

ผลกระทบของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ด ต่อกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน

Effect of The Particle Size of Polypropylene with Flakes Shape on Rotational Molding

ณรงค์ชัย โอเจริญ¹ นที ศรีสวัสดิ์² และ เอกตินัย จันทร์ศรี^{3*}

Narongchai O-Charoen¹, Natee Srisawat² and Ektinai Jansri^{3*}

Received: 8 September 2021, Revised: 30 August 2022, Accepted: 12 September 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน โดยใช้พอลิโพรพิลีนที่ได้มาจากแก้วพลาสติกใสที่เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง โดยการดำเนินการจะเริ่มจากการนำแก้วพลาสติกเหลือใช้มาทำการบดและคัดแยกขนาดให้ได้เป็นขนาดเล็ก (rPP-S) ขนาดกลาง (rPP-M) และขนาดใหญ่ (rPP-L) แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐาน จากนั้นนำไปขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียวที่ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที ใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 210 °C สังเกตและบันทึกผลปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปแล้วนำตัวอย่างที่ขึ้นรูปได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เหนียว ความร้อน และเชิงกลของชิ้นงาน โดยผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนทั้งขณะที่อยู่ในสถานะของแข็งซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการส่งผ่านความร้อนของอนุภาคและสถานะของเหลวซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองอากาศในชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการขึ้นรูปพบว่า rPP-S มีศักยภาพใน

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

² Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

³ Department of Polymer Materials Technology, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot university, Ongkharak, Nakhon Nayok 26120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Ektinai@g.swu.ac.th

การขึ้นรูปสูงและมีความแข็งแรงต่อแรงอัดสูงกว่า rPP-M และ rPP-L ประมาณ 21.77 และ 30.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คำสำคัญ: ขนาดอนุภาค, พอลิโพรพิลีน, ลักษณะเป็นเกล็ด, กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน, แก้วพลาสติกเหลือใช้

ABSTRACT

This research aims to study the effect of polypropylene particle size with flake shape on the rotational molding process. The polypropylene used in the experiment was obtained from waste plastic glass with transparent single-use packaging. The procedure of research started with the waste plastic glass crushing and sieving into small (rPP-S), medium (rPP-M), and large (rPP-L) sizes, then the characteristics of particles were analyzed. The specimens were molded with the axial powder flow apparatus at a rotation speed of 7 rpm, using a molding temperature of 210 °C. The phenomena that occurred during the molding were observed and recorded. After that, the tests of the physical, thermal, and mechanical properties were carried out. The results showed that small particle size directly affected the rotational molding both in the solid state which is involved in particle motion and the heat transfer of the particles and in a liquid state which involved the bubbles in the specimens. Comparing the potential of processibility, it was found that the case of rPP-S had higher potential and compressive strength than rPP-M and rPP-L about 21.77% and 30.49% respectively.

Key words: particle size, polypropylene, flake shape, rotational molding, waste plastics glasses

บทนำ

แก้วพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้งชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีลักษณะใสและมีราคาถูกทำให้ปริมาณขยะประเภทนี้มีมากขึ้น ซึ่งการจัดการขยะประเภทนี้สามารถทำได้ยากเนื่องจากแก้วพลาสติกมีผนังบาง ทำให้ยากต่อการลดขนาดหรือแปรรูปหรือหากลดขนาดของแก้วพลาสติกได้แต่ก็ยังไม่สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้ทันที เนื่องจากลักษณะของอนุภาคหลังจากการลดขนาดเป็นลักษณะเกล็ดบางซึ่งไม่เหมาะกับการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป จำเป็นต้องนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกเพื่อควบคุมคุณภาพของอนุภาคก่อน ทำให้

ขยะประเภทแก้วพลาสติกไม่ได้รับความนิยมในการนำมารีไซเคิลเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะผนังหนา เช่น ขวดหรือกล่องพลาสติก อย่างไรก็ตามมีกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกรูปแบบหนึ่งที่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคที่มีลักษณะดังกล่าวได้โดยไม่ต้องนำไปผลิตเป็นเม็ดพลาสติกก่อนนั่นคือ กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน (Rotational Molding) ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปนี้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวงขนาดใหญ่ เช่น ถังขยะขนาดใหญ่ ถังเก็บน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย เรือแคนู เรือคายัคและถังน้ำแข็ง เป็นต้น (Tcharkhtchi and Verdu, 2004) เนื่องจากกระบวนการนี้มีขั้นตอนการขึ้นรูปไม่ซับซ้อน เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปมีราคา

ไม่สูงสามารถผลิตได้เองภายในประเทศและมีค่าบำรุงรักษาถูกทำให้ได้รับความสนใจมากขึ้นในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็ก แม้ว่ากระบวนการนี้มีข้อดีอยู่หลายประการแต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่บ้างบางประการเช่น ต้องใช้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่เหมาะสมถึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพ โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วงระหว่าง 300-350 ไมครอน และมีลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลมซึ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ การหลอมเหลว และการก่อตัวของผนังชิ้นงาน (Crawford and Throne, 2001) นอกจากนี้ ยังมีอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญคือ อัตราการหลอมรวมอนุภาค (Sintering Rate) ซึ่งตัวแปรนี้จะช่วยทำนายระยะเวลาในการขึ้นรูปและคุณภาพของชิ้นงานเบื้องต้นได้ (Bellehumeur *et al.*, 1996; Pop-Iliev *et al.*, 2003) สำหรับการใช้พอลิโพรพิลีนในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนมีรายงานว่า อนุภาคของพอลิโพรพิลีนที่ได้มาจากกระบวนการลดขนาดหรือการบดที่แตกต่างกันจะมีขนาดและลักษณะรูปทรงของอนุภาคที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการหลอมรวมอนุภาคและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน (Greco and Maffezzoli, 2004) และเมื่อพิจารณาอัตราการหลอมไหลของพอลิโพรพิลีนจะพบว่า ชนิดที่มีอัตราการหลอมไหลสูงจะทำให้อนุภาคมีอัตราการหลอมรวมที่อุณหภูมิต่ำกว่าชนิดที่มีอัตราการหลอมไหลต่ำ (Sharma *et al.*, 2009) สำหรับสมบัติทางกลจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนที่มีอนุภาคเล็กจะมีค่าความแข็งแรงในส่วนของมอดูลัสเริ่มต้น (Initial Modulus) สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และยังสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วย (Jansri and Narongchai, 2018) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการหล่อเย็นพบว่า การใช้อัตราหล่อเย็นต่ำจะทำให้เกิดผลึกที่สูงขึ้นซึ่งจะมีผลต่อการขยายตัวหรือแพร่กระจายของรอยแตกของ

ชิ้นงาน แต่จะไม่ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกเริ่มต้น (Pop-Iliev *et al.*, 2003; Pick and Harkin-Jones, 2003; Therese Pick *et al.*, 2006) นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนจะมีค่าความต้านทานแรงกระแทกต่ำเนื่องจากลักษณะของผลึกจะเป็นวงกลมกลายเป็นสเฟียรูไลต์ (Sharma *et al.*, 2009) ซึ่งจากงานรายงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการนำพอลิโพรพิลีนมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนจะต้องพิจารณาหลายตัวแปรเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่สมบูรณ์หรือเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยที่ตัวแปรที่ควรพิจารณาและให้ความสำคัญเป็นอันดับแรกคือลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาค อย่างไรก็ตาม การศึกษาการขึ้นรูปด้วยอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนยังไม่ได้ความสนใจและมีการศึกษาไม่กว้างขวางในปัจจุบัน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน โดยพอลิโพรพิลีนที่ใช้ได้มาจากขยะแก้วใสที่เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง และทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูป ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป การปรากฏของฟองอากาศ ความหยาบของผิว สมบัติทางความร้อน และความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงาน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุ

พอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากขยะแก้วพลาสติกใสที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล หมายเลข 5 และมีน้ำหนักเฉลี่ย 18 ออนซ์ โดยขยะแก้วพลาสติกเหล่านี้จะถูกนำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและนำเข้าสู่กระบวนการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบ

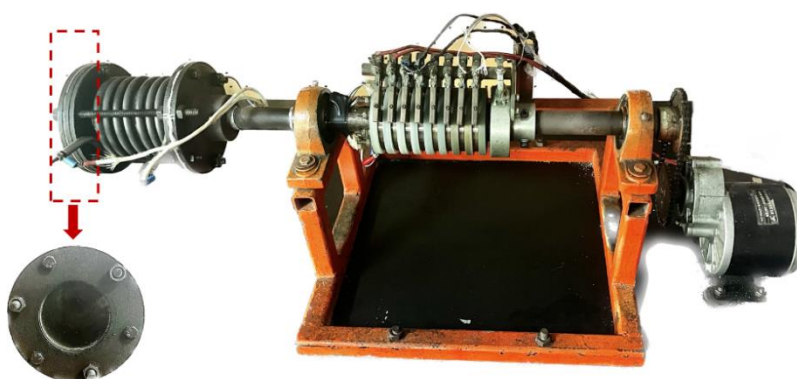
โม่ที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งคุณภาพของอนุภาคจะถูกควบคุมด้วยปริมาณแก้วพลาสติกที่ใส่ลงในเครื่องบด และระยะเวลาในการบดที่ 300 กรัมต่อ 10 นาที จากนั้นนำไปทำการคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน ตามมาตรฐาน ASTM E11 เบอร์ 6 12 และ 30 จะได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (rPP-L) ขนาดกลาง (rPP-M) และขนาดเล็ก (rPP-S) ตามลำดับ

2. การขึ้นรูปด้วยตัวอย่างทดสอบ

การทดลองนี้จะใช้เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว ซึ่งเครื่องขึ้นรูปนี้ถูกสร้างขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างขึ้นรูป จะมีระบบการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าโดยสามารถตั้งค่าอุณหภูมิได้สูงถึง 400 °C ปรับความเร็วในการหมุนได้ตั้งแต่ 7-200 รอบต่อนาที สามารถวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในแม่พิมพ์

ได้ และมีการติดตั้งกระจกทนความร้อนบนแม่พิมพ์ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการหลอมละลายและการเคลื่อนที่ของอนุภาคตั้งแต่ในสถานะของแข็งจนหลอมละลายดังแสดงในภาพที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องนี้ทำให้สามารถนำไปกำหนดเงื่อนไขหรือสถานะในการขึ้นรูปจริงได้

โดยในการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะใช้พลาสติกน้ำหนัก 32 กรัม ใช้ความเร็วในการหมุนแม่พิมพ์ที่ 7 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในการขึ้นรูปจะถูกตั้งไว้ที่ 210 °C เมื่ออุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์สูงถึง 210 °C ระบบควบคุมจะสั่งให้ฮีตเตอร์หยุดให้ความร้อน แล้วเริ่มขั้นตอนการหล่อเย็นโดยแม่พิมพ์จะถูกหล่อเย็นด้วยพัดลมที่มีอัตราความเร็วลมคงที่ การหล่อเย็นจะถูกดำเนินการจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิลงรูปของพอลิเมอร์ จากนั้นชิ้นงานจะถูกถอดออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 1 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว (Axial Powder-Flow Apparatus)

3. การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงาน

ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของอนุภาค (Particles Properties) หลังการลดขนาดถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital-Microscope) รุ่น 1000X ยี่ห้อ Hiview และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ

สมบัติการไหลของอนุภาคขณะเป็นของแข็ง (Dry Flow) และการทดสอบความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1895 และการทดสอบ Hausner Ratio ถูกใช้เพื่อระบุลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของอนุภาค

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าความหยาบของ

ผิวชิ้นงาน (Arithmetic Mean of Surface Roughness) ใช้เทคนิคการเปรียบเทียบความแตกต่างของสี โดยชิ้นงานที่มีผิวเรียบจะมีการตกกระทบของแสงที่สม่ำเสมอกว่าชิ้นงานมีผิวไม่เรียบหรือมีพื้นผิวที่มีความลึกต่างกัน และการตรวจสอบการปรากฏของฟองอากาศในชิ้นงาน (Bubbles) โดยทั้งสองการทดสอบจะถูกดำเนินการด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลแล้ววิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ และชิ้นงานทดสอบจะถูกกำหนดให้มีขนาด 2×2 เซนติเมตร และตัดจากชิ้นงานที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง

การทดสอบสมบัติทางความร้อนประกอบไปด้วยการวัดอัตราการหลอมไหล (Melt Flow Index) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ด้วยเครื่องทดสอบ CEAST รุ่น 6425 ที่อุณหภูมิ 230 °C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม การวัดอัตราการหลอมรวมอนุภาค (Sintering Rate) ด้วยเครื่อง Sinter รุ่น RT1 ช่วงอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 30 - 250 °C และการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) รุ่น DSC 200 F3 จากบริษัท NETZSCH มีอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที จากอุณหภูมิ 30 °C

จนถึง 200 °C โดยการรักษาอุณหภูมิที่ 200 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดประวัติทางความร้อน แล้วลดอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที จากอุณหภูมิ 200 °C ลงมาจนถึง 30 °C แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงต่อแรงอัด (Compressive Strength) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3787 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Hounsfield Model TG18 ใช้ความเร็วในการอัด 50 มิลลิเมตร ต่อนาที และโหลด 500 นิวตัน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

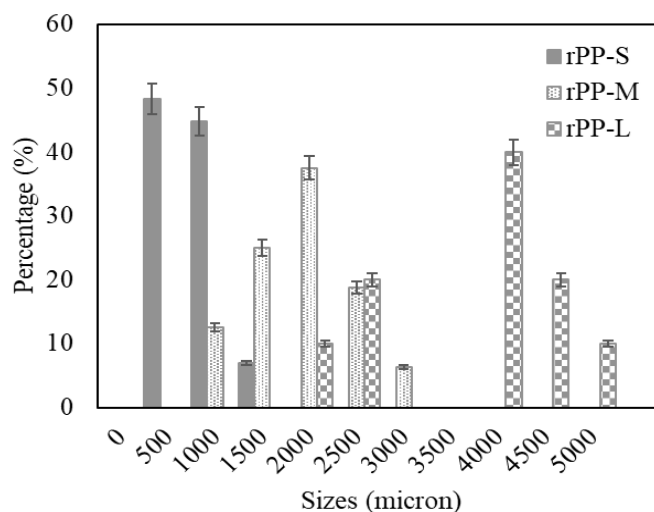
1. ลักษณะและสมบัติของอนุภาคหลังการลดขนาด

การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของขยะแก้วพลาสติกโพลีเอทิลีนพอลิโพรพิลีนหลังการบดและแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน แสดงในตารางที่ 1 โดยผลที่ได้พบว่าอนุภาคมีความหนาเฉลี่ย 0.20 มิลลิเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 3,484 1,644 และ 574 ไมครอน สำหรับ rPP-L rPP-M และ rPP-S ตามลำดับ และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแสดงในภาพที่ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะของอนุภาค

Materials	Mean Particle Size (μm)	Avg. Thickness (mm.)	Bulk Density* (g/cm ³)	Dry Flow (sec)*	Hausner Ratio	MFI (g/10 min) (230°C/2.16kg)
rPP-L	3,484 (±101.64)		0.17	22.00 (±3.72)	1.22	3.36 (±0.21)
rPP-M	1,644 (±135.47)	0.20 (±1.41)	0.18	19.00 (±1.38)	1.21	3.38 (±0.19)
rPP-S	579 (±107.16)		0.25	14.67 (±1.91)	1.23	3.38 (±0.21)

*ไม่สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน จำเป็นต้องให้แรงในการทดสอบ



ภาพที่ 2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการจำแนกลักษณะรูปร่างของอนุภาคของขยะแก้วพลาสติกโพลีโพรพิลีนหลังการลดขนาด ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Roundness และ Circularity และในภาพที่ 3 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของรูปร่างอนุภาค ซึ่งพบว่าลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เตรียมจากขยะแก้วพลาสติกโพลีโพรพิลีนจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีสัดส่วนของอนุภาคที่มีรูปร่างเรียวยาวและรูปร่างค่อนข้างกลมใกล้เคียง

กันประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอนุภาคขนาดกลางจะมีอนุภาครูปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ และอนุภาคขนาดใหญ่จะมีอนุภาครูปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะรูปร่างของอนุภาคแก้วพลาสติกโพลีโพรพิลีนหลังการลดขนาดแสดงในภาพที่ 4 จะเห็นได้ชัดว่ายิ่งขนาดอนุภาคเล็ก รูปร่างของอนุภาคจะมีลักษณะเรียวยาวเนื่องจากอนุภาคมีการขีดตัวออกเนื่องจากแรงเฉือนของใบมีดเครื่องบด

ตารางที่ 2 ลักษณะของอนุภาคจากความสัมพันธ์ระหว่าง Roundness และ Circularity

		Roundness								
		0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
Circularity	0.1-0.2									
	0.2-0.3									
	0.3-0.4									
	0.4-0.5									
	0.5-0.6									
	0.6-0.7									

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Circularity	Roundness									
	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	
0.7-0.8										
0.8-0.9										
0.9-1.0										

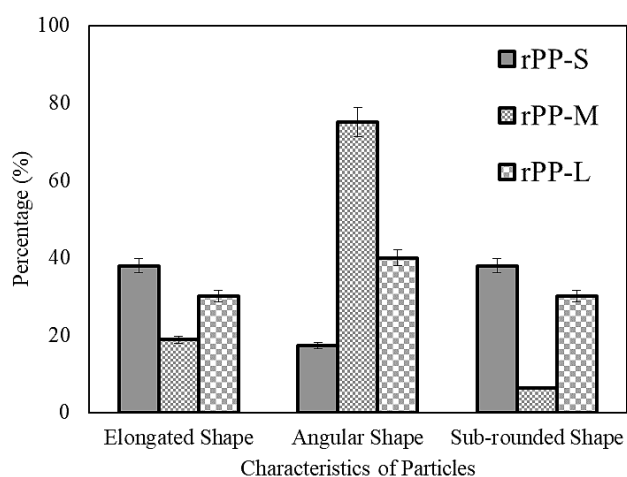
*ในงานวิจัยนี้รูปร่างของอนุภาคจะถูกกำหนดจากความสัมพันธ์ระหว่าง Roundness และ Circularity ดังนี้

Roundness 0.1-0.3 และ Circularity 0.1-0.5 = รูปร่างเรียวยาว (Elongated Shape)

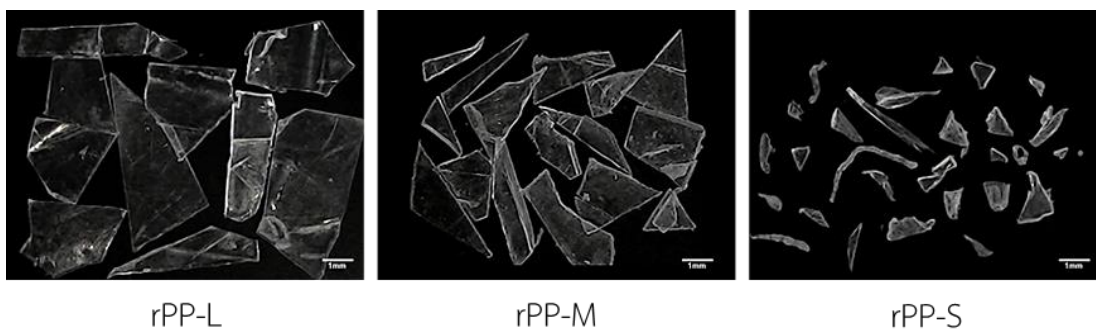
Roundness 0.3-1.0 และ Circularity 0.4-0.6 = รูปร่างเหลี่ยมมีมุม (Angular Shape)

Roundness 0.3-1.0 และ Circularity 0.6-0.8 = รูปร่างค่อนข้างกลม (Sub-Rounded Shape)

Roundness 0.3-1.0 และ Circularity 0.8-0.9 = รูปร่างกลม (Rounded Shape)



ภาพที่ 3 การกระจายตัวของรูปร่างอนุภาค



ภาพที่ 4 อนุภาคของขยะแก้วพลาสติกไฮชนิดพอลิโพรพิลีนหลังการลดขนาด

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และอัตราการไหลแบบแห้ง (Dry Flow) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนเล็ก rPP-S มีค่าความหนาแน่นรวมสูงและไหลเร็วที่สุดที่ 0.25 (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ต่อ 14.67 วินาที ตามด้วย rPP-M ที่ 0.17 (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ต่อ 19.00 วินาที และ rPP-L ที่ 0.18 (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ต่อ 22.00 วินาที โดยผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า (Cumberland and Crawford, 1987) ซึ่งได้อธิบายไว้ว่าค่าความหนาแน่นรวมและอัตราการไหลแบบแห้งจะแปรผกผันกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีความหนาแน่นรวมน้อยจะมีอัตราการไหลช้ากว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นรวมมาก เนื่องจากวัสดุที่มีความหนาแน่นรวมน้อยเกิดจากอนุภาคแต่ละอนุภาคมีขนาด รูปร่าง หรือการกระจายของของขนาดไม่เหมาะสมทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่และการแผ่ตัวของวัสดุ (Shenoy, 2013)

การทดสอบอัตราส่วน Hausner ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค พบว่าทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับตารางแสดงลักษณะการไหลของอนุภาค พบว่าในทุกกรณีของอนุภาค พอลิโพลีนแสดงลักษณะการไหลอยู่ในช่วง 1.19-1.25 หมายถึง การไหลของอนุภาคอยู่ในระดับพอใช้ (Fair) (Geldart *et al.*, 2006)

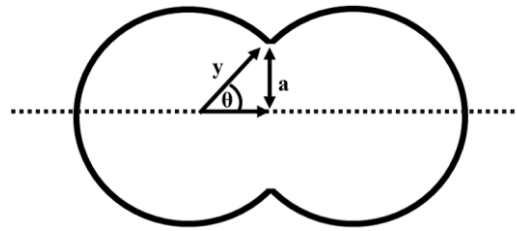
2. สมบัติเชิงความร้อน

2.1 อัตราการหลอมไหลและอัตราการหลอมรวมอนุภาค

ผลการทดสอบอัตราการไหลของขี้ผึ้งพลาสติกโพรพิลีนทั้ง 3 ขนาดพบว่า rPP-M และ rPP-S มีค่าเท่ากันที่ 3.88 กรัมต่อ 10 นาที ในขณะที่ rPP-L มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยที่ 3.37 กรัมต่อ

10 นาที ซึ่งอาจเป็นผลมาจากมีฟองอากาศเกิดขึ้นในชิ้นงานทดสอบสำหรับวัสดุที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

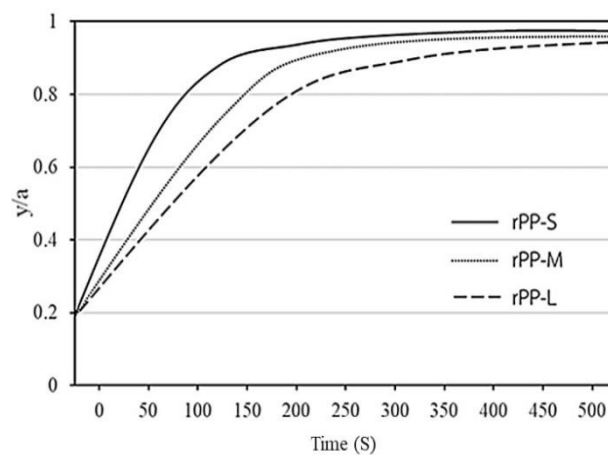
ผลการทดสอบอัตราการหลอมรวมมีความสำคัญในการประเมินระยะเวลาการให้ความร้อนในการขึ้นรูปและการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์อัตราการหลอมรวมอนุภาคได้จากอัตราส่วนระหว่าง “y/a” ถ้าอัตราส่วนเข้าใกล้ 1 นั่นคืออนุภาคทั้งสองรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ โดยที่ “y” คือความยาวของจุดเชื่อมต่อระหว่างสองอนุภาคและ “a” คือรัศมีเฉลี่ยของอนุภาค (Guillén-Castellanos *et al.*, 2003) (ดังแสดงในภาพที่ 5) ผลการวิเคราะห์อัตราการหลอมรวมอนุภาค จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขี้ผึ้งพลาสติกโพรพิลีนหลังการบด ทั้ง 3 ขนาด เริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง (Solid Phase) เป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery Phase) ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 135-140 °C แล้วเปลี่ยนจากสถานะคล้ายยางเป็นของไหลหลอมเหลว (Melted Phase) ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 190-210 °C และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วน y/a ในภาพที่ 7 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันในกรณีของ rPP-S มีอัตรา y/a สูงที่สุดตามด้วย rPP-M และ rPP-L ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้รวดเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (Perot *et al.*, 2008)



ภาพที่ 5 การหลอมรวมของอนุภาค

	rPP-S	rPP-M	rPP-L
Start			
	~ 35 °C	~ 35 °C	~ 35 °C
Originally Melted			
	~ 140 °C	~ 140 °C	~ 140 °C
Completely Melted			
	~ 192 °C	~ 204 °C	~ 211 °C

ภาพที่ 6 สถานะการหลอมรวมของอนุภาคที่อุณหภูมิต่างกัน

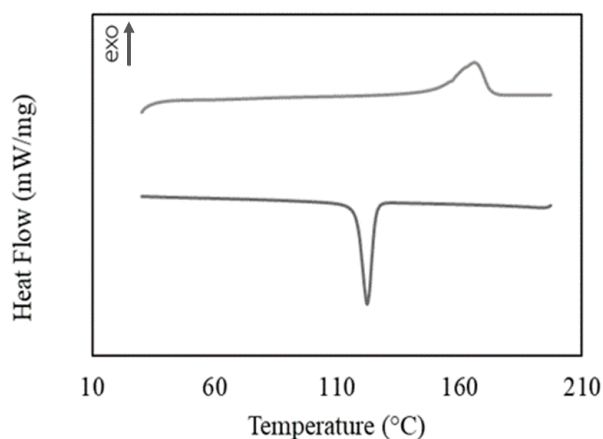


ภาพที่ 7 อัตราการหลอมรวมอนุภาค

2.2 การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

การวิเคราะห์นี้เป็นการทดสอบเพื่อระบุชนิดและหาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้พอลิโพรพิลีนหลังการลดขนาดในการทดสอบผลการทดสอบในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุเชิงเดี่ยว ไม่มีการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นเนื่องจากกราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลวและ

อุณหภูมิเกิดผลึกเพียงจุดเดียว โดยแสดงจุดอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Point Temperature, T_m) ที่ 168.2°C และจุดอุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) ที่ 122.4°C และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟจาก อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเกิดผลึก และค่าพลังงานการดูดกลืนความร้อนของวัสดุสามารถระบุได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีน (Jansri and Narongchai, 2018)

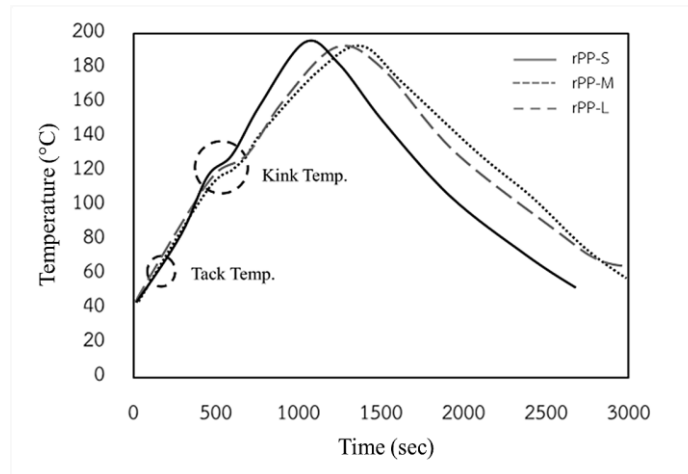


ภาพที่ 8 DSC เทอร์โมแกรมพอลิโพรพิลีน

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์

จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์ในภาพที่ 9 พบว่าอนุภาคจะได้รับความร้อนและเริ่มเคลือบที่ผนังแม่พิมพ์ หรือเรียกว่าจุด Tack Point ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันทุกกรณี ที่ประมาณ 50°C จากนั้นอัตราการความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและจะช้าลงที่จุด Kink Point หรือจุดที่อนุภาคทั้งหมดหยุดการเคลื่อนที่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ $117-120^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นอัตราการความร้อนจะ

เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ตั้งไว้ จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะกราฟจะเห็นได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กมีอัตราการความร้อนเพิ่มขึ้นเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าทำให้สามารถหลอมรวมกันได้รวดเร็วกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการหลอมรวมอนุภาคในการทดลองก่อนหน้านี้ จากผลดังกล่าวส่งผลให้ใช้เวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่าอนุภาคขนาดใหญ่



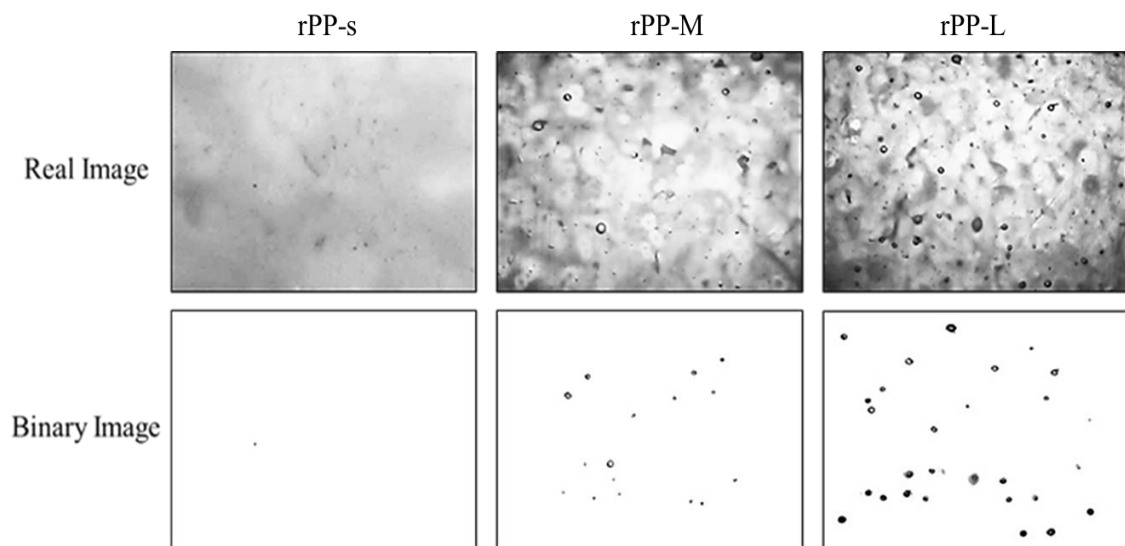
ภาพที่ 9 รูปแบบอุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์

4. สมบัติทางกายภาพ

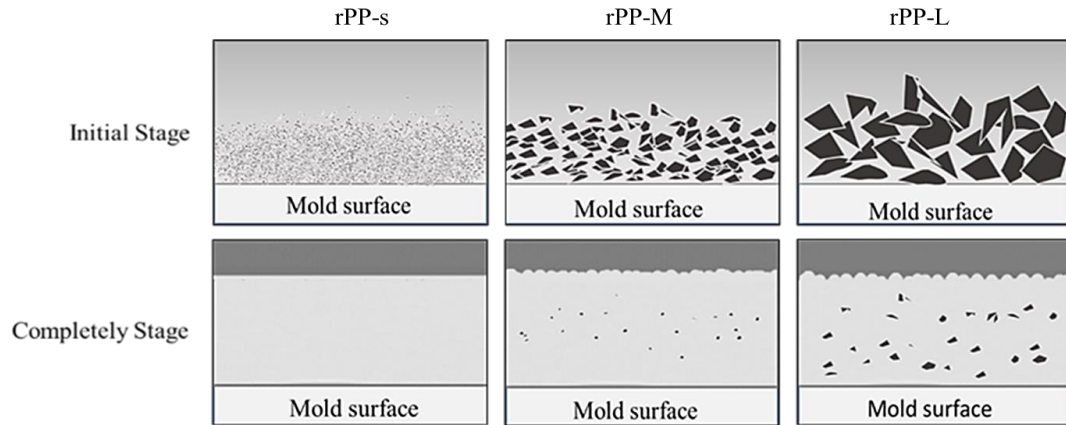
4.1 การปรากฏของฟองอากาศในชิ้นงาน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณของฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 10 ฟองอากาศที่เกิดในชิ้นงาน

เกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความหนาแน่นรวมซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อนุภาคที่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่าอนุภาคที่มีค่าความหนาแน่นรวมสูงทำให้ตัวอย่างชิ้นงานมีโอกาสที่จะเกิดฟองอากาศได้มากกว่าและฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มขนาดใหญ่กว่า (Spence and Crawford, 1996)



ภาพที่ 10 ฟองอากาศในชิ้นงาน



ภาพที่ 11 ลักษณะการก่อตัวเป็นผนังด้านในและด้านนอกของชิ้นงาน

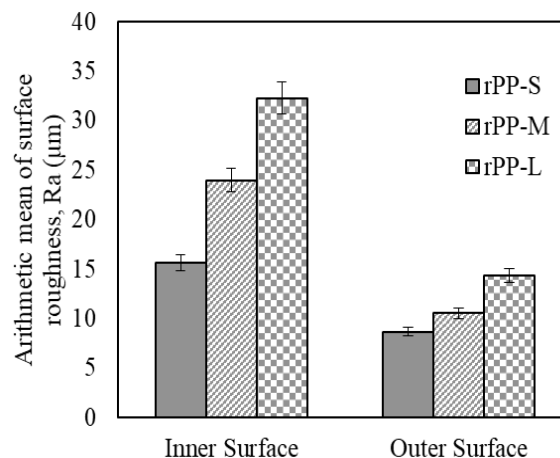
4.2 ความหยาบของผิวชิ้นงาน

ผลการทดสอบ โดยใช้เทคนิคการเปรียบเทียบความแตกต่างของสีโดยโปรแกรม ImageJ ดังแสดงในตารางที่ 3 และกราฟเปรียบเทียบในภาพที่ 12 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า ขนาดอนุภาคที่

เล็กลงแสดงค่าเฉลี่ยความขรุขระผิวน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวชิ้นงานทั้งด้านในและด้านนอกเรียบขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กหลอมเหลวได้ง่ายกว่า อนุภาคขนาดใหญ่ทำให้เมื่อได้รับความร้อนจึงเกาะที่ผนังแม่พิมพ์และรวมตัวกันสมบูรณ์ได้ง่ายกว่า (Rao and Throne, 1972)

ตารางที่ 3 ความหยาบของผิวชิ้นงาน

Materials	Rotational Speed (rpm.)	Arithmetic Mean of Surface Roughness, Ra (μm)	
		Inner Surface	Outer Surface
rPP-S	7	15.71 (± 2.18)	9.19 (± 1.08)
rPP-M		24.22 (± 2.62)	11.10 (± 1.74)
rPP-L		32.98 (± 3.31)	14.03 (± 1.37)



ภาพที่ 12 กราฟเปรียบเทียบความหยาบของผิวชิ้นงานด้านในและนอก

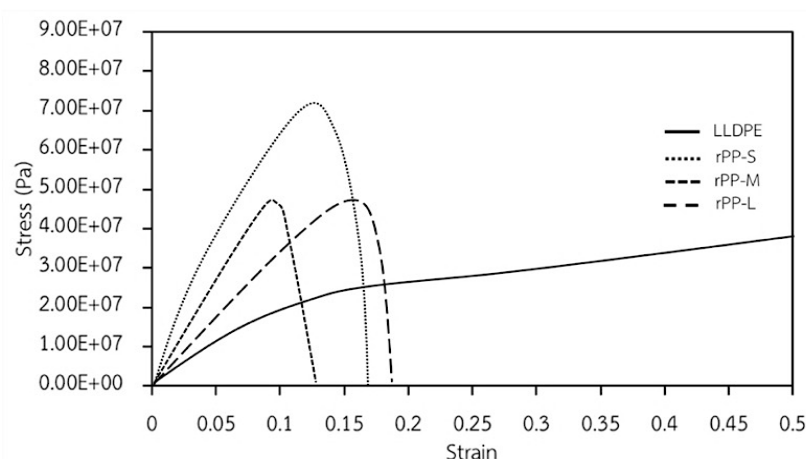
5. ความแข็งแรงต่อแรงอัด

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบแบบกดอัด เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีลักษณะรูปทรงเป็นกระบอกกลวง และการทดสอบนี้ส่วนใหญ่จะรายงานผลด้วยค่าโมดูลัสเริ่มต้น (Initial Modulus) (Rosato *et al.*, 2001) จากตารางที่ 4 พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีค่าโมดูลัสเริ่มต้นสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคขนาดกลางและขนาดใหญ่มีค่า 21.77 และ 30.49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นผลจากขนาดอนุภาคเล็กขณะเป็นของแข็งมีการเคลื่อนที่ดีกว่าทำให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้อนุภาคแต่ละอนุภาคหลอมรวมกันได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ทั้งนี้อนุภาคขนาดเล็กจะมีอัตราการหลอมรวมอนุภาครวดเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อีกทั้งอนุภาคขนาดเล็กก็ยังมีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยกว่าทำให้ชิ้นงานมีความสมบูรณ์ มีผิวเรียบและมีการกระจายความหนาสม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาที่ลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานจากกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดในภาพที่ 13 พบว่า พอลิโพรพิลีนทั้ง 3 ขนาดมีการเสียรูปในลักษณะแบบเปราะในขณะที่ LLDPE มีการเสียรูปในลักษณะแบบเหนียวอย่างไรก็ตามลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศที่ปรากฏในชิ้นงานโดยชิ้นงานที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่จะแสดงความเปราะมากกว่าชิ้นงานที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก

ตารางที่ 4 ค่าโมดูลัสเริ่มต้น

Materials	Rotational Speed (rpm/min)	Initial Modulus (MPa)
LLDPE	7	9.13 ±2.62
rPP-S		41.39 ±2.28
rPP-M		32.38 ±2.21
rPP-L		28.77 ± 1.15



ภาพที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain

สรุป

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน โดยพอลิโพรพิลีนที่ใช้ได้มาจากขยะแก้วใสที่เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง ใช้สภาวะเงื่อนไขในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210 °C และความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว สามารถสรุปได้ดังนี้

- ลักษณะอนุภาคที่เตรียมจากขยะแก้วพลาสติกไอโซนิกพอลิโพรพิลีนจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีสัดส่วนของอนุภาคที่มีรูปร่างเรียวยาวและรูปร่างค่อนข้างกลมใกล้เคียงกันประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอนุภาคขนาดกลางจะมีอนุภาครูปปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ และอนุภาคขนาดใหญ่จะมีอนุภาครูปปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

- ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถเคลือบผนังแม่พิมพ์ได้รวดเร็วและใช้เวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

- การเกิดฟองอากาศในชิ้นงานพบว่าปริมาณของฟองอากาศจะใหญ่ขึ้นตามขนาดของอนุภาค

- ความหนาของผิวชิ้นงานพบว่าอนุภาคขนาดเล็กแสดงค่าความหนาของผิวดำกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ทั้งด้านในและด้านนอก

- สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากขยะแก้วพลาสติกไอโซนิกพอลิโพรพิลีนทุกกรณีมีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกันที่ 168.2 °C และมีอุณหภูมิเกิดผลึกที่ 122.4 °C

- ความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงานพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีค่ามอดูลัสเริ่มต้นสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ 21.77 และ 30.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการปรากฏของฟองอากาศในชิ้นงาน

อนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กมีศักยภาพในการขึ้นรูปสูงกว่าอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดใหญ่

กิตติกรรมประกาศ

กรอบงานวิจัยแผนงานสำคัญ (Flagship) ประจำปีงบประมาณ 2563 ชุมชนนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน สัญญาเลขที่ CBLRMUTT63B08 และแผนงานวิจัยทำหายไทย : ทะเลไทยไร้ขยะ ระยะที่ 2 สัญญาเลขที่ วช.อว.(อ)(กส)/89/2563/ผ02

เอกสารอ้างอิง

- Bellehumeur, C.T., Bisaria, M.K. and Vlachopoulos, J. 1996. An experimental study and model assessment of polymer sintering. **Polymer Engineering & Science** 36(17): 2198-2207.
- Crawford, R.J. and Throne, J.L. 2001. **Rotational molding technology**. William Andrew, New York.
- Cumberland, D.J. and Crawford, R.J. 1987. **The packing of particles**. Elsevier, New York.
- Geldart, D., Abdullah, E.C., Hassanpour, A., Nwoke, L.C. and Wouters, I.J.C.P. 2006. Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. **China Particuology** 4(3-4): 104-107.
- Greco, A. and Maffezzoli, A. 2004. Powder-shape analysis and sintering behavior of high-density polyethylene powders for rotational molding. **Journal of applied polymer science** 92(1): 449-460.
- Guillén-Castellanos, S.A., Lin, W., Bellehumeur, C.T. and Weber, M. 2003. Effect of processing history on the intering of ethylene copolymers.

- International Polymer Processing** 18(1): 87-90.
- Jansri, E. and Narongchai, O. 2018. Polypropylene/Polyethylene two-layered by one-step rotational molding. **Journal of Polymer Engineering** 38(7): 685-694.
- Perot, E., Lamnawar, K. and Maazouz, A. 2008. Optimization and modelling of rotational molding process. **International Journal of Material Forming** 1(1): 783-786.
- Pick, L.T. and Harkin-Jones, E. 2003. An investigation into the relationship between the impact performance of rotationally molded polyethylene products and their dynamic mechanical properties. **Polymer Engineering & Science** 43(4): 905-918.
- Pop-Iliev, R., Liu, F.Y., Liu, G.B. and Park, C.B. 2003. Rotational foam molding of polypropylene with control of melt strength. **Advances in Polymer Technology** 22(4): 280-296.
- Rao, M.A. and Throne, J.L. 1972. Principles of rotational molding. **Polymer Engineering & Science** 12(4): 237-264.
- Rosato, D.V., Schott, N.R. and Rosato, M.G. 2001. **Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook**. Springer Science & Business Media, New York.
- Sharma, T., Mahanwar, P. and Bambole, V. 2009. Study of modified polypropylene for rotational moulding applications. **International Journal of Plastics Technology** 13(1): 83-94.
- Shenoy, A.V. 2013. **Rheology of filled polymer systems**. Springer Science & Business Media, Berlin.
- Spence, A.G. and Crawford, R.J. 1996. Removal of pinholes and bubbles from rotationally moulded products. **Journal of Engineering Manufacture** 210(6): 521-533.
- Tcharkhtchi, A. and Verdu, J. 2004. Structure Processability Relationships During Rotational Moulding of Plastics. **Advanced Engineering Materials** 6(12): 983-992.
- Therese Pick, L., Harkin-Jones, E., Jovita Oliveira, M. and Clara Cramez, M. 2006. The effect of cooling rate on the impact performance and dynamic mechanical properties of rotationally molded metallocene catalyzed linear low density polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science** 101(3): 1963-1971.