวณมีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{\Delta w_{CO_2}(t)}{\Delta w_{CO_2}(t = \infty)} &= 1 \\ &- \left[\frac{8}{(2 \times 0 + 1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2 \times 0 + 1)^2 \times \pi^2 \times 1200}{4 \times (0.2^2)} \right] \right] \\ &+ \frac{8}{(2 \times 1 + 1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2 \times 1 + 1)^2 \times \pi^2 \times 1200}{4 \times (0.2^2)} \right] \\ &+ \frac{8}{(2 \times 2 + 1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2 \times 2 + 1)^2 \times \pi^2 \times 1200}{4 \times (0.2^2)} \right] + \dots \\ &+ \left. \frac{8}{(2 \times 50 + 1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2 \times 50 + 1)^2 \times \pi^2 \times 1200}{4 \times (0.2^2)} \right] \right] = 0.959 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากนำผลการคำนวณของสัดส่วนปริมาณการละลายที่ได้จากการคำนวณและเวลาต่างๆ มาพลอตกราฟดังรูปที่ ข.2 ซึ่งจะสามารถทำนายเวลาที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถแพร่เข้าไปในพอลิโพรพิลีนจนถึงสภาวะอิ่มตัวเมื่อค่าสัดส่วนปริมาณการละลายมีค่าเข้าใกล้ 1



รูปที่ ข.2 สัดส่วนปริมาณการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่ละลายในพอลิโพรพิลีน

ข.2 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

ข.2.1 การประมาณค่าการละลายโดยใช้สมการสถานะของ Sanchez-Lacombe

การประมาณค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนใช้สมการสถานะของ Sanchez-Lacombe โดยใช้โปรแกรม Visual Basic ในการคำนวณและเทียบ ทั้งนี้คำสั่งในการประมาณค่าการละลายมีดังต่อไปนี้

```
Sub solubilitycal()
```

```
Set dataArea = Worksheets("solubility").Range("A1")
```

```
'input characteristic parameter and thermodynamic condition'
```

```
Set dataArea = Worksheets("solubility").Range("A1")
```

```
T = dataArea.Cells(17, 3).Value
```

```
Tst1 = dataArea.Cells(6, 3).Value
```

```
Pst1 = dataArea.Cells(7, 3).Value
```

```
Dst1 = dataArea.Cells(8, 3).Value
```

```
GMW = dataArea.Cells(9, 3).Value
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Tst2 = dataArea.Cells(11, 3).Value
Pst2 = dataArea.Cells(12, 3).Value
Dst2 = dataArea.Cells(13, 3).Value
PMW = dataArea.Cells(14, 3).Value
Pden = dataArea.Cells(15, 3).Value
Wp = dataArea.Cells(20, 3).Value
xk12 = dataArea.Cells(18, 3).Value
```

```
'input initial value of alkane weight, Wal
Set dataArea = Worksheets("solubility").Range("A1")
Wg = dataArea.Cells(24, 3).Value

'input gas constant; R(J/mol.K)
R = 8.314
'Check data number
For IJ = 1 To 100
If dataArea.Cells(IJ + 25, 1).Value = "" Then
N9 = IJ - 1

Exit For
End If
Next IJ
```

```
For IJ = 1 To N9

'input pressure for solubility calculation ; P0 = 0.0 Mpa
Set dataArea = Worksheets("solubility").Range("A1")
P(IJ) = dataArea.Cells(IJ + 25, 1).Value

'calculation of pure component characteristic parameter
vst1 = (R * Tst1) / Pst1
vst2 = (R * Tst2) / Pst2
```

```
r1 = GMW / (Dst1 * vst1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_2 = PMW / (Dst_2 * vst_2)$$

$$Trd_1 = T / Tst_1$$

$$Prd_1(IJ) = P(IJ) / Pst_1$$

$$Drd_1(IJ) = 0$$

$$vst_1 = 3.638$$

$$vst_2 = 17.36$$

$$r_1 = 8.564$$

$$r_2 = 22.989$$

$$Trd_1 = T / Tst_1$$

$$Prd_1(IJ) = P(IJ) / Pst_1$$

$$Drd_1(IJ) = 0$$

'calculation of pure component reduced density

'for gas component

A1:

$$GDrd(IJ) = 1 - (1 / \text{Exp}(Drd_1(IJ) ^ 2 / Trd_1 + (1 - (1 / r_1)) * Drd_1(IJ) + Prd_1(IJ) /$$

Trd_1))

If GDrd(IJ) = Drd_1(IJ) Then

'If Abs(GDrd(IJ) - Drd_1(IJ)) < 0.000001 Then

GoTo A2

Else

Drd_1(IJ) = GDrd(IJ)

GoTo A1

End If

A2:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Co2den(IJ)} = \text{Drd1(IJ)} * \text{Dst1}$$

$$\text{CPpure(IJ)} = r1 * R * T * (-\text{Drd1(IJ)} / \text{Trd1} + \text{Prd1(IJ)} / (\text{Drd1(IJ)} * \text{Trd1}) + ((1 - \text{Drd1(IJ)}) / \text{Drd1(IJ)}) * \text{Log}(1 - \text{Drd1(IJ)}) + (\text{Log}(\text{Drd1(IJ)}) / r1))$$

'Set dataArea=Worksheets("solubility").Range("A1")

'dataArea.Cells(25+IJ, 1)=P(IJ)/1000000#

'dataArea.Cells(25+IJ, 2)=CO2den(IJ)

'dataArea.Cells(25+IJ, 5)=CPpure(IJ)

A7:

'calculation of alkane/gas mass & vol.fraction

$$\text{fm1(IJ)} = \text{Wg} / (\text{Wg} + \text{Wp})$$

$$\text{vf1(IJ)} = (\text{fm1(IJ)} / \text{Dst1}) / ((\text{fm1(IJ)} / \text{Dst1}) + (1 - \text{fm1(IJ)}) / \text{Dst2})$$

$$\text{vf2(IJ)} = (1 - \text{vf1(IJ)})$$

'calculation of the characteristic parameter of mixture

'calculation of the average close-packed volume of mixture, v*=vst

$$\text{pvf1(IJ)} = \text{vf1(IJ)} / (\text{vf1(IJ)} + ((\text{vst1} / \text{vst2}) * \text{vf2(IJ)}))$$

$$\text{pvf2(IJ)} = (1 - \text{pvf1(IJ)})$$

$$\text{vst(IJ)} = (\text{pvf1(IJ)} * \text{vst1}) + (\text{pvf2(IJ)} * \text{vst2})$$

'calculation of P*=Pst

$$\text{Pst12} = (1 - \text{xk12}) * (\text{Pst1} * \text{Pst2}) ^ (0.5)$$

$$\text{DPst} = \text{Pst1} + \text{Pst2} - (2 * \text{Pst12})$$

$$\text{Pst(IJ)} = (\text{vf1(IJ)} * \text{Pst1}) + (\text{vf2(IJ)} * \text{Pst2}) - (\text{vf1(IJ)} * \text{vf2(IJ)} * \text{DPst})$$

'calculation of alkane/gas interaction energy, e*=Est

$$\text{Est(IJ)} = \text{Pst(IJ)} * \text{vst(IJ)}$$

'calculation of T*=Tst

$$\text{CO2X} = (\text{DPst} * \text{vst1}) / (\text{R} * \text{T})$$

$$\text{Tst(IJ)} = \text{Est(IJ)} / \text{R}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

'calculation of characteristic density of mixture $D^*=D_{st}$, $v_{sp}^*=v_{spst}$

$$D_{st}(IJ) = 1 / ((f_{m1}(IJ) / D_{st1}) + ((1 - f_{m1}(IJ)) / D_{st2}))$$

'calculation of the total number of site is occupied by alkane/gas $r=mix$

$$g_{mole}(IJ) = W_g / GMW$$

$$p_{mole} = W_p / PMW$$

$$t_{mole}(IJ) = g_{mole}(IJ) + p_{mole}$$

$$x_{f1}(IJ) = g_{mole}(IJ) / t_{mole}(IJ)$$

$$R_{mix}(IJ) = x_{f1}(IJ) * r_1 + (1 - x_{f1}(IJ)) * r_2$$

'calculation of reduced parameter of mixture

$$Trd(IJ) = T / T_{st}(IJ)$$

$$Prd(IJ) = P(IJ) / P_{st}(IJ)$$

$$Drd(IJ) = 0$$

A8:

$$B(IJ) = 1 - (1 / \text{Exp}((Drd(IJ))^2 / Trd(IJ) + (1 - (1 / R_{mix}(IJ))) * Drd(IJ) + Prd(IJ) / Trd(IJ)))$$

If $B(IJ) = Drd(IJ)$ Then

GoTo A9

Else

$$Drd(IJ) = B(IJ)$$

GoTo A8

End If

Stop

A9:

'calculation Density of mixture and spec volume of mixture $V_{mix}(T,P,Wal)$

$$D(IJ) = Drd(IJ) * D_{st}(IJ)$$

$$V_{mix}(IJ) = 1 / D(IJ)$$

A10:

```
Set dataArea = Worksheets("solubility").Range("A1")
```

```
'dataArea.Cells(25+IJ),4)=Wal
```

```
'calculation of alkane weight
```

```
vf1cal(IJ) = 0
```

A11:

```
term1(IJ) = r1 * (-Drd(IJ) / Trd1 + Prd1(IJ) / (Trd1 * Drd(IJ)) + ((1 - Drd(IJ)) /  
Drd(IJ)) * Log(1 - Drd(IJ)) + (Log(Drd(IJ)) / r1))
```

```
term2(IJ) = (1 - (r1 / r2)) * (1 - vf1cal(IJ)) + r1 * Drd(IJ) * CO2X * ((1 -  
vf1cal(IJ)) ^ 2)
```

```
Bvf1cal(IJ) = Exp(CPpure(IJ) / (R * T) - term1(IJ) - term2(IJ))
```

```
If Bvf1cal(IJ) > 1 Then
```

```
dataArea.Cell(19, 6) = "Overflow"
```

```
End
```

```
Else
```

```
GoTo A12
```

```
End If
```

A12:

```
If Abs(Bvf1cal(IJ) - vf1cal(IJ)) < 0.000001 Then
```

```
GoTo A13
```

```
Else
```

```
vf1cal(IJ) = Bvf1cal(IJ)
```

```
GoTo A11
```

```
End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A13:

$$m1cal(IJ) = (vf1cal(IJ) / Dst2) / (1 / Dst1 - vf1cal(IJ) / Dst1 + vf1cal(IJ) / Dst2)$$

$$Wgascal(IJ) = m1cal(IJ) * Wp / (1 - m1cal(IJ))$$

$$m2cal(IJ) = 1 - m1cal(IJ)$$

$$dataArea.Cells(25 + IJ, 7) = Wgascal(IJ) - Wg$$

If Abs(Wgascal(IJ) - Wg) < 0.000001 Then

GoTo A14

Else

Wg = Wgascal(IJ)

GoTo A7

End If

A14:

'Print characteristic parameter

Set dataArea = Worksheets("solubility").Range("A1")

dataArea.Cells(25 + IJ, 4) = Wgascal(IJ)

dataArea.Cells(25 + IJ, 9) = Trd(IJ)

dataArea.Cells(25 + IJ, 10) = Prd(IJ)

dataArea.Cells(25 + IJ, 11) = Drd(IJ)

dataArea.Cells(25 + IJ, 12) = D(IJ)

dataArea.Cells(25 + IJ, 13) = m1cal(IJ)

'input initial value of alkane weight, Wal

Wg = dataArea.Cells(24, 3).Value

Next IJ

End Sub

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำแบบจำลองที่ได้ข้างต้นนั้นมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์รีเกรสชัน โดยเบื้องต้นนำค่าการละลายของจากผลการทดลองของ Da-chao Li และคณะ [31] ดังแสดงได้ดังตารางที่ ข.1 มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์ จากนั้นนำผลค่าการละลายด้วยวิธีการวิเคราะห์รีเกรสชันถูกด้วยการปรับเปลี่ยนค่า k_{12} จากการประมาณค่าการละลายของสมการสภาวะ Sanchez-Lacombe เปรียบเทียบกับค่าการละลายจากผลการทดลอง พบว่าผลที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ ข.3 และเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์พบว่าเมื่ออุณหภูมิสัมบูรณ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า k_{12} ลดลง ดังรูปที่ ข.4

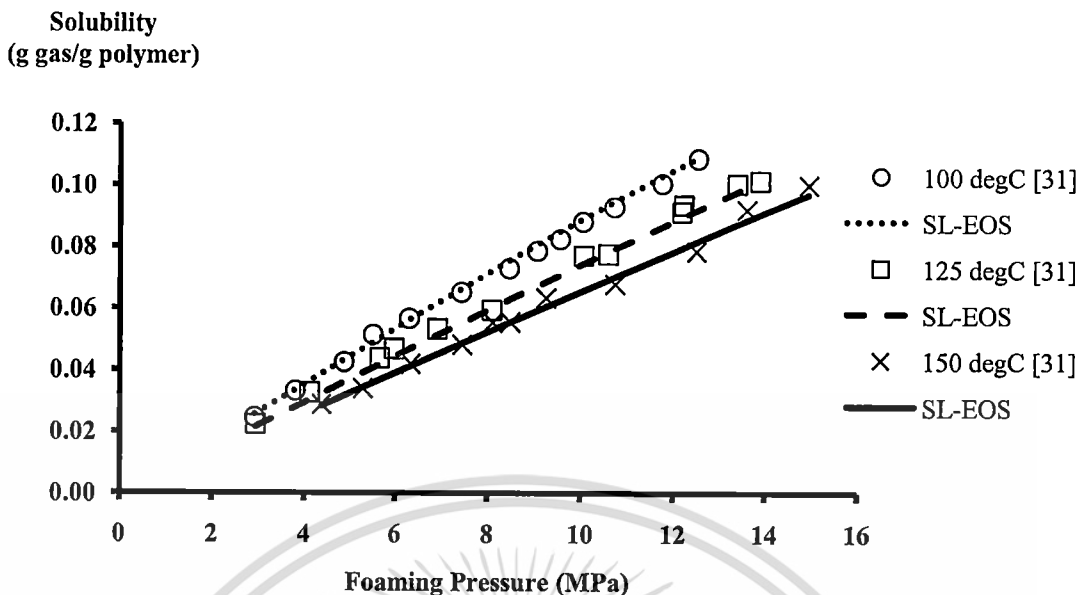
ตารางที่ ข.1 ค่าการละลายของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

Temperature (K)	Pressure (MPa)	Solubility (g-CO ₂ /g-PP)
423.15	4.39	0.02883
	5.3	0.03402
	6.35	0.04199
	7.46	0.04814
	8.12	0.05533
	8.5	0.05552
	9.27	0.06341
	10.75	0.06787
	12.52	0.07849
	13.62	0.09209
	14.96	0.1001

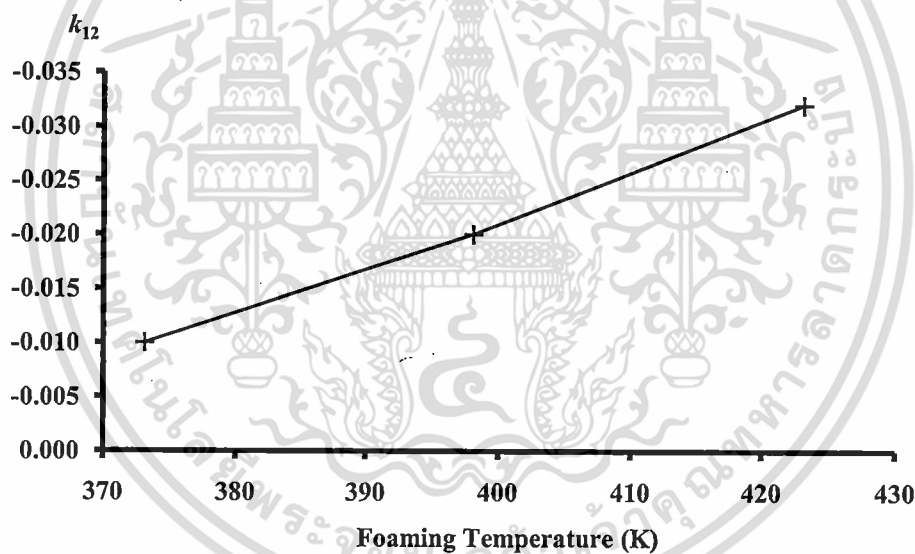
ตารางที่ ข.1 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน (ต่อ)

Temperature (K)	Pressure (MPa)	Solubility (g-CO ₂ /g-PP)	
398.15	2.95	0.02249	
	4.12	0.03282	
	5.66	0.04387	
	5.98	0.04695	
	6.92	0.05339	
	8.1	0.05952	
	10.07	0.07716	
	10.6	0.07764	
	12.19	0.09144	
	12.23	0.09366	
	13.41	0.10054	
	13.9	0.10146	
	373.15	2.93	0.02469
		3.81	0.03324
		4.89	0.04255
5.52		0.05144	
6.31		0.05667	
7.44		0.06521	
8.48		0.07291	
9.08		0.07864	
9.57		0.08245	
10.06		0.08818	
10.73		0.09291	
11.76		0.10054	
12.55	0.10862		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

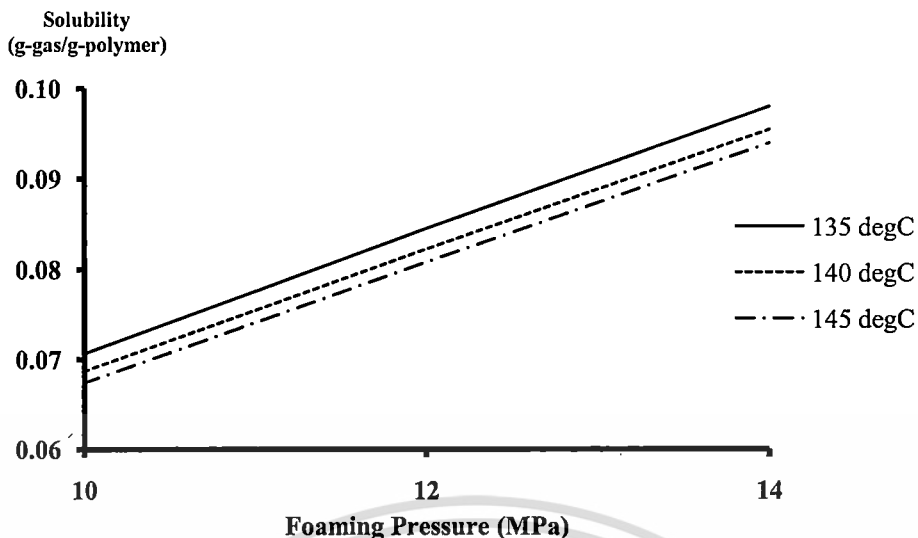


รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าการละลายที่ได้จากการทดลอง [31] และจากการลองผิดลองถูกค่า k_{12}

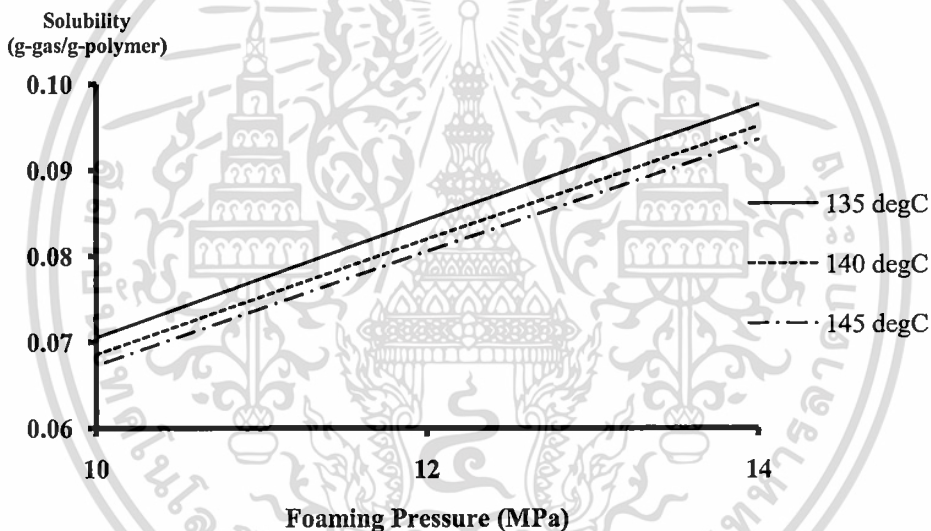


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์

เมื่อนำแบบจำลองและความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{12} และอุณหภูมิสัมบูรณ์ มาวิเคราะห์ค่าการละลายของพอลิเมอร์ PP-A และ PP-B ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ ๕.5 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ PP-A



รูปที่ ๕.6 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์ PP-B

๕.2.2 การประมาณค่าการละลายโดยใช้กฎของ Henry

ตัวอย่างการคำนวณค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$10^{-3} \frac{\Delta H_S}{8.314} = 1.0 - 0.010 \times 195.2, \Delta H_S = 6,691.11 \text{ J/mol}$$

$$\log S_0 = -5.5 - 0.005 \times 195.2, S_0 = 3.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3 \cdot \text{Pa}$$

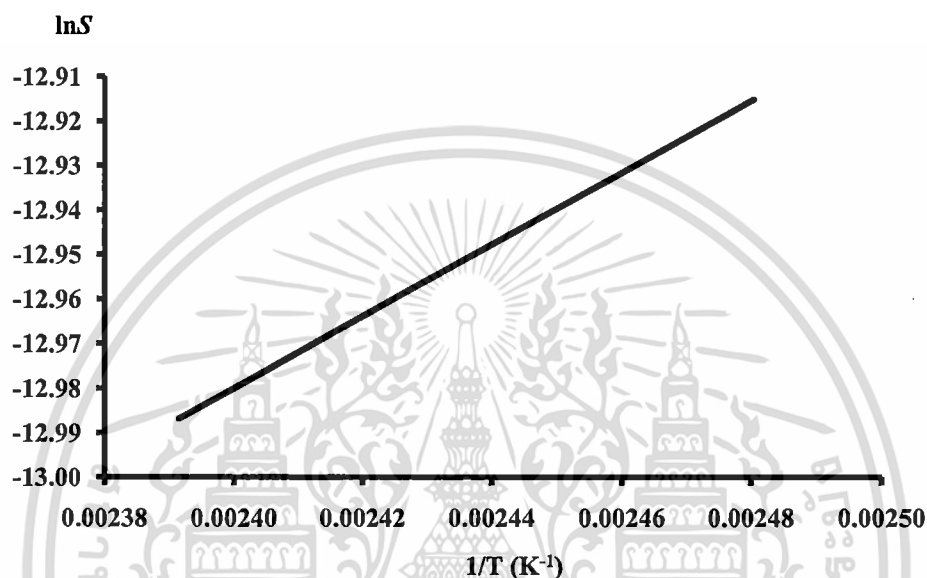
ตัวอย่างการคำนวณค่าการละลายที่อุณหภูมิเกิดโฟม 140°C แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = 3.3 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{6691.11}{8.314 \times 413.15}\right), S = 2.3 \times 10^{-6}$$

$$S = 2.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3 \cdot \text{Pa}$$

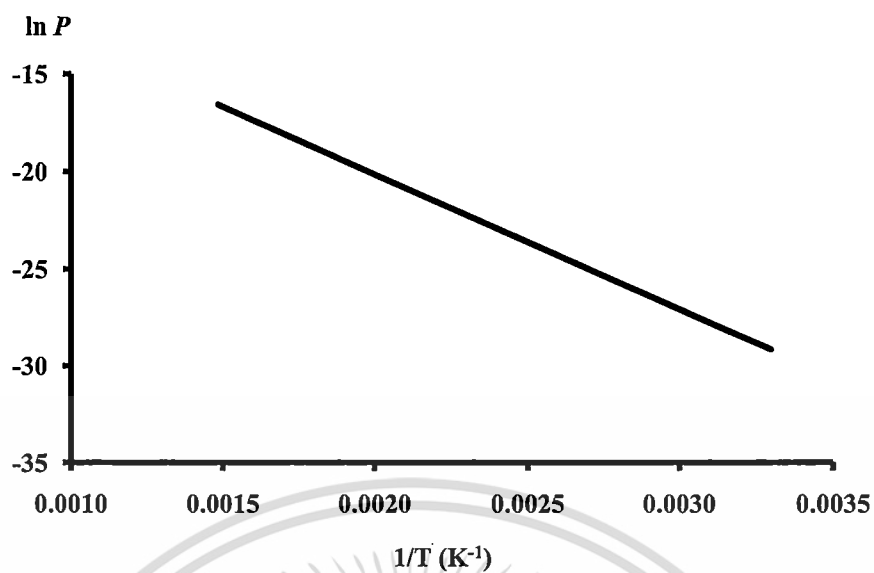
หากวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การละลายที่อุณหภูมิเกิดโพลต่างกันพบว่ามีความโน้มถ่วงเพียงแต่สังเกตได้ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 สัมประสิทธิ์การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

ข.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านเกิดจากการรบกวนกันของสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายซึ่งสามารถแสดงผลการคำนวณได้ดังรูปที่ ข.8



รูปที่ ๘.๘ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิโพรพิลีน

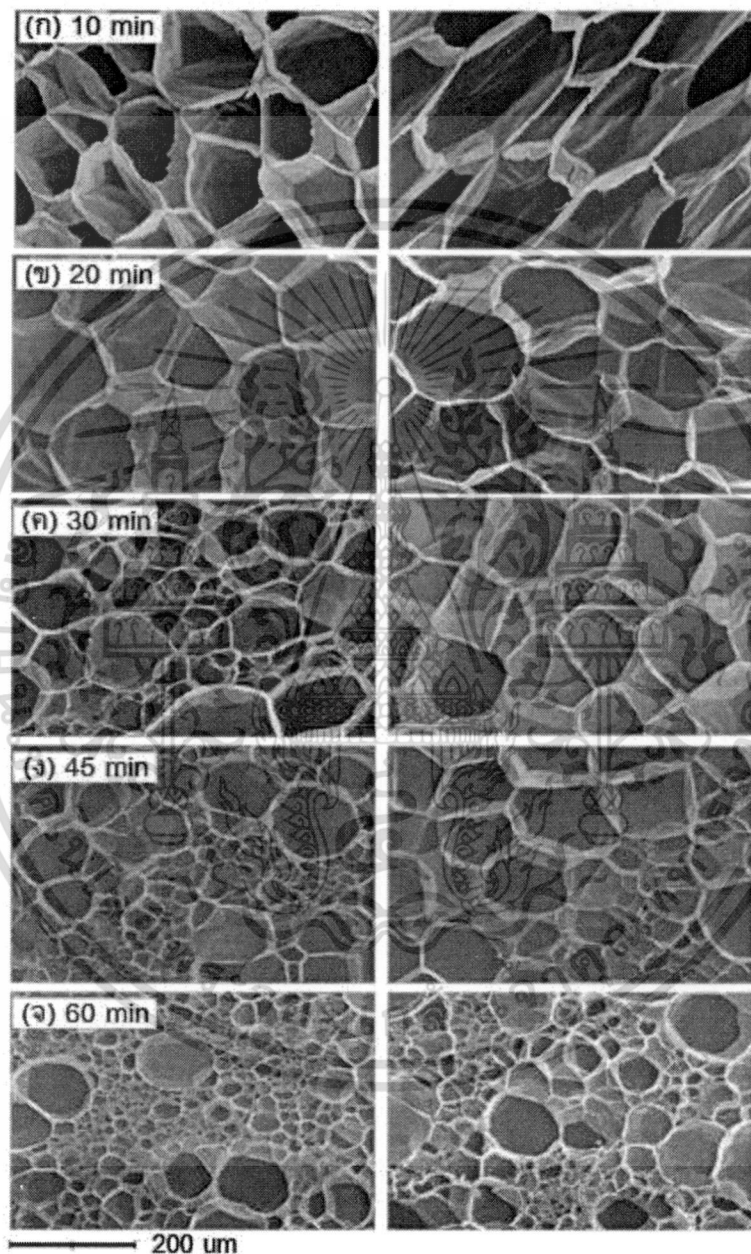


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ

ผลการทดลองของการเกิดพอลิพรพิลีนโฟม

ซ.1 การศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ



รูปที่ ซ.1 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม ที่เวลาต่างๆ ที่มีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

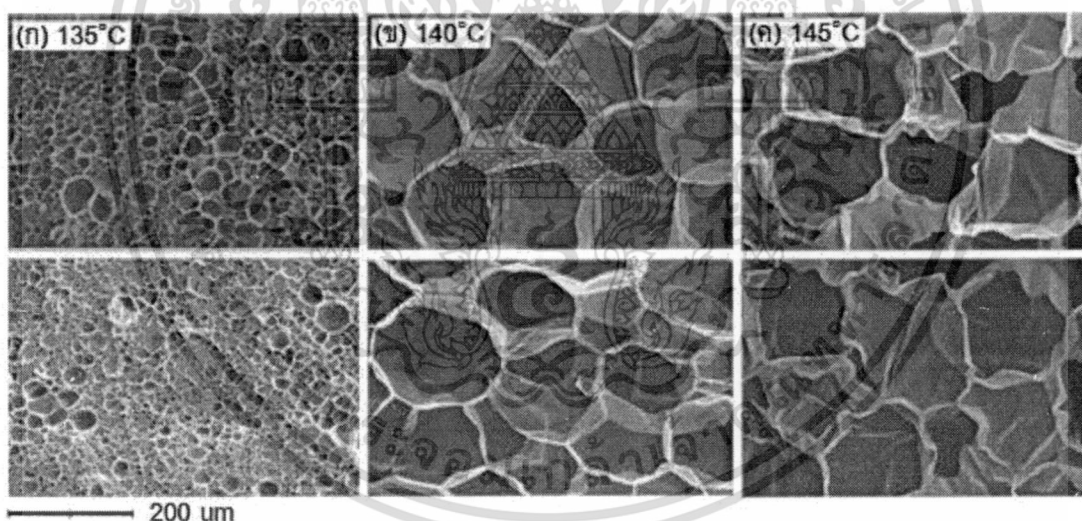
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ.1 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A โฟม ที่สภาวะความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

Time (min)	Expansion Ratio (-)	Cell Diameter (μm)	Cell Density (cells/cm ³)
10	24.6	155.8	5.3×10^5
20	23.5	122.9	6.7×10^5
30	20.1	61.4	2.7×10^7
45	16.0	64.1	9.0×10^7
60	18.0	49.3	8.6×10^7

ซ.2 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

เมื่อนำพอลิโพรพิลีน โฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆกัน มาวิเคราะห์พื้นผิวเพื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ซ.2 และผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ ซ.2



รูปที่ ซ.2 ภาพไมโครกราฟของ PP-A โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

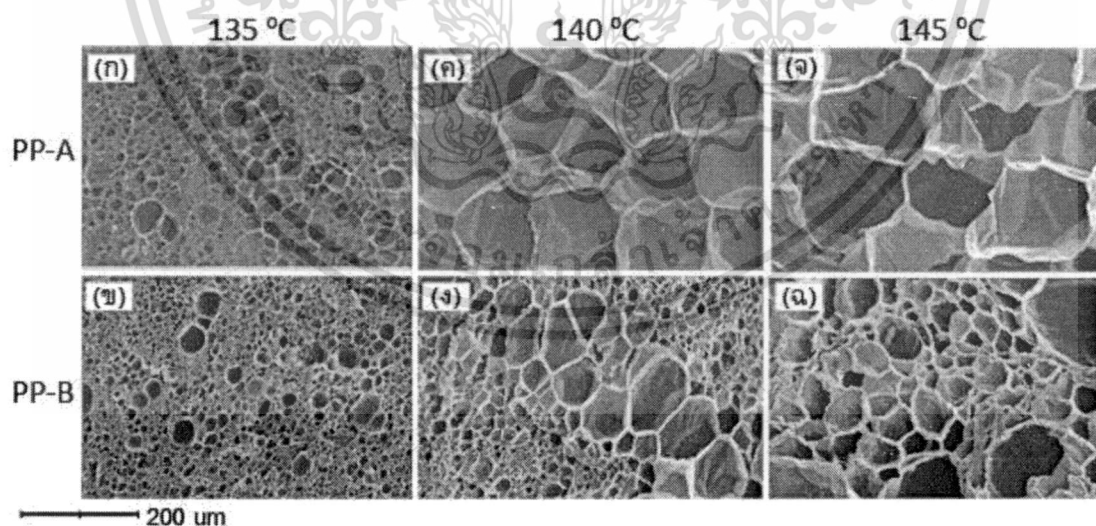
Foaming Temperature (°C)	PP Density (g/cm ³)	Foam Density (g/cm ³)	Expansion Ratio (-)	Cell Diameter (µm)	Cell Density (cells/cm ³)
135	0.9097	0.0853	10.9	11.2	1.4x10 ⁹
140	0.9007	0.0387	23.5	122.9	6.7x10 ⁵
145	0.9167	0.0980	9.3	142.3	3.9x10 ⁵

เมื่อนำค่าของความหนาแน่นของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนโฟมมาคำนวณหาค่า สัดส่วนการขยายตัวตามสมการ 2.23 ดังตัวอย่างเช่น

$$\phi = \frac{\rho_P}{\rho_F} = \frac{0.9167}{0.0980} = 9.3$$

เพราะฉะนั้นสัดส่วนการขยายตัวคือ 9.3 เท่า

ข.3 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โฟม



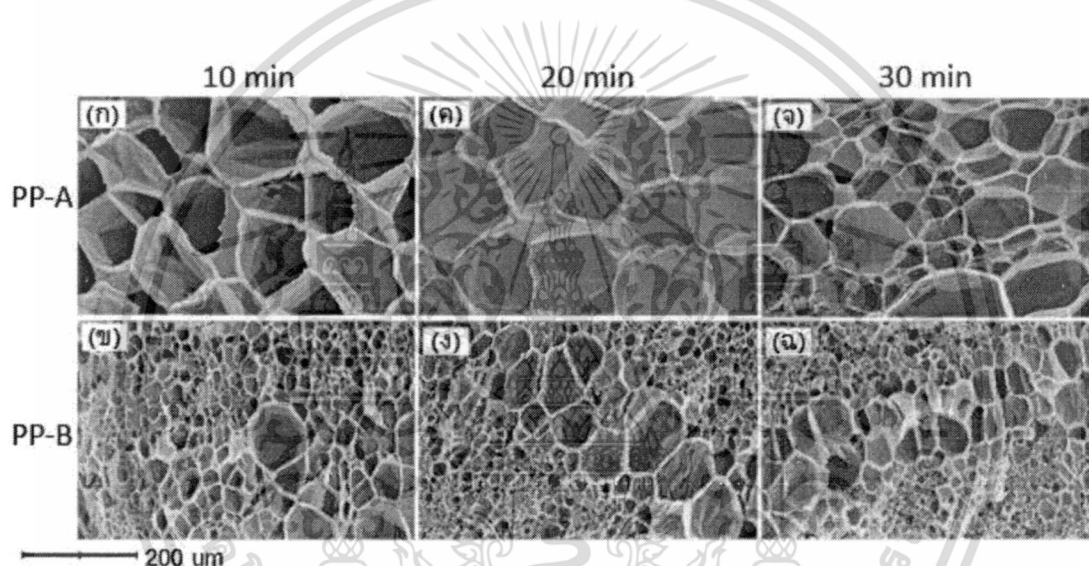
รูปที่ ข.3 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ และมีสภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa และเวลา 20 min

Foaming Temperature (°C)	Expansion Ratio (-)	Cell Diameter (μm)	Cell Density (cells/cm ³)
135	14.7	11.1	3.9×10^9
140	19.3	16.8	7.5×10^8
145	10.9	108.9	1.0×10^7

ข.4 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-A และ PP-B โฟม



รูปที่ ข.4 ภาพไมโครกราฟของ PP-A และ PP-B โฟม ที่เวลาต่างๆ และคือความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

ตารางที่ ข.4 ผลของเวลาที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของ PP-B โฟม ที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันเกิดโฟม 12 MPa และอุณหภูมิเกิดโฟม 140°C

Time (min)	Expansion Ratio (-)	Cell Diameter (μm)	Cell Density (cells/cm ³)
10	20.5	73.1	3.2×10^8
20	19.3	16.8	7.5×10^8
30	12.6	28.6	6.9×10^8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ.4 การวิเคราะห์ความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของ PP-A และ PP-B โฟม

การคำนวณดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24 – 2.26 โดยตัวอย่างการคำนวณของ PP-A โฟม ที่ความดันเกิดโฟม 12 MPa อุณหภูมิเกิดโฟม 145°C และเวลา 20 นาที พบว่ามีสัดส่วนการขยายตัว 9.3 และขนาดเซลล์ 142.3 μm แสดงได้ดังนี้

$$N_{F,MB} = \frac{6}{\pi(d)^3} \left(1 - \frac{1}{\phi}\right) = \frac{6}{\pi(142.3 \times 10^{-4})^3} \left(1 - \frac{1}{9.3}\right) = 5.9 \times 10^5 \text{ cells/cm}^3$$

กำหนดให้ไอโซโทรปิกแฟคเตอร์ (φ_0) ของโฟมความหนาแน่นต่ำมีค่าเท่ากับ 0.1453

$$N_F^0 = \varphi_0 \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2} = 0.1453 \times (5.3 \times 10^3)^{3/2} = 5.6 \times 10^4 \text{ cells/cm}^3$$

$$\eta = \log\left(\frac{N_{F,MB}}{N_F^0}\right) = \log\left(\frac{5.9 \times 10^5}{5.6 \times 10^4}\right) = 1.022$$

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกโฟมของ PP-A และ PP-B โฟม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ซ.5 และ ซ.6 ตามลำดับ

ตารางที่ ซ.5 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของ PP-A โฟม

Foaming Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Time (min)	Isotropic Foam Index
135	20	1.013
	10	0.907
	20	1.041
140	30	0.566
	45	0.085
	60	1.674
	20	1.021

ตารางที่ ซ.6 ดัชนีความเป็นโฟมไอโซโทรปิกของ PP-B โฟม

Foaming Temperature (°C)	Time (min)	Isotropic Foam Index
135	20	0.355
	10	-0.962
140	20	0.481
	30	-0.060
145	20	0.248



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

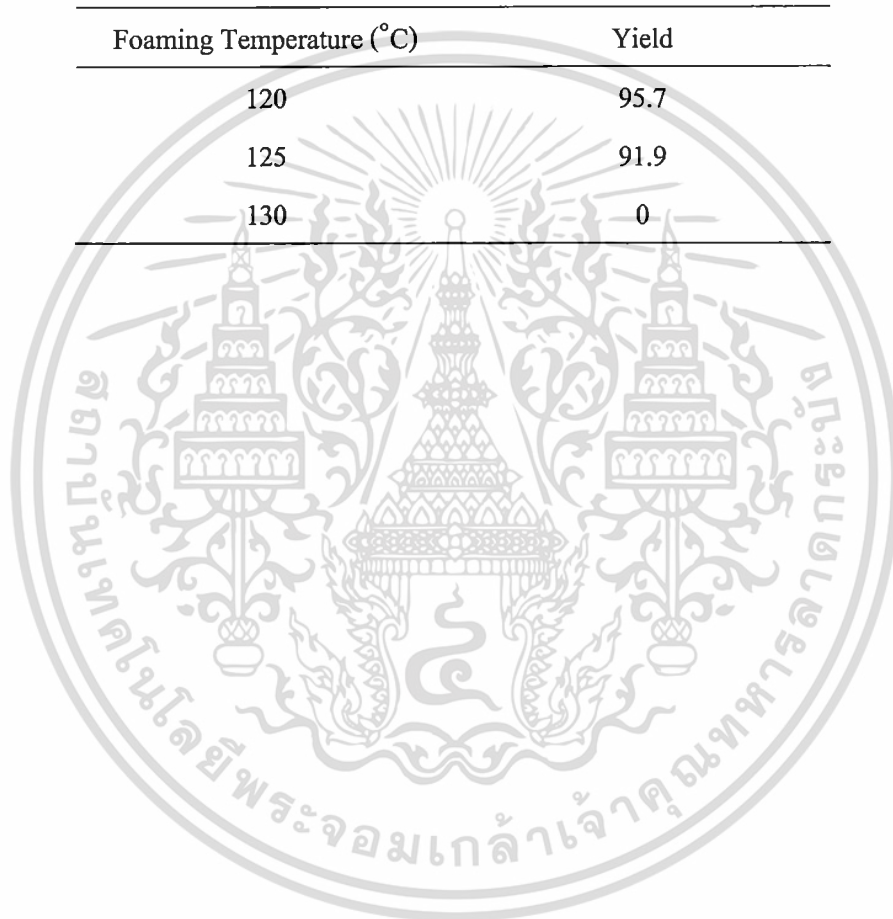
ภาคผนวก ฅ

ผลการทดลองของการเกิด PP-B โฟมบีดส์

ฅ.1 การศึกษาช่วงอุณหภูมิเกิดโฟมที่เหมาะสมต่อการเกิดโฟมของ PP-B โฟมบีดส์

ตารางที่ ฅ.1 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อ PP-B โฟมบีดส์ ที่สภาวะเกิดโฟมคือความดันเกิดโฟม 10 ± 2 MPa และเวลา 120 min

Foaming Temperature ($^{\circ}$ C)	Yield
120	95.7
125	91.9
130	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤตสามารถ
เริ่มต้นคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของเฮกเซนจากสมการ

$$\frac{C_{p,\text{Hexane}}}{8.314} = 3.025 + 53.722 \times 393.15 - 16.791 \times 393.15^2$$

$$C_{p,\text{Hexane}} = 179.27 \text{ J/mol.K}$$

ถัดมาจึงคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์

$$\frac{C_{p,\text{Hexane}}}{8.314} = 5.457 + 1.045 \times 393.15 - 1.157 \times 10^{-5} \times 393.15^{-2}$$

$$C_{p,\text{CO}_2} = 42.57 \text{ J/mol.K}$$

โดยความจุความร้อนจำเพาะของของผสม ที่สัดส่วนโดยโมลเฮกเซน คือ 0.02 สามารถ
คำนวณได้ดังนี้

$$C_{p,\text{mix}} = 0.02 \times 179.27 + 0.08 \times 42.57$$

$$C_{p,\text{mix}} = 45.31 \text{ J/mol.K}$$

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล ณัฐพงศ์ เชื้อพล

วันเดือนปีเกิด 3 เมษายน 2530

อีเมล n.chuapon@gmail.com

ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปีที่สำเร็จการศึกษา	ชื่อสถานศึกษา
วศ บ.สาขาวิศวกรรมเคมี	2552	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ในการทำงาน

- ฝึกงานที่บริษัทไทยโพลีเอททีลีนจำกัด (TPE) ในหน่วยงานวิจัย ระยะเวลาในการฝึกงาน
17 มีนาคม – 16 พฤษภาคม 2551

ผลงานวิชาการ

- 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.

- ณัฐพงศ์ เชื้อพล, ปิยพงศ์ บัวโฮม, รัชพล ตั้งนพภูถ, วุฒิพงษ์ รังษีสันติวานนท์ และ สุรัตน์ อารีรัตน์ “การศึกษาผลของ MA-g-PP ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโฟมเสริมแรงเส้นใยสับปะรด” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27 ฉบับที่ 2 กันยายน 2553 หน้า 49-54.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้