

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้ประโยชน์จากเศษฉนวนเส้นใยแก้วสำหรับการเตรียม
พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตไฟม



นางสาวรัฐกานต์ นิลกำแหง
นางสาวทวิพร วงศ์เชียว

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **62100**
วัน,เดือน,ปี **31 ก.ค. 2549**

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

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UTILIZATION OF GLASS FIBER WASTE FOR PREPARATION OF
POLYPROPYLENE COMPOSITE FOAM



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

คาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเหนือวิกฤติเข้าไปในเนื้อพอลิพรอพิลีนโดยตรง เพื่อช่วยทำให้เกิด เซลล์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ซึ่งสภาวะที่ใช้เตรียมไมโครเซลลูลาร์โฟมมีดังนี้คือ ป้อน คาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเหนือวิกฤติเข้าถึงปฏิกรณ์ความดันสูง ที่บรรจุตัวอย่างพอลิพรอพิ- ลีนคอมโพสิต ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง ภายใต้ความดัน 10 และ 14 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ

จากผลการศึกษาลักษณะวิทยา พบว่าสามารถเตรียมไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพ- ลิตโฟมได้โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ประมาณ 170-200 นาโนเมตร และมีความหนาแน่นของเซลล์ประมาณ 10^{16} เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และจากผลการศึกษามบัติเชิงกลพลวัต (DMA) ของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม แสดงให้เห็นว่าเศษฉนวนเส้นใยแก้วสามารถนำมาประยุกต์ใช้แทนเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ได้ ดังนั้นการผลิตไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม จึงจัดว่าเป็นแนวทางที่น่าสนใจ ในการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะการนำเศษฉนวนเส้นใยแก้วมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Utilization of Glass Fiber Waste for Preparation of Polypropylene Composite Foam

By Miss Nattakarn Ninkamhaeng
Miss Tawiporn Wongkeaw

Advisor Dr. Surat Areerat

Report for Bachelor's Degree of Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

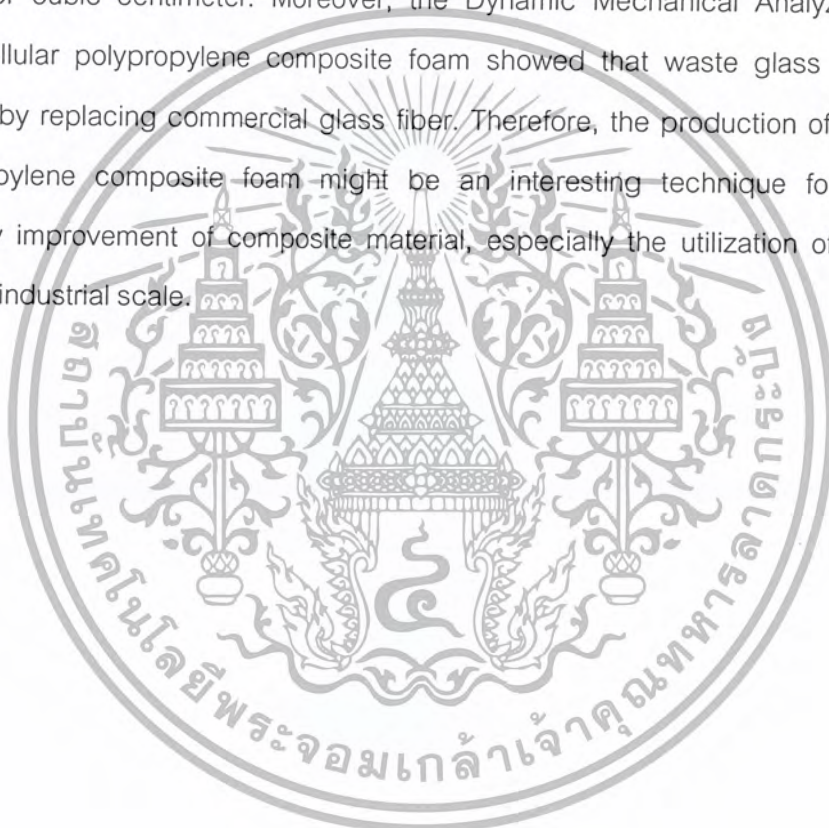
The purpose of this research is the utilization of waste glass fiber insulator as composite material for microcellular polypropylene composite foam preparation. Waste glass fiber samples were supplied by heat insulator plant. Polypropylene composites were prepared by melt mixing of polypropylene with glass fiber using an internal mixer at rotor speed 70 rpm, at given temperature 190 °C and mixing time 8-18 min per batch, varying polypropylene to glass fiber ratio as 90/10, 80/20 and 70/30, respectively. Then hot compression molding was used to form polypropylene composite sheets which 2 mm thickness at constant temperature 210 °C. Mechanical properties of polypropylene composite were investigated by universal tensile testing machine, while their morphology were observed by SEM. From the experimental results, it found that when the ratio of glass fiber increased, tensile strength and elongation at break decreased but Young's modulus increased. And we obviously found that commercial glass fiber shows better mechanical properties than waste glass fiber. Especially, high modulus of polypropylene composite with commercial glass fiber could be obtained. From morphology investigation, SEM micrographs have shown that weak interaction between glass fiber and polypropylene matrix can be observed. Clearly, that this weak interaction leads to decreasing of tensile strength and elongation at break.

To improve the mechanical properties of waste glass fiber polypropylene composite this research has applied Microcellular foam preparation technique. By

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของคณะผู้จัดทำเอกสารนี้ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

physical foaming method, supercritical carbon dioxide is directly dissolved into polypropylene composite. This method aims to obtain microcellular foam with all diameters in the range of micrometer. The microcellular foaming was conducted by feeding supercritical carbon dioxide into high pressure reactor where contains polypropylene composite samples at given temperature 150 °C, soaking time 3-5 hr per batch under carbon dioxide pressure 10 and 14 MPa.

Morphology studies resulted that microcellular polypropylene composite foam can be prepared which bubble diameter about 170-200 nm and bubble density about 10^{16} cells per cubic centimeter. Moreover, the Dynamic Mechanical Analyzing, DMA of microcellular polypropylene composite foam showed that waste glass fiber can be utilized by replacing commercial glass fiber. Therefore, the production of microcellular polypropylene composite foam might be an interesting technique for mechanical property improvement of composite material, especially the utilization of waste glass fiber as industrial scale.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่ให้คำปรึกษา ดูแลเอาใจใส่การทำงาน ตลอดจนให้คำแนะนำรวมทั้งความรู้ และประสบการณ์ ในการทำงานที่ดี

ขอขอบพระคุณบริษัทไมโครไฟเบอร์อุตสาหกรรมจำกัด สำหรับความอนุเคราะห์เส้นใยแก้วที่ใช้ในการทำโครงงานวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และดร.บรรพต ไ้มั่งาม นักวิจัยฝ่ายวิศวกรรมพลาสติก รวมถึงพี่ๆ ผู้ช่วยนักวิจัยทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ต่างๆ และการดูแลตลอดการทำงาน

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

สำหรับคุณความดีที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดามารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่ได้ให้ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี
อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใดในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้ดำเนินโครงงานวิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิจัย
นางสาวณัฐกานต์ นิลกำแหง
นางสาวทวิพร วงศ์เขียว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินโครงการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 คอมโพสิต.....	5
2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต.....	6
2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต.....	7
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานของคอมโพสิต (Composites Applications).....	8
2.3 เส้นใยแก้ว.....	8
2.4 โฟม.....	11
2.5 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์.....	12
เหนือวิกฤติในพอลิเมอร์	
2.5.1 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ (Supercritical Carbon dioxide:.....	12
sc-CO ₂)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์.....	12
(Self-Diffusion and Mutual Diffusion Coefficients)	
2.5.3 สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายพอลิเมอร์ต่อ.....	16
คาร์บอนไดออกไซด์	
2.5.4 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์.....	19
2.6 การคำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์.....	20
2.7 การคำนวณขนาดและจำนวนเซลล์ในเนื้อโฟม.....	22
2.8 การวัดสมบัติเชิงกลพลวัต.....	23
2.8.1 การประยุกต์ใช้งานของเครื่องวัดสมบัติเชิงกลพลวัต.....	24
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	26
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	26
3.2.1 การผสมและการขึ้นรูปพลาสติกผสม.....	26
3.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	28
3.2.3 ศึกษาโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่อง.....	29
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	
3.2.4 คำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซในพลาสติก (Soaking Time).....	30
3.2.5 การทำไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม.....	30
3.2.6 ศึกษาฐานฐานวิทยาของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม.....	31
ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	
3.2.7 หาความหนาแน่นอัตราการขยายตัวของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีน.....	31
คอมโพสิตโฟม	
3.2.8 ศึกษาสมบัติเชิงกลของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม.....	32
ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	33
4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	33
4.1.1 สมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	34
4.1.2 สมบัติร้อยละการยืดตัวของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	35
4.1.3 สมบัติโมดูลัสของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	36
4.2 ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	37
4.2.1 ลักษณะการยึดเกาะของพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยแก้ว.....	37
4.2.2 ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยแก้วในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	38
4.3 ไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม.....	39
4.3.1 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม....	40
4.3.2 ผลของความดันที่ใช้เตรียมไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม...	41
4.3.3 อัตราการขยายตัวของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม.....	43
4.3.4 ความหนาแน่นของเซลล์ไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม.....	45
4.3.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์.....	52
เหนือวิกฤติในพอลิพรอพิลีน	
ภาคผนวก ข การคำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิพรอพิลีน.....	62
ภาคผนวก ค ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัส.....	63
ของพอลิพรอพิลีน และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต	
ภาคผนวก ง สมภาวะที่ใช้ในการทำโฟม.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ ความหนาแน่นเฉลี่ยและอัตราการขยายตัวของพอลิพรอพิลีนและ.....	70
ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต	
ภาคผนวก ฉ การคำนวณจำนวนเซลล์.....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต.....	8
2.2 สัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิ..... และความดันต่างๆ	16
2.3 พารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิพรอพิลีน.....	17
2.4 ค่าความสามารถการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	20
3.1 คุณสมบัติของเส้นใยแก้ว.....	27
4.1 ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตและไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีน..... คอมโพสิตโฟมที่เตรียมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดันของก๊าซคาร์บอนได- ออกไซด์เท่ากับ 14 เมกกะปาสคาล	43
4.2 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์และผลการคำนวณจำนวนเซลล์ของไมโครเซลลูลาร์..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ 14 เมกกะปาสคาล	46
ก-1 ผลการคำนวณค่า $\ln \rho$ และ μ	61
ค-1 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน.....	63
ค-2 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 10%F1	63
ค-3 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 20%F2	63
ค-4 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 30%F1	64
ค-5 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 10%F2	64
ค-6 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 20%F1	64
ค-7 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 30%F1	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-8 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 10%NF	65
ค-9 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 20%FN	65
ค-10 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต 30%NF	66
ง-1 สภาวะที่ใช้ในการทำไฟมครั้งที่ 1	67
ง-2 สภาวะที่ใช้ในการทำไฟมครั้งที่ 2	68
ง-3 สภาวะที่ใช้ในการทำไฟมครั้งที่ 3	69
จ-1 อัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตไฟม	70
ฉ-1 ผลการคำนวณจำนวนเซลล์	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างแก้วโซเดียมซิลิเกต.....	9
2.2 กระบวนการผลิตเส้นใยแก้ว	10
2.3 เวลาที่ใช้ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์.....	21
2.4 ลูกตุ้มที่ทำให้เกิดการบิดและการดึงในทิศทางเดียวแบบหลายๆ ครั้ง..... (การให้แรงเป็นจังหวะ)	23
3.1 โรเตอร์แบบโรลเลอร์และเครื่องผสมพลาสติก.....	27
3.2 เครื่องบดพลาสติกและเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน.....	28
3.3 ชิ้นงานขนาดตาม ASTM D 638 Type 4 และเครื่องทดสอบสมบัติต้านทาน..... แรงดึงยืด (Tensile Test Machine)	29
3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... (Scanning Electron Microscopy: SEM)	30
3.5 เครื่องขึ้นโฟมแบบอัดความดันสูงและตำแหน่งวาล์ว.....	31
3.6 เครื่องทดสอบความหนาแน่น (Electronic Densimeter).....	32
3.7 เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA).....	32
4.1 ผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วต่อค่าความแข็งแรงดึงของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต	34
4.2 ผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วต่อค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุดของ..... พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต	35
4.3 ผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วต่อค่าโมดูลัสของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต.....	36
4.4 สันฐานวิทยาการยึดเกาะของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับเส้นใยแก้วในอัตราส่วน..... 90/10 สำหรับเส้นใยแก้วชนิดต่างๆ	37
4.5 สันฐานวิทยาการกระจายตัวของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับเส้นใยแก้วในอัตราส่วน..... 70/30 สำหรับเส้นใยแก้วชนิดต่างๆ	38
4.6 สันฐานวิทยาของไมโครเซลลูโลสพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสความดัน 10 เมกกะปาสคาล กำลังขยาย 2500 เท่า	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การเปรียบเทียบการเกิดโฟมของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 10 และ 14 เมกกะปาสคาล กำลังขยาย 2500 และ 10000 เท่า	42
4.8 อัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้ว แต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ	44
4.9 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตโดยเปรียบเทียบค่าโมดูลัสระหว่างไมโครเซลลูลาร์ พอลิพรอพิลีนโฟมและไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเศษฉนวน เส้นใยแก้วชนิดผง	47
4.10 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิพรอพิลีนโฟมและไมโครเซลลูลาร์ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดผงและเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์	48
ก-1 ทิศทางการถ่ายโอนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านพอลิเมอร์	52
ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ทางเคมีกับ ln (สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์)	59

สัญลักษณ์

A	พารามิเตอร์คงที่สำหรับสมการการแพร่	$[cm^2 \cdot mol / (J \cdot s)]$
A_i	แอมพลิจูดของการแกว่งครั้งที่ i	$[-]$
A_d	พารามิเตอร์คงที่สำหรับสมการของ Fujita	$[cm^2 / s]$
A'	พารามิเตอร์คงที่สำหรับสมการของ Maeda และ Paul	$[Pa \cdot s]$
B	พารามิเตอร์คงที่สำหรับสมการการแพร่	$[cm^3 / g]$
B_d	พารามิเตอร์คงที่สำหรับสมการของ Fujita	$[-]$
B'	พารามิเตอร์คงที่สำหรับสมการของ Maeda และ Paul	$[-]$
c	ความเข้มข้นของก๊าซ	$[mol / dm^3]$
c_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซที่ผิวสัมผัส	$[mol / dm^3]$
D	สัมประสิทธิ์การแพร่	$[cm^2 / s]$
D_{mutual}	สัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์	$[cm^2 / s]$
D_T	สัมประสิทธิ์การแพร่ทางเทอร์โมไดนามิกส์	$[cm^2 / s]$
\bar{D}	สัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ย	$[cm^2 / s]$
f	สัดส่วนปริมาตรอิสระ	$[-]$
f_r	สัดส่วนปริมาตรอิสระอ้างอิง	$[-]$
H_p	ค่าคงที่ของเฮนรี	$[cm^3 (STP) / kg \cdot MPa]$
H_0	พารามิเตอร์คงที่สำหรับสมการแวนฮอฟ (van't Hoff Equation)	$[cm^3 (STP) / kg \cdot MPa]$
ΔH_{sol}	ค่าความร้อนของการละลาย	$[J / mol]$
k	จำนวนของการแกว่ง	$[-]$
k_{12}	พารามิเตอร์ปรับแก้ค่า	$[-]$
L	ความหนาของชิ้นงาน	$[mm]$
l	ความยาวของชิ้นงาน	$[mm]$
l	ความยาวของด้านที่กำหนด	$[mm]$
m_d	ค่าการเคลื่อนที่ของสารแพร่สำหรับสมการของ Fujita	$[cm^2 / s]$
M	ค่าการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย	$[cm^2 / s]$
M	โมเมนต์ความเฉื่อยของ inertia rod	$[N \cdot m]$
M_w	มวลโมเลกุลเฉลี่ย	$[g / mol]$
n	จำนวนเซลล์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรของโฟม	$[-]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n_b	จำนวนเซลล์ในพื้นที่ $l \times l$	[-]
P	ความดัน	[MPa]
P^*	ความดันแสดงคุณลักษณะ	[MPa]
\tilde{P}	ความดันปรับลด	[-]
r	พารามิเตอร์แสดงบริเวณที่ถูกแทนที่	[-]
r	รัศมีของชิ้นงาน	[cm]
R	ค่าคงที่ของก๊าส	[J/mol.K]
t	เวลา	[s]
T	อุณหภูมิ	[°C] หรือ [K]
T^*	อุณหภูมิแสดงคุณลักษณะ	[K]
\tilde{T}	อุณหภูมิปรับลด	[-]
T_g	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	[°C] หรือ [K]
T_m	อุณหภูมิหลอมเหลว	[°C] หรือ [K]
T_s	อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับสมการของ Fujita	[°C] หรือ [K]
\hat{v}_{mix}	ปริมาตรจำเพาะของสารละลายพอลิเมอร์/ก๊าส	[cm ³ /g]
\hat{v}^o_{mix}	ปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน	[cm ³ /g]
\hat{v}^o_{poly}	ปริมาตรจำเพาะที่ถูกแทนที่ของพอลิเมอร์ ที่ 0 เคลวิน	[cm ³ /g]
$\hat{v}^o_{CO_2}$	ปริมาตรจำเพาะที่ถูกแทนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 0 เคลวิน	[cm ³ /g]
v^*	ปริมาตรแสดงคุณลักษณะ	[cm ³ /mol]
W_{CO_2}	น้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์	[g]
x	สัดส่วนโดยโมล	[-]
α_f	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของฟิลเลอร์	[1/°C]
β	สัมประสิทธิ์การกดอัด ณ อุณหภูมิคงที่	[1/MPa]
β_d	สัมประสิทธิ์การกดอัด ณ อุณหภูมิคงที่ของฟิลเลอร์	[1/MPa]
X_{12}	interaction parameter	[-]
ϕ	สัดส่วนโดยปริมาตร	[-]
φ	อัตราการขยายตัว	[-]
ω	มุมของความถี่	[-]
Λ	Logarithmic Decrement	[-]
μ	ค่าศักย์ทางเคมี	[kJ/mol]
ρ	ความหนาแน่น	[g/cm ³]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ρ_f	ความหนาแน่นของโฟม	[g/cm ³]
ρ_p	ความหนาแน่นของพอลิเมอร์	[g/cm ³]
ρ^*	ความหนาแน่นแสดงคุณลักษณะ	[g/cm ³]
$\tilde{\rho}$	ความหนาแน่นปรับลด	[-]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย

ในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตฉนวนใยแก้วกันความร้อนจะมีเส้นใยแก้วที่เป็นของเสียที่ไม่ได้มาตรฐานเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทางโรงงานยังไม่มีแนวทางที่แน่ชัดในการกำจัดเส้นใยแก้วที่ไม่ได้มาตรฐานนี้ ซึ่งในปัจจุบันโรงงานได้ทำการกำจัดโดยการฝังกลบ แต่ประสบปัญหาคือสถานที่ไม่เพียงพอ และนอกจากฉนวนใยแก้วที่ผลิตขึ้นจะมีเส้นใยแก้วเป็นองค์ประกอบหลักแล้วยังมีสารเคมีอื่นๆ เป็นองค์ประกอบเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวประสานเส้นใยแก้วให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนได้ ดังนั้นในการนำเส้นใยแก้วที่ไม่ได้มาตรฐานกลับมาใช้ใหม่จะต้องกำจัดสารเคมีที่เป็นตัวประสานออกให้หมดก่อนที่จะนำมาผลิตใหม่ ในการกำจัดสารเคมีเหล่านี้ต้องใช้งบลงทุนสูงและยังก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นแนวทางการแก้ปัญหาโดยการนำเส้นใยแก้วที่ไม่ได้มาตรฐานมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ จึงเป็นการกำจัดขยะที่สามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุน และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับขยะอุตสาหกรรมอีกด้วย

ด้วยเหตุนี้ โครงการวิจัยนี้ต้องการนำเสนอการใช้ประโยชน์เศษฉนวนใยแก้ว โดยพัฒนาเป็นไมโครเซลลูโลสพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ซึ่งมีเศษฉนวนใยแก้วเป็นองค์ประกอบเพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นและการกระจายตัวของโฟมที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทพอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม จากเศษฉนวนใยแก้วที่เป็นของเสียจากโรงงานผลิตฉนวนใยแก้วกันความร้อน
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม เช่น ลักษณะของเศษเส้นใยแก้ว อุณหภูมิ ความดัน หรืออัตราส่วนที่ผสม
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของพลาสติกผสมและโฟมที่เกิดขึ้น เช่น ความแข็งแรงของพลาสติกผสม ขนาดและการกระจายตัวของเซลล์โฟม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ผสมเส้นใยแก้วแต่ละชนิดกับพอลิพรอพิลีนในอัตราส่วน 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนัก โดยเส้นใยแก้วที่ใช้คือ แบบผง แบบเส้นสั้น และเส้นใยแก้วชนิดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์
2. การทำไฟมใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความดัน 10 และ 14 เมกะปาสคาล โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon dioxide)
3. ศึกษาสมบัติทางกลของพลาสติกผสมและไฟมที่ได้จากการทดลอง
4. ศึกษาการกระจายตัวของเซลล์ไฟม และขนาดของเซลล์ไฟมตั้งแต่ระดับไมโครเมตร จนถึงระดับนาโนเมตร

1.4 วิธีการดำเนินโครงการวิจัย

1. ศึกษารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลอง
2. ผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน
3. ทดสอบสมบัติเชิงกลและศึกษาโครงสร้างของชิ้นงาน
4. คำนวณเวลาดูดซึมน้ำของก๊าซในพลาสติก (Soaking Time)
5. ศึกษากระบวนการทำไฟมและหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดไฟม
6. หาความหนาแน่น อัตราการขยายตัว และศึกษาสัณฐานวิทยาของไฟม
7. คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในเนื้อไฟม
8. ทดสอบสมบัติเชิงกลของไฟม

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียและกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม
2. พัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุเชื้อจุลินทรีย์ในบ่อบำบัดน้ำเสีย
3. พัฒนาผู้ดำเนินโครงการวิจัยให้มีความรู้ ความสามารถ ความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ และความสนใจในการแก้ปัญหาขยะอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gui Lin และคณะ [1] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและโครงสร้างระดับไมโครเมตรของโฟมที่เป็นคอมโพสิตของยางกับเส้นใยสั้น (ในลอน 6) และเปรียบเทียบกับคอมโพสิตโฟม 3 ชนิดคือ ยางธรรมชาติ 100% ยางธรรมชาติผสมเส้นใยสั้นที่ผ่านการบำบัดด้วยสารยัดเกาะและยางธรรมชาติที่ผสมกับเส้นใยสั้นที่ไม่ผ่านการบำบัด พบว่าสัดส่วนวิทยาของคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยสั้นที่ผ่านการบำบัดนั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เช่นเดียวกับเส้นใยแก้วที่ไม่ผ่านการบำบัด แต่เส้นใยแก้วที่ผ่านการบำบัดจะมีการยึดเกาะกับวัสดุโครงสร้างได้ดีกว่า และคอมโพสิตโฟมที่มีเส้นใยอยู่นั้นทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้น เช่น ค่าโมดูลัส (Tensile Modulus) และค่าความแข็ง (Hardness) รวมทั้งพบว่าการเสริมแรงของเส้นใยสั้นที่ส่งผลต่อค่า Compressive Modulus นั้นขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตโฟม การจัดเรียงตัวของเส้นใยสั้น และขึ้นกับอัตราการเสียรูป (Deformation Ratio)

L.M. Matuana และคณะ [2] ทำการวิจัยเกี่ยวกับคุณลักษณะเฉพาะของคอมโพสิตโฟมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) กับเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งพบว่าสัดส่วนช่องว่างของไมโครเซลลูโลสในโฟมนั้นถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิการทำโฟมและเวลาในการโฟม และเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลก่อนทำโฟมของคอมโพสิตกับพอลิไวนิลคลอไรด์ พบว่าคอมโพสิตก่อนโฟมให้ค่าโมดูลัสที่สูงกว่าแต่มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) และร้อยละการยืดตัว (Elongation) น้อยกว่าวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์ และเมื่อผ่านการทำโฟมแล้วนั้น ถึงแม้ว่าคอมโพสิตโฟมจะให้ค่าความแข็งแรงดึง และโมดูลัสลดลงเนื่องมาจากสัดส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้น แต่คอมโพสิตโฟมจะมีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของช่องว่างที่เพิ่มขึ้น และถ้าสัดส่วนช่องว่างของคอมโพสิตโฟมมีถึงร้อยละ 56 จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเกือบสามเท่าเมื่อเทียบกับคอมโพสิตก่อนทำโฟม

มีนักวิจัยหลายท่าน [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านการละลาย (Solubility) และความสามารถในการแพร่ (Diffusivity) ของก๊าซในพอลิเมอร์ เช่น Durill และ Griskey ได้ศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไนโตรเจน (N_2) ในพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิคลอไรด์ (PS) สำหรับ Liu และ Prausnitz ได้ทำการศึกษาการละลายของก๊าซหลายชนิดรวมทั้ง

คาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเอทิลีน (PE) และเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA) ซึ่งพวกเขาได้ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 125 ถึง 200 องศาเซลเซียส ความดัน 2.5 เมกกะปาสคาล Lee และ Flumerfelt ศึกษาการละลายของไนโตรเจน ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 120 ถึง 177 องศาเซลเซียส และความดัน 12.5 เมกกะปาสคาล Wang และคณะ วัดค่าการละลายในพอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) และพอลิไทลเมทาไคเลต Sato และคณะ ได้ศึกษาการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนในพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส และความดัน 20 เมกกะปาสคาล และในพอลิไวนิลอะซิเตท ที่ 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส และความดัน 17.5 เมกกะปาสคาล ในงานวิจัยเหล่านี้ได้ผลสรุปว่าความสามารถในการละลายของก๊าซในพอลิเมอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันอิ่มตัวเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของเฮนรี ดังนั้นค่าคงที่เฮนรีจึงถูกนำมาใช้เพื่อหาการละลายของก๊าซที่มวลโมเลกุลต่ำในระบบของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวร่วมกับสมการ van't Hoff ซึ่งอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าการละลาย

รูปแบบสมการมากมายได้ถูกเสนอขึ้นเพื่อให้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในพอลิเมอร์ ซึ่งสมการเหล่านั้นมักใช้แนวคิดของปริมาตรอิสระในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยแนวคิดนี้ได้รับเริ่มมาจาก Cohen และ Turnbull ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารที่แพร่เข้าไปนั้น จะแสดงในรูปฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลของส่วนกลับของสัดส่วนปริมาตรอิสระ

Fujita ได้เสนอสมการการแพร่ซึ่งยึดทฤษฎีของ Cohen และ Turnbull และได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารที่แพร่เข้าไปในพอลิเมอร์ โดยทำให้สัดส่วนปริมาตรอิสระเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความเข้มข้น Kulkarni และ Stern ได้นำสมการของ Fujita มาประยุกต์ให้สามารถอธิบายการแพร่ของสารโมเลกุลเล็ก เช่น มีเทน อีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเอทิลีน Lee ได้พัฒนาสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในพอลิเมอร์เช่นกัน ซึ่งเขาได้ทำการทดลองเพื่อหาความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน ในพอลิเมอร์สิบสามชนิดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และจากการพลอตกราฟระหว่างความสามารถในการแพร่ผ่านที่วัดได้ กับค่าปริมาตรอิสระจำเพาะของสารผสมพอลิเมอร์ต่อก๊าซ พบว่าปริมาตรอิสระจำเพาะเป็นตัวกำหนดอัตราการแพร่ของก๊าซในพอลิเมอร์ Maeda และ Paul ได้นำวิธีของ Lee มาประยุกต์ใช้ต่อโดยสร้างสมการเอมไพริคัลเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ ฮีเลียม และมีเทนในพอลิเมอร์หลายชนิด พวกเขาใช้สารไฮโดรคาร์บอนเจือจางหลายชนิดเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าปริมาตรอิสระจำเพาะของพอลิเมอร์ และเพื่อสังเกตผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอิสระที่มีต่อค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็กซ์โปเนนเชียลกับปริมาตรอิสระจำเพาะสัมบูรณ์ของพอลิเมอร์ และเมื่อไม่นานมานี้ Park และ Paul ประยุกต์ใช้วิธีเดียวกันเพื่อที่จะหาความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซใน กระจกพอลิเมอร์ (Glass polymer) และสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากข้อมูลปริมาตรอิสระจำเพาะได้อย่างดี Thran และคณะ ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาตรอิสระกับการแพร่ของก๊าซ 6 ชนิด (ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ฮีเลียม และ ไฮโดรเจน) กับพอลิเมอร์ 71 ชนิด พวกเขาได้แสดงเป็นความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลระหว่างปริมาตรอิสระจำเพาะ กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ รวมทั้งรายงานค่าคงที่เอมไพริคัลของความสัมพัทธ์เอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งค่าคงที่นี้จะขึ้นอยู่กับโมเลกุลของก๊าซ แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์

ในงานวิจัยของ Surat Areerat และคณะ [3-2] ได้ทำการวัดค่าการละลายและ ความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกักใน พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิ-เอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน และเอทิลีนเอทิลอคริเลต (Ethylene-Ethylacrylate Copolymer) ในช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส ความดัน 12 เมกกะปาสคาล และคำนวณค่าคงที่เฮนรีของระบบพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ละระบบโดยแปรเปลี่ยนอุณหภูมิในการดูดซึมก๊าซ และยังได้พัฒนารูปแบบสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ โดยรวมสมการของ Fujita กับสมการของ Maeda และ Paul ซึ่งสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากปริมาตรจำเพาะของสารผสมพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาตรจำเพาะที่ถูกแทนที่ของของผสม และค่าศักย์ทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารผสม รูปแบบสมการที่ได้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์หลายชนิดได้อย่างถูกต้องโดยไม่ต้องทำการทดลอง

2.2 คอมโพสิต (Composites)

คอมโพสิต หรือวัสดุประกอบ [4] เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างมาก ในปัจจุบันมีปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมากกว่า 10 ล้านตันต่อปีและมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นทุกปีประมาณร้อยละ 5-10 คอมโพสิตจึงจัดเป็นวัสดุวิศวกรรมที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ ทั้งนี้เนื่องจากคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุดคือมีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ ดังนั้นคอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) ซึ่งนิยาม

เท่ากับความแข็งแรงต่อความหนาแน่นสูง ดังนั้นเมื่อใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นส่วนประกอบใน โครงสร้างเช่น ยานพาหนะ จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น มี

ประสิทธิภาพในการขนส่งมากขึ้น และประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่กว้างเนื่องจากมีคอมโพสิตหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ออกแบบ และสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานได้

ในปัจจุบันมีการเรียกวัสดุคอมโพสิตหลากหลายชื่อ เช่น พลาสติกเสริมแรง (Reinforce Plastics, RP) พลาสติกเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Fiberglass Reinforced Plastics, FRP) แผ่นลามิเนตเสริมแรง (Reinforced Plastic Laminate) หรือไฟเบอร์กลาส (Fiberglass)

องค์ประกอบของคอมโพสิตประกอบด้วยสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ

1. วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งและโมดูลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใยชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass Fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar Fibers) อาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว หรือเส้นใยสั้น นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ โดย วัสดุเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต
2. วัสดุโครงสร้าง (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน โดยให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดทาน เนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง และความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมีค่าโมดูลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง ทั้งยังเป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load Transfer Medium) วัสดุเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะและ เซรามิกส์

2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตในหลายแบบ อาจแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous Composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้นหรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง
2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar Composites) คือคอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแซนวิช (Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate Composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)

นอกจากนี้ สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิตคือ

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural Composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ (Wood) ฟัน (Teeth) และกระดูก (Bone) ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยจะมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น
2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic Composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส ฯลฯ

2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตมีหลายชนิด และมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากนี้เรายังสามารถออกแบบโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to Weight/Density Ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific Modulus) ความเหนียวจำเพาะ (Specific Stiffness) ฯลฯ เนื่องจากคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง
- มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติการรับแรงและแดมป์ (Damping) ดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional of Thermal Expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

อย่างไรก็ดีวัสดุคอมโพสิตมีข้อเสียบางประการคือ

ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือนำมาขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิต

- มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse Direction)
- ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมกับวัสดุอื่น
- ยากในการทำลายหรือนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle)

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานของคอมโพสิต (Composites Applications)

วัสดุคอมโพสิตสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิต เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aerospace) อุปกรณ์กีฬา (Sporting Goods) ฯลฯ ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากคอมโพสิตมีน้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้น ไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต [4-2]

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ (Space Shuttle) สถานีอวกาศ (Space Station)
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบรถยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ (Hulls) คาดฟ้า (Decks)
อุปกรณ์กีฬา	ไม้เทนนิส ไม้เบดมินตัน ก้านไม้กอล์ฟ ตัวถังจักรยาน สกี เรือแคนู หมวกกันกระแทก คันเบ็ด
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝ้าผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โต๊ะ เก้าอี้ บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจรไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้า กล่องคอมพิวเตอร์

2.3 เส้นใยแก้ว

ส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้มากที่สุดกับเมทริกซ์พอลิเมอร์คือ เส้นใยแก้ว ข้อได้เปรียบของเส้นใย

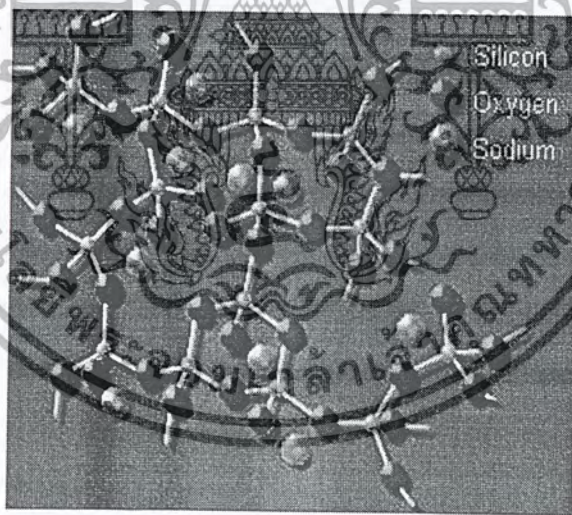
แก้ว คือ ราคาถูก ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกระแทกสูง และมีความต้านทานต่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีสูง ข้อเสียของเส้นใยแก้วคือ ไม่ทนทานต่อการขีดถูเสียดสี และมีการยึดเกาะกับเมตริกซ์ต่ำ เส้นใยแก้วที่นิยมใช้ ในปัจจุบันมี 3 ชนิดคือ [4-3]

1. เส้นใยแก้วชนิด E (Electrical) นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีความแข็งแรงดี มีสมบัติทางไฟฟ้า และทนต่อดินฟ้าอากาศ
2. เส้นใยแก้วชนิด C (Chemical Corrosion) มีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีสูง แต่ความแข็งแรงต่ำ และราคาแพง
3. เส้นใยแก้วชนิด S (Strength) เป็นเส้นใยแก้วที่มีค่าโมดูลัสสูง และทนอุณหภูมิได้สูง แต่มีราคาแพง

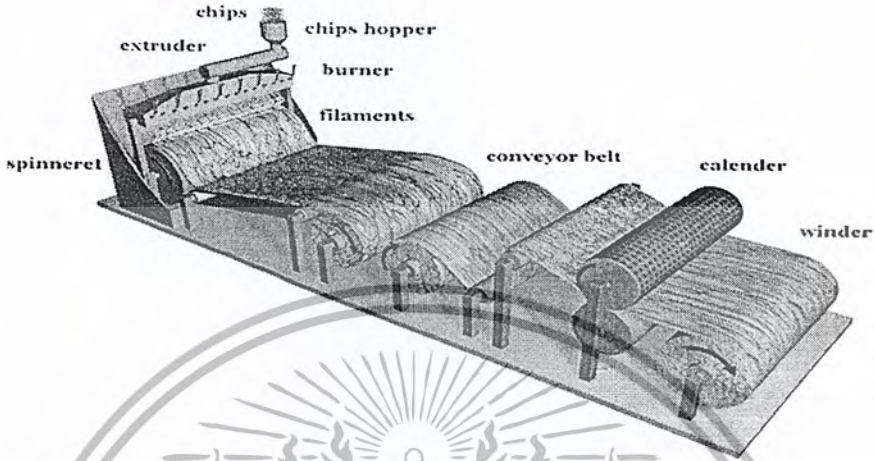
เส้นใยแก้วมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา และมีส่วนประกอบอื่นๆ เป็นออกไซด์ของ แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม เป็นต้น เส้นใยแก้วแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของออกไซด์ ต่างๆ กัน องค์ประกอบต่างๆ ในเส้นใยแก้วจะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) แม้ว่าอาจเกิดเป็น ผลึกได้บ้างถ้าให้ความร้อนเส้นใยที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน แต่เป็นสาเหตุทำให้ความแข็งแรง ของเส้นใยลดลง รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างสองมิติของโครงสร้างร่างแหหลายเหลี่ยม (Polyhedron Network Structure) ของแก้วโซเดียมซิลิเกตซึ่งมีการจัดโครงสร้างเป็นสามมิติในโครงสร้างจริง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแก้วโซเดียมซิลิเกต

เส้นใยแก้วผลิตได้จากการหลอมแก้ววัตถุดิบในถัง และส่งผ่านรูเล็กๆ หลายร้อยช่องตาม แรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เกิดเป็นเส้นใยแก้ว ดังรูปที่ 2.2 จากนั้นเส้นใยจะถูกดึงยืดและพันรอบถึง เก็บด้วยความเร็วสูง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยควบคุมได้จากการปรับความหนืดของแก้ว

ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและอุณหภูมิ ขนาดของรู และความเร็วในการพัน ปกติเส้นผ่าน-
ศูนย์กลางของเส้นใยแก้วชนิด E อยู่ในช่วง 8-15 ไมครอน



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตเส้นใยแก้ว

ปกติแล้วความแข็งแรงและโมดูลัสของเส้นใยแก้วขึ้นกับโครงสร้างสามมิติของออกไซด์ที่เป็น
องค์ประกอบ โครงสร้างอสังฐานของแก้วเกิดจากพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงของออกซิเจนอะตอม
กับซิลิกอนอะตอม และไฮเดียมไอออนจะเกิดพันธะไอออนิกกับออกซิเจนอะตอมโดยไม่มีการ
เชื่อมโยงโดยตรงกับโครงสร้าง โครงสร้างร่างแหและความแข็งแรงของโครงสร้างแตกต่างกันเมื่อมี
ออกไซด์ของโลหะอื่นๆอยู่ในโครงสร้าง ดังนั้นแก้วชนิดต่างๆ ที่มีองค์ประกอบของออกไซด์ต่างกัน
จึงมีสมบัติแตกต่างกัน เป็นที่น่าสังเกตว่าแก้วมีสมบัติ "ไอโซโทรปี" (Isotropy) นั่นคือมีสมบัติ
ทุกทิศทุกทางเหมือนกัน ซึ่งต่างไปจากเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยเคฟลาร์ ตัวอย่างเช่นโมดูลัสของ
เส้นใยแก้วตามแนวเส้นใยมีค่าเท่ากับโมดูลัสตามขวางของเส้นใย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากโครงสร้าง
ร่างแหสามมิติของโครงสร้างแก้วนั่นเอง

ปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อการลดลงของความแข็งแรงของเส้นใยแก้วคือรอยตำหนิ (Flaws
of Voids) ที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วถูกกันในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงมีการใช้สารเคมี
บางอย่างเคลือบเส้นใยแก้วบางๆ เพื่อป้องกันการสูญเสียที่เกิดเป็นรอยตำหนิ สารที่ใช้เคลือบเส้น
ใยแก้วคือ ไซซิงเอเจนต์ (Sizing agent) ที่สำคัญได้แก่สารคู่ควบพวกซิลิโคน (Silance coupling
agent) ซึ่งทำหน้าที่ดังต่อไปนี้

- ป้องกันพื้นผิวของเส้นใยจากการทำลาย เป็นผลให้เกิดรอยตำหนิ
- เชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกันเพื่อความสะดวกในกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หล่อลื่นเส้นใยเพื่อให้สามารถต้านทานต่อการขูดถูเสียดสีในระหว่างกระบวนการผลิต
- ให้สมบัติต้านทานต่อไฟฟ้าสถิตย์ (Anti-Static Properties)
- เกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่างพื้นผิวของเส้นใยแก้วกับเมตริกซ์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างเฟส (Interface Bond Strength)

2.4 โฟม

เซลลูลาร์พลาสติก หรือพลาสติกโฟม [5] หมายถึง พลาสติกที่ขยายตัวหรือพองฟูคล้ายฟองน้ำ จะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคของแข็งที่เป็นพอลิเมอร์ อาจประกอบด้วยพอลิเมอร์หนึ่งชนิดหรือมากกว่า หรือเป็นคอมโพสิตพอลิเมอร์ เช่น ในกรณีของโฟมคอมโพสิตที่ทำการศึกษา ในวัฏภาคของแข็งจะประกอบไปด้วยพอลิพรอพิลีนและเส้นใยแก้ว และอีกวัฏภาคหนึ่งคือ วัฏภาคก๊าซซึ่งเกิดขึ้นจากสารที่เรียกว่า สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing Agent) โฟมอาจมีลักษณะอ่อนนุ่มหรือแข็งก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ในช่วงที่ต่ำ โฟมที่ได้จะมีลักษณะอ่อนนุ่ม แต่ถ้าอยู่ในช่วงที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง โฟมที่ได้จะมีลักษณะแข็ง

โฟมพลาสติกจะมีความหนาแน่นแตกต่างกันมากมาย มีขอบเขตประมาณ 1.6 ถึง 96 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การประยุกต์ใช้งานของโฟมเหล่านี้จะพิจารณาจากช่วงความหนาแน่นของโฟมที่ผลิต เนื่องจากสมบัติเชิงกลจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของโฟม ดังนั้นโฟมแบบแข็งเหมาะสำหรับการทนรับแรงซึ่งต้องมีความหนาแน่นสูง ในขณะที่โฟมหนาแน่นต่ำโดยทั่วไปเหมาะสำหรับทำฉนวนกันความร้อน โฟมที่ยืดหยุ่นซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จะใช้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ เบาะที่นั่งในรถยนต์ และโฟมที่มีความหนาแน่นสูงกว่านี้จะประยุกต์ใช้สำหรับแผ่นรองของพรม และตัวดูดซับพลังงาน

กลไกในการเกิดโฟมเป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่เกี่ยวข้องกับทางฟิสิกส์ และทางเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเอง หรือจากสารอื่นที่แพร่เข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซ (Bubble Nucleation) และการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble Growth) ซึ่งโฟมที่ได้ก็คือเซลล์ของก๊าซที่กระจายตัวในโครงสร้างของพอลิเมอร์นั่นเอง

การเกิดโฟมมีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์ และมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันภายนอก เพื่อขยายขนาด จึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟองพองออกมา หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอสำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธีการคือการลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ โดยทั่วไปกระบวนการเกิดโฟมประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเริ่มเกิดฟองก๊าซ (Bubble Initiation) หรือการเกิดนิวเคลียส (Nucleation)
2. การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble Growth)
3. การคงสภาพของโฟม (Stabilization)

2.5 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในพอลิเมอร์

2.5.1 คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ (Supercritical Carbon dioxide: sc-CO₂)

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ มีอุณหภูมิวิกฤติ (T_c) เท่ากับ 31 องศาเซลเซียส และมีความดันวิกฤติเท่ากับ 7.38 เมกะปาสคาล [5-2] คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบไม่มีขั้ว มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถผสมเข้าได้ง่ายกับพลาสติกในขณะหลอมตัว โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะแทรกและกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพลาสติก ช่วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลหรือสายโซ่ของพลาสติก ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และพลาสติกจะบวมขึ้น ทำให้ความหนืดของพลาสติกหลอมลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติมีส่วนช่วยให้จุดหลอมตัวและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพลาสติกลดลง ซึ่งทำให้สามารถผสมพลาสติกหลายชนิดได้อุณหภูมิต่ำลงจากระบบทั่วไป ซึ่งมีข้อดีคือโครงสร้างของพลาสติกไม่ถูกทำลายเนื่องจากอุณหภูมิสูงและสีของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน

2.5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์ (Self-Diffusion and Mutual Diffusion Coefficients) [3-3]

Vrentas และ Duda ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์ (Mutual Diffusion Coefficient) ศักย์ทางเคมี (Chemical Potential) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Self-Diffusion Coefficient) ของระบบพอลิเมอร์ต่อสารโมเลกุลเล็ก ดังสมการ

$$D_{mutual} = \frac{x_2 D_1 + x_1 D_2}{RT} \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1} \right)_{T,P} \quad (2.1)$$

เมื่อ D_1 และ D_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Self-Diffusion Coefficient) ของสารโมเลกุลเล็กและพอลิเมอร์ตามลำดับ μ_1 คือค่าศักย์ทางเคมีของสารโมเลกุลเล็กในพอลิเมอร์ x_1 และ x_2 คือสัดส่วนโดยโมลของสารโมเลกุลเล็กที่อยู่ในพอลิเมอร์ และสัดส่วนโดยโมลของพอลิเมอร์ตัวนั้นๆ เมื่อนำสมการที่ (2.1) มาใช้คำนวณในระบบพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ หมายเลข 1 แทน คาร์บอนไดออกไซด์ และ 2 แทนพอลิเมอร์

ในระบบพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพอลิเมอร์ (D_2) มักมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ คาร์บอนไดออกไซด์ และถ้า $x_1 D_2$ มีค่าน้อยกว่า $x_2 D_1$ มากๆ จะทำให้สมการที่ (2.1) เปลี่ยนเป็น

$$D_{mutual} = \frac{x_2 D_1}{RT} \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1} \right)_{T, P} \quad (2.2)$$

รูปแบบสมการโดยทั่วไปจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สัมพันธ์กับปริมาตรอิสระ (Free Volume) ของพอลิเมอร์ ดังเช่นสมการของ Maeda และ Paul ได้แสดงความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ย (\bar{D}) และส่วนกลับของปริมาตรอิสระจำเพาะ (Specific Free Volume) ของพอลิเมอร์ดังสมการ

$$\bar{D} = A' \exp \left[\frac{-B'}{(\hat{v}_{mix} - \hat{v}_{mix}^o)} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ \bar{D} คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ย (Average Effective Diffusion Coefficient) ซึ่งหาได้จากความสามารถในการละลายของก๊าซที่ได้จากการทดลอง \hat{v}_{mix} คือปริมาตรจำเพาะของสารละลายพอลิเมอร์ต่อก๊าซ \hat{v}_{mix}^o คือปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน หรือปริมาตรจำเพาะที่ถูกแทนที่ (Occupied Specific Volume) ของสารผสม ส่วน A' และ B' เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับชนิดของก๊าซ

ค่าปริมาตรอิสระสัมบูรณ์ (Absolute Free Volume) ของสารผสมพอลิเมอร์ต่อสารโมเลกุลเล็ก คำนวณได้จากผลต่างระหว่างปริมาตรจำเพาะและปริมาตรจำเพาะที่ถูกแทนที่ของสารผสม โดย Maeda และ Paul ได้หาค่าปริมาตรจำเพาะของสารผสมจากการทดลองและหาค่าปริมาตรจำเพาะที่ถูกแทนที่ด้วยวิธีกรุปคอนทริบิวชัน (Group contribution) เพื่อหาค่า A' และ B' ในสมการที่ (2.3) แต่ข้อเสียของสมการนี้ คือไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และไม่สามารถใช้ได้โดยตรงในระบบที่มีอุณหภูมิสูง

Fujita ได้คิดค้นสมการที่สามารถแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอของสารอินทรีย์ในพอลิเมอร์หรือสัณฐานที่เหนืออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สมการของ Fujita ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (D_T) กับค่าสัดส่วนปริมาตรอิสระโดยเฉลี่ย (Average Free Volume Fraction, f) ในรูปของความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ของสารที่เป็นตัวแพร่เข้าไป (m_d)

$$D_T = RTm_d \quad (2.4)$$

$$m_d = A_d \exp(-B_d/f) \quad (2.5)$$

เมื่อ R คือค่าคงที่ของก๊าซ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารผสม A_d และ B_d คือพารามิเตอร์ และเพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นที่มีต่อความสามารถในการแพร่ Fujita ได้แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรอิสระ (f) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารที่แพร่เข้าปดังสมการ

$$f(T, \phi) = f(T_s, 0) + \alpha_f (T - T_s) + \beta(T) \phi \quad (2.6)$$

เมื่อ ϕ คือสัดส่วนโดยปริมาตรของสารที่แพร่เข้าไป T_s คืออุณหภูมิอ้างอิง α_f คือพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะของพอลิเมอร์ และ $\beta(T)$ คือฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ค่า T_s , α_f และ $\beta(T)$ จะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อใช้สมการของ Fujita เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของระบบพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ จะต้องหาค่า T_s , α_f และ $\beta(T)$ สำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิด และต้องทำการทดลองการแพร่เพื่อหาค่า $\beta(T)$ และพารามิเตอร์ A_d และ B_d ซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอ้างอิง (T_s) ดังนั้นแม้ว่าสมการของ Fujita จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับสัดส่วนโดยปริมาตร (ϕ) ได้ แต่ต้องทำการทดลองจึงจะประมาณค่าการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ได้

เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่าจุดหลอมเหลว) Surat Areerat และคณะจึงได้รวมสมการของทั้ง Maeda และ Paul กับ Fujita เพื่อพัฒนารูปแบบสมการโดยสมมติว่าปริมาตรจำเพาะสัมบูรณ์ (Absolute Specific Volume) ของสารผสมเป็นตัวกำหนดความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของพอลิเมอร์และโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแสดงดังสมการ

$$M = A \exp\left[\frac{-B}{(\hat{v}_{mix} - \hat{v}_{mix}^o)}\right] \quad (2.7)$$

เมื่อ M คือ ความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สัมพันธ์กับ พอลิเมอร์

และเพื่อที่จะประยุกต์ใช้สมการนี้กับพอลิเมอร์หลายชนิด จึงสมมติว่า A และ B เป็นค่าคงที่ ขึ้นกับชนิดของก๊าซ ไม่ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{self}) ของ คาร์บอนไดออกไซด์ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมพันธ์ (D_{mutual}) แสดงดังสมการ

$$D_{self} = RTM = RTA \exp\left[\frac{-B}{(\hat{v}_{mix} - \hat{v}_{mix}^o)}\right] \quad (2.8)$$

$$D_{mutual} = \frac{x_2 D_{self}}{RT} \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1} \right)_{T,p} \quad (2.9)$$

จากสมการของ Cohen-Turnbull และ Fujita ที่ได้สมมติว่าการเคลื่อนที่ของสารที่แพร่เข้าไป ในพอลิเมอร์ถูกกำหนดโดยปริมาตรอิสระ (Free Volume) ของพอลิเมอร์ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นสัดส่วนกับความความสามารถในการเคลื่อนที่ ซึ่งในสมการที่ (2.8) และ (2.9) ได้ใช้ทฤษฎีนี้ เช่นกันแต่ได้ประมาณค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ โดยเป็นฟังก์ชันของ $\hat{v}_{mix} - \hat{v}_{mix}^o$ เพื่อที่จะ ทำให้พารามิเตอร์ A และ B สามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ทุกชนิดดังเช่นสมการของ Maeda-Paul และพารามิเตอร์ A และ B หาโดยใช้สมการที่ (2.8) โดยการพลอตค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{self}) ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์หลายชนิด ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และความดันระบบ 8 ถึง 12 เมกกะปาสคาล พบว่าค่า $A = 4.18 \times 10^{-22}$ ตารางเซนติเมตร.โมลต่อจูล.วินาที และ $B = 0.24$ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมพันธ์ของ คาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์บางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิ และ ความดันต่างๆ [6]

พอลิเมอร์	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความดัน (เมกกะปาสคาล)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
พอลิสไตรีน	423	8.3	5.3
	473	8.4	9.9
พอลิเอไมด์	488	10.3	52.9
	488	37.9	22.9
	303	10.5	17

2.5.3 สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลายพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ [3-4]

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ คาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สมการที่ (2.8) และ (2.9) นั้น ค่า \hat{v}_{mix} \hat{v}_{mix}^o และ $\left(\frac{\partial \mu}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P}$ จะต้องคำนวณที่อุณหภูมิและความดันของระบบพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์แต่ละระบบ ซึ่งค่า \hat{v}_{mix}^o จะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายเข้าไป โดยหาได้จากน้ำหนักเฉลี่ยของปริมาตรจำเพาะที่ถูกแทนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ และพอลิเมอร์

$$\hat{v}_{mix}^o = (1 - m_{CO_2}) \hat{v}_{poly}^o + m_{CO_2} \hat{v}_{CO_2}^o \quad (2.10)$$

โดยค่า $\hat{v}_{CO_2}^o = 0.589$ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และค่า $\hat{v}_{poly}^o = 1.103$ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

สำหรับการหาค่าปริมาตรจำเพาะของสารผสมพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (\hat{v}_{mix}) จะใช้สมการของ Sanchez-Lacombe (SL Equation) โดยแสดงดังนี้

$$\tilde{p}^2 + \tilde{P} + \tilde{T}[\ln(1 - \tilde{p}) + (1 - \frac{1}{r})\tilde{p}] = 0 \quad (2.11a)$$

$$\tilde{P} = \frac{P}{P^*} \quad \tilde{T} = \frac{T}{T^*} \quad \tilde{p} = \frac{\rho}{\rho^*} \quad r = \frac{P^* v^*}{RT^*} \quad (2.11b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า \bar{P} , \bar{T} และ $\bar{\rho}$ คือ ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นปรับลด ตามลำดับ r คือ พารามิเตอร์แสดงบริเวณที่ถูกแทนที่ (size parameter) ซึ่งแทนจำนวนแลตทิซ (lattice sites) ซึ่งถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ R คือค่าคงที่ของก๊าซ \bar{M}_w คือมวลโมเลกุลเฉลี่ย P^* , T^* , v^* และ ρ^* คือพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะซึ่งแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิพรอพิลีน

พารามิเตอร์	ρ^* (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	P^* (เมกกะปาสคาล)	T^* (เคลวิน)	ช่วงความดัน (เมกกะปาสคาล)
คาร์บอนไดออกไซด์	1.2530	369.1	341.2	0-20
พอลิพรอพิลีน	0.8817	285.2	683.1	0-50

เมื่อใช้สมการ SL สำหรับระบบที่เป็นองค์ประกอบเดียว ค่าพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะเฉพาะสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2.11) กับข้อมูลการทดลอง PVT และการคำนวณค่าความหนาแน่นของสารผสมเฟสเดียว (ρ) และค่าปริมาตรจำเพาะของสารผสมพอลิเมอร์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (\hat{v}_{mix}) สามารถคำนวณได้จาก mixing rule ของสมการ SL ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$v^* = \phi_1^0 v_1^* + \phi_2^0 v_2^* \tag{2.12a}$$

$$\phi_1^0 = \frac{\phi_1}{\phi_1 + (v_1^* / v_2^*) \phi_2} \quad \text{สำหรับ } i = 1 \text{ และ } 2 \tag{2.12b}$$

$$\phi_i = \frac{\frac{m_i}{\rho_i^*}}{\left(\frac{m_1}{\rho_1^*} + \frac{m_2}{\rho_2^*}\right)} \quad \text{สำหรับ } i = 1 \text{ และ } 2 \tag{2.12c}$$

$$\phi_1 + \phi_2 = 1 \tag{2.12d}$$

$$P^* = \phi_1 P_1^* + \phi_2 P_2^* - \frac{RT}{v^*} \phi_1 \phi_2 X_{12} \tag{2.12e}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{12} = \frac{(P_1^* + P_2^* - 2(P_1^* P_2^*)^{1/2})(1 - k_{12})v^*}{RT} \quad (2.12f)$$

$$T^* = \frac{P^* v^*}{R} \quad (2.12g)$$

$$r = x_1 r_1 + x_2 r_2 \quad x_1 + x_2 = 1 \quad (2.12h)$$

$$\frac{1}{\rho^*} = \frac{m_1}{\rho_1^*} + \frac{m_2}{\rho_2^*} \quad (2.12i)$$

เมื่อ k_{12} คือ พารามิเตอร์ปรับแก้ค่า (Adjustable Parameter) x_1 และ x_2 คือสัดส่วนโดยโมล m_1 และ m_2 คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของ คาร์บอนไดออกไซด์ และพอลิเมอร์ตามลำดับ v_1^* และ v_2^* คือ ปริมาตรโดยโมลแสดงคุณลักษณะ (characteristic molar volume) ของ คาร์บอนไดออกไซด์ และพอลิเมอร์ตามลำดับ สัญลักษณ์ $*$ หมายถึงคุณสมบัติของสารที่เป็นของ สารผสม (binary mixture) หมายเลข 1 แทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และ 2 แทนพอลิเมอร์

ค่า พารามิเตอร์ปรับแก้ค่า (k_{12}) ของระบบพอลิพรอพิลีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 200 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.121 ส่วนค่า $\tilde{\rho}$ และ ρ^* สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.11) และ (2.12) และใช้ข้อมูลจากค่าพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะของทั้งพอลิเมอร์และ คาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับค่าความหนาแน่นของสารผสมเฟสเดียว (ρ) คำนวณได้จาก $\tilde{\rho}$ ρ^* และ \hat{v}_{mix} หาจาก $1/\rho$

สมการ SL สำหรับสารผสมสองชนิดสามารถใช้ในการคำนวณค่าศักย์ทางเคมี (μ_1) ของ คาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ โดยการใช้สมการที่ (2.13)

$$\frac{\mu_1}{RT} = \ln \phi_1 + (1 - \frac{r_1}{r_2}) \phi_2 + r_1 \tilde{\rho} X_{12} \phi_2^2 \frac{v_1^*}{v^*} + r_1 \left[-\frac{\tilde{\rho} + \tilde{P}_1 \tilde{v}}{\tilde{T}_1} + \tilde{v}((1 - \tilde{\rho}) \ln(1 - \tilde{\rho}) + \frac{\tilde{\rho} \ln \tilde{\rho}}{r_1}) \right] \quad (2.13)$$

$$\text{โดยที่ } \tilde{P}_1 = \frac{P}{P_1^*} \quad \tilde{T}_1 = \frac{T}{T_1^*} \quad \text{และ } \tilde{v} = \frac{v}{v^*}$$

ส่วนเทอม $\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1} \right)_{T,P}$ ในสมการที่ (2.9) สามารถคำนวณได้โดยทำอนุพันธ์สมการที่ (2.13)

$$\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P} \left(\frac{\partial \ln \phi_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P} = \left[1 + \phi_1 \left(\frac{M_{w2} \rho_1^* - M_{w1} \rho_2^*}{M_{w1} \rho_2^*}\right)\right] \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P} \quad (2.14)$$

เมื่อ M_{w1} และ M_{w2} คือมวลโมเลกุลเฉลี่ยของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์ ϕ_1 คือสัดส่วนโดยปริมาตรของ คาร์บอนไดออกไซด์ ρ_1^* และ ρ_2^* คือพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์และพอลิเมอร์ตามลำดับ ส่วนเทอม $\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P}$ หาได้จากความชันของกราฟระหว่างค่าศักย์ทางเคมี (μ_1) กับ $\ln(\phi_1)$ ที่ได้จากสมการ SL

2.5.4 ค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ [3-5]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่เฮนรี (H_o) กับอุณหภูมิแสดงได้โดยสมการ van'Hoff

$$\ln(H_p) = \ln(H_o) + \left(\frac{-\Delta H_{sol}}{RT}\right) \quad (2.15)$$

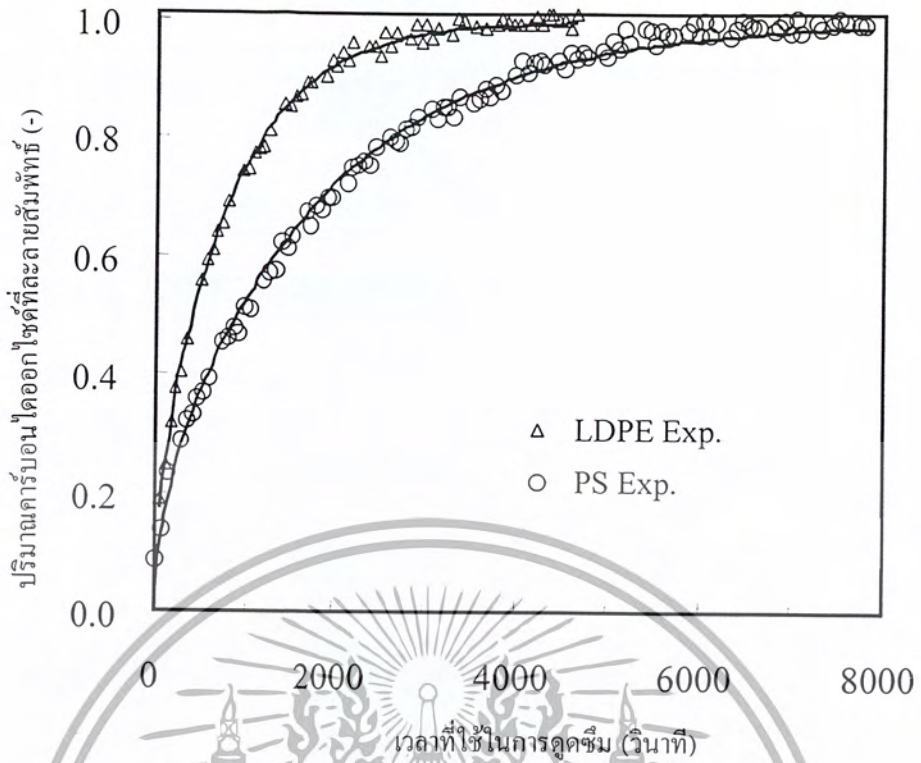
โดย H_o คือค่าคงที่ และ ΔH_{sol} คือพลังงานความร้อนของการละลาย โดยค่า H_o และ ΔH_{sol} ของระบบพอลิพรอพิลีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ 150–200 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 7.13×10^2 ลูกบาศก์เซนติเมตร(ที่ STP)ต่อกิโลกรัม.เมกกะปาสคาล และ -6.23 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ และค่าคงที่เฮนรี (H_o) ที่หาได้นั้นก็คือความชันของกราฟระหว่างค่าการละลาย (Solubility) กับความดันของระบบ ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความสามารถละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.4 ค่าความสามารถการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [6-2]

พอลิเมอร์	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความดัน (เมกกะปาสคาล)	ค่าความสามารถในการละลาย
พอลิพรอพิลีน	25	20.4	0.1 wt %
(PP)	200	730.0-116.5	0.50-1.59 g/100 g
	180	61.2-152.0	0.3-1.09 g/100 g
	160	53.5-170.2	0.32-1.43 g/100 g
พอลิสไตรีน	35	1.36-10.2	1.84-5.56 g/100 g
(PS)	40	0-9.52	3.47-10.12 g/100 g
	100	7.19-19.77	2.26-11.57 g/100 g
	140	3.57-18.31	3.09-13.4 g/100 g
พอลิไวนิลคลอไรด์	25	0-6.8	0-8 g/100 g
(PVC)	40	13.6	0.1 wt %
	25	0-5.44	0-29 g/100 g
	40/50	4.93-29.61	5.5-13.4-12 g/100 g
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	25/40	6.8	0.0/0.2 wt %
(LDPE)	40	13.6	0.4 wt %
	25	20.4	0.1, 0.0 wt %
	40	6.8/13.6	0.5 wt %
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	25	20.4	0.1 wt %
(HDPE)	40	6.84-17.22	0.41-1.32 g/100 g
	180	6.52-16.8	0.32-1.03 g/100 g
	200	6.96-17.89	0.35-1.20 g/100 g

2.6 การคำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์ (Soaking Time) [3-6]

เวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์ คือเวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้สารช่วยให้เกิดฟองได้ละลายเข้าไปในพอลิเมอร์จนอิ่มตัว (แสดงดังรูปที่ 2.3) ซึ่งหาจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's second diffusion law)



รูปที่ 2.3 เวลาที่ใช้ในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์

จากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิกส์

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{mutual}(c_o) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{2.16}$$

โดยมีเงื่อนไขของขอบเขตและจุดเริ่มต้นคือ

$$x = L \quad t \geq 0 \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \tag{2.16a}$$

$$0 \leq x \leq L \quad t = 0 \quad c = c_i \tag{2.16b}$$

$$x = 0 \quad t \geq 0 \quad c = c_o \tag{2.16c}$$

ผลเฉลยแบบวิเคราะห์ของสมการที่ (2.16) และเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$c = c_o - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4(c_o - c_i)(-1)^n}{2n+1} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right] \exp\left[\frac{-D_{mutual}(c_o)(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \tag{2.17}$$

เมื่อ L คือความหนาของชิ้นงาน c_i และ c_o คือความเข้มข้นของก๊าซที่สภาวะเริ่มต้นและที่ผิวสัมผัสที่สภาวะสมดุลของชิ้นงานกับความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ ผลเฉลยของสมการสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta w_{CO_2}(t)}{\Delta w_{CO_2}(t = \infty)} = 1 - \sum_n \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[\frac{-D_{mutual} (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (2.18)$$

เมื่อ $\Delta w_{CO_2}(t)$ คือ การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ ณ เวลา t

2.7 การคำนวณขนาดและจำนวนเซลล์ในเนื้อโฟม [5-3]

โฟมพลาสติกโดยทั่วไปที่มีคุณสมบัติเท่ากันตลอดปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรและมีเนื้อเดียวสม่ำเสมอจะประกอบด้วย 1,000 ถึง 10,000 เซลล์ โดยความแตกต่างของขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยกับขนาดของเซลล์ที่แท้จริงมีค่าจะประมาณ 12% ถึง 15% ซึ่งขนาดของเซลล์และการกระจายของเซลล์จะขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์และสภาวะของกระบวนการทำโฟม พารามิเตอร์ที่สำคัญและนิยมใช้มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส หรือความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมในส่วนของตัวอย่างนั้น คือ จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรโฟม (n) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของเซลล์และความหนาแน่นของโฟมพลาสติก จำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรโฟม (n) มีค่าดังสมการ

$$n = \left(\frac{n_b}{l^2}\right)^{3/2} \times 10^3 \times \varphi \quad (2.19)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเซลล์ต่อหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรของโฟม n_b คือ จำนวนเซลล์ในพื้นที่ $l \times l$ โดย l คือ ความยาวของด้านที่กำหนดในหน่วยมิลลิเมตร และ φ คือ อัตราการขยายตัว (Expansion Ratio)

อัตราการขยายตัวนิยามได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (2.20)$$

โดย ρ_p คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ρ_f คือ ความหนาแน่นของโฟมในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.8 การวัดสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis) [7]

เป็นเทคนิคที่ใช้วัดสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic) เช่น ความเค้น ความเครียด หรือโมดูลัส (Storage and loss modulus) สำหรับตัวอย่างที่นำมาทดสอบที่มีการเสียรูป โดยวัดเป็นช่วงๆ หรือเป็นระยะๆ และให้ความถี่และอุณหภูมิต่างๆกัน ทั้งนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ relaxation process ของพอลิเมอร์โดยเฉพาะในช่วงการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition) และกระบวนการที่ทำให้มีสถานะคล้ายแก้ว (Subglass process) ในการดำเนินการมีข้อควรระวัง คือความเครียดที่ใช้ในการวัดควรมีค่าน้อย (<0.5%) เพื่อหลีกเลี่ยงการตอบสนองแบบไม่เป็นเส้นตรง เช่น nonlinear visco-elasticity

อุปกรณ์ที่สำคัญในการวัดมี 3 ชนิด คือ

1. ลูกตุ้มที่ทำให้เกิดการบิด (torsion pendulum)
2. อุปกรณ์ที่ใช้หลักการการสะท้อนของเสียง
3. เครื่องมือที่ให้แรงเป็นจังหวะหรือโดยการแกว่ง (forced oscillation instrument)



(ก) ลูกตุ้มที่ทำให้เกิดการบิด (ข) การดิ่งในทิศทางเดียวแบบหลายๆ ครั้ง
รูปที่ 2.4 ลูกตุ้มที่ทำให้เกิดการบิดและการดิ่งในทิศทางเดียวแบบหลายๆ ครั้ง (การให้แรงเป็นจังหวะ)

จากรูปที่ 2.4 (ก) สำหรับลูกตุ้มที่ทำให้เกิดการบิด ตัวอย่างที่นำมาทดสอบอาจจะเป็นแท่งทรงกระบอกถูกยึดไว้ที่ปลายด้านหนึ่ง และปลายอีกด้านหนึ่งจะติดกับ Inertia rod ซึ่ง Inertia rod นี้จะถูกทำให้แกว่งและตัวอย่างจะถูกทำให้บิด (Sinusoidal torsion) ช่วงของความถี่ที่ใช้คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.01-50 เฮิร์ต ค่าสัมประสิทธิ์ของการเฉือนที่วัดได้จริง (shear modulus; G') และค่าในอุดมคติ (G'') แสดงได้ดังนี้

$$G' = \frac{2IM\omega^2}{\pi^4} \quad (2.21)$$

$$G'' = \frac{2I - M}{\pi^4} \omega^2 \frac{\Lambda}{\pi} \quad (2.22)$$

เมื่อ l คือความยาวของชิ้นงาน M คือโมเมนต์ความเฉื่อยของ Inertia rod ω คือมุมของความถี่ (Angular Frequency) r คือรัศมีของชิ้นงาน และ Λ คือ Logarithmic decrement

โดย Logarithmic decrement นิยามดังนี้

$$\Lambda = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{A_n}{A_{n+k}} \right) \quad (2.23)$$

เมื่อ k คือจำนวนของการแกว่ง และ A_i คือ แอมพลิจูดของการแกว่งครั้งที่ i ค่ามุมของความถี่สามารถเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนโมเมนต์ความเฉื่อยของ Inertia rod (M) วิธีที่ให้แรงเป็นจังหวะสามารถใช้ได้กับช่วงความถี่ที่กว้างกว่าวิธีแรก โดยความถี่ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^4 เฮิร์ต การขยายในแกนเดียว (Uniaxial Extension) การโค้งงอ (Bending) การบิด (Torsion) และการเฉือน (Shear) จะมีอุปกรณ์ที่ใช้แตกต่างกัน โดยจะให้ sinusoidal strain แก่ชิ้นงาน และจะสามารถวัดความเค้น (แรง) ได้โดยใช้ strain gauge transducer ค่าที่วัดได้จะเป็นฟังก์ชันของเวลา จะทำให้เรารู้ค่าความเค้นและความเครียดเป็นฟังก์ชันของเวลา ทำให้สามารถคำนวณหาค่าโมดูลัส (E^* หรือ G^*) ได้

2.8.1 การประยุกต์ใช้งานของเครื่องวัดสมบัติเชิงกลพลวัต

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของสารตัวอย่างพอลิเมอร์เพื่อดู

- ช่วงการประยุกต์ใช้งานของอุณหภูมิ
- ลักษณะความขึ้น
- ข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของพอลิเมอร์ สารผสม หรือโคพอลิเมอร์
- พฤติกรรมการไหลและ relaxation ของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิเคราะห์ค่าโมดูลัสของวัสดุพอลิเมอร์
3. วิเคราะห์อุณหภูมิสมภาวะคล้ายแก้ว (T_g) ของวัสดุพอลิเมอร์
4. วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นส่วนพลาสติก (TMA mode)
5. วิเคราะห์ softening point ของวัสดุพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- พอลิพรอพิลีน (Polypropylene: PP)
- เส้นใยแก้วที่เหลือจากโรงงาน (Waste Glass Fiber)
- เส้นใยแก้วเกรดทางการค้าชนิด Chop Glass Fiber
- เครื่องผสมพลาสติกแบบปิด (Internal Mixer)
- เครื่องบดพลาสติก (Crusher)
- เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Compression Molding Machine)
- แม่พิมพ์ (Die) รูปดัมเบล
- เครื่องมือทดสอบสมบัติต้านทานแรงดึงยืด (Tensile Test)
- เครื่องทดสอบความหนาแน่น (Electronic Densimeter)
- ถึงปฏิบัติการทำโม่ความดันสูง
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscopy: SEM)
- เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer: DMA)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การผสมและการขึ้นรูปพลาสติกผสม

3.2.1.1 การผสมเส้นใยแก้วและพลาสติก

ผสมพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยแก้วในอัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อเส้นใยแก้วเป็น 90/10 80/20 และ 70/30 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยใช้เส้นใยแก้ว 3 ชนิด (แสดงดังตารางที่ 1) ผสมในเครื่องผสมแบบปิด ซึ่งใช้โรเตอร์แบบโรลเลอร์ ทำที่ผสมที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบโรเตอร์ 70 รอบต่อนาที โดยในขั้นตอนการผสมจะเริ่มผสมพอลิพรอพิลีนเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจึงใส่เส้นใยแก้ว แล้วผสมจนครบ 8 นาที ยกเว้นเส้นใยแก้วชนิด F2 จะใส่เส้นใยแก้วนาที่ที่ 2 และจากนั้น ห้างกันทุกๆ 1.5 นาที จำนวน 9 ครั้งและผสมจนครบ 15 นาทีในสูตร 10%F2 และ 20%F2 และ 18 นาทีในสูตร 30%F2 ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยแก้วชนิด F2 มีลักษณะฟู ทำให้การผสมต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเพื่อให้เส้นใยแก้วเข้ากันได้ดีกับพอลิพรอพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเส้นใยแก้ว

คุณสมบัติ	Powder (F1)	Chop (F2)	Commercial(NF)*
เส้นผ่านศูนย์กลาง(μm)	7**	7	13
ลักษณะทางกายภาพ	ผง	เส้นใยสั้น	Chop Glass Fiber ยาว 3 mm

*จัดซื้อจากห้างหุ้นส่วนจำกัด รักษ์วานิช

**คัตขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน 140 Mesh



(ก) โรเตอร์แบบโรลเลอร์

(ข) เครื่องผสมพลาสติก

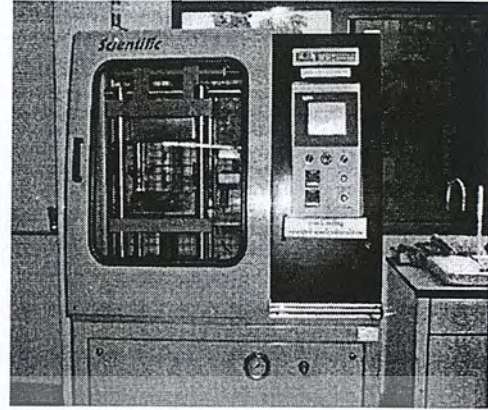
รูปที่ 3.1 โรเตอร์แบบโรลเลอร์และเครื่องผสมพลาสติก

3.2.1.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

นำพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับเส้นใยแก้วออกจากเครื่องผสม ซึ่งพลาสติกผสมที่ได้โครงการวิจัยนี้เรียกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต นำไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก และขึ้นรูปชิ้นงานโดยการอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งใช้โมลด์หนา 2 มิลลิเมตร สภาวะการขึ้นรูปที่ 210 องศาเซลเซียส ความดัน 18 ตัน ทำการ Preheating 7 ถึง 10 นาที Beforeventing 1.2 ถึง 1.5 วินาที จำนวน 3 ครั้ง Fullpressing 4 นาที Cooling 8 นาที



(ก) เครื่องบดพลาสติก



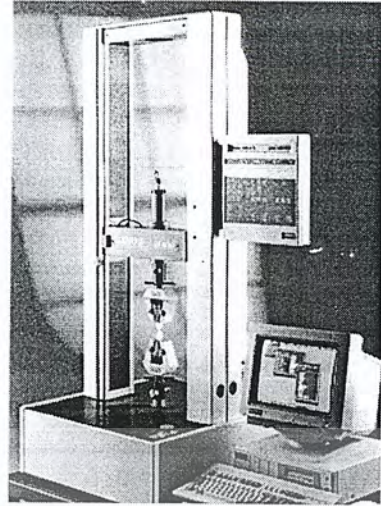
(ข) เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

รูปที่ 3.2 เครื่องบดพลาสติกและเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

3.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

3.2.2.1 การทดสอบสมบัติด้านทานแรงดึงยืด

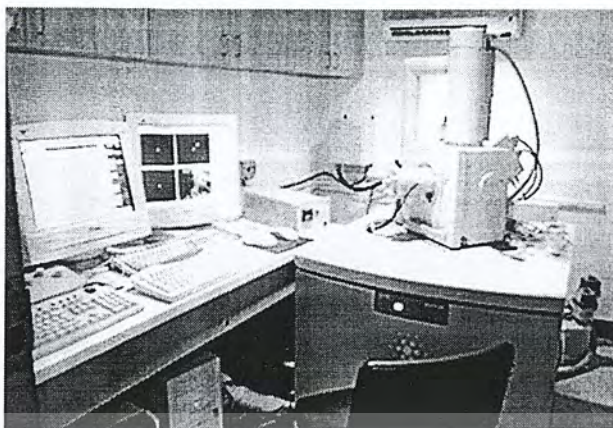
เตรียมตัวอย่าง จำนวน 5 ตัวอย่างให้มีขนาดตาม ASTM D 638 โดยเลือกการเตรียมตัวอย่าง Type 4 ความหนาของตัวอย่างจากการขึ้นรูปแบบอัดประมาณ 2 มิลลิเมตร ระยะที่ใช้พิจารณาในการเปลี่ยนรูปคือระยะ Gauge Length ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ในการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบสมบัติด้านทานแรงดึงยืด โดยใช้ตัวจับ (Grip) จับชิ้นงานทั้งสองด้าน ตัวจับด้านล่างจะยึดติดกับเครื่อง ส่วนตัวจับด้านบนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบ 5 ครั้ง แล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย



(ก) ชิ้นงานขนาดตาม ASTM D 638 Type 4 (ข) เครื่องทดสอบสมบัติต้านทานแรงดึงยึดรูปที่ 3.3 ชิ้นงานขนาดตาม ASTM D 638 Type 4 และเครื่องทดสอบสมบัติต้านทานแรงดึงยึด (Tensile Test Machine)

3.2.3 ศึกษาโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

1. การศึกษาโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตจะทำการศึกษาบริเวณพื้นที่หน้าตัดของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต และต้องใช้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่มีขนาดเล็กสูงประมาณ 3-4 มิลลิเมตร เนื่องจากพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ได้มีลักษณะค่อนข้างแข็งและเหนียว ดังนั้นในการหักพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตจะต้องนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว เพื่อในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเปราะ สามารถแตกหักได้ง่าย ทำการหักพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตจะได้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ไม่มีผลของการยึดเนื่องจากความเหนียวของพลาสติก สามารถศึกษาโครงสร้างได้ง่าย
2. นำพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ได้ไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเป็นประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า
3. ศึกษาโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

3.2.4 คำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซในพลาสติก (Soaking Time)

แสดงในภาคผนวก ข

3.2.5 การทำไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม

3.2.5.1 ตัดพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อนโดยให้มีขนาดกว้างประมาณ 2 เซนติเมตร และยาวประมาณ 3 เซนติเมตร ทำฟอยล์ให้เป็นรูปกระพวง จากนั้นนำกระพวงฟอยล์ใส่ลงในเครื่องทำโฟมแบบอัดความดันสูงและขึ้นเนื้อให้แน่นสนิท เริ่มทำโฟมโดยมีขั้นตอนดังนี้

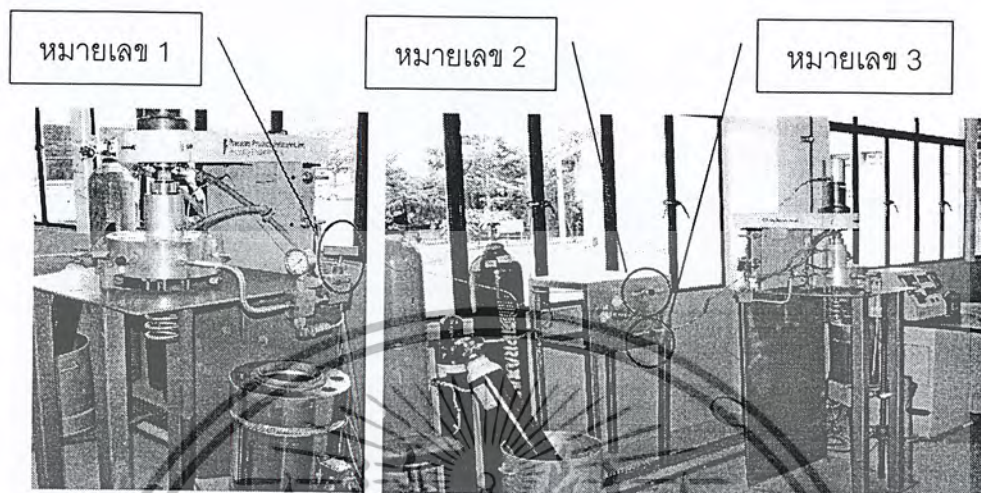
1. กำหนด Set Point ของ Heater ที่ 150 องศาเซลเซียส และตั้งความดันไว้ที่ 10 หรือ 14 เมกกะปาสคาล

2. ไล่อากาศที่อยู่ภายในถังออกโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปแทนที่ โดยปิดวาล์วหมายเลข 1 ซึ่งเป็นทางออกของอากาศ และเปิดวาล์วหมายเลข 2 ซึ่งจะทำหน้าที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป (ดังรูปที่ 3.6) ดูที่เครื่องควบคุมให้ได้ความดันประมาณ 0.34-0.68 เมกกะปาสคาล จากนั้นปิดวาล์วหมายเลข 2 และเปิดวาล์วหมายเลข 1 เพื่อไล่อากาศออกและเหลือความดันไว้ประมาณ 0.14 เมกกะปาสคาล เพื่อป้องกันอากาศภายนอกดันกลับเข้าระบบ จากนั้นปิดวาล์วหมายเลข 1 ทำการไล่อากาศเช่นนี้ประมาณ 4-5 ครั้ง

3. เปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อควบคุมให้ได้ความดัน 10 หรือ 14 เมกกะปาสคาล เมื่อความดันถึง 10 หรือ 14 เมกกะปาสคาล ให้ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง เมื่อครบ 3-5 ชั่วโมง ปิด Heater และปิดวาล์วหมายเลข 3 จากนั้น เปิดวาล์วหมายเลข 2 เพื่อลดอุณหภูมิ

4. เปิดวาล์วหมายเลข 1 อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปหมดแล้วให้ปิดวาล์วหมายเลข 2

5. ชั้นนํ้าตอกเพื่อนำพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เป็นโฟมซึ่งงานวิจัยนี้เรียกว่าไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมออกจากเครื่อง



รูปที่ 3.6 เครื่องขึ้นโฟมแบบอัดความดันสูงและตำแหน่งวาล์ว

3.2.6 ศึกษาสัณฐานวิทยาของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
ทำตามขั้นตอนที่ 3.2.3

3.2.7 หาความหนาแน่นอัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม

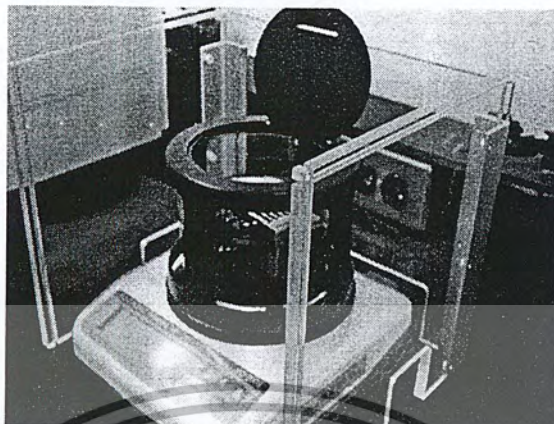
หาความหนาแน่นของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต และไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ MD-200S ซึ่งสามารถใช้วัดความหนาแน่นของวัตถุได้ทั้งของแข็งและของเหลว แต่ไม่สามารถวัดความหนาแน่นของวัตถุที่มีลักษณะซึ่งใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes) โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของน้ำ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นค่าอ้างอิง มีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

1. ตั้งค่าน้ำจอบแสดงผลเป็นศูนย์
2. ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานในอากาศขณะแห้งและทำการบันทึกค่า
3. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำแล้วทำการบันทึกค่า (สังเกตดูว่ามีฟองอากาศอยู่ในน้ำหรือไม่ ถ้ามีให้กำจัดออกก่อนบันทึกค่า)

4. เครื่องซึ่งจะแสดงผลเป็นค่าความหนาแน่น

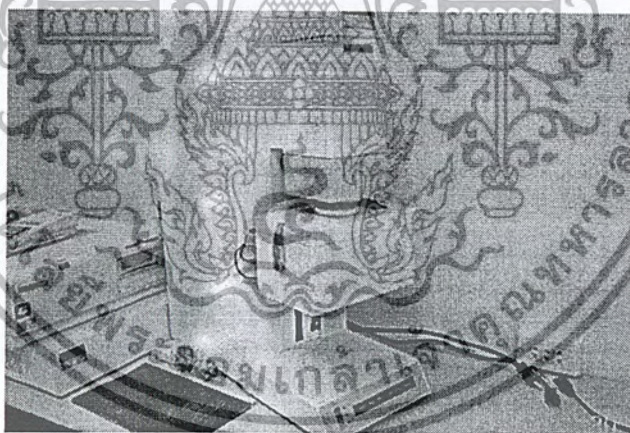
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ค่าความหนาแน่นที่ได้นำไปคำนวณหาอัตราขยายตัวจากสมการที่ (2.20)



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความหนาแน่น (Electronic Densimeter)

3.2.8 ศึกษาสมบัติเชิงกลของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต
โพลีด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

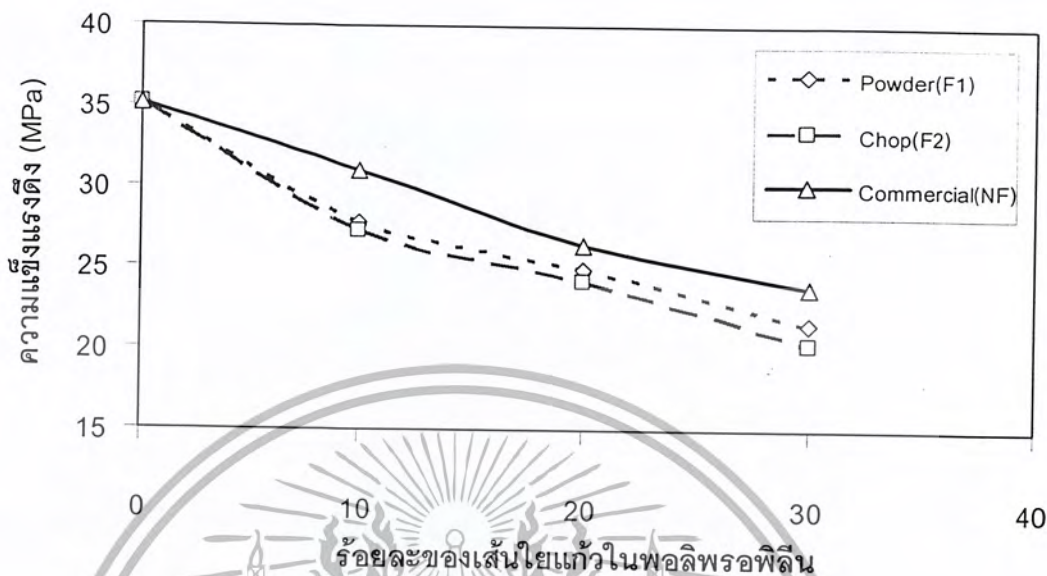
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ได้นำเส้นใยแก้วที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ โดยการผลิตเป็นพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตนั้น คณะผู้ดำเนินงานวิจัยต้องการศึกษาว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งชนิดผง และชนิดเส้นลึ้นที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น มีความเป็นไปได้เพียงใด ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ทดแทน หรือมีคุณสมบัติเชิงกลที่เทียบเท่ากับพอลิพรอพิลีน และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ ในโครงการวิจัยนี้จึงได้ทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วแต่ละชนิด ที่อัตราส่วนเส้นใยแก้วร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

ผลการทดลองในส่วนนี้ แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้ว และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ โดยได้ทดสอบ ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ร้อยละการยืดตัว (Percentage Elongation) และค่าโมดูลัส (Modulus) ตามลำดับ สามารถแสดงผลได้ดังนี้

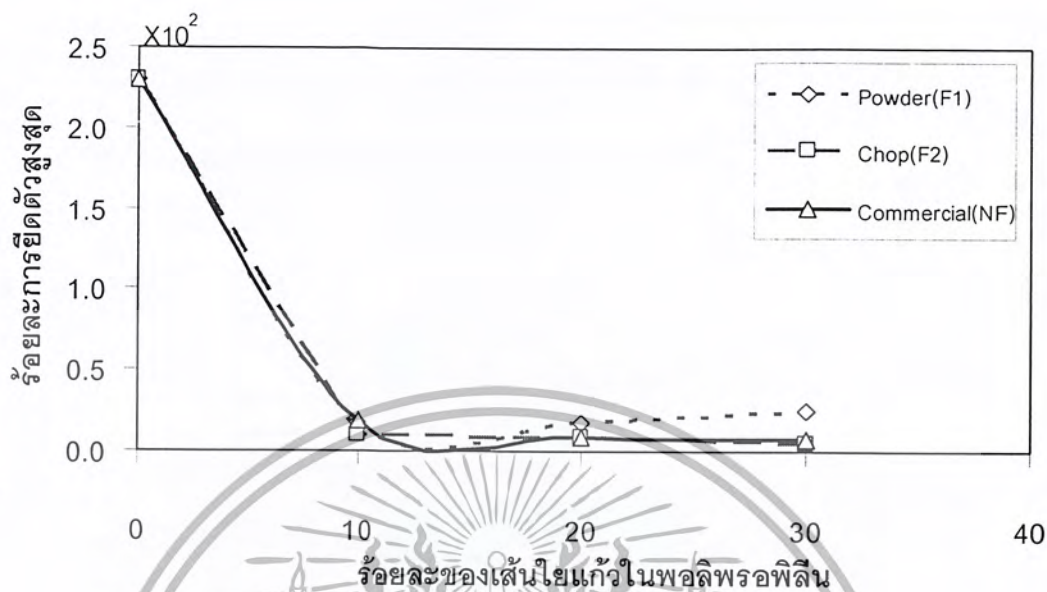
4.1.1 สมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต



รูปที่ 4.1 ผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วต่อค่าความแข็งแรงดึงของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

ผลการทดลองในรูปที่ 4.1 แสดงความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต พบว่าพอลิพรอพิลีน มีความแข็งแรงดึงมากที่สุด เมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โดยพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษขนวนเส้นใยแก้วทั้งชนิดผง และเส้นสั้น ที่ทุกอัตราส่วนของเส้นใยแก้ว มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เป็นเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นนั้น จะมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุด เนื่องจากลักษณะเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นเส้นพองฟูและเกาะกันเป็นก้อน ทำให้เส้นใยลักษณะดังกล่าวผสมเข้ากับพอลิพรอพิลีนได้ไม่ดี และการกระจายตัวที่ไม่ดีของเส้นใยแก้วนี้ จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยแก้วกับพอลิพรอพิลีนมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงของวัสดุมีค่าลดลง

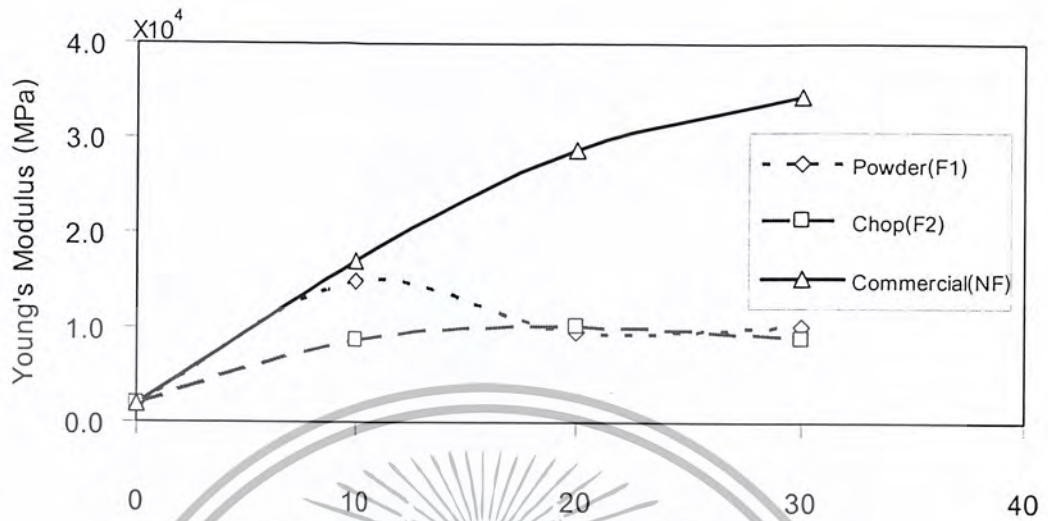
4.1.2 สมบัติร้อยละการยืดตัวของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต



รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วต่อค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุดของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าร้อยละการยืดตัว (Percentage Elongation) ของพอลิพรอพิลีนมีค่าสูงที่สุด และเมื่อผสมเส้นใยแก้วลงในพอลิพรอพิลีน จะทำให้ร้อยละการยืดตัวลดลงอย่างมาก โดยพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษอนุวณเส้นใยแก้วชนิดผง และชนิดเส้นสั้น มีค่าร้อยละการยืดตัวใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ และเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยแก้วทั้งสามชนิดในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ ค่าร้อยละการยืดตัวของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตยังคงมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนของเส้นใยแก้ว โดยร้อยละการยืดตัวของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตลดลง พบว่าเป็นลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะเป็นเนื้อผสม (Heterogeneous) ทำให้เมื่อมีการยืดตัวของวัสดุคอมโพสิต เนื้อพอลิเมอร์กับเส้นใยแก้วจะแยกขาดจากกันได้ง่าย

4.1.3 สมบัติโมดูลัสของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต



ร้อยละของเส้นใยแก้วในพอลิพรอพิลีน

รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วต่อค่าโมดูลัสของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

รูปที่ 4.3 ได้แสดงผลของปริมาณและชนิดของเส้นใยแก้วต่อค่าโมดูลัสของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต จากกราฟจะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่า ค่าโมดูลัสของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีค่ามากกว่าโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน เนื่องจากการที่มีเส้นใยแก้วไปยึดเกาะกับพอลิพรอพิลีน จะมีผลทำให้เกิดการลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิพรอพิลีน วัสดุจึงเปลี่ยนรูปได้ยาก คือมีความคงรูปสูง โดยเฉพาะพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตชนิดที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ จะให้ค่าโมดูลัสที่สูงกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งชนิดผง และชนิดเส้นสั้น เนื่องจากเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์นั้น โดยทั่วไปจะมีการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านการยึดเกาะกับวัสดุ ทำให้เส้นใยแก้วชนิดนี้ยึดเกาะกับพอลิพรอพิลีนได้ดี จึงมีความแข็งแรงมากกว่าเศษฉนวนเส้นใยแก้วซึ่งยึดเกาะกับพอลิพรอพิลีนได้ไม่ดี และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ในพอลิพรอพิลีนมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งหมดคือ ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และค่าโมดูลัสพอลิพรอพิลีน และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต พบว่าพอลิพรอพิลีนจะให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัวสูงกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วทั้งสามชนิด แต่พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตจะให้ค่าโมดูลัสที่สูงกว่า และจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยรวมนั้น แสดงให้เห็นว่า พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิพรอพิลีนคอม

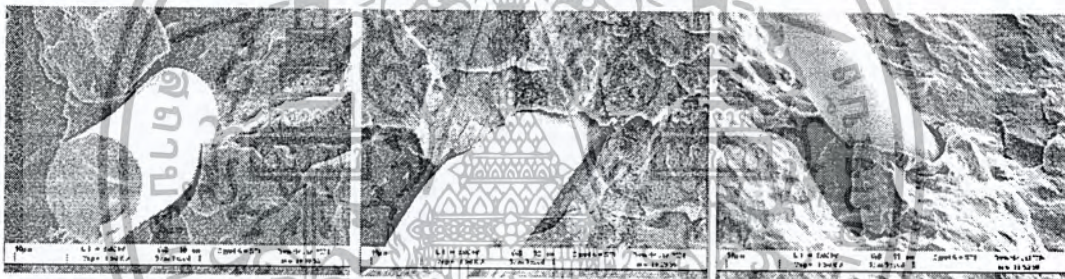
โพ-สิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วชนิดผง และเส้นสั้นที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้ คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของ พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งแบบชนิดผง และเส้นสั้นกับพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ เพื่อนำสัณฐานวิทยา มาอธิบายสาเหตุที่พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้ว มีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์

4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโดยใช้ SEM โดยมุ่งไปที่ การศึกษาลักษณะการยึดเกาะของเส้นใยแก้วกับเนื้อพอลิพรอพิลีน และดูลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยแก้วทั้งสามชนิดในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

4.2.1 ลักษณะการยึดเกาะของพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยแก้ว



(ก) เส้นใยแก้วชนิดผง (ข) เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น (ค) เส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์

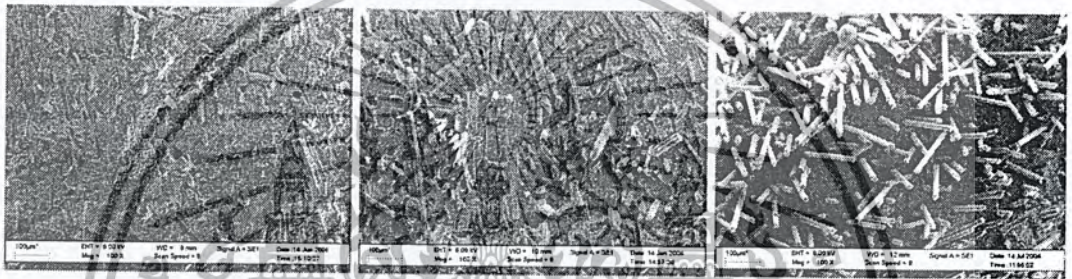
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาการยึดเกาะของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับเส้นใยแก้วในอัตราส่วน 90/10 สำหรับเส้นใยแก้วชนิดต่างๆ ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบทางสัณฐานวิทยาการยึดเกาะของเส้นใยแก้วชนิดที่เป็น เศษฉนวนทั้งแบบผง และแบบเส้นสั้น กับเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ โดยเลือกเปรียบเทียบที่ปริมาณ อัตราส่วนเส้นใยแก้วเดียวกัน คือที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากสัณฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งแบบผง และแบบเส้นสั้น มีการยึดเกาะกับเนื้อพอลิพรอพิลีนได้ไม่ดีโดยสังเกตได้จาก รูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) บริเวณผิวสัมผัสของเส้นใยแก้วกับเนื้อพอลิพรอพิลีน ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ว่าเป็นเพราะความแตกต่างของสมบัติความเป็นขั้วของวัสดุ คือพอลิพรอพิลีนเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว ส่วนเส้นใยแก้วเป็นวัสดุที่มีขั้ว จึงทำให้วัสดุทั้งสองยึดเกาะกันไม่ได้ดี ส่วนสัณฐานวิทยาการยึด

เกาะของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมด้วยเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ จากการสังเกต รูปที่ 4.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เปิดเผยข้อมูลด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) บริเวณผิวสัมผัสของเส้นใยแก้วกับเนื้อพอลิพรอพิลีน พบว่ามีการยึดเกาะกันดีมากกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วแบบผง และแบบเส้นสั้น ที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ โดยทั่วไปนั้นได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารที่ช่วยในการยึดเกาะกับวัสดุ ด้วยเหตุนี้ฐานฐานวิทยาการยึดเกาะของเส้นใยแก้วกับพอลิพรอพิลีนจึงมีความสอดคล้องกับผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลที่แสดงให้เห็นว่า พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งแบบผงและแบบเส้นสั้น

4.2.2 ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยแก้วในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต



ก) เส้นใยแก้วชนิดผง ข) เส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้น ค) เส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์
รูปที่ 4.5 ฐานฐานวิทยาการกระจายตัวของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับเส้นใยแก้วในอัตราส่วน 70/30 สำหรับเส้นใยแก้วชนิดต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จากรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบทางฐานฐานวิทยาการกระจายตัวของเส้นใยแก้วชนิดที่เป็นเศษฉนวนทั้งแบบผง และแบบเส้นสั้น กับเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ โดยเลือกเปรียบเทียบที่ปริมาณอัตราส่วนเส้นใยแก้วเดียวกัน คือที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จากฐานฐานวิทยาของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วชนิดผงมีการกระจายตัวในเนื้อพอลิพรอพิลีนดีที่สุดในรูปที่ 4.5 (ก) เนื่องจากลักษณะเส้นใยแก้วที่เป็นผง จึงทำให้สามารถผสมเข้ากับพอลิพรอพิลีนได้ดี และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วนพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมด้วยเศษฉนวนเส้นใยแก้วแบบเส้นสั้น แสดงฐานฐานวิทยาที่มีการจัดเรียงตัว และกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.4 (ข) เนื่องจากลักษณะของเส้นใยแก้วแบบเส้นสั้นมีความพองฟู จึงผสมเข้ากับพอลิพรอพิลีนได้ไม่ดี และกระจายตัวไม่ทั่วเนื้อพอลิพรอพิลีน และถ้าพิจารณาฐานฐานวิทยาการกระจายตัวของคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ จะพบว่าเส้นใยแก้วชนิดนี้ซึ่งมีลักษณะที่ยาวกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่นนั้น มีการเรียงตัวอย่างเป็น

ระเบียบ และสม่ำเสมอทั่วพอลิพรอพิลีน ดังรูปที่ 4.4 (ค) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาฐานฐานวิทยาการกระจายตัวของเส้นใยแก้วทั้งสามชนิด ได้ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเหล่านั้น คือด้วยเหตุที่พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตจากเศษฉนวนเส้นใยแก้วที่เป็นแบบเส้นสั้นมีความพองฟู และกระจายตัวได้ไม่ดีในเนื้อพอลิพรอพิลีน จึงทำให้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดนี้มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ส่วนพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วที่เป็นแบบผง ถึงแม้จะมีการกระจายตัวที่ดี ในเนื้อพอลิพรอพิลีน เนื่องจากลักษณะเส้นใยที่เป็นผง แต่สมบัติการยึดเกาะของเส้นใยแก้วชนิดนี้กับเนื้อพอลิพรอพิลีนที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้วว่ายึดเกาะกันไม่ได้ดี จึงส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำเช่นกัน และสำหรับพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์นั้น มีทั้งการกระจายตัวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วที่สม่ำเสมอ รวมถึงสามารถยึดเกาะกับเนื้อพอลิพรอพิลีนได้ดี เนื่องจากผ่านการปรับคุณสมบัติของเส้นใยแก้วด้วยสารที่ในการยึดเกาะกับวัสดุ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลจากฐานฐานวิทยาทั้งหมดจึงแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจน และสอดคล้องกับคุณสมบัติเชิงกลว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์นั้น มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งชนิดผง และชนิดเส้นสั้น ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ได้จากการนำเศษฉนวนเส้นใยแก้วชนิดผง และชนิดเส้นสั้น ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์สูงสุด คณะผู้ดำเนินโครงการวิจัยจึงได้นำพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตจากเส้นใยแก้วทั้งสามชนิดมาผลิตเป็นไมโครเซลลูลาร์คอมโพสิตโฟม เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่ต่ำของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้ว และนำไมโครเซลลูลาร์คอมโพสิตโฟม มาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติกับไมโครเซลลูลาร์คอมโพสิตโฟมที่ได้จากพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในผลการทดลองต่อไปนี้

4.3 ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม

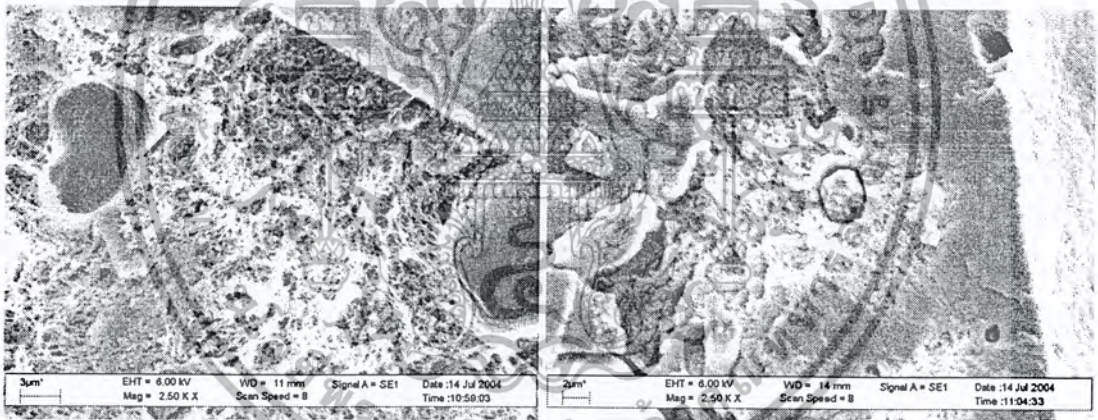
เนื่องจากในปัจจุบัน ไมโครเซลลูลาร์โฟมเป็นเทคโนโลยีวัสดุใหม่ที่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติดีขึ้น โดยขนาดเซลล์ของไมโครเซลลูลาร์โฟมจะมีขนาดเล็กกว่าโฟมธรรมดาทั่วไปซึ่งขนาดที่ได้จะอยู่ในช่วงไมโครเมตร และความหนาแน่นของเซลล์โฟมต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตรจะมากกว่าโฟมธรรมดาทั่วไป โดยอยู่ในช่วงมากกว่า 10^{10} เซลล์ขึ้นไป งานวิจัยนี้ได้นำพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมได้มาเตรียมเป็นไมโครเซลลูลาร์โฟม โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารให้พอง ภายใต้ความดัน 10 และ 14 เมกกะปาสคาล ในถังปฏิกรณ์ทำโฟมความดันสูง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งได้คำนวณค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิพรอพิลีนที่ความดัน 10 เมกกะปาสคาลนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติก และอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ได้เท่ากับ 3.15×10^6 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และเวลาดูดซึมของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิพรอพิลีนประมาณ 1.08 ชั่วโมง แต่ในการทดลองได้เพิ่มเวลาการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 3-5 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ได้มากจนเกือบถึงสภาวะสมดุล ส่วนที่ความดัน 14 เมกกะปาสคาล มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมพัทธ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับที่ 10 เมกกะปาสคาล เนื่องจากความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ และจากการทดลองเตรียมไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โฟมสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

4.3.1 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โฟม

การศึกษาพื้นฐานวิทยาของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 พื้นฐานวิทยาของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกกะปาสคาล ที่กำลังขยาย 2500 เท่า

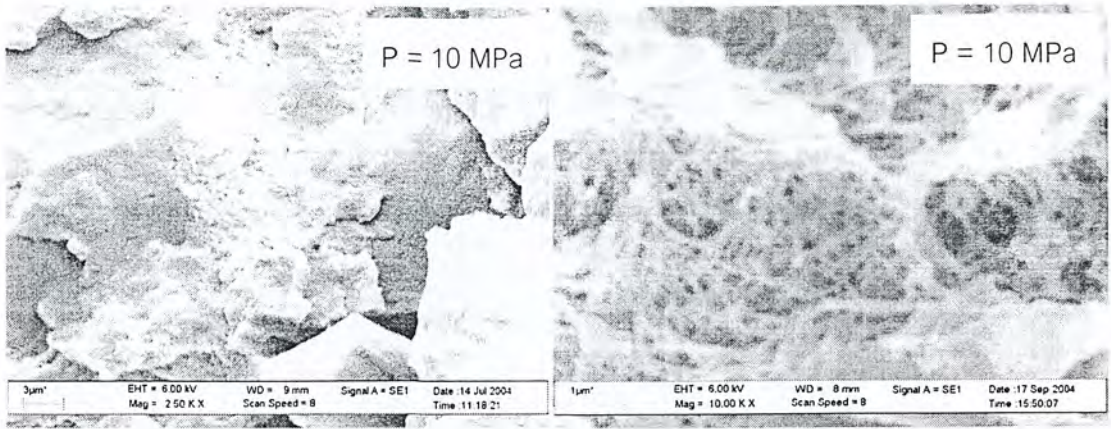
จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมมีการกระจายตัวของรูพรุนหรือเซลล์ยังไม่สม่ำเสมอ และพบว่าเซลล์ที่เกิดขึ้นมักจะมีขอบเขตรอบๆ เส้นใยแก้ว ทั้งนี้อาจจะเกิดเนื่องจากเส้นใยแก้วยึดติดกับพอลิพรอพิลีนได้ไม่ดี ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเส้นใยแก้วกับพอลิพรอพิลีน และทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านไปยังบริเวณนี้ได้ยากกว่าบริเวณอื่น โฟมจึงเกิดได้มากที่บริเวณรอบๆ เส้นใยแก้ว นอกจากนี้จากพื้นฐานวิทยายังพบว่า

เซลล์ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 170-200 นาโนเมตร

4.3.2 ผลของความดันที่ใช้เตรียมไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โฟม

โดยทั่วไปความสามารถในการละลาย (Solubility) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อพอลิพรอพิลีนเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law) ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มากขึ้น เราจะสามารถเพิ่มค่าการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิพรอพิลีนได้ โครงการวิจัยนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบผลของการเตรียมไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ที่อุณหภูมิคงที่คือ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 10 และ 14 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ จากผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่เตรียมได้สามารถแสดงได้ดังนี้



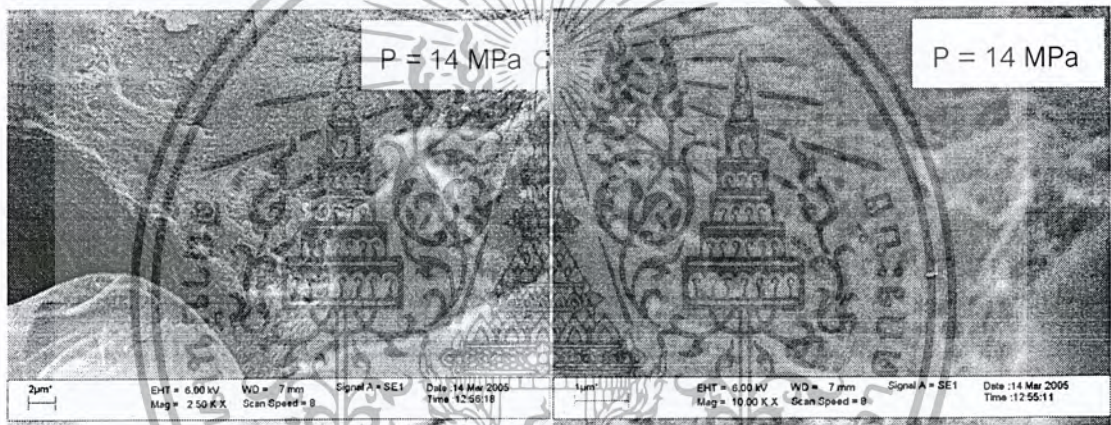


(ก) กำลังขยาย 2500 เท่า

ความดัน 10 เมกกะปาสคาล

(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ความดัน 10 เมกกะปาสคาล



(ค) กำลังขยาย 2500 เท่า

ความดัน 14 เมกกะปาสคาล

(ง) กำลังขยาย 10000 เท่า

ความดัน 14 เมกกะปาสคาล

รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการเกิดโฟมของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม

ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 10 และ 14 เมกกะปาสคาล

กำลังขยาย 2500 และ 10000 เท่า

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดโฟมของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ที่ความดัน 10 เมกกะปาสคาล จะน้อยกว่าบริเวณที่เกิดโฟมของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม ที่ความดัน 14 เมกกะปาสคาล ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น นั่นคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 14 เมกกะปาสคาล จะมีความสามารถในการละลายมากกว่าก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 10 เมกกะปาสคาล ความสามารถในการละลายดีกว่านี้ทำให้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายเข้าไปในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตได้มากกว่า มีบริเวณที่เกิดโฟม มากกว่า แสดงว่าเกิดโฟมได้ดีกว่า ทำให้ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ความดัน 14 เมกกะปาสคาล มีบริเวณที่เกิดโฟมมากกว่า เกิดโฟมได้ดีกว่า นั่นคือความแตกต่างของพื้นที่ ที่เกิดโฟมเป็นผลมาจากความดัน โดยเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ที่เกิดโฟมเพิ่มมากขึ้น และเกิดโฟมได้ดีขึ้น

4.3.3 อัตราการขยายตัวของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม

ผลการทดลองส่วนนี้แสดงความหนาแน่นและอัตราการขยายตัวของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โฟม เพื่อทำการเปรียบเทียบพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วแต่ละชนิดที่อัตราส่วน ต่างๆ โดยความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต และไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีน คอมโพสิตโฟมแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นเฉลี่ยของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตและไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีน คอมโพสิตโฟมที่เตรียมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดันของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์เท่ากับ 14 เมกกะปาสคาล

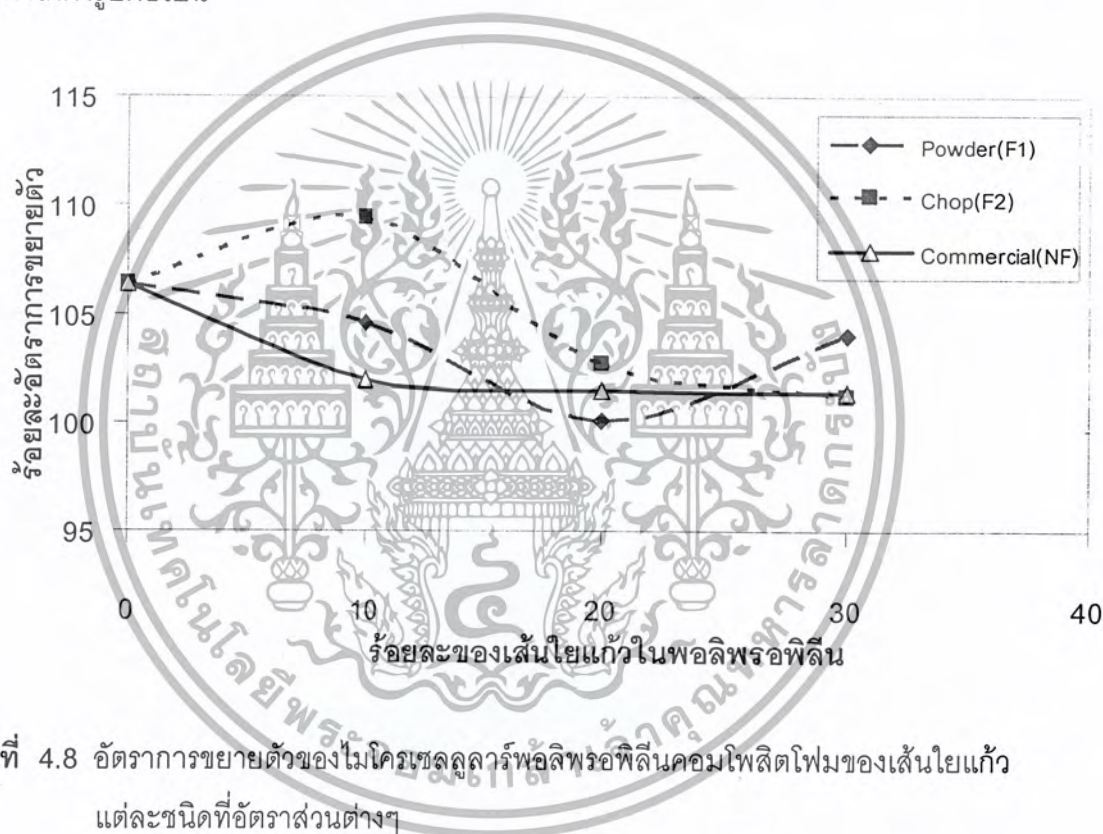
สูตร พลาสติกผสม	ร้อยละ เส้นใยแก้ว	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	
		พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต	ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต
PP	0	0.906	0.825
F1	10	0.958	0.916
F2		0.952	0.87
NF		0.961	0.942
F1	20	1.019	1.018
F2		1.019	0.992
NF		1.03	1.015
F1	30	1.095	1.053
F2		1.089	1.076
NF		1.098	1.083

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราส่วนการผสมของเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความ หนาแน่นของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมจะเป็นการเพิ่ม ปริมาณเส้นใยแก้วที่มีความหนาแน่นมากกว่าพอลิพรอพิลีนจึงเป็นผลให้ความหนาแน่นของพอลิ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรอพิลีนคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้น และยังพบว่าความหนาแน่นของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีค่ามากกว่าไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม เนื่องจากไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมจะมีปริมาตรมากกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเมื่อน้ำหนักเท่ากัน โดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในเนื้อพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต ทำให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กระจายตัวอยู่ในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต เป็นผลให้ความหนาแน่นของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีค่ามากกว่าไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม

เมื่อศึกษาอัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม เพื่อเปรียบเทียบไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ กัน แสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 อัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมจะมีอัตราการขยายตัวน้อยกว่าพอลิพรอพิลีนโฟม โดยพอลิพรอพิลีนโฟมจะมีร้อยละอัตราการขยายตัวประมาณ 106 และเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้นอัตราการขยายตัวจะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมเส้นใยแก้วกับพอลิพรอพิลีนเส้นใยแก้วจะไปแทนที่พอลิพรอพิลีนทำให้พื้นที่ที่สามารถเกิดโฟมได้ลดลง และเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณเส้นใยแก้วมากขึ้น ทำให้พื้นที่ที่สามารถเกิดโฟมได้ลดลงมากขึ้นด้วย จึงทำให้อัตราการขยายตัวของ

ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมน้อยกว่าพอลิพรอพิลีนโฟม และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ ยังพบว่าอัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นจะมีแนวโน้มสูงกว่าไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วชนิดอื่น โดยร้อยละอัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเฉลี่ยมีค่าประมาณ 104 ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นนี้มีลักษณะพองฟู การผสมจะทำให้ยาก ทำให้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ได้จากการผสมมีช่องว่างระหว่างเส้นใยแก้วกับพอลิพรอพิลีนมากกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่น จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายเข้าไปในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตนี้ได้ดีกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตชนิดอื่น จึงทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตชนิดอื่น ทำให้ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีอัตราการขยายตัวมากกว่าไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมชนิดอื่นๆ ทำให้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นเกิดโฟมได้ดีที่สุด

ในทางตรงกันข้ามไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วชนิดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะมีแนวโน้มของอัตราการขยายตัวต่ำที่สุด โดยร้อยละอัตราการขยายตัวเฉลี่ยมีค่าประมาณ 101 ทั้งนี้เนื่องจากจากฐานฐานวิทยาพบว่าเส้นใยแก้วชนิดนี้จะมีการเรียงตัวได้ดีในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยแก้วกับพอลิพรอพิลีนน้อยกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายเข้าไปในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตนี้ได้น้อยกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตชนิดอื่น และทำให้มีปริมาตรน้อยกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตชนิดอื่น เป็นผลให้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วชนิดเส้นที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มีอัตราการขยายตัวน้อยกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตชนิดอื่น ทำให้พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตของเส้นใยแก้วชนิดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เกิดโฟมได้น้อยที่สุด

4.3.4 ความหนาแน่นของเซลลูลาร์ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม

เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองที่ว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นเกิดโฟมได้ดีที่สุด และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตของเส้นใยแก้วชนิดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เกิดโฟมได้น้อยที่สุด ดังนั้นคณะผู้ดำเนินโครงการวิจัยจึงได้ศึกษาความหนาแน่นของเซลลูลาร์ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้แสดงได้ดังตาราง

ตารางที่ 4.2 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์และผลการคำนวณจำนวนเซลล์ของไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟม ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 14 เมกกะปาสคาล

สูตรพลาสติคผสม	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	จำนวนเซลล์ (10^{16} เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
10%F1	0.187	2.8
10%F2	0.177	3.0
10%NF	0.206	2.7

จากตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ของไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟม จะอยู่ในช่วง 0.17-0.21 ไมโครเมตร และในปริมาตรของโฟม 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีจำนวนเซลล์อยู่ประมาณ 10^{16} เซลล์

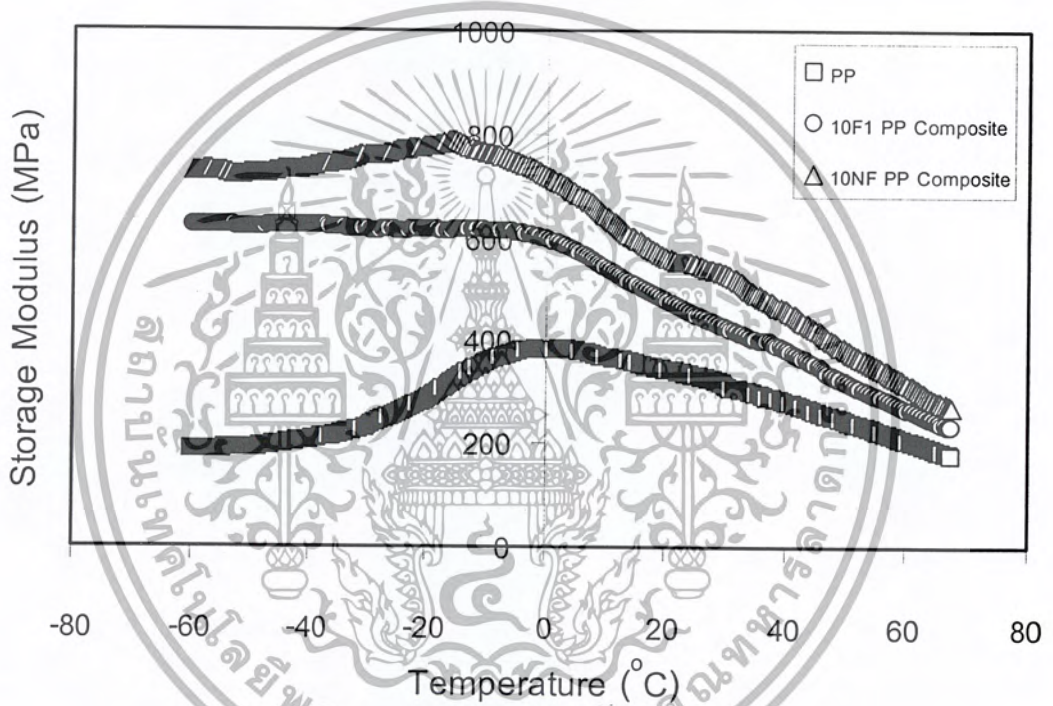
จากผลการศึกษาไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟม พบว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นเกิดโฟมได้ดีที่สุด และพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีของเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์เกิดโฟมได้น้อยที่สุด นั่นคือพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีของเส้นใยแก้วที่เป็นของเสียที่ได้จากโรงงานจะให้โฟมที่ดีกว่าเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ ดังนั้นเพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟมของเส้นใยแก้วทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โครงการวิจัยนี้จึงได้นำไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟมไปทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis: DMA) และเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟมที่ผสมเศษขนวนเส้นใยแก้วที่เป็นของเสียจากโรงงานกับไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟมที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

4.3.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis: DMA)

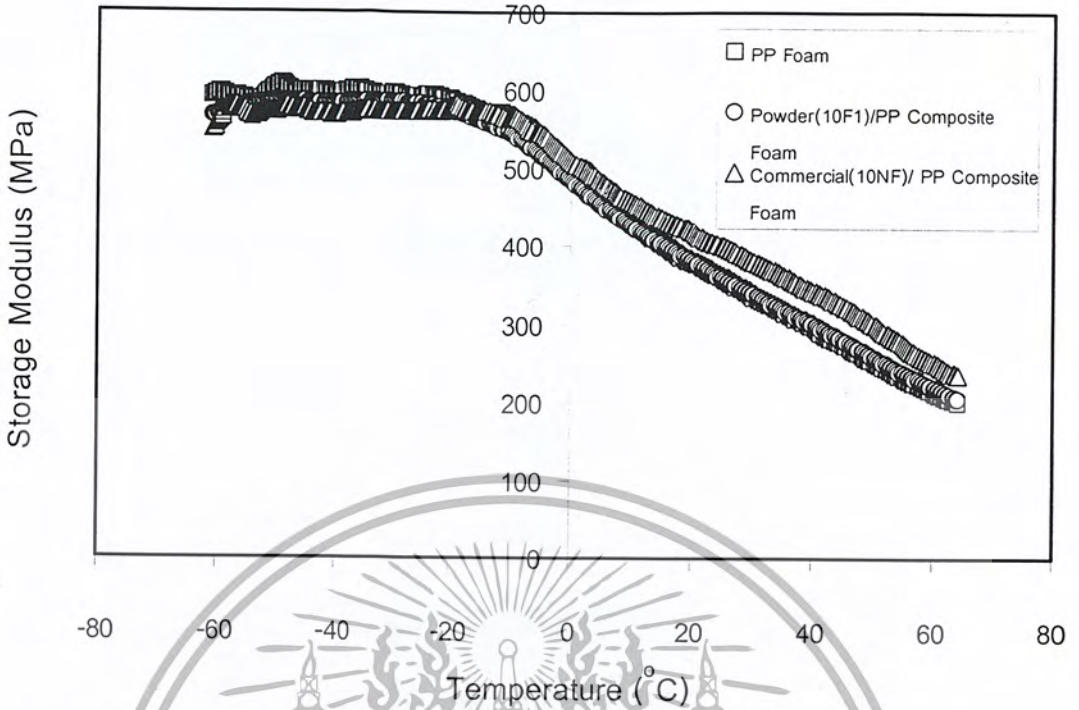
จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile Test) ของพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตี ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีที่ผสมเศษขนวนเส้นใยแก้ว แต่เมื่อนำพอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีมาผลิตเป็นไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟม ผลจากหลักฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์โฟมมีขนาดเล็กมากกว่านาโนเมตร จึงอาจเป็นไปได้ว่าไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟมที่ผสมเศษขนวนเส้นใยแก้ว มีสมบัติเชิงกลที่ดีเทียบเท่ากับไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟมที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของไมโครเซลล์ลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพลีตีโฟม เพื่อที่จะสามารถยืนยันได้ว่า

พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษขนวนเส้นใยแก้วนั้น สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้โดยการผลิตเป็นไมโครเซลลูลาร์โฟม และมีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลพลวัตได้อย่างชัดเจน จึงได้แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตทั้งของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต และไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม รวมถึงพอลิพรอพิลีนและไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีน ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิพรอพิลีน และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดผงและเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนโฟม และ ไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดผงและเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตในกราฟรูปที่ 4.10 พบว่าค่าโมดูลัสของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนโฟม และไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วชนิดผงและเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ มีค่าโมดูลัสที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะวิทยาของโฟมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์เล็กระดับนาโนเมตร จึงทำให้โมดูลัสมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าในตอนแรกก่อนทำโฟม ผลการทดสอบเชิงกลพลวัตในกราฟรูปที่ 4.10 ของพอลิพรอพิลีนและพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วชนิดผงและเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์ มีค่าแตกต่างกันมากอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการทำไมโครเซลลูลาร์โฟมเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วให้ดีขึ้นได้เทียบเท่ากับพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ และในอัตราส่วน พบว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตมีค่าโมดูลัสมากกว่าพอลิพรอพิลีนแต่มีค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืดตัวน้อยกว่า และพอลิพรอพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิพรอพิลีนที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งชนิดผงและเส้นสั้นที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเศษฉนวนเส้นใยแก้วทั้งชนิดผงและเส้นสั้นนี้ยึดเกาะกับพอลิพรอพิลีนได้ไม่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าเศษฉนวนเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นกระจายตัวได้ไม่ดีในพอลิพรอพิลีน

2. จากผลการทดลองผลิตไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟม พบว่าโฟมที่เกิดขึ้นมักมีการกระจายตัวของเซลล์บริเวณรอบๆ เส้นใยแก้ว และเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ในการเกิดโฟมเพิ่มมากขึ้นด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลล์ประมาณ 170-200 ไมโครเมตร ความหนาแน่นของเซลล์ประมาณ 10^{16} เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีจำนวนเซลล์มาก เกิดโฟมได้ดีที่สุด และเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้นอัตราการขยายตัวของโฟมจะมีแนวโน้มลดลง โดยอัตราการขยายตัวของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วชนิดเส้นสั้นมีแนวโน้มสูงกว่าพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมของเส้นใยแก้วชนิดอื่น

3. จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าค่าโมดูลัสของไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนโฟมและไมโครเซลลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วชนิดผง มีค่าโมดูลัสที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งต่างจากพอลิพรอพิลีนและพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่มีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากสัณฐานวิทยาของโฟมที่ผลิตได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กถึงระดับนาโนเมตร ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการทำไมโครเซลลูลาร์โฟมนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตที่ผสมเศษฉนวนเส้นใยแก้วให้ดีขึ้นได้เทียบเท่ากับพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยแก้วเชิงพาณิชย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตด้วยวิธีอัดขึ้นรูปร้อน มักทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ดังนั้นอาจใช้วิธีฉีดขึ้นรูปแทน
2. เส้นใยแก้วที่ใช้ควรผ่านการปรับปรุงสภาพด้านการยึดเกาะกับวัสดุ เนื่องจากถ้าเส้นใยแก้วยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้นด้วย และควรมีการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเส้นใยแก้วที่ใช้ให้มีขนาดสม่ำเสมอ เพื่อให้พอลิเมอร์คอมโพสิตโฟม มีการกระจายตัวของเซลล์โฟมอย่างทั่วถึง
3. ควรเพิ่มความดันในการทำโฟมให้สูงขึ้น เนื่องจากถ้าความดันเพิ่มขึ้น จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายเข้าไปในพอลิเมอร์มากขึ้นด้วย
4. อาจทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านอื่นเพิ่ม เช่น ความต้านทานแรงกระแทก



เอกสารอ้างอิง

- [1] Gui Lin, Xiu-Juan Zhang. et. al., *European Polymer Journal*, 40, 1733 (2004).
- [2] L.M. Matuana, C.B. Park. et. al. "Characterization of Microcellular Foamed Plastic/Cellulosic Fiber Composites." *Antec*. 1998.
- [3] S. Areerat, E. Funami, Y. Hayata, D. Nakagana, and M. Ohshima, *Polym. Eng. Sci.*, 44, 1915 (2004).
- [4] อิทธิพล แจ่มชัด. พอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] กมลรัตน์ สุนทรลาภ และคณะ. 2546. "การเตรียมไมโครเซลลูลาร์โฟมจากพอลิเมอร์ผสมโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] David L. Tomasko, Hongbo Li, Dehua Liu, Xiangmin Han, Maxwell J. Wingert, L. James Lee, and Kurt W. Koelling, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 6431 (2003).
- [7] Ulf W. Gedde, *Polymer Physics*, 1st Ed., London : Chapman & Hall. 1995.

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤติในพอลิพรอพิลีน

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติในพอลิพรอพิลีนที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกกะปาสคาล น้ำหนักของพอลิพรอพิลีนก่อน ทำโฟมเท่ากับ 0.77 กรัม มวลโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิพรอพิลีนเท่ากับ 410,000 กรัมต่อโมล

สมมติฐาน : คาร์บอนไดออกไซด์ไม่ละลายเข้าไปในเส้นใยแก้ว

: มีการถ่ายโอนมวลเพียงทิศทางเดียวคือตามแนวแกน y เนื่องจากความยาวของ พอลิเมอร์ตามแนวแกน x และ z ยาวกว่าแกน y มาก การถ่ายโอนมวลจึงน้อย มากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน y



รูปที่ ก-1 ทิศทางการถ่ายโอนมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านพอลิเมอร์

จากสมการที่ (2.15) (van'Hoff equation)

$$\ln(H_p) = \ln(H_o) + \left(\frac{-\Delta H_{sol}}{RT} \right) \tag{2.15}$$

แทนค่า H_o และ ΔH_{sol} ลงในสมการ จะได้ว่า

$$\ln(H_p) = \ln(7.13 \times 10^2 \text{ cm}^3 \text{ (STP) / kg.MPa}) + \left(\frac{6.23 \text{ kJ / mole}}{(8.314 \text{ J / mole})(1 \text{ kJ} / 1000 \text{ J})(423 \text{ K})} \right)$$

$$H_p = 8.227 \times 10^{-3} \text{ เมกกะปาสคาล}^{-1}$$

เนื่องจาก H_p คือค่าความชันของกราฟระหว่างค่าการละลาย (Solubility) กับความดัน ดังนั้นจะ
ได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ค่าการละลาย (Solubility)} &= H_p \times \text{ความดันของระบบ} \\ &= (8.227 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}) (10 \text{ MPa}) \\ &= 8.227 \times 10^{-2} \text{ กรัม CO}_2/\text{กรัมพอลิเมอร์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นน้ำหนักของก๊าซ CO}_2 \text{ ในพอลิพรอพิลีน} &= (8.227 \times 10^{-2}) (0.77 \text{ กรัม}) \\ &= 0.0633 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\text{สัดส่วนโดยน้ำหนักของ CO}_2 (m_1) = \frac{0.0633}{0.0633 + 0.77} = 0.076$$

$$\text{สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีน (m}_2) = 1 - 0.076 = 0.924$$

$$\text{สัดส่วนโดยโมลของ CO}_2 (x_1) = \frac{0.0633/44}{(0.0633/44) + (0.77/410,000)} = 0.9987$$

$$\text{สัดส่วนโดยโมลของพอลิพรอพิลีน (x}_2) = 1 - 0.9987 = 0.0013$$

คำนวณค่า \hat{v}^o_{mix} จากสมการที่ (2.10)

$$\hat{v}^o_{mix} = (1 - m_{co_2}) \hat{v}^o_{poly} + m_{co_2} \hat{v}^o_{co_2} \quad (2.10)$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\hat{v}^o_{mix} = (1 - 0.076)(1.103 \text{ cm}^3 / \text{g}) + (0.076)(0.589 \text{ cm}^3 / \text{g})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.0192 + 0.0448 \text{ cm}^3 / \text{g}$$

$$= 1.064 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม}$$

คำนวณค่า \hat{v}_{mix} ($\hat{v}_{mix} = 1/\rho$) จากสมการที่ (2.11a) (Sanchez-Lacombe equation of state)

$$\tilde{\rho}^2 + \tilde{P} + \tilde{T}[\ln(1 - \tilde{\rho}) + (1 - \frac{1}{r})\tilde{\rho}] = 0 \quad (11a)$$

โดยคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่า v_1^* และ v_2^* จากสมการที่ (2.12g) โดยแทนค่าพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะ T_1^* , T_2^* , P_1^* และ P_2^* จากตารางที่ 3.

$$\begin{aligned} v_1^* &= \frac{T_1^* R}{P_1^*} = \frac{(341.2 \text{ K})(8.314 \text{ cm}^3 \text{ MPa} / \text{mole} \cdot \text{K})}{(369.1 \text{ MPa})} \\ &= 7.68 \text{ cm}^3 / \text{mole} \\ v_2^* &= \frac{T_2^* R}{P_2^*} = \frac{(683.1 \text{ K})(8.314 \text{ cm}^3 \text{ MPa} / \text{mole} \cdot \text{K})}{(285.2 \text{ MPa})} \\ &= 19.91 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล} \end{aligned}$$

2. คำนวณค่า ϕ_1 และ ϕ_2 จากสมการที่ (2.12c) โดยแทนค่าพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะ ρ_1^* , ρ_2^* จากตารางที่ 1

$$\phi_i = \frac{\frac{m_i}{\rho_i^*}}{\left(\frac{m_1}{\rho_1^*} + \frac{m_2}{\rho_2^*}\right)} \quad \text{สำหรับ } i=1 \text{ และ } 2 \quad (2.12c)$$

$$\phi_1 = \frac{\frac{0.076}{1.253 \text{ g/cm}^3}}{\left(\frac{0.076}{1.253 \text{ g/cm}^3} + \frac{0.924}{0.8817 \text{ g/cm}^3}\right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.057$$

จากสมการที่ (2.12d)

$$\phi_1 + \phi_2 = 1 \quad (2.12d)$$

$$\phi_2 = 1 - 0.057 = 0.9453$$

3. คำนวณค่า ϕ_1^o และ ϕ_2^o จากสมการที่ (2.12b)

$$\phi_i^o = \frac{\phi_i}{\phi_1 + (v_1/v_2)\phi_2} \quad \text{สำหรับ } i=1 \text{ และ } 2 \quad (2.12b)$$

$$\phi_1^o = \frac{0.0547}{0.057 + \left(\frac{7.68}{19.91}\right)0.9453} = 0.1304$$

$$\phi_2^o = \frac{0.9453}{0.057 + \left(\frac{7.68}{19.91}\right)0.9453} = 2.2545$$

4. คำนวณค่า v^* จากสมการที่ (2.12a)

$$v^* = \phi_1^o v_1^* + \phi_2^o v_2^* \quad (2.12a)$$

$$= (0.1304)(7.68 \text{ cm}^3 / \text{mole}) + (2.2545)(19.91 \text{ cm}^3 / \text{mole})$$

$$= 45.89 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล}$$

5. คำนวณค่า X_{12} จากสมการที่ (2.12f)

$$X_{12} = \frac{(P_1^* + P_2^* - 2(P_1^* P_2^*)^{1/2})(1 - k_{12})v^*}{RT} \quad (2.12f)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{12} = \frac{(369.1 + 285.2 - 2(369.1 \times 285.2)^{1/2})(1 - 0.121)45.89 \text{ (MPa} \cdot \text{cm}^3 / \text{mole)}}{(8.314 \text{ cm}^3 \cdot \text{MPa} / \text{mole} \cdot \text{K})(423 \text{ K})}$$

$$= 1.0948$$

6. คำนวณค่า P^* จากสมการที่ (2.12e)

$$P^* = \phi_1 P_1^* + \phi_2 P_2^* - \frac{RT}{v} \phi_1 \phi_2 X_{12} \quad (2.12e)$$

$$P^* = (0.0547)(369.1 \text{ MPa}) + (0.9453)(285.2 \text{ MPa})$$

$$- \frac{(8.314 \text{ cm}^3 \cdot \text{MPa} / \text{mole} \cdot \text{K})(423 \text{ K})}{(45.89 \text{ cm}^3 / \text{mole})} (0.0547)(0.9453)(1.0948)$$

$$= (20.19 + 269.6 - 4.34) \text{ MPa}$$

$$= 285.45 \text{ เมกกะปาสคาล}$$

7. คำนวณค่า T^* จากสมการ (2.12g) ρ^* จากสมการ (2.12i) r_1 และ r_2 จากสมการ (2.11b)

$$T^* = \frac{P^* v^*}{R} = \frac{(285.45 \text{ MPa})(45.89 \text{ cm}^3 / \text{mole})}{(8.314 \text{ cm}^3 \cdot \text{MPa} / \text{mole} \cdot \text{K})} = 1575.57 \text{ เคลวิน}$$

$$\frac{1}{\rho^*} = \frac{m_1}{\rho_1^*} + \frac{m_2}{\rho_2^*} = \frac{0.076}{(1.253 \text{ g/cm}^3)} + \frac{0.924}{(0.8817 \text{ g/cm}^3)} = 1.1086 \text{ cm}^3 / \text{g}$$

$$\rho^* = \frac{1}{1.1086} = 0.902 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$r_1 = \frac{P_1^* v_1^*}{RT_1^*} = \frac{(369.1 \text{ MPa})(7.68 \text{ cm}^3 / \text{mole})}{(8.314 \text{ cm}^3 \cdot \text{MPa} / \text{mole} \cdot \text{K})(341.2 \text{ K})} = 0.9993$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_2 = \frac{P_2^* v_2^*}{RT_2^*} = \frac{(285.2 \text{ MPa})(19.91 \text{ cm}^3 / \text{mole})}{(8.314 \text{ cm}^3 \cdot \text{MPa} / \text{mole} \cdot \text{K})(683.1 \text{ K})} = 0.9998$$

8. คำนวณค่า r จากสมการที่ (2.12h)

$$r = x_1 r_1 + x_2 r_2 \quad (2.12h)$$

$$= (0.9987)(0.9993) + (0.0013)(0.9998)$$

$$= 0.9993$$

9. คำนวณค่า \tilde{T} และ \tilde{P} จากสมการที่ (2.11b)

$$\tilde{T} = \frac{T}{T^*} = \frac{423 \text{ K}}{1575.57 \text{ K}} = 0.2685$$

$$\tilde{P} = \frac{P}{P^*} = \frac{10 \text{ MPa}}{285.45 \text{ MPa}} = 0.035$$

10. คำนวณค่า $\tilde{\rho}$ จากสมการที่ (2.12a) โดยใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial & Error)

$$\tilde{\rho}^2 + \tilde{P} + \tilde{T} [\ln(1 - \tilde{\rho}) + (1 - \frac{1}{r}) \tilde{\rho}] = 0 \quad (2.12a)$$

$$\tilde{\rho}^2 + 0.035 + 0.2685 [\ln(1 - \tilde{\rho}) + (1 - \frac{1}{0.9993}) \tilde{\rho}] = 0$$

$$\tilde{\rho} = 0.974$$

11. คำนวณค่า ρ จากสมการที่ (2.11b)

$$\rho = \tilde{\rho} \cdot \rho^* \quad (2.11b)$$

$$= (0.974)(0.902 \text{ g} / \text{cm}^3) = 0.878 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถคำนวณค่า \hat{v}_{mix} ได้โดย

$$\hat{v}_{mix} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{(0.878 \text{ g/cm}^3)} = 1.139 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม}$$

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Self-Diffusion Coefficient) จากสมการที่ (2.8)

$$D_{self} = RTA \exp\left[\frac{-B}{(\hat{v}_{mix} - \hat{v}_{mix}^o)}\right] \quad (2.8)$$

$$D_{self} = (8.314 \text{ J/mole.K})(423 \text{ K})(4.18 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{mole/J.s}) \exp\left[\frac{-0.24 \text{ cm}^3/\text{g}}{(1.139 - 1.064) \text{ cm}^3/\text{g}}\right]$$

$$= 1.47 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} \exp(-3.2)$$

$$= 5.98 \times 10^{-6} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที}$$

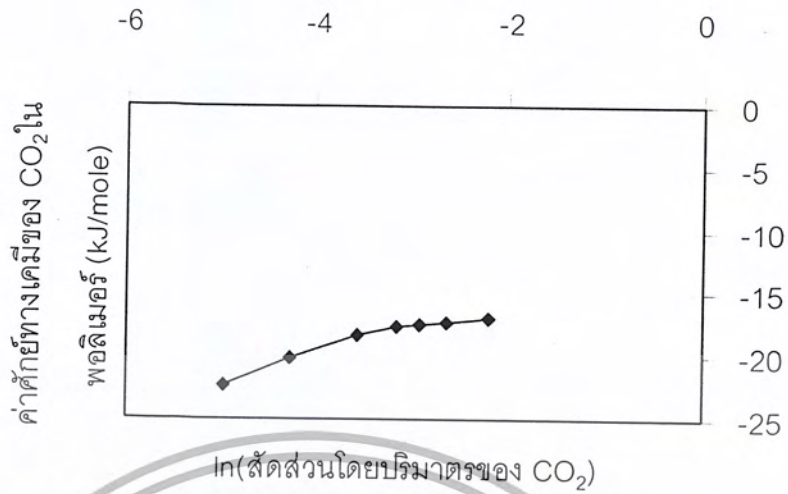
คำนวณค่า $\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P}$ ได้จากความชันของกราฟระหว่างค่าศักย์ทางเคมี (μ_1) กับ $\ln(\phi_1)$ ที่

อุณหภูมิและความดันของระบบ ซึ่งต้องสมมติค่า m ขึ้นเพื่อนำมาคำนวณ ϕ_1 และค่า μ_1 โดย μ_1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

$$\frac{\mu_1}{RT} = \ln \phi_1 + \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right) \phi_2 + r_1 \tilde{\rho} X_{12} \phi_2^2 \frac{v_1}{v} + r_1 \left[\frac{-\tilde{\rho} + \tilde{P}_1 \tilde{v}}{\tilde{T}_1} + \tilde{v}((1 - \tilde{\rho}) \ln(1 - \tilde{\rho}) + \frac{\tilde{\rho} \ln \tilde{\rho}}{r_1}) \right] \quad (2.13)$$

ผลการคำนวณค่า $\ln \phi_1$ และค่า μ_1 แสดงดังตารางที่ ก-1

นำผลการคำนวณที่ได้มาพลอตกราฟระหว่าง $\ln \phi_1$ และค่า μ_1 แสดงดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ทางเคมีกับ ln(สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์)

จากรูปที่ ก-1 พบว่าความชันของกราฟเท่ากับ 1.97 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งคือค่า $\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P}$ นำค่า $\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P}$ ที่ได้มาคำนวณค่า $\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P}$ จากสมการที่ (2.14)

$$\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P} \left(\frac{\partial \ln \phi_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P} = \left[1 + \phi_1 \left(\frac{M_{w2} \rho_1^* - M_{w1} \rho_2^*}{M_{w1} \rho_2}\right)\right] \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln \phi_1}\right)_{T,P} \quad (2.14)$$

$$\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P} = \left[1 + 0.057 \left(\frac{410,000(1.253) - 44(0.8817)}{44(0.8817)}\right)\right] (1.97 \text{ kJ / mole})$$

$$= 1428.82 \text{ กิโลจูลต่อโมล}$$

นำค่า D_{sel} และ $\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P}$ ที่ได้มาคำนวณค่า D_{mutua} จากสมการที่ (2.9)

$$D_{mutual} = \frac{x_2 D_{self}}{RT} \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1}\right)_{T,P} \quad (2.9)$$

$$D_{\text{mutual}} = \frac{(0.0013)(5.98 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{s})}{(8.314 \text{ J / mole} \cdot \text{K})(423 \text{ K})(1 \text{ kJ / 1000 J})} (1428.82 \text{ kJ / mole})$$

$$= 3.15 \times 10^{-6} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 แสดงผลการคำนวณค่า $\ln\phi_1$ และ μ_1

m_i		ϕ_i		ϕ_i^o		v^* (cm ³ /mole)	X_{12}	P^* (Mpa)	\tilde{P}	T^* (K)	\tilde{T}	$\tilde{\rho}$	ρ^* (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	v (cm ³ /g)	\tilde{v}	$\ln\phi_1$	μ_1
m_1	m_2	ϕ_i	ϕ_i	ϕ_1^o	ϕ_2^o													
0.010	0.990	0.0071	0.9930	0.0181	2.5460	50.83	1.2097	285.20	0.03506	1743.65	0.2426	0.9840	0.8843	0.8700	1.149	13.042	-4.953	-22.345
0.020	0.980	0.0142	0.9858	0.0360	2.4995	50.04	1.1909	285.22	0.03506	1716.67	0.2464	0.9828	0.8870	0.8777	1.147	13.227	-4.254	-20.167
0.040	0.960	0.0285	0.9715	0.0707	2.4095	48.52	1.1548	285.27	0.03505	1664.82	0.2541	0.9801	0.8923	0.8745	1.143	13.597	-3.557	-18.314
0.060	0.940	0.0430	0.9570	0.1043	2.3222	47.04	1.1195	285.36	0.03504	1614.54	0.2620	0.9771	0.8976	0.8700	1.140	13.984	-3.146	-17.546
0.076	0.924	0.0547	0.9453	0.1304	2.2545	45.89	1.0948	285.45	0.03500	1575.57	0.2685	0.9740	0.9020	0.8780	1.139	14.320	-2.906	-17.387
0.100	0.900	0.0725	0.9257	0.1683	2.1555	44.20	1.0519	285.65	0.03501	1518.61	0.2785	0.9699	0.9086	0.8812	1.135	14.813	-2.646	-17.334
0.150	0.850	0.1104	0.8896	0.2434	1.9616	40.92	0.9737	286.24	0.03490	1408.82	0.3002	0.9582	0.9228	0.8840	1.131	15.946	-2.204	-16.994

ภาคผนวก ข
การคำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใน
พอลิพรอพิลีน

ตัวอย่างการคำนวณเวลาดูดซึมของก๊าซในพอลิเมอร์ หรือเวลาที่ต้องใช้ในการปล่อยให้คาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าไปในเนื้อพอลิพรอพิลีนจนอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกกะปาสคาล ความหนาชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร จากสมการที่ (2.14)

$$\frac{\Delta w_{CO_2}(t)}{\Delta w_{CO_2}(t=\infty)} = 1 - \sum_n \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[\frac{-D_{mutual} (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (2.14)$$

ให้ $n=1$ และ $\Delta w_{CO_2}(t) \cong \Delta w_{CO_2}(t=\infty)$ ดังนั้น $\frac{\Delta w_{CO_2}(t)}{\Delta w_{CO_2}(t=\infty)} \cong 0.9999$
แทนค่าในสมการจะได้ว่า

$$0.9999 = 1 - \sum_n \frac{8}{3^2 \pi^2} \exp\left[\frac{(-3.15 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{s}) 3^2 \pi^2 t}{4(0.2)^2 \text{ cm}^2}\right]$$

$$\exp(1.74 \times 10^{-3} t) (1/s) = \frac{0.09}{0.0001} = 900$$

$$1.74 \times 10^{-3} t (1/s) = 6.8024$$

$$t = 3909.4 \text{ วินาที คิดเป็น } 1.086 \text{ ชั่วโมง}$$

ในการทดลองได้เพิ่มเวลาการดูดซึมก๊าซเป็น 3 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ได้มากจนเกือบถึงสภาวะสมดุล

ภาคผนวก ค

ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด โมดูลัส
ของพอลิพรอพิลีนและพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต

ตารางที่ ค-1 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	35.340	60.840	1919.38
2	34.986	399.611	1923.79
เฉลี่ย	35.167	230.226	1921.59

ตารางที่ ค-2 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 10%F1

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	28.458	14.868	18893.11
2	28.751	16.184	14659.85
3	26.852	15.124	23073.78
4	27.519	21.116	4928.78
5	27.386	18.236	12745.83
เฉลี่ย	27.793	17.106	14860.83

ตารางที่ ค-3 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 20%F1

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	24.030	7.964	5487.13
2	25.467	28.720	5492.01
3	24.832	20.380	12074.56
4	24.964	13.072	8919.83
5	25.705	21.800	16016.17
6	24.954	10.652	9041.68
เฉลี่ย	24.992	17.098	9505.23

ตารางที่ ค-4 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 30%F1

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	21.292	18.120	11750.50
2	20.869	27.708	7531.76
3	21.446	11.828	18131.50
4	21.095	29.752	7090.28
5	22.582	37.460	6028.30
เฉลี่ย	21.457	24.974	10106.47

ตารางที่ ค-5 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 10%F2

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	27.095	13.500	5308.28
2	29.584	11.512	2925.72
3	27.283	14.896	12267.12
4	27.720	7.884	2620.74
5	24.892	2.952	13516.72
6	27.147	7.548	15420.72
เฉลี่ย	27.287	9.715	8676.55

ตารางที่ ค-6 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 20%F2

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	24.389	5.936	7408.85
2	24.041	5.173	17102.51
3	25.435	9.700	7508.30
4	22.687	5.140	13064.55
5	23.802	14.822	4623.68
6	24.048	15.669	11749.75
เฉลี่ย	24.067	9.406	10242.94

ตารางที่ ค-7 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 30%F2

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	19.560	6.964	6102.72
2	20.243	5.329	10170.93
3	21.463	4.825	8181.16
4	19.852	3.663	2695.79
5	10.004	2.158	17032.46
เฉลี่ย	20.224	4.588	8836.41

ตารางที่ ค-8 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 10%NF

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	30.25	24.32	12438.32
2	31.17	15.51	20096.71
3	29.90	17.89	16713.25
4	32.85	14.08	23330.96
5	30.94	24.82	12465.75
เฉลี่ย	31.02	19.32	17009.00

ตารางที่ ค-9 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 20%NF

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	28.15	11.600	24267.24
2	26.63	8.971	29684.54
3	25.32	8.423	30060.55
4	27.00	7.575	35643.56
5	24.76	10.490	23603.43
เฉลี่ย	26.37	9.412	28651.86

ตารางที่ ค-10 ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัวสูงสุด และโมดูลัสของพอลิพรอพิลีน
คอมโพสิต 30%NF

การทดลองที่	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ร้อยละการยืดตัวสูงสุด (%)	Young's Modulus
1	24.52	7.638	32102.64
2	21.80	6.633	32865.97
3	25.07	6.475	38718.15
เฉลี่ย	23.80	6.915	34562.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
สภาวะที่ใช้ในการทำไฟม

ตารางที่ ง-1 สภาวะที่ใช้ในการทำไฟมครั้งที่ 1

เวลา (นาทื)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกกะปาสคาล)
0	150.00	9.99
5	152.78	10.03
10	152.22	9.93
15	148.33	9.78
30	147.22	9.73
45	150.56	9.78
60	151.67	9.73
75	147.22	9.54
90	151.67	9.66
105	149.44	9.49
120	147.22	9.22
135	152.78	9.27
150	146.67	9.01
165	148.33	9.01
180	156.11	9.09
เฉลี่ย	150.15	9.55

หมายเหตุ เวลาที่ใช้ในการทำไฟม (รวม delay time) 3 ชั่วโมงครึ่ง

อุณหภูมิเฉลี่ย 150.15 องศาเซลเซียส

ความดันเฉลี่ย 9.55 เมกกะปาสคาล

ตารางที่ ง-2 สภาวะที่ใช้ในการทำไฟมครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกกะปาสคาล)
0	151.67	10.05
5	152.22	10.01
10	148.33	10.53
15	148.89	10.76
30	150.00	10.77
45	150.00	10.66
60	150.00	10.65
75	149.44	10.51
90	150.56	10.56
105	150.00	10.43
120	146.11	10.40
135	152.22	10.48
150	146.11	10.29
165	152.78	10.51
เฉลี่ย	149.88	10.47

หมายเหตุ เวลาที่ใช้ในการทำไฟม (รวม delay time) 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิเฉลี่ย 149.88 องศาเซลเซียส

ความดันเฉลี่ย 10.47 เมกกะปาสคาล

ตารางที่ ง-3 สภาวะที่ใช้ในการทำไฟมครั้งที่ 3

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกกะปาสคาล)
0	144.44	14.52
5	146.11	14.50
10	145.56	14.46
15	147.22	14.55
30	149.44	14.47
45	148.32	14.32
60	151.11	14.28
75	148.89	14.05
90	148.32	13.95
105	146.67	13.67
120	150.00	13.71
135	148.32	13.46
150	147.22	13.23
165	147.78	13.20
180	147.78	13.07
210	144.44	12.65
เฉลี่ย	147.60	13.88

หมายเหตุ เวลาที่ใช้ในการทำไฟม (รวม delay time) 5 ชั่วโมง

อุณหภูมิเฉลี่ย 147.60 องศาเซลเซียส

ความดันเฉลี่ย 13.88 เมกกะปาสคาล

ภาคผนวก จ

อัตราการขายตัวของไมโครเซลล์ลูลาร์
พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฝม

ตารางที่ จ-1 อัตราการขายตัวของไมโครเซลล์ลูลาร์พอลิพรอพิลีนคอมโพสิตโฝม

พลาสติกผสม	ร้อยละเส้นใยแก้ว	อัตราการขายตัว
PP	0	1.063
F1	10	1.046
F2		1.094
NF		1.020
F1	20	1.001
F2		1.027
NF		1.015
F1	30	1.040
F2		1.012
NF		1.014

ภาคผนวก ฉ
การคำนวณจำนวนเซลล์

ตัวอย่างการคำนวณจำนวนเซลล์ของพอลิพรอพิลีนคอมโพลีเมอร์ 10%F1
จากสมการที่ (2.20)

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_f}$$

แทนค่า $\rho_p = 0.958$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\rho_f = 0.916$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จะได้

$$\varphi = \frac{0.958}{0.916}$$

$$\varphi = 1.046$$

จากสมการที่ (2.19)

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

จากการกำหนดพื้นที่เพื่อนับจำนวนเซลล์ จะได้จำนวนเซลล์ทั้งหมด 9 เซลล์ ในพื้นที่ 10^{-8} ตารางเซนติเมตร

แทนค่า $n_b = 9$ เซลล์

$l = 10^{-4}$ เซนติเมตร

$\varphi = 1.046$

จะได้

$$n = \left(\frac{9}{10^{-4} \times 10^{-4}} \right)^{3/2} \times 10^3 \times 1.046$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = 2.8 \times 10^{16} \text{ เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

นั่นคือจะได้จำนวนเซลล์ 2.8×10^{16} เซลล์ต่อ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ ๑-1 ผลการคำนวณจำนวนเซลล์ของโพน

สูตรพลาสดิกผสม	จำนวนเซลล์ (10^{16} เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
10%F1	2.8
10%F2	3.0
10%NF	2.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้