

การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมโดยใช้

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง

Study On Morphology Of Polyvinyl Chloride Foam By Using Supercritical Carbon Dioxide

As Blowing Agent

วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์ ฉัฐพงศ์ เชื้อพล ปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ สุรัตน์ อารีรัตน์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
บริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมที่เตรียมจากกระบวนการเกิดโฟมแบบกะโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพ สภาวะเกิดโฟมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 145 °C ความดันอิ่มตัว 120 - 190 bar และเวลาเกิดโฟม 30 - 120 min พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมที่เตรียมได้คือ อุณหภูมิเกิดโฟมและความดันอิ่มตัว โดยการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมจาก 40 °C ถึง 115 °C ได้ฟองขนาดใหญ่ขึ้นจาก 2 µm เป็น 380 µm และความหนาแน่นฟองลดลงจาก 10^{10} cell/cm³ เป็น 10^5 cell/cm³ แต่หากเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 135 °C และ 145 °C ได้ฟองขนาดเล็กใกล้เคียงกันประมาณ 150 µm และมีความหนาแน่นฟองสูงประมาณ 5×10^6 cell/cm³ อาจเนื่องมาจากเกิดการสลายตัวของพลาสติกไซเซอร้ออกไปบางส่วนในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม สภาวะเกิดโฟมที่อุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 80 °C เมื่อทำการเพิ่มความดันอิ่มตัวจาก 120 bar เป็น 190 bar ได้ฟองขนาดเล็กประมาณ 2 µm และความหนาแน่นฟองสูงประมาณ 10^{10} cell/cm³ ได้เป็นพีวีซีชนิดไมโครเซลลูลาร์โฟม

คำสำคัญ : พอลิไวนิลคลอไรด์ พลาสติกไซเซอร้อ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โฟม

Abstract

This research aimed to study foam morphology of polyvinylchloride (PVC) foam producing via batch foaming process with supercritical carbon dioxide as a physical blowing agent. In this research, foaming temperature range of 40-145 °C, saturated pressure 120-190 bar and foaming time 30-120 min are foaming condition. The parameters affecting foam morphology were foaming temperature and saturated pressure. Increasing foaming temperature from 40 °C to 115 °C affected larger bubble diameter from 2 µm to 380 µm and decrease bubble density from 10^{10} cell/cm³ to 10^5 cell/cm³. However, the increasing in foaming temperature from 135 °C to 145 °C resulted in the decreasing in bubble diameter about 150 µm and bubble density about 5×10^6 cell/cm³ because some of plasticizer was volatiled during foaming process. Furthermore, at foaming temperature 40 - 80 °C when increase saturated pressure from 120 bar to 190 bar, the bubble diameter decreased to 2 µm and bubble density increased to about 10^{10} cell/cm³ approximately. So they were PVC microcellular foam.

Keywords : Polyvinyl Chloride, Plasticizer, Supercritical Carbon Dioxide, Foam

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

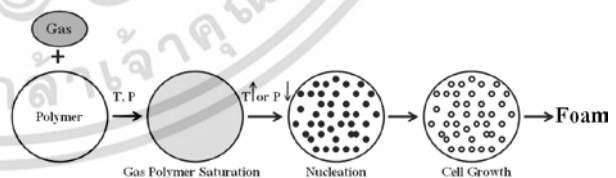
พอลิเมอร์โฟม คือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีฟองอากาศกระจายและแทรกอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ (Cellular Materials) มีจุดเด่นคือน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงเมื่อเทียบกับของแข็งชนิดอื่น ทนแรงกระแทกได้ดี เป็นฉนวนความร้อนและต้านทานไฟฟ้า ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีลดปริมาณการใช้สารตั้งต้นและสารเคมีในกระบวนการ [1] นิยมใช้ผลิตโซฟา โฟมกันกระแทก ผนักันความร้อน วัสดุก่อสร้างอย่างอิฐมวลเบาผสมโฟม เป็นต้น [2] โฟมชนิดไมโครเซลลูลาร์ (Microcellular Foam) เป็นโฟมที่เกิดภายใต้ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ มีจุดเด่นคือขนาดฟอง (Bubble Diameter) เล็กประมาณ 1 - 10 μm ความหนาแน่นฟอง (Bubble Density) สูงประมาณ $10^7 - 10^9 \text{ cell/cm}^3$ มีสมบัติทนแรงกระแทกสูง นิยมใช้เป็นส่วนประกอบเรือและเครื่องบิน [3] พอลิเมอร์ที่นิยมขึ้นรูปเป็นพอลิเมอร์โฟมเช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ทำโฟมบรรจุอาหาร [4] พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) ทำฉนวนกันความร้อน พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) และ พอลิไวนิลอะซิเตท (Poly Vinyl Acetate, EVA) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น โดยพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีการใช้งานแตกต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของพอลิเมอร์ชนิดนั้น

พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (Polyvinylchloride, PVC) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ประเภทอสัณฐาน (Amorphous Polymer) สังเคราะห์จากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer, VCM) ข้อดีคือ ทนต่อการไหม้ เมื่อติดไฟแล้วสามารถดับได้เอง (Self Extinguish) ไม่ทนความร้อนจึงต้องเติมสารเติมแต่งก่อนนำไปใช้งาน เช่น สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านเสถียรภาพทางความร้อนและเพิ่มความยืดหยุ่นตามลำดับ [5] พีวีซีแบ่งเป็นสองชนิดคือ พีวีซีชนิดแข็ง (uPVC) มีลักษณะแข็งเปราะ เมื่อเติมพลาสติไซเซอร์ทำให้เมทริกซ์อ่อนตัวลง โดยพลาสติไซเซอร์จะแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ปริมาตรอิสระ (Free Volume) เพิ่มขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่าย ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (T_g) ลดลง [6] ได้เป็นพีวีซีอีกชนิดหนึ่งคือพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (PVC) ซึ่งมีลักษณะอ่อนตัวและยืดหยุ่น

พลาสติไซเซอร์ที่นิยมใช้เช่น ไดออกทิลฟทาเลท (Diocetyl Phthalate, DOP), บิวทิลเบนซิลฟทาเลท (Butyl Benzyl Phthalate, BBP) เป็นต้น [5]

กระบวนการขึ้นรูปโฟมโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพ (Physical Blowing Agents, PBA) [7] คือ การขึ้นรูปโฟมโดยการขยายตัวของแก๊สเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิและ/หรือการลดความดัน สารเกิดฟองที่นิยมใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide, scCO_2) เนื่องจากมีจุดวิกฤตต่ำกว่าของไหลวิกฤตชนิดอื่น ราคาถูก ไม่เป็นพิษและง่ายต่อการแยกออกจากระบบ ขั้นตอนการเกิดโฟมประกอบด้วย 4 ขั้นตอน [8] ดังรูปที่ 1

1. การละลายของแก๊ส (Gas Dissolution) แก๊สละลายในพอลิเมอร์ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous Polymer) เกิดเป็นสารละลายแก๊สและพอลิเมอร์
2. การเกิดฟองแก๊ส (Bubble Formation) หลังจากที่แก๊สละลายพอลิเมอร์จนอิ่มตัวแล้ว ทำการรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยการลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กเรียกว่า นิวเคลียส (Nucleus) กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์
3. การเติบโตของฟองแก๊ส (Bubble Growth) ฟองแก๊สเกิดการขยายขนาดโดยการแพร่ของแก๊สบริเวณข้างเคียงเข้ามายังฟองแก๊ส
4. การคงสภาพของฟองแก๊ส (Bubble Stability) เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างแก๊สภายในฟองและอากาศจากภายนอกเป็นผลให้โฟมเกิดการคงสภาพ



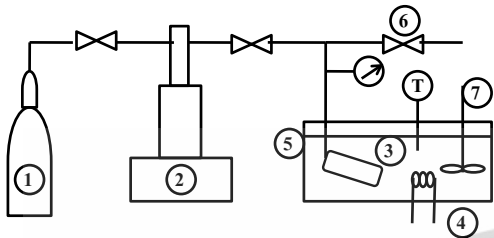
รูปที่ 1 ขั้นตอนการเกิดโฟม

2. การทดลอง

2.1 พีวีซีชนิดยืดหยุ่นจากบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) ขนาด $0.5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$ นำไปเตรียมพีวีซี โฟม ด้วยชุดอุปกรณ์ขึ้นรูปโฟมแบบกะดังรูปที่ 2 บรรจุแผ่นพีวีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อเตรียมโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 145 °C ความดันอิมตัว 120 - 190 bar และเวลาอิมตัว 30 - 120 min จากนั้นลดความดันเป็นเวลา 5 - 7 s จนเข้าสู่ความดันบรรยากาศ



1. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2. ปั๊มอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D) 3. ภาชนะทนแรงดันสูง (Taiatsu Techno) 4. ขดลวดความร้อน 5. อ่างน้ำมันซิลิโคน 6. วาล์ว 7. เครื่องปั่นกวน

รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ขึ้นรูปโฟมแบบกะ

2.2.2 นำโฟมที่ได้มาบ่ม (Aging Foam) โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 h เพื่อศึกษาการคงสภาพของโฟม

2.2.3 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น MA10

2.2.4 นำพีวีซีและพีวีซีโฟมวิเคราะห์การสลายตัวภายใต้ความร้อนด้วย Thermal Gravimetric Analysis หรือ TGA ยี่ห้อ Perkin Elmer TGA Pyris 1

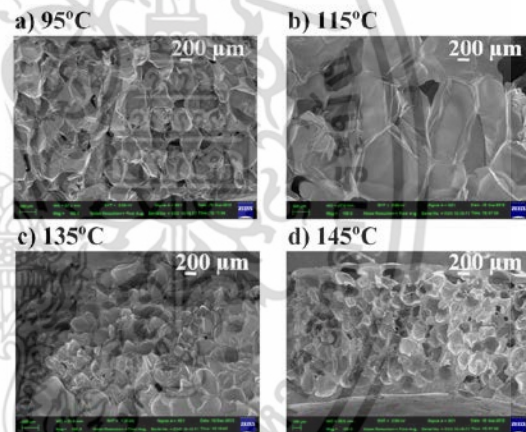
2.2.5 วัดขนาดฟอง (Bubble Diameter) และความหนาแน่นฟอง (Bubble Density) ด้วยโปรแกรม Image J

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

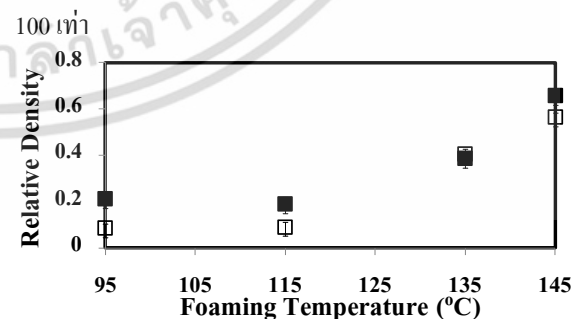
3.1 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของพีวีซีโฟม

จากการศึกษาพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอิมตัว 120 bar เวลาเกิดโฟม 120 min และอุณหภูมิเกิดโฟม 95 - 145 °C พบว่าโฟมที่ได้มีลักษณะสีขาวขุ่น เกิดเป็นโฟมได้ง่ายและขยายตัวได้ดี เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟมสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซี หากเพิ่มอุณหภูมิเกินช่วงดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพคือมีสีเหลืองถึงเหลืองเข้ม จากรูปที่ 3(a) ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C พบว่าฟองกระจายตัวสม่ำเสมอ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 115 °C ดังรูปที่ 3 (b) พบว่าฟองมีขนาดใหญ่ ผนังฟองบางและมีปริมาณฟองลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟม มีผลทำให้เมทริกซ์อ่อนตัวลงและในระหว่างที่คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตละลายในพอลิเมอร์

เป็นผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วและความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง[6] ดังนั้นเมื่อทำการรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้ฟองเกิดการขยายตัวได้ดี ผนังฟองจึงบางลง ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) คือความหนาแน่นของพีวีซีโฟมเทียบกับความหนาแน่นของพีวีซี พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมทำให้ความหนาแน่นโฟมลดลงเป็นผลให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ก่อนบ่ม (Before Aging) มีแนวโน้มลดลง และเมื่อผ่านการบ่มเพื่อให้ฟองแก๊สเกิดการคงสภาพโครงสร้างฟองเกิดการหดตัวลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นโฟมสูงขึ้น เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังบ่ม (After Aging) สูงขึ้นดังรูปที่ 4 สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C มีขนาดฟอง 206 μm และมีความหนาแน่นฟอง 7.9×10^5 cell/cm³ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 115 °C ขนาดฟองเพิ่มขึ้นเป็น 369 μm และในทางกลับกันความหนาแน่นฟองลดลงเป็น 1.1×10^5 cell/cm³ ดังรูปที่ 5



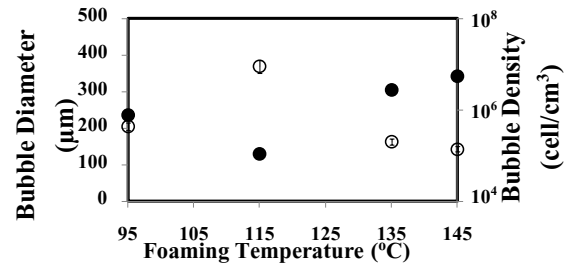
รูปที่ 3 สัณฐานวิทยาของพีวีซีโฟมที่ความดันอิมตัว 120 bar เวลาเกิดโฟม 120 min และอุณหภูมิเกิดโฟมต่างๆ ที่กำลังขยาย



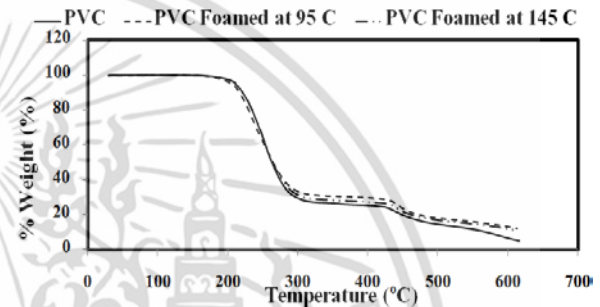
รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ก่อน (สัญลักษณ์ □) และ หลังบ่ม (สัญลักษณ์ ■) เป็นเวลา 12 h ที่ความดันอิมตัว 120 bar เวลาเกิดโฟม 120 min และอุณหภูมิเกิดโฟม 95 - 145 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

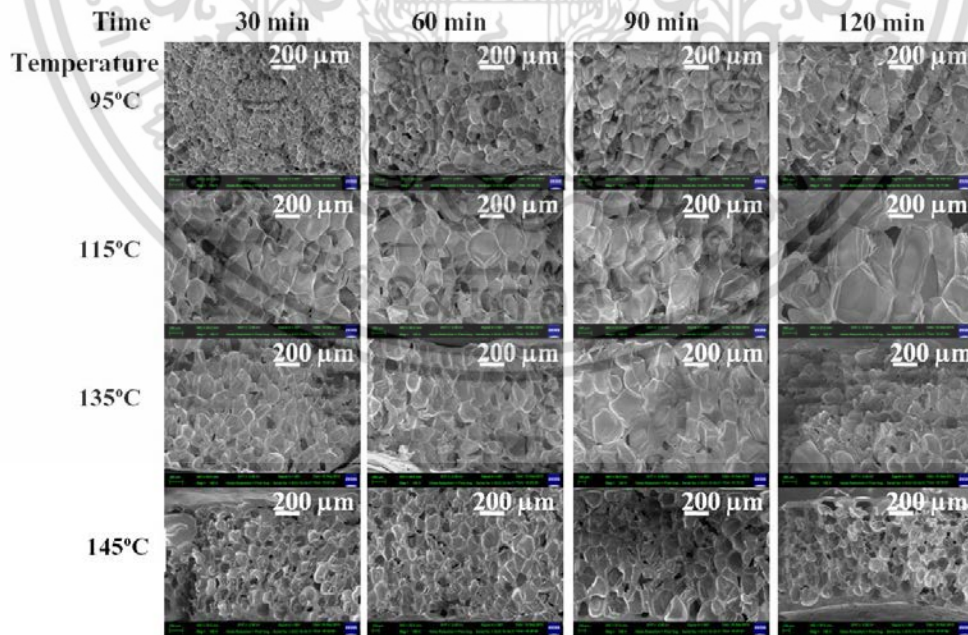
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 135 และ 145 °C กลับพบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ทั้งก่อนและหลังบ่มมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อทำการทดสอบด้วย TGA แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าพีวีซีและพีวีซีโฟมเกิดการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง คือช่วงแรกเกิดการสลายตัวของแก๊สไฮโดรคลอริก (HCl) ที่อุณหภูมิ 180 - 320 °C ช่วงที่สองเกิดการสลายตัวของโซ่หลักที่อุณหภูมิ 420 - 500 °C [9] อุณหภูมิการสลายตัวที่ 280 °C พบว่า พีวีซีโฟมมีน้ำหนักที่เหลือจากการสลายตัวมากกว่าพีวีซีซึ่งอาจมีสารบางอย่างสลายตัวออกไปในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม โดยจากงานวิจัยของ Marcilla A. และ Beltran M. [9] รายงานว่าพลาสติกไซเซอรเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 178 °C แต่เนื่องจากพีวีซีโฟมที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟม 145 °C ในงานวิจัยนี้ใช้เวลาการเกิดโฟมนานถึง 120 min จึงอาจเกิดการสลายตัวของพลาสติกไซเซอรออกไปบ้างบางส่วนทำให้แมทริกซ์แข็งขึ้น โฟมจึงขยายตัวได้ยากเป็นผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ทั้งก่อนและหลังบ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4 เมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาตามรูปที่ 3(d) พบว่าได้โฟมที่มีขนาดเล็ก ความหนาแน่นสูงและมีผนังพองหนา ซึ่งสอดคล้องกับการสันนิษฐานที่ว่าพลาสติกไซเซอรเกิดการสลายตัวออกไปบ้างบางส่วน โฟมที่ได้จึงมีขนาดพองเล็กประมาณ 150 μm และความหนาแน่นสูงประมาณ 5×10^6 cell/cm³ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิเกิดโฟมต่อขนาดพอง (สัญลักษณ์โปร่ง) และความหนาแน่นพอง (สัญลักษณ์ทึบ) ที่ความดันอ้อมตัว 120 bar เวลาเกิดโฟม 120 min และอุณหภูมิเกิดโฟม 95 - 145 °C



รูปที่ 6 TGA curve ของพีวีซีและพีวีซีโฟมที่อุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 145 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

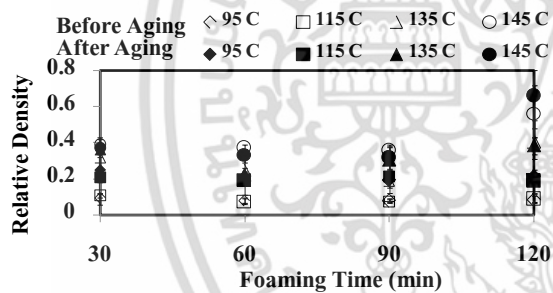


รูปที่ 7 สัณฐานวิทยาของพีวีซีโฟมที่ความดันอ้อมตัว 120 bar อุณหภูมิเกิดโฟม 95 - 145 °C และเวลาอ้อมตัว 30 - 120 min ที่กำลังขยาย 100 เท่า

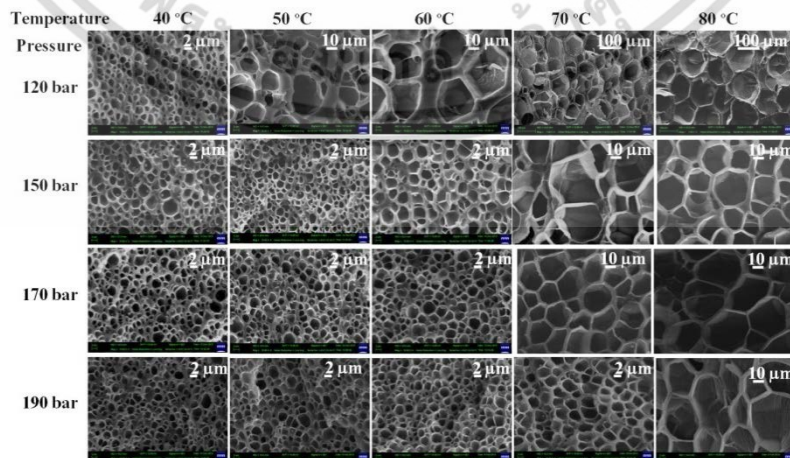
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ผลของเวลาเกิดโฟมที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของพีวีซีโฟม

จากการศึกษาพีวีซีที่สภาวะเกิดโฟมคือ ความดันอิมตัว 120 bar อุณหภูมิเกิดโฟม 95 - 145°C และเวลาเกิดโฟม 30 - 120 min จากรูปที่ 7 ที่อุณหภูมิเกิดโฟม 95 °C และ 115°C การเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 - 120 min พบว่าได้ฟองขนาดใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเวลาเกิดโฟมนานขึ้น ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หนีออกจากเซลล์พอลิเมอร์ได้นาน ส่งผลให้เมทริกซ์มีโอกาสร่อนตัวลง จากขนาดฟองที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ความหนาแน่นโฟมใกล้เคียงกัน เป็นผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ทั้งก่อนและหลังบ่มมีแนวโน้มใกล้เคียงกันดังรูปที่ 8 สำหรับอุณหภูมิเกิดโฟม 135°C และ 145 °C ได้ขนาดฟองเล็กใกล้เคียงกันดังรูปที่ 7 เนื่องจากผลของอุณหภูมิเกิดโฟมสูงทำให้พลาสติกไซเซออร์เกิดการสลายตัว เป็นผลให้เมทริกซ์แข็ง ฟองเกิดการขยายตัวได้ต่ำ โดยพบว่าพีวีซีเกิดการอิมตัวอย่างสมบูรณ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์หนีออกในเวลา 30 min



รูปที่ 8 ผลของเวลาและอุณหภูมิเกิดโฟมที่มีต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่ม ที่ความดัน 120 bar อุณหภูมิเกิดโฟม 95 - 145°C และเวลาเกิดโฟม 30 - 120 min

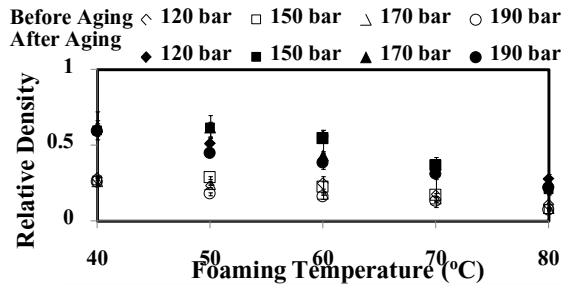


รูปที่ 9 สัณฐานวิทยาของพีวีซีโฟมที่เวลาอิมตัว 30 min ความดันอิมตัว 120 - 190 bar และ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 80°C ที่กำลังขยาย 15000 เท่า

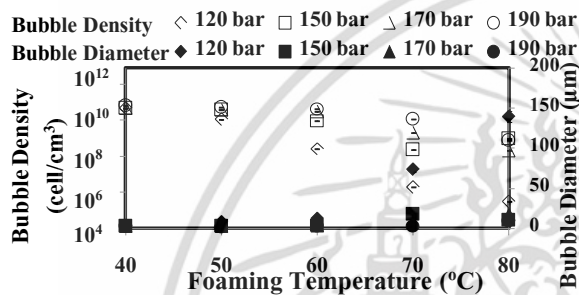
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ผลของความดันอิมตัวที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของพีวีซีโฟม

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความสามารถในการเป็นไมโครเซลล์ลาร์โฟมของพีวีซี ดังนั้นจึงทำการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซี และที่สภาวะความดันอิมตัวสูง [3] โดยสภาวะเกิดโฟมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เวลาเกิดโฟม 30 min อุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 80°C ความดันอิมตัว 120 - 190 bar จากรูปที่ 9 พบว่าที่อุณหภูมิเกิดโฟมช่วง 40 - 80°C การเพิ่มความดันอิมตัวจาก 150 bar เป็น 190 bar ได้ฟองขนาดเล็กประมาณ 2 - 10 μm เนื่องจากการเพิ่มความดันอิมตัวเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์หนีออกฤกตในพอลิเมอร์มากขึ้น เมื่อทำการรบกวนสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ เกิดการแยกเฟส (Phase Separation) ได้นิวเคลียสจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ [10] และอุณหภูมิเกิดโฟมที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซี ดังนั้นฟองจึงเกิดการขยายตัวได้ต่ำ จึงทำให้ได้ฟองขนาดเล็ก โดยมีขนาดฟองเล็กใกล้เคียงกันประมาณ 2 - 10 μm และมีความหนาแน่นฟองสูงใกล้เคียงกันประมาณ 1×10^{10} cell/cm³ ดังรูปที่ 11 ส่งผลให้ได้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มมีแนวโน้มใกล้เคียงกันดังรูปที่ 10 ผลของการเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมทำให้ได้ฟองขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มลดลงเหตุผลดังได้กล่าวแล้วข้างต้น สำหรับที่อุณหภูมิเกิดโฟม 70 - 80°C ความดันอิมตัว 120 bar พบว่าฟองขนาดใหญ่ประมาณ 100 μm ดังรูปที่ 9 เนื่องจากอุณหภูมิเกิดโฟมใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซี ดังนั้นฟองจึงขยายตัวได้ดี ได้ฟองขนาดประมาณ 100 - 150 μm และความหนาแน่นฟองประมาณ $10^5 - 10^6$ cell/cm³ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ผลของความดันอิมตัว 120 - 190 bar และอุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 80°C ที่มีผลต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ก่อน และหลัง บ่มเป็นเวลา 12 h ที่เวลาอิมตัว 30 min



รูปที่ 11 ผลของความดันอิมตัว 120 - 190 bar และอุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 80°C ที่มีผลต่อขนาดฟองและความหนาแน่นฟองที่เวลาอิมตัว 30 min

4. สรุปผลการทดลอง

สภาวะเกิดโฟมของพีวีซีในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิเกิดโฟม 40 - 145 °C ความดันอิมตัว 120 - 190 bar และเวลาเกิดโฟม 30 - 120 min ปัจจัยที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมคือ อุณหภูมิเกิดโฟมและความดันอิมตัว โดยพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมจาก 40 °C ถึง 115 °C ได้ฟองขนาดใหญ่ขึ้นจาก 2 µm เป็น 380 µm และมีความหนาแน่นฟองลดลงจาก 10¹⁰ cell/cm³ เป็น 10⁵ cell/cm³ แต่หากเพิ่มอุณหภูมิเกิดโฟมเป็น 135 °C และ 145 °C ได้ฟองขนาดเล็กใกล้เคียงกันประมาณ 150 µm มีผนังฟองหนาและความหนาแน่นฟองสูงประมาณ 5×10⁶ cell/cm³ จากผลของ TGA พบว่าเกิดการสลายตัวของพลาสติกไซเซออร์ออกไปบางส่วนในระหว่างการเกิดโฟม ฟองจึงขยายตัวได้ต่ำ เวลาเกิดโฟมที่เหมาะสมสำหรับให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตละลายในพีวีซีจนเข้าสู่สมดุลคือ 30 min โดยการเพิ่มเวลาเกิดโฟมจาก 30 min เป็น 120 min ฟองขยายขนาดเล็กน้อยที่อุณหภูมิเกิดโฟมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของพีวีซีคือ 40 - 80°C และความดันอิมตัว 120 - 190 bar พบว่า

ฟองมีขนาดเล็กประมาณ 2 µm และความหนาแน่นฟองสูงประมาณ 10¹⁰ cell/cm³ ได้เป็นพีวีซีชนิดไมโครเซลลูลาร์โฟม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก บริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Demir, M. Sipahioglu, D. Balkose, S. U Iku, "Effect of Additives on Flexible PVC Foam Formation," *Materials Processing Technology Journal*, Vol.195,pp.144-153,2008.
- [2] J. Banhart, "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams," *Progress in Materials Science*, Vol.46, pp.559-632, 2011.
- [3] S. Siripurapua, J. Gaya, R. Royera, M. DeSimonea,b, J. Spontaka,c, A. Khana, "Generation of Microcellular Foams of PVDF and its Blends Using Supercritical Carbon Dioxide in a Continuous Process," *Polymer Journal*, Vol. 43, pp.5511-5520, 2004.
- [4] K.A. Arora, A.J. Lesser, T.J. McCarthy, "Compressive Behavior of Microcellular Polystyrene Foams processed in Supercritical Carbon Dioxide," *Polym. Eng. Sci*, Vol.38, pp.2055-2062, 1998.
- [5] P. Kroushl, "Resin Selection for PVC Applications. Handbook of Vinyl Formulating," John Wiley & Sons, Inc, pp.13-56, 2007.
- [6] B. Krause, R. Mettinkhof, M.Wessling, "Microcellular Foaming of Amorphous High-T_g Polymers Using Carbon Dioxide," *Macromolecules*, Vol.34, pp.874-884, 2001.
- [7] J.E. Martini, "The Production and Analysis of Microcellular Foam, S.M. Thesis, Dept. Mech. Eng., MIT, 1981.
- [8] Siu Ning Sunny Leung. "Mechanisms of Cell Nucleation, Growth, and Coarsening in Plastics Foaming: Theory, Simulation, and Experiment." Graduate Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 2009.
- [9] O. Marcilla and M. Beltran, "PVC - Plasticizer Interactions during the Thermal Decomposition of PVC Plasticsols. Influence of the type of Plasticizer and Resin," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 53, pp.261-268, 1996.
- [10] V. Kumar, K. Nadella, G. Branch, B. Flinn. "Extrusion of Microcellular Foams Using Pre-Saturated Pellets and Solid-State," *Cellular Polymers*, Vol.23, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้