การรีไซเคิลขยะพลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้งด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

SINGLE USE PLASTIC WASTE RECYCLE BY ROTATIONAL MOLDING PROCESS

จักรภัทร ปรีดาวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การรีไซเคิลขยะพลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้งด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

จักรภัทร ปรีดาวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การรีไซเคิลขยะพลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้งด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน Single Use Plastic Waste Recycle Using Rotational Molding Process
ชื่อ – นามสกุล	นายจักรภัทร ปรีดาวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์, Ph.D.)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์อภิรัตน์ เลาห์บุตรี, Ph.D.)

.... กรรมการ
(อาจารย์กุลวดี สังข์สนิท, Ph.D.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์, Ph.D.)
วันที่ 16 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การรีไซเคิลขยะพลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้งด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน
ชื่อ-นามสกุล	นายจักรภัทร ปรีดาวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

เนื่องจากในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งถูกใช้งานในชีวิตประจำวันมากมาย แต่กลับพบว่าขาดการจัดการที่เหมาะสมหลังการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำพลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้งมาขึ้นรูปใหม่ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ภายในงานวิจัยมีการใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) เกรดทางการค้าสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน เปรียบเทียบกับ ฝาขวดพลาสติก (rBottleCap) เม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนรีไซเคิล (rHDPE) ถุงพลาสติก (rBag) บรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (rPP) หลอดพลาสติก (rStraw) โฟมชนิดพอลิสไตรีน (rFoam) ฝาแก้วพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (rPS) โดยนำมาบดด้วยเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยงและเครื่องบดเพลาเดียวให้อยู่ในรูปของวัสดุผง แล้วจึงนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบอีกครั้งด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ผลการวิจัยพบว่าการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวด้วยวัสดุทุกชนิดที่เตรียมได้สามารถขึ้นรูปได้ ผลการบดลดขนาดอนุภาคที่เตรียมได้มีขนาดเฉลี่ยในช่วง 150-350 ไมครอน และมีรูปร่างใกล้เคียงกัน วัสดุที่เตรียมได้จากฝาขวดพลาสติก มีความหนาแน่นรวมและการไหลแบบแห้งใกล้เคียงกับ LLDPE เช่นเดียวกับค่าดัชนีการไหล วัสดุรีไซเคิลทุกชนิดที่เตรียมได้ ใช้เวลาในการขึ้นรูปแบบหมุนนานกว่า LLDPE ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการหลอมของวัสดุแต่ละชนิดมีอัตราการหลอมที่นานกว่า การรับแรงกดอัดของฝาขวดพลาสติก มีค่าสูงใกล้เคียงกับ LLDPE ซึ่งมากกว่าวัสดุชนิดอื่น 50% แต่มีการเสียรูปแบบเปราะ ส่วนความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากโฟมชนิดพอลิสไตรีน และฝาแก้วพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน มีค่าสูงกว่า LLDPE 35%

คำสำคัญ: พลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้ง การรีไซเคิล กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

Thesis Title	Single Use Plastic Waste Recycle Using Rotational Molding Process
Name-Surname	Mr. Jakkaphat Preedawat
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Narongchai O-Charoen, Ph.D.
Academic Year	2022

ABSTRACT

There are many single-use plastic products that are used in daily life nowadays. However, it lacks proper handling after use. Therefore, this research aimed to recycle single-use plastics with a rotational molding process.

In this research, commercial grade Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) was used for rotational molding and compared with plastic bottle caps (rBottleCap), recycled polyethylene (rHDPE), plastic bags (rBag), polypropylene package (rPP), plastic straws (rStraw), polystyrene foam (rFoam) and plastic cup lids from polystyrene (rPS). All materials were ground by centrifugal hammer mill and single-shaft shredder into the form of powder materials. Then, the physical properties were carried out and molded into the testing samples again by rotational molding process.

The research results revealed that uniaxial rotational molding with all kinds of materials could be molded. The average obtained particle size reduction was in the range of 150-350 microns and was similar in shapes. Materials prepared from plastic bottle caps had a similar bulk density and dry flow to those of LLDPE, as well as a Melt Flow Index (MFI). All kinds of prepared recyclable materials took longer processing time than LLDPE. This was in line with the sintering rate of each material, which was longer than that of LLDPE. The compressive strength of plastic bottle caps was high. This was similar to LLDPE which was 50% higher compressive strength when compared to other materials. However, it had brittle deformation. In terms of hardness of the surface, the samples molded from polystyrene foam and plastic cup lids from polystyrene were 35% higher than LLDPE.

Keywords: single use plastics, recycle, rotational molding

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. ณรงค์ชัย โอเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อเสนอต่างๆ ตลอดจนแก้ปัญหา เพื่อให้เป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง จนสำเร็จลุล่วงได้ ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ทีนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณบุคลากรและภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยเหลือในกระบวนการขึ้นรูป ขั้นตอนการทดสอบ และแก้ปัญหาทางเทคนิคต่างๆ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลที่คอยให้การสนับสนุนรวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และช่วยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและต้องการศึกษาต่อไม่ทางใดก็ทางหนึ่ง หากงานวิจัยในครั้งนี้มีข้อบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ทางผู้วิจัยขอกราบขออภัยไว้ในโอกาสนี้ด้วย

จักรภัทร ปรีดาวัฒน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ........ (3)
กิตติกรรมประกาศ........ (5)
สารบัญ........ (6)
สารบัญตาราง........ (8)
สารบัญรูป........ (9)
คำอธิบายลักษณะและคำย่อ........ (12)
บทที่ 1 บทนำ........ 13
1.1 ที่มาและความสำคัญ........ 13
1.2 วัตถุประสงค์........ 14
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย........ 14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ........ 15
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง........ 16
2.1 วัสดุพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน........ 16
2.2 การรีไซเคิลพลาสติก (Plastic Recycle) 21
2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)........ 23
2.4 สมบัติของอนุภาคผงพลาสติก (Powder Properties)........ 32
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย........ 42
3.1 แผนการดำเนินงาน........ 42
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน........ 45
3.3 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย........ 47
3.4 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย........ 51
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน........ 56
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล........ 64
4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผลพลาสติก........ 64
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน........ 68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดลองขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว.. 70

4.4 การกระจายความหนาของชิ้นงาน.. 72

4.5 ลักษณะความขรุขระที่ผิวชิ้นงานทดสอบ... 73

4.6 ความแข็งที่ผิว.. 75

4.7 การทดสอบการทนต่อแรงกดอัด... 75

4.8 การผสมอนุภาคผง LLDPE กับ rFoam... 77

บทที่ 5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.. 85

5.1 การรีไซเคิลด้วยขยะพลาสติกแต่ละชนิด.. 85

5.2 การผสมอนุภาคผง rFoam กับ LLDPE... 86

5.3 ข้อเสนอแนะ... 87

บรรณานุกรม.. 88

ภาคผนวก.. 92

ภาคผนวก ก ผลการตีพิมพ์เผยแพร่... 93

ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์... 108

ประวัติผู้เขียน... 115

สารบัญตาราง

หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางลักษณะการไหลเทียบกับอัตราการอัดตัว (Hausner ratio)...................... 36
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน.. 40
ตารางที่ 4.1 ขนาดและความกลมเฉลี่ยของอนุภาคผงพลาสติก LLDPE และอนุภาคผงที่เตรียมได้.. 66
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ... 68
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบดัชนีการไหล.. 70
ตารางที่ 4.4 ค่าความขรุขระที่พื้นผิวชิ้นงานด้านในและด้านนอก... 74
ตารางที่ 4.5 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงพลาสติก LLDPE และ rFoam แต่ละขนาด................ 77
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ rFoam แต่ละขนาด..................................... 78

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะสายโซ่พอลิเอทิลีน a) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ b) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น c) พอลิเอทิลีนความแน่นสูง........ 17

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิพรอพิลีน........ 19

รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พลาสติกสไตรีน (PS)........ 20

รูปที่ 2.4 ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน A) การใส่วัสดุ B) การให้ความร้อน C) การหล่อเย็น D) การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์........ 25

รูปที่ 2.5 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด ฝาหอย (Clamshell Rotational Molding Machine). 27

รูปที่ 2.6 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด ร็อคแอนด์โรล (Rock and Roll Machine)........ 28

รูปที่ 2.7 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด กระสวย (Shuttle Style Machine)........ 28

รูปที่ 2.8 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงชนิดแขนตรึง (Fix-Arm Turret Machines)........ 29

รูปที่ 2.9 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด แขนอิสระ (The Independent Arm Machine)........ 30

รูปที่ 2.10 กราฟอุณหภูมิที่วัดได้ในระหว่างการขึ้นรูปของพอลิเอทิลีน........ 30

รูปที่ 2.11 กราฟอุณหภูมิในระหว่างการขึ้นรูปจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน........ 31

รูปที่ 2.12 ลักษณะรูปร่างเปรียบเทียบกับค่าความกลม........ 33

รูปที่ 2.13 ลักษณะอนุภาคที่มีหาง (Tail) และอนุภาคที่ไม่มีหาง........ 34

รูปที่ 2.14 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นของเนื้อ........ 34

รูปที่ 2.15 เครื่องมือในการวัดความหนาแน่นรวมและการไหลแบบแห้ง........ 35

รูปที่ 2.16 แนวองศาการแยกตัวของอนุภาคผงจากผิวแม่พิมพ์ในการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์. 37

รูปที่ 2.17 พฤติกรรมการไหลภายในแม่พิมพ์........ 38

รูปที่ 2.18 ลักษณะการหลอมของผงพลาสติก........ 39

รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงาน........ 45

รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน (ต่อ)........ 46

รูปที่ 3.3 ฝาขวดน้ำพลาสติกผ่านการใช้งานแล้ว........ 47

รูปที่ 3.4 หลอดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว........ 47

รูปที่ 3.5 ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว........ 48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6 บรรจุภัณฑ์พลาสติกผ่านการใช้งานแล้ว........ 48
รูปที่ 3.7 ฝาแก้วพลาสติกผ่านการใช้งานแล้ว........ 49
รูปที่ 3.8 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการรีไซเคิลแล้ว........ 49
รูปที่ 3.9 โฟมผ่านการใช้งานแล้ว........ 50
รูปที่ 3.10 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)........ 50
รูปที่ 3.11 เครื่องบดชนิดเพลาเดี่ยว (Single shaft Shredder)........ 51
รูปที่ 3.12 เครื่องบดชนิดละเอียดชนิดค้อนเหวี่ยง (Pulverizer)........ 51
รูปที่ 3.13 เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) และตะแกรง (Sieve)........ 52
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Difference Scanning Calorimeter, DSC)........ 52
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล (Digital Microscope) รุ่น S04-600X........ 53
รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)........ 53
รูปที่ 3.17 เตาให้ความร้อน (Hot Plate)........ 54
รูปที่ 3.18 เครื่องขึ้นรูปแบบแบบหมุนแกนเดียวเดียว (Axial Powder Flow Apparatus).. 54
รูปที่ 3.19 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ดิจิตอล (Vernier Caliper)........ 55
รูปที่ 3.20 เครื่องวัดความแข็งที่ผิวชิ้นงาน (Durometer) และสเกล D (Shore D)........ 55
รูปที่ 3.21 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)........ 56
รูปที่ 3.22 การแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดและค่าความกลมของอนุภาคผง........ 58
รูปที่ 3.23 แสดงค่ามุมระหว่างพลาสติก 2 อนุภาค........ 59
รูปที่ 3.24 ลักษณะตัวอย่างการวัดการกระจายขนาดของชิ้นงาน........ 61
รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์ความขรุขระที่ผิวด้วยโปรแกรมม ImageJ........ 62
รูปที่ 3.26 เครื่อง Universal Testing Machine และชุดจับชิ้นงานทดสอบการกดอัด........ 63
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC........ 65
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้านหน้าแม่พิมพ์ของวัสดุแต่ละชนิด a) LLDPE b) rHDPE c) rPP d) rBottleCap e) rPS f) rFoam g) rStraw h) rBag 67
รูปที่ 4.3 ลักษณะอนุภาคผงระหว่างการทดสอบอัตราการหลอม........ 69

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการขึ้นรูปแบบหมุน......... 71
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมภายในแม่พิมพ์เมื่อเริ่มให้ความร้อนจนถึงอนุภาคผงพลาสติก หลอมเหลว.. 72
รูปที่ 4.6 กราฟการกระจายความหนาของชิ้นงาน.. 73
รูปที่ 4.7 ลักษณะความขรุขระภายในและภายนอกชิ้นงานทดสอบ...................................... 74
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน.. 75
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด... 76
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลลักษณะการเสียรูปผ่านการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด................ 76
รูปที่ 4.11 ลักษณะของอนุภาคผง rFoam แต่ละขนาดจากเริ่มต้นให้ความร้อนตลอดจน หลอมสมบูรณ์.. 79
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการขึ้นรูป LLDPE/rFoam..... 80
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างขึ้นรูป LLDPE/rFoam............ 81
รูปที่ 4.14 กราฟการกระจายความหนาของชิ้นงาน.. 82
รูปที่ 4.15 ผลการวัดความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน LLDPE, rFoam และ LLDPE/rFoam......... 83
รูปที่ 4.16 กราฟผลการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด... 84

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	มาตรฐานการทดสอบจากประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society of Testing and Materials)
$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส
PS	Polystyrene
PE	Polyethylene
HDPE	High Density Polyethylene
rBottleCap	Recycle Bottlecap
rHDPE	Recycle High Density Polyethylene
rBag	Recycle Plastic Bag
LLDPE	Linear Low Density Polyethylene
PP	Polypropylene
rPP	Recycle Polypropylene
rFoam	Recycle Foam
Huasner ratio	อัตราการกดอัด
mm.	หน่วยการวัด มิลลิเมตร
g/cm^3	หน่วยของความหนาแน่นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g/10min	หน่วยของดัชนีการไหล กรัมต่อ 10 นาที
MPa	หน่วยการวัด เมกะปาสคาล
ρ	ความหนาแน่น
ρT	ความหนาแน่นหลังจากการเคาะ (Tap Density)
ρB	ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)
Ra	ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness Average)
T_m	อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ (Melting Temperature)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำพลาสติกและโฟมมาใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ มากขึ้นจากสถิติพบว่าปีที่ผ่านมามีการบริโภคถุงพลาสติกหูหิ้วจำนวน 45,000 ล้านใบต่อปี โฟมบรรจุอาหารจำนวน 6,758 ล้านใบต่อปี แก้วพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวจำนวน 9,750 ล้านใบ ซึ่งพลาสติกและโฟมเหล่านี้เป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากเมื่อไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้องจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางบกและทางทะเล [1] ประกอบกับ ณ ปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคของประชาชนที่นิยมความสะดวกสบายมากขึ้น โดยเฉพาะการส่งสินค้าจากบริการสั่งซื้อออนไลน์สินค้าและบริการสั่งอาหารทำให้เกิดขยะพลาสติกถึงมือผู้บริโภคเป็นจำนวนมาก ซึ่งพลาสติกเหล่านี้ได้มีการถูกศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำหรือมารีไซเคิล (Recycle) ผ่านวิธีต่าง ๆ [2-4] อีกทั้งระยะเวลาในการย่อยสลายของพลาสติกที่นาน เช่น ขวดพลาสติก ฝาขวดพลาสติก หลอดพลาสติก ถุงพลาสติก มีระยะเวลาย่อยสลายประมาณ 450 ปี ส่วนโฟมมีระยะเวลาในการย่อยสลายนานหรือไม่สามารถย่อยสลายได้ [5]

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational molding) เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวง ขนาดใหญ่และมีรูปร่างไม่ซับซ้อน โดยลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ เช่น ถังขนาดใหญ่ เรือ ถังน้ำ เป็นต้น โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหมาะสมกับพลาสติกกลุ่มเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ส่วนมากจะเป็นกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ข้อดีของกระบวนการนี้คือภายในกระบวนการไม่มีแรงเค้น (Stress-free) แตกต่างจากกระบวนการอื่น เช่น กระบวนฉีดพลาสติก (Injection molding) กระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion molding) อีกทั้งกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีลักษณะของแม่พิมพ์ไม่ซับซ้อนจึงทำให้แม่พิมพ์มีราคาถูก เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นและสามารถควบคุมความหนาของชิ้นงานได้ แต่กระบวนการนี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ที่จำเป็นจะต้องอยู่ในรูปของผง และระยะเวลาในกระบวนการขึ้นรูปที่ระยะเวลานาน [6]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการเตรียม ฝาขวดน้ำพลาสติก หลอดพลาสติก ถุงพลาสติก บรรจุภัณฑ์พลาสติก ฝาแก้วพลาสติก เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการรีไซเคิลแล้ว และโฟมให้อยู่ในลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับมารีไซเคิลด้วยด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน อีกทั้งเพื่อศึกสภาวะและความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปและมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาด รูปร่าง จุดหลอมเหลว สมบัติทางกล เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ใช้ในอุตสาหกรรมในการขึ้นรูปแบบหมุนเป็นหลัก

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการนำขยะพลาสติกแบบใช้แล้วทิ้งใช้ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

1.2.2 ศึกษาการเตรียมพลาสติกแต่ละชนิด และโฟมให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมและศึกษาสภาวะการขึ้นรูปสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุนของขยะพลาสติก

1.2.3 ศึกษาสมบัติทางกาย สมบัติทางความร้อนจากวัสดุที่ผ่านการเตรียมและสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ขยะพลาสติกและโฟมที่ผ่านการใช้งานแล้ว ฝาขวดน้ำพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอดพลาสติก ถุงพลาสติก บรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน ฝาแก้วพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการรีไซเคิลแล้วและโฟมชนิดพอลิสไตรีน

1.3.2 เตรียมขยะพลาสติกแต่ละชนิดและโฟมให้อยู่ในรูปเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน โดยการบดลดขนาดด้วยเครื่องบดละเอียดชนิดค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และบดถุงพลาสติกด้วยเครื่องบดเพลาเดี่ยว (Single shaft shredder) พร้อมทั้งแยกขนาดอนุภาคที่บดได้ด้วยเครื่องแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) ที่ขนาดรู (Sieve) 300 ไมครอน

1.3.3 ถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของขอนุภาคผงที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล (Digital Microscope) พร้อมวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ Image J และทดสอบสมบัติการไหลแบบแห้ง (Flow Rate) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ตามมาตรฐาน ASTM D1895 และอัตราการอัดตัว (Hausner ratio) ของอนุภาคผงที่เตรียม

1.3.4 ทดสอบสมบัติทางความร้อน ทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index) อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ตามมาตรฐาน ASTM D1238 และทดสอบอัตราการหลอมภายใต้สภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ (Sintering rate) ของอนุภาคผงแต่ละชนิดที่ผ่านการบดลดขนาดพร้อมบันทึกอุณหภูมิและภาพด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) และกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล

1.3.5 ทดสอบการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเครื่องทดสอบการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus) พร้อมกับบันทึกภาพและอุณหภูมิ สภาวะการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคผงแต่ละชนิดจากสภาวะของแข็ง (Solid Stage) ไปสู่ของเหลว (Melt Stage) โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุน 7 รอบต่อนาทีและใช้วัสดุน้ำหนัก 40 กรัม

1.3.6 ชิ้นงานตัวอย่างจากการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว ทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยการวัดการกระจายความหนาของชิ้นงานด้วยเนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) และทดสอบความแข็งที่ผิว

ด้วย Durometer Shore D ตามมาตรฐาน ASTM D785 จากนั้นทดสอบสมบัติทางกล โดยการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D3787

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะรับ

1.4.1 สามารถนำขยะพลาสติกแต่ละชนิดและโฟมมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่ากับขยะพลาสติกและโฟม

1.4.2 เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจำเป็นต้องใช้วัสดุในการขึ้นรูปจำนวนมากจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณขยะในการขึ้นรูปมาก จึงสามารถช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกแต่ละชนิดและโฟมทำให้ลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

1.4.3 สามารถใช้เป็นแนวทางในการเตรียมขยะแต่ละชนิดและสภาวะในการขึ้นรูปให้เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

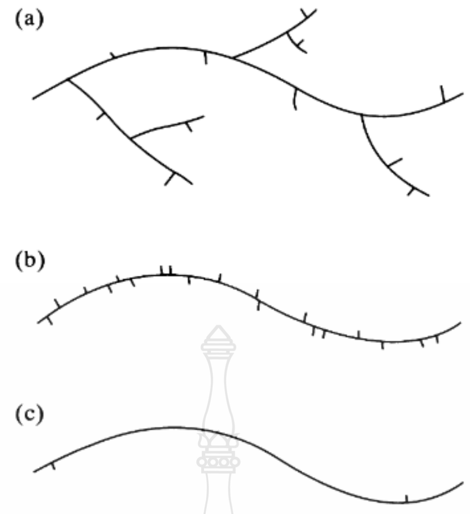
กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวงและขนาดใหญ่ดังนั้นวัสดุที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปแบบหมุนจึงจำเป็นต้องมีปริมาณมาก โดยส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปแบบหมุนมีการใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็นวัตถุดิบหลักซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงการนำวัสดุพลาสติกชนิดอื่นมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

2.1.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density Polyethylene, LDPE) [7]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ถูกค้นพบโดยบังเอิญจากนักวิจัยในประเทษอังกฤษ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลยาว (Long Chain Carbon Atoms) เป็นสายโซ่กิ่งก้านซึ่งประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ ของมอนอเมอร์พอลิเอทิลีน จากการค้นพบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในช่วงนั้นพอลิมเอทิลีนมีบทบาทสำคัญในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยนำมาใช้เป็นวัสดุหุ้มสายเคเบิ้ลใต้น้ำและเป็นฉนวนสำหรับเรดาร์ เพราะพอลิเอทิลีนมีสมบัติเบาและเป็นฉนวนที่ดี นอกจากนี้พอลิเอทิลีนยังเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายอีกด้วย

การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ สังเคราะห์จากปฏิกิริยา Polymerization ของโมโนเมอร์พอลิเอทิลีน ซึ่งเตรียมจาก Ethylene (CH_2=CH_2) โดยใช้ปฏิกิริยาสังเคราะห์เป็นแบบเติมใช้บิวทิลไฮโดรเพอร์ออกไซด์และคิวมีนไฮโดรเพอร์ออกไซด์ในกระบวนการจับตัวเป็นออกไซด์ โดยมีปฏิกิริยาเกิดอย่างต่อเนื่องจนได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่าพอลิเอทิลีนที่มีขนาดตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีลักษณะสายโซ่ที่มีกิ่งก้านแสดงดังรูปที่ 2.1a แสดงถึงลักษณะของสายโซ่ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ต่ำ และต่ำเชิงเส้น ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูงมีลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้

ลักษณะทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เม็ดมีลักษณะสีโปร่งแสง (ขุ่นนิดๆ) มีคุณสมบัติสามารถโก่งตัวได้มาก ทนต่อความร้อนสูง ผิวไม่แข็ง สามารถนำมาขึ้นรูปโดยอาศัยสภาวะที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะความต้องการของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วยกระบวนการเป่าฉีดเข้าแม่พิมพ์แล้วเป่ายืด การเป่าเข้าแม่พิมพ์และอัดรีด การขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าแม่พิมพ์ การเคลือบด้วยวิธีการอัดรีด การขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เช่น กระจาด ถัง ของเล่นเด็ก หีบห่อ ขวด เครื่องมือแพทย์ ถุงพลาสติก เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะสายโซ่พอลิเอทิลีน a) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ b) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น c) พอลิเอทิลีนความแน่นสูง [8]

2.1.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene) [8]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็นพลาสติกมีโครงสร้างเป็นกึ่งผลึกที่มีลักษณะสายโซ่โมเลกุลผลึกจัดเรียงกันแน่นและมีการสังเคราะห์เหมือนกันกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีการสังเคราะห์และใช้สารเร่งปฏิกิริยาใกล้เคียงกันโดยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีสายโซ่ที่ถูกทำให้สั้นกว่าดังรูปที่ 2.1b ซึ่งทำให้โมเลกุลสามารถก่อตัวให้เกิดเป็นผลึก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีความหนาแน่นปานกลางเมื่อเทียบกับชนิดความหนาแน่นสูงและต่ำ โดยในสภาวะทั่วไป พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจะมีปริมาณผลึกอยู่ประมาณ 65-75% ทำให้มีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความยืดหยุ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง LLDPE มีสมบัติทางกลที่ดีกว่า LDPE และคุณสมบัติทางแสงดีกว่า HDPE การทนต่อสารเคมีและการทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งเหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ ฉีดขึ้นรูป เป่าขึ้นรูปและกระบวนการหมุนขึ้นรูป

2.1.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) [9]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ถูกผลิตและพัฒนามาจากพอลิเอทิลีน (Polyethylene) โดย Reginald Gibson และ Eric Tupper แห่งบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในประเทศอังกฤษต่อมาเมื่อปี 1945 Earl Tupper แห่งบริษัท Dupont ได้สังเกตว่าพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความเหนียว ทนทาน สามารถนำมาหล่อในแบบพิมพ์ให้มีขนาดรูปร่าง และผสมสีให้มีสีต่างๆ ได้ จึงเริ่มด้วยการผลิตแก้วน้ำพลาสติก ชามและอ่าง ซึ่งได้รับความนิยมเนื่องจากมีน้ำหนักเบา สีสันน่าใช้และต่อมาได้ผลิตภาชนะที่มีฝาปิดได้ด้วย ซึ่งเป็นที่มาของภาชนะ

บรรจุอาหารที่ได้รับความนิยมจากแม่บ้านในสมัยนั้น ในชื่อทัปเปอร์แวร์ จึงทำให้ในปัจจุบันพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกกันอย่างแพร่หลาย

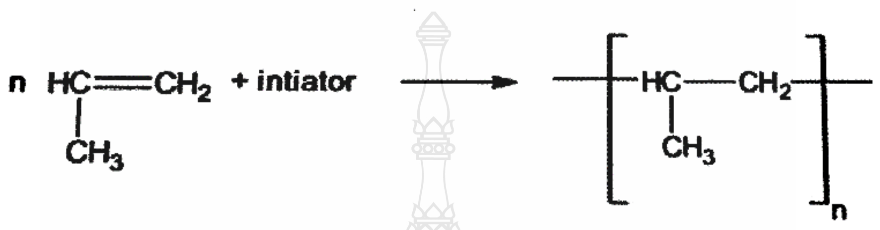
การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชั่นแบบเติมเกิดจากโมเลกุลของมอนอเมอร์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการบัลด์พอลิเมอไรเซชั่น (Bulk Polymerization) เป็นกระบวนการผลิตที่ไม่ใช้ตัวทำละลายและสารที่ทำให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชั่นเริ่มเกิดขึ้นเท่านั้นการเรียกชื่อของพอลิเอทิลีนนั้นจะเรียกตามมอนอเมอร์เป็นคำนำหน้าชื่อที่ใช้เตรียม โดยมอนอเมอร์ที่ใช้คือ Polyethylene ที่มีลักษณะเป็นพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนส่วนคำว่า “High Density” นั้นเป็นสมบัติของพลาสติกที่มีความหนาแน่นสูงที่มีลักษณะสายโซ่โมเลกุลมีกิ่งสั้นเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ แสดงดังรูป 2.1c มีลักษณะเป็นผงหรือเม็ดเล็กๆ ที่ไม่ละลายในสารละลายที่ใช้ เมื่อ กระบวนการสังเคราะห์สิ้นสุด เติมน้ำหรือแอลกอฮอล์เพื่อละลายตัวเร่งปฏิกิริยาและทำการแยกเม็ดพอลิเมอร์ออกเพื่อทำให้แห้ง โดยมีข้อเสียคือ ปฏิกิริยาจะคายความร้อนออกมาสูงมาก ควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ยากทำให้เกิดผลเสียต่อสมบัติกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์

ลักษณะทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เม็ดมีลักษณะสีทึบแสง (สีนม) คุณสมบัติมีความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิสูงและคงรูป สามารถนำมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคต่างๆ โดยส่วนใหญ่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป กระบวนการอัดรีด กระบวนการฉีดเป่าที่ทำการดึงในขณะเป่า ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เช่น เครื่องใช้ภายในบ้าน ขวด ถัง ภาชนะบรรจุกล่อง เป็นต้น

2.1.4 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) [10]

พอลิพรอพิลีนเป็นพลาสติกที่สามารถใช้ในกระบวนการขึ้นรูปทุกกระบวนการและมีการใช้งานที่หลากหลายโดยพอลิพรอพิลีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดย Giulio Natta และ Karl Rehn ซึ่งเป็นนักเคมีชาวเยอรมันในปี 1954 พอลิพรอพิลีนที่ถูกสังเคราะห์ในครั้งนี้เป็นชนิดไอโซแทคติกต่อมาได้มีการผลิตสำหรับการค้าในปี 1957 ประเทศอิตาลี การสังเคราะห์พอลิพรอพิลีนสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมหรือรวมตัวของมอนอเมอร์พรอพิลีน (Polypylene) เข้าด้วยกันเกิดเป็นสายโซ่ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบพวกโลหะ เช่น ไทเทเนียมคลอไรด์ ดังรูปที่ 2.2 แต่ถ้าหากใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะของการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันจะได้ โดยสมบัติทั่วไปของพอลิพรอพิลีนนั้นมีน้ำหนักเบาหรือความหนาแน่นต่ำส่งผลให้เมื่อผลิตชิ้นงานทำให้ต้องใช้พรอลิพรอพิลีนน้ำหนักน้อยและมีความแข็งแรงสูงต่อน้ำหนัก มีการทนต่อสารเคมีหรือสารละลายทนทานต่อการรับแรงจึงนิยมนำมาผลิตเป็นของใช้ภายในบ้านที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน 3 ชนิด คือ ไอโซแทกติก (Isotactic) ซินดิโอแทกติก (Syndiotactic) และ อะแทกติก (Atactic) ขึ้นรูปอยู่กับ

ทิศทางการจับของหมู่เมธิลกับอะตอมคาร์บอน โดยพอลิพรอพิลีนประเภท Isotactic นำมาผลิตเป็นพลาสติกที่ใช้อยู่ทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมธิลอยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็ง ทนทาน ตรงข้ามกับชนิด Atactic ที่มีความเหนียวมากกว่าเนื่องมาจากหมู่เมธิลมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ส่วนชนิด Syndiotactic หมู่เมธิลจัดเรียงตัวตรงข้ามกันมีความแข็งน้อยกว่าแต่จะทนทานมากกว่าชนิด Isotactic



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิพรอพิลีน [7]

ลักษณะทั่วไปพอลิพรอพิลีนมีลักษณะโปร่งแสง มีคุณสมบัติทนต่อการแปรรูปด้วยความร้อน ทนต่อแรงดึงและแรงกระแทก ผิวแข็ง ไม่ดูดซึมน้ำ เปราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส สามารถนำมาใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ เป่าขวด เป่าถุง เทอร์โมฟอร์มมิ่ง เป็นต้น โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิพรอพิลีน เครื่องใช้ภายในบ้าน (เช่น ถัง อ่าง ตะกร้า ขวด) ถุงพลาสติกร้อน ของเล่นเด็ก ชิ้นส่วนทางไฟฟ้า เป็นต้น

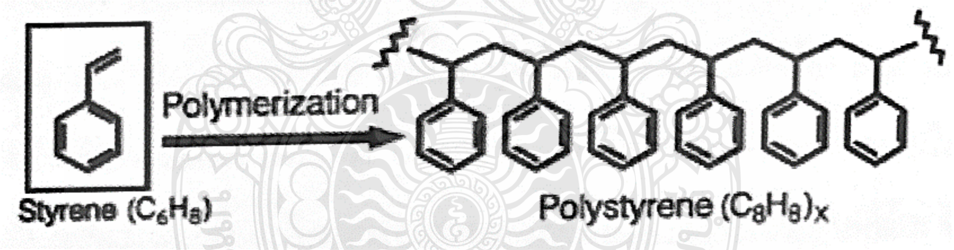
2.1.5 พอลิสไตรีน (Polystyrene) [11]

พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ผลิตมาจากมอนอเมอร์สไตรีน เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม ถูกผลิตออกขายครั้งแรกในช่วงปี 1930-1939 ในช่วงแรกสไตรีนถูกผลิตขึ้นมาถูกนำไปใช้ในสงครามโลก ครั้งที่ 2 เป็นหลัก หลังจากสงครามจบลงจึงถูกเปลี่ยนมาผลิตพอลิสไตรีนเพื่อออกขายแทน ในการผลิตพอลิสไตรียังมีวัตถุดิบอื่นๆ ที่ใช้ร่วมด้วยได้แก่ เบนซีน เอทิลีน และบิวทาไดอีน พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกกลุ่มอสัณฐานสามารถหลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสภานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อทำให้ร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลงพอลิสไตรีนบริสุทธิ์จะใส มีความแข็งแรงสูงแต่มีความเปราะ ทนต่อสารเคมีและเป็นฉนวนไฟฟ้าสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด ฉีดขึ้นรูปและเป่าขึ้นรูป

พอลิสไตรีนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นชนิดที่เรียกกว่า Expanded Polystyrene (EPS) เป็นชนิดที่ได้จากการผสมพอลิสไตรีนร้อยละ 90-95 กับสารทำให้ขยายตัว ร้อยละ 5-10 พลาสติกที่เป็นของแข็งถูกทำให้เป็นโฟมโดยการใช้ความร้อน (มักเป็นไอน้ำ) พอลิสไตรีนอีกชนิดหนึ่งคือ

Extruded Polystyrene (XPS) มีชื่อทางการค้าที่แพร่หลายคือ Styrofoam เป็นชนิดที่มีการเติมอากาศใช้ในช่องว่างตามเนื้อโฟมทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำ ใช้ในงานก่อสร้างและใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในอาคาร และยังมีชนิดที่เป็นแผ่นเรียกว่า Polystyrene Paper Foam (PSP) ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่องหรือถาดใส่อาหาร การสังเคราะห์พอลิสไตรีนที่เป็นภาชนะบรรจุอาหารที่ใช้กันทั่วไปส่วนใหญ่เป็นโฟมที่ทำมาจากพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่เกิดตากการนำโมเลกุลของสาร Styrene มาเชื่อมกันเป็นสายยาวโดยกระบวนการ Polymerization ดังรูปที่ 2.3 พอลิสไตรีนที่ได้ถูกนำมาเติมสารช่วยในการขยายตัว (Blowing Agent) ได้แก่ Carbon Dioxide และ Pentane เพื่อช่วยให้พลาสติกสามารถพองตัวและเกิดการแทรกตัวของก๊าซในเนื้อพลาสติก ได้เป็น Polystyrene Foam (PS Foam) หรือ Styrofoam หลังจากใช้ความร้อนด้วยไอน้ำ PS Foam ที่ได้มักถูกนำไปรีดให้เป็นแผ่นสำหรับบรรจุอาหาร

ลักษณะทั่วไปของพอลิสไตรีน เป็นเม็ดลักษณะทรงกระบอก เม็ดคล้ายไข่มุก ใสเหมือนแก้ว พอลิสไตรีนมคุณสมบัติที่ความแข็งสูง เป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อความชื้นและน้ำ สามารถนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดเข้าแม่พิมพ์ กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง กระบวนการอัดรีด เป็นต้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพอลิสไตรีนเช่น ชิ้นส่วนก่อสร้าง ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าและโทรคมนาคมที่ไม่รับแรงกระแทกมาก ขวดโหล ภาชนะขนาดเล็ก เครื่องเขียน



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พลาสติกสไตรีน (PS) [7]

ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนยังสามารถใช้วัสดุชนิดอื่นๆในการขึ้นรูปได้ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ไนลอน (Nylon) พอลิคาร์บอเนต (PC) เป็นต้น ซึ่งภายในงานวิจัยนี้ได้มีการให้ความสนใจกับขยะพลาสติกที่มีการใช้อยู่ภายในชีวิตประจำวันหรือพลาสติกใช้ครั้งเดียว (Single Use Plastic) เช่น ถุงพลาสติก หลอด ฝาขวดน้ำพลาสติก โฟมพลาสติก ฝาแก้วน้ำพลาสติก เพื่อนำมาเตรียมให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน

2.2 การรีไซเคิลพลาสติก (Plastic Recycle) [12]

พลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสามารถใช้แทนทรัพยากรในธรรมชาติ เช่น ไม้และเหล็กได้เป็นอย่างดีและมีราคาถูก น้ำหนักเบาสามารถผลิตให้มีสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้จากการเลือกชนิดของวัตถุดิบ ปฏิกิริยาเคมี กระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังสามารถปรับแต่งสมบัติได้ง่ายโดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารปรับสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารตัวเติม (Filler) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกหลากหลายรูปแบบและสีสันให้เลือกใช้อย่างมากมายด้วยสมบัติที่โดดเด่นหลายด้านทำให้มีการยอมรับพลาสติกอย่างรวดเร็วและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณสูงมากขึ้นตามด้วย ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลจึงเป็นที่สนใจเป็นอย่างมากเพราะสามารถช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกแล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางเทคโนโลยีในช่วงหลายปีที่ผ่านมาทำให้สามารถรีไซเคิลพลาสติกกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary recycling)

2.2.1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ เป็นการนำผลิตภัณฑ์พลาสติกหรือเศษพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อน ที่เกิดในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

2.2.2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทำความสะอาด บด หลอมและขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นหลายเทคนิค คือ

2.2.2.1 การรีไซเคิลทางกล (Mechanical recycling) เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการรวบรวมพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภทและสีมาล้างทำความสะอาดแล้วนำมาบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่ เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนี้จะเป็นตัวกำหนดการนำไปใช้งานและปริมาณการผสมที่ต้องการ โดยปัญหาในการรีไซเคิลพลาสติกคือหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งคุณภาพของพลาสติกจะต่ำลงปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล

ทำให้ไม่ได้คุณภาพและมีราคาถูกลงเรื่อย ๆ จนบางครั้งไม่คุ้มต่อการลงทุน และอีกสาเหตุที่สำคัญคือมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ฉลากเล็ก ๆ หรือเศษกาวทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเข้มขึ้นหรือมีความใสลดลง นอกจากนี้ความชื้นในพลาสติกและความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัวหรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติก ทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเหลืองและมีสมบัติเชิงกลลดลงด้วย

2.2.2.2 การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical modification) เนื่องจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติการขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้นการปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสีแต่ถ้าเป็นพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากันที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

2.2.2.3 การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Coextrusion and Coinjection moulding) การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Coextrusion and Coinjection moulding) เป็นหนึ่งวิธีของการรีไซเคิลแบบทุติยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดีและมีสีสันน่าใช้ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกรีไซเคิล

2.2.3 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิการรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน

การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) เป็นวิธีการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการแตกออกหรือขาด (Depolymerisation) เกิดเป็นมอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) และนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพลาสติกเพท (PET) ได้ใหม่

การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis) วิธีนี้โครงสร้างของพลาสติกเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน (Thermolysis) แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation)

2.2.3.1 ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกผ่านการให้ความร้อนแบบโดยปราศจากออกซิเจน โดยลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการเป็นสารควบแน่นของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic crude oil) สามารถนำกลับไปใช้

ในโรงกลั่นและส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการ

2.2.3.2 แก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของพลาสติกเกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบโดยมีการใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าไพโรไลซิส ผลลัพธ์ที่ได้คือ ซินแก๊ส (Syngas) ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงแต่ถ้าทำการแยกก่อนนำมาใช้ในรูปของสารเคมีจะมีมูลค่าสูงขึ้น 2 – 3 เท่า

2.2.3.3 ไฮโรจีเนชั่น (Hydrogenation) เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสายโซ่พอลิเมอร์ของพลาสติกจะถูกทำให้แตกหรือขาดออกจากกันด้วยความร้อนและสัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินพอที่ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ จนเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) และเกิดการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล

กระบวนการรีไซเคิลทางความร้อน เป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์และคุ้มค่ากว่าการรีไซเคิลทางเคมีเพราะการรีไซเคิลทางเคมีหรือทางกลจะไม่สามารถใช้กับพลาสติกผสมที่มีสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่พลาสติกได้ ในขณะที่การรีไซเคิลทางเคมีต้องใช้พลาสติกที่มีความสะอาดค่อนข้างสูงและมีการผสมหรือปนเปื้อนได้เพียงเล็กน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูง อย่างไรก็ตามพลาสติกเพทที่จะนำมารีไซเคิลทางความร้อนก็ควรมีการคัดขนาดหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกบ้าง

2.2.4 การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ เป็นการนำพลาสติกมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการเป่าขึ้นรูปโดยที่เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีลักษณะกลวง แต่มีหลักการและกระบวนการแตกต่างกันในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจะมีการควบคุมในเรื่องของน้ำหนักของผงพลาสติกบรรจุลงในแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์ทำจากโลหะที่แบ่งเป็นสองส่วนเพื่อสามารถประกบด้วยกันและสามารถหมุนพร้อมกับให้ความร้อนในเตาอบระหว่างการให้ความร้อนนั้นแม่พิมพ์จะมีการหมุนในสองทิศทางได้แก่ แกนตั้งฉากและแกนแนวราบ เมื่อให้ความร้อนกับพลาสติกในแม่พิมพ์ผงพลาสติภายในแม่พิมพ์จะเกิดการก่อตัวขึ้นเป็นชั้นผิวด้านในผนังของแม่พิมพ์จนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว หลังจากนั้นหล่อเย็นแม่พิมพ์พร้อมกับหมุนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้พลาสติกหลอมเกิดการเย็นตัวทุกทิศทางและกลายเป็นของแข็งในระหว่างการให้ความเย็นกับแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ยังคงหมุนอยู่อย่างต่อเนื่องและขั้นตอนสุดท้ายนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยกระบวนการนี้เริ่มมีการพัฒนาในปี ศตวรรษ 1940 สำหรับในกับไวนิลพลาสติกโซลในรูปของของเหลวจนกระทั่งในปีศตวรรษ 1950 ได้มีการใช้ขึ้นรูปจากผงพอลิเอทิลีนได้สำเร็จ ซึ่งปัจจุบันได้มีการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุหลายชนิดขึ้นเช่น ไนลอน พอลิพรอพิลีน พอลิคาร์บอเนต แต่ส่วนใหญ่จะใช้เป็นพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน

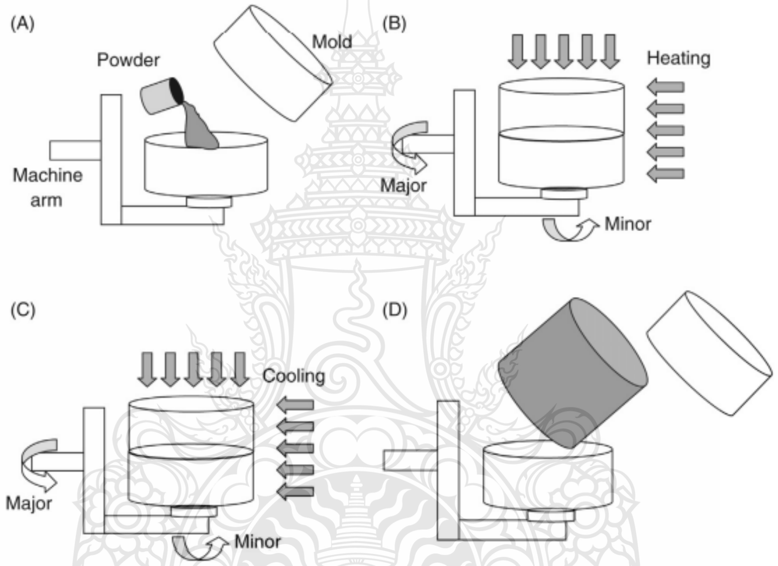
กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนี้เป็นกระบวนการที่มีข้อดีเนื่องจาก เป็นกระบวนการที่ไม่มีความดันในกระบวนการจึงใช้แม่พิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปไม่ซับทำให้มีราคาถูก นอกจากนี้ขนาดชิ้นงานที่ได้ยังมีความหนาสม่ำเสมอและยังสามารถเติมสารเสริมแรงลงไปในกระบวนการได้ โดยกระบวนการนี้ผิวชิ้นงานปราศจากความเครียดทำให้สามารถออกแบบแม่พิมพ์ให้มีลวดลายได้ กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีระยะเวลาในการขึ้นรูปใช้เวลานานเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปหรือการเป่าขึ้นรูปแต่กระบวนการนี้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ มีผนังหนา ซึ่งกระบวนการอื่นผลิตไม่สามารถผลิตได้ เช่น การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีผนังหนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

โดยกระบวนการนี้ในหนึ่งรอบการผลิตสามรถดำเนินการหลายรูปแบบ เช่น ในการผลิตชิ้นงานสามารถทำได้ภายในเตาอบเตาเดียว (โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่) ตัวเครื่องจะมีแขนโดยที่ปลายแขนจะติดกับแม่พิมพ์ที่มีการบรรจุผงพลาสติกเพื่อนำเข้าสู่เตาอบ ในระหว่างการให้ความร้อนแม่พิมพ์แขนแม่พิมพ์จะมีการหมุนรอบตัวเอง (แกนหลัก) และแม่พิมพ์จะหมุนรอบตัวเอง (แกนรอง) พร้อมกัน หลักจากให้ความร้อนจนได้เวลาแขนจับจะนำแม่พิมพ์ออกจากเตาอบไปสู่ห้องให้ความเย็น (Cooling Chamber) ซึ่งอัตราการหล่อความเย็นมีความสำคัญเนื่องจากการให้ความเย็นแบบรวดเร็วจะทำให้มีความคุ้มทุนมากกว่าแต่อาจจะเกิดปัญหาตามมา เช่น การยุบตัวของผลิตภัณฑ์ โดยปกติทั่วไปแล้วกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจะทำการหล่อเย็นด้วยการใช้พัดลมและไอน้ำ อัตราการหล่อเย็นมีผลหลักต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์บางครั้งอาจมีการใช้หัวฉีดอากาศ (Air Jet) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเย็นตัว กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนประกอบไปด้วยแขนสามแขนซึ่งติดกับแม่พิมพ์ ในระหว่างที่แม่พิมพ์ตัวหนึ่งถูกให้ความร้อน แม่พิมพ์อีกตัวจะอยู่ในขั้นตอนการหล่อเย็นและจะดำเนินการกระทำอย่างต่อเนื่อง โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีการใช้ความเร็วในการหมุนต่ำกว่าการหล่อขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Casting) เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบหมุนมีความเร็วค่อนข้างช้าที่ 20 รอบต่อนาทีและมีอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบในการหมุนแกนหลักต่อแกนรองอยู่ที่ 6:1 นอกจากนี้เนื่องจากผนังแม่พิมพ์ทั้งหมดมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการหมุน (Center of Rotation) ไม่เท่ากันส่งผลให้อาจมีการไม่เท่ากันของผนังชิ้นงาน ทำให้ต้องมีการออกแบบให้จุดตัดของแกนหมุนหลักและรองไม่ซ้อนทับกับจุดศูนย์กลางของแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ความหนาที่เท่ากันทั้งชิ้นงาน

ในการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเป็นการพาความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่อยู่ในรูปต่าง ๆ เช่น แสงอินฟราเรด ของเหลวร้อน เปลวไฟและลมร้อนโดยการให้ความร้อนด้วยลมร้อนได้รับความนิยมมาสุด โดยอุณหภูมิของเตาอบจะอยู่ที่ 250-450 องศาเซลเซียส ซึ่งปกติแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิไม่สูงมาก เนื่องจากถูกให้ความเย็นเพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ก่อนจะทำการในผงพลาสติกลงในแม่พิมพ์ใหม่ เมื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชิ้นถัดไปทำให้เมื่อเริ่มให้ความร้อนจะใช้เวลาค่อนข้างนานสำหรับการให้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ [6]

2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน [13]

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนมี 4 ขั้นตอนหลัก แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน A) การใส่วัสดุ B) การให้ความร้อน C) การหล่อเย็น D) การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ [16]

2.3.1.1 การป้อนผงพลาสติกลงในแม่พิมพ์ เตรียมผงพลาสติกโดยการชั่งน้ำหนักตามที่ต้องการจากการคำนวณและเติมลงในแม่พิมพ์ หลังจากนั้นปิดฝาแม่พิมพ์แล้วนำมาวางบนแขนจับแม่พิมพ์ เพื่อล็อคแม่พิมพ์ให้แน่นแล้วเคลื่อนแม่พิมพ์เข้าสู่เตาอบเพื่อให้ความร้อน

2.3.1.2 การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ ในขณะที่แม่พิมพ์หมุนในสองทิศทางในเตาอบที่มีการให้ความร้อน ผนังแม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะมีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกแม่พิมพ์สู่ผงพลาสติกภายในจนพลาสติกหลอมเป็นของเหลวระหว่างการหมุนของแม่พิมพ์ เนื่องจากการหมุนพลาสติกหลอมจะเคลือบผนังแม่พิมพ์ภายในจนเป็นชั้นบาง ๆ เป็นรูปผลิตภัณฑ์และเมื่อความร้อนมาก

พอจะทำให้พลาสติกติดเป็นชั้นถัดๆ ไปลงบนพลาสติกชั้นแรกจนหมดและให้ความร้อนต่อเพื่อให้พลาสติกเชื่อมตัวติดกันในแต่ละชั้นและรวมกันเป็นเนื้อเดียวโดยพื้นผิวของชิ้นงานจะมีลักษณะเรียบหรือมีลวดลายตามลักษณะของแม่พิมพ์

2.3.1.3 การหล่อเย็น เมื่อพลาสติกหลอมสมบูรณ์แล้ว เครื่องจะทำการเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์จากออกจากเตาอบไปยังห้องหล่อเย็น ที่มีพัดลม เพื่อเป่าด้านนอกแม่พิมพ์จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงจุดก่อผลึกหรือกลายเป็นของแข็ง ในขณะให้หล่อเย็นแม่พิมพ์จะมีการหมุนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ความเย็นกระจายทั่วแม่พิมพ์และป้องกันการหดตัวของผลิตภัณฑ์

2.3.1.4 การปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ หลังจากหล่อเย็นแม่พิมพ์จะถูกเคลื่อนย้ายไปยังจุดปลดชิ้นงานและเตรียมแม่พิมพ์ให้พร้อมสำหรับการเริ่มขึ้นรูปอีกครั้ง

2.3.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงรูปร่างไม่ซับซ้อน ขนาดใหญ่และมีลักษณะพิเศษคือชิ้นงานที่มีลักษณะ 2 ชั้น เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนและแม่พิมพ์ราคาต่ำ รวมไปถึงลักษณะแม่พิมพ์ที่ไม่ซับซ้อนเท่ากระบวนการอื่นภายในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นไม่มีแรงดันและแรงเฉือนภายใน อีกทั้งชิ้นงานยังไม่มีรอยต่อระหว่างชิ้นหรือรอยตำหนิจากการถอดชิ้นงานและชิ้นงานที่ได้มีสามารถควบคุมความหนาได้จากปริมาณผงพลาสติกที่เติม กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นเหมาะในเชิงเศรษฐกิจเนื่องจากต้นทุนต่ำและวัสดุเสียน้อย เพราะสามารถควบคุมได้จึงมีแนวโน้วว่าจะมีกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นทุกปี

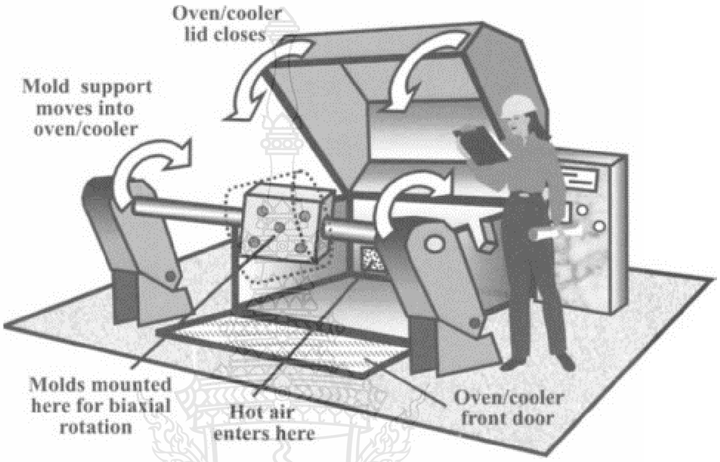
ข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนคือไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนของแม่พิมพ์สูงได้ เนื่องจากพลาสติกไม่สามารถไหลทั่วแม่พิมพ์และไม่เหมาสมสำหรับผลิตชิ้นงานที่มีชิ้นส่วนเล็ก ๆ หลายชิ้นมาประกอบกัน วัสดุที่ใช้ในกระบวนการค่อนข้างมีราคาสูงเนื่องจากจำเป็นต้องบดลงขนาดให้อยู่ในรูปผง ส่วนระยะเวลาในการผลิตชิ้นงานอาจช้ากว่ากระบวนการอื่นเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนใช้เวลาในการขึ้นรูปค่อนข้างนาน เนื่องจากในการผลิตให้อุณหภูมิค่อนข้างสูง จากนั้นต้องอยู่ในสภาวะอุณหภูมิปกติและในส่วนของการปลดชิ้นงานยังจำเป็นต้องมีการใช้สารช่วยปลดชิ้นงานและแรงงานคนอยู่ด้วย

2.3.3 ชนิดของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน [14]

เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนมีหลายรูปแบบแตกต่างกันไปโดยแต่ละแบบจะเหมาะสมกับการผลิตที่แตกต่างกัน

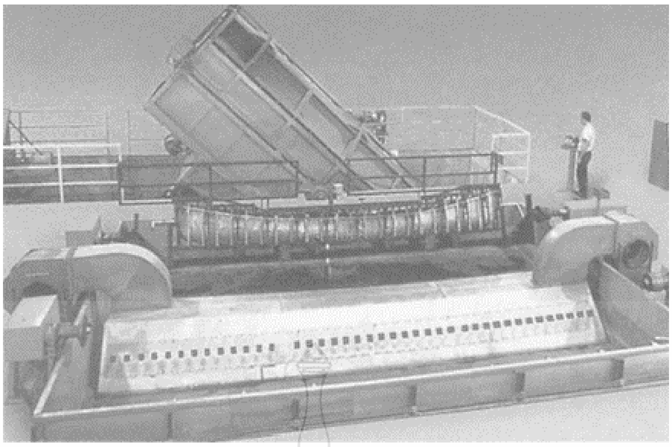
เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดฝาพับ (Clamshell) เป็นเครื่องที่มีการใช้พื้นที่น้อยเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีจำกัดแสดงดังรูปที่ 2.5 ลักษณะการทำงานของเครื่องนี้แม่พิมพ์จะถูกให้ความร้อนจนถึงเวลาที่กำหนดแล้วทำการหล่อเย็น โดยใช้พัดลมเป่าภายนอกแม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิต่ำลงหรืออาจจะใช้น้ำ

เป็นระบบหล่อเย็นก็ได้ โดยแม่พิมพ์ยังคงอยู่ในเตาอบและสามารถใช้ได้ทั้งสองแขนจึงสามารถผลิตชิ้นงานได้ทั้งขนาดใหญ่และเล็กขึ้นอยู่กับขนาดของเตาอบ โดยมีข้อดีคือการให้ความร้อนและการให้ความเย็นจะอยู่ภายในเตาอบเดียวกันจึงทำให้ใช้พื้นที่ติดตั้งเครื่องน้อย แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ใช้พลังงานมากกว่าแบบอื่น ๆ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงพอและลดลงต่ำในการหล่อเย็นแล้วเพิ่มอุณหภูมิเพื่อขึ้นรูปต่อเนื่อง



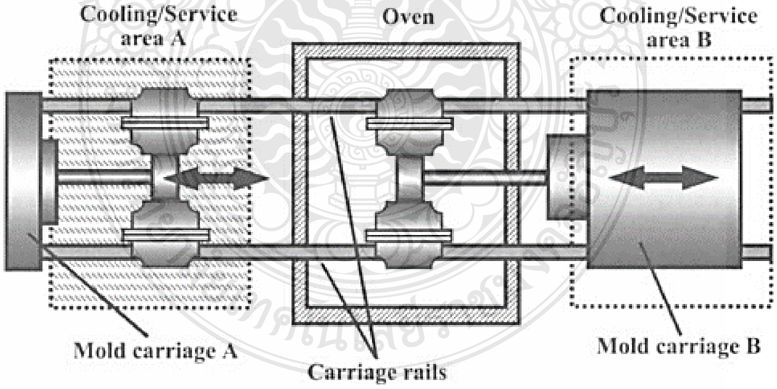
รูปที่ 2.5 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด ฝาหอย (Clamshell Rotational Molding Machine) [14]

เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแบบร็อคแอนด์โรล (Rock and Roll Machine) เป็นเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนที่ราคาไม่สูงมาก เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ เช่น ถังทรงกระบอก โดยจะมีการหมุนในแนวขนาดกับพื้น แสดงดังรูปที่ 2.6 ตัวเครื่องจะทำการกระดกทางซ้ายและขวาสลับกันทำมุมประมาณ 45 องศา โดยที่การหมุนรอบตัวเองจะมีความเร็วมากกว่าการกระดกและยังมีเครื่องอีกแบบเรียกว่า Rocking oven machine จะมีความคล้ายกันแต่แม่พิมพ์จะหมุนภายในเตาอบทำให้ลดการสูญเสียพลังงานความร้อนลงเหมาะสำหรับผลิตชิ้นงานยาวเรียว เช่น เสาไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.6 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด ร็อคแอนด์โรล (Rock and Roll Machine) [14]

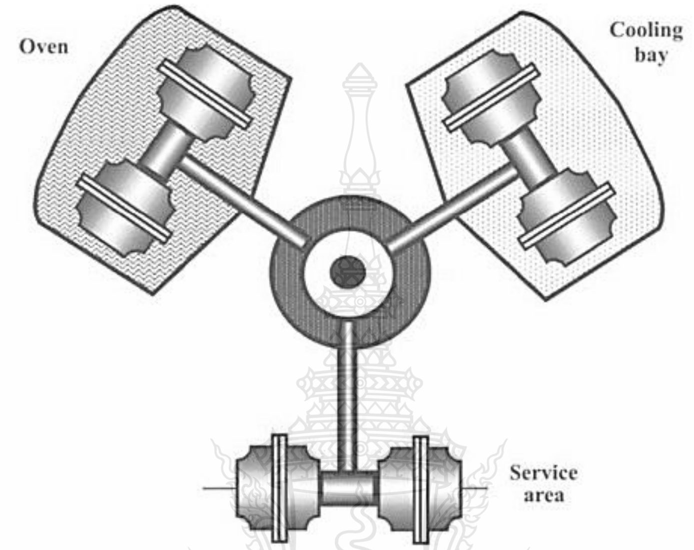
เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดกระสวย (Shuttle Style Machine) เป็นเครื่องที่ใช้งานได้ง่าย ราคาไม่สูงมาก ส่วนใหญ่จะใช้ผลิตถังหรือพาชนะขนาดใหญ่แสดงดังรูปที่ 2.7 ลักษณะการทำงานของเครื่องจะมีการเคลื่อนที่เข้าเตาอบแม่พิมพ์จะหมุนพร้อมให้ความร้อนจนถึงเวลาที่ตั้งไว้ แล้วเคลื่อนที่ออกจากเตาเพื่อทำการหล่อเย็นในขณะที่ แม่พิมพ์อีกตัวที่มีการใส่พลาสติกแล้วเคลื่อนที่เข้าสู่เตาอบต่อเนื่อง ซึ่งตัวเครื่องชนิดนี้สามารถมี 1 เตาอบและ 2 แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการผลิตได้



รูปที่ 2.7 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด กระสวย (Shuttle Style Machine) [14]

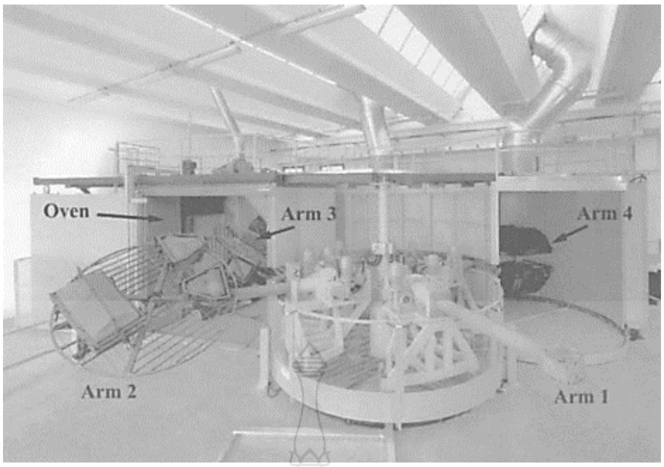
เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงชนิด แขนตรึง (Fix-Arm Turret Machines) เป็นเครื่องที่มีแขนสำหรับจับแม่พิมพ์แต่แม่พิมพ์สำหรับเข้าเตาอบ เตาหล่อเย็นและจุดปลดชิ้นงานจากแม่พิมพ์

แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยตัวเครื่องได้มีโปรแกรมสำหรับในแต่ละแขนโดยแม่พิมพ์ที่อยู่ในแต่ละแขนจะต้องมีรอบเวลา อุณหภูมิ การหล่อเย็นที่เข้ากันได้หากเกิดความแตกต่างระหว่างรอบของเวลาในแต่ละขั้นตอนอาจส่งผลต่อปริมาณที่จะผลิตได้ เครื่องชนิดนี้เป็นเครื่องที่นิยมมาในปัจจุบันให้ผลตอบแทนคุ้มค่า ผลิตได้จำนวนมากและซ่อมบำรุงรักษาสะดวก มีหลายแบบเช่น แบบ 3 และ 4 แขน เป็นต้น



รูปที่ 2.8 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงชนิด แขนตรึง (Fix-Arm Turret Machines) [14]

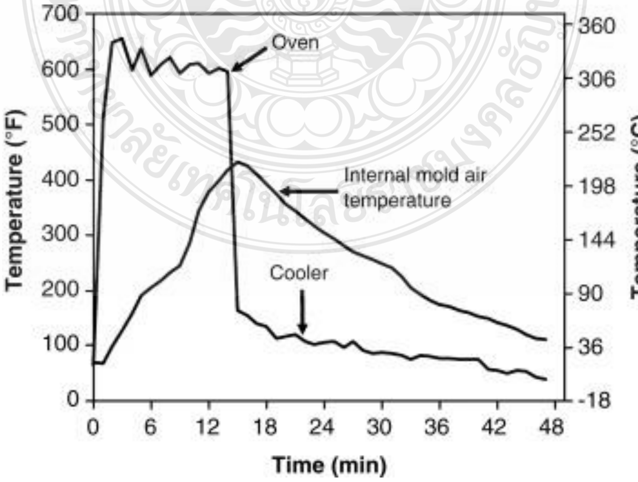
เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด แขนอิสระ (The Independent Arm Machine) เป็นเครื่องที่ปรับปรุงมาจากเครื่องแบบแขนตรึง ช่วยให้มีความยืดหยุ่นในการทำงานมากขึ้นมีการเพิ่มการทำงานอัตโนมัติเข้ามาและสะดวกในการผลิต จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงเครื่องแบบ 5 สถานี 4 แขน ประกอบด้วยสถานีให้ความร้อน สถานีหล่อเย็น 2 สถานี และสถานีปลดชิ้นงาน โดยแต่ละสถานีสามารถใช้วัสดุและแม่พิมพ์ต่างกันก็ได้ การเคลื่อนที่แต่ละแขนเป็นอิสระต่อกันคือไม่ต้องเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กัน แต่ละแขนจะเคลื่อนที่ตามที่กำหนดไว้หรือวางโปรแกรมไว้



รูปที่ 2.9 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด แขนอิสระ (The Independent Arm Machine) [14]

2.3.4 หลักการควบคุมการผลิต [15-16]

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนโดยทั่วไปจะมีการควบคุมกระบวนการด้วยอุณหภูมิและเวลาโดยแสดงดังรูปที่ 2.10 แสดงถึงกราฟอุณหภูมิที่วัดในระหว่างการขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนที่มีการขึ้นรูปแล้วมีการวัดอุณหภูมิภายนอกแม่พิมพ์และภายในแม่พิมพ์ โดยกระบวนการเริ่มจากการให้ความร้อนอุณหภูมิภายนอกและภายในมีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อแม่พิมพ์เข้าสู่เตาอบอุณหภูมิภายนอกแม่พิมพ์และเตาอบจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ โดยภายในเตาอบอุณหภูมิอาจสูงขึ้นอย่างไม่คงที่เนื่องจากการหมุนของแม่พิมพ์และการเคลื่อนที่ของลมร้อนจากทางเข้า เมื่อสิ้นสุดการให้ความร้อนอุณหภูมิภายนอกจะลดลงอย่างรวดเร็วเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการหล่อเย็นตามสภาวะที่ได้ตั้งไว้



รูปที่ 2.10 กราฟอุณหภูมิที่วัดได้ในระหว่างการขึ้นรูปของพอลิเอทิลีน [16]

ซึ่งมีการสังเกตจากอุณหภูมิภายในแสดงดังรูปที่ 2.11 แสดงถึงจุดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตระหว่างการขึ้นรูปที่จุด A ถึง C แสดงถึงช่วงการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์และจากจุด C ถึงจุด F แสดงถึงช่วงอุณหภูมิในการหล่อเย็นซึ่งจะสังเกตได้ว่าช่วงระยะเวลาในการหลอเย็นของกระบวนการมีระยะเวลานานกว่าขึ้นตอนอื่น ๆ โดยแต่ละช่วงคือ จุด A ผงพลาสติกเริ่มมีการติดบริเวณผิวในแม่พิมพ์

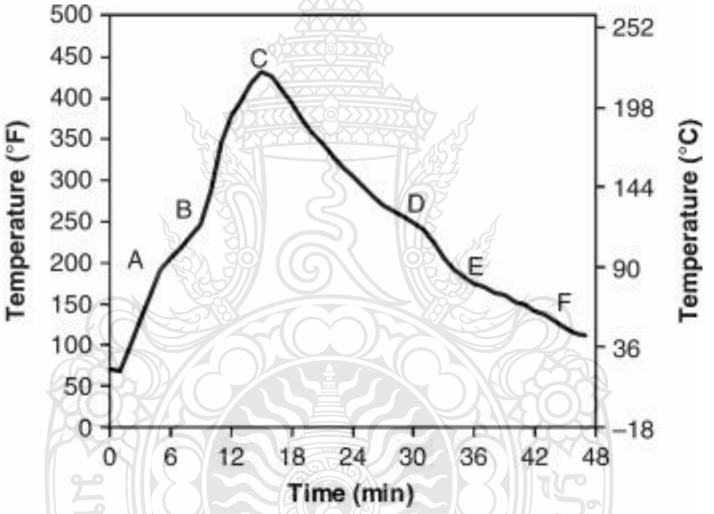
จุด B ผงพลาสติกติดผิวแม่พิมพ์จนสมบูรณ์

จุด C จุดสูงสุดของอุณหภูมิ

จุด D จุดที่มีการเกิดผลึกขึ้นของพอลิเมอร์

จุด E ชิ้นงานเริ่มมีการแยกตัวออกจากผิวแม่พิมพ์ภายใน

จุด F จุดที่เริ่มปลดชิ้นงาน



รูปที่ 2.11 กราฟอุณหภูมิในระหว่างการขึ้นรูปจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [16]

ขั้นที่ 1 พลาติกยังไม่เกิดการหลอมเนื่องจากอุณหภูมิยังไม่เพียงพอกับอุณหภูมิหลอมเหลว การไหลภายในแม่พิมพ์เป็นอิสระจนอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นคงที่จนถึงจุด A

ขั้นที่ 2 ที่จุด A พลาสติกหลอมจะเกิดการเกาะติดผนังแม่พิมพ์เป็นชั้นแรกโดยที่อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าลงเนื่องจากพลาสติกจะค่อย ๆ ก่อตัวเป็นชั้นที่สอง และชั้นต่อไปเนื่องจากผงพลาสติกจะดึงความร้อนเข้ามาใช้เพื่อหลอมละลายทำให้อุณหภูมิภายในลดลงทำให้วความร้อนที่เพิ่มขึ้นช้าลง

ขั้นที่ 3 ที่จุด B ผงพลาสติกทั้งหมดที่ถูกหลอมติดผนังแม่พิมพ์เป็นชั้น อุณหภูมิภายในจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งพลังงานความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์จะลดลงหลังจากผ่านจุด B ไปแล้ว อุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ พลาสติดที่หลอมเหลวจะคงตัวและฟองอากาศที่อยู่ระหว่างพลาสติกหลอมกับผงพลาสติกลดลง ผิวชั้นในเริ่มเรียบและมีความหนาแน่นสูงภายในแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิสูงสุดที่จุด C

ขั้นที่ 4 แม่พิมพ์จะถูกให้ความเย็นซึ่งอุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงจุด C เนื่องจากความร้อนของอากาศและพลาสติกยังคงเหลืออยู่ภายในและจะค่อย ๆ ลดลงจากการหล่อเย็นด้วยลมหรือน้ำถ้าอัตราการเย็นตัวเร็วไปจะทำให้พลาสติกเกิดการบิดตัว (Warpage Problem) ถ้าเย็นตัวช้าจะส่งต่อเวลาในการผลิตซึ่งเป็นผลแง่ลบทางเศรษฐศาสตร์ ในขั้นนี้พลาสติกยังคงหลอมเหลวเป็นชั้นที่ผนังแม่พิมพ์

ขั้นที่ 5 วัสดุบางชนิดเช่น พอลิเอทิลีนจะมีจุดหักมุม (Kink) เป็นจุดที่ทำให้เกิดผลึกตรงกับจุด D ความร้อนที่ถูกดูกลืนจะถูกถ่ายเทออกและอุณหภูมิภายในจะอยู่ในระดับคงที่ความยาวของกราฟช่วงจุด D-E ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการหลอมเหลวระหว่างจุด A-B พลาสติกเกาะกันลดลงเนื่องจากความร้อนทำลายความเป็นผลึกเนื่องจากว่าการเกิดผลึกได้ต้องใช้อุณหภูมิต่ำ

ขั้นที่ 6 ที่จุด E เส้นกราฟมีความแปรผันพลาสติกก่อตัวกันสร้างพันธะและกลายเป็นของแข็งโดยความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์ออกออกทำให้พลาสติกเริ่มเย็นตัว และความชันของกราฟเปลี่ยนไป ณ จุดที่ F พันะระหว่างพลาสติกจะจับตัวกันเองแต่จะไม่ติดผนังแม่พิมพ์

2.4 สมบัติของอนุภาคผงพลาสติก (Powder Properties)

เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจำเป็นต้องใช้วัสดุที่อยู่ในรูปแบบอนุภาคผงเพื่อจะสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ ลักษณะเฉพาะและสมบัติของอนุภาคผงเป็นสิ่งจำเป็นมากที่สุดในการขึ้นรูป โดยทั่วไปจะมีลักษณะทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่น และยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพได้ เช่น การไหลและกลไกของอนุภาคระหว่างที่อยู่ในแม่พิมพ์ การส่งผ่านความร้อนหรืออัตราความร้อนระหว่างอนุภาคอนุภาคด้วยกันเองลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน การกระจายความหนารวมไปถึงสมบัติทางกล ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับสมบัติของผงในการขึ้นรูปแบบหมุน

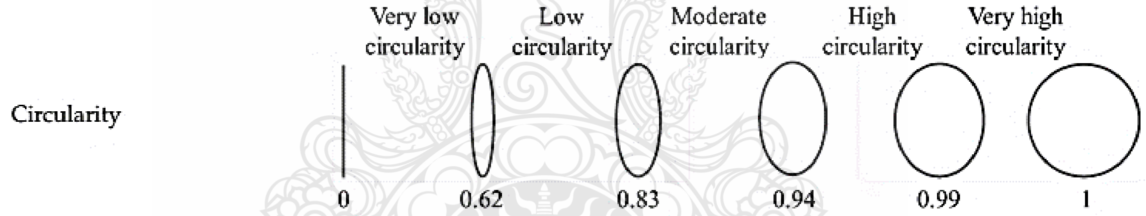
2.4.1 ขนาดและรูปร่างผงพลาสติก (Size and Shape of Plastic powder) [16]

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ขนาดของอนุภาคเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการควบคุมกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ในกรณีที่รูปร่างของอนุภาคเหมือนกัน เนื่องมากจากอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิว (Surface area) มากกว่าปริมาตรของอนุภาค ในสภาวะของแข็งอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะมี

พื้นที่ของช่องว่างมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อได้รับความร้อนอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้จึงง่ายต่อการส่งผ่านความร้อนระหว่างตัวอนุภาคกับอนุภาคด้วยกันเองมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เป็นเหตุให้อนุภาคมีการหลอมเป็นของเหลวไวกว่า ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่มีปริมาณพื้นที่ช่องว่างมากกว่าทำให้การหลอมเหลวช้ากว่ามาก

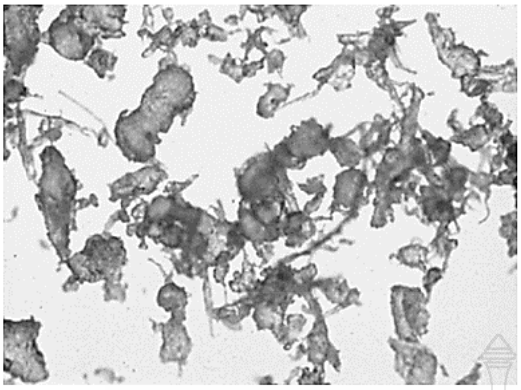
ในส่วนของรูปร่างได้มีการศึกษาถึงค่าความกลม การวัดความกลมคำนวณจากอัตราส่วนของพื้นที่ (Area) กับเส้นรอบวงของอนุภาค (Perimeter) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ในการคำนวณค่าของความกลมซึ่งตัวเลขที่ได้จะสามารถแสดงเป็นค่าตัวเลขที่อยู่ในช่วง 0-1 ตัวเลขที่น้อยแสดงถึงรูปที่มีลักษณะเส้นหรือเป็นวงส่วนเมื่อตัวเลขเข้าใกล้เลข 1 แสดงถึงรูปร่างที่มีลักษณะกลมสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 2.12 เพื่อให้สามารถใช้พารามิเตอร์นี้ได้อย่างมีความหมายจำเป็นต้องมีการวัดเส้นรอบวงที่แม่นยำ [17-18]

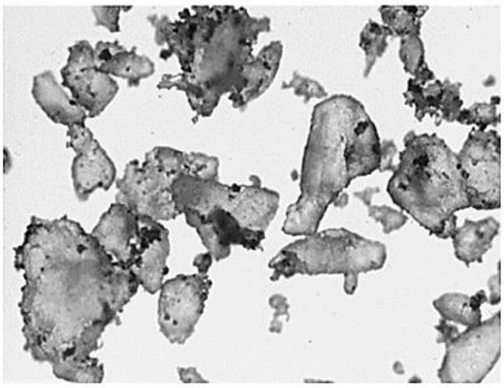
$$Circularity = 4\pi\left(\frac{Area}{Perimeter^2}\right) \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.12 ลักษณะรูปร่างเปรียบเทียบกับค่าความกลม [17]

รูปร่างของอนุภาคตัวบ่งชี้ทางสัณฐานวิทยาต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนพบว่าอนุภาคที่มีลักษณะรีหรือทรงกลมจะเหมาะสมมากกว่าเนื่องมาจากมีความหนาแน่นในการรวมตัวและการสัมผัสระหว่างอนุภาคมากกว่าอนุภาคที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมหรืออนุภาคที่มีปลายยื่นออกมาหรือหาง (Tail) แสดงดังรูปที่ 2.13 และอนุภาคที่มีปลายยื่นออกมามีการขัดขวางการสัมผัสระหว่างอนุภาคกับอนุภาคเป็นเหตุให้เกิดพื้นที่ว่างระหว่างอนุภาคผงมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการหลอมเหลวช้าลงยังอีกยังเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานที่ได้มีรูพรุน

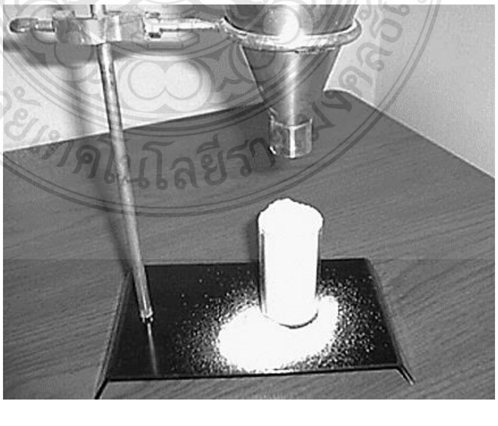




2.13 ลักษณะอนุภาค ซ้ายอนุภาคที่มีหาง (Tail) และขวาอนุภาคที่ไม่มีหาง [6]

2.4.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) [16]

ค่าความหนาแน่นรวมใช้ในการวัดถึงประสิทธิภาพของการไหลภายในกระบอกที่ทราบปริมาตรที่วางข้างใต้กรวยทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2.14 โดยที่อนุภาคที่ดี (ไม่มีหาง) จะมีค่าความหนาแน่นรวมสูงเนื่องมาจากรูปร่างและการกระจายขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นรวมยังสัมพันธ์กับการไหลของอนุภาคเมื่อความหนาแน่นรวมสูงขึ้นอัตราการไหลก็จะสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่การกระจายขนาดสามารถมีผลต่อค่าความหนาแน่นรวม เมื่อมีการผสมกันระหว่างอนุภาคละเอียดและอนุภาคหยาบเข้าด้วยกันผลลัพธ์ที่ได้จะมีสองลักษณะ หนึ่งค่าความหนาแน่นรวมลดลงถ้าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักอนุภาคละเอียดมากกว่าสามเท่าของอนุภาคหยาบ เนื่องจากอนุภาคละเอียดจะแบ่งอนุภาคหยาบให้กระจายตัวกัน สองค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้น ถ้าอนุภาคละเอียดเอาไปเติมใส่ส่วนช่องว่างของอนุภาคใหญ่



รูปที่ 2.14 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นของเนื้อ [16]

2.4.3 การไหลแบบแห้ง (Dry Flow) [16]

สมบัติการไหลแบบแห้งของอนุภาคผงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งสมบัติการไหลนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์โดยที่อนุภาคผงที่มีขนาดเล็กหรือมีรูปร่างเรียบกลมจะไหลไปตามช่องทางการไหลได้ดี หากผงมีขนาดใหญ่ขึ้นไปมีแนวโน้มที่จะมีการไหลแตกต่างกันมากในส่วนของรูปร่างที่มีผลต่อการไหลอนุภาคที่มีส่วนของหางส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลง ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้คุณสมบัติของชิ้นงานลดลงเช่นการเกิดการหลอมติดกันของส่วนที่เป็นหางทำให้ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นที่ผิวชิ้นงาน เครื่องมือการทดสอบการไหลแบบแห้งแสดงดังรูปที่ 2.15

รูปที่ 2.15 เครื่องมือในการวัดความหนาแน่นรวมและการไหลแบบแห้ง [16]

2.4.4 อัตราการอัดตัวของผง (Hausner Ratio) [19-20]

Hausner Ratio (HR) เป็นหนึ่งวิธีการวัดเพื่อคาดการณ์ถึงอนุภาคผงที่ถูกบีบอัดและแสดงถึงปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคแต่ละอนุภาคซึ่งมีความสำคัญสำหรับอนุภาคผงที่เคลื่อนที่เป็นอิสระหรือมีการเกาะเป็นกลุ่มกัน โดยมีการวัดจากความหนาแน่นรวมเทียบกับความหนาแน่นหลังผ่านการเคาะเป็นค่าความสัมพันธ์ของความสามารถในการไหลของอนุภาคที่สามารถอธิบายถึงความสามารถของอนุภาคขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ผ่านอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$\mathrm{HR} = \frac{\rho T}{\rho B} \tag{2.2}$$

ที่ ρB คือค่า ความหนาแน่นรวมของอนุภาคผงและ ρT คือ การเคาะของผงที่ทำการหาความหนาแน่นรวมซึ่งได้จากปริมาณคความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงคงที่และต่อเนื่อง เมื่อคำนวณค่า H ได้แล้วนำมาเปรียบเทียบกับตารางลักษณะการไหล ตางรางที่ 2.1 โดยใช้เครื่องทดสอบความหนาแน่นรวมมีวิธีการทดสอบดังนี้

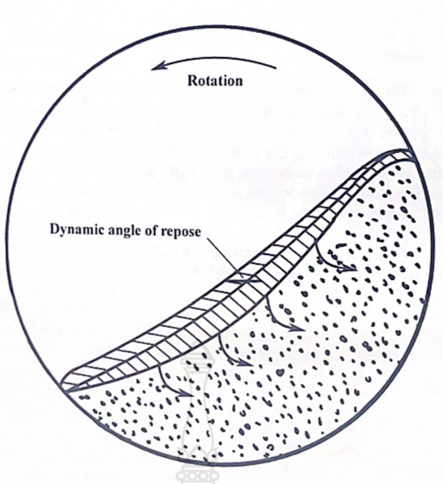
ตารางที่ 2.1 ตารางลักษณะการไหลเทียบกับอัตราการอัดตัว (Hausner ratio)

Flow Character	Hausner ratio
Excellent	1.00-1.11
Good	1.12-1.18
Fair	1.19-1.25
Passable	1.26-1.34
Poor	1.35-1.45
Very poor	1.46-1.59
Very, very poor	>1.6

2.4.5 การไหลของอนุภาคผง (Powder Flow) [13]

ในการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นมีการใช้ความเร็วรอบในการหมุนของแม่พิมพ์ที่ต่ำโดยทั่วไปจะมีความเร็ว 4-20 รอบต่อนาที ในความเร็วในการหมุนที่ช้านี้ทำให้อนุภาคผงเกิดการกองรวมกันที่บริเวณก้นแม่พิมพ์ตั้งแต่นช่วงต้นของการให้ความร้อน พฤติกรรมการไหลของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนถูกแบ่งออกเป็นการไหลแบบคูลอมบ์และการไหลของผงพลาสติกแบบหนืด โดยการไหลแบบคูลอมบ์เป็นการไหลที่อนุภาคที่สำคัญในการทำให้ผงพลาสติกเกาะติดกันอย่างต่อเนื่องซึ่งแรงดึงดูดจะถูกต้านด้วยกันเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคผง โดยสภาวะการเคลื่อนที่ของอนุภาคผงพอลิเมอร์จะถูกแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

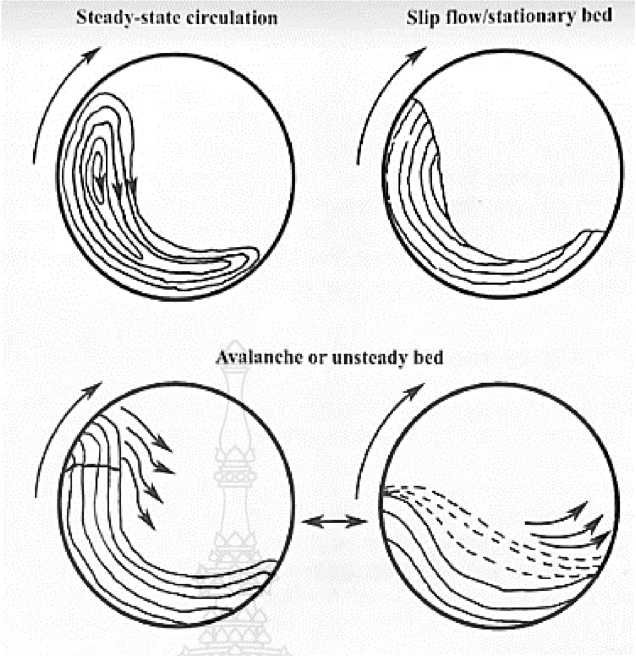
การไหลแบบคงที่ (Steady-state Circulation) เป็นการไหลที่อนุภาคผงพลาสติกที่ก้นแม่พิมพ์เกิดการเคลื่อนที่ตามผนังแม่พิมพ์จนกระทั้งมวลของอนุภาคผงเกินมุมของการเกาะผนังแม่พิมพ์ โดยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีมุมอยู่ที่ 25 และ 50 องศา ตามแนวนอน แสดงดังรูปที่ 2.16 ที่จุดนี้อนุภาคผงที่เกาะตามผนังแม่พิมพ์จะเกิดการแยกตัวจากผนังแม่พิมพ์และตกลงสู่ก้นแม่พิมพ์ซึ่งการไหลแบบนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องหรือจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแม่พิมพ์ ซึ่งการเกิดพฤติกรรมการไหลแบบคงที่จากการที่อนุภาคมีลักษณะกลมหรือค่อนข้างกลมทำให้มีการไหลที่ดี



รูปที่ 2.16 แนวองศาการแยกตัวของอนุภาคผงจากผิวแม่พิมพ์ในการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ [13]

การไหลแบบลื่นไถล (Slip flow) จะเกิดขึ้นเมื่อผิวของแม่พิมพ์มีความเรียบส่งผลให้แรงเสียดทานต่ำระหว่างแม่พิมพ์ที่มีการขัดผิวอย่างดีกับอนุภาคผง เมื่อแม่พิมพ์มีการหมุนอนุภาคผงที่ติดผนังแม่พิมพ์ขึ้นไปจนถึงจุดหนึ่งแรงเสียดทานไม่สูงพอที่จะรับน้ำหนักของอนุภาคผงส่งผลให้อนุภาคที่ติดแม่พิมพ์จะเกิดการลื่นไหลลงมากองด้านล่างภายในแม่พิมพ์คล้ายกับอนุภาคม้วนตัวลงมา

การไหลแบบหิมะถล่ม (Avalanching) เป็นการไหลคล้ายกับการที่หิมะถล่มเริ่มจากในระหว่างการหมุนอนุภาคผงที่ติดกับบริเวณผนังแม่พิมพ์จะถูกยกขึ้นตามการหมุนของแม่พิมพ์จนเมื่อเกินแรงเสียดทานที่รองรับอนุภาคผงจะแตกออกจากผิวแม่พิมพ์และลงมาผสมกับกลุ่มของผงที่กองด้านล่างภายในแม่พิมพ์ (Powder bed) ดังรูปที่ 2.17 สำหรับการไหลแบบหิมะถล่ม ในทางกลับกันกลุ่มผงที่กองเกาะติดกับด้านล่างผนังแม่พิมพ์ก็จะเคลื่อนที่ตามแม่พิมพ์ไปและถล่มลงมาซ้ำๆกันเรื่อยในระหว่างการหมุนจนกระทั่งสิ้นสุดการให้ความร้อนในกระบวนการ การเกิดการไหลแบบหิมะถล่มจะพบได้กับอนุภาคผงที่มีการติดกันหรือมีการไหลที่ไม่ดีดังนั้นการไหลแบบหิมะถล่มเป็นการไหลที่ไม่คงที่



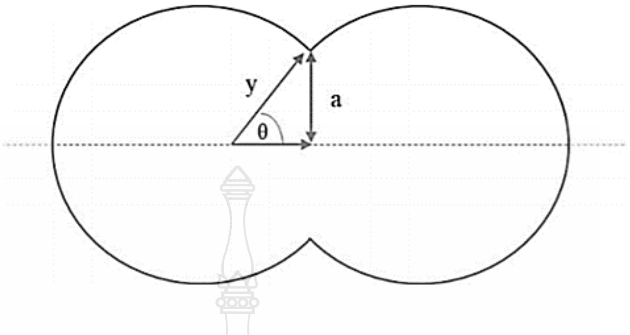
รูปที่ 2.17 พฤติกรรมการไหลภายในแม่พิมพ์ [13]

2.4.5 อัตราการหลอมภายใต้สภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ (Sintering rate)

อัตราการหลอมของพลาสติกเป็นบทบาทหลักสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ส่งผลไปยังกระบวนการผลิตและสมบัติของชิ้นงาน อัตราการหลอมไม่สมบูรณ์ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดรูพรุนและสมบัติทางกลต่ำลง รอยต่อระหว่างผิวที่หลอมติดกันระหว่างพลาสติกกับพลาสติกและพลาสติกกับแม่พิมพ์และมุมประสานระหว่างอนุภาค ทั้งสามนี้เป็นปัจจัยของพฤติกรรมการหลอม ในระหว่างการหลอมความร้อนจะทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงโดยการลดพื้นที่ผิว ซึ่งสามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของรอยเชื่อมระหว่างสองอนุภาค “y” หารด้วยรัศมีของอนุภาค “a” แสดงดังรูปที่ 2.18 กระบวนการหลอมสมบูรณ์จะเกิดเมื่อค่าของ y หาร a เข้าใกล้ 1 โดยเวลาในการหลอมรวมกันสามารถคำนวณหรือควบคุมได้จากเวลาในการให้ความร้อนของกระบวนการผลิต [21]

และอีกปัจจัยหลักอีกหนึ่งอย่างคือความหนืด ความหนืดเป็นปัจจัยหลักสำหรับสมบัติการไหลเนื่องจากการต้านทานการไหลของพลาสติกหลอม จากหลายการทดลองได้มีการยืนยันหากความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การขยับของโมเลกุลเป็นไปได้ยากทำให้อัตราการหลอมลดลง แต่ปัญหานี้สามารถลดได้โดยการปรับขนาดลองอนุภาค อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปแบบหมุนอุณหภูมิไม่เท่ากันตลอดทั้งกระบวนการ จึงจำเป็นต้องรู้ถึงความหนืดของพลาสติกที่ไม่มีความเค้นมากระทำ ความยืดหยุ่นของของเหลวมีความสำคัญในการหลอมเช่นกัน หากพลาสติกมีความยืดหยุ่นของของเหลวสูง จะทำให้อัตรา

การหลอมลดช้าลงจึงทำให้ยากต่อการขึ้นรูป การกระจายความหนาไม่สม่ำเสมอและทำให้มีฟองอากาศในชิ้นงาน [22-23]



รูปที่ 2.18 ลักษณะการหลอมของผงพลาสติก [14]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.Song และคณะ [24] ได้ศึกษาโดยใช้ PE เกรดสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน ที่เคยใช้มาบดซ้ำ และนำมาผสมกับ PE ใหม่เกรดสำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน อัตราส่วน 15, 30 และ 100 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยมีการบดพลาสติกซ้ำ 1 ถึง 4 ครั้ง และมีการทดสอบสมบัติเชิงกลรวมถึงการทดสอบแรงกระแทก ณ อุณหภูมิต่ำ ทดสอบแรงดึงและการทนต่อแรงกระแทก โดยใช้ PE ความหนาแน่น 0.935 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาด 73x52x21 เซนติเมตร ใช้ PE 4 กิโลกรัม โดยจะได้ความหนาชิ้นงานเฉลี่ยที่ 3.6 มิลลิเมตร PE ที่ผ่านการบดด้วยเครื่อง Grinder และแยกขนาดด้วย Sieve ขนาดรู 0.5 มิลลิเมตร โดยนำมาทดสอบการทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้ชิ้นงานขนาด 125x125 มิลลิเมตร ทดสอบที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสทดสอบ 20 ครั้ง และการทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D256 ใช้ค้อน 0.907 กิโลกรัม ทดสอบการทนต่อแรงดึงที่อุณหภูมิห้องใช้ gauge length 50 มิลลิเมตร ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที ตามมาตรฐาน ASTM D638 ใช้ดัมเบล type 1 และทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC และ TGA โดย DSC ใช้ heat rate ที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ของ TGA และทดสอบความหนืดด้วย Rheometrics Mechanical Spectrometer ตามาตรฐาน ASTM D1238 โดยมีผลการศึกษาเมื่อปริมาณ PE ที่ผ่านการบดเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดในรอบที่สองและรอบต่อ ๆ ไปลดลงและพบว่าสีของพลาสติกมีการเปลี่ยนไปและสมบัติทางกลลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพ และเมื่อนำพลาสติกที่บดแล้วมาผสมกับพลาสติกใหม่ที่ 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สมบัติดีขึ้นเล็กน้อย

Greco A. และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการรีไซเคิลขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (rHDPE) เกรดเป่าขึ้นรูปผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ในการขึ้นรูปแบบ

หมุน โดยมีอัตราส่วนการผสม 12.5, 30, 55, 70 และ 85 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยการผสมผ่านเครื่องอัดรีดและเข้าสู่การตัดเม็ดและบดละเอียดโดย LLDPE มีขนาดอนุภาค 150-450 ไมโครเมตร และ rHDPE มีขนาดใหญ่กว่า 1.5 เท่า โดยมีการขึ้นรูปแบบหมุนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาสมบัติทางความร้อน การไหล ทางกลและลักษณะสัณฐานวิทยา ผลการทดลองทางความร้อนและการไหลพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ rHDPE และสูตรที่มีการผสมกับ LLDPE มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผสมของ rHDPE ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LLDPE เช่นเดียวกันกับอัตราการไหลมีค่าลดลงตามปริมาณของ rHPDE ที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการไหลของ rHDPE/LLDPE ที่อัตราส่วน 12.5 ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 4 กรัมต่อ10นาที ซึ่งเท่ากับ LLDPE จึงมีการใช้อัตราส่วนนี้ในการขึ้นรูปแบบหมุน ลักษณะสัญฐานวิทยาพบว่าอนุภาค rHDPE มีการกระจายตัวภายในเนื้อของ LLDPE ซึ่งสังเกตุได้จากสีที่ต่างกันเนื่องจากการความหนืดที่สูงกว่าของ rHPDE ขัดขวางการไหลและการผสมกันของ LLDPE และสมบัติทางกลพบว่าอัตราส่วน rHDPE/LLDPE 12.5 ร้อยละโดยน้ำหนักส่งผลให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นที่ 30% และความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 20% เมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE

López R. G. และคณะ [26] ได้มีการศึกษาการใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเพื่อผลิตโดยใช้ส่วนผสมของโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และโพลิเอไมด์ 6 (PA6) ที่มีอัตราส่วน 0, 10, 20 และ 30% โดยปริมาตร ที่มีและไม่มีสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Surlyn 9020) ด้วยการผสมสองวิธีการผสมแบบแห้งในเครื่องผสมแรงเฉือนสูงและการผสมแบบหลอมเหลวผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตามด้วยและบดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจึงได้มีการขึ้นด้วยการอัดขึ้นรูป สำหรับการขึ้นรูปแบบหมุน มีการใช้น้ำแข็งแห้ง เพื่อสร้างบรรยากาศเฉื่อยในแม่พิมพ์และสภาวะจากอุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์ชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีการทดสอบสมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยาและเชิงกล ผลการวิจัยพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่มีการผสมแบบหลอมเหลวสามารถทำให้อนุภาคผง PA6 ขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในเนื้อ LLDPE ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีความละเอียดยิ่งขึ้นนำไปสู่การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีสารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่พบว่าเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการอัดรูป

Chaisrichawla S. และ Dangtungee R. [27] ได้มีการเลือกใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (rHDPE) จากกระบวนการเป่าเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการใช้เยอะและหาได้ไม่ยาก จึงได้มีการผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่อัตราส่วน 50, 60, 70, 80, 90, 100 ร้อยละโดยน้ำหนัก สำหรับการผลิตถังบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน จากการศึกษาอัตราส่วนการผสมมีการทดสอบพบว่า LLDPE มีความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสสูงว่า rHDPE ในกรณีสูตรการผสมพบว่าปริมาณการเติม rHDPE เพิ่มขึ้นส่งผลให้การทนต่อแรงดึงลดลง การทดสอบแรงกระแทก LLDPE

มีการทนต่อแรงกระแทกต่ำกว่า rHDPE และเมื่อผสมกันพบว่ามีการทนต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นตาม rHDPE การทดสอบความแข็งพบว่าความแข็ง LLDPE มากกว่า rHDPE และเมื่อผสมกันความเข็งจะลดลงตามปริมาณ rHDPE ที่เพิ่มขึ้นและการทดสอบอัตราการไหลพบว่า LLDPE มีอัตราการไหลสูงกว่า rHDPE และสูตรการผสมส่งผลให้อัตราการไหลลดลงตาม rHPDE ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนอัตราการไหลที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 2-10 กรัม/10นาที ส่งผลให้การผสมที่อัตราส่วน 50-90 ร้อยละโดยน้ำหนักเหมาะสมกับการขึ้นรูปแบบหมุนและการทดสอบลัษณะสัณฐานวิทยาพบว่าการผสมของทั้งสองวัสดุมีการเข้ากันได้ดีแต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ rHDPE จะพบรอยประสานของผิวและรอยแตกจาก rHDPE

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์สำหรับรีไซเคิลขยะพลาสติกและโฟมเพื่อนำมาขึ้นรูปใหม่ โดยศึกษาการเตรียมขยะจากพลาสติกและโฟมเพื่อสามารถนำมาขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding) จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดและขั้นตอนเป็นลำดับดังนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานการรีไซเคิลขยะพลาสติกและโฟมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแบ่งรายละเอียดการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ						
	2563						2564
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย	ธ.ค.	ม.ค.-ธ.ค.
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	⇠⇢ ↔	⇠⇢ ↔					
2. รวบรวมข้อมูลและวางแผนดำเนินงาน			⇠⇢ ↔	⇠⇢ ↔	↔		
3.จัดทำโครงงานนำเสนอปริญญานิพนธ์จัดหา			⇠⇢	⇠⇢ ↔	⇠⇢ ↔	↔	

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน (ต่อ)

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ						
	2563						2564
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย	ธ.ค.	ม.ค.-ธ.ค.
4. จัดหาวัตถุดิบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง							
5. เตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมในการขึ้นรูป							
6. ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุแต่ละชนิด							
7. ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละชนิด							

แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ			
	2565	2566		
	ม.ค.-ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี .ค.
8.ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของชิ้นงาน				
9. รวบรวมผลเพื่อวิเคราะห์ผล				

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน (ต่อ)

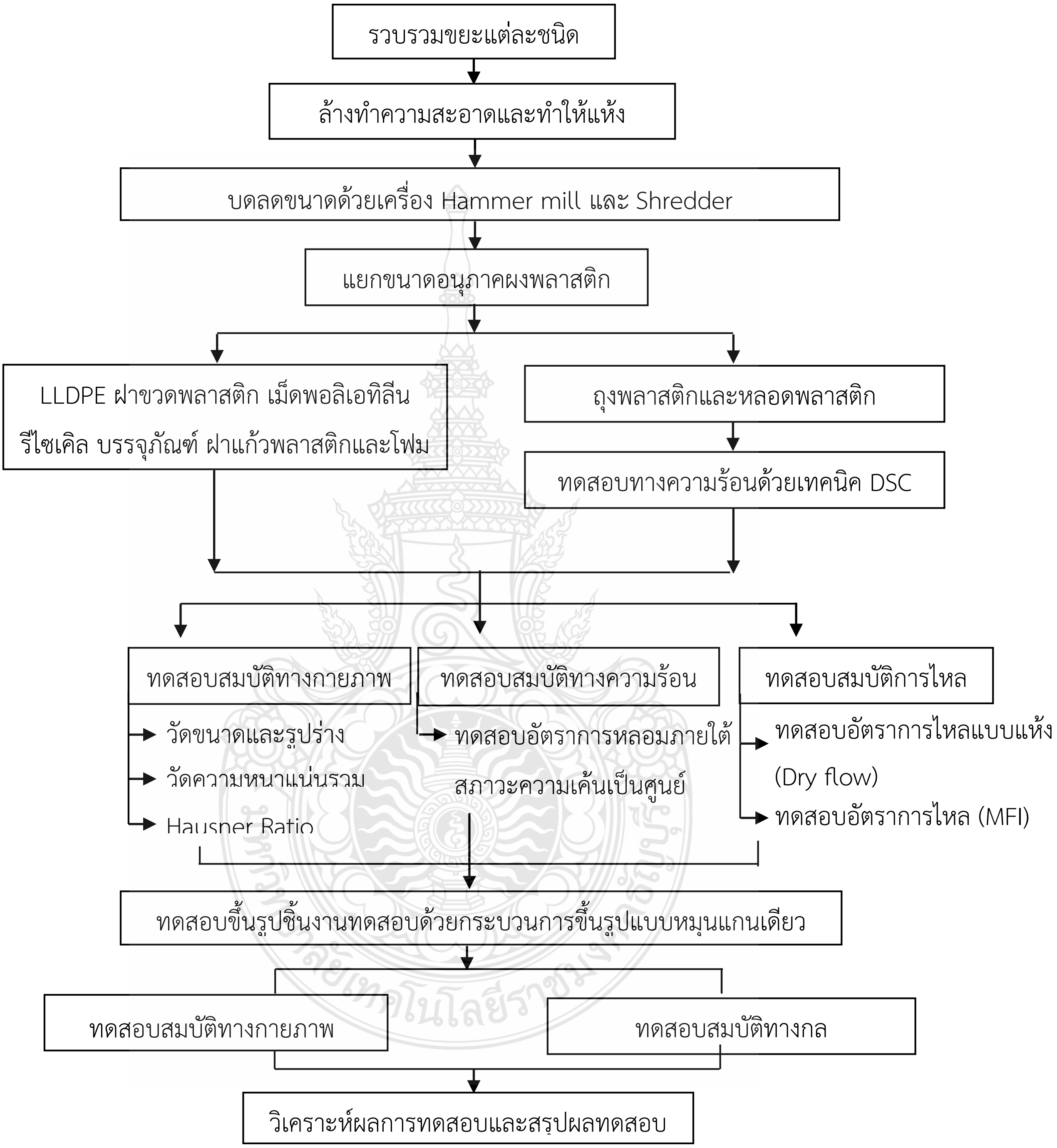
แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ														
	2565												2566		
	ม.ค.-ธ.ค.												ม.ค.	ก.พ.	มี .ค.
10.รอการเผยแพร่งานวิจัย															
11. สรุปงานวิจัย จัดทำรูปเล่มและเอกสารยื่นสอบ															

หมายเหตุ : ◄- - - - - -► แสดงแผนการดำเนินงานที่วางแผนไว้

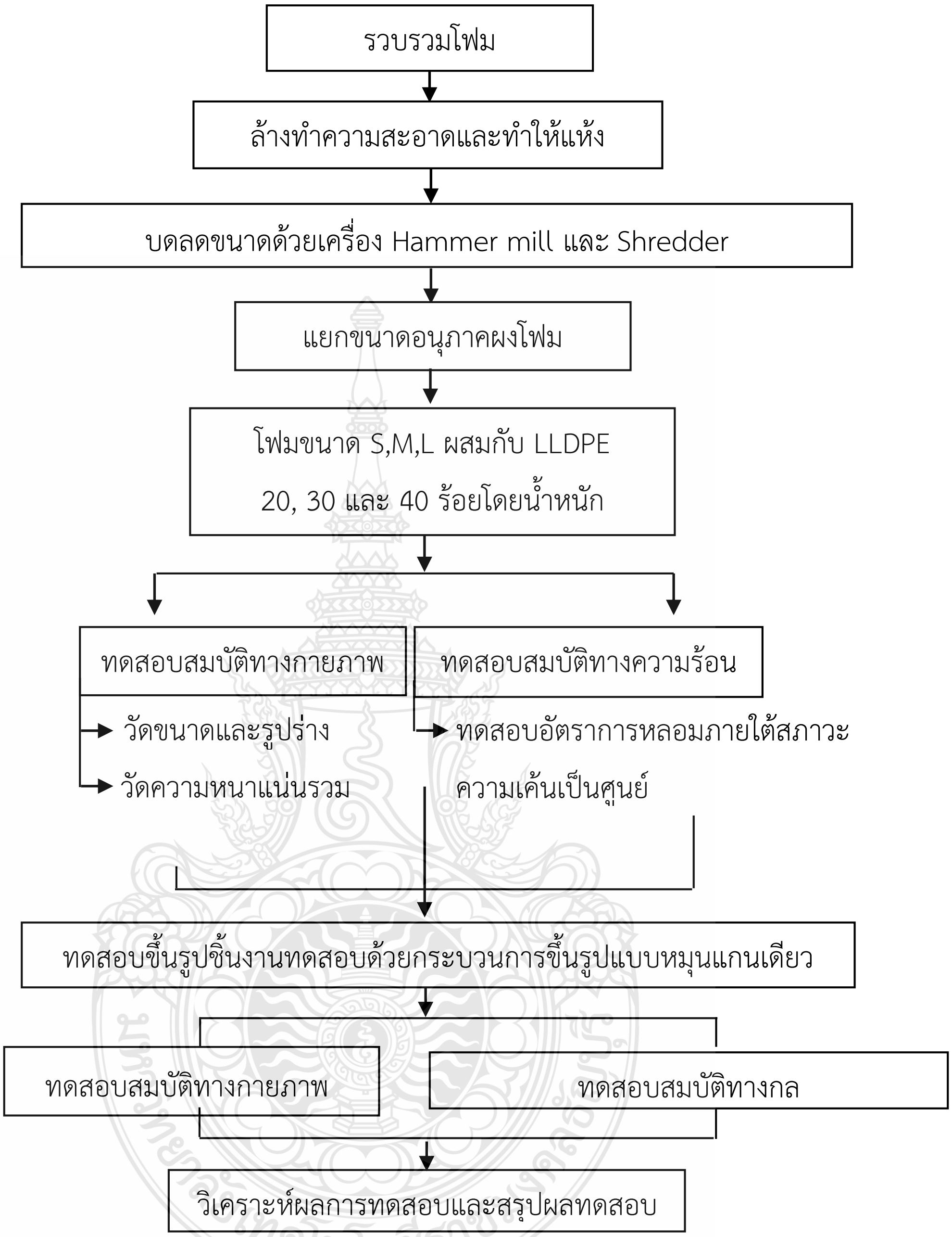
◄────► แสดงการดำเนินงานที่ปฏิบัติจริง

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 ในงานวิจัยได้มีการดำเนินงานมีขั้นตอนการดำเนินงานตามแผนภูมิ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานการรีไซเคิลขยะพลาสติกใช้แล้วทิ้งทุกชนิด



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานการรีไซเคิลโฟมพอลิสไตรีน

3.3 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1) ฝาขวดน้ำพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงตามสัญลักษณ์รีไซเคิลหมาลเลข 2

รูปที่ 3.3 ฝาขวดน้ำพลาสติกผ่านการใช้งานแล้ว

2) หลอดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

รูปที่ 3.4 หลอดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

3) ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

รูปที่ 3.5 ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

4) บรรจุภัณฑ์พลาสติกผ่านการใช้งานแล้วที่ผลิตจากพอลิพรอพิลีนตามสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 5

รูปที่ 3.6 บรรจุภัณฑ์พลาสติกผ่านการใช้งานแล้ว

5) ฝาแก้วพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วที่ผลิตจากพอลิสไตรีนตามสัญลักษณ์หมายเลข 6

รูปที่ 3.7 ฝาแก้วพลาสติกผ่านการใช้งานแล้ว

6) เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการรีไซเคิลแล้ว

รูปที่ 3.8 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการรีไซเคิลแล้ว

7) โฟมผ่านการใช้งานแล้วที่ผลิตจากพอลิสไตรีนตามสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 6

รูปที่ 3.9 โฟมผ่านการใช้งานแล้ว

8) ผงพลาสติกความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene) เกรด LL9641 จากบริษัท PTT POLYMER MARKETING COMPANY LIMITED (PTT PM)

รูปที่ 3.10 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)

3.3 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1) เครื่องบดชนิดเพลาเดี่ยว (Single shaft Shredder) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปที่ 3.11 เครื่องบดชนิดเพลาเดี่ยว (Single shaft Shredder)

2) เครื่องบดชนิดละเอียดชนิดค้อนเหวี่ยง (Pulverizer) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปที่ 3.12 เครื่องบดชนิดละเอียดชนิดค้อนเหวี่ยง (Pulverizer)

3) เครื่องขัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) รุ่น FRITSCH และตะแกรง (Sieve) ขนาด 2000, 800 และ 200 ไมโครเมตร ผลิตจากประเทศ Germany

รูปที่ 3.13 เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) และตะแกรง (Sieve)

4) เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Difference Scanning Calorimeter, DSC) รุ่น NETZSCH model DSC 200 F3

รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Difference Scanning Calorimeter, DSC)

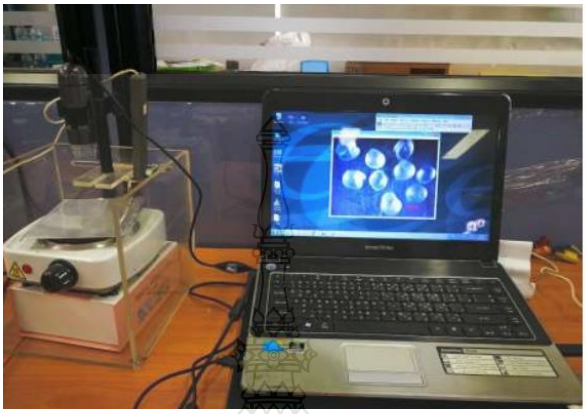
5) กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล (Digital Microscope) รุ่น S04-600X กำลังขยาย 25X-600X อัตราการปรับภาพ 0-40 มิลลิเมตร พร้อมกับคอมพิวเตอร์และโปรแกรมวิเคราะห์ขนาด ImageJ

รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล (Digital Microscope) รุ่น S04-600X

6) เครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow) และ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) รุ่น CEAST สำหรับวิเคราะห์อนุภาคผงที่ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

7) เตาให้ความร้อน (Hot Plate) สามารถให้ความร้อนคงที่และสามารถปรับอัตราการให้ความร้อนได้ 6 ระดับ ปรับอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 350 องศาเซลเซียส พร้อมต่อกับกล้องอิเล็กทรอนิกส์สำหรับบันทึกภาพ



รูปที่ 3.17 เตาให้ความร้อน (Hot Plate)

8) เครื่องทดสอบการไหลแบบแกนเดียวด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus) พร้อมเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปที่ 3.18 เครื่องขึ้นรูปแบบแบบหมุนแกนเดียวเดียว (Axial Powder Flow Apparatus)

9) เครื่องวัดเวอร์เนียคาลิปเปอร์ดิจิตอล (Vernier Caliper) ความละเอียด 1/128 นิ้ว จาก บริษัท MIT TEK

รูปที่ 3.19 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ดิจิตอล (Vernier Caliper)

10) เครื่องวัดความแข็งที่ผิวชิ้นงาน (Durometer) และสเกล D (Shore D)

รูปที่ 3.20 เครื่องวัดความแข็งที่ผิวชิ้นงาน (Durometer) และสเกล D (Shore D)

11) เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น C110097 จากบริษัท HOUNSFIELD พร้อมหัวจับชิ้นงานทดสอบการกดอัด

รูปที่ 3.21 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.4.1 การเตรียมขยะพลาสติกและโฟมชนิดพอลิสไตรีน

เนื่องจากพลาสติกและโฟมที่รวบรวมได้มีสิ่งสกปรกจึงทำการนำขยะที่รวบรวมได้มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและตากในที่ร่ม เนื่องจากการนำไปตากในที่มีแดดจะทำให้พลาสติกและโฟมมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดด

3.4.2 การเตรียมขยะพลาสติกและโฟมให้อยู่ในรูปอนุภาคผง

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปต้องอยู่ในรูปแบบผงละเอียด จึงต้องมีการบดลดขนาดขยะพลาสติกและโฟมให้อยู่ในรูปผงเพื่อสามารถนำมารไซเคิลและขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยมีขั้นตอนการบดลดขนาดให้อยู่ในรูปอนุภาคผง ดังนี้

1. ตัดขยะพลาสติกและโฟมแต่ละชนิดให้อยู่ในรูปชิ้นเล็กด้วยกรรไกรเพื่อสามารถป้อนเข้าเครื่องบดได้

2. สำหรับฝาขวดน้ำพลาสติก หลอดพลาสติก บรรจุภัณฑ์พลาสติก ฝาแก้วพลาสติก และเม็ดพลาสติกรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงป้อนเข้าสู่เครื่องบดละเอียดชนิดค้อนหมุน (Pulverizer)

3. สำหรับถุงพลาสติกและโฟมที่ถูกตัดแล้วป้อนเข้าสู่เครื่องบดชนิดเพลาเดี่ยว (Single Shaft Shredder)

4. เก็บผงพลาสติกและโฟมแต่ละชนิดที่บดได้ชั่งน้ำหนัก

3.4.3 การแยกขนาดของอนุภาคถุงพลาสติกและโฟมที่ผ่านการบดลดขนาด

เนื่องจากการบดด้วยเครื่องบดเพลาเดี่ยว (Single Shaft Shredder) ทำให้อนุภาคถุงพลาสติกและโฟมที่บดได้มีขนาดของอนุภาคผสมกันระหว่างขนาดเล็กและใหญ่ จึงจำเป็นต้องแยกขนาดเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปขึ้นรูป ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยจะใช้เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) โดยจะใช้ตะแกรง (Sieve) ขนาด

2000, 800 และ 200 ไมโครเมตร โดยมีขั้นตอนการแยกขนาด ดังนี้

1. นำ Sieve ที่มีขนาดรูที่ต้องการติดตั้งกับเครื่อง Shaker

2. นำอนุภาคถุงพลาสติกและโฟมที่ผ่านการบดนำมาป้อนลงในตะแกรงชั้นบนสุด

3. ทำการเปิดเครื่องเขย่าเป็นเวลา 20-30 นาที และเก็บอนุภาคที่สามารถรอดผ่านตะแกรงในแต่ละชั้น

3.4.4 อัตราส่วนการผสม

สำหรับโฟมที่ผ่านการบดแต่ละขนาดได้แก่ rFoam S ที่เล็กกว่า 200 ไมครอน, rFoam M ที่ขนาด 200-800 ไมครอน และ rFoam L ที่ขนาด 800-2000 ไมครอน ได้ทำการขึ้นรูปแบบหมุนและผสมแบบแห้งกับ LLDPE ที่อัตราส่วน LLDPE/rFOAM 80/20, 70/30 และ 60/40 ร้อยละโดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบ LLDPE ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์

ทำการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5 - 10 มิลลิกรัม บรรจุสารตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง (Pan) ทำการอัดแน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ โดยใช้สภาวะในการทดสอบที่อัตราการเพิ่มความร้อนเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสจนถึง 200 องศาเซลเซียส

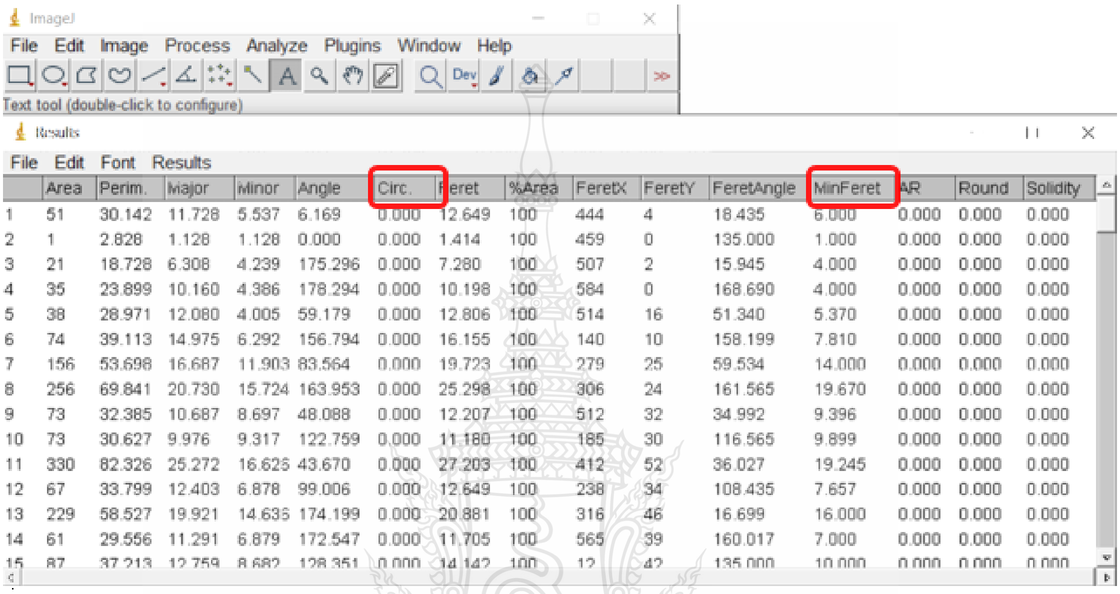
3.4.6 การวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างอนุภาค

เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน มีปัจจัยที่ต้องให้วัสดุในการขึ้นรูปที่มีขนาดเล็กแล้วยังต้องพิจารณาถึงขนาดและค่าความกลมของอนุภาคผงโดยอนุภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล (Digital microscope) รุ่น S04-600X กำลังขยาย 25X-600X อัตราการปรับภาพ 0-40 มิลลิเมตร และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย ImageJ (Freeware) เพื่อบันทึกผลที่ได้ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ โดยขนาดของอนุภาคถูกวัดเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสั้นที่สุดของอนุภาคและจะแสดงผ่าน

คอลัมน์ MinFeret และในส่วนของค่าความกลมนั้นจะเป็นการค่าผ่านการคำนวณจากสมการค่าความกลมซึ่งแสดงค่าที่ได้ผ่านคอลัมน์ Circularity แสดงดังรูปที่ 3.22

1. นำอนุภาคผงแต่ละชนิดมาถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล (Digital Microscope) ที่กำลังขยาย 5x

2. นำภาพถ่ายที่ได้มาวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างด้วยโปรแกรม ImageJ



	Area	Perim.	Major	Minor	Angle	Circ.	Feret	%Area	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret	AR	Round	Solidity
1	51	30.142	11.728	5.537	6.169	0.000	12.649	100	444	4	18.435	6.000	0.000	0.000	0.000
2	1	2.828	1.128	1.128	0.000	0.000	1.414	100	459	0	135.000	1.000	0.000	0.000	0.000
3	21	18.728	6.308	4.239	175.296	0.000	7.280	100	507	2	15.945	4.000	0.000	0.000	0.000
4	35	23.899	10.160	4.386	178.294	0.000	10.198	100	584	0	168.690	4.000	0.000	0.000	0.000
5	38	28.971	12.080	4.005	59.179	0.000	12.806	100	514	16	51.340	5.370	0.000	0.000	0.000
6	74	39.113	14.975	6.292	156.794	0.000	16.155	100	140	10	158.199	7.810	0.000	0.000	0.000
7	156	53.698	16.687	11.903	83.564	0.000	19.723	100	279	25	59.534	14.000	0.000	0.000	0.000
8	256	69.841	20.730	15.724	163.953	0.000	25.298	100	306	24	161.565	19.670	0.000	0.000	0.000
9	73	32.385	10.687	8.697	48.088	0.000	12.207	100	512	32	34.992	9.396	0.000	0.000	0.000
10	73	30.627	9.976	9.317	122.759	0.000	11.180	100	185	30	116.565	9.899	0.000	0.000	0.000
11	330	82.326	25.272	16.625	43.670	0.000	27.203	100	412	52	36.027	19.245	0.000	0.000	0.000
12	67	33.799	12.403	6.878	99.006	0.000	12.649	100	238	34	108.435	7.657	0.000	0.000	0.000
13	229	58.527	19.921	14.635	174.199	0.000	20.881	100	316	46	16.699	16.000	0.000	0.000	0.000
14	61	29.556	11.291	6.879	172.547	0.000	11.705	100	565	39	160.017	7.000	0.000	0.000	0.000
15	87	37.213	12.759	8.682	128.351	0.000	14.142	100	12	42	135.000	10.000	0.000	0.000	0.000

รูปที่ 3.22 การแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดและค่าความกลมของอนุภาคผง

3.4.7 การทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index)

การทดสอบดัชนีการไหลอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1238 เป็นการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นว่าพลาสติกมีอัตราการไหลเท่าใดในเวลา 10 นาที ซึ่งการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นจำเป็นต้องมีการใช้พลาสติกที่มีค่าอัตราการไหลที่ต่ำเพื่อที่สามารถไหลภายในแม่พิมพ์อย่างราบเรียบ โดยในการทดสอบใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักผงพลาสติกสำหรับทดสอบ 8 กรัม

2. ป้อนผงเข้าสู่กระบอกของเครื่องทดสอบและรอเวลา 6-8 นาที เพื่อให้อนุภาคผงหลอมเหลว

3. นำแท่ง Piston วางลงบนกระบอกและใส่น้ำหนักกด

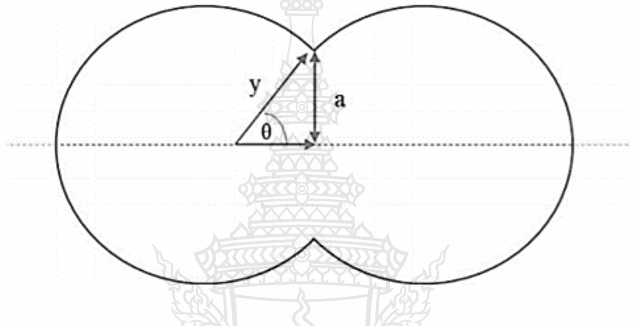
4. เมื่อน้ำหนักกดดันแทง Piston ลงมาถึงตำแหน่งเริ่มตัดชิ้นงานและจับเวลาที่ใช้ในการตัด

5. เมื่อได้ชิ้นงานอย่างน้อย 5 ชิ้น ชั่งน้ำหนักและคำนวณตามสูตรดังสมการที่ 3.1

$$\text{ดัชนีการไหล } (MFI) = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยของชิ้นงาน (กรัม)}}{\text{เวลาที่ใช้ตัด (วินาที)}} \times 600 \quad (3.1)$$

3.4.8 การวัดอัตราการหลอมภายใต้ความเค้นเป็นศูนย์ (Sintering Rate)

การวัดอัตราการหลอมของพลาสติกภายใต้สภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ (Zero Shear Condition) เป็นค่าความสัมพันธ์ของเวลาต่ออุณหภูมิ โดยจะวัดได้จากมุมที่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.23 แสดงค่ามุมระหว่างพลาสติก 2 อนุภาค [14]

จากรูปที่ 3.23 แสดงให้เห็นค่า y คือพื้นที่ผิวสัมผัสอนุภาคทั้ง 2 อนุภาคและ a คือรัศมีของอนุภาคในแต่ละอนุภาค เมื่อนำ y/a มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่า อนุภาคทั้ง 2 หลอมรวมกันอย่างสมบูรณ์เหมาะสำหรับการสังเกตพฤติกรรมการหลอมของพลาสติกแต่ละชนิด โดยมีขั้นตอนการวัดดังนี้

1. นำอนุภาคผง 2 อนุภาควางชิดกัน บนเตาให้ความร้อน (Hot Plate) ซึ่งเตาให้ความร้อนจะต่อกับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Data logger) และเริ่มให้ความร้อน
2. เมื่อเริ่มให้ความร้อนทำการบันทึกวิดีโอ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล (Digital Microscope) เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลง
3. นำวิดีโอที่บันทึกได้กับค่าอุณหภูมิที่บันทึกด้วย Data logger มาวิเคราะห์ผล

3.4.9 การทดสอบความหนาแน่นรวมของวัสดุ (Bulk Density)

การวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุภายในกระบอกที่บรรจุไปด้วยวัสดุและอากาศ ด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density Apparatus) อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นรวม ASTM D1895 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. คำนวณปริมาตรกระบอกทดสอบ (400 ลูกบาศก์เซนติเมตร) และนำกระบอกชั่งน้ำหนัก

2. ใส่วัสดุทดสอบลงในกรวยทดสอบจากนั้นเปิดลิ้นของกรวยทดสอบ

3 เมื่อวัสดุไหลเต็มกระบอก ทำการปิดลิ้นของกรวยทดสอบและห้ามเคาะให้ผงมีการอัดแน่น พร้อมนำกระบอกชั่งน้ำหนักโดยจะนำน้ำหนักที่มีวัสดุในกระบอกลบด้วยน้ำหนักกระบอก

4. คำนวณค่าความหนาแน่นของวัสดุจากสูตรดังสมการ 3.2

$$D = \frac{M}{V} \tag{3.2}$$

โดยที่ D คือความหนาแน่น มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

M คือ มวล มีหน่วยเป็นกรัม

V คือปริมาณ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4.10 การทดสอบการไหลแบบแห้งของวัสดุ (Dry Flow)

เป็นการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของวัสดุขณะที่เป็นของแข็งผ่านกรวยทดสอบด้วยอุปกรณ์เดียวกับเครื่องวัดความหนาแน่นรวมแต่ต่างกันที่จะจับเวลาในการไหลของวัสดุอ้างอิงตามาตรฐาน ASTM D1895 มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 400 กรัม และนำใส่กรวยทดสอบ

2. เปิดลิ้นกรวยทดสอบพร้อมกับจับเวลาจนกว่าอนุภาคไหลหมด

3 บันทึกผลการทดสอบ

3.4.11 การทดสอบอัตราการอัดตัว (Hausner ratio)

อัตราการอัดตัว เป็นค่าความสัมพันธ์ของความสามารถในการไหลของอนุภาคที่สามารถอธิบายถึงความสามารถของอนุภาคขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ผ่านอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งต้องใช้เครื่องทดสอบความหนาแน่นรวมและค่าความหนาแน่นรวมในการนำมาคำนวณหาค่าอัตราการอัดตัว

1. ชั่งน้ำหนักกระบอกเปล่าและวัดความสูงของกระบอกพร้อมกับใส่อนุภาคผงในกระบอกจนเต็ม

2. ทำการเคาะกระบอกจำนวน 50 ครั้ง เพื่อให้อนุภาคผงเกิดการอัดตัว

3. วัดความสูงจากอนุภาคผงที่อัดแน่นจนถึงปากกระบอก จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหล

3.4.12 การทดสอบการไหลแบบแกนเดียวด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus)

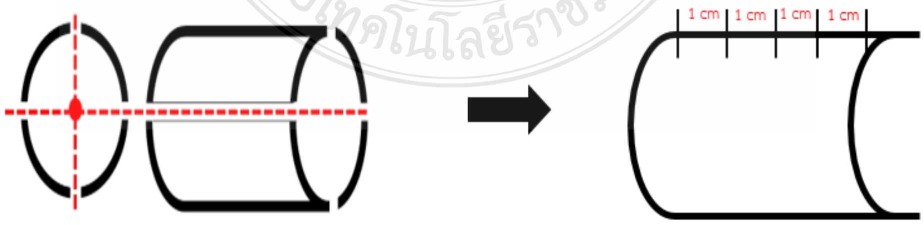
การทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียวเป็นการทดสอบการไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ต่อเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูและช่วงอุณหภูมิ โดยเครื่องทดสอบประกอบด้วยแม่พิมพ์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ยาว 90 มิลลิเมตร ตัวฝาปิดแม่พิมพ์มีกระจกเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงภายในแม่พิมพ์ สามารถปรับความเร็วรอบได้ 7-300 รอบต่อนาที มีระบบให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าอุณหภูมิสูงสุด 400 องศาเซลเซียส ระบบหล่อเย็นด้วยพัดลมอุตสาหกรรม โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักผงพลาสติก 40 กรัม และบรรจุภายในแม่พิมพ์
2. เปิดสวิตช์หลักและปรับความเร็วรอบในการหมุน แม่พิมพ์จะทำการหมุน
3. ตั้งอุณหภูมิที่จะใช้ในการขึ้นรูป
4. บันทึกวิดีโอพร้อมกับบันทึกอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ผ่านฝาปิดแม่พิมพ์ที่ทำจากกระจกตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนกับแม่พิมพ์จนถึงการหล่อเย็น
5. ทำการหล่อเย็นตัวพัดลมอุตสาหกรรม จนอุณหภูมิลดลง
6. ทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

3.4.13 การวัดการกระจายความหนาของชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบการไหลแบบแกนเดียวมาวัดการกระจายความหนาโดยการตัดชิ้นงานที่ได้เป็น 4 ชิ้น แล้วทำการวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) จากส่วนหน้าของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร) ไปตามความยาวครั้งละ 1 เซนติเมตร ไปจนสุดชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.24 และนำค่าความหนาที่ได้มาเปรียบเทียบกัน 4 ชิ้นงาน

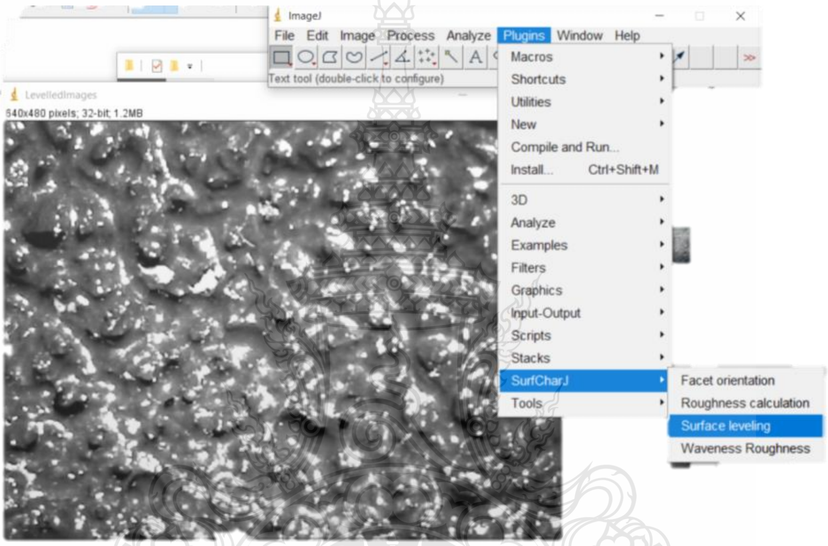
1. นำชิ้นงานมาตัดออกเป็น 4 ชิ้น
2. นำชิ้นงานที่ตัดมาวัดตำแหน่งที่จะทำการวัดความหนา โดยเริ่มจากหน้าชิ้นงานและขยับทีละ 1 เซนติเมตร จนท้ายสุดชิ้นงาน
3. นำความหนาที่วัดได้ทั้ง 4 ชิ้นมาเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.24 ลักษณะตัวอย่างการวัดการกระจายขนาดของชิ้นงาน

3.4.14 การวัดความขรุขระที่ผิวชิ้นงาน

การวัดความขรุขระที่ผิวเป็นการใช้เครื่องมือร่วมกันระหว่างกล้องดิจิตอลไมโครสโครปและโปรแกรมวิเคราะห์ ImageJ เพื่อวิเคราะห์ความขรุขระผิวจากภาพที่ถ่ายโดยแสดงเป็นพื้นผิวเป็นค่าเฉลี่ยทางเลขาคณิตจากการวิเคราะห์ความขรุขระพื้นผิววัดโดยค่า R ที่พื้นผิวทั้งหมดซึ่งมีการระบุเป็นค่าหยาบตามมาตรฐาน ISO4287/2000 โดยแสดงค่าเป็นความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness Average, Ra) ที่แสดงถึงค่าความสูงของผิวที่ชิ้นงานที่ต่ำสุดและสูงสุดซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากโปรแกรม ImageJ ในโหมด SurfCharJ แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์ความขรุขระที่ผิวด้วยโปรแกรมม ImageJ

3.4.15 การทดสอบสมบัติทนต่อแรงกดอัด

การทดสอบการทนต่อแรงกดอัดเป็นการทดสอบสมบัติทางกลโดยการให้แรงอัดกับชิ้นงานผ่านแท่นวางชิ้นงานที่ติดตั้งกับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) แสดงดังรูปที่ 3.26 เนื่องจากชิ้นงานที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร โดยมีความเร็วในการกด 50 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้โหลดขนาด 1 กิโลนิวตัน จึงเลือกใช้การทดสอบแรงกดอัดแทนการทดสอบการทนต่อแรงดึงและการทดสอบการทนต่อการโก่งงอ

รูปที่ 3.26 เครื่อง Universal Testing Machine และชุดจับชิ้นงานทดสอบการกดอัด

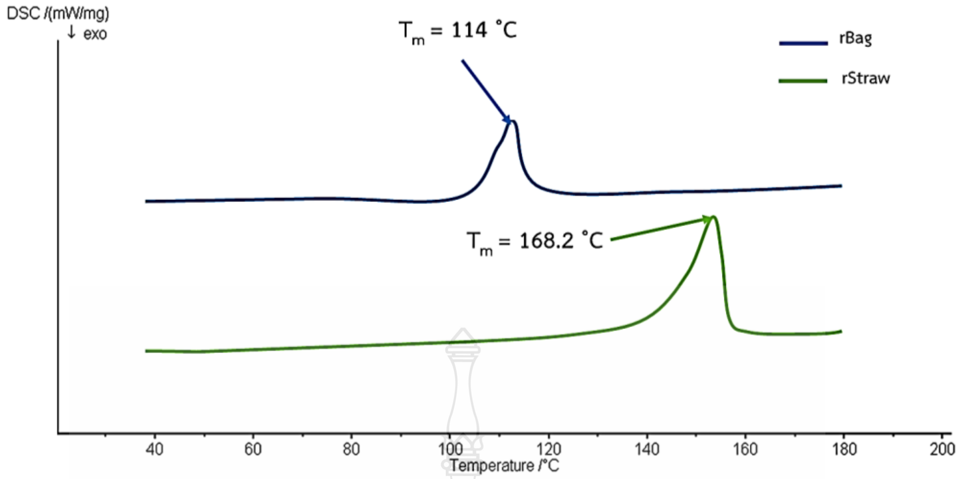
บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ทำการนำวัสดุที่มีการใช้ในชีวิตประจำวันทั่วไปนำกลับมารีไซเคิลด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยมีวัสดุที่ใช้ได้แก่ ฝาขวดน้ำชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (rBottleCap) เม็ดรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (rHDPE) ถุงพลาสติก (rBag) บรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิพรอพิลีน (rPP) หลอดพลาสติก (rStraw) โฟมชนิดพอลิสไตรีน (rFoam) และฝาแก้วกาแฟชนิดพอลิสไตรีน (rPS) เปรียบเทียบ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เกรดทางการค้า ที่เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน และมีการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของ rFoam ด้วยการนำมาผสมกับ LLDPE ที่อัตราส่วน LLDPE/rFoam 80/20, 70/30 และ 60/40 ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดต้องถูกบดลดขนาดให้อยู่ในลักษณะผงที่สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยบดวัสดุรีไซเคิลด้วยเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยงและชนิดเพลาเดี่ยว หลังจากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน ทดลองการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวและสมบัติทางกล จากชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมจากวัสดุรีไซเคิลแต่ละชนิด โดยมีผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผงพลาสติก

4.1.1 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคทางความร้อนถุงพลาสติกและหลอดพลาสติก

จากการทดสอบเพื่อระบุชนิดของถุงพลาสติกและหลอดพลาสติกด้วยเทคนิค DSC ที่แสดงถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ (Melting Temperature, T_m) จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า rBag มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 114 องศาเซลเซียส ซึ่งกับงานวิจัยที่ผ่านมา [28-29] มีการทดสอบเทคนิค DSC ของวัสดุพอลิเอทิลีนพบว่าช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในระหว่าง 97-125 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถระบุได้ว่า rBag เป็นวัสดุชนิดพอลิเอทิลีน และ rStraw มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 168.2 องศาเซลเซียส และในงานวิจัยที่ผ่านมา [30] อุณหภูมิของพอลิพรอพิลีนอยู่ในช่วง 120-132 องศาเซลเซียส จึงสามารถระบุได้ว่า rStraw เป็นวัสดุชนิดพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

4.1.1 ผลการกระจายขนาดและความกลมของอนุภาคผงพลาสติก

วัสดุแต่ละชนิดที่หลังจากผ่านกระบวนการลดขนาดและวัดการกระจายขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิตอล พบว่าขนาดเฉลี่ยของผงพลาสติกแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผง LLDPE ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 158 ไมครอน และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงพลาสติกที่เตรียมได้มีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันของ rPP, rStraw, rPs, rFoam และ rHDPE มีขนาดอนุภาคผงเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่ 140-190 ไมครอน และ rBottleCap มีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 249 ไมครอน ส่วน rBag มีขนาดอนุภาคผงเฉลี่ยใหญ่ที่สุดที่ 352 ไมครอน แสดงดังตางรางที่ 4.1 ซึ่งอนุภาคผง rBag ที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากถุงพลาสติกนั้นมีลักษณะอ่อนและยืดหยุ่นส่งผลให้เครื่องบดไม่สามารถบดลดขนาดถุงพลาสติกให้อยู่ในรูปของผงได้

ในส่วนของค่าความกลมพบว่าค่าความกลมของอนุภาคผง LLDPE มีค่าความกลมเฉลี่ยที่ 0.8 และพลาสติกที่เตรียมได้มีค่าเฉลี่ยความกลมที่เท่ากันของ rPP, rPs, rFoam, rHDPE และ rBottleCap ที่ค่าความกลมเฉลี่ยเท่ากับ 0.7 นอกจากนี้พบว่าอนุภาคผงพลาสติกที่เตรียมได้จาก rStraw และ rBag มีค่าความกลมที่น้อยกว่าอนุภาคผงข้างต้นที่ 0.6 และ 0.5 แสดงดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากการบดลดขนาดถุงพลาสติกที่มีความเหนียวและบางส่งผลให้เกิดการยืดตัวในระหว่างการบดอนุภาคผงที่ได้จึงมีส่วนของหาง (Tail) เกิดขึ้น

จากผลขนาดอนุภาคและความกลมพบว่าขนาดอนุภาคของวัสดุที่เตรียมได้ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE ยกเว้น rBag ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดและค่าความกลมต่ำเนื่องจากถุงพลาสติกมีความเหนียวเมื่อผ่านการลดส่งผลให้มีการยืดตัวของถุงทำให้เกิดเป็นส่วนของหางที่ยื่นออกมาและเนื่องจาก

ขนาดของอนุภาคผงมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน วัสดุที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างกลมมีความสามารถในการขึ้นรูปแบบหมุนได้ดีกว่าอนุภาคผงที่มีขนาดใหญ่หรืออนุภาคผงที่มีรูปร่างไม่กลม นอกจากนี้อนุภาคผงที่มีขนาดและรูปร่างไม่เหมาะสมกับกระบวนการส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ เช่น การเกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานหรือที่ผิวชิ้นงาน ความสม่ำเสมอของความหนาชิ้นงานและความขรุขระของผิวด้านในชิ้นงาน [6]

ตารางที่ 4.1 ขนาดและความกลมเฉลี่ยของอนุภาคผงพลาสติก LLDPE และอนุภาคผงที่เตรียม

Materials	Size Average (Micron)	Circularity Average
LLDPE	158±133.5	0.8±0.18
rBottleCap	190±129.5	0.7±0.18
rHDPE	249±129.5	0.7±0.24
rBag	352±346.3	0.5±0.23
rPP	183±123.7	0.7±0.23
rStraw	148±141.4	0.6±0.23
rFoam	142±74.3	0.7±0.16
rPS	145±66.6	0.7±0.20

4.1.2 ผลความหนาแน่นรวมและอัตราการไหลแบบแห้ง

การทดสอบความหนาแน่นรวมพบว่าอนุภาคผง LLDPE มีค่าความหนาแน่นรวมสูงสุดเท่ากับ 0.39 g/cm^3 รองลงมาคืออนุภาคผง rBottleCap ความหนาแน่นรวม 0.32 g/cm^3 อนุภาคผงอีก 3 ชนิดที่มีความหนาแน่นรวมใกล้เคียงกันคืออนุภาคผง rPs, rHDPE, rPP ที่ความหนาแน่นรวม 0.27, 0.26, 0.24 g/cm^3 ตามลำดับ อนุภาคผง rFoam และ rStraw มีความหนาแน่นรวมใกล้เคียงกัน 0.17, 0.18 g/cm^3 ตามลำดับ และอนุภาคผง rBag มีความหนาแน่นรวมต่ำสุดเท่ากับ 0.08 g/cm^3 แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งความหนาแน่นรวมต่ำเกิดจากอนุภาคผงนั้นมีขนาดใหญ่หรือว่ามีรูปร่างไม่กลม เช่น อนุภาคที่มีส่วนของหาง ซึ่งค่าความหนาแน่นรวมส่งผลกับความสามารถในการขึ้นรูป เช่น rBag เมื่อใส่อนุภาคผงน้ำหนักเท่ากันกับอนุภาคผงชนิดอื่นภายในแม่พิมพ์เดียวกัน อนุภาคผง rBag นั้นมีการอัดแน่นภายในแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 4.2 ทำให้ในระหว่างการหมุนอนุภาคผงเคลื่อนได้อย่างไม่อิสระภายในแม่พิมพ์

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้านหน้าแม่พิมพ์ของวัสดุแต่ละชนิด a) LLDPE b) rHDPE c) rPP d) rBottleCap e) rPS f) rFoam g) rStraw h) rBag

ในส่วนของอัตราการไหลแบบแห้งพบว่าอนุภาคผง LLPDE มีอัตราการไหลแบบแห้งภายในเวลา 11.054 วินาที และอนุภาคผง rBottleCap มีอัตราการไหลแบบแห้งภายในเวลา 31.8 วินาที แสดงดังตารางที่ 4.2 และจากการทดลองพบว่าอนุภาคผงจาก rHDPE, rPP, rStraw, rPS, rFoam และ rBag ไม่สามารถไหลผ่านได้กรวยได้เนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีการกีดขวางการเคลื่อนไหวระหว่างอนุภาคซึ่งมีสาเหตุมาจากรูปร่างไม่กลม

4.1.3 ผลอัตราการอัดตัวของผง (Hausner Ratio)

การทดสอบอัตราการอัดตัวของผงเป็นการทดสอบแสดงถึงความสามารถในการอัดตัวของอนุภาคผงภายในภาชนะที่บรรจุ จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าอัตราการอัดตัวของอนุภาคผง LLDPE มีค่าเท่ากับ 1.18 เมื่อนำมาเทียบกับตารางการคุณสมบัติการไหลของอนุภาคผง อนุภาคผง LLDPE มีการไหลทีดี อนุภาคผง rBottleCap มีค่าเท่ากับ 1.21 เมื่อเทียบกับตารางการคุณสมบัติการไหลพบว่ามีการไหลปานกลาง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงเมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์อนุภาคของ LLDPE และ rBottleCap มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ได้ดีกว่า ส่วนอนุภาคผง rHDPE, rStraw, rPP, rFoam rPs และ rBag มีค่าอัตราการอัดแน่นของอนุภาคที่ 1.37, 1.38, 1.40, 1.40, 1.41 และ 1.44 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตารางการคุณสมบัติการไหลพบว่าอนุภาคผงทั้ง 6 ชนิดมีความสามารถในการไหลต่ำซึ่งแสดงถึงเมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุนของแม่พิมพ์ในช่วงที่เป็นของแข็ง อนุภาคที่มีอัตราการอัดตัวของผงสูงจะมีการเกาะตัวกันของอนุภาคที่ต่ำซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานมีฟองอากาศหรือการกระจายความหนาของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นรวม

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

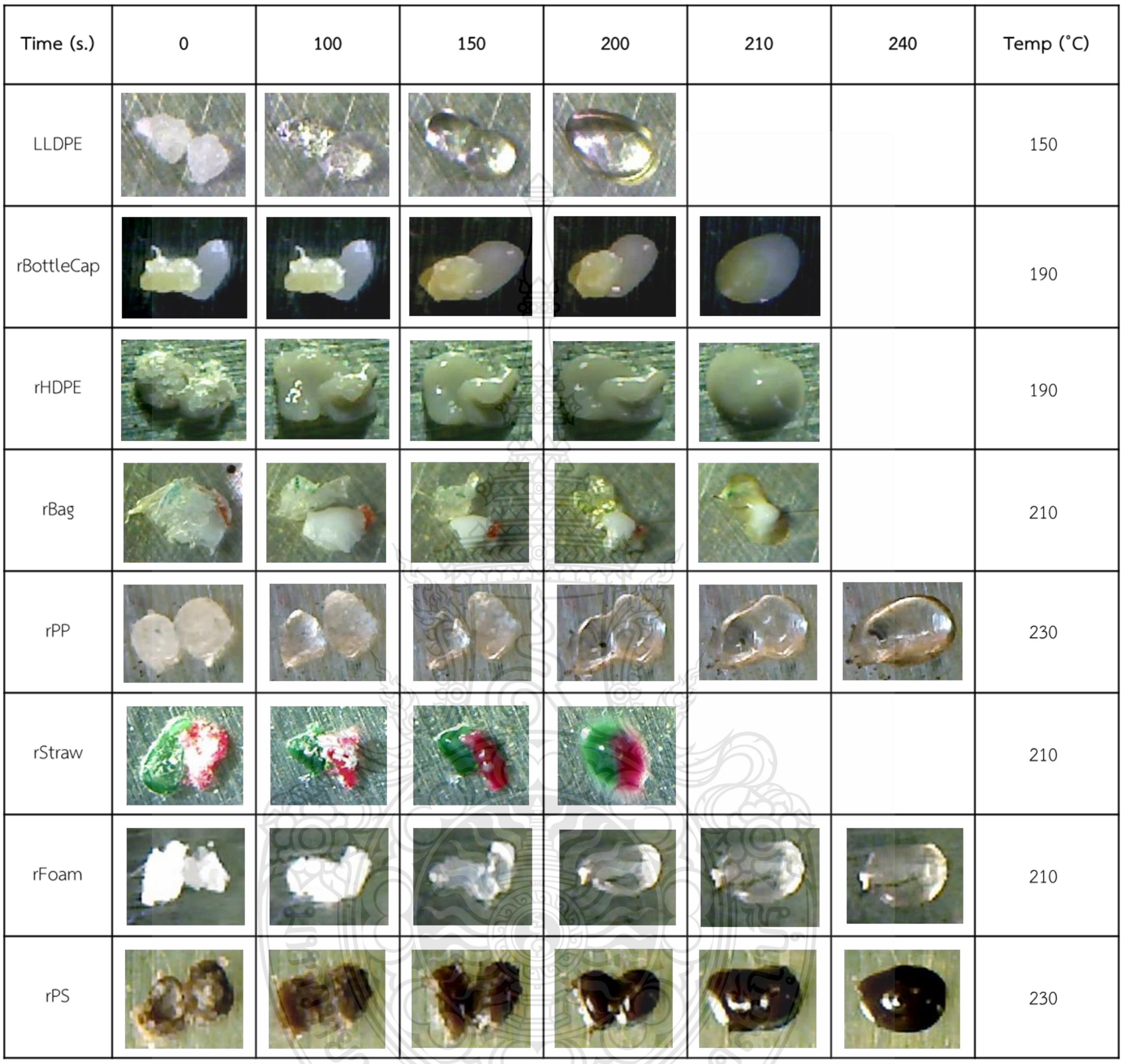
Material	Bulk Density (g/cm^3)	Dry Flow (s)	Hausner Ratio
LLDPE	0.39	11.054	1.18
rBottleCap	0.32	31.8	1.21
rHDPE	0.26	ไม่ไหล	1.37
rBag	0.08	ไม่ไหล	1.44
rPP	0.24	ไม่ไหล	1.40
rStraw	0.18	ไม่ไหล	1.38
rFoam	0.17	ไม่ไหล	1.40
rPS	0.27	ไม่ไหล	1.41

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

4.2.1 ผลการอัตราการหลอมภายใต้สภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ (Sintering rate)

การทดสอบอัตราการหลอมรวมกันของอนุภาคผงเป็นการทดสอบในการคาดการณ์ถึงอุณหภูมิในระหว่างการขึ้นรูปของอนุภาคผงพลาสติก 2 อนุภาค ได้รับความร้อนจนเริ่มหลอมและรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันภายใต้อัตราเฉือนเป็นศูนย์ โดยมีการเทียบกันระหว่างอัตราส่วนรัศมีของอนุภาค (y) กับรัศมีของอนุภาคที่มีการสัมผัสกัน (a) โดยพบว่าเมื่อให้ความร้อนที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากันพบว่า อนุภาคผง LLDPE หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 200 วินาที อนุภาคผง rBottleCap หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 210 วินาที อนุภาคผง rHDPE หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 210 วินาที อนุภาคผง rBag หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 190 วินาที อนุภาคผง rPP หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 240 วินาที อนุภาคผง rStraw หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 200 วินาที อนุภาคผง rFoam หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 240 วินาที อนุภาคผง rPS หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 240 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งอุณหภูมิหลอมสมบูรณ์ของ LLDPE มีค่าต่ำสุดเนื่องจาก LLDPE มีขนาดอนุภาคที่เล็กและรูปร่างของอนุภาคผงที่ค่อนข้างกลมทำให้อนุภาคมีพื้นที่ผิวมากส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยพลาสติกในกลุ่มพอลิเอทิลีนพบว่า rHDPE, rBottleCap มีระยะเวลาและอุณหภูมิหลอมสมบูรณ์สูงกว่า LLDPE เล็กน้อยเช่นเดียวกับ rBag ที่มีระยะเวลาและอุณหภูมิหลอมสมบูรณ์สูงสุดในกลุ่มเนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าและรูปร่างที่ไม่กลมจึงยากที่จะส่งผ่านความร้อนระหว่าง

อนุภาค กลุ่มพอลิพรอพิลีนพบว่ามีอุณหภูมิหลอมสมบูรณ์ใกล้เคียงกันแต่ระยะเวลาในการหลอมสมบูรณ์ของ rStraw มีระยะเวลาที่สั้นกว่าเช่นเดียวกับกลุ่มพอลิสไตรีน



รูปที่ 4.3 ลักษณะอนุภาคผงระหว่างการทดสอบอัตราการหลอม

4.2.2 ผลการทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index)

การทดสอบดัชนีการไหลโดยค่าดัชนีการไหลที่เหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนอยู่ในช่วง 2-8 กรัมต่อ 10 นาที โดยผลการทดลองอนุภาคผงแต่ละชนิดพบว่าอนุภาคผง LLDPE มีค่าดัชนีการไหล 3.5 กรัมต่อ 10 นาที และอนุภาคผงที่เตรียมได้นั้นพบว่า rBag มีค่าดัชนีการไหลต่ำที่สุดที่ 0.2 กรัมต่อ 10 นาที เนื่องจากถุงพลาสติกนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความหนืดในการขึ้นรูปถุง rPS

และ rFoam มีค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกัน 0.6 และ 0.7 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ ส่วน rStraw, rBottleCap และ rHDPE มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 3.1, 4 และ 4.1 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ ในกรณีของ rPP พบว่ามีค่าดัชนีการไหลสูงที่สุดเท่ากับ 27.1 กรัมต่อ 10 นาที แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนพลาสติกที่มีความหนืดสูงมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ไม่ดีเนื่องจากในระหว่างการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นไม่มีแรงใดๆมากระทำกับพลาสติกในระหว่างการเคลื่อนที่ ทำให้พลาสติกที่มีความหนืดสูงเคลื่อนที่ในระหว่างการหมุนของแม่พิมพ์ได้ยากกว่าพลาสติกที่มีความหนืดต่ำ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบดัชนีการไหล

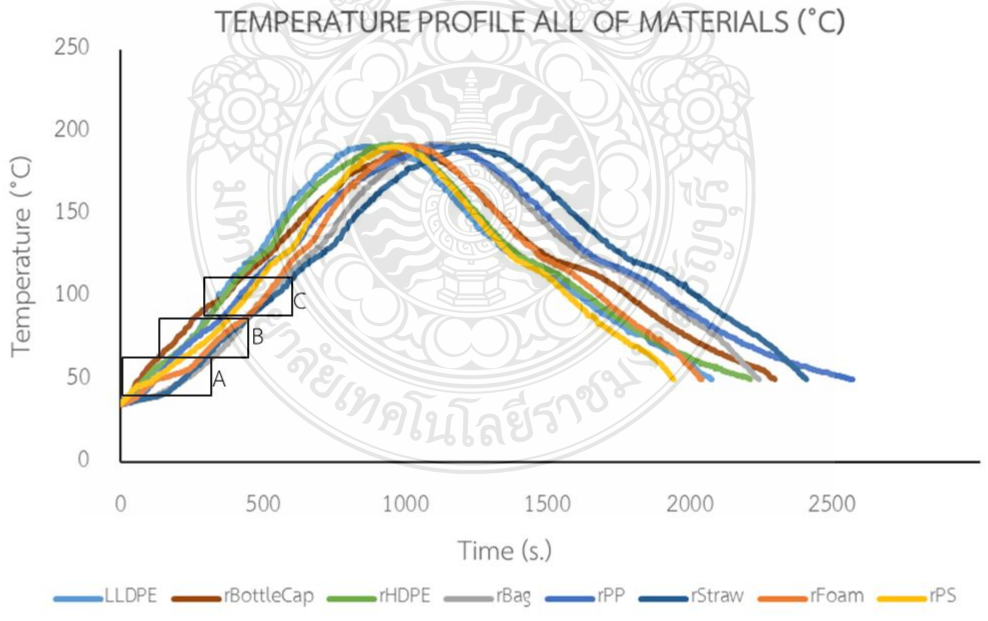
Materials	Melt Flow Index (g/10min)
LLDPE	3.5
rBottleCap	4
rHDPE	4.1
rBag	0.2
rPP	27.1
rStraw	3.1
rFoam	0.7
rPS	0.6

4.3 ผลการทดลองขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว

การทดลองการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวจากเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวโดยใช้วัสดุในการขึ้นรูปครั้งละ 40 กรัม ความเร็วรอบการหมุน 16 รอบต่อนาที โดยให้ความร้อนในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิถึง 190 องศาเซลเซียสและลดอุณหภูมิลงถึง 50 องศาเซลเซียส ด้วยพัดลมอุตสาหกรรม โดยการทดลองขึ้นรูปพบว่าวัสดุที่เตรียมได้แต่ละชนิดสามารถขึ้นรูปได้แต่พบว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จากอนุภาคผง rBag ไม่สมบูรณ์เนื่องจากชิ้นงานมีรูพรุนมากกว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จากวัสดุชนิดอื่นในระหว่างการขึ้นรูปได้มีการบันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ขณะเริ่มให้ความร้อนจนถึงการสิ้นสุดให้ความเย็นและสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าอนุภาคผง LLPDE และ rHDPE เมื่อเริ่มให้ความร้อนอนุภาคผงจะมีการเข้าสู่สภาวะแรกคือ สภาวะอนุภาคผงเริ่มมีการหลอมติดผนังแม่พิมพ์ (Tack temperature) ตามจุด A ที่อุณหภูมิ 44 และ 46.9 องศาเซลเซียส rBottleCap และ rPP เริ่มหลอมติดผนังแม่พิมพ์ในเวลาต่อมาที่

อุณหภูมิ 48 และ 50 องศาเซลเซียส และ rPs และ rFoam เริ่มหลอมติดผนังแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 47 และ 51 องศาเซลเซียส และในส่วน rBag และ rStraw เริ่มหลอมติดผนังแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 52 และ 53 องศาเซลเซียส เมื่อดำเนินการขึ้นรูปต่อจะเริ่มเข้าสู่สภาวะที่สองคือ สภาวะอนุภาคผงจะเกิดการเกาะติดแม่พิมพ์จนหมด (Kink temperature) ตามจุด B โดยอนุภาคผง LLPDE และ rHDPE จะเกาะติดแม่พิมพ์จนหมดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 87 และ 90 องศาเซลเซียส และอนุภาคผง rFoam, rPs, rPP และ rHDPE มีการเกาะติดแม่พิมพ์จนหมดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 94.9, 96, 96.8 และ 97.8 องศาเซลเซียส และ rStraw กับ rBag มีอุณหภูมิเกาะติดแม่พิมพ์ที่สูงสุดที่ 101 และ 115 องศาเซลเซียส สุดท้ายจะเข้าสู่สภาวะที่สามคือ สภาะอนุภาคผงหลอมสมบูรณ์ (Air inside) ตามจุด C พบว่าวอนุภาคผง LLDPE, rHDPE, rBottleCap, rPs, rFoam และ rPP ทั้ง 6 ชนิดมีอุณหภูมิเมื่อเข้าสู่สภาวะหลอมสมบูรณ์ใกล้เคียงกันที่ 110, 113, 113, 114, 115 และ 118 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนอนุภาคผง rStraw และ rBag มีอุณหภูมิหลอมสมบูรณ์สูงสุดที่ 124.7 และ 140 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยทั้ง 3 สภาวะได้มีการบันทึกภาพภายในแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 4.5

โดยการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียววัสดุที่เตรียมแต่ละชนิดใช้เวลาในการขึ้นรูปไม่เท่ากันและใช้เวลานานเมื่อเทียบกับ LLDPE ซึ่งสอดคล้องกับผลอัตราการหลอมภายสภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ที่อัตราการหลอมของวัสดุที่เตรียมมีอัตราการหลอมที่นานกว่า LLDPE



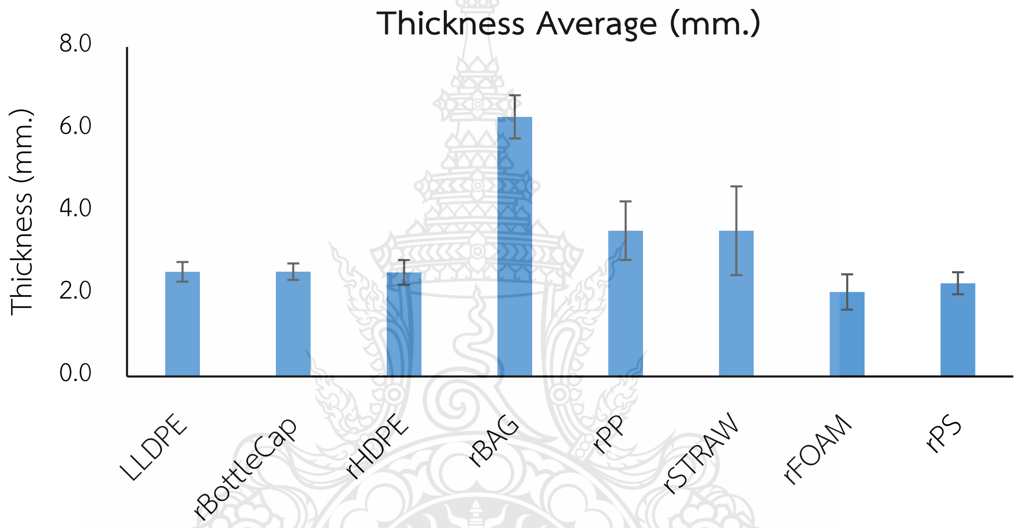
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการขึ้นรูปแบบหมุน

รูปที่ 4.5 พฤติกรรมภายในแม่พิมพ์เมื่อเริ่มให้ความร้อนจนถึงอนุภาคผงพลาสติกหลอมเหลว

4.4 การกระจายความหนาของชิ้นงาน

ในระหว่างการขึ้นรูปแบบหมุนที่น้ำหนักของอนุภาคผงพลาสติกเท่ากันมีการเคลื่อนที่ตามการหมุนของแม่พิมพ์ส่งผลให้การกระจายความหนาที่น้ำหนักอนุภาคผงแต่ละชนิดเท่ากันแต่ความหนาของชิ้นงานแต่ชิ้นไม่เท่ากันโดยพบว่าชิ้นงานจากอนุภาคผง LLDPE และ rBottleCap มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 2.5±0.2 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาเฉลี่ยเท่ากับชิ้นงานจากอนุภาคผง rHDPE เท่ากับ 2.5±0.3 ในส่วนของชิ้นงานจากอนุภาคผง rPP และ rStraw มีขนาดความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 3.5±0.7 และ

3.5±1.1 มิลลิเมตร แต่พบว่าภายในชิ้นงานมีฟองอากาศเกิดขึ้นมากกว่าชิ้นงานอื่นที่เตรียม อนุภาคผง rFoam และ rPS มีความหนาน้อยสุดที่ 2.1±0.4 และ 2.3±0.3 มิลลิเมตร ส่วนชิ้นงานจากอนุภาคผง rBag มีความหนาเฉลี่ยสูงสุด 6.3±0.5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากอนุภาคผงที่เตรียมมีลักษณะรูปร่างกลมจะสามารถเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ได้ดีส่งผลให้มีการกระจายความหนาได้ดีกว่าอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีส่วนของหางอีกทั้งในระหว่างการหมุนอนุภาคที่มีหางหรือรูปร่างไม่กลมเกิดการหลอมก่อนในส่วนที่ยืดออกและหลอมติดกันทำให้เกิดเป็นโพรงหรือฟองอากาศภายในชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 กราฟการกระจายความหนาของชิ้นงาน

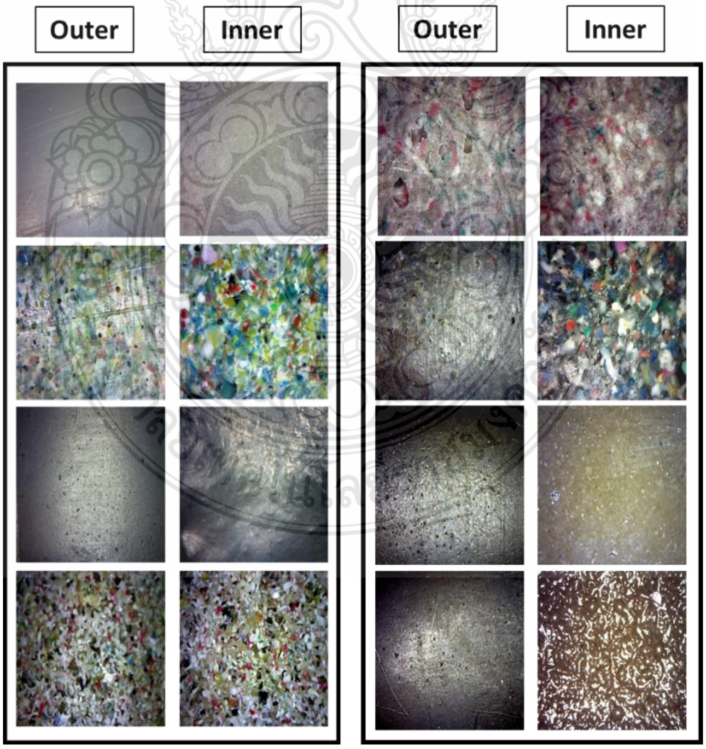
4.5 ลักษณะความขรุขระที่ผิวชิ้นงานทดสอบ

การขึ้นรูปแบบหมุนลักษณะผิวชิ้นงานภายนอกที่ได้จะมีความเรียบตามผิวแม่พิมพ์แต่ลักษณะผิวภายในชิ้นงานจะมีความเรียบตามลักษณะรูปร่างของอนุภาคผง โดยได้มีการนำกล้องดิจิตอลไมโครสโคปถ่ายภาพพื้นผิวชิ้นงานด้านในและนอกแล้ววิเคราะห์ลักษณะความขรุขระที่พื้นผิวด้วยโปรแกรม ImageJ ซึ่งเป็นการวัดความลึกสูงสุดของพื้นผิวเทียบกับความความสูงสุดของผิวชิ้นงานจากตารางที่ 4.4 พบว่าชิ้นงานจากอนุภาคผง LLDPE มีความเรียบที่ผิวทั้งด้านในและด้านนอกมากกว่าชิ้นงานที่ได้จากอนุภาครีไซเคิล โดยภายนอกของชิ้นงานจากวัสดุรีไซเคิลมีลักษณะเป็นรู แสดงดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากการหลอมของอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนหรืออัตราการหลอมที่ไม่ดีทำให้อนุภาคผงที่ยึด

เกาะกับผนังแม่พิมพ์หลอมเหลวเชื่อมติดกันไม่สมบูรณ์ ส่วนลักษณะผิวด้านในพบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะหลอมเกาะชิ้นงานเป็นพื้นผิวภายในซึ่งเป็นเหตุให้ลักษณะพื้นผิวขรุขระ

ตารางที่ 4.4 ค่าความขรุขระที่พื้นผิวชิ้นงานด้านในและด้านนอก

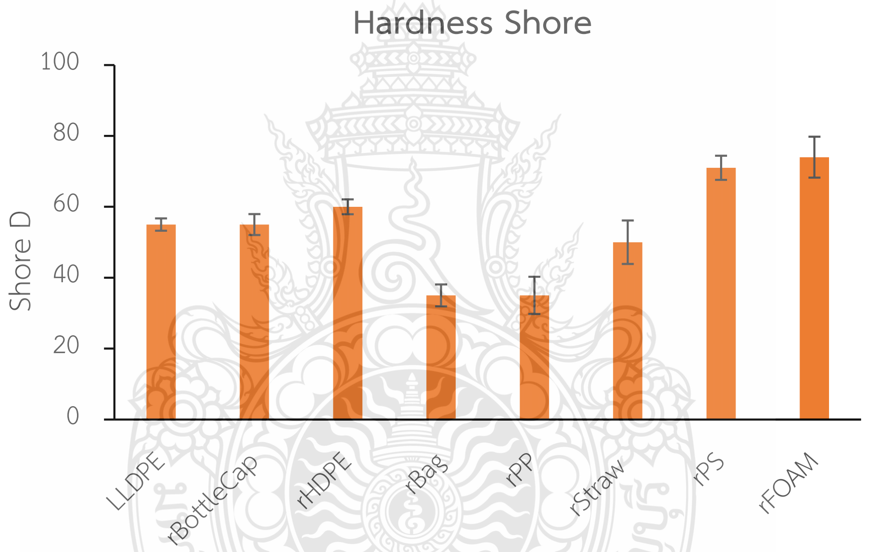
Materials	Arithmetic Mean of Surface Roughness, Ra (Micron)	
	Inside	Outside
LLDPE	15.47	4.77
rBottleCap	27.49	23.47
rHDPE	22.82	12.7
rBag	31.33	20.66
rPP	27.28	23.96
rStraw	22.93	16.54
rFoam	16.1	27.26
rPS	45.50	24.18



รูปที่ 4.7 ลักษณะความขรุขระภายในและภายนอกชิ้นงานทดสอบ

4.6 ความแข็งที่ผิว (Surface Hardness)

ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวด้วย Shore Hardness แสดงดังรูป 4.8 พบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผงมีค่าความแข็งที่ผิวแตกต่างกันจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคผง rStraw, LLDPE, rBottleCap และ rHDPE มีค่าความแข็งที่ 50, 55, 55 และ 60 ตามลำดับ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคผง rPs และ rFoam มีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่าชนิดอื่นที่ 71 และ 74 ตามลำดับ เนื่องจากพลาสติกพอลิสไตรีนมีความแข็งสูงกว่าเทียบกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพอลิพรอพิลีน และในส่วนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคผง rPP และ rBag มีค่าความแข็งที่ผิวเท่ากันที่ 35 เนื่องจากลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาค rBag มีลักษณะเป็นโพรงหรือรูพรุนจำนวนมากส่งผลให้ความแข็งที่ผิวต่ำส่วนภายในชิ้นงาน rPP นั้นมีส่วนที่เป็นฟองอากาศภายในส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับชิ้นงานอื่น

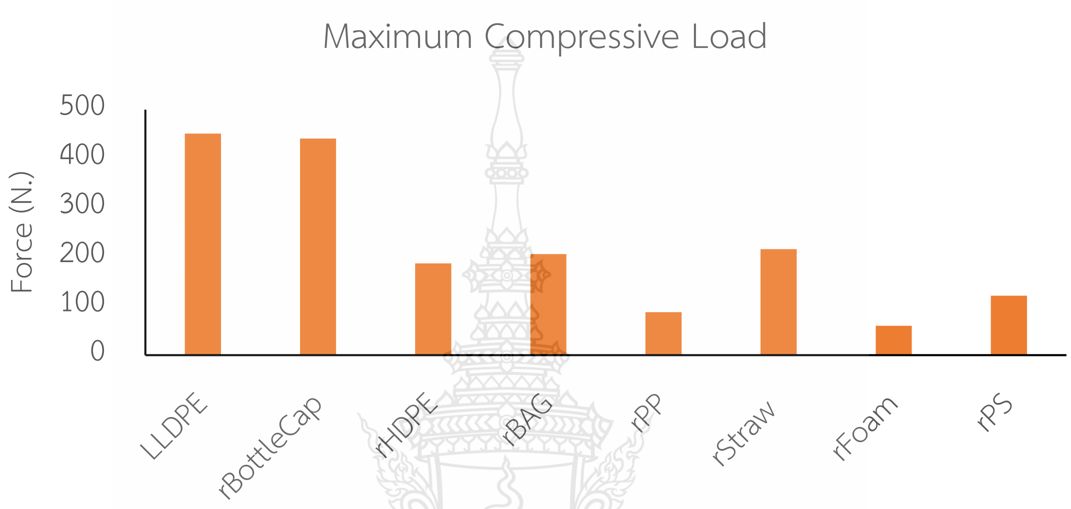


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน

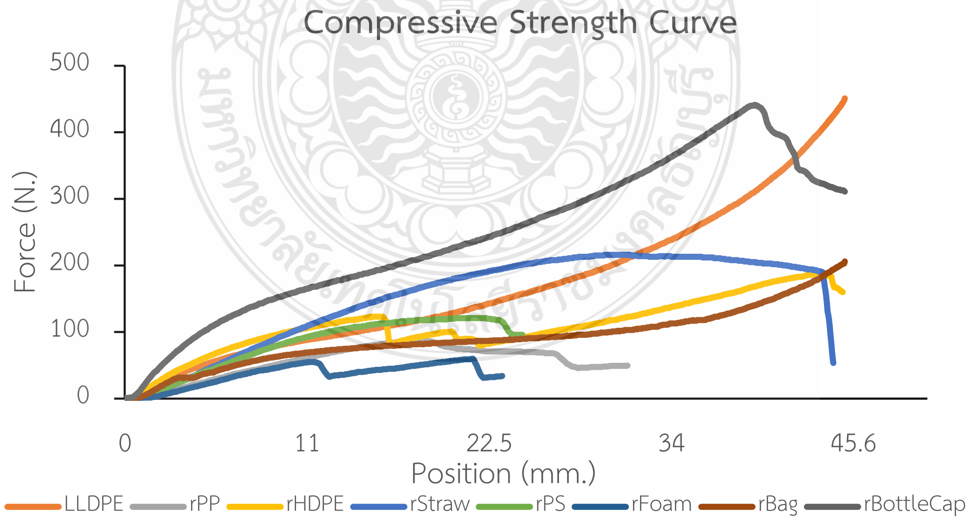
4.7 การทดสอบการทนต่อแรงกดอัด

ผลการทดสอบการทนต่อแรงกดอัดแสดงถึงผลการทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคผง LLDPE และ rBottleCap มีค่ารับแรงกดอัด 451 และ 441 นิวตัน ตามลำดับ rBag มีค่ารับแรงกดอัด 206 นิวตัน ความหนาที่มากกว่าจึงไม่มีผลกับการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด ในขณะที่ rStraw และ rHDPE มีค่ารับแรงกดอัด 216 และ 187 นิวตัน ส่วน rPP มีค่ารับแรงกดอัด 87.5 นิวตัน ส่วน rPs และ rFoam มีค่ารับแรงกดอัด 121 และ 60 นิวตัน แสดงดังรูปที่ 4.9 และจากผลที่ได้พบว่าชิ้นงานจาก LLDPE มีค่าทนต่อแรงกดอัดสูงใกล้เคียงกับ rBottleCap แต่พบว่า

rBottleCap เกิดการเสียรูปแบบเปราะ (Brittle) แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งต่างจาก LLDPE ที่มีความเหนียวมากกว่า ชิ้นงาน rBag ถึงแม้ว่าจะมีความหนามากที่สุดแต่กลับให้ผลการทดสอบนี้ต่ำดังนั้นความหนาของชิ้นงาน rBag ไม่ช่วยในการรับแรงของชิ้นงาน และชิ้นงาน rHDPE rPP rStraw มีการเสียรูปแบบเปราะ ส่วน rPs และ rFoam นั้นมีการเสียรูปแบบเปราะซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุที่มีความแข็ง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลลักษณะการเสียรูปผ่านการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด

4.8 การผสมอนุภาคผง LLDPE กับ rFoam

ในงานวิจัยพบว่าชิ้นงานที่ได้จาก rFoam มีสมบัติทางกลต่ำเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุรีไซเคิลอื่นๆ ในงานวิจัยจึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการผสมหระว่างอนุภาคผง rFoam กับ LLDPE ที่มีการเตรียมอนุภาคผง rFoam ให้มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดใหญ่ (L), ขนาดกลาง (M) และ ขนาดเล็ก (S) โดยมีการผสมระหว่างอนุภาคผง rFoam/LLDPE ที่อัตราส่วน 20/80, 30/70 และ 40/60 ตามลำดับ

4.8.1 ผลการกระจายขนาดและความกลมของอนุภาค rFoam

การเตรียมอนุภาคผง rFoam ผ่านการบดลดขนาดด้วยเครื่องบด Shredder และแยกขนาดผ่านตะแกรงที่มีขนาด 2000, 800 และ 200 ไมครอน จากตารางที่ 4.5 พบว่าขนาดอนุภาคผงเฉลี่ย rFoam L มีขนาด 1355 ไมครอน อนุภาคผง rFoam M มีขนาดเฉลี่ย 769 ไมครอน และอนุภาคผง rFoam S มีขนาด 142 ไมครอน และในส่วนอนุภาคผง LLPDE มีขนาดเฉลี่ย 158 ไมครอน

ความกลมของอนุภาคผงพบว่าอนุภาคผง rFoam L และ M มีค่าความกลมเท่ากันที่ 0.5 ในขณะที่ rFoam S มีค่าความกลม 0.7 ส่วนอนุภาคผง LLDPE มีค่าความกลม 0.8

ตารางที่ 4.5 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงพลาสติก LLDPE และ rFoam แต่ละขนาด

Materials	Size Average (Micron)	Circularity
LLDPE	158	0.8
rFoam L	1,476	0.5
rFoam M	933.2	0.5
rFoam S	142	0.7

4.8.2 ผงความหนาแน่นรวมและการไหลแบบแห้ง

การทดสอบความหนาแน่นรวมอนุภาคผง rFoam ที่มีขนาดแตกต่างกัน จากตารางที่ 4.6 พบว่าอนุภาคผง rFoam L มีความหนาแน่นรวม 0.11 g/cm^3 อนุภาคผง rFoam M มีความหนาแน่นรวม 0.16 g/cm^3 และอนุภาคผง rFoam S มีความหนาแน่นรวม 0.17 g/cm^3 ในส่วนอนุภาคผง LLDPE มีความหนาแน่นรวม 0.39 g/cm^3 จากผลการทดสอบซึ่งสังเกตได้ว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และรูปร่างไม่กลมจะมีความหนาแน่นรวมต่ำกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

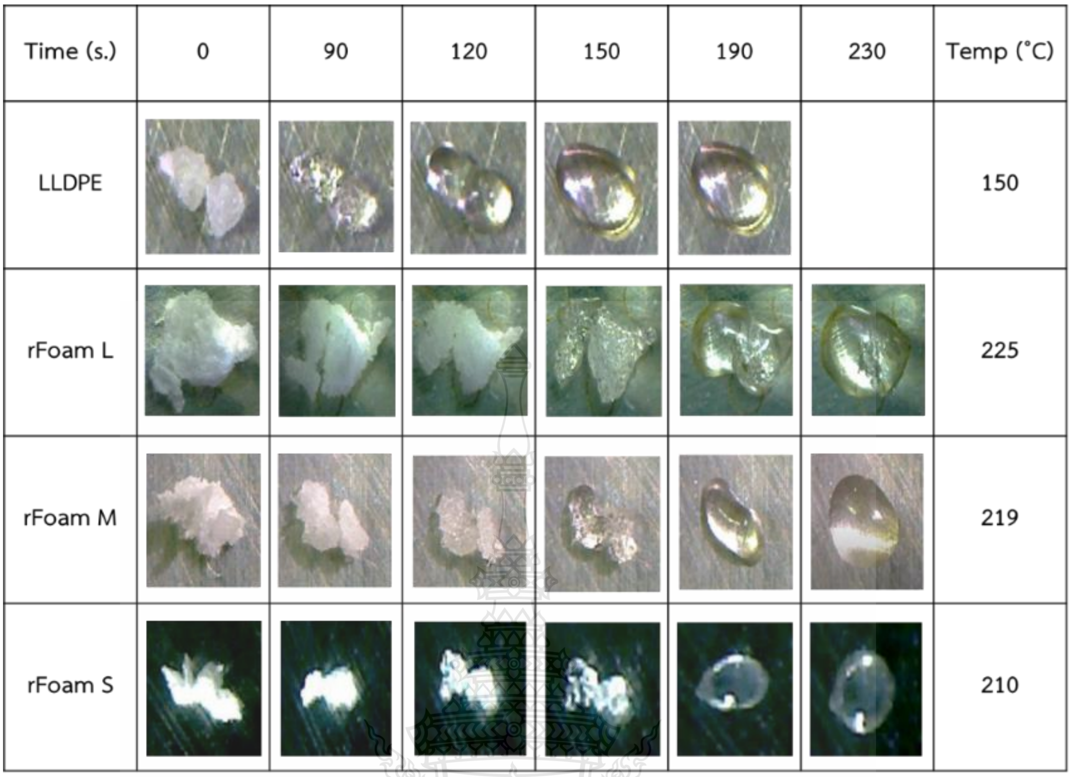
อัตราการไหลแบบแห้งพบว่าอนุภาคผง rFoam L, M และ S ไม่สามารถไหลผ่านอุปกรณ์ทดสอบได้และอนุภาคผง ส่วนอนุภาคผง LLDPE มีอัตราการไหล 11.054 วินาที เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีและรูปร่างไม่กลมเกิดการกีดขวางการไหลส่งให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ rFoam แต่ละขนาด

Material	Bulk Density (g/cm^3)	Dry Flow (s)
LLDPE	0.39	11.054
Size L	0.11	ไม่ไหล
Size M	0.16	ไม่ไหล
Size S	0.17	ไม่ไหล

4.8.3 ผลการอัตราการหลอมภายใต้สภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ (Sintering rate)

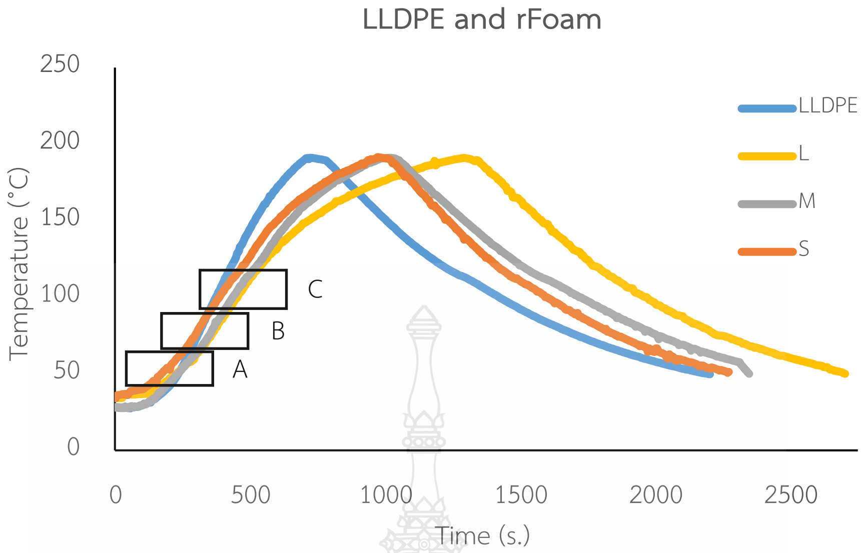
จากการนำอนุภาคผงวิเคราะห์ลักษณะทางความร้อน ตารางที่ 4.11 พบว่าอนุภาคผง rFoam เมื่อมีการให้ความร้อนอนุภาคผงจะเกิดการหดตัวลงอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงนึงและจึงเริ่มหลอมและหลอมสมบูรณ์ โดยอนุภาคผง rFoam L เมื่อเริ่มให้ความอนุภาคผงมีการหดตัวลงจนถึงอุณหภูมิ 153.6˚C หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 225˚C ส่วนอนุภาคผง rFoam M มีการหดตัวจนถึงอุณหภูมิ 135.5˚C และหลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 219˚C อนุภาคผง rFoam S มีการหดตัวลงจนถึงอุณหภูมิ 122.5˚C และหลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 210˚C เมื่อเทียบกับ LLDPE ที่หลอมเหลวสมบูรณ์ 150 องศาเซลเซียส จากการทดลองเห็นได้ว่า rFoam ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมสมบูรณ์เพิ่มสูงขึ้นตามเนื่องจากอนุภาคคผงที่มีขนาดใหญ่และมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 4.11 ลักษณะของอนุภาคผง rFoam แต่ละขนาดจากเริ่มต้นให้ความร้อนตลอดจนหลอมสมบูรณ์

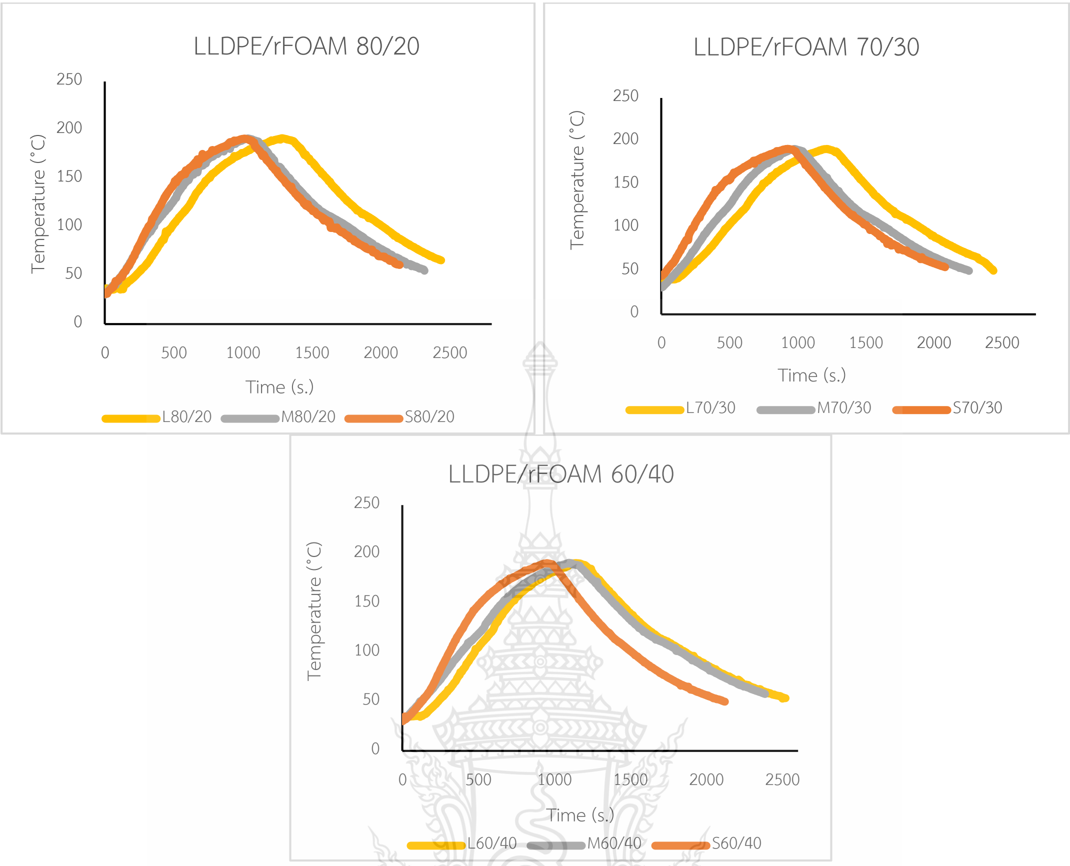
4.8.4 ผลการทดลองขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว

การขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวด้วยอนุภาคผง rFoam โดยพบว่าการใช้อนุภาคผงน้ำหนัก 30 กรัม ได้ความหนาของชิ้นงาน 3 มิลลิเมตร แต่ขนาดของอนุภาคผง rFoam L และ rFoam M มีขนาดใหญ่จนไม่สามารถบรรจุลงในแม่พิมพ์ได้จึงได้ลงปริมาณลงเหลือ 30 กรัม ความหนา 2.25 มิลลิเมตร จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการขึ้นรูป โดยอนุภาคผง LLDPE มีระยะเวลาในการขึ้นรูปเร็วกว่าอนุภาคผง rFoam S,M,L ในขณะที่อนุภาคผง rFoam S, M, L พบว่าอนุภาคผง rFoam L มีระยะเวลาในการขึ้นรูปนานที่สุด โดยอนุภาคผง LLDPE จากจุด A อนุภาคผงเริ่มมีการติดที่ผนังแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 44 °C และที่จุด B อนุภาคผงยึดเกาะติดผนังแม่พิมพ์สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 87 °C ที่จุด C อนุภาคผงหลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 110 °C ส่วนอนุภาคผง rFoam S,M,L เริ่มหลอมติดผนังแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 52, 54, 55 °C ตามลำดับ และติดผนังแม่พิมพ์สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 91, 94, 97 °C ตามลำดับ หลอมสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 119, 117, 116 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการขึ้นรูป LLDPE/rFoam

จากรูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างการขึ้นรูปของอนุภาคผง LLDPE และ rFoam S,M,L ที่อัตราส่วน 20, 30, 40 โดยน้ำหนัก โดยที่ LLDPE/rFoam ที่อัตราส่วน 20/80, 30/70 และ 40/60 พบว่าเมื่อมีการผสมระหว่าง LLDPE/rFoam สูตรที่มีการผสม rFoam ขนาดใหญ่ขึ้นและอัตราส่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการขึ้นรูปนานขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการหลอมที่แสดงถึงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการหลอมสมบูรณ์นานกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

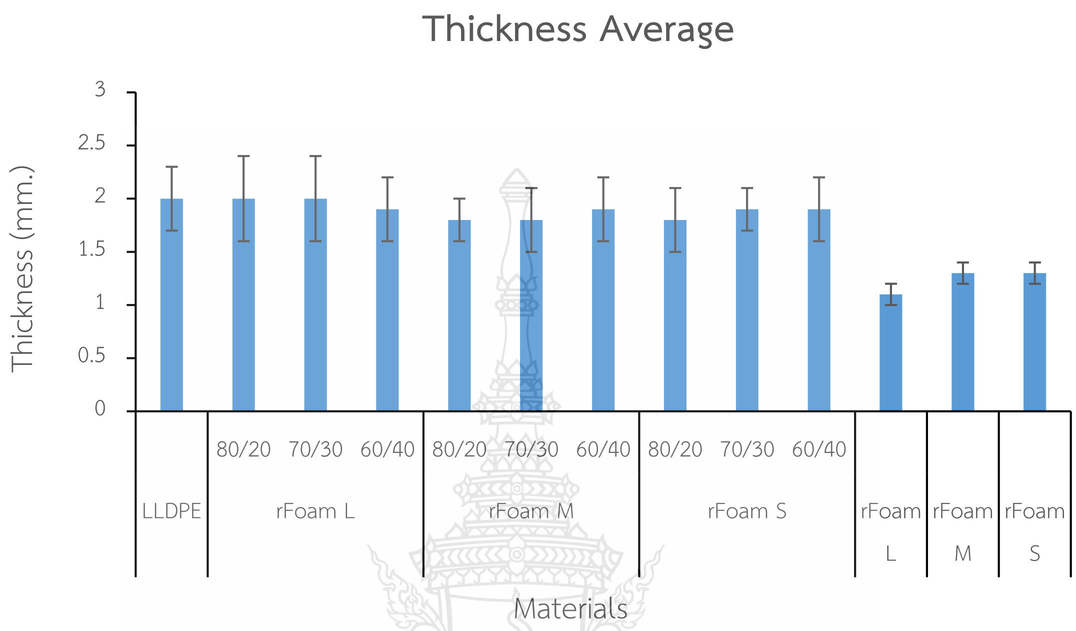


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในระหว่างขึ้นรูป LLDPE/rFoam

4.8.5 การกระจายความหนาของชิ้นงาน

จากการวัดความหนาทั้ง 10 จุด ของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคผง LLDPE มีความหนาสม่ำเสมอกันโดยมีความหนาเฉลี่ย 2±0.3 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง LLDPE/rFoam L ในอัตราส่วน 80/20, 70/30, 60/40 มีการกระจายความหนาเฉลี่ย 2.0±0.3, 2.0±0.4, 1.9±0.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคผง LLDPE/rFoam M ในทุกอัตราส่วนการกระจายความหนาเฉลี่ย 1.8±0.2, 1.8±0.3, 1.9±0.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ และชิ้นงานที่เตรียมได้จาก LLDPE/rFoam S ในทุกอัตราส่วนมีความหนาเฉลี่ย 1.8±0.3, 1.9±0.2 1.9±0.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในส่วน rFoam L พบว่าชิ้นงานมีความหนาเฉลี่ย 1.1±0.1 มิลลิเมตร และ rFoam M และ S มีความหนาเฉลี่ย 1.3±0.1 มิลลิเมตร ซึ่งจากการวัดความหนาพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE มีความหนามากกว่าชิ้นงานจาก rFoam ทุกขนาดเนื่องจากอนุภาคผง rFoam นั้นมีลักษณะที่เป็นรูพรุนซึ่งสังเกตได้จากผลการทดสอบอัตราการหลอมที่แสดงถึงอนุภาค

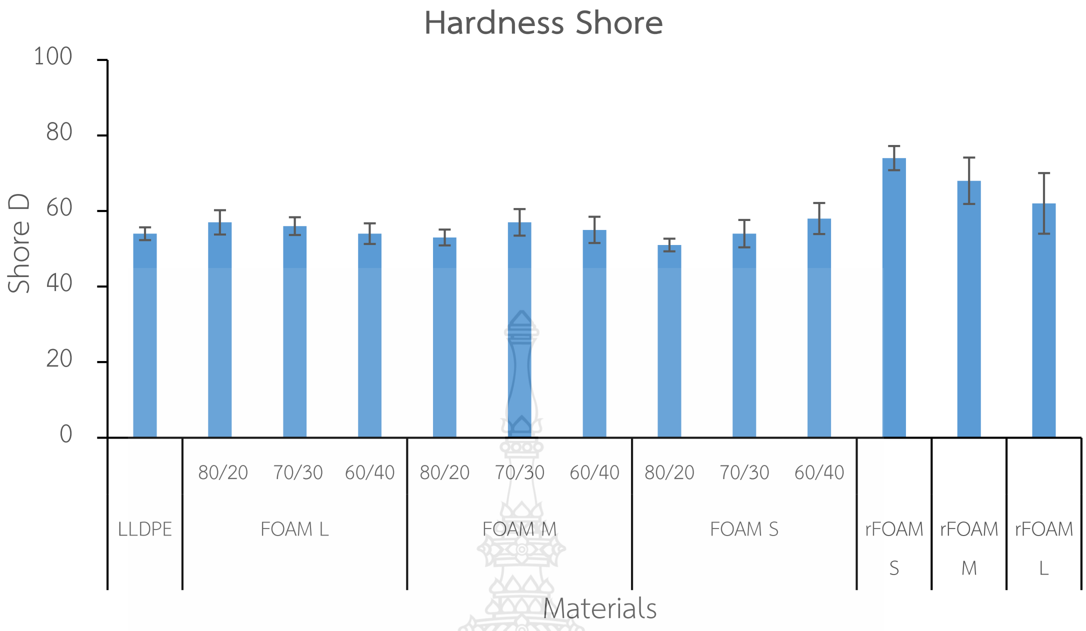
rFoam มีการหดตัวลงก่อนที่จะเกิดการหลอมทำให้ความหนาของชิ้นงานที่ได้ลดลงและเมื่อมีการผสมกับ LLDPE ที่มีความหนามากกว่าจึงสามารถทำให้ชิ้นมาผสมมีความหนาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 กราฟการกระจายความหนาของชิ้นงาน

4.8.7 ความแข็งที่ผิว (Surface Hardness)

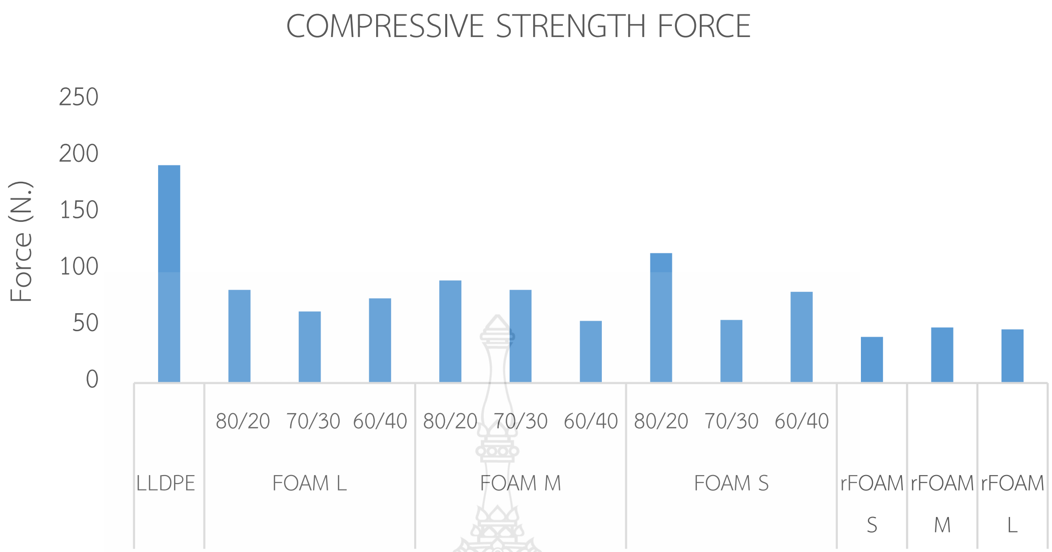
ผลการทดสอบความแข็งที่ผิวพบว่าอนุภาคผง แสดงดังรูป 4.15 พบว่าผลการวัดค่าความแข็งที่ผิวภายนอกชิ้นงานจากอนุภาคผง LLDPE มีความแข็งที่ผิวเฉลี่ย 54 ส่วนชิ้นงานจากอนุภาคผง rFoam L, M, S มีความแข็งที่ผิว 62, 68, 72 ตามลำดับ ซึ่งชิ้นงานที่เตรียมได้จาก rFoam นั้นมีความแข็งที่ผิวมากกว่าและในส่วนของชิ้นงานที่มีการผสมระหว่าง LLDPE/rFoam L ที่อัตราส่วน 80/20, 70/30, 60/40 พบว่ามีความแข็งที่ผิวภายนอก 57, 56, 54 ตามลำดับ ชิ้นงาน LLDPE/rFoam M มีความแข็งที่ผิวภายนอก 53, 57, 55 ตามลำดับ และชิ้นงาน LLDPE/rFoam S มีความแข็งที่ผิวภายนอก 51, 54, 58 ตามลำดับ จากการผสมค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงานที่ได้มีค่าเพิ่มสูงเล็กน้อยเนื่องจากอนุภาคผงของ rFoam ที่มีความแข็งมากกว่ากระจายอยู่ภายในชิ้นงานเมื่อทดสอบหัวกดได้มีการสัมผัสกับส่วนของ rFoam จึงส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ผลการวัดความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน LLDPE, rFoam และ LLDPE/rFoam

4.8.8 การทดสอบการทนต่อแรงกดอัด

ผลการทดสอบแรงกดอัดแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าชิ้นงานจากอนุภาคผง LLDPE สามารถรับแรงกดอัดได้ 193 นิวตัน ซึ่งสามารถรับแรงกดอัดได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีการผสมกันระหว่าง LLDPE/rFoam โดยผลการรับแรงกดอัดจากชิ้นงาน LLDPE/rFoam L ที่อัตราส่วน 80/20, 70/30, 60/40 มีค่ารับแรงกดอัด 82.5, 63.3 และ 75 นิวตัน ตามลำดับ ชิ้นงานทดสอบจาก LLDPE/rFoam มีค่ารับแรงกดอัด 90.8, 82.5 และ 55 นิวตัน ตามลำดับ และชิ้นงานทดสอบ LLDPE/rFoam S มีค่ารับแรงกดอัด 115, 55.8 และ 80.8 นิวตัน ตามลำดับ ในส่วนของชิ้นงานจากอนุภาคผง rFoam L, M, S มีค่ารับแรงกดอัด 40.8, 49.2 และ 47.5 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มเมื่อมีการผสม rFoam ส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดลดลงตามปริมาณ rFoam เพิ่มขึ้น เนื่องจากชิ้นงาน rFoam L,M,S มีค่าการทนต่อแรงกดอัดลดลงต่ำอยู่แล้วเมื่อเติมลงใน LLDPE ส่งผลให้ไปขัดขวางการรับแรงและเกิดช่องว่างระหว่าง rFoam กับ LLDPE



รูปที่ 4.16 กราฟผลการทดสอบการทนต่อแรงกดอัด

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้มีวัตถุประสงค์ศึกษาถึงการนำฝาขวดพลาสติก (rBottleCap) เม็ดพอลิเอทิลีนผ่านการรีไซเคิล (rHDPE) ถุงพลาสติก (rBag) บรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน (rPP) หลอดพลาสติก (rStraw) โฟมชนิดพอลิสไตรีน (rFoam) และฝาแก้วน้ำพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (rPS) มาขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเพื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปแบบหมุน อีกทั้งยังมีการนำขยะจากโฟมมาผสมกับ LLDPE เพื่อปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติบางประการ โดยผลทดลองสามารถสรุปดังนี้

5.1 การรีไซเคิลด้วยขยะพลาสติกแต่ละชนิด

การทดสอบอัตลักษณ์เพื่อระบุชนิดของถุงพลาสติกและหลอดพลาสติกพบว่าทำถุงพลาสติกทำมาจากพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนส่วนหลอดพลาสติกทำจากพอลิพรอพิลีนและจากการทดลองสมบัติทางกายภาพของอนุภาคผงพบว่าอนุภาค LLDPE กับวัสดุที่เตรียมแต่ละชนิดมีขนาดใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 140-240 ไมครอน ยกเว้นอนุภาคผง rBag มีขนาดใหญ่อยู่ที่ 350 ไมครอน และการตรวจสอบรูปร่างของอนุภาคพบว่าอนุภาค LLDPE และขยะที่เตรียมได้มีรูปร่างค่อนข้างกลมยกเว้น rStraw และ rBag ที่มีรูปร่างไม่กลมและมีส่วนของหาง ส่วนความหนาแน่นรวมนั้นพบว่าวัสดุที่เตรียมได้มีความหนาแน่นรวมที่ต่ำกว่า LLDPE เนื่องมากจากอนุภาคแต่ละชนิดมีความหนาแน่น รูปร่าง ขนาดไม่เท่ากันและการทดสอบการไหลแบบแห้งพบว่ามีเพียง LLDPE และ rBottleCap ที่สามารถไหลผ่านได้เช่นเดียวกับการทดสอบอัตราการอัดตัวที่มีแค่ LLDPE และ rBottleCap มีค่าการไหลดี หลังการทดสอบค่าดัชนีการไหลวัสดุที่เตรียมได้มีค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกับ LLDPE ที่มีค่าดัชนีการไหล 3.5 กรัมต่อ 10 นาที ยกเว้น rBag, rFoam, rPS ที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำและ rPP ที่มีค่าดัชนีการไหลสูงซึ่งไม่เหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

การทดสอบทางความร้อนภายใต้สภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ผลการทดสอบ LLDPE มีอัตราการหลอมเหลวสมบูรณ์เร็วกว่าวัสดุที่เตรียมในช่วงเวลาเดียวกันและอัตราการหลอมของ rBottleCap และ rHDPE มีอัตราหลอมใกล้เคียงกับ LLDPE และการทดสอบการขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแกนเดียวพบว่าอนุภาคผงที่เตรียมได้นั้นสามารถขึ้นรูปได้ทุกชนิดแต่เวลาในการขึ้นรูปไม่เท่ากันโดย LLDPE มีเวลาในการขึ้นรูปเร็วที่สุด ตามด้วย rHDPE และ rBottleCap ซึ่งสอดคล้องกับผลอัตราการหลอม

การทดสอบทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบด้วยการวัดการกระจายความหนาพบว่าชิ้นงาน LLDPE มีความหนา 2.5 มิลิเมตร และชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย rBottleCap rHDPE มีความหนาเท่ากัน

ส่วน rBag มีความหนาสูงที่สุดเนื่องจากวัสดุมีความหนาแน่นรวมต่ำ มีขนาดและรูปร่างไม่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูป ส่วน rPP และ rStraw พบว่าภายในชิ้นงานมีฟองหรืออากาศส่งผลให้ความหนามากกว่า LLDPE และ rFoam และ rPS มีความหนาน้อยที่สุดใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบความขรุขระที่ผิวชิ้นงานจาก LLDPE มีความขรุขระที่ผิวที่ต่ำทั้งด้านในและด้านนอกชิ้นงานต่างจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากวัสดุที่เตรียมได้พบว่าที่พื้นผิวด้านนอกมีความขรุขระต่ำแต่พบรูและเป็นโพรงสำหรับชิ้นงานจาก rBag ส่วนพื้นผิวภายในพบว่ามีค่าความขรุขระที่สูงเมื่อเทียบกับ LLDPE ในส่วนของความแข็งที่ผิวชิ้นจาก LLDPE rBottleCap rHDPE rStraw มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน และ rBag rPP มีความแข็งที่ผิวต่ำ แต่ชิ้นงานจาก rPS และ rFoam มีความแข็งที่ผิวสูงที่สุดเนื่องจากเป็นลักษณเด่นของพอลิสไตรีน

การทดสอบการทนต่อแรงกดอัดจากชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวชิ้นงานจาก LLDPE สามารถทนต่อแรงกดอัดได้สูงใกล้เคียงกับชิ้นงานจาก rBottleCap แต่ชิ้นงานมีการเสียรูปแตกต่างด้วย rBottleCap มีการเสียรูปแบบเปราะส่วน LLDPE มีการเสียรูปแบบเหนียว ส่วนชิ้นงานจาก rBag มีค่าทนต่อแรงกระแทกต่ำถึงแม้จะมีความหนามากที่สุด ในส่วนชิ้นงาน rPS และ rFoam สามารถรับแรงกดอัดได้ต่ำที่สุดเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเปราะ

จากการทดลองพบว่าฝาขวดน้ำพลาสติกและเม็ดพอลิเอทิลีนที่ผ่านการรีไซเคิล เหมาะสมสำหรับการนำมารีไซเคิลด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเนื่องจากผลการทดสอบต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE เกรดทางการค้า ส่วนขยะชนิดอื่นอาจจะไม่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

5.2 การผสมอนุภาคผง rFoam กับ LLDPE

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของอนุภาคผง rFoam ที่ผ่านการบดลดขนาดทั้ง 3 ขนาดพบว่านอกจากขนาดมีความต่างกันแล้วรูปร่างยังต่างกันโดย rFoam L และ M มีค่าความกลมต่ำกว่าแสดงถึงรูปร่างที่ไม่กลมเมื่อเทียบกับ rFoam S และ LLDPE ที่มีค่าความกลมใกล้เคียงกัน เมื่อทดสอบความหนาแน่นรวมจึงพบว่าความหนาแน่นรวมของ rFoam ทั้ง 3 ขนาดมีความหนาแน่นต่ำกว่า 1 เท่าเมื่อเทียบกับ LLDPE เนื่องจากความหนาแน่นของโฟมต่ำจากลักษณะอนุภาคที่มีรูพรุน และผลการทดสอบอัตราการไหลแบบแห้งอนุภาคผง rFoam ทั้ง 3 ขนาดไม่สามารถไหลผ่านกรวยทดสอบ

ผลทดสอบทางความร้อนภายใต้สภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ rFoam พบว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้อัตราการหลอมช้าขึ้นเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีการส่งผ่านความร้อนต่ำกว่าอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวเยอะเมื่อทดสอบการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวตามอัตราส่วนพบว่าเมื่อปริมาณ rFoam เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการขึ้นรูปนานขึ้นตามเช่นเดียวกับขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปนานขึ้น

การทดสอบทางกายภาพของชิ้นงานจากการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวความหนาของชิ้นงาน LLDPE และชิ้นงานที่มีการผสมทุกอัตราส่วนมีความหนาเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ความหนาของชิ้นงาน จาก rFoam M และ S ชิ้นงานที่ได้มีความหนาใกล้เคียงกันยกเว้นชิ้นงานที่ขึ้นรูปจาก rFoam L มีความหนาต่ำที่สุด และผลการทดสอบความแข็งที่ผิวชิ้นงาน LLDPE มีความแข็งที่ผิวน้อยกว่าชิ้นงานที่ได้จาก rFoam ซึ่งจากอนุภาค rFoam ที่มีขนาดต่างกันส่งผลให้ความแข็งต่างกันโดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีความแข็งที่ผิวสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่และการผสม rFoam กับ LLDPE ในทุกอัตราส่วนนั้นสามารถเพิ่มความแข็งที่ผิวได้เล็กน้อย

การทดสอบการทนต่อแรงกดอัดการทดสอบแรงกดอัดของชิ้นงาน LLDPE มีค่าการทนต่อแรงกดอัดสูงกว่าชิ้นงานจาก rFoam ที่ขึ้นรูปทุกขนาดอนุภาคและเมื่อผสมกันทุกอัตราส่วนพบว่าการทนต่อแรงกดอันลดลงครึ่งนึงจึงแสดงให้เห็นว่าการผสมระหว่าง rFoam กับ LLDPE ไม่ช่วยเพิ่มสมบัติทางกลแต่กลับลดสมบัติทางกล

จากการทดลองพบว่าเมื่อผสมอนุภาคผง rFoam กับ LLDPE สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้แต่สมบัติของชิ้นงานที่ได้ลดลงมากกว่า 50% เมื่อเทียบกับ LLDPE อีกทั้งยังใช้เวลาในการขึ้นรูปที่นานขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรศึกษาวิธีการเตรียมอนุภาคผงให้มีลักษณะกลมหากวิธีเตรียมที่เหมาะสมจะสามารถทำให้วัสดุที่เตรียมได้มีแนวโน้มที่สามารถขึ้นรูปและมีสมบัติที่ดี

5.3.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรอบการหมุนของกระบวนการขึ้นรูปที่ส่งผลกับการไหลภายในแม่พิมพ์

5.3.3 ควรมีการศึกษาวิธีการผสมรูปแบบอื่นนอกจากแบบแห้ง เพื่อทำให้สมบัติของพลาสติกผสมดีขึ้น

บรรณานุกรม

[1] รายงานประจำปี 2563 กรมควบคุมมลพิษ. Retrieved from https://www.pcd.go.th/publication/12076

[2] M. Samper, D. Garcia-Sanoguera, F. Parres, and J. López. (2010). Recycling of Expanded Polystyrene from Packaging. **Plastics and Recycling Technology, 26**(2), 83–92. doi:10.1177/147776061002600202

[3] J.A. Rodríguez-Liébana, M.A. Martín-Lara, F.J. Navas-Martos, A. Peñas-Sanjuan, V. Godoy, S. Arjandas, M. Calero. (2022). Morpho-structural and thermo-mechanical characterization of recycled polypropylene and polystyrene from mixed post-consumer plastic waste. **Journal of Environmental Chemical Engineering, 10**(5), 108332. doi:10.1016/j.jece.2022.108332.

[4] P. Sormunen and T. Kärki. (2019). Compression Molded Thermoplastic Composites Entirely Made of Recycled Materials. **Sustainability, 11**(3), 631. doi: 10.3390/su11030631.

[5] Live About. (2019). **How Long Will It Take That Bag of Trash to Decompose in a Landfill**. Retrieved from https://www.liveabout.com/how-long-does-it-take-garbage-to-decompose-2878033

[6] R. J. Crawford and J. L. Throne. (2002). 1 - INTRODUCTION TO ROTATIONAL MOLDING. **Rotational Molding Technology,** Norwich, NY: William Andrew Publishing,

[7] นันทวัฒน์ พร้อมภูมิและมนรสมิ์ ตั้งสุณาวรรณ. (2013). พอลิเอทิลีน. **Plastic Knowledge**. สมุทรปราการ: บริษัท วีพลัส กรุ๊ป (ไทยแลนด์) จำกัด.

[8] K. H. J. Buschow. (2001). Polyethylene: Linear Low-density. **Encyclopedia of materials science and technology.** Amsterdam, New York: Elsevier.

[9] H. F. Enderle. (2001). Polyethylene: High-density. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology (2nd ed).** K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B.Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veyssière. Oxford: Elsevier.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[10] C. Maier and T. Calafut. (1998).Introduction. **Polypropylene**. Norwich, NY: William Andrew Publishing.

[11] A. J. Peacock and A. Calhoun. (2006) . 21 Polystyrene. **Polymer Chemistry**. Germany: Hanser Publishers, United states, US: Sanser Gardner Publications,

[12] MTEC A Member Of NSTDA. (2020). **พลาสติกรีไซเคิล.** Retrieved from https://www.mtec.or.th/bioplastic/recycled-plastic/

[13] Ogila, K., Shao, M., Yang, W., & Tan, J. (2017). Rotational molding: A review of the models and materials. **Express Polymer Letters, 11**, 778-798. doi:10.3144/expresspolymlett.2017.75.

[14] R. J. Crawford and J. L. Throne. (2002). 4 - ROTATIONAL MOLDING MACHINES. **Rotational Molding Technology.** Norwich, NY: William Andrew Publishing

[15] E. Edge and E. LLC. (n.d.).**Rotational Molding Review.** Retrieved from https://www.engineersedge.com/manufacturing/rotational_molding_review_10007.htm

[16] P. Nugent. (2017). Chapter15 - Rotational Molding. **Applied Plastics Engineering Handbook** (2nd ed). United states, US: William Andrew Publishing.

[17] S. Durand, B. E. Jackson, W. C. Fonteno, and J.-C. Michel. (2023). Quantitative Description and Classification of Growing Media Particle Morphology through Dynamic Image Analysis. **Agriculture(13)**2, 396, doi:10.3390/agriculture13020396

[18] Y. Takashimizu and M. Iiyoshi. (2016). New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio. **Prog. Earth Planet. Sci, 3**(2), 1-16. doi:10.1186/s40645-015-0078-x

[19] เชาวลิต มณฑล, กฤษณา ไกรสินธุ์, จิระพรชัย สุขเสรี และลักษณา เจริญใจ. (2557). การศึกษาสมบัติการไหลของผงยาสมุนไพรเพื่อการเตรียมยาในรูปแบบของแข็ง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 22**(5), 743-754.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[20] J. D. Phillipson. (1997). Analytical profiles of drug substances and excipients. **Phytochemistry, 24**(45), 122-162. doi:10.1016/S0031-9422(97)85525-2

[21] E. Jansri and N. O-Charoen. (2018). Two-Layered Polypropylene and Polyethylene Product by One-Step Rotational Molding. **Journal of Polymer Engineering, 38**(7), 685-694. doi: 10.1515/polyeng-2017-0367

[22] M. Asgarpour, F. Bakir, S. Khelladi, A. Khavandi, and A. Tcharkhtchi. (2012). 3D model for powder compact densification in rotational molding. **Polymer Engineering & Science, 52**(9), 2033–2040. doi: 10.1002/pen.23133

[23] A. G. Spence and R. J. Crawford. (1996) The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products. **Polymer Engineering & Science,** 36(7), 993–1009. doi: 10.1002/pen.10487

[24] S. S. Song, T. Nagy, and J. L. White. (1992). A Basic Study of Applicability of Regrind Polyethylene in Rotational Molding. **International Polymer Processing, 7**(3), 274–282. doi:10.3139/217.920274

[25] A. Greco, M. Frigione, A. Maffezzoli, and D. Acierno. (2001). Rotational molding of recycled HDPE. **Polymer Recycling, 6**(1), 23–33.

[26] R. G. López GonzalezNúñez, R. C. Vázquez-Fletes, P. Ortega-Gudiño, M. O. Vázquez-Lepe, D. Rodrigue, and R. González-Núñez, (2021). Rotational molding of compatibilized PA6/LLDPE blends. **Polymer Engineering & Science, 61**(4), 1007–1017. doi:10.1002/pen.25617

[27] S. Chaisrichawla and R. Dangtungee. (2018). The Usage of Recycled Material in Rotational Molding Process for Production of Septic Tank. **Materials Science Forum**, **936**, 151–158. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.936.151.

[28] D. Li, L. Zhou, X. Wang, L. He, and X. Yang. (2019). Effect of Crystallinity of Polyethylene with Different Densities on Breakdown Strength and Conductance Property. **Materials, 12**(11), 1746. doi:10.3390/ma12111746

บรรณานุกรม (ต่อ)

[29] E. Karaagac, M. P. Jones, T. Koch, and V.-M. Archodoulaki. (2021). Polypropylene Contamination in Post-Consumer Polyolefin Waste: Characterization Consequences and Compatibilisation. **Polymers, 13**(16) 2618. doi: 10.3390/polym13162618

[30] A. Scoppio, D. Cavallo, A. J. Müller, and D. Tranchida. (2022). Temperature modulated DSC for composition analysis of recycled polyolefin blends. **Polymer Testing, 113**, 107656. doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107656

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ISSN 0125-1724 (Print)
ISSN 2730-3888 (Online) วิศวสาร
ลาดกระบัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL
ปีที่ 40 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2566

บทความวิจัย

1. ความเป็นไปได้ในการใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน 1
จักรภัทร ปรีดาวัฒน์ สุชาลิณี มธุรสมนตรี เอกตินัย จันทร์ศรี และ ณรงค์ชัย โอเจริญ
2. การประยุกต์ใช้แนวคิดลีนและโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อช่วยในการติดตามผล การดำเนินงานของงานสำคัญในสำนักงาน 10
พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม อณัญญา จันทวุฒิ และ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข
3. การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนการสอนในการออกแบบระบบพื้นคอมโพสิต 27
สิทธิศักดิ์ อันสนั่น อัศนัย ทาเภา และ เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์
4. การวางแผนการผลิตที่มีหลายกลุ่มผลิตภัณฑ์และการจัดสรรแรงงานที่มีทักษะหลากหลายด้วยตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม กรณีศึกษาผู้ผลิตชุดสายไฟรถยนต์ 40
วุฒินันท์ นุ่นแก้ว มาริษา กิมาพร และ ชฎาพร สิงห์กุม
5. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน 57
อภิญญา อ่อนสาร สุพัฒน์พงษ์ มัตราช วิภาดา เดชะปัญญา กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา เทียมมะณีย์ รัตนวีระพันธ์ และ สมภพ สนองราษฎร์
6. การเลือกตัวทำละลายสำหรับการสกัดไมทราไจนีน โดยใช้พารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน 72
สิรวิชญ์ ดิษฐาพรเศรษฐ์ ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันติ์ และ สุรัตน์ อารีรัตน์
7. การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวสดแช่แข็งรายเดือนด้วยตัวแบบผสมของโฮลต์และซัปพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชันที่เน้นการลดความผิดพลาดอย่างเป็นระบบ 85
ธรณินทร์ สัจวิริยทรัพย์
8. การประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมภูมิคุ้มกันหมู่ไวรัสโคโรนาร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมของวาฬหลังค่อมสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีช่วงเวลายืดหยุ่น 98
ศิริชัย ยศวังใจ และ กิตติพงษ์ ม้าลำพอง
9. การศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางสลับ 115
สมพล สกุลหลง สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์ และ ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์
10. การส่งเสริมค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดด้วยเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อน 126
พงศ์ธร ญาติพร้อม และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ
11. การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยฮิลไคลมิงอัลกอริทึม 139
กิตติศักดิ์ บรรณสาร และ อลงกรณ์ ละม่อม
12. สภาวะที่เหมาะสมในการกัดผิวหน้าเรียบผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกต่อค่าความขรุขระผิว 153
ธเนศ รัตนวิไล สมศักดิ์ จีนาพงษ์ และ ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ (662) 329-8301# 207
โทรสาร (662) 329-8301# 207

ที่ปรึกษา

คณบดี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อุมา สีบุญเรือง

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร.พิณิช ธนชัยโชคศิริกุล

กองบรรณาธิการเฉพาะด้าน (Transaction)

ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์
ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข
รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รวิภัทร ลาภเจริญสุข
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิดา นอบน้อม
ติดต่อประสานงาน
จัดทำต้นฉบับ Artwork

นายวิรัญจ์ จุลไกวัลสุจริต
พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

นายทนงศักดิ์ ใจชื่นแสน
ออกแบบปก

"วิศวสารลาดกระบัง"

วิศวสารลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ตีพิมพ์บทความที่มีคุณภาพสูงทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ
2. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนผลงานวิจัยและองค์ความรู้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างนักศึกษา นักวิจัย และอาจารย์ ตลอดจนผู้สนใจ
4. เป็นเอกสารรวบรวมบทความวิจัยและผลงานทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนกับงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิด หรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ และมีทฤษฎีประกอบ หรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของทุกบทความมี มาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมิใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟท์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่นำเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

ชื่อเรื่อง	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน	ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ
สถานที่ทำงาน	ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน
บทคัดย่อ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
เนื้อความ	ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อตามลำดับ 1. บทนำ 3. การทดลองและผลการทดลอง 2. ทฤษฎี 4. สรุป 2.1 หลักการของ..... 2.2 หลักการใหม่.....
กิตติกรรมประกาศ	(ถ้ามี)
เอกสารอ้างอิง	การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิงโดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

[1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, vol.30, no.1, pp.7-12, March, 2556.

[2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltes, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol.39, no.4, pp.312-315, Sept., 1992.

[3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความอยู่ระหว่าง 8–14 หน้ากระดาษ A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการวิศวสารลาดกระบัง และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรติดต่อ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ได้ที่ ลิงก์ https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL
วิศวสารลาดกระบัง
School of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ "วิศวสารลาดกระบัง"

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน
บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ
สิรินธร ไทย-เยอรมัน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-
พระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตรจร
สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริ้วรุจา
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติเขต สู้รักษา
ภาควิชาวิศวกรรมดนตรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร (เกษียณอายุ)
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ (เกษียณอายุ)
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง

ความเป็นไปได้ในการใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

Potential use of Recycled Plastic Bags in Rotational Molding Process

จักรภัทร ปรีดาวัฒน์[1], สุชาลินี มธุรสมนตรี[1], เอกตินัย จันทร์ศรี[2] และ ณรงค์ชัย โอเจริญ[1,*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก, คลองหลวง ปทุมธานี 12110

[2]ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์, คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์, องครักษ์ องครักษ์ นครนายก 26120

Jakkaphat Preedawat,[1] Suchalinee Mathurosemontria[1], Ektinai Jansri[2] 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) เปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดพอลิเอทีลีนเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน ภายในงานวิจัยมีการเตรียมวัสดุสำหรับใช้ในการขึ้นรูปต้องมีการลดขนาดถุงพลาสติกให้อยู่ในรูปอนุภาคผงด้วยเครื่องพัลเวอร์ไรซ์ (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 นิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กลวงขนาดใหญ่ เช่น ถังบรรจุน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย ถังขยะ ฯลฯ ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุค่อนข้างมากในการผลิต[1] และมากกว่า 90% ของผลิตภัณฑ์ในการผลิตถุงพลาสติกเป็นส่วนใหญ่จะใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนเป็นหลัก งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะนำวัสดุจากถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วและถูกทิ้งในรูปของขยะมูลฝอยกลับมาใช้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการนำถุงมาตัดให้อยู่ในรูปแบบฟิล์ม จึงขอใช้คำว่าฟิล์มแทนคำว่าถุง อีกทั้งช่วยงานวิจัยนี้จะช่วยให้ผู้ผลิตภายในประเทศไทยสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ และยังช่วยลดปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อมของปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้นในพื้นที่จังหวัดปทุมธานีได้อีกทางหนึ่งด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุในการทดลอง

ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากแต่ละอำเภอของจังหวัดปทุมธานีซึ่งได้แก่ อำเภอเมืองปทุมธานี อำเภอคลองหลวง 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 จากนั้นตัดแต่งถุงให้อยู่ในรูปของฟิล์มและลดขนาดฟิล์มให้อยู่ในรูปของอนุภาคผง เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [1] โดยการนำไปอัดเป็นแผ่นขนาด 20×20 เซนติเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ในแต่ละครั้งจะใช้ฟิล์ม 70–80 กรัม ใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 150 บาร์ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และหล่อเย็นเป็นระยะเวลา 6 นาที จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบไม่อัดพลาสติกเป็นเวลา 5 นาที จะได้เศษพลาสติกขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร แล้วจึงนำมาบดด้วยเครื่องพัลเวอร์ไรซ์ (Pulverizer) แบบค้อนเหวี่ยง ครั้งละ 20 กิโลกรัม เวลา 15 นาที ทำให้ได้อนุภาคผง r-Film ที่มีขนาดเล็กที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแบบหมุน

2.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

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

รูปที่ 1 เครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว (The Axial Powder Flow Apparatus)

3. ผลการทดลอง

3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผงพลาสติก

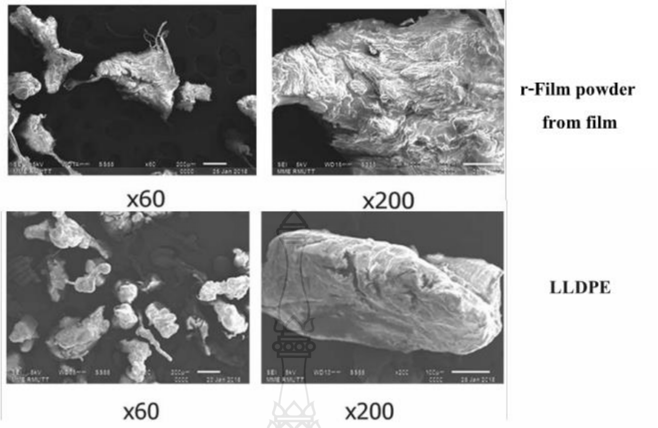
ผลการตรวจสอบลักษณะด้วยกล้องดิจิตอลไมโครสโคป และผลการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคผง r-Film จำนวน 200 อนุภาค ด้วยโปรแกรม ImageJ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคผง r-film ที่เตรียมได้มีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่า LLDPE ที่ขนาด 400 และ 250 ไมโครเมตร ตามลำดับแสดงดัง**ตารางที่ 1** และค่าความกลม(Circularity) 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 ดัง**รูปที่ 2** ซึ่งมีส่วนที่เกิดจากการยืดตัวเมื่อถูกตัดเฉือนเป็นลักษณะเหมือนหาง (Tail) ที่เห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ LLDPE ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากกล้องดิจิตอลไมโครสโคป อย่างชัดเจนและส่งผลต่อความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และการไหลแบบแห้ง (Pour ability)

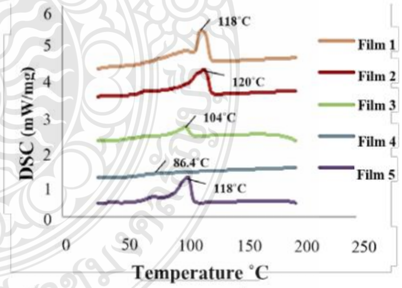
โดยการทดสอบความหนาแน่นรวม ตามมาตรฐาน ASTM D1895 พบว่าอนุภาคผง r-Film ผ่านการลดขนาดมีค่า 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ LLDPE มีค่าเท่ากับ 0.39 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นรวมของอนุภาคผง r-Film น้อยกว่า LLDPE เกิดจากอนุภาคผง r-Film ที่เตรียมมีขนาดใหญ่กว่าและมีส่วนของหางมากกว่า (ค่าความกลมต่ำกว่า)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



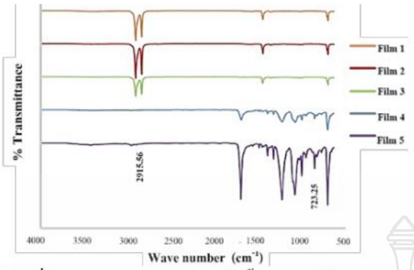
รูปที่ 2 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 60 เท่า และ 200 เท่าจากกล้อง SEM ของอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

3.2 การทดสอบลักษณะเฉพาะของฟิล์มพลาสติก

จากลักษณะของถุงพลาสติกที่เก็บรวบรวมมาพบว่ามีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันอยู่ 5 ตัวอย่าง จึงทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC) ซึ่งผลที่ได้พบว่าจากกราฟความร้อนพบว่ามีจุดหลอมเหลวที่ในฟิล์มชนิดที่ 1–3 มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 118, 120 และ 104 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดัง**รูปที่ 3** ซึ่งสอดคล้องกับพลาสติกในตระกูลพอลิเอทิลีน (PE) ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 100–130 โดยฟิล์มชนิดที่ 3 มีค่าจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ซึ่งมีค่าจุดหลอมเหลวที่ 100–115 องศาเซลเซียส ส่วนฟิล์มชนิดที่ 1 และ2 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 ชิ้นมาทดสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแบบฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป (FTIR) ซึ่งให้ผลแสดงดัง**รูปที่ 4** พบว่าฟิล์มชนิดที่ 1–3 แสดงแถบการดูดกลืนรังสีเปอร์เซ็นต์ดูดกลืนมากที่สุดที่ช่วงคลื่นที่ 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 ชนิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC)



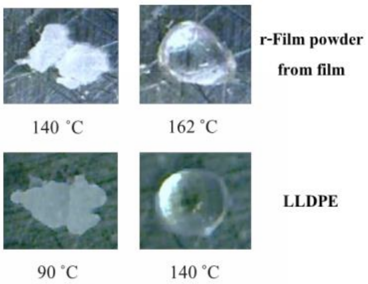
รูปที่ 4 กราฟผลการทดสอบฟิล์มทั้ง 5 ชนิด ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแบบ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

3.3 การทดสอบสมบัติการไหลแบบหลอมเหลว

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

3.4 การทดสอบอัตราการหลอม

การทดสอบนี้ทดสอบโดยการนำอนุภาคผง r-Film และ LLDPE วางคู่กันบนแผ่นให้ความร้อนพร้อมให้ความร้อนและบันทึกอุณภูมิพร้อมกับถ่ายวิดีโอ ผลการทดสอบอัตราการหลอมของอนุภาคผง r-Film ที่เตรียมได้กับ LLDPE พบว่า LLDPE มีอัตราการหลอมติดกันที่อุณหภูมิ 90°C และอนุภาคผงหลอมเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 110°C ในขณะที่อนุภาคผง r-Film เริ่มหลอมติดกันที่อุณหภูมิ 140°C และหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 162°C แสดงดัง**รูปที่ 5** ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการหลอมของอนุภาคผง r-Film มีอัตราการหลอมที่ต่ำกว่าเนื่องจากชนิดของฟิล์มที่นำมารีไซเคิลนั้น 2 ใน 3 เป็นฟิล์มที่อยู่ในกลุ่ม HDPE ที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่า LLDPE [7] และสอดคล้องกับผลดัชนีการไหลที่แสดงถึงความหนืดของอนุภาคผง r-Film ที่มากกว่า



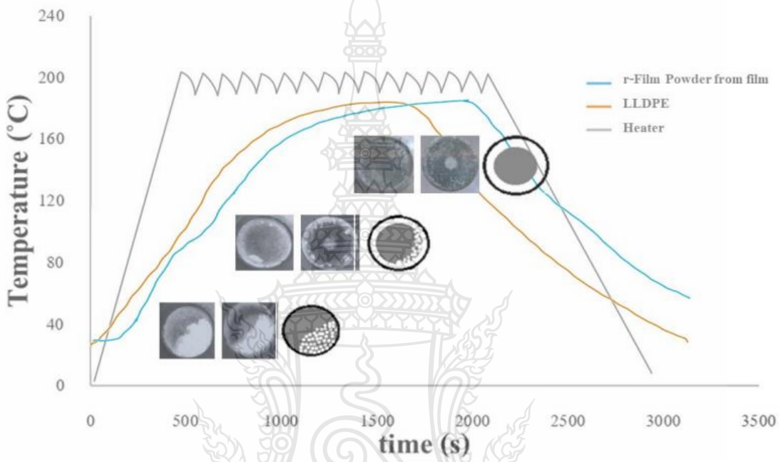
รูปที่ 5 ภาพถ่ายอัตราการหลอมของอนุภาคผง r-Film และ LLDPE

3.5 การทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดียว

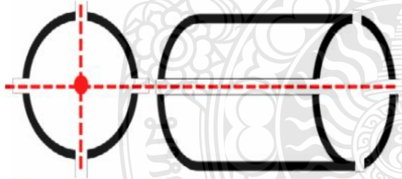
การทดสอบนี้จะทำโดยการเปรียบเทียบค่าเวลาของวัสดุ 2 ชนิด คือ อนุภาคผง r-Film และ LLDPE นำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาในการขึ้นรูปผ่านไป ซึ่งค่าอุณหภูมิของระบบแสดงไว้ในแผนภูมิเส้นบนสุดที่แสดงถึงอุณหภูมิในการขึ้นรูปจนถึง 190°C ดังแสดงใน**รูปที่ 6** ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมภายในเช่น สภาวะที่ผงพลาสติกเริ่มติดผนังแม่พิมพ์ (Tack Temperature) สภาวะที่ผงพลาสติกเกาะกับผิวแม่พิมพ์ทั้งหมด (Kink Temperature) และสภาวะที่พลาสติกเปลี่ยนจากของแข็งไปของเหลวที่สภาพวะนี้พลาสติกจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นลักษณะของอสัณฐาน (Amorphous phase) ทั้งหมดแล้ว ซึ่งสังเกตเห็นภายในแม่พิมพ์ได้ชัดว่าวัสดุที่ติดผิวของแม่พิมพ์จะมีลักษณะใสทั้งหมด โดยกราฟจะแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ขึ้นรูปของ r-Film นานกว่า LLDPE เนื่องจากอนุภาคผง r-Film มีขนาดใหญ่และความหนาแน่นรวมมากกว่ารวมถึงอัตราการหลอมต่ำกว่าทำให้การแพร่ผ่านความร้อนระหว่างอนุภาคต่ำกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กและกลม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดขนาด ความกลมและอัตราการหลอมที่อัตราการหลอมของอนุภาคผง r-Film มีอัตราการหลอมที่ต่ำกว่า LLDPE [2],[7]

3.6 การวัดการกระจายความหนาของชิ้นงานทดสอบ

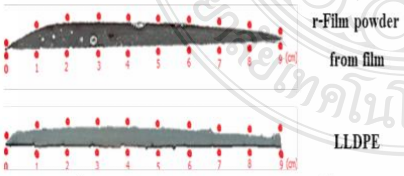
จากชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film และ LLDPE ทำการตัดเพื่อเตรียมวัดการกระจายความหนาของชิ้นงาน โดยตัดชิ้นงานออกเป็น 4 ชิ้น แสดงดัง**รูปที่ 7** แล้วทำการจัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) จากส่วนหน้าของชิ้นงาน (ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร) ไปตามความยาวครั้งละ 1 เซนติเมตร ไปจนสุดชิ้นงานและนำค่าความหนาที่ได้มาเปรียบเทียบกัน 2 ชิ้นงาน ดัง**รูปที่ 8** ผลการวัดค่ากระจายความหนาพบว่าความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง LLDPE มีค่าใกล้เคียงกันตลอดชิ้นงานมากกว่าการใช้ผง r-Film ที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ เนื่องมาจากลักษณะรูปร่างของ LLDPE มีขนาดเล็กและความกลมของ LLDPE มีความกลมมากกว่าอนุภาคผง r-Film [2] เป็นเหตุให้การกระจายความหนาของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบการไหลแบบหมุนแกนเดี่ยว



รูปที่ 7 ภาพการเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการวัดขนาด

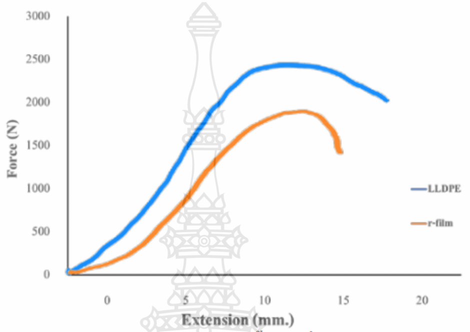


รูปที่ 8 การกระจายของความหนาของชิ้นงาน

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 ในขณะเดียวกันระยะการยืดตัวของชิ้นงานที่เตรียมได้จากอนุภาคผง r-Film มีค่า 15.384 มิลลิเมตร และระยะยืดของชิ้นงาน LLDPE อยู่ที่ 18.620 มิลลิเมตร แสดงดัง**รูปที่ 9** ซึ่งการรับแรงกดและระยะยืดของชิ้นงานที่ได้เตรียมจาก LLDPE มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-

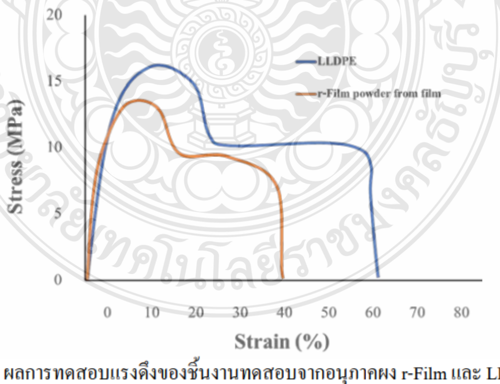
Film ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เมื่อมีการนำกลับมาใช้ขึ้นรูปอีกครั้งจะมีปัญหาทั้งในเรื่องของการเจือปนกับวัสดุอื่นๆ และการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลเนื่องจากการขาดของสายโซ่ [7] ส่งผลสมบัติทางกลที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับการใช้วัสดุใหม่ซึ่งพบว่าในงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้จากวัสดุรีไซเคิลมีผลสอดคล้องกันในเรื่องของสมบัติทางกล กล่าวคือมีค่าทนต่อการเจาะทะลุได้ต่ำกว่าการใช้วัสดุใหม่ และความเหนียวของวัสดุก็ลดลง โดยสามารถสังเกตเห็นได้จากระยะยืดที่ลดลงของชิ้นงานทดสอบเมื่อได้รับแรงกระทำ



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 แสดงดัง**รูปที่ 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 D785โดยมีสภาวะการทดสอบในโหมด HRR น้ำหนักกด 60 นิวตัน ขนาดหัวกด 0.5 นิ้ว โดยผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอนุภาคผง r-Film มีค่าความแข็งที่ผิว เท่ากับ 20.62 และค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่เตรียมจาก LLDPE เท่ากับ 26.78 แสดง**ตารางที่ 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

จากการทดลองพบว่าสามารถนำถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วทั้ง 5 ชนิดมาขึ้นรูปใหม่ ซึ่งพบปัญหาในการลดขนาดถุงพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบผงจึงมีวิธีการเตรียมถุงพลาสติกจากลักษณะบางและเหนียว ให้อยู่ในลักษณะแข็งด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปและบดลดขนาดด้วยเครื่องบดละเอียดให้อยู่ในรูปแบบผงที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยลักษณะของอนุภาคผง r-Film ที่เตรียมจากเครื่องบด มีขนาดเฉลี่ย 400 ไมครอน และค่าความกลม 0.58 ซึ่งแตกต่างจาก LLDPE ที่มีขนาด 250 ไมครอน และค่าความกลม 0.68 ส่งผลให้ค่าการกระจายความหนาของชิ้นงานจากอนุภาคผง r-Film ไม่สม่ำเสมอ

ผลการทดลองอัตราการไหลพบว่าความหนืดของอนุภาคผง r-Film สูงกว่า LLDPE เนื่องจากในการผลิตฟิล์มจำเป็นจะต้องใช้พลาสติกที่มีความหนืดสูงส่งผลกับอัตราการหลอมและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การนำขยะถุงพลาสติกมาขึ้นรูปใหม่จะทำให้สมบัติการทนต่อการเจาะทะลุลดลง 22.5% สมบัติการทนต่อแรงดึงลดลงที่ 33.5% และความแข็งที่ผิวลดลง 23% เมื่อเทียบกับ LLDPE ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกที่มีการผ่านความร้อนหลายครั้งและระยะเวลาที่นานในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก กรอบงานวิจัยแผนงานสำคัญ (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.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ISSN 0125-1724 (Print)
ISSN 2730-3888 (Online) วิศวสาร ลาดกระบัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL
Volume 40 Number 1 March 2023

Research Papers

1. Potential use of Recycled Plastic Bags in Rotational Molding Process 1
J. Preedawat S. Mathurosemontria E. Jansri and N. O-Charoen

2. Applying Lean Concept and Software Packages to Support Critical Issue Monitoring Process in Office 10
P. Kittipanya-ngam A. Chanthavutti and K. Sirikasemsuk

3. Application of Teaching–learning-based optimization for design of composite floor system 27
S. Ansanan A. Tapao and R. Cheerarot

4. Multi-Product-Group Production Planning and Multi-Skill Labor Assignment by Integer Linear Programming Model: A Case Study of an Automotive Electrical Cable Manufacturer 40
W. Nunkaew M. Kimaporn and C. Singkum

5. Removal Performance of Phosphate and Natural Organic Matter Using Nanofiltration Membrane 57
A. Onsarn S. Mattaraj W. Dechapanya K. Ratanapongleka T. Rattanaweerapan And S. Sanongraj

6. Solvent Selection for Mitragynine Extraction by Hansen Solubility Parameter 72
S. Ditthapornset N. Lerkkasemsan and S. Areerat

7. Forecasting Monthly Export Volume of Frozen White Shrimp with Hybrid Model of Holt and Support Vector Regression Emphasizing on Systematic Error Reduction 85
T. Sujjaviriyasup

8. Hybrid Coronavirus Herd Immunity Optimizer with Whale Optimization Algorithm for Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows 98
S. Yodwangjai and K. Malampong

9. Study on Thermal Performance Enhancement in Rectangular Duct Heat Exchanger Installed with Staggered Baffle 115
S. Skullong S. Suwannapan and P. Hoonpong

10. An Improvement of Tubular-Ice Making Machine Coefficient of Performance with a Commercial Water Chiller 126
P. Yartprom and A. Chinsuwan

11. Optimum Design of Reinforced Concrete Stairs Using Hill Climbing Algorithm 139
K. Bannasarn and A. Lamom

12. Suitable Condition for Face Milling of Wood-Plastic Composite Products on Surface Roughness 153
T. Ratanawilai S. Jeenapong and C. Srivabut

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์

ข.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบการกระจายขนาดและรูปร่างของอนุภาคผง

Materials	Size Average (Micron)	S.D.	Circularity Average	S.D.
LLDPE	158	133.5	0.8	0.18
rBottleCap	249	157.6	0.7	0.18
rHDPE	190.8	129.5	0.7	0.24
rBag	352	346.3	0.5	0.23
rPP	183	123.7	0.7	0.23
rStraw	148	150.4	0.6	0.23
rFoam	142	74.3	0.7	0.16
rPS	145	66.6	0.7	0.20

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม อัตราการไหลแบบแห้งและอัตราการอัดตัว

Materials	Bulk Density	Flow rate	Hausner ratio	Materials	Bulk Density	Flow rate	Hausner ratio
LLDPE	0.39	12.43	1.18	rPP	0.24	-	1.38
	0.38	11.09	1.18		0.24	-	1.38
	0.39	10.73	1.18		0.23	-	1.43
	0.39	10.68	1.18		0.23	-	1.43
	0.39	10.34	1.18		0.23	-	1.43
Average	0.39	11.05	1.18		0.24	-	1.41
S.D.	0.002	0.664	0.000		0.003		0.027
rBottleCap	0.31	50	1.26	rStraw	0.17	-	1.47
	0.32	23	1.22		0.18	-	1.39
	0.33	37	1.18		0.18	-	1.39
	0.33	31	1.18		0.19	-	1.32
	0.32	18	1.22		0.18	-	1.39
Average	0.32	31.80	1.21		0.18	-	1.39
S.D.	0.006	11.196	0.028		0.004		0.049

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม อัตราการไหลแบบแห้งและอัตราการอัดตัว (ต่อ)

Materials	Bulk Density	Flow rate	Hausner ratio	Materials	Bulk Density	Flow rate	Hausner ration
	0.26	-	1.38		0.17	-	1.41
	0.26	-	1.38		0.17	-	1.41
rHDPE	0.27	-	1.33	rFoam	0.17	-	1.41
	0.26	-	1.38		0.18	-	1.41
	0.26	-	1.38		0.17	-	1.41
Average	0.26	-	1.37			-	1.41
S.D.	0.002	-	0.021		0.004	-	0.000
	0.08	-	1.50		0.27	-	1.41
	0.08	-	1.50		0.27	-	1.41
rBag	0.08	-	1.50	rPS	0.27	-	1.41
	0.08	-	1.50		0.27	-	1.41
	0.09	-	1.33		0.27	-	1.41
Average	0.08	-	1.47		0.27	-	1.41
S.D.	0.002	-	0.067		0.002	-	0.000

ข.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตางรางที่ ข.4 ผลการทดสอบดัชนีการไหล

LLDPE		rBottleCap		rPP		rHDPE	
No.	Weight	No.	Weight	No.	Weight	No.	Weight
1	0.0892	1	0.0979	1	0.205	1	0.1002
2	0.0862	2	0.0979	2	0.2101	2	0.1011
3	0.0884	3	0.0986	3	0.2122	3	0.1011
4	0.0887	4	0.0995	4	0.2178	4	0.1013
5	0.0871	5	0.1003	5	0.2228	5	0.1018
6	0.0872	6	0.1014	6	0.2249	6	0.1019
7	0.0875	7	0.1018	7	0.2326	7	0.102
8	0.0879	8	0.1021	8	0.2336	8	0.1023

ตางรางที่ ข.4 ผลการทดสอบดัชนีการไหล (ต่อ)

LLDPE		rBottleCap		rHDPE		rBag	
No.	Weight	No.	Weight	No.	Weight	No.	Weight
9	0.0879	9	0.1022	9	0.2392	9	0.103
10	0.0881	10	0.104	10	0.2625	10	0.1034
Average	0.08782		0.10057		0.22607		0.10181
S.D.	0.000821		0.001958		0.016033		0.000899
rPS		rFoam		rBag		rStraw	
No.	Weight	No.	Weight	No.	Weight	No.	Weight
1	0.0293	1	0.0299	1	0.0203	1	0.075
2	0.0297	2	0.031	2	0.0204	2	0.0754
3	0.03	3	0.0316	3	0.0207	3	0.0755
4	0.0303	4	0.0326	4	0.0208	4	0.0777
5	0.0303	5	0.0331	5	0.0208	5	0.0779
6	0.0303	6	0.0336	6	0.0208	6	0.0779
7	0.0304	7	0.0338	7	0.0208	7	0.0781
8	0.0304	8	0.034	8	0.0209	8	0.0789
9	0.0304	9	0.0358	9	0.0209	9	0.0789
10	0.0306	10	0.0361	10	0.021	10	0.0789
Average	0.03017		0.03315		0.02074		0.07742
S.D.	0.000374		0.00187		0.000211		0.001456

ข.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

ตารางที่ ข.5 ผลการกระจายความหนาของชิ้นงาน

Materials	LLDPE	rBottleCap	rHDPE	rBag	rPP	rStraw	rFoam	rPS
Average	2.5	2.5	2.5	6.3	3.5	3.5	2.1	2.3
S.D.	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	1.1	0.4	0.3

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิว

Materials	Hardness average	S.D.
LLDPE	55	1.74
rBottleCap	55	2.95
rHDPE	60	2.1
rBag	35	3.1
rPP	35	5.25
rStraw	50	6.13
rFOAM	74	5.78
rPS	71	3.39

ข.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของ rFoam/LLDPE

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบการกระจายขนาดและรูปร่างของอนุภาคผง

Materials	Size Average (Micron)	S.D.	Circularity	S.D.
LLDPE	158	133.5	0.8	0.18
Size L	1355	566	0.5	0.14
Size M	769	140	0.5	0.17
Size S	142	74.3	0.7	0.16

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม อัตราการไหลแบบแห้งและอัตราการอัดตัว

Materials	Bulk Density	Flow rate	Hausner ratio	Materials	Bulk Density	Flow rate	Hausner ratio
LLDPE	0.39	12.43	1.18	rFoam L	0.11	-	1.37
	0.38	11.09	1.18		0.11	-	1.50
	0.39	10.73	1.18		0.11	-	1.53
	0.39	10.68	1.18		0.11	-	1.47
	0.39	10.34	1.18		0.11	-	1.46
Average	0.39	11.05	1.18		0.11	-	1.47
S.D.	0.002	0.664	0.000		0.002		0.049

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม อัตราการไหลแบบแห้งและอัตราการอัดตัว (ต่อ)

rFoam M	0.16	-	1.40	rFoam S	0.17	-	1.41
	0.16	-	1.42		0.17	-	1.41
	0.16	-	1.45		0.17	-	1.41
	0.16	-	1.42		0.18	-	1.41
	0.16	-	1.43		0.17	-	1.41
Average	0.16	-	1.42		0.18	-	1.41
S.D.	0.001	-	0.016		0.004	-	0.000

ตารางที่ ข.9 ผลการกระจายความหนาของชิ้นงาน

Materials		Thickness (mm.)	S.D.
LLDPE		2	0.3
rFoam L	80/20	2.0	0.4
	70/30	2.0	0.4
	60/40	1.9	0.3
rFoam M	80/20	1.8	0.2
	70/30	1.8	0.3
	60/40	1.9	0.3
rFoam S	80/20	1.8	0.3
	70/30	1.9	0.2
	60/40	1.9	0.3
rFoam L		1.1	0.1
rFoam M		1.3	0.1
rFoam S		1.3	0.1

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบความแข็งที่ผิว

Materials		Shore D	S.D.
	LLDPE	54	1.69
FOAM L	80/20	57	3.21
	70/30	56	2.37
	60/40	54	2.72
FOAM M	80/20	53	2.1
	70/30	57	3.51
	60/40	55	3.46
FOAM S	80/20	51	1.69
	70/30	54	3.62
	60/40	58	4.1
	rFOAM S	74	3.18
	rFOAM M	68	6.13
	rFOAM L	62	8.02

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน	นายจักรภัทร ปรีดาวัฒน์
วัน เดือน ปีเกิด	20 กรกฎาคม 2540
ที่อยู่	155/200 ถนนพันเรือง ตำบลบางพุทรา อำเภอเมืองสิงห์บุรี จังหวัดสิงห์บุรี 16000
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2565 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	09-2678-1124
อีเมล์	Jakkaphat_p@mail.rmutt.ac.th