การศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกและสัณฐานวิทยาของเส้นใยเชิงเดี่ยวโฟมพอลิโพรพิลีน

Crystallization Kinetics and Morphology of Polypropylene mono-Filament Foam

พีรพจน์ เพทายพนากิจ ณัฐพงศ์ เชื้อพล สุรัตน์ อารีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยว และโฟมพอลิโพรพิลีน โดยพอลิโพรพิลีนจะถูกหลอมอัดรีดและขึ้นรูปเป็นเส้นใยเชิงเดี่ยวด้วยเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิ 190 °C มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 μm จากนั้นนำมาเตรียมโฟม โดยกระบวนการเกิดโฟมแบบกะใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพและเวลาอิ่มตัวเท่ากับ 20 min ที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 165, 170, และ 175 °C และความดันอิ่มตัว 100, 120 และ 140 bar จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนโฟมมีช่วงอุณหภูมิการเกิดโฟมแคบในช่วงประมาณ 5 °C พบว่าโฟมเส้นใยเชิงเดี่ยวที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 170 °C และความดันอิ่มตัว 140 bar ได้สัดส่วนการขยายตัวเป็น 1.06 เท่า จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนและโฟมมีองศาความเป็นผลึก 35% และ 22.5% ตามลำดับ ซึ่งองศาความเป็นผลึกที่ลดลงสามารถอธิบายได้จากการแข่งขันระหว่างการเกิดโฟมและการตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีน โดยที่เส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนและโฟมมีช่วงอุณหภูมิการตกผลึกและอัตราการตกผลึกที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ : เส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีน โฟมพอลิโพรพิลีน การตกผลึก สมการของ Avrami

Abstract

This research studied the crystallization kinetics of polypropylene mono-filaments and their foams. Polypropylene mono-filament with a diameter of 550 μm was prepared by free-falling extrusion process at 190 °C. The prepared polypropylene mono-filament samples were subsequently foamed by a batch foaming process using sc-CO_2 as a blowing agent at foaming temperatures of 165, 170, and 175 °C and saturated pressures of 100, 120 and 140 bar. The results show that the polypropylene mono-filament foam has narrow foaming temperature range of 5 °C. The polypropylene mono-filaments foam was prepared at a foaming temperature of 170 °C and a saturated pressure of 140 bar had expanded foam with an expansion ratio of 1.06. The thermal analysis by Differential Scanning Calorimetry (DSC) illustrated that the polypropylene mono-filament and its foam had degree of crystallinity of about 35% and 22.5%, respectively. The reduction of crystallinity can be explained by competition between crystallization and foaming processes where the crystallization temperature range and crystallization rate of the polypropylene mono-filament and its foam are different.

Keywords : Polypropylene, Mono-filament, Foam, Crystallization, Avrami's equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

พอลิโพรพิลีน (PP) เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline) มีสมบัติที่สำคัญ คือ น้ำหนักเบา จุดหลอมเหลวสูง เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสารเคมีได้ดี นอกจากนี้ยังให้ค่าความแข็ง (Stiffness) ความแข็งแรง (Strength) ที่เหมาะสมทำให้สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย พอลิโพรพิลีนสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยเชิงเดี่ยว (Mono-filament) ด้วยความร้อนผ่านเครื่องอัดรีด (Extrusion) และหัวไดย์ (Die) จากนั้นจะลดอุณหภูมิด้วยการหล่อเย็นทำให้เกิดการตกผลึกซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ การเกิดนิวเคลียส และการเติบโตของผลึก [1] โดยเส้นใยเชิงเดี่ยวนิยมใช้ทำเป็นฉนวนความร้อน บรรจุภัณฑ์ และใช้เป็นวัสดุประกอบ

การขึ้นรูปพอลิเมอร์ให้มีโครงสร้างเป็นรูพรุนแบบโฟมมีข้อดีคือ น้ำหนักและความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง ใช้เป็นฉนวนความร้อนได้ดี ช่วยลดต้นทุนเพราะใช้วัสดุน้อยลง พอลิเมอร์ที่นิยมนำมาทำเป็นโฟม เช่น พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น ซึ่งมีข้อดีคือ ราคาถูก มีความเสถียรต่ออุณหภูมิ ทนทานต่อสารเคมี สามารถใช้งานได้ในหลายกระบวนการ อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เหล่านี้ก็ยังมีข้อจำกัดด้านคุณสมบัติทางกายภาพทำให้เป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์ในการใช้งานของโฟม [2] ซึ่งพอลิโพรพิลีนสามารถใช้แทนเทอร์โมพลาสติกที่กล่าวข้างต้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรง ช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้างและมีความเสถียรต่ออุณหภูมิดีกว่าพอลิโอเลฟินส์ชนิดอื่นและความเหนียวมากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีนโฟม [3] อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ พบว่าการขึ้นรูปโฟมของพอลิโพรพิลีนทำได้ยากซึ่งมีสองสาเหตุสำคัญคือ พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่ตกผลึกเร็ว ทำให้ช่วงอุณหภูมิการเกิดโฟมแคบ และความแข็งแรงของพอลิเมอร์ที่หลอมละลายต่ำ ทำให้ผนังของเซลล์แตกระหว่างการขึ้นรูปโฟมและได้ฟองแก๊สขนาดไม่เหมาะสม [4]

กระบวนการเกิดโฟมในเส้นใยเชิงเดี่ยวของพอลิเมอร์กึ่งผลึกโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพแสดงในรูปที่ 1 มี 4 ขั้นตอน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

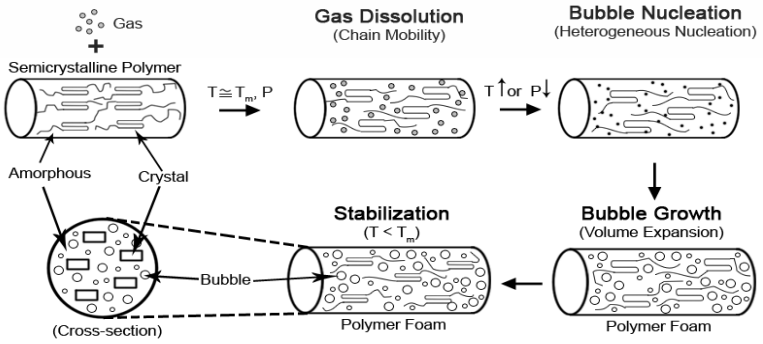
1) การละลายของแก๊สที่อุณหภูมิใกล้กับอุณหภูมิหลอมเหลวทำให้แก๊สละลายในพอลิเมอร์ และทำให้ผลึกส่วนหนึ่งของพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกหลอมเหลวไป

2) การเกิดนิวเคลียสเกิดจากการรบกวนสมดุลของระบบด้วยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือการลดความดันของระบบ

3) การเติบโตของฟองแก๊สเกิดจากการแพร่ของแก๊สที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์เข้าสู่นิวเคลียสโดยความแตกต่างของความเข้มข้น

4) การคงสภาพของฟองแก๊สเกิดจากการที่สารเกิดฟองแพร่ออกสู่บรรยากาศและในขณะเดียวกันนั้นอากาศภายนอกเข้ามาแทนที่สารเกิดฟองภายในโครงสร้างโฟม

เนื่องจากการขยายตัวของฟองแก๊สระหว่างกระบวนการเกิดโฟมสำหรับพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกเมื่ออุณหภูมิลดลงและเกิดการตกผลึกร่วมด้วย ทำให้ฟองแก๊สไม่สามารถขยายตัวได้อย่างอิสระ [5] จากการศึกษางานวิจัยของ S. Doroudiani และคณะ [6] ที่ศึกษาผลขององศาความเป็นผลึกกับความสามารถในการเกิดโฟมของพอลิเมอร์กึ่งผลึก พบว่าองศาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์



รูปที่ 1 กระบวนการเกิดโฟมในเส้นใยของพอลิเมอร์กึ่งผลึกโดยใช้สารเกิดฟองทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งผลึกเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการเกิดโฟมของวัสดุ และจากงานวิจัยของ X. Chunling และคณะ [3] ที่ศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกของพอลิโพรพิลีนผสมพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง พบว่าพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการตกผลึกพอลิโพรพิลีนทำให้ได้โฟมที่มีขนาดเซลล์สม่ำเสมอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกและสัณฐานวิทยาของเส้นใยเชิงเดี่ยวโฟมพอลิโพรพิลีน สำหรับนำไปช่วยปรับปรุงกระบวนการเตรียมโฟมพอลิโพรพิลีนในลักษณะเส้นใยเชิงเดี่ยว

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

พอลิโพรพิลีนมีค่าดัชนีการไหล (MFI) 11 g/ 10 min และความหนาแน่น 0.9 g/cm^3 จากบริษัท Japan Polypropylene Corporation และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.95 % จากบริษัท United Industrial Gas

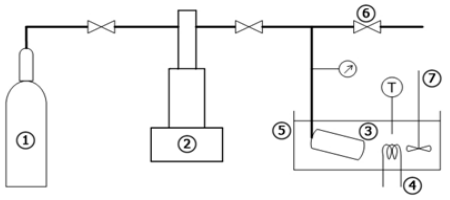
2.2 ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนเป็นเส้นใยเชิงเดี่ยวด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิหัวได 190 °C ความเร็วรอบของเกียร์ปั๊ม 10 rpm และเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิซที่หัวไดขนาด 900 μm

2. เตรียมโฟมด้วยชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปโฟมแบบกะดังรูปที่ 2 โดยบรรจุเส้นใยเชิงเดี่ยวพอโพรพิลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อเตรียมโฟมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 165, 170, และ 175 °C ความดันอิ่มตัว 100, 120 และ 140 bar เวลาอิ่มตัว 20 min จากนั้นลดความดันด้วยเวลา 3-5 s จนเข้าสู่ความดันบรรยากาศ

3. นำโฟมที่ได้วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น MA10

4. นำเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอโพรพิลีนวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน เช่น เอนทัลปีของการหลอมเหลว อุณหภูมิการตกผลึก ด้วยเครื่อง DSC รุ่น Pyris Diamond DSC ในช่วงอุณหภูมิ 50 - 200 °C ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



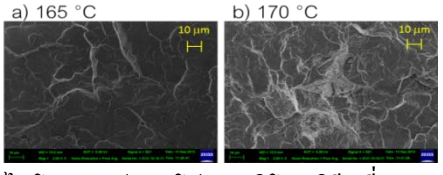
1. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2. ปั๊มอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D) 3. ภาชนะทนแรงดันสูง (Taiatsu Techno) 4. ขดลวดความร้อน 5. อ่างน้ำมันซิลิโคน 6. วาล์วไล่อากาศ 7. เครื่องปั่นกวน

รูปที่ 2 การขึ้นรูปเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนเป็นโฟม

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

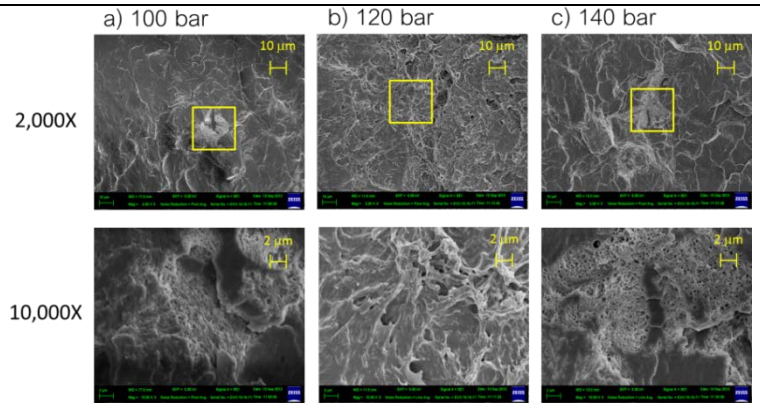
3.1 ผลของอุณหภูมิการทำโฟมต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิโพรพิลีน

จากรูปที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิการเกิดโฟมต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิโพรพิลีน พบว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิการเกิดโฟม 165 °C ไม่เกิดฟองแก๊ส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเกิดโฟมเป็น 170 °C พบว่าได้โฟมที่มีฟองแก๊สขนาดเล็กและกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้าง เนื่องจากการเกิดโฟมของพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกจะเกิดฟองแก๊สในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) เท่านั้น แต่สำหรับกรณีที่ใช้อุณหภูมิการเกิดโฟม 175 °C พบว่าโฟมที่ได้เสียรูปทรงของเส้นใยเชิงเดี่ยว เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เกินอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhi-Mei X. และคณะ [7] ที่รายงานว่าอุณหภูมิการเกิดโฟมของพอลิโพรพิลีนอยู่ในช่วงแคบระหว่าง 4-5 °C ในช่วงความดัน 100-140 bar



รูปที่ 3 ไมโครกราฟของโฟมพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม a) 165 และ b) 170 °C ความดันอิ่มตัว 140 bar เวลาอิ่มตัว 20 min และเวลาการลดความดัน 3-5 s ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

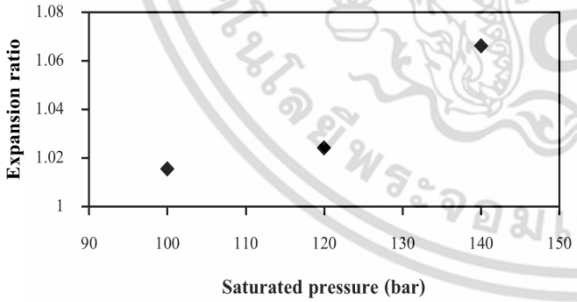
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ไมโครกราฟของโฟมพอลิโพรพิลีนที่ความดันอิ่มตัว a) 100, b) 120 และ c) 140 bar อุณหภูมิการเกิดโฟม 170 °C เวลาอิ่มตัว 20 min และอัตราการลดความดัน 3-5 s ที่กำลังขยาย 2,000 และ 10,000 เท่า

3.2 ผลของความดันอิ่มตัวต่อสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิโพรพิลีน

จากรูปที่ 4 แสดงผลของความดันอิ่มตัวต่อสันฐานวิทยาของโฟมพอลิโพรพิลีน พบว่าเมื่อเพิ่มความดันอิ่มตัวจะทำให้ฟองแก๊สกระจายตัวในอยู่ภายในโครงสร้างได้มากขึ้นและสอดคล้องกับสัดส่วนการขยายตัวดังรูปที่ 5 ซึ่งกรณีที่ใช้ความดันอิ่มตัว 140 bar ได้สัดส่วนการขยายตัวสูงสุดคือ 1.06 เท่า เนื่องจากการเพิ่มความดันอิ่มตัวจะทำให้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพละลายในพอลิเมอร์ได้เพิ่มขึ้นและทำให้เกิดฟองแก๊สได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhi-Mei X. และคณะ [7]



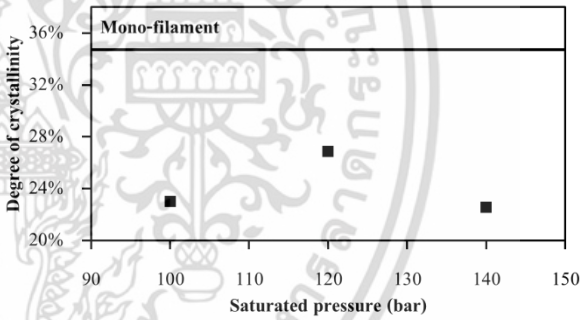
รูปที่ 5 ผลของความดันอิ่มตัวต่อสัดส่วนการขยายตัวของโฟมพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 170 °C เวลาอิ่มตัว 20 min และเวลาการลดความดัน 3-5 s

3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอลิโพรพิลีน

การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ด้วย DSC สามารถนำไปคำนวณองศาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (Degree of Crystallinity, X_c) ซึ่งเป็นสัดส่วนของเอนทัลปีของการหลอมเหลวของวัสดุใด ๆ ($\Delta H_{f,m}$) เปรียบเทียบกับเอนทัลปีของการหลอมเหลวของวัสดุที่มีองศาความเป็นผลึกที่ 100% (ΔH_f^0) [8] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$X_c = \frac{\Delta H_{f,m}}{\Delta H_f^0} \quad (1)$$

ซึ่งพอลิโพรพิลีนมีค่า $\Delta H_f^0 = 207.1$ J/g [9]



รูปที่ 6 องศาความเป็นผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอลิโพรพิลีนที่ความดันอิ่มตัวต่าง ๆ อุณหภูมิการเกิดโฟม 170 °C เวลาอิ่มตัว 20 min และเวลาการลดความดัน 3-5 s

จากรูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์องศาความเป็นผลึกพบว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนที่ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 190 °C และที่ความเร็วรอบของเกียร์ปั๊มคงที่เท่ากับ 10 rpm ในการอัดรีดขึ้นรูป มีองศาความเป็นผลึกเท่ากับ 35% เมื่อนำเส้นใยเชิงเดี่ยวพอโพรพิลีนเตรียมเป็นโฟมที่อุณหภูมิ 170 °C ความดันอิ่มตัว 100 bar เวลาอิ่มตัว 20 min และปล่อยความดันด้วยเวลา 3-5 s พบว่ามีองศาความเป็นผลึกลดลงเหลือ 23% เมื่อเพิ่มความดันอิ่มตัวเป็น 120 และ 140 bar ได้องศาความเป็นผลึก 26% และ 22% ตามลำดับ เพราะกระบวนการเกิดโฟมที่อุณหภูมิใกล้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

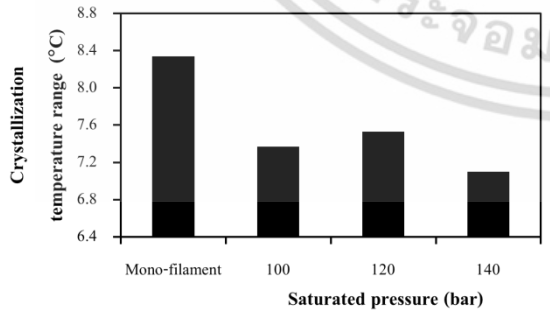
อุณหภูมิหลอมเหลวทำให้ผลึกส่วนหนึ่งของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวไป และเมื่อรบกวนสมดุลของระบบด้วยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยการลดความดันเพื่อทำให้เกิดฟองแก๊สของโฟม ส่งผลให้อุณหภูมิลดลงและเกิดกระบวนตกผลึกใหม่ไปพร้อม ๆ กัน ทำให้การโตของผลึกไม่สามารถเกิดได้อย่างอิสระ เนื่องจากการขยายตัวของฟองแก๊ส ดังนั้นองศาความเป็นผลึกของโฟมพอลิโพรพิลีนจึงลดลง

จากการวิเคราะห์กระบวนการตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอลิโพรพิลีนดังตารางที่ 1 พบว่าอุณหภูมิการตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอลิโพรพิลีนมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิการตกผลึกดังรูปที่ 7 พบว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนและโฟมมีช่วงอุณหภูมิการตกผลึกที่ต่างกัน ซึ่งแสดงว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอลิโพรพิลีนมีพฤติกรรมการตกผลึกที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 อุณหภูมิการตกผลึกของโฟมเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 170 °C เวลาอิ่มตัว 20 min และเวลาการลดความดัน 3-5 s

ความดันอิ่มตัว (bar)	อุณหภูมิตกผลึก (°C)
100	115.18
120	115.01
140	115.16

* เส้นใยเชิงเดียวพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการตกผลึกเท่ากับ 115.34 °C



รูปที่ 7 ช่วงอุณหภูมิการตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอลิโพรพิลีนที่ความดันอิ่มตัวต่าง ๆ อุณหภูมิการเกิดโฟม 170 °C เวลาอิ่มตัว 20 min และเวลาการลดความดัน 3-5 s

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกของวัสดุด้วยสมบัติเชิงความร้อนแบบอุณหภูมิไม่คงที่ ซึ่งใช้ค่าความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (Relative Crystallinity, X_t) ที่อุณหภูมิ T และสามารถแปลงเป็นกระบวนการตกผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ได้จากความสัมพันธ์ของอัตราการลดอุณหภูมิ (φ) ได้ดังนี้ [8]

$$X_t = \frac{\int_{T_0}^{T} (dH/dT)dT}{\int_{T_0}^{T_\infty} (dH/dT)dT} \quad (2)$$

$$\varphi = (T_0 - T)/t \quad (3)$$

เมื่อ $\int_{T_0}^{T} (dH/dT)dT$ และ $\int_{T_0}^{T_\infty} (dH/dT)dT$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานการตกผลึกต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิ T_0 ถึงอุณหภูมิ T และจากอุณหภูมิ T_0 ถึงอุณหภูมิ T_∞ ที่ค่า X_t เท่ากับ 1 ตามลำดับ

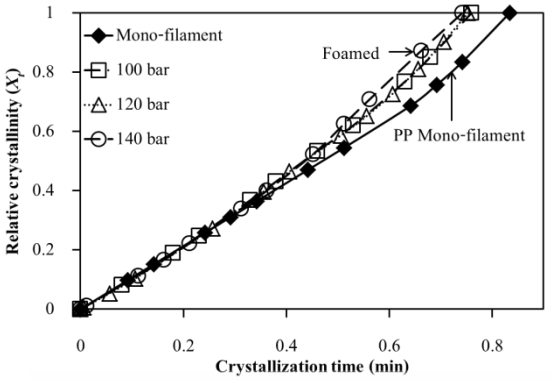
ซึ่งสมการที่ใช้วิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการตกผลึกแบบอุณหภูมิคงที่โดยทั่วไปคือ สมการของ Avrami [8] ดังสมการที่ (4)

$$\log(-\ln(1 - X_t)) = \log K + n \log t \quad (4)$$

K คือ ค่าคงที่อัตราการตกผลึกของวัสดุ และ n คือดัชนีของ Avrami แสดงถึงรูปร่างของผลึก สามารถประมาณค่าได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\log(-\ln(1-X_t))$ กับ $\log t$ ที่มีความชันเป็นค่าคงที่ n และจุดตัดแกน y เป็นเป็นค่าคงที่ $\log K$

จากรูปที่ 8 พบว่าเวลาการตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนนานกว่าโฟม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การตกผลึกโดยใช้สมการของ Avrami ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงดัชนีของ Avrami และค่าคงที่อัตราการตกผลึก พบว่าดัชนีของ Avrami ของเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนและโฟมมีค่าประมาณ 1.3- 1.4 แสดงว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนและโฟมมีการตกผลึกแบบ 1 มิติ แต่เมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนและโฟม พบว่าค่าคงที่อัตราการตกผลึกของโฟมมีค่ามากกว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีน เพราะกระบวนการเกิดโฟมโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารเกิดฟองทางกายภาพทำให้กระบวนการตกผลึกเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากการละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิโพรพิลีนจะช่วยเพิ่ม Free volume ทำให้พอลิโพรพิลีนสามารถตกผลึกได้เร็วขึ้น [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นผลึกสัมพัทธ์กับเวลาของเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีน และโฟมพอลิโพรพิลีนที่ความดันอิ่มตัว 100, 120 และ 140 bar ตามลำดับ อุณหภูมิการเกิดโฟม 170 °C เวลาอิ่มตัว 20 min และเวลาการลดความดัน 3-5 s

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ Avrami ของโฟมเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 170 °C เวลาอิ่มตัว 20 min และเวลาการลดความดัน 3-5 s

ความดันอิ่มตัว (bar)	*n*	log *K*
100	1.3	0.3080
120	1.2	0.3137
140	1.2	0.3314

* เส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนมีดัชนีของ Avrami และค่าคงที่อัตราการตกผลึกเท่ากับ 1.3 และ 0.3079 ตามลำดับ

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกของเส้นใยเชิงเดี่ยวและโฟมพอลิโพรพิลีน จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนโฟมมีช่วงอุณหภูมิการเกิดโฟมแคบและมีสัดส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อความดันอิ่มตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันอิ่มตัวจะทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในพอลิเมอร์ได้เพิ่มขึ้นทำให้เกิดฟองแก๊สได้มากขึ้น และจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกของเส้ยใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีนและโฟม พบว่าโฟมมีองศาความเป็นผลึกลดลง มีช่วงอุณหภูมิการตกผลึกแคบและอัตราการตกผลึกของเร็วกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยเชิงเดี่ยวพอลิโพรพิลีน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัย Yamagata ประเทศญี่ปุ่น และสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] W. D, Jr. Callister and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering An Introduction, 8th ed, Hoboken NJ, John Wiley & Sons, Inc, 2010.

[2] F. Rodriguez, Principles of Polymer Systems, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.

[3] X. Chunling, H. Yadong, L. Qingchun, H. Yingzhu, Y. Baorui and W. Xiaodong, "Crystallization Behavior and Foaming Properties of Polypropylene Containing Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Under Supercritical Carbondioxide," J. Appl. Polym. Sci, vol. 119, pp. 1275–1286, Aug., 2011.

[4] B. P. Chul and K. C. Lewis, "A study of cell nucleation in the extrusion of polypropylene foams," Polym Eng Sci, vol. 37, pp. 1-10, Jan., 1997.

[5] P. Spitael and C. W. Macosko, "Strain Hardening in Polypropylenes and Its Role in Extrusion Foaming" Polym Eng Sci, vol. 44, pp. 2090–2100, Nov., 2004.

[6] S. Doroudiani, C. B. Park and M. T. Kortschot, "Effect of the Crystallinity and Morphology on the Microcellular Foam Structure of Semicrystalline Polymers," Polym Eng Sci, vol. 36, pp. 2645–2662, Nov., 1996.

[7] X. Zhi-Mei, J. Xiu-Lei, L. Tao, H. Guo-Hua, Z. Ling, Z. Zhong-Nan and Y. Wei-Kang, "Foaming of polypropylene with supercritical carbon dioxide," J. of Supercritical Fluids, vol. 41, pp. 299–310, Sep., 2007.

[8] J. D. Menczel and R.B. Prome, Thermal Analysis of Polymers, Hoboken NJ, John Wiley & Sons, Inc, 2009.

[9] J. Karger-Kocsis, Polypropylene Structure blends and Composites Volume 2 Copolymers and Blends, Springer, 1995

[10] S.M. Lambert and M.E. Paulaitis, "Crystallization of poly(ethylene terephthalate) induced by carbon dioxide sorption at elevated pressures," J. Supercrit. Fluids, vol. 4, pp 15–23, Mar., 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้