

ความเป็นไปได้ในการใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

Potential use of Recycled Plastic Bags in Rotational Molding Process

จักรภัทร ปรีดาวัฒน์¹, สุชาลิณี มหุทธสมณตรี¹, เอกนัย จันทร์ศรี² และ ณรงค์ชัย โอเจริญ^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก, คลองหลวง ปทุมธานี 12110

²ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์, คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์, องครักษ์ นครนายก 26120

Jakkaphat Preedawat,¹ Suchaline Mathurosemontria¹, Ektinai Jansri² and Narongchai O-Charoen^{1,*}

¹ Department of Materials and Metallurgical Engineer, Faculty of Engineer, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong Hok, Khlong Luang, 12110, Thailand

² Division of Polymer Materials Technology, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok, 26120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: narongchai.o@en.rmutt.ac.th

Received: Jul 11, 2022; Revised: Sep 21, 2022; Accepted: Sep 23, 2022

บทคัดย่อ

ถุงพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้งานในชีวิตประจำวัน ส่งผลให้เกิดปริมาณขยะจากถุงพลาสติกหลังการใช้งานเป็นจำนวนมากขึ้นในทุกๆปี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับมาขึ้นรูปอีกครั้งด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน รวมไปถึงการศึกษาสมบัติด้านต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้ โดยใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในเขตพื้นที่ปทุมธานีซึ่งพบว่าส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene; LDPE) เปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน ภายในงานวิจัยมีการเตรียมวัสดุสำหรับการขึ้นรูปต้องมีการลดขนาดถุงพลาสติกให้อยู่ในรูปอนุภาคผงด้วยเครื่องฟัลเวอร์ไรซ์ (Pulverizer) พร้อมทั้งวัดขนาดอนุภาค ค่าความกลม (Circularity) ด้วยเทคนิคทางสัณฐานวิทยา ความสามารถในการไหลแบบแห้ง (Pourability) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ของอนุภาคและทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus) ที่รอบการหมุน 7 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 190°C พร้อมบันทึกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงภายในแม่พิมพ์ และทดสอบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการวัดการกระจายความหนาของชิ้นงาน การทนต่อการเจาะทะลุ การทนต่อแรงดึงและค่าความแข็งที่ผิว โดยพบว่าขนาดอนุภาคผงพลาสติกที่เตรียมได้จากถุงพลาสติกมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าและค่าความกลมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคผงพลาสติกชนิด LLDPE ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน ส่งผลให้การกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยอนุภาคผงจากถุงพลาสติกด้อยกว่าและมีความทนต่อการเจาะทะลุ การทนต่อแรงดึงและความแข็งที่ผิวลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ผงพลาสติกชนิด LLDPE

คำสำคัญ: ฟิล์มพลาสติก, พอลิเอทิลีน, การรีไซเคิล, กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

Abstract

Plastic bags are one of the most widely used products because it can provide convenience to users in everyday life. As a result, the amount of waste from plastic bags after use increases every year. The objective of this research is to study the preparation of used plastic bags to be in a suitable form for recycling by the rotational molding process. Including the study of various properties of molded products by using plastic bags that have been used in Pathum-Thani area, most of them are Low Density Polyethylene (LDPE) compared to Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) used in the rotational molding industry. In this research, the material for molding must be prepared by reducing the size of plastic bags to the powder particles by a Pulverizer, as well as measuring the particle size, roundness (Circularity) by morphological techniques. The pourability bulk density and melt flow index of the particles were tested and molded by an Axial Powder Flow Apparatus with the rotation speed at 7 rpm, temperature 190°C and recorded the behavior of changes within the mold and test the molded specimen by measuring the thickness distribution of the specimen, puncture resistance, tensile strength and surface hardness. It was found that the particle size of plastic powder prepared from plastic bags was larger and less roundness compared to the particle size of LLDPE powder used in the rotational molding industry. As a result, the thickness distribution of the workpieces produced with powder particles from plastic bags is inferior and the penetration resistance, tensile strength and surface hardness are reduced compared to using LLDPE.

Keywords: Plastic film, Polyethylene, Recycle, Rotational Molding

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานเป็นจำนวนมากในแต่ละวัน และพบว่าถุงพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานอย่างมากชนิดหนึ่ง แต่มีปริมาณการนำกลับมารีไซเคิลน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความบางและค่อนข้างอ่อนตัว ทำให้การเตรียมวัสดุที่ผ่านการใช้งานแล้วให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำกลับมาขึ้นรูปใหม่อีกครั้งค่อนข้างยาก ทำให้ถุงพลาสติกถูกนำไปทิ้งในรูปของขยะเป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นสาเหตุให้ถุงพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ในขณะที่กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน (Rotational Molding) ใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเป็นวัตถุดิบหลัก นิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กลางขนาด

ใหญ่ เช่น ถังบรรจุน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย ถังขยะ ฯลฯ ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุค่อนข้างมากในการผลิต[1] และมากกว่า 90% ของผลิตภัณฑ์ในการผลิตถุงพลาสติกเป็นส่วนใหญ่จะใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนเป็นหลัก งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะนำวัสดุจากถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วและถูกทิ้งในรูปของขยะมูลฝอยกลับมาใช้ในการขึ้นรูป

ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการนำถุงมาตัดให้อยู่ในรูปแบบฟิล์ม จึงขอใช้คำว่าฟิล์มแทนคำว่าถุง อีกทั้งช่วยงานวิจัยนี้จะช่วยให้ผู้ผลิตภายในประเทศไทยสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ และยังช่วยลดปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อมของปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นในพื้นที่จังหวัดปทุมธานีได้อีกทางหนึ่งด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุในการทดลอง

ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากแต่ละอำเภอของจังหวัดปทุมธานีซึ่งได้แก่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอลองหลวง อำเภอหนองเสือ อำเภอลาดหลุมแก้ว อำเภอลำลูกกา อำเภอสามโคก

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) เกรดทางค้า LL9641UP จากบริษัท PTT Global Chemical

2.2 การเตรียมอนุภาคผงฟิล์ม

การเตรียมอนุภาคผงฟิล์มที่ผ่านการใช้งานแล้ว (r-Film) เริ่มจากทำความสะอาดถุงด้วยน้ำและนำมาผึ่งลมให้แห้งในที่ร่ม เนื่องจากการนำพลาสติกมาตากแดดจะทำให้

พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ จากนั้นตัดแต่งถุงให้อยู่ในรูปของฟิล์มและลดขนาดฟิล์มให้อยู่ในรูปของอนุภาคผงเพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [1] โดยการนำไปอัดเป็นแผ่นขนาด 20×20 เซนติเมตรหนา 6 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ในแต่ละครั้งจะใช้ฟิล์ม 70–80 กรัม ใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 150 บาร์ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และหล่อเย็นเป็นระยะเวลา 6 นาที จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบไม้อัดพลาสติกเป็นเวลา 5 นาที จะได้เศษพลาสติกขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร แล้วจึงนำมาบดด้วยเครื่องฟัลเวอร์ไรเซอร์ (Pulverizer) แบบค้อนเหวี่ยง ครั้งละ 20 กิโลกรัม เวลา 15 นาที ทำให้ได้อนุภาคผง r-Film ที่มีขนาดเล็กที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแบบหมุน

2.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว (The Axial Powder Flow Apparatus) ดังรูปที่ 1 โดยเครื่องนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมภายในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร ใช้สภาวะการขึ้นรูปที่หมุนด้วยความเร็ว 7 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 190°C ให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์ ใช้วัสดุตัวอย่างครั้งละ 50 กรัม ใช้เวลาขึ้นรูปทั้งกระบวนการประมาณ 50 นาที ในระหว่างการเตรียมชิ้นงานได้มีการบันทึกภาพบริเวณฝาแม่พิมพ์และบันทึกอุณหภูมิตลอดการขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว
(The Axial Powder Flow Apparatus)

3. ผลการทดลอง

3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผงพลาสติก

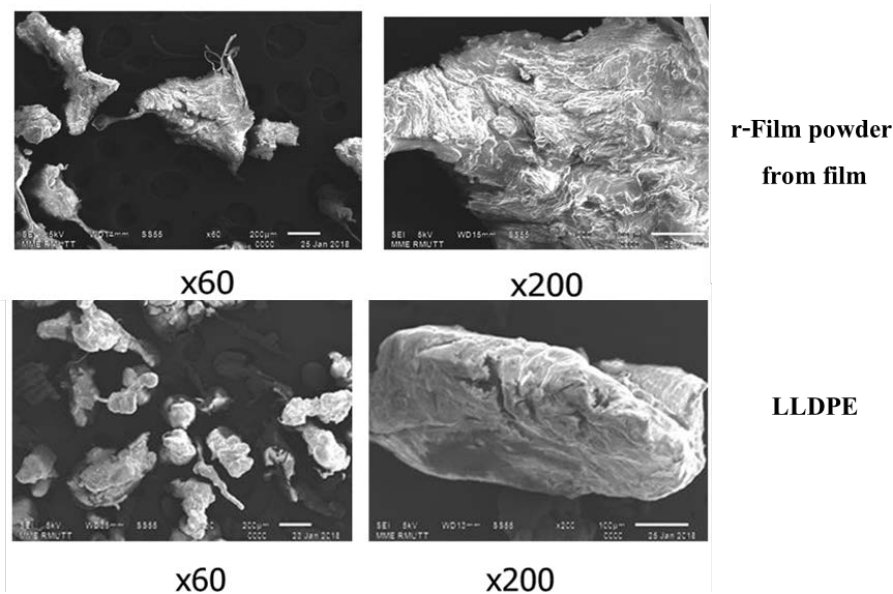
ผลการตรวจสอบลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคป และผลการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคผง r-Film จำนวน 200 อนุภาค ด้วยโปรแกรม ImageJ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคผง r-film ที่เตรียมได้มีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่า LLDPE ที่ขนาด 400 และ 250 ไมโครเมตร ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 1 และค่าความกลม (Circularity) ของอนุภาคผง r-Film และ LLDPE เท่ากับ 0.58 และ 0.68 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่สมมาตรและกลมน้อยกว่า

ตารางที่ 1 ผลการวัดขนาดและค่าความกลมของอนุภาค

Material (Powder form)	Particle Size (μ)	Circularity
LLDPE	250 ± 70.94	0.68 ± 0.09
r-Film	400 ± 131.2	0.58 ± 0.12

จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ชัดว่าอนุภาคผง r-Film มีขนาดใหญ่กว่า LLDPE และอนุภาคผง r-Film มีลักษณะกลมน้อยกว่า LLDPE ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีส่วนที่เกิดจากการยึดตัวเมื่อถูกตัดเฉือนเป็นลักษณะเหมือนหาง (Tail) ที่เห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ LLDPE ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคป อย่างชัดเจนและส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และการไหลแบบแห้ง (Pour ability)

โดยการทดสอบความหนาแน่นรวม ตามมาตรฐาน ASTM D1895 พบว่าอนุภาคผง r-Film ผ่านการลดขนาดมีค่า 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ LLDPE มีค่าเท่ากับ 0.39 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นรวมของอนุภาคผง r-Film น้อยกว่า LLDPE เกิดจากอนุภาคผง r-Film ที่เตรียมมีขนาดใหญ่กว่าและมีส่วนของหางมากกว่า (ค่าความกลมต่ำกว่า) ทำให้มีช่องว่างอนุภาคมากกว่า [2–3] นอกจากนี้ส่วนของหางยังขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคทำให้อัตราการไหลลักษณะเป็นของแข็งต่ำหรือไม่เกิดการไหล

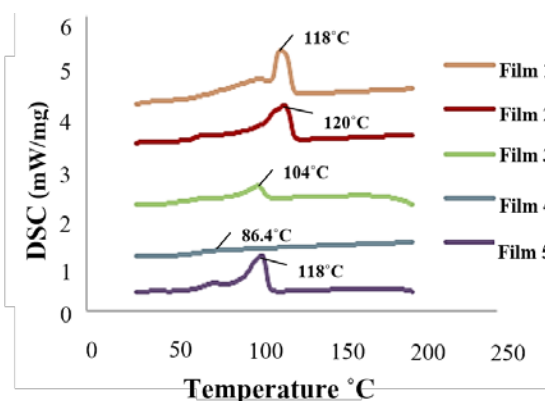


รูปที่ 2 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 60 เท่า และ 200 เท่าจากกล้อง SEM ของอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

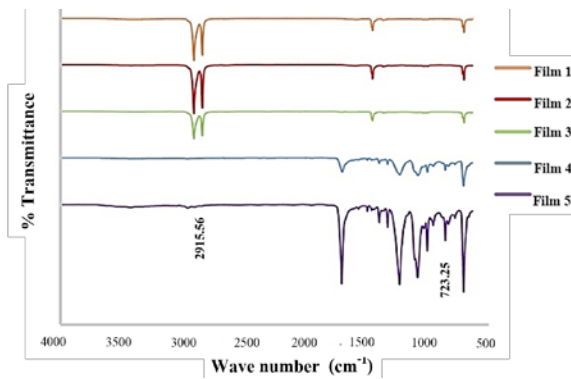
3.2 การทดสอบลักษณะเฉพาะของฟิล์มพลาสติก

จากลักษณะของถุงพลาสติกที่เก็บรวบรวมมาพบว่า มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันอยู่ 5 ตัวอย่าง จึงทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ซึ่งผลที่ได้พบว่าจากกราฟความร้อนพบว่า มีจุดหลอมเหลวที่ในฟิล์มชนิดที่ 1–3 มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 118, 120 และ 104 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับพลาสติกในตระกูลพอลิเอทิลีน (PE) ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 100–130 โดยฟิล์มชนิดที่ 3 มีค่าจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ซึ่งมีค่าจุดหลอมเหลวที่ 100–115 องศาเซลเซียส ส่วนฟิล์มชนิดที่ 1 และ 2 ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ที่มีค่าจุดหลอมเหลวที่ 115–130 องศาเซลเซียส ส่วนฟิล์มชนิดที่ 4 พบค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่ 86.4 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ที่ 85–125 องศาเซลเซียส ในส่วนของฟิล์มชนิดที่ 5 สันนิษฐานว่าจะเป็นพลาสติกผสม [4] จึงได้นำตัวอย่าง 5 ชิ้นมาทดสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแบบฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป (FTIR) ซึ่งให้ผลแสดง

ดังรูปที่ 4 พบว่าฟิล์มชนิดที่ 1–3 แสดงแถบการดูดกลืนรังสีเปอร่เช็นต์ดูดกลืนมากที่สุดที่ช่วงคลื่นที่ 2915.96 cm^{-1} , 2916.11 cm^{-1} และ 2915.97 cm^{-1} ซึ่งมีเลขคลื่นใกล้เคียงกับสารประกอบ C-H ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก DSC ที่สันนิษฐานเป็นพอลิเอทิลีน ฟิล์มชนิดที่ 4 มีช่วงคลื่นที่ 723.12 cm^{-1} และ 723.25 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นใกล้เคียงกับสารประกอบแอโรมาติก (Aromatic) สอดคล้องผลจาก DSC จึงสันนิษฐานเป็นพอลิสไตรีนที่ ส่วนฟิล์มชนิดที่ 5 พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันอื่นประกอบอยู่ด้วยจึงสันนิษฐานว่าเป็นพลาสติกผสมหรือฟิล์มแบบมัลติเลเยอร์ [5]



รูปที่ 3 กราฟผลการทดสอบฟิล์มทั้ง 5 ชนิดด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC)



รูปที่ 4 กราฟผลการทดสอบฟิล์มทั้ง 5 ชนิด ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแบบ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

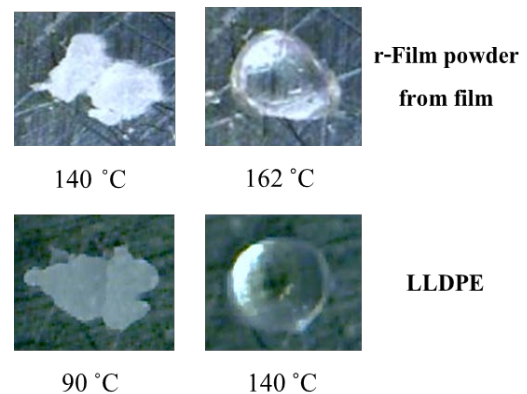
3.3 การทดสอบสมบัติการไหลแบบหลอมเหลว

การทดสอบอัตราการไหลเพื่อทราบถึงค่าดัชนีการไหล (MFI) ซึ่งมีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยใช้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ผลการทดลองพบว่าอนุภาค r-Film มีค่าดัชนีการไหลที่ 1.37 กรัมต่อ 10 นาที และ LLDPE อยู่ที่ 4 กรัมต่อ 10 นาที ซึ่งอนุภาค r-Film มีความหนืดมากกว่า LLDPE เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการจะมีความหนืดสูงกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนและอื่นๆ [6] อีกทั้งอนุภาค r-Film ที่เตรียมได้มีการผสมกันของพลาสติกหลายชนิดซึ่งอ้างอิงจากผลจากเทคนิค DSC และ FTIR

3.4 การทดสอบอัตราการหลอม

การทดสอบนี้ทดสอบโดยการนำอนุภาค r-Film และ LLDPE วางคู่กันบนแผ่นให้ความร้อนพร้อมให้ความร้อนและบันทึกอุณหภูมิพร้อมกับถ่ายวิดีโอ ผลการทดสอบอัตราการหลอมของอนุภาค r-Film ที่เตรียมได้กับ LLDPE พบว่า LLDPE มีอัตราการหลอมติดกันที่อุณหภูมิ 90°C และอนุภาคหลอมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 110°C ในขณะที่อนุภาค r-Film เริ่มหลอมติดกันที่อุณหภูมิ 140°C และหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 162°C ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการหลอมของอนุภาค r-Film มีอัตราการหลอมที่ต่ำกว่าเนื่องจากชนิดของฟิล์มที่นำมาใช้เคลือบนั้น 2 ใน 3 เป็นฟิล์มที่อยู่ในกลุ่ม HDPE ที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่า

LLDPE [7] และสอดคล้องกับผลดัชนีการไหลที่แสดงถึงความหนืดของอนุภาค r-Film ที่มากกว่า



รูปที่ 5 ภาพถ่ายอัตราการหลอมของอนุภาค r-Film และ LLDPE

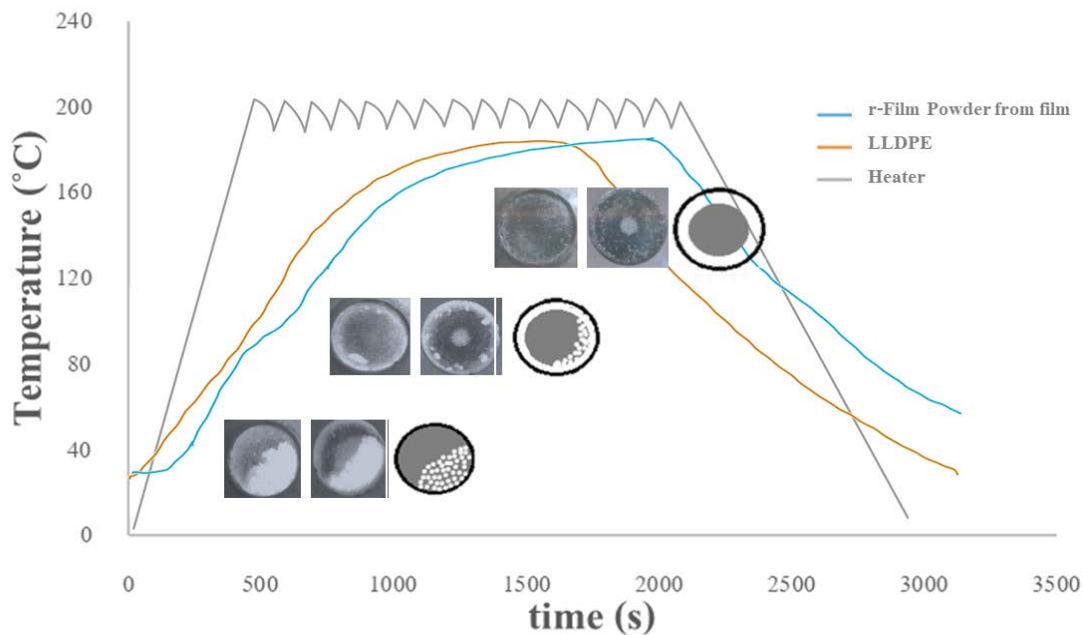
3.5 การทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว

การทดสอบนี้จะทำโดยการเปรียบเทียบค่าเวลาของวัสดุ 2 ชนิด คือ อนุภาค r-Film และ LLDPE นำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาในการขึ้นรูปผ่านไป ซึ่งค่าอุณหภูมิของระบบแสดงไว้ในแผนภูมิเส้นบนสุดที่แสดงถึงอุณหภูมิในการขึ้นรูปจนถึง 190°C ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมภายในเช่น สภาวะที่พลาสติกเริ่มติดผนังแม่พิมพ์ (Tack Temperature) สภาวะที่ผนังพลาสติกเกาะกับผิวแม่พิมพ์ทั้งหมด (Kink Temperature) และสภาวะที่พลาสติกเปลี่ยนจากของแข็งไปของเหลวที่สภาวะนี้พลาสติกจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นลักษณะของอสัณฐาน (Amorphous phase) ทั้งหมดแล้ว ซึ่งสังเกตเห็นภายในแม่พิมพ์ได้ชัดว่าวัสดุที่ติดผิวของแม่พิมพ์จะมีลักษณะใสทั้งหมด โดยกราฟจะแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ขึ้นรูปของ r-Film นานกว่า LLDPE เนื่องจากอนุภาค r-Film มีขนาดใหญ่และความหนาแน่นรวมมากกว่ารวมถึงอัตราการหลอมต่ำกว่าทำให้การแพร่ผ่านความร้อนระหว่างอนุภาคต่ำกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กและกลม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดขนาด ความกลมและอัตราการหลอมที่อัตราการหลอมของอนุภาค r-Film มีอัตราการหลอมที่ต่ำกว่า LLDPE [2],[7]

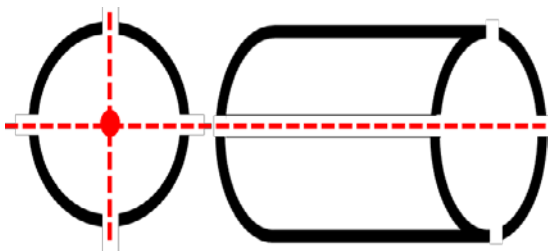
3.6 การวัดการกระจายความหนาของชิ้นงานทดสอบ

จากชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film และ LLDPE ทำการตัดเพื่อเตรียมวัดการกระจายความหนาของชิ้นงาน โดยตัดชิ้นงานออกเป็น 4 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 7 แล้วทำการวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) จากส่วนหน้าของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร) ไปตามความยาวครึ่งละ 1 เซนติเมตร ไปจนสุดชิ้นงานและนำค่า

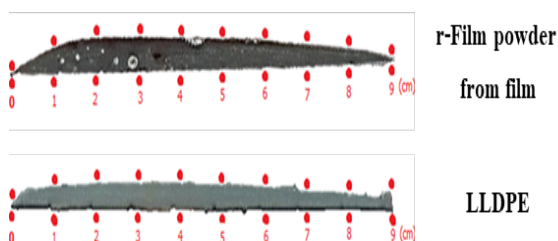
ความหนาที่ได้มาเปรียบเทียบกับ 2 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 8 ผลการวัดค่ากระจายความหนาพบว่าความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง LLDPE มีค่าใกล้เคียงกันตลอดชิ้นงานมากกว่าการใช้ผง r-Film ที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากลักษณะรูปร่างของ LLDPE มีขนาดเล็กและความกลมของ LLDPE มีความกลมมากกว่าอนุภาคผง r-Film [2] เป็นเหตุให้การกระจายความหนาของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว



รูปที่ 7 ภาพการเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการวัดขนาด



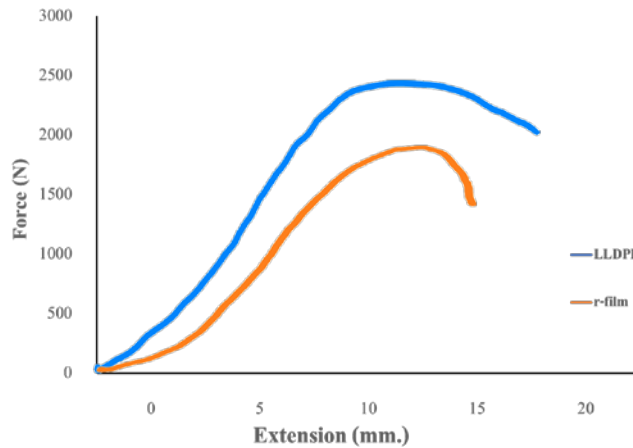
รูปที่ 8 การกระจายของความหนาของชิ้นงาน

3.7 การทดสอบสมบัติการทนต่อการเจาะทะลุ

การทดสอบสมบัติการทนต่อการเจาะทะลุทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D3787 โดยชิ้นงานทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร สภาวะการทดสอบ โหลดเซลล์ 5,000 นิวตัน, ระยะกด 30 มิลลิเมตร, ความเร็ว 305 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะสิ้นสุด 28 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE สามารถรับแรงกดได้ 2,500 นิวตัน และชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film สามารถรับแรงกดได้ 1,946.3 นิวตัน ในขณะที่เดียวกันระยะการขีดตัวของชิ้นงานที่เตรียมได้จากอนุภาคผง r-Film มีค่า 15.384 มิลลิเมตร และระยะขีดของชิ้นงาน LLDPE อยู่ที่ 18.620 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งการรับแรงกดและระยะขีดของชิ้นงานที่ได้เตรียมจาก LLDPE มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-

Film ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เมื่อมีการนำกลับมาใช้ขึ้นรูปอีกครั้งจะมีปัญหาทั้งในเรื่องของการเจือปนกับวัสดุอื่นๆ และการลดลงของน้ำหนักโมเลกุล เนื่องจากการขาดของสายโซ่ [7] ส่งผลสมบัติทางกลที่ต่ำลง เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุใหม่ซึ่งพบว่าในงานวิจัยนี้

ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้จากวัสดุรีไซเคิลมีผลสอดคล้องกันในเรื่องสมบัติทางกล กล่าวคือมีค่าทนต่อการเจาะทะลุได้ต่ำกว่าการใช้วัสดุใหม่ และความเหนียวของวัสดุก็ลดลง โดยสามารถสังเกตเห็นได้จากกระยะยืดที่ลดลงของชิ้นงานทดสอบเมื่อได้รับแรงกระทำ

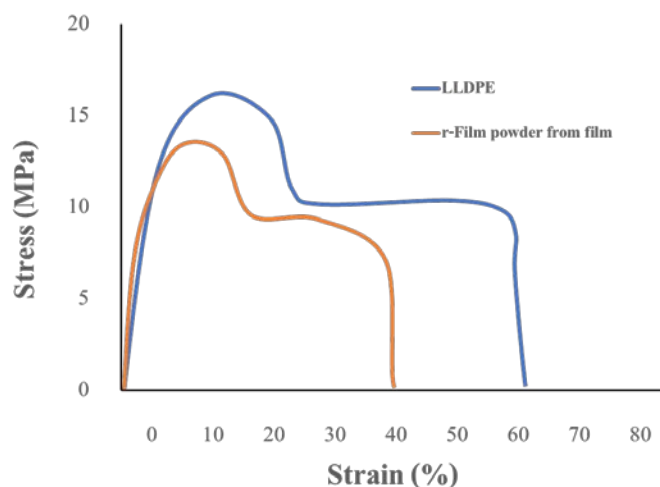


รูปที่ 9 ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อการเจาะทะลุของชิ้นงานที่เตรียมได้จากอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

3.8 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง

การทดสอบการทนสมบัติการต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยมีสภาวะการทดสอบความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที, ระยะจับชิ้นงาน 115 มิลลิเมตร, โหลดเซลล์ 500 นิวตัน ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film มีค่าทนต่อแรงดึง 11.18 เมกะปาสคาล ในขณะที่ค่าการทนต่อแรงดึงของชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE เท่ากับ 16.80 เมกะปาสคาล แสดงดังรูปที่ 10

ซึ่งสอดคล้องกับผลการทนต่อการเจาะทะลุที่ r-Film มีความแข็งแรงน้อยกว่า LLDPE แสดงให้เห็นว่า วัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะมีค่าสมบัติทางกลที่ลดลง เนื่องจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลจากการขาดของสายโซ่ ส่งผลให้การทนต่อแรงดึงลดลง [8],[9] นอกจากนี้ในงานขึ้นรูปที่ใช้วัสดุรีไซเคิลยังอาจพบปัญหาสมบัติทางกลที่ต่ำลงเนื่องจากการเจือปนของวัสดุอื่นๆ ได้อีกด้วย [8],[10]



รูปที่ 10 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจากอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

3.9 การทดสอบความแข็งที่ผิว

การทดสอบความแข็งที่ผิวด้วยเครื่อง Rockwell Hardness ตามมาตรฐาน ASTM D785 โดยมีสภาวะการทดสอบในโหมด HRR น้ำหนักกด 60 นิวตัน ขนาดหัวกด 0.5 นิ้ว โดยผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film มีค่าความแข็งที่ผิว เท่ากับ 20.62 และค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE เท่ากับ 26.78 แสดงตารางที่ 2 เนื่องจากชิ้นงานที่เตรียมจาก r-Film มีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณผลึก เนื่องจากการขาดของสายโซ่ทำให้เกิดช่องว่างของสายโซ่เพิ่มขึ้น [9],[11] ส่งผลให้ความแข็งลดลง อีกทั้งชิ้นงานเตรียมจากฟิล์มที่เป็นวัสดุมีความแข็งที่ผิวน้อย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่เตรียมได้จาก r-Film และ LLDPE

ชิ้นงาน	ความแข็งของผิวชิ้นงาน
LLDPE	26.78 ± 0.89
r-Film powder from film	20.62 ± 4.1

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดลองพบว่าสามารถนำผงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วทั้ง 5 ชนิดมาขึ้นรูปใหม่ ซึ่งพบปัญหาในการลดขนาดผงพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบผงจึงมีวิธีการเตรียมผงพลาสติกจากลักษณะบางและเหนียวให้อยู่ในลักษณะแข็งด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปและบดลดขนาดด้วยเครื่องบดละเอียดให้อยู่ในรูปแบบผงที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยลักษณะของอนุภาคผง r-Film ที่เตรียมจากเครื่องบด มีขนาดเล็ก 400 ไมครอน และค่าความกลม 0.58 ซึ่งแตกต่างจาก LLDPE ที่มีขนาด 250 ไมครอน และค่าความกลม 0.68 ส่งผลให้ค่าการกระจายความหนาของชิ้นงานจากอนุภาคผง r-Film ไม่สม่ำเสมอ

ผลการทดลองอัตราการไหลพบว่าความหนืดของอนุภาคผง r-Film สูงกว่า LLDPE เนื่องจากการผลิตฟิล์มจำเป็นต้องใช้พลาสติกที่มีความหนืดสูงส่งผลกับอัตราการหลอมและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การนำขยะพลาสติกมาขึ้นรูปใหม่จะทำให้สมบัติการทน

ต่อการเจาะทะลุลดลง 22.5% สมบัติการทนต่อแรงดึงลดลงที่ 33.5% และความแข็งที่ผิวลดลง 23% เมื่อเทียบกับ LLDPE ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกที่มีการผ่านความร้อนหลายครั้งและระยะเวลาที่นานในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก งบประมาณวิจัยแผนงานสำคัญ (Flagship) ประจำปีงบประมาณ 2563 ชุมชนนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน จากหน่วยบริหารและจัดการทุนวิจัยด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) สัญญาเลขที่ CBLRMUTT63B08 ภายใต้การบริหารทุนวิจัยและสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1.] P. J. Nugent and R. J. Crawford, "INTRODUCTION TO ROTATIONAL MOLDING," in Rotational Molding of Plastics, New York, NY, USA: John Wiley and Sons Inc., 1992, ch. 1, sec. x, pp. 1–14.
- [2.] J. Olinek, C. Anamd and C. T. Bellehumeur, "Experimental Study on the Flow and Deposition of Powder Particles in Rotational Molding," *Polymer Engineering and science*, vol. 45, no. 1, pp.62–73, 2005, doi: 10.1002/pen.20230.
- [3.] A. López Córdoba and S. Goyanes, "Food Powder Properties," in Reference Module in Food Science, 2017, doi: 10.1016/b978-0-08-100596-5.21198-0.
- [4.] A. Scoppio, D. Cavallo, A. J. Müller and D. Tranchida, "Temperature modulated DSC for composition analysis of recycled polyolefin blends," *Polymer Testing*, vol. 113, 2022, Art. no. 107656, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107656.
- [5.] M. Bredács, C. Barretta, L. F. Castillon, A. Frank, G. Oreski, G. Pinter and S. Gergely, "Prediction of

- polyethylene density from FTIR and Raman spectroscopy using multivariate data analysis,” *Polymer Testing*, vol. 104, 2021, Art. no. 107406, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107406.
- [6.] lyondellbasell, “Molecular Structure and Composition Affect Properties and Processability,” in *A Guide to Polyolefin Film Extrusion*, Houston, TX, USA: LyondellBasell, 2015, ch. 3, pp.3–5.
- [7.] B. I. Chaudhary, T. Elizabeth and V. John , “Processing enhancers for rotational molding of polyethylene,” *Polymer Engineering and Science*, vol. 41, no. 10, pp.1731–1742, 2001, doi: 10.1002/pen.10870.
- [8.] Q. Fu, Y. Men and G. Strobl. “Understanding of tensile deformation in HDPE/LDPE blends based on their crystal structure and phase morphology,” *Polymer*, vol. 44, no. 6, pp. 1927–1933, 2003, doi: 10.1016/S0032-3861(02)00940-0.
- [9.] C. N. Kartalis, C. D. Papaspyrides and R. Pfaedner. “Recycling of post-used PE packaging film using the restabilization technique,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 70, no. 2, pp.189–197, 2000, doi: 10.1016/S0141-3910(00)00106-3.
- [10.]H. Jin, J. Gonzalez-Gutierrez, P. Oblak, B. Zupancic, and I. Emri, “The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 97, no. 11, pp. 2262–2272, 2012, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.039.
- [11.]S. P. Cestari, P. J. Martin, P. R. Hanna, M. P. Kearns, L. C. Mendes and B. Millar, “Use of virgin/recycled polyethylene blends in rotational moulding,” *Journal of Polymer Engineering*, vol. 41, no. 6, pp. 509–516, 2021, doi: 10.1515/polyeng-2021-0065.