

พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผนังสองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขึ้นตอนเดียวที่อัตราความเร็วรอบการหมุนสูง

เอกตินัย จันทรศรี^{1*} จิตาภา กรมสุริยศักดิ์² จักรภัทร ปรีดาวัฒน์³ และ ณรงค์ชัย โอเจริญ⁴
Ektinai.j@mail.rmutk.ac.th^{1*} 1158104520767@mail.rmutt.ac.th² 1158104730374@mail.rmutt.ac.th³
narongchi.o@en.rmutt.ac.th⁴

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²⁻⁴ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 19-Mar-2020
Revised	: 23-Apr-2020
Accepted	: 12-May-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผนังสองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขึ้นตอนเดียวที่อัตราความเร็วรอบการหมุนสูง โดยใช้พอลิโพรพิลีน (PP) ที่มีขนาดและลักษณะรูปร่างของอนุภาคต่างกันร่วมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่มีลักษณะอนุภาคเป็นผง ทำการผสมที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 ด้วยวิธีการผสมแบบแห้งแล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียวที่ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที ซึ่งในระหว่างการขึ้นรูป อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์และพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบการหมุนสูงสามารถทำให้ชิ้นงานเกิดการแยกชั้นได้ในทุกกรณี พื้นผิวชิ้นงานทั้งด้านในและด้านนอกมีความขรุขระลดลง และชิ้นงานมีค่ามอดูลัสเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปที่อัตราความเร็วรอบการหมุนต่ำ ยกเว้นในกรณีของ PP ที่มีลักษณะรูปร่างกลมและมีขนาดใหญ่กว่า LLDPE 3 เท่า

คำสำคัญ: กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขึ้นตอนเดียว พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น พอลิโพรพิลีน

Polypropylene and Linear Low-Density Polyethylene Two-Layered in Single-Step Rotational Molding at the High-Speed Rotating

Ektinai Jansri^{1*}, Jidapa Kromsuriyasak², Jakkphat Preedawat³
and Narongchai O-Charoen⁴

Ektinai.j@mail.rmutk.ac.th^{1*}, 1158104520767@mail.rmutt.ac.th², 1158104730374@mail.rmutt.ac.th³,
narongchi.o@en.rmutt.ac.th⁴

¹Department of Textile Chemical Engineering, Faculty of Textile Industry, Rajamangala University of Technology
Krungthep,

²⁻⁴Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi,

Received	: 19-Mar-2020
Revised	: 23-Apr-2020
Accepted	: 12-May-2020

Abstract

The objective of this research has studied the molding of two-layered products in one-step rotational molding process at high-speed rotation. In this research, polypropylene (PP) with different sizes and shapes of particles were used to mixed with linear low-density polyethylene (LLDPE) with powder particles, using the single-axis rotation machine for molding, mixing by dry blend method at 50:50 ratios, the rotational speed at 60 rpm, during molding the temperature change within the mold and the particles movement behavior was observed and recorded. The results show clearly that high-speed rotation can cause the sample to be separated as two-layered in all cases, the surface roughness both inside and outside has reduced, and the sample had higher an initial modulus when compared to low-speed rotation except in the case of PP with round shape and 3 times larger than LLDPE

Key Words: One-step rotational molding, Linear Low-Density Polyethylene, Polypropylene,

1. บทนำ

การขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน (Rotational molding or Roto-molding) เป็นกระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก เครื่องจักรมีราคาไม่แพง สามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงขนาดใหญ่ เช่น ถังเก็บน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย เรือคายัค ก่อ่งใส่น้ำแข็ง ของเล่นเด็กกลางแจ้ง และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น [1,2] ข้อดีของกระบวนการนี้มีหลายประการ เช่น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสมมาตรและไม่มีความเค้นตกค้าง, ชิ้นงานมีผิวเรียบ แม้พิมพ์ราคาไม่แพง และสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผนังหลายชั้นได้ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้มากกว่า 85% ผลิตจากพอลิเอทิลีน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low-Density Polyethylene, LLDPE) ในรูปของอนุภาคผง [3,4] พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติที่โดดเด่นหลายอย่าง เช่น สามารถลดขนาดเป็นผงได้ง่าย หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ได้ดี [5] มีความแข็งแรงสูง ยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อสารเคมี และทนต่อสภาพแวดล้อม เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ชนิดนี้มีข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้งานผลิตภัณฑ์ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและมีความดันได้เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิการโก่งตัวต่ำ (Low heat distortion) และมีสมบัติความแข็งเกร็งต่ำ (Low stiffness) ทำให้มีการคงรูปไม่ดี จากข้อเสียดังกล่าวทำให้นักวิจัยหลายคนสนใจที่จะศึกษาการปรับปรุง LLDPE เพื่อให้สมบัติดังกล่าวดีขึ้น โดยการใช้พอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) มาผสม เนื่องจากเป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดในโลก มีความหลากหลายในการขึ้นรูป มีราคาถูก และมีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากมาย เช่น ทนต่อแรงกระแทก ทนความร้อน มีความแข็งแรงสูง ทนต่อรอยขีดข่วน ทนต่อสารเคมี และที่สำคัญพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของพอลิโอเลฟิน เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน

วิธีการขึ้นรูปชิ้นงานผนังหลายชั้นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการเรียงลำดับการใส่วัสดุลงในแม่พิมพ์ ซึ่งมีหลายเทคนิคที่นิยมใช้ เช่น การใช้อุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่ากล่องแบบเลื่อน (drop-box) เทคนิคการใช้ถุงเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic bag) หรือแม้แต่เทคนิคการเปิดแม่พิมพ์ในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนเพื่อเติมวัสดุที่ต้องการให้เป็นผนังชั้นในลงแม่พิมพ์ [6-8] เทคนิคที่กล่าวมาข้างต้นแม้จะมีหลักการไม่ซับซ้อนแต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพง ต้องใช้พื้นที่บนแม่พิมพ์สำหรับการติดตั้ง และบางเทคนิคต้องหยุดการทำงานในระหว่างขึ้นรูปซึ่งทำให้เวลาในการ

ผลิตนานขึ้น อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9, 10, 11] อธิบายไว้ว่าการขึ้นรูปชิ้นงานผนังสองชั้นไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือขั้นตอนที่ซับซ้อน เพียงแค่พิจารณาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ เช่น จุดหลอมเหลว ลักษณะการไหลขนาด และรูปร่างของอนุภาคก็สามารถผลิตชิ้นงานผนังสองชั้นได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12] ที่แสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูป PP/LLDPE สองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขั้นตอนเดียวสามารถขึ้นรูปได้ โดยใช้อุณหภูมิ LLDPE ที่มีขนาดเล็กกว่า PP ประมาณ 3 เท่า, ใช้ PP ที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมและใช้ความเร็วรอบการหมุน 7 รอบต่อนาที ซึ่งความชัดเจนของการแยกชั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคหรือความสามารถในการแทรกตัวผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคไปยังพื้นผิวแม่พิมพ์ของอนุภาคขนาดเล็ก ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดประเด็นที่น่าสนใจอีกข้อคือ การเพิ่มความเร็วรอบการหมุนอาจทำให้รูปแบบการแยกอนุภาคในขณะที่เป็นของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้ชิ้นงานแยกเป็นสองชั้นได้

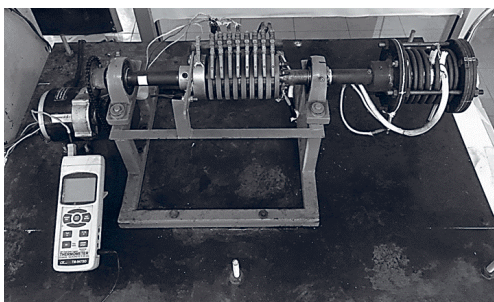
ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาการขึ้นรูป PP/LLDPE สองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขั้นตอนเดียวที่อัตราความเร็วรอบการหมุนสูง เพื่อช่วยเพิ่มทางเลือกสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผนังหลายชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่มีขั้นตอนที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

2. วัสดุและอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุสามชนิดคือ พอลิพรอพิลีนชนิดโฮโมพอลิเมอร์ (PPH) เกรด 1100NK จากบริษัท IRPC พอลิพรอพิลีนชนิดโคพอลิเมอร์ (PPC) เกรด EP549H จากบริษัท HMC และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เกรด M3204RU จากบริษัท SCG chemical มีอัตราการไหล 11, 11 และ 4 กรัม/10 นาทีตามลำดับ โดยก่อนการขึ้นรูปวัสดุทั้งหมดจะถูกผสมกับสีด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างขึ้นรูป; อัตราส่วนผสมสีเท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก โดย LLDPE จะถูกผสมด้วยสีเหลือง, PPH ผสมด้วยสีแดง และ PPC ผสมด้วยสีเขียวตามลำดับ หลังจากนั้นเพื่อควบคุมคุณภาพของวัสดุให้ใกล้เคียงกับเชิงการค้า LLDPE จะถูกลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบไม่ สำหรับ PP สองชนิดที่แตกต่างกันถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากต้องการให้อนุภาคภายหลังจากการลดขนาดมีลักษณะรูทรงที่ต่างกัน ซึ่ง PP ทั้งสองชนิดจะถูกลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบใบมีดและควบคุมขนาดอนุภาคโดยการกำหนดระยะเวลาและปริมาณของวัสดุที่ 300 กรัมต่อ 15 นาที

3. ขั้นตอนและวิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน

งานวิจัยนี้จะใช้เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว (The Axial powder flow apparatus) ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาโดยเฉพาะ ดังแสดงรูปที่ 1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น ณ เวลาจริงในระหว่างการขึ้นรูป โดยในการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะใช้ผงพลาสติกน้ำหนัก 48 กรัม เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ใช้อัตราส่วนการผสมระหว่าง PP และ LLDPE เท่ากับ 50:50 (%wt), ความเร็วในการหมุนแม่พิมพ์ที่ 60 รอบต่อนาที, และอุณหภูมิในการขึ้นรูปจะถูกตั้งไว้ที่ 190 °C เมื่ออุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์สูงถึง 190 °C ระบบจะหยุดให้ความร้อน แล้วเริ่มขั้นตอนการหล่อเย็นโดยแม่พิมพ์จะถูกหล่อเย็นจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิคงรูปของพอลิเมอร์ จากนั้นชิ้นงานจะถูกถอดออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 1 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว

4. การทดสอบลักษณะและสมบัติของชิ้นงาน

ความหนาแน่นมวลรวม (bulk density) และอัตราการไหลแห้ง (Dry flow rate) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1895-96, อัตราส่วน Hausner (Hausner ratio) ใช้ทดสอบเพื่ออธิบายความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคขณะเป็นของแข็ง, สมบัติการหลอมไหลของเหลว (Melt flow index) จะถูกทดสอบด้วยเครื่อง CEAST® Modular Melt Flow Indexer (รุ่น 8331) ตามมาตรฐาน ASTM D1238, ชุดกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลพร้อมด้วยแผ่นให้ความร้อนและซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ImageJ ถูกใช้เพื่อตรวจสอบอัตราหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ (Sintering rate), การทดสอบสมบัติทางความร้อนใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ NETZSCH (รุ่น DSC 200 F3) โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 30-200 °C อัตราการให้ความร้อนและอัตราการระบายความร้อนที่ 10 °C ต่อนาที และ 5 °C ต่อนาที ตามลำดับ การทดสอบนี้ใช้เพื่อระบุการแยกชั้นและความเข้ากันได้ของตัวอย่าง, กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลกำลังขยาย

600 เท่าทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ImageJ ในฟังก์ชันวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวเพื่อตรวจสอบความหยาบของผิวชิ้นงาน, และสมบัติเชิงกลจะถูกทดสอบในฟังก์ชันของการรับแรงอัด (Compression test)

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

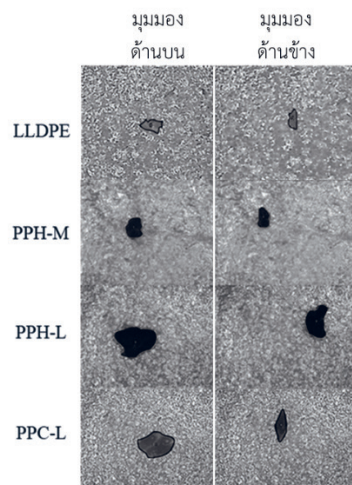
5.1 สมบัติและลักษณะของอนุภาคหลังการลดขนาด

ความหนาแน่นมวลรวมและอัตราการไหลแบบแห้งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการแพ้ตัวและการเคลื่อนที่ของอนุภาค ลักษณะรูปร่างของอนุภาคในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า LLDPE, PPH-L และ PPH-M มีรูปทรงอนุภาคสมมาตรและมีลักษณะค่อนข้างกลมกว่าในกรณีของ PPC-L ที่ไม่สมมาตรและมีลักษณะแบนซึ่งสอดคล้องกับค่าความกลมเฉลี่ยที่แสดงในตารางที่ 1 โดยจะเห็นได้ว่าอนุภาคที่มีความสมมาตรหรือค่อนข้างกลมจะมีค่าความกลมเฉลี่ยเข้าใกล้ 1 ทั้งมุมมองด้านบนและด้านล่าง สำหรับผลการทดสอบสมบัติของอนุภาคแสดงในตารางที่ 1 ในกรณีของ PPH-L มีค่าความหนาแน่นมวลรวมสูงสุดตามด้วย PPH-M, PPC-L และ LLDPE ตามลำดับ ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม PPH-L/LLDPE มีความหนาแน่นมวลรวมสูงกว่าและมีอัตราการไหลแบบแห้งเร็วกว่า PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า LLDPE ช่วยเพิ่มความหนาแน่นมวลรวมและอัตราการไหลแบบแห้งของ PP ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความหนาแน่นรวมของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคที่เหมาะสม [3] สำหรับอัตราการไหลแบบแห้งของอนุภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอนุภาค โดยการลดลงของอนุภาคที่มีรูปร่างผิดปกติ (ไม่กลม) จะทำให้อัตราการไหลแบบแห้งของอนุภาคเพิ่มขึ้นหรือไหลได้เร็วขึ้น

อัตราส่วน Hausner เป็นวิธีทดสอบที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพหรือความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านช่องว่าง ผลของการทดสอบที่แสดงในช่วง 1.12 ถึง 1.18 หมายถึงอนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างสูง อนุภาคที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างปานกลางจะแสดงผลอยู่ในช่วง 1.19 ถึง 1.25 และอนุภาคที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างต่ำจะแสดงผลในช่วง 1.35-1.45 [13] ผลการทดสอบในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าในกรณีของ PPH-L, PPH-M และ PPC-L อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างสูง ในขณะที่ LLDPE อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่าง

ปานกลาง ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม PPH-L/LLDPE อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างสูง ขณะที่กรณีของทั้ง PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างปานกลาง จาก

ผลทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า LLDPE ที่มีอนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของ PPH-L ได้ดีกว่า PPH-M และ PPC-L เนื่องจากอนุภาค PP-H มีขนาดใหญ่กว่า PPH-M และมีรูปทรงค่อนข้างกลมมากกว่า PPC-L



รูปที่ 2. ลักษณะรูปร่างอนุภาคหลังการลดขนาด

ตารางที่ 1 สมบัติของอนุภาค

วัสดุ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	ค่าเฉลี่ยความกลมอนุภาค		ความหนาแน่นมวลรวม (กรัม/ลบ. ซม.)	อัตราการใช้ไฮดรอลิก (วินาที)	อัตรา Hausner	ดัชนีไหล (กรัม/10 นาที) ¹
		มุมมองด้านบน	มุมมองด้านข้าง				
LLDPE	368	0.67	0.53	0.33	9.49	1.19	4.10
PPH-M	758	0.66	0.66	0.35	11.97	1.16	5.15
PPH-L	1,421	0.75	0.73	0.38	10.78	1.14	5.08
PPC-L	1,471	0.73	0.56	0.34	21.30	1.16	5.91
PPH-M/LLDPE	-	-	-	0.38	10.91	1.19	5.72
PPH-L/LLDPE	-	-	-	0.39	10.70	1.17	5.41
PPC-L/LLDPE	-	-	-	0.37	10.88	1.22	5.64

¹ ทดสอบภายหลังจากการผสมสีและใช้สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 190°C.

5.2 ผลทดสอบค่าดัชนีไหล

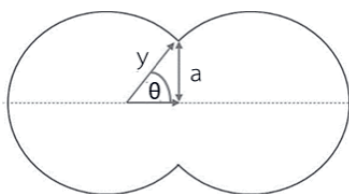
การทดสอบดัชนีไหลในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมบัติการไหลของวัสดุหลังจากการผสมสี โดยวัสดุทั้งหมดจะถูกทดสอบที่อุณหภูมิเดียวกัน อ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ซึ่ง

ค่าดัชนีไหลก่อนการผสมสีของ LLDPE มีค่าเท่ากับ 4 กรัม/10 นาที PPH และ PPC มีค่าเท่ากับ 5 กรัม/10 นาที เมื่อนำผลที่ได้ก่อนและหลังผสมสีมาเปรียบเทียบพบว่า LLDPE หลังจากผ่านการผสมสีมีสมบัติการไหลไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ PPH-L, PPH-M และ PPC-L หลังจาก

การผสมมีค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนเชิงกลและปฏิกิริยาเทอร์โมออกซิไดซ์ในขั้นตอนการขึ้นรูป โดยทั่วไปแล้วสมบัติการหลอมไหลของพอลิเมอร์ที่ผ่านการให้ความร้อนมากกว่าหนึ่งครั้งจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการขาด หรือเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล เป็นสาเหตุให้สมบัติการไหลของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลง [14-17] ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม PPH-L/LLDPE, PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE พบว่าค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LLDPE ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PP ช่วยปรับปรุงสมบัติการหลอมไหลของ LLDPE

5.3 ผลทดสอบอัตราการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค

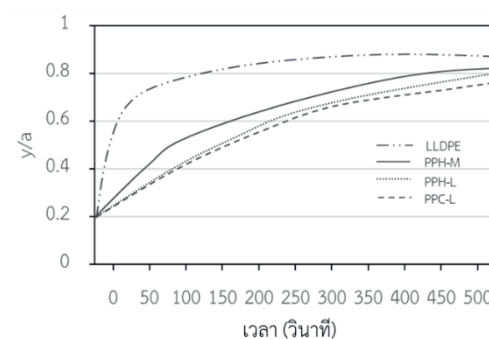
การทดสอบนี้มีบทบาทสำคัญในการคาดคะเนระยะเวลาการให้ความร้อนในการขึ้นรูปและการควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน โดยเครื่องทดสอบประกอบด้วยกล้องดิจิทัลที่มีกำลังขยายสูงสุด 600 เท่า พร้อมด้วยแผ่นความร้อนและเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ การทดลองจะใช้อนุภาคสองอนุภาคที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกันวางไว้บนแผ่นความร้อนโดยให้หน้าสัมผัสของอนุภาคอยู่ชิดกัน จากนั้นให้ความร้อนอย่างคงที่และเมื่อแผ่นความร้อนทำงาน กล้องไม่โครสโคปแบบดิจิทัลและเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิจะเริ่มทำงานพร้อมกัน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบจะถูกบันทึกวิดีโอและข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่ออัตราการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค โดยการหาอัตราส่วนระหว่าง y/a ; โดยที่ y คือความยาวของจุดเชื่อมต่อระหว่างสองอนุภาคและ a คือรัศมีเฉลี่ยของอนุภาค ซึ่งหากอัตราส่วนระหว่าง y/a เข้าใกล้ 1 หมายความว่าอนุภาคทั้งสองรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ [18] (ดังแสดงในรูปที่ 3)



รูปที่ 3 ลักษณะการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค

ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า LLDPE ที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดและมีจุดหลอมเหลวต่ำจะมีอัตราการหลอมเป็นเนื้อเดียวกันสูงที่สุดตามด้วย PP ที่มี

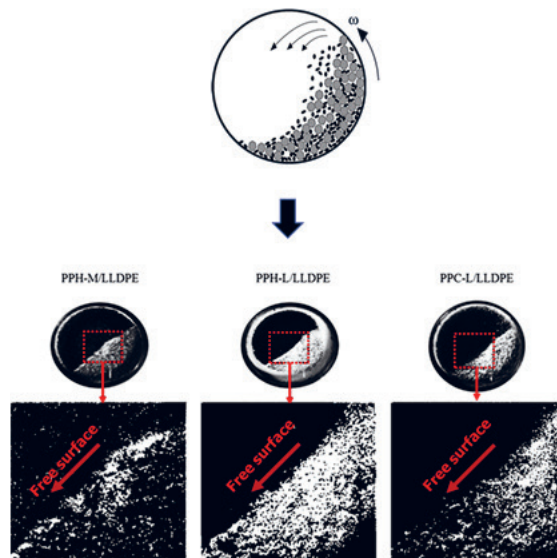
อนุภาคขนาดเล็กและ PP ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ตามลำดับ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นชัดเจนว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการทดสอบในงานวิจัยนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อการหลอมรวมกันเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วยังมีตัวแปรอีกมากที่มีผลต่อการทดสอบ เช่น ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวหรือค่าความหนืดและความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว เป็นต้น [4,19]



รูปที่ 4 อัตราการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค

5.4 รูปแบบการแยกตัวของอนุภาคที่ความเร็วรอบในการหมุนสูง

ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคของ PPH-L/LLDPE, PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE ที่ความเร็วรอบการหมุนสูงพบว่ามีรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่อนุภาค LLDPE ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ส่วนใหญ่จะปรากฏที่บริเวณผิวการไหล (Free surface) เป็นผลมาจากการหมุนด้วยความเร็วรอบสูงทำให้อนุภาคขนาดเล็กสามารถเอาชนะแรงเสียดทานและถูกเหวี่ยงม้วนขึ้นไปอยู่บริเวณผิวการไหล ซึ่งจากรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นทำให้สามารถคาดเดาได้ว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานผนังสองชั้นได้

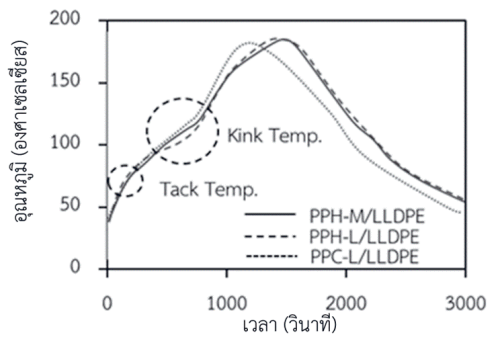


รูปที่ 5 รูปแบบการแยกตัวของอนุภาคที่ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที

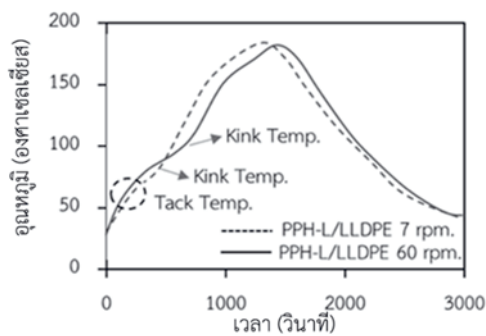
5.5 รูปแบบอัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์

อัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 6, ในกรณีของ PPH-L/LLDPE, PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE พบว่ามีอุณหภูมิที่อนุภาคเริ่มเคลือบผิวแม่พิมพ์ (Tack temperature) และอุณหภูมิที่อนุภาคเคลือบแม่พิมพ์สมบูรณ์ (Kink temperature) ใกล้เคียงกันประมาณ 50 °C และ 110 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ ลักษณะรูปแบบของกราฟอัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าทุกกรณีของมีรูปแบบคล้ายกันทั้ง 3 กรณี โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ความเร็วรอบในการหมุนสูงจะทำให้รูปแบบการแยกตัวของอนุภาคในขณะที่เป็นของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลง อนุภาค LLDPE ที่มีขนาดเล็กถูกแรงเหวี่ยงทำให้สามารถเอาชนะแรงเสียดทานและแทรกตัวไปยังผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย. การก่อตัวของชั้นความหนาพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มต้นเมื่อให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ อนุภาค LLDPE ที่มีขนาดเล็ก จุดหลอมเหลวต่ำ และอยู่ใกล้กับผนังแม่พิมพ์จะถูกหลอมละลายเคลือบบนพื้นผิวแม่พิมพ์ได้ก่อน ในขณะที่อนุภาค PP ที่มีขนาดใหญ่ จุดหลอมเหลวสูงและอยู่ห่างผนังแม่พิมพ์จะยังไม่ละลายและส่วนใหญ่ยังคงหมุนอยู่ แต่ก็ยังมีอนุภาคบางส่วนถูกยึดตรึงไว้โดย LLDPE หลอมเหลว โดยความหนาของ ชั้น LLDPE หลอมเหลวที่ก่อตัวเป็นผนังชั้นนอกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและความร้อนจะถ่ายเทเข้าไปยังภายในแม่พิมพ์อย่างช้าๆ จนกระทั่งอนุภาค PP ที่กลิ้งอยู่ได้รับความร้อนเพียงพอ จะค่อยๆ

หลอมละลายและเคลือบบนชั้น LLDPE หลอมเหลวกลายเป็นผนังชั้นใน. การพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบการหมุนที่มีต่ออัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์จะใช้กรณีของ PPH-L/LLDPE ในการเปรียบเทียบเนื่องจากงานวิจัย [12] ก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าในกรณีของ PPH-L/LLDPE ที่ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที สามารถขึ้นรูปเป็นผนังสองชั้นได้อย่างชัดเจน ผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 7 พบว่าการหมุนด้วยความเร็วรอบสูงจะมีอัตราความร้อนภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากอนุภาคจะสัมผัสกับพื้นผิวของแม่พิมพ์ในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ไปยังอนุภาคและอนุภาคต่ออนุภาคข้างล่างส่งผลให้การสร้างชั้นความหนาของพอลิเมอร์หลอมเหลวข้างล่างด้วยและด้วยเหตุนี้ทำให้การหมุนด้วยความเร็วรอบสูงจะมีจุดอุณหภูมิที่อนุภาคเกาะแม่พิมพ์สมบูรณ์สูงกว่าการหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ



รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที



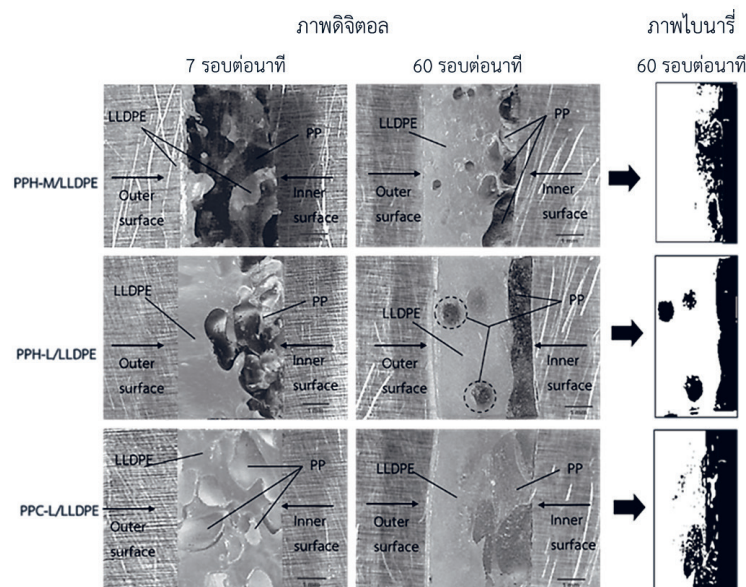
รูปที่ 7 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่ความเร็วในการหมุน 7 และ 60 รอบต่อนาที

5.6 ผลการตรวจสอบการแยกชั้น

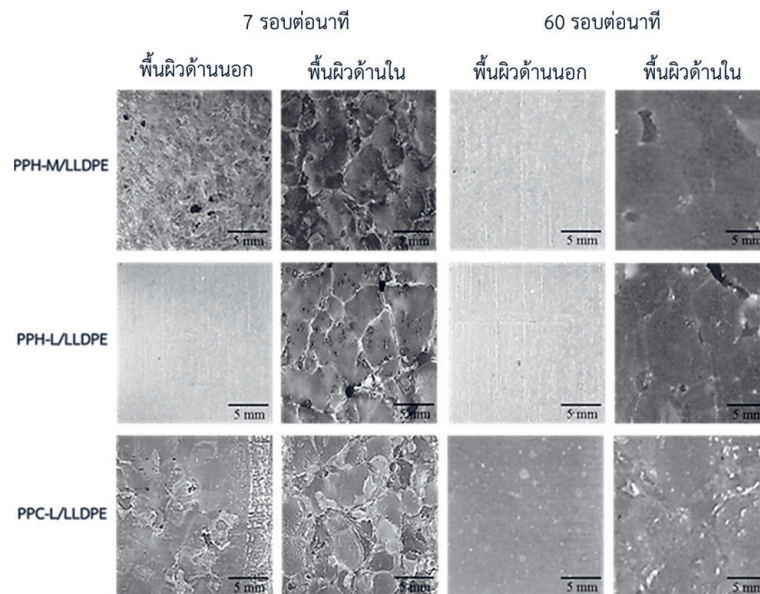
การตรวจสอบการแยกชั้นของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลพบว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้น ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปได้มีการแยกเป็นสองชั้นชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 การแยกชั้นที่ชัดเจนเกิดจากอนุภาค LLDPE ที่มีขนาดเล็กสามารถเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคทำให้สามารถแทรกตัวไปยังผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย

5.7 ผลการตรวจสอบความเรียบของผิวชิ้นงาน

ในการตรวจสอบนี้ ตัวอย่างทดสอบจะถูกตัดจากจุดกึ่งกลางของชิ้นงานทรงกระบอกและบันทึกภาพพื้นผิวด้านในและด้านนอกด้วยกล้องดิจิทัลกำลังขยายสูง ภาพที่บันทึกได้แสดงในรูปที่ 9 หลังจากนั้นใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ภาพ ImageJ ในฟังก์ชัน 'surf' เพื่อแสดงค่าเฉลี่ยของความขรุขระพื้นผิว และผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2 พบว่าชิ้นงานทั้งผิวด้านในและผิวด้านนอกมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้เร็ว



รูปที่ 8 ภาพตัดขวางชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม



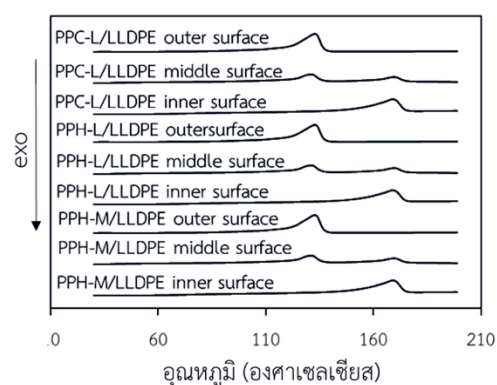
รูปที่ 9 ความขรุขระของผิวชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่ความเร็วในการหมุน 7 และ 60 รอบต่อนาที

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิว

วัสดุ	ค่าเฉลี่ยความขรุขระ (ไมครอน)			
	ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที		ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที	
	พื้นผิวด้านใน	พื้นผิวด้านนอก	พื้นผิวด้านใน	พื้นผิวด้านนอก
PPH-M/LLDPE	19.33	16.10	12.13	5.20
PPH-L/LLDPE	23.41	11.50	13.91	6.63
PPC-L/LLDPE	25.01	14.04	19.11	6.69

5.8 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้และการกระจายตัวของพอลิเมอร์บนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ ตัวอย่างชิ้นทดสอบจะถูกตัดออกจากชิ้นงานทรงกระบอกในตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง จากนั้นแยกตัวอย่างชิ้นทดสอบออกเป็นพื้นผิวด้านใน (inner surface) กลาง (middle surface) และด้านนอก (Outer surface) ซึ่งบริเวณพื้นผิวตรงกลางใช้สำหรับตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์



รูปที่ 10 DSC เทอร์โมแกรมพอลิเมอร์ผสม

ผลทดสอบแสดงในรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมพบว่า ทุกกรณีมีจุดอุณหภูมิหลอมเหลวสองตำแหน่งซึ่งหมายความว่า PP และ LLDPE ไม่รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ตำแหน่งแรกที่

แสดงช่วงอุณหภูมิต่ำคือ LLDPE และตำแหน่งสองที่แสดงช่วงอุณหภูมิสูงคือ PP การกระจายตัวของพอลิเมอร์บนพื้นผิวทั้งด้านในและด้านนอกชิ้นงานถูกใช้เพื่อพิจารณาการแยกเป็นสองชั้นของชิ้นงาน ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าทุกกรณีของพอลิเมอร์ผสมแสดงจุดอุณหภูมิหลอมเหลวที่พื้นผิวด้านในและด้านนอก ด้านละ 1 ตำแหน่งซึ่งหมายความว่า PP และ LLDPE มีการแยกเป็นสองชั้น โดยที่ PP เป็นพื้นผิวด้านในและ LLDPE เป็นพื้นผิวด้านนอก

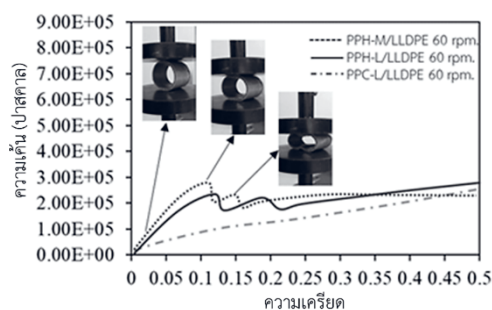
5.9 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานนี้จะใช้การทดสอบแบบอัด เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ มีลักษณะรูปทรงเป็นกระบอกกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 60 มม. ความยาว 50 มม. และความหนา 3 มม. ใช้ความเร็วในการอัด 10 มม./นาทีและใช้โหลด 1 กิโลนิวตัน การทดสอบนี้ส่วนมากจะใช้ค่าโมดูลัสเริ่มต้นในการรายงานผลการทดสอบ[20] ผลของโมดูลัสแรงอัดแสดงในตารางที่ 3 และลักษณะการเสียรูปแสดงในรูปที่ 11 พบว่าโมดูลัสแรงอัดของ PPH-M/LLDPE มีค่าสูงสุดตามด้วย PPH-L/LLDPE และ PPC-L/LLDPE ที่ 13.77, 11.94 และ 5.13 ปาสคาล ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแสดงให้เห็นว่ากรณีของ PPC-L/LLDPE มีลักษณะการเสียรูปแบบเหนียว

ในขณะที่ ทั้ง PPH-L/LLDPE และ PPH-M/LLDPE แสดงลักษณะการเสียรูปแบบผสมทั้งเปราะและเหนียว ซึ่งจากการสังเกตพบว่าการเสียรูปในช่วงแรกเกิดจาก PPH ที่เป็นผนังชั้นในเกิดรอยร้าวขนาดเล็กและเมื่อรอยร้าวดังกล่าวขยายตัวชิ้นงานจะรับแรงอัดได้น้อยลงแต่ก็ยังสามารถรับแรงอัดได้อย่างต่อเนื่องเพราะผนังชั้นนอกที่เป็น LLDPE ที่มีความยืดหยุ่นสูงจะช่วยคงรูปไม่ให้ชิ้นงานแตกหักในทันทีทันใด นอกจากนี้จากการสังเกตตำแหน่งของการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กที่ปรากฏบนชิ้นงานพบว่าในกรณีของ PPH-M/LLDPE และ PPH-L/LLDPE รอยร้าวจะเริ่มจากบริเวณส่วนที่สัมผัสกับแผ่นกดด้านล่างและด้านบนของเครื่องทดสอบก่อน หลังจากนั้นจะเกิดบริเวณส่วนด้านข้างในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงอัดตามลำดับ ด้วยเหตุนี้กราฟจึงแสดงลักษณะการเสียรูปมากกว่าหนึ่งครั้ง เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความเร็วในการหมุนพบว่าโมดูลัสแรงอัดทั้ง PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE เพิ่มขึ้นตามความเร็วการหมุนที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นผลมาจากการแยกเป็นสองชั้นของชิ้นงาน ในขณะที่กรณีของ PPH-L/LLDPE มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความเร็วรอบในการหมุนเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการกระจายความหนาของพอลิเมอร์ที่ก่อตัวเป็นผนังชั้นนอกและผนังชั้นในของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงอัด

วัสดุ	ค่าความต้านทานแรงอัด	
	ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที
PPH-M/LLDPE	7.34 ±1.35	14.37 ±1.16
PPH-L/LLDPE	13.91 ±1.41	10.91 ±1.32
PPC-L/LLDPE	3.03 ±0.81	6.03 ±1.22



รูปที่ 11 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดพอลิเมอร์ผสมที่ความเร็วในการหมุนที่ 60 รอบต่อนาที

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ความเร็วในการหมุนที่ 60 รอบต่อนาทีสามารถทำให้ชิ้นงาน PP/LLDPE เกิดการแยกชั้นได้ในทุกกรณี โดยที่ประสิทธิภาพหรือความชัดเจนในการแยกชั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถของ LLDPE ที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค PP โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค LLDPE คือรูปร่างและขนาดของอนุภาค PP โดยอนุภาค PP ที่มีขนาดใหญ่กว่า LLDPE ประมาณ 3 เท่าและมีรูปร่างค่อนข้างกลมจะทำให้อนุภาค LLDPE เคลื่อนผ่านได้ง่ายเพราะมีแรงเสียดทานน้อยกว่า PP ที่มีรูปร่างไม่กลมหรือมีรูปร่างกลมแต่ขนาดเล็ก นอกจากนี้ความเร็วในการหมุนที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ผนังชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้นและทำให้ค่าโมดูลัสเริ่มต้นของชิ้นงานสูงขึ้นอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มความเร็วในการหมุนจะทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานผนังสองชั้นได้ แต่ควรจำไว้ว่าการเพิ่มความเร็วในการหมุนอาจจะทำให้รูปแบบการแยกอนุภาคไม่เสถียรส่งผลให้สัดส่วนของเนื้อพอลิเมอร์ที่ก่อตัวเป็นผนังชั้นนอกและผนังชั้นในมีความแปรปรวน ซึ่งอาจทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงดังในกรณีของ PPH-L/LLDPE ที่มีค่าโมดูลัสเริ่มต้นลดลงเมื่อเทียบกับความเร็วในการหมุนต่ำ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยท้าทายไทย กลุ่มเรื่องนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่ประจำปี 2560 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ ABCRMUTT60B06

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Iwakura K, Ohta Y, Chen CH, White J. Experimental investigation of rotational molding and the characterization of rotationally molded polyethylene-parts. International Polymer Processing. 1989; 4(3):163-71.
- [2] Qin L, Ding Y-M, Zhu G-C, Yu H-C, Yang W-M. Heat flow analysis and efficiency optimization of rotational molding equipment for large plastic products. International Polymer Processing. 2015;30(2):194-201.
- [3] Crawford RJ, Crawford RJ, Throne JL. Rotational molding technology: William Andrew; 2001.
- [4] Kulikov O, Hornung K, Wagner M. Novel processing additives for rotational molding of polyethylene. International Polymer Processing. 2009;24(5):452-62.
- [5] Ramkumar P, Kulkarni D, Chaudhari V. Parametric and mechanical characterization of linear low density polyethylene (LLDPE) using rotational moulding technology. Sadhana. 2014;39(3):625-35.
- [6] Liu SJ, Yang CH. Rotational molding of two-layered polyethylene foams. Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute. 2001;20(2):108-15.
- [7] Barhoumi N, Lamnawar K, Maazouz A, Jaziri M, Abdelhedi R. Reactive rotational molding process of PP/ PA6 bilayer systems: experimental investigations. International Journal of Material Forming. 2008;1(1):671-4.
- [8] Löhner M, Drummer D. Characterization of layer built- up and inter- layer boundaries in rotational molding of multi-material parts in dependency of

- the filling strategy. *Journal of Polymer Engineering*. 2017;37(4):411-20.
- [9] Pop- Iliev R, Rizvi GM, Park CB. The importance of timely polymer sintering while processing polypropylene foams in rotational molding. *Polymer Engineering & Science*. 2003;43(1): 40-54.
- [10] Greco A, Maffezzoli A. Powder- shape analysis and sintering behavior of high- density polyethylene powders for rotational molding. *Journal of applied polymer science*. 2004;92(1): 449-60.
- [11] Olinek J, Anand C, Bellehumeur C. Experimental study on the flow and deposition of powder particles in rotational molding. *Polymer Engineering & Science*. 2005;45(1):62-73.
- [12] Jansri E, Narongchai O. Polypropylene / polyethylene two-layered by one-step rotational molding. *Journal of Polymer Engineering*. 2018;38(7):685-94.
- [13] Spence A, Crawford R. The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products. *Polymer Engineering & Science*. 1996;36(7):993-1009.
- [14] Chaudhary BI, Takacs E, Vlachopoulos J. Processing enhancers for rotational molding of polyethylene. *Polymer Engineering & Science*. 2001;41(10): 1731-42.
- [15] Da Costa HM, Ramos VD, De Oliveira MG. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*. 2007;26(5):676-84.
- [16] Da Costa, H. M, Ramos, V. D, De Oliveira, M. G. (2007). Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*, 26(5), 676-84.
- [17] Jin H, Gonzalez- Gutierrez J, Oblak P, Zupančič B, Emri I. The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene. *Polymer degradation and stability*. 2012;97(11):2262-72.
- [18] Chaudhary BI, Takacs E, Vlachopoulos J. Processing enhancers for rotational molding of polyethylene. *Polymer Engineering & Science*. 2001;41(10):1731-42.
- [19] Sharma T, Mahanwar P, Bambole V. Study of modified polypropylene for rotational moulding applications. *International Journal of Plastics Technology*. 2009; 13(1):83.
- [20] Rosato DV, Schott NR, Rosato MG. *Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook: Springer Science & Business Media; 2001.*