

ผลกระทบของเถ้าแกลบเป็นวัสดุเติมแต่งในพอลิเอทิลีนความหนาแน่น
สูงรีไซเคิลโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

THE EFFECT OF RICE HUSK ASH AS ADDITIVE IN RECYCLED
HIGH-DENSITY POLYETHYLENE WITH THE ROTATIONAL
MOLDING PROCESS

บรรณรต ทาประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของเก้าแกลบเป็นวัสดุเติมแต่งในพอลิเอทธิลีนความหนาแน่น
สูงรีไซเคิลโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

บรรณรต ทาประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุเติมแต่งในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

The Effect of Rice Husk Ash as Additive in Recycled High-Density Polyethylene with the Rotational Molding Process

ชื่อ - นามสกุล

นายบรรณรต ทาประเสริฐ

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.

ปีการศึกษา

2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีดิ์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์ภูตินันท์ เอื้อวงษ์สุวรรณ, Ph.D.)

สุมณฑลชัย ไชยมณฑล

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมนมาลย์ ไชยมณฑล, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 28 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการใช้แก้วกลบเป็นวัสดุเติมแต่งในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน
ชื่อ – นามสกุล	นายบรรณรต ทาประเสริฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

การนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาแปรรูปแล้วนำมาใช้ซ้ำ (Recycle) เป็นวิธีที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิตทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูกลงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวัตถุดิบใหม่ แต่ปัญหาส่วนใหญ่ที่มักพบในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกรีไซเคิลคือ มีสมบัติบางประการลดลงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของการใช้แก้วกลบเป็นวัสดุเติมแต่งในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมและอัตราส่วนการผสมของแก้วกลบที่มีอนุภาคขนาดประมาณ 174.1 ไมครอน และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลอนุภาคขนาด 255 ไมครอน วิธีการผสมถูกแบ่งเป็นการผสมแบบแห้ง (Dry Blend) และแบบหลอมเหลว (Melt Blend) ที่อัตราส่วนการผสม 10, 20, 30 และ 40 %wt. อิทธิพลอัตราส่วนที่เหมาะสมถูกขึ้นรูปโดยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดี่ยว และการทดสอบสมบัติเชิงกลถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเชิงอุตสาหกรรม

ผลการทดลองพบว่าการผสมแบบหลอมเหลวสามารถขึ้นรูปได้สูงสุดที่มีปริมาณแก้วกลบสูงสุดที่อัตราส่วน 40 %wt. มีการต้านทานการเจาะทะลุสูงสุดที่อัตราส่วน 10 %wt. ค่าการทดสอบ 650 นิวตัน ในขณะที่การผสมแบบแห้งสามารถขึ้นรูปได้สูงสุดที่มีปริมาณแก้วกลบสูงสุดที่ 20 %wt. มีการต้านทานการเจาะทะลุสูงสุดที่อัตราส่วน 10 %wt. ค่าการทดสอบ 485 นิวตัน ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้แก้วกลบเป็นวัสดุเติมแต่งร่วมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่อัตราส่วน 10 %wt. และใช้วิธีการผสมแบบหลอมเหลวมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในด้านความแข็งแรงของวิธีการผสม และอัตราส่วนการเติมแก้วกลบ

คำสำคัญ: กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน แก้วกลบ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล

Thesis Title The Effect of Rice Husk Ash as Additive in Recycled High-Density Polyethylene with the Rotational Molding Process

Name – Surname Mr. Bannarot Taprasert

Program Materials Engineering

Thesis Advisor Mr. Narongchai O-charoen, Ph.D.

Academic Year 2019

ABSTRACT

The plastic recycling is a method of reducing the production costs that is cheaper than manufacturing new plastic. A major problem in recycling plastic is that the more quality decreases the more time it is recycled. The purpose of this research was to study the effect of rice husk ash as additive in recycled high-density polyethylene with the rotational molding process.

This research studied the influence of a compound containing a mixture of rice husk ash with 174.1 microns and 255 microns of recycled high-density polyethylene. The compound was separated into both a dry blend and melt blend in ratio mixture 10, 20, 30 and 40 % wt. The influence ratio was molded by axial powder flow apparatus machine. The mechanical properties were molded using rotational molding.

The result of the research was found that the melt blends could be the best mold in the highest quantity of rice husk ash was at the ratio of 40% wt. The highest resistance puncture was at the ratio of 10 % wt and the value test was 650 N. While the dry blends the best mold in the highest quantity of rice husk ash at the ratio of 20% wt. The highest resistance puncture was at the ratio of 10 % wt and the value test was 485 N. The experimental showed that the most rice husk ash as an additive in combination with recycled high-density polyethylene was at the ratio 10 % wt and the melt blend was the best and highest effective compound in strength, integration and the ratio of adding the rice husk ash.

Keywords: rotational molding, rice husk ash, recycled high density polyethylene

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเพราะได้รับความกรุณาอย่างสูงจากหลายๆฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องและภาควิชาโลหการและวัสดุคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์สำหรับการทดสอบสมบัติของวัสดุ ขอขอบคุณ คุณเกียรติ สารเก่ง เจ้าของร้านกรีนเวย์ที่ให้ความอนุเคราะห์ฝาขวดน้ำดื่มพลาสติกที่ถูกใช้งานแล้ว และขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้อง ผู้ที่มีส่วนร่วมให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำ ประสิทธิประสาทความรู้ ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย จนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง หากงานวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ โอกาสนี้

บรรณรต ทาประเสริฐ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	(16)
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	16
1.2 วัตถุประสงค์.....	17
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	18
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 พลาสติกกรีไซเคิล.....	20
2.2 พอลิเอทิลีน.....	22
2.3 ความเป็นกึ่งก้านของโมเลกุล (Chain Branching).....	28
2.4 แกลบและแก้วแกลบ.....	29
2.5 ลักษณะอนุภาคผง.....	37
2.6 การเคลื่อนที่วัสดุพอลิเมอร์.....	39
2.7 ความหนาแน่นวัสดุพอลิเมอร์.....	41
2.8 ลักษณะการหลอมละลายพอลิเมอร์ (Sintering).....	42
2.9 สมบัติการไหลและน้ำหลักโมเลกุล.....	43
2.10 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน.....	45
2.11 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composite).....	59
2.12 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	62
2.13 การ बदลดขนาดของแข็ง.....	64
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	75
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	75
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	76
3.3 วัสดุในงานวิจัย.....	78
3.4 การเตรียมวัสดุสำหรับกระบวนการ.....	79
3.5 อุปกรณ์เครื่องมือและเครื่องขึ้นรูป.....	81
3.6 อุปกรณ์ทดสอบสมบัติเชิงกล.....	94
บทที่ 4 วิธีการดำเนินงาน.....	97
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเข้ากลับ.....	97
4.2 การวิเคราะห์สมบัติอนุภาคผงเบื้องต้น.....	98
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะผาขวด.....	101
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางความร้อน.....	102
4.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus).....	103
4.6 การกระจายขนาดความหนาของชิ้นงาน.....	105
4.7 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ขณะหลอมเหลว.....	107
4.8 การแยกอนุภาคและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแม่พิมพ์.....	111
4.9 สันฐานวิทยาและความขรุขระพื้นผิว.....	114
4.10 ผลทดสอบเชิงกลจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว.....	119
4.11 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเครื่องชนิด Shuttle Style.....	122
4.12 ความหนาชิ้นงานของตัวอย่างทดสอบจากกระบวนการขึ้นรูปชนิด Shuttle Style.....	123
4.13 สันฐานวิทยาและความขรุขระของชิ้นงานโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style.....	124
4.14 ผลทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture Test).....	128
4.15 การทดสอบความแข็งบริเวณผิวแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test).....	130

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.16 ผลการทดสอบการกระจายของแก้วกลม.....	131
4.17 อัตราการสิ้นเปลืองระหว่างพอลิเอทธิลีนเชิงการค้าและพอลิเอทธิลีนรีไซเคิล.....	133
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	135
5.1 ลักษณะอนุภาคผง.....	135
5.2 การวิเคราะห์ความแตกต่างวัสดุในงานวิจัย.....	135
5.3 ความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมแก้วกลม.....	135
5.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการ.....	136
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	136
บรรณานุกรม.....	137
ภาคผนวก.....	142
ประวัติผู้เขียน.....	161



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เกรตพอลิเอทธิลีนเชิงพาณิชย์ที่ใช้ความหนาแน่นของพลาสติกเป็นตัวกำหนด...	23
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกข้าว.....	29
ตารางที่ 2.3 น้ำหนักและสีของแกลบที่อุณหภูมิต่าง.....	31
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ.....	33
ตารางที่ 2.5 ตารางตัวอย่างค่า Mc ของพอลิเมอร์ชนิดต่าง.....	44
ตารางที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก.....	44
ตารางที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุล.....	44
ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	72
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน.....	75
ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการรับแรงกดอัด (Compressive Strength).....	95
ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test).....	96
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแกลบด้วยเทคนิควิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF).....	98
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของผงและแกลบ.....	101
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว.....	104
ตารางที่ 4.4 การกระจายผนังความหนาขึ้นงานจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเครื่อง Axial Powder Flow Apparatus.....	106
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความขรุขระบนพื้นผิวโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว.....	118
ตารางที่ 4.6 ผลค่าโมดูลัสแรกเริ่ม (Initial Modulus).....	120
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style.....	122
ตารางที่ 4.8 การกระจายขนาดความหนาโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style.....	124
ตารางที่ 4.9 ความขรุขระพื้นผิวภายในและภายนอกโดยการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style.....	128
ตารางที่ 4.10 ค่าการทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุ.....	129

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 สัญลักษณ์แสดงลักษณะเครื่องหมายรีไซเคิลขยะ.....	21
ภาพที่ 2.2 รูปแสดงบรรจุภัณฑ์ชนิด HDPE.....	22
ภาพที่ 2.3 รูปแสดงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน.....	23
ภาพที่ 2.4 รูปแสดงลักษณะของโครงสร้างที่ความหนาแน่นสูง.....	23
ภาพที่ 2.5 รูปแสดงลักษณะโครงสร้างที่ความหนาแน่นต่ำ.....	23
ภาพที่ 2.6 รูปแสดงกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของ Polyethylene.....	24
ภาพที่ 2.7 รูปแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Polyethylene.....	27
ภาพที่ 2.8 รูปแสดงความยาวของสายโซ่หลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	27
ภาพที่ 2.9 รูปแสดงความเป็นกึ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุล.....	28
ภาพที่ 2.10 รูปแสดงกลบและถ้ากลบดำโรงสี.....	29
ภาพที่ 2.11 รูปแสดงการเผากลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี.....	32
ภาพที่ 2.12 รูปแสดงโครงสร้างจุลภาคของถ้ากลบเผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	34
ภาพที่ 2.13 รูปแสดงความถ่วงจำเพาะถ้ากลบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา.....	35
ภาพที่ 2.14 รูปแสดงรูปร่างอนุภาคพลาสติก.....	38
ภาพที่ 2.15 การจัดหมวดหมู่ของรูปร่างอนุภาค.....	38
ภาพที่ 2.16 รูปแสดงลักษณะของพอลิเมอร์ที่มีความแตกต่างกัน.....	39
ภาพที่ 2.17 รูปแสดงลักษณะการหลอมละลายของพอลิเมอร์ที่ส่วนโค้ง.....	39
ภาพที่ 2.18 ลักษณะการไหลของอนุภาคภายในแม่พิมพ์.....	41
ภาพที่ 2.19 รูปแสดงความหนาแน่นโดยรวม.....	42
ภาพที่ 2.20 รูปแสดงลักษณะของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์.....	43
ภาพที่ 2.21 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log.....	45
ภาพที่ 2.22 รูปแสดงกระบวนการขึ้นรูปแบบ Rotational Molding.....	47
ภาพที่ 2.23 รูปแสดงเครื่อง Open Flame Rock and Roll Machines.....	48
ภาพที่ 2.24 รูปแสดงการทำงานแสดงแขนแบบ Offset Arm.....	48
ภาพที่ 2.25 รูปแสดงเครื่อง Rocking Oven Machines.....	49
ภาพที่ 2.26 รูปแสดงเครื่อง Box Oven Machines.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.27 รูปแสดงเครื่อง Shuttle-Style Machines Concept.....	50
ภาพที่ 2.28 รูปแสดงเครื่อง Clamshell Rotational Molding Machines.....	51
ภาพที่ 2.29 รูปแสดงเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน 3-Arm Vertical Machines.....	52
ภาพที่ 2.30 รูปแสดงเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน 6-Arm Vertical Machines.....	52
ภาพที่ 2.31 รูปแสดงการทำงานเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน 6-Arm Vertical Machines.....	52
ภาพที่ 2.32 รูปแสดงลักษณะการทำงานของเครื่องแบบ Fixed-Arm Turret.....	53
ภาพที่ 2.33 รูปแสดงลักษณะการทำงาน ของเครื่อง Rotational Molding แบบ Independent-Arm.....	54
ภาพที่ 2.34 รูปแสดงการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบ และแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน.....	55
ภาพที่ 2.35 รูปแสดงแสดงอุณหภูมิโปรไฟล์ (Profile) ของอากาศขณะให้ความร้อน.....	56
ภาพที่ 2.36 รูปแสดงอุณหภูมิอากาศภายในและอุณหภูมิแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน.....	57
ภาพที่ 2.37 รูปแสดงผลิตภัณฑ์ของการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน.....	58
ภาพที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม.....	60
ภาพที่ 2.39 ลักษณะของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ผสม.....	61
ภาพที่ 2.40 รูปแสดงเครื่องทดสอบแรงกดอัด.....	62
ภาพที่ 2.41 รูปแสดงเครื่องทดสอบการกดทะลุ.....	63
ภาพที่ 2.42 รูปแสดงเครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscopy.....	64
ภาพที่ 2.43 ตะแกรงแยกขนาด (Sieve Analysis).....	65
ภาพที่ 2.44 รูปแสดงขนาดของช่องรูตะแกรง (Aperture Size).....	65
ภาพที่ 2.45 รูปแสดงเครื่องบดแบบใบมีด Bosco.....	66
ภาพที่ 2.46 รูปแสดงเครื่อง Pulverizer ที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรม.....	66
ภาพที่ 2.47 ค่าพลังงานของความแตกต่างวัสดุทั้งสามชนิดโดยใช้วิธีของ Heywood.....	70
ภาพที่ 2.48 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscopy ; SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่าของพลาสติกกรีไซเคิลและซีลื้อย.....	71
ภาพที่ 3.1 รูปแผนการดำเนินงานวิจัย.....	77
ภาพที่ 3.2 รูปแสดงฟลาขวดน้ำดื่มชนิดพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งาน rHDPE.....	78

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.3 ถ้ำกลบที่ยังไม่ถูกบไล้ความชื้น และ (b) ถ้ำกลบที่ถูกบไล้ความชื้นและถูกแยกขนาดที่ 300 ไมครอน.....	78
ภาพที่ 3.4 ผงพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นถูกในใช้อุตสาหกรรมการขึ้นรูปแบบหมุน.	79
ภาพที่ 3.5 เครื่องบดใบมีด Bossco และ อนุภาค rHDPE ขนาดเฉลี่ย 0.1 – 0.2 เซนติเมตร....	79
ภาพที่ 3.6 รูปเครื่อง Pulverazer และผงพลาสติกชนิด rHDPE ที่ได้จากการบด.....	80
ภาพที่ 3.7 รูปเครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker).....	81
ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบความหนาแน่นโดยรวมและอัตราการไหลขณะของแข็ง.....	82
ภาพที่ 3.9 รูปแสดงเครื่องมือวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคอนุภาค.....	82
ภาพที่ 3.10 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1.....	83
ภาพที่ 3.11 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2.....	84
ภาพที่ 3.13 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 3.....	84
ภาพที่ 3.14 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 4.....	85
ภาพที่ 3.15 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 5.....	85
ภาพที่ 3.16 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 6.....	86
ภาพที่ 3.17 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 7.....	86
ภาพที่ 3.18 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้นตอนที่ 1.....	88
ภาพที่ 3.19 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้นตอนที่ 2.....	88
ภาพที่ 3.20 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้นตอนที่ 3.....	89
ภาพที่ 3.21 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index: MFI).....	90
ภาพที่ 3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	90
ภาพที่ 3.23 แสดงค่ามุมระหว่างพอลิเมอร์ 2 อนุภาค.....	91
ภาพที่ 3.24 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก.....	91
ภาพที่ 3.25 เครื่อง Axial Powder Flow Apparatus.....	92
ภาพที่ 3.26 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style Machine.....	93
ภาพที่ 3.27 เครื่อง Twin Screw Extruder ที่ใช้ในกระบวนการผสมแบบ Melt Blend.....	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.28 เครื่อง Thickness Measurement Apparatus.....	94
ภาพที่ 3.29 เครื่องทดสอบการรับแรงแบบกดอัด (Compressive Strength).....	95
ภาพที่ 3.30 เครื่องการทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test).....	96
ภาพที่ 4.1 ช่วงการกระจายขนาดอนุภาค LLDPE, rHDPE และ RHA.....	100
ภาพที่ 4.2 ลักษณะรูปร่างอนุภาคผงพลาสติก (a) LLDPE, (b) rHDPE และ (c) RHA.....	100
ภาพที่ 4.3 ผลทางความร้อนของพอลิเมอร์สองชนิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC).....	101
ภาพที่ 4.4 ผลแสดงค่าการนำความร้อนของ LLDPE, rHDPE และ rHDPE : RHA.....	103
ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิภายในเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว.....	103
ภาพที่ 4.6 ชิ้นงานทดสอบจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว.....	104
ภาพที่ 4.7 ชิ้นงานทดสอบการกระจายความหนาชิ้นงาน.....	105
ภาพที่ 4.8 ความหนาจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน LLDPE, rHDPE และ พอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง.....	106
ภาพที่ 4.9 ความหนาจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน LLDPE, rHDPE และ พอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว.....	107
ภาพที่ 4.10 ชิ้นงานทดสอบการกระจายความหนาชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว.....	108
ภาพที่ 4.11 ผลแสดงอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์พลาสติก LLDPE และ rHDPE.....	109
ภาพที่ 4.12 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง.....	110
ภาพที่ 4.13 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว.....	111
ภาพที่ 4.14 การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ของอนุภาค LLDPE และ rHDPE.....	112
ภาพที่ 4.15 การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ของพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนแก้ว 10, 20, 30 โดยน้ำหนัก.....	113
ภาพที่ 4.16 การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวอัตราส่วนแก้ว 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก.....	114
ภาพที่ 4.17 พื้นผิวภายในและภายนอกวัสดุชนิด LLDPE และ rHDPE.....	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.18 พื้นผิวภายในและภายนอกพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนแก้วกลบร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก.....	116
ภาพที่ 4.19 พื้นผิวภายในและภายนอกพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนแก้วกลบร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก.....	117
ภาพที่ 4.20 กระบวนการทดสอบการต้านแรงกดอัด (Compressive Strength).....	121
ภาพที่ 4.21 กราฟการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยวิธีการรับแรงกดอัดของพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง เปรียบเทียบระหว่าง LLDPE และ rHDPE.....	121
ภาพที่ 4.22 กราฟการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยวิธีการรับแรงกดอัดของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวเปรียบเทียบระหว่าง LLDPE และ rHDPE.....	122
ภาพที่ 4.23 ลักษณะชิ้นงานทดสอบการกระจายความหนา.....	124
ภาพที่ 4.24 พื้นผิวภายในและภายนอกชิ้นงานตัวอย่างวัสดุ LLDPE.....	125
ภาพที่ 4.25 พื้นผิวภายในและภายนอกชิ้นงานตัวอย่างวัสดุ rHDPE.....	126
ภาพที่ 4.26 พื้นผิวภายในและภายนอกพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนแก้วกลบร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก.....	126
ภาพที่ 4.27 พื้นผิวภายในและภายนอกพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวอัตราส่วนแก้วกลบร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก.....	127
ภาพที่ 4.28 การทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุของพอลิเมอร์บริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง.....	130
ภาพที่ 4.29 การทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุของพอลิเมอร์บริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว.....	130
ภาพที่ 4.30 ค่าความแข็งบริเวณพื้นผิว (Rockwell Hardness Test).....	131
ภาพที่ 4.31 ลักษณะพื้นผิวจากการทดสอบการเจาะทะลุของชิ้นงานที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) LLDPE, (b) rHDPE, (c) rHDPE : RHA D 10%wt., และ (d) rHDPE : RHA D 10%wt. (e) rHDPE : RHA D 30%wt., (f) rHDPE : RHA M 10%wt., (g) rHDPE : RHA M 20%wt. และ (h) rHDPE : RHA M 30%wt.....	132

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

rHDPE	Recycle High Density Polyethylene
RHA	Rice Husk Ash
D	Density
M	Mass
V	Volume
ASTM	American Standard Test Method
MFI	Melt Flow Index
μm	Micron
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
Mpa	เมกะปาสกาล
mm	มิลลิเมตร
cm	เซนติเมตร
minutes	นาที
rpm	Revolutions Per Minute
I	กระแสมอเตอร์
V	แรงดันไฟฟ้า
P	กำลังไฟฟ้า
eff.	ค่าประสิทธิภาพ
PF	ค่าตัวประกอบกำลัง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในรูปของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากสมบัติส่วนใหญ่ของพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม ราคาถูกและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่น จึงทำให้พลาสติกเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างสูง ในปัจจุบันพลาสติกสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะได้ลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทางพลาสติกจะให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะกลวง มีขนาดชิ้นงานที่ค่อนข้างใหญ่ มีสมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่มีความเค้นตกค้างในตัวผลิตภัณฑ์ (Free Stress) แต่ในกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้มีข้อจำกัดในการเลือกใช้วัสดุในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันในประเทศไทยนิยมใช้พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Liner Low Density Polyethylene: LLDPE) เป็นวัสดุหลักในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยจะต่างจากกระบวนการผลิตอื่นๆ ที่สามารถเลือกใช้วัสดุพลาสติกได้หลากหลายชนิด แตกต่างกันไปออกไปตามความต้องการใช้งาน

การนำพลาสติกที่ผ่านใช้งานมาแล้ว กลับมาใช้ซ้ำอีกครั้งหรือการรีไซเคิล (Recycle) เป็นวิธีการที่ดีสำหรับการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม รวมถึงสามารถลดต้นทุนในการผลิตทางอุตสาหกรรมแต่พลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมักจะมีสมบัติบางประการที่ต่ำลงเมื่อนำพลาสติกกลับมาขึ้นรูปซ้ำ ทำให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามที่ต้องการของผู้บริโภค ในผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบหมุนก็เช่นเดียวกันยังคงมีการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ในการผลิตค่อนข้างน้อยมาก ในทางปฏิบัติต้องใช้ผงพลาสติกแบบใหม่มาผสมในอัตราส่วนที่มากเพื่อให้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามความต้องการ ต้นทุนในการผลิตไม่เปลี่ยนแปลงมากนักขยะส่วนใหญ่ที่เป็นลักษณะขวดขุ่นหรือเกลลอนที่ใช้บรรจุของเหลวส่วนใหญ่มักจะขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าขวด (Extrusion Low Molded) เกือบทั้งหมดใช้วัสดุชนิดพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) เนื่องจากสมบัติในด้านการทนสารเคมีได้ดี มีความเหนียวสูงกว่าพอลิเอทธิลีนชนิดอื่น ทำให้ขึ้นรูปในกระบวนการเป่าขวดได้ง่าย มีสมบัติด้านการไหลที่เหมาะสม การเกิดของเสียในการผลิตน้อย จึงทำให้พบว่าพลาสติกชนิดนี้ถูกนำมาทิ้งเป็นขยะจำนวนมาก การคัดแยกพลาสติกชนิดนี้มาขายเป็นพลาสติกเกรดสอง แต่ในทางกลับกันมีการนำมาใช้ไม่มากนักเนื่องจากสมบัติบางประการที่สูญเสียและการควบคุมผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามความต้องการได้ยาก ในขณะเดียวกัน

เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash: RHA) ก็เป็นวัสดุเหลือใช้อีกชนิดหนึ่งที่อาจก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวล (Biomass Power Plant) ซึ่งเถ้าแกลบที่ได้จากการสีข้าว ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนสำหรับการผลิตไฟฟ้าทำให้มีปริมาณเถ้าแกลบที่เหลือจากกระบวนการผลิต มีปริมาณมากเนื่องจากคุณสมบัติของแกลบมีการดูดซับความชื้นต่ำและมีน้ำหนักเบาต่อการขนส่ง ปัจจุบันมีการนำเถ้าแกลบมาใช้ในงานก่อสร้าง เช่น การผสมในคอนกรีต แต่ยังไม่แพร่หลายมาก และใช้สำหรับวัสดุเชิงเกษตรกรรม ในงานวิจัยด้านเถ้าแกลบมีงานวิจัยน้อยในด้านการใช้งานร่วมกับพลาสติก การวิจัยและการพัฒนายังต้องมีการทำอีกมากในด้านการใช้งานระยะยาว เช่นเดียวกับการนำมาใช้งานในด้านพลาสติกยังคงไม่แพร่หลายมากนักเมื่อนำมาเทียบกับสารตัวเติมในพลาสติกอื่นๆ

ในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการนำพลาสติกรีไซเคิลพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ได้มาจากฝาคัดน้ำดื่มมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนและเติมเถ้าแกลบในอัตราส่วนต่างๆ โดยศึกษาลักษณะของวัสดุ ขนาด รูปร่าง ศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุทั้งสองชนิดเทียบกับพอลิเอทิลีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปแบบหมุน ศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการเช่นจุดหลอมเหลว ลักษณะการนำความร้อนของพลาสติกชนิดรีไซเคิลและชนิดพอลิเอทิลีนที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมและศึกษาสมบัติเชิงกลบางประการเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกในกระบวนการอุตสาหกรรมขึ้นรูปแบบหมุนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมเถ้าแกลบและถูกเติมร่วมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน และสถานะการขึ้นรูปที่เหมาะสม

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมลักษณะ ขนาด รูปร่างของผงเถ้าแกลบ และพอลิเอทิลีนหนาแน่นสูงรีไซเคิลที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

1.2.3 เพื่อศึกษาความสามารถในกระบวนการขึ้นรูปโดยการผสมระหว่างผงเถ้าแกลบและพอลิเอทิลีนรีไซเคิล

1.2.4 เพื่อนำผลจากงานวิจัยไปใช้งานจริงและเป็นตัวลดต้นทุนสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เตรียมวัสดุรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง (Recycle High Density Polyethylene : rHDPE) จากฝาขวดถูกเติมด้วยเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash: RHA) เป็นอนุภาคผงโดยการบดลดขนาดด้วยเครื่องตัดแบบสองใบมีดและคัดแยกขนาด (Sieve) ที่ขนาด 300 ไมครอน รวมถึงทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ Microscope และบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม ImageJ

1.3.2 ทดสอบสมบัติการไหลของอนุภาคผงพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว ผสมกับเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่มีการเตรียมการผสมทั้งแบบแห้ง (Dry Blend) และการผสมแบบหลอมเหลว (Melt Blend) ด้วยการทดสอบหาดัชนีการไหล (ASTM D1238) และความหนาแน่นโดยรวม (ASTM D1895) ของพลาสติกขณะเป็นลักษณะของแข็งและหลอมเหลว เพื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นในอุตสาหกรรมเกรดทางการค้า LL9641UP บริษัท PTT Global Chemical จำกัด

1.3.3 ทำการทดสอบการไหลในกระบวนการขึ้นรูปที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงของพลาสติกขณะที่เป็นของแข็ง (Solid Stage) และของเหลว (Melt Stage) ด้วยเครื่องทดสอบการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus) อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 190 °C รอบการหมุน 7 รอบต่อนาที น้ำหนักที่ใช้ 49 กรัม เพื่อทดสอบความเปลี่ยนแปลงขณะที่พลาสติกผ่านในแม่พิมพ์เปลี่ยนสถานะ

1.3.4 ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดกระสวยเดี่ยว (Shuttle Style Rotational Molding) อุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูป 240 °C โดยใช้เวลาในการให้ความร้อน 10-30 นาทีและหล่อเย็นด้วยลม สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมได้จากการทดลองในข้อ 1.3.3

1.3.5 ทดสอบสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูป เช่น สมบัติทางความร้อน โดยกระบวนการทดสอบ Sintering Rate สมบัติการรับแรงกดอัด Compressive Strength ค่าความแข็งร็อคเวล (Rockwell Hardness Testing, ASTM D785) และสมบัติความต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture Test, ASTM D3787) เป็นต้น เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

1.3.6 รวบรวมผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีนเกรดทางการค้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมแบบหมุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้กระบวนการเตรียมผงพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลผสมกับ
แก้วเคลบที่มีอัตราส่วนผสม ขนาดและรูปร่างอนุภาคที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบ
หมุนให้สมบัติในด้านต่างๆเช่น สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน เป็นต้น ที่สามารถใช้ได้
จริง

1.4.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนโดยใช้ผงพอลิเอทิลีนความ
หนาแน่นสูงรีไซเคิลผสมกับแก้วเคลบ มีความเหมาะสมและปลอดภัยต่อกระบวนการผลิต ไม่เป็นพิษต่อ
สิ่งแวดล้อมและลดปัญหาการใช้งานของแก้วเคลบและพลาสติกชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิลได้

1.4.3 สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเผยแพร่ด้วยการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ
หรือสามารถนำเสนอในที่ประชุมทางวิชาการ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกรีไซเคิล

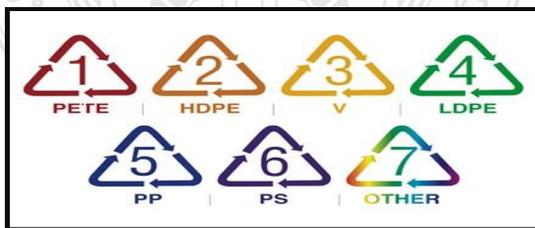
ปัจจุบันพลาสติกได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งที่มีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนการใช้งานเนื่องจากผลิตภัณฑ์พลาสติกถูกนำมาใช้แทนวัสดุได้หลากหลายอย่าง เช่น ไม้ เหล็ก เนื่องจากพลาสติกมีน้ำหนักเบาและมีราคาถูกมีขอบเขตการใช้งานอย่างกว้างขวางสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติตามต้องการได้ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ประเภทของพลาสติก กระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูปในรูปทรงต่างๆ และยังสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additive) เช่น สารเสริมแรงสภาพทางพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารเสริมแรง (Filler) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น

ด้วยสภาพการณ์ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีที่และทันสมัยมากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกมีมากขึ้นทำให้สามารถเลือกใช้งานได้หลายรูปแบบและมีการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของพลาสติกตลอดเวลา มีลักษณะที่โดดเด่นสีสวยงามทำให้พลาสติกเป็นที่ยอมรับอย่างรวดเร็วและมีการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีปริมาณขยะพลาสติกในปริมาณสูงมากขึ้นตามด้วย ดังนั้นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลจึงเป็นที่ได้รับความสนใจเพราะนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะจากพลาสติกลงแล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย ในทางอุตสาหกรรมยังเป็นการลดต้นทุนทางด้านวัสดุและค่าใช้จ่ายลงอีกด้วย โดยทั่วไปพลาสติกถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพลาสติกที่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลงพลาสติกประเภทนี้ได้แก่ โพลีเอทิลีน (PE) โพลีโพรพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิเอสเตอร์ (PET) เป็นต้น และเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) เป็นพลาสติกที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเมื่อนำไปขึ้นรูปพลาสติกประเภทนี้ไม่สามารถนำมาหลอมเพื่อกลับมาใช้ใหม่ ตัวอย่างของพลาสติกประเภทนี้ได้แก่ โพลียูเรเทน (PUR) อีพอกซี (Epoxy) ฟีนอลิก (Phenolic) เมลามีน (Melamine) เป็นต้น [1]

2.1.1 ประเภทพลาสติกรีไซเคิล

ในส่วนของพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็นการจัดการกับวัสดุเหลือใช้ที่กำลังจะเป็นขยะโดยการนำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพโดยเฉพาะการหลอมขึ้นรูปใหม่เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุใหม่แล้วนำกลับมาใช้อีกครั้งวัสดุที่ผ่านการแปรสภาพนั้นจะถูกใช้งานในรูปผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ สามารถแบ่งออกเป็น 7 ประเภทดังนี้ พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 1 พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต

(Polyethylene terephthalate : PET) เป็นพลาสติกเหมาะสำหรับทำขวดน้ำดื่ม เนื่องจากความใส มีความยืดหยุ่นสูงและป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ นิยมนำมารีไซเคิลเป็นเส้นใย สำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม ใยสังเคราะห์ พลาสติกกรีไซเคิลหมายเลข 2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) เป็นพลาสติกเหมาะสำหรับผลิตถุงหิ้ว ขวดน้ำดื่มแบบขุ่น ขวดบรรจุภัณฑ์สำหรับสารเคมี หรือถังน้ำ เพราะมีความยืดหยุ่นสูงและสามารถยังป้องกันการซึมผ่านของอากาศ นิยมนำมารีไซเคิลเป็น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า ขวดน้ำมันเครื่อง ลังพลาสติก ไม้เทียม เป็นต้น พลาสติกกรีไซเคิลหมายเลข 3 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride : PVC) เหมาะสำหรับท่อน้ำ ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า กระเป๋าหนังเทียม ประตูพีวีซี เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แข็งแรง ทนสารเคมี ทนน้ำ สามารถทำเป็นสีสันทากหลายได้ นิยมนำมารีไซเคิลเป็นท่อน้ำประปาหรือรางน้ำสำหรับการเกษตร กรวยจราจร เฟอร์นิเจอร์ เคเบิล แผ่นไม้เทียม เป็นต้น พลาสติกกรีไซเคิลหมายเลข 4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) เหมาะสำหรับการนำมาเป็นถุงเย็นใส่อาหารแช่แข็ง เพราะมีความยืดหยุ่นสูงเหนียว ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี ไม่เหมาะสำหรับบรรจุอาหารร้อน พลาสติก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถนำมารีไซเคิลเป็น ถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหิ้ว พลาสติกกรีไซเคิลหมายเลข 5 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) เหมาะสำหรับทำถุงร้อนบรรจุอาหารหรือผลิตกล่องบรรจุอาหารสำหรับนำเข้าไมโครเวฟ เพราะมีความยืดหยุ่นสูง ทนสารเคมี นิยมนำมารีไซเคิลเป็นกล่องแบตเตอรี่ในรถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชน และกรวยสำหรับน้ำมัน ไฟท้าย พลาสติกกรีไซเคิลหมายเลข 6 พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) เหมาะสำหรับทำเป็นโฟม กล่อง ถ้วย จาน เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปไม่ซับซ้อน สามารถเพิ่มสีสันทและลวดลายได้ นำมารีไซเคิลเป็นจำพวก ไม้แขวนเสื้อ ไม้บรรทัด กระเป๋า เทอร์โมมิเตอร์ แผงสวิทช์ไฟ ฉนวนกันความร้อน เป็นต้น พลาสติกกรีไซเคิลหมายเลข 7 หมายถึงสัญลักษณ์สำหรับพลาสติกชนิดอื่นๆ หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกหลายชนิดรวมกัน [2]



ภาพที่ 2.1 สัญลักษณ์แสดงลักษณะเครื่องหมายรีไซเคิลขยะ [3]

การกำจัดขยะพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการนำไปฝัง การนำไปทำเชื้อเพลิง การนำกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นทางเลือกที่ให้ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

ด้านการแก้ไขปัญหาลาสติกอย่างไรก็ตามการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่นั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดคือการแยกประเภทของพลาสติกให้ชัดเจนก่อนที่จะนำไปรีไซเคิลและการกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไปโดยปกติแล้วพลาสติกที่มีการปะปนกันนั้นจะแบ่งเป็นหลายกรณี ถึงแม้ว่าลักษณะโครงสร้างทางเคมีจะคล้ายกันแต่ก็ไม่สามารถเข้ากันได้ ยกตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะมีลักษณะโครงสร้างที่เหมือนกันแต่มีความหนาแน่นของโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกัน ทำให้การใช้งานจึงมีความแตกต่างกันนอกจากนี้สารเติมแต่งก็ยังคงส่งผลกระทบต่อการใช้รีไซเคิลของพลาสติก สารเติมแต่งบางชนิดเมื่อใช้ร่วมกันแล้วไม่สามารถแสดงคุณสมบัติเด่นที่ต้องการออกมาได้แต่ก็มีสารเติมแต่งบางชนิดเมื่อผสมลงในพลาสติกจะช่วยให้เกิดพันธะเคมีระหว่างพอลิเมอร์ 2 ประเภทที่มีความเข้ากันไม่ได้ เช่น สารเติมแต่งจำพวก Compatibilizer จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรีไซเคิล เป็นต้น [4]

2.2 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงแข็งแรง ความสามารถยืดตัวสูง ไม่แตกหัก ลักษณะเป็นสีขาวขุ่นจึงนิยมใช้สีเป็นตัวเพิ่มสีสัน ยกเว้นขวดน้ำดื่มที่มีลักษณะเป็นสีขุ่น ราคาถูกและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทนต่อสารเคมีจึงเป็นที่นิยมใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องเติมสารเคมี เช่น น้ำยาทำความสะอาด แชมพู ยาสระผม นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจาก HDPE สามารถทนความชื้นได้ดีจึงนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความชื้นเช่น ถังหมักหมม ถังกาแฟ เป็นต้น ในปัจจุบันพอลิเอทิลีนถูกใช้งานอย่างแพร่หลายจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมากที่สุดจึงมีการจัดประเภททางการค้าของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนจะแบ่งออกเป็นเกรดต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการใช้งานเชิงพาณิชย์โดยใช้ความหนาแน่นของพลาสติกเป็นเกณฑ์กำหนดดังแสดงตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 บรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชนิด High Density Polyethylene: HDPE [3]

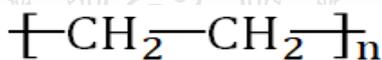
ตารางที่ 2.1 เกรดพอลิเอทิลีนเชิงพาณิชย์โดยใช้ความหนาแน่นของพลาสติกเป็นตัวกำหนด [5]

Polyethylene	Density (g/cm ³)	Type
--------------	------------------------------	------

High Density Polyethylene; HDPE	0.941-0.965	Hopolymer
Medium Density Polyethylene; MDPE	0.926-0.940	Hopolymer
Low Density Polyethylene; LDPE	0.910-0.925	Hopolymer
Liner Low Density Polyethylene; LLDPE	0.925-0.940	Copolymer
Very Low Density Polyethylene; VLDPE	< 0.910	Copolymer

2.2.1 โครงสร้างพอลิเอทิลีน

โครงสร้างสำหรับพอลิเอทิลีนที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน จะมีลักษณะของโครงสร้างเหมือนกัน ดังแสดงในภาพที่ 10 แตกต่างกันที่ลักษณะของโครงสร้างที่มีความเป็นกิ่งสาขาของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดเช่นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจะมีลักษณะโครงสร้างของกิ่งสาขาน้อยโมเลกุลภายในเกิดการเรียงชิดติดกันแน่นจึงส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 11 ในทางตรงกันข้ามพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะมีกิ่งก้านสาขามาก ดังแสดงในภาพที่ 12 ทำให้โมเลกุลเกิดการเกาะติดกันแบบหลวมแรงระหว่างโมเลกุลจึงต่ำ ไม่แข็งแรง ส่งผลต่อสมบัติ เช่นความแข็งแรง ความแข็งเปาะ แต่จะมีข้อดีที่แตกต่าง เช่นมีความเหนียวสูง [6]



ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [7]



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของโครงสร้างที่ความหนาแน่นสูง [8]



ภาพที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างที่ความหนาแน่นต่ำ [8]

กระบวนการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม (Addition

ความเป็นผลึกจึงทำให้พอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆที่อุณหภูมิห้องแต่ถ้าที่อุณหภูมิ 70 °C จะเริ่มบวมพองและละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน หรือฮาโลเจนไฮโดรคาร์บอน เช่น โทลูอิน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีนและไดคลอโรเอทิลีน เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ละลายพอลิเอทิลีนจะสูงเมื่อความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นซึ่งอยู่ในช่วง 60-80 °C ของเหลวบางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ เอสเตอร์ และคีโตน ทำให้พอลิเอทิลีนเกิดความเค้นขณะที่แช่อยู่ในของเหลวนั้นทำให้เกิดการแตกหักได้ที่มีความเค้นต่ำกว่าเมื่อไม่มีของเหลว พอลิเอทิลีนจะมีความสามารถทนกรดและด่างได้ดีจึงนิยมใช้ทำภาชนะบรรจุกรดและด่าง หรือสารออกซิไดซ์แรงๆได้ ผิวของพอลิเอทิลีนจะค่อนข้างมันคล้ายเทียนจึงเป็นไปได้อย่างง่ายสำหรับการพิมพ์และตกแต่งจึงจำเป็นที่จะต้องเตรียมผิวด้วยการลนด้วยเปลวไฟออกซิอะเซทิลีนหรือเปลวไฟแก๊สทุ้งต้มเพื่อให้เกิดออกไซด์บนผิวอีกชั้นหนึ่งก่อนหรืออาจกัดพื้นผิวด้วยสารเคมี

2.2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE)

พลาสติกประเภท HDPE พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง คุณสมบัติเบื้องต้นมีความหนาแน่นระหว่างโมเลกุลสูง ค่อนข้างนิ่ม มีความเหนียวไม่แตกหักง่าย จุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 130 °C มีความหนาแน่น 0.92 - 0.95 นิยมนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น แชมพู ถังร้อนชนิดสีขุ่น ขวดนม เป็นต้น เม็ดพลาสติก HDPE ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง ทำให้มีคุณสมบัติเด่นหลากหลายเช่น ความสามารถในการขึ้นรูป พร้อมทั้งสมบัติเชิงกลเด่นตามน้ำหนักโมเลกุลสามารถนำมาผลิตฟิล์มที่ต้องการความแข็งแรง ความเหนียว ทนแรงดึง คุณสมบัติภายนอกของพอลิเอทิลีนมีลักษณะดังนี้ ขุ่น แสงผ่านได้น้อยกว่า LDPE และ LLDPE สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่เปิดกรดต่างไม่ว่องไวต่อสารเคมี มีความเหนียวค่อนข้างนิ่ม ยืดหยุ่น ทนความต้านทานแรงต่างๆได้ดี เช่น ทนต่อแรงกระแทกหรือการหักงอ มักใช้งานเป็นภาชนะที่ต้องรับน้ำหนัก ป้องกันการผ่านของอากาศได้ดี จึงไม่เหมาะสมสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้การอัดอากาศ ทนความเย็นต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้ใช้บรรจุอาหารแช่แข็ง การขึ้นรูปขวด สามารถใช้ HDPE จะทำให้น้ำหนักขวดลดลงได้มากกว่า LDPE 40 % เนื่องจากสามารถเป่าขวดบางได้มาก พอลิเอทิลีนผลิตโดยการอัดแก๊สเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการเติมสารที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่างๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขมัน) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (ลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้)

2.2.4 คุณสมบัติทางกายภาพพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

HDPE มีโครงสร้างทางเคมีที่มีกิ่งก้านน้อย จึงส่งผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามเมื่อมีความหนาแน่นลดลงจะทำให้ผิวแตก ร้าวได้ง่าย ทนต่อความร้อนได้ไม่มากนัก แต่สามารถทนสารเคมีได้ดี ทนอุณหภูมิสูง 110-120 °C ได้ในช่วงสั้นๆ แต่ไม่สามารถทน

อุณหภูมิในหม้ออัดไอน้ำได้เท่าพลาสติกชนิด Polypropylene ทนสารเคมีได้มากกว่า Low Density Polyethylene ทนต่อสภาพอากาศได้ดีแต่อากาศสามารถซึมผ่านได้

2.2.5 การใช้งานพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

HDPE ทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายหลายชนิด มีความยืดหยุ่นต่อแรงกระทบ กระแทก ไม่แตกร้าวง่าย นิยมนำมาใช้ผลิตภาชนะบรรจุที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) เนื่องจากคุณสมบัติการหดตัวของพลาสติกในแม่พิมพ์ ทำให้เวลาปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เป็นไปได้ง่าย ภาชนะที่ผลิตจาก HDPE เช่น ขวดบรรจุนมสด ขวดบรรจุน้ำยาซักผ้า น้ำยาทำความสะอาด สระอาด ถังบรรจุน้ำมันเครื่อง โตะ แก้วอี เป็นต้น นอกจากนี้ HDPE ยังใช้ในการปูพื้นฝังกลบขยะเพื่อ ป้องกันการรั่วซึมจากสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

2.2.6 ความปลอดภัยในการใช้งาน

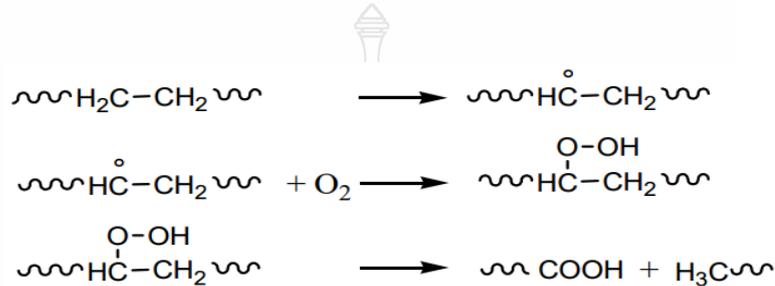
HDPE มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมากกว่า PVC (Polyvinyl Chloride) และ PC (Polycarbonate) ซึ่งอาจจะปล่อย Bisphenol A ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และมีข้อดีเหนือ ภาชนะที่ทำจากแก้ว โลหะ กระดาษ เนื่องจากภาชนะที่ใช้ในการบรรจุอาหารต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง ผู้บริโภคจึงควรคำนึงถึงความปลอดภัยของภาชนะ ว่ามีการทำปฏิกิริยากับอาหารที่บรรจุหรือไม่ และมีการปล่อยสารปนเปื้อนมาสู่อาหารหรือไม่ [5]

2.2.7 กระบวนการรีไซเคิล

- คัดแยกและรวบรวมของเสียพลาสติก HDPE
- บดลดขนาดให้มีขนาดเล็กลง
- ล้างทำความสะอาดเกล็ดพลาสติกในถังหมุนเพื่อแยกเกล็ดพลาสติก HDPE ที่ลอย น้ำออกจากสิ่งสกปรกอื่นๆที่จมน้ำ
- อบด้วยลมร้อน จะได้พลาสติก HDPE แห้งและสะอาด
- นำพลาสติกที่ผ่านการบดย่อยลดขนาด ไปหลอมใหม่โดยผ่านกระบวนการหลอม พลาสติกที่อุณหภูมิเหมาะสม
- พลาสติกที่ได้จะถูกส่งผ่านตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดละเอียดเพื่อดักสิ่งแปลกปลอมที่ ยังตกค้างอยู่ในเศษพลาสติก
- พลาสติกจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องอัดรีด Extruder เพื่อรีดออกมาเป็นเส้นพลาสติก เส้นพลาสติกเหล่านี้จะผ่านรางน้ำยาว 5-10 m เพื่อให้พลาสติกแข็งตัวโดยใช้เวลา ไม่นานเส้นพลาสติกจะถูกส่งเข้าเครื่องตัดเม็ดเล็ก ได้เป็นพลาสติกเกรดรีไซเคิล

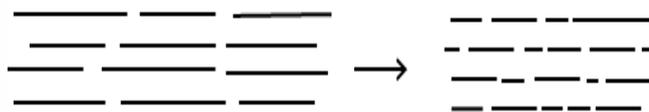
ในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง พอลิเอทิลีนอาจสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้นบนสายโซ่จากนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับ

ออกซิเจนในบรรยากาศกลายเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และเกิดการสลายตัวต่อไปโดยแบ่งสายโซ่ ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเช่นเดิม ส่วนที่สองได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ ปลายข้างหนึ่งกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำทำให้เกิดการสลายตัวต่อไป ดังแสดงใน ภาพที่ 2.7 ทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลลดลง ตัวอย่างของสายโซ่พอลิเมอร์ ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง เช่น สมบัติ การทนแรงดึง สมบัติการทนแรงกระแทก



ภาพที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Polyethylene [2]

ในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกที่นำมาใช้ใหม่โดยกระบวนการรีไซเคิล หากในกระบวนการ แยกพลาสติกไม่มีประสิทธิภาพในระดับหนึ่งจะมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกส่งผลให้สมบัติบางประการ ของพลาสติกลดลง



ภาพที่ 2.8 ความยาวของสายโซ่หลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [2]

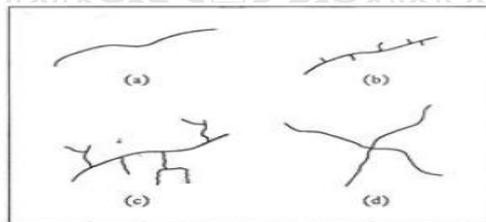
สำหรับพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลจะมีคุณสมบัติ ต่ำกว่าพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ ในกระบวนการขึ้นรูปใหม่นั้นควรที่จะผสมพลาสติกใหม่ร่วมกับพลาสติกรีไซเคิลเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการโดยพลาสติก HDPE ที่นิยมนำกลับมาขึ้นรูปใหม่นั้นจะได้เป็นบรรจุภัณฑ์ ชนิดต่างๆเช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดแชมพู ถังแกลลอนพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ลัง เป็นต้น

2.3 ความเป็นกิ่งก้านของโมเลกุล (Chain Branching)

ความเป็นกิ่งก้านสายโซ่ของโมเลกุลจะถูกเรียกความยาวของสายโซ่โมเลกุลว่าเป็นสายโซ่โมเลกุลหลักการผลิตพอลิเมอร์สายโซ่โมเลกุลอาจเกิดกิ่งก้านขึ้นได้ เช่น สังเคราะห์พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งแบบ Ziegler-Natta ซึ่งในหลายกรณีเกิดขึ้นจากความตั้งใจของผู้สังเคราะห์ ซึ่งกิ่งก้านของ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 การใช้งานที่มีความแตกต่างกันดังนั้นการควบคุมกิ่งก้านเป็นปัจจัยหลักต่อ สมบัติด้านการไหล แบ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุลเป็นลักษณะต่างๆดังนี้

ปริมาณของกิ่งก้าน เมื่อเทียบพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านและไม่มีกิ่งก้านพบว่าความหนืดจะแตกต่างกันเนื่องจากความสามารถในการอัดตัวของพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านจะมีความหนืดต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งก้าน เป็นผลจากความสามารถในการอัดตัวของพอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งก้านมีค่ามากกว่าซึ่งในหลักการนี้สามารถเทียบพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลวได้แต่จะต้องมีความยาวเฉลี่ยของกิ่งก้านใกล้เคียงกัน

ความยาวหรือน้ำหนักโมเลกุลของกิ่งก้าน พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อเกิดการไหลจะมีความหนืดน้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านยาว ค่าความหนืดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือน้ำหนักโมเลกุล และการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านยาวจึงส่งผลต่อค่าความหนืด ผลงานวิจัยของ Saini และ Shenoy [9] พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของกิ่งก้านมีความสำคัญมากกว่าปริมาณของกิ่งก้าน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) มีค่าความหนืดที่อัตราความเร็วต่ำ สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene: LLDPE) แต่มีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene: LDPE)



ภาพที่ 2.9 ความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุล (a) สายโซ่เส้นตรงไม่มีกิ่งก้าน, (b) กิ่งก้านสั้น, (c) กิ่งก้านยาวไม่เป็นระเบียบและ (d) กิ่งก้านแบบแห [10]

2.4 แกลบและเถ้าแกลบ

ข้าวเป็นผลผลิตทางการเกษตรในปีหนึ่งจะมีการเก็บเกี่ยวข้าวได้ประมาณ 600 ล้านตัน ประเทศไทยมีกำลังผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน ซึ่งเป็นเปลือกข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ซึ่งโดยปกติในกระบวนการสีข้าว ข้าวเปลือก 100 ตัน จะได้แกลบ 23 ตัน [12]



ภาพที่ 2.10 แกลบและแฉ่ำแกลบตำโรงสี

แกลบเป็นส่วนผสมของ เปลือก เมล็ด หาง กลีบเลี้ยง และข้าวเมล็ด มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-24 ของข้าวเปลือก ถือเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ลักษณะทั่วไปของแกลบจะมีขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2 ความชื้นของแกลบไม่เกินร้อยละ 15 ส่วนใหญ่ได้มาจากโรงสีข้าว แกลบส่วนใหญ่ถูกใช้งานได้หลายอย่าง เช่นเป็นเชื้อเพลิง ผสมลงในดินเพื่อปรับสภาพดิน เป็นต้น นอกจากนี้แกลบยังสามารถมีมูลค่าสูงถ้าสามารถควบคุมคุณสมบัติให้ได้ตามที่คุณต้องการ ส่วนจุดด้อยของแกลบคือมีปริมาณซีแฉ่ำร้อยละ 16-18 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของเปลือกข้าว [11]

สมบัติ	
สี	เหลือ/ทอง
ความยาว (มิลลิเมตร)	5 - 10
ความกว้าง (มิลลิเมตร)	2.5 - 5.0
ความแข็ง (Mohr Scale)	5.5 - 6.5
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ม ³)	96 - 160

เปลือกข้าวมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ เซลลูโลส (Cellulose) ลิกนิน (Lignin) และเพนโทซาน (Pentosane) รวมกันประมาณร้อยละ 80 และสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Component) ประมาณ ร้อยละ 20 จึงไม่เหมาะแก่การนำไปเป็นอาหารสัตว์ คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกข้าว เพราะว่าเปลือกข้าวมีความแข็งประมาณ 6.6 ตามโมสเกล และเนื่องจากกลบให้ความร้อนจากการเผาสูงถึงประมาณ 13×10^6 จูล/กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นประมาณครึ่งหนึ่งของถ่านหิน ทำให้มีความพยายามในการใช้ถ่านกลบเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นกลบส่วนใหญ่จึงใช้ในการเผาเพื่อนำเอาพลังงานไปใช้ เช่นการเผาในโรงสี และการเผาอิฐ และในปัจจุบันมีการใช้กลบในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในจังหวัด นครสวรรค์ ร้อยเอ็ด และนครราชสีมา เป็นต้น การใช้งานกลบและถ่านกลบโดยทั่วไปมักจะใช้เป็นแหล่งในการสกัดซิลิกาซึ่งมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมากมาย เนื่องจากปริมาณกลบที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีแนวทางการใช้งานกลบและถ่านกลบได้ 7 ประเภทดังต่อไปนี้

ประเภทที่ 1 การใช้งานกลบเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน

ประเภทที่ 2 การใช้งานกลบเพื่อเป็นแหล่งผลิตซิลิกา (SiO_2)

ประเภทที่ 3 การใช้งานซิลิกาจากกลบเพื่อเป็นวัตถุดิบในงานเซรามิกส์

ประเภทที่ 4 การใช้งานซิลิกาจากกลบเพื่อผลิตซิลิกอน (Si)

ประเภทที่ 5 การใช้งานกลบเพื่อผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4)

ประเภทที่ 6 การใช้งานถ่านกลบในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า

ประเภทที่ 7 การใช้งานถ่านกลบในอุตสาหกรรมคอนกรีต เป็นต้น

2.4.1 กลบกับอุณหภูมิ

กลบเมื่อถูกความร้อนจะเริ่มสูญเสียความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 3 แสดงน้ำหนักและสีของกลบที่เปลี่ยนไปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส น้ำและความชื้นจะถูกกำจัดออกโดยกระบวนการให้ความร้อนโดยที่กลบยังคงสภาพเดิม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 200 °C กลบจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล แสดงให้เห็นถึงการเริ่มกระบวนการเผาไหม้ที่เริ่มเกิดโดยน้ำหนักจะลดลง น้ำหนักของกลบโดยทั่วไปจะลดลงร้อยละ 15 และถ่านกลบที่ผ่านการบดลดขนาดจะมีน้ำหนักลดลงร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 300 °C การไหม้จะเกิดมากขึ้นโดยกลบจะเปลี่ยนลักษณะของสีเป็นสีเทาเข้มและสีดำ น้ำหนักของกลบจะลดลงกว่าเดิมหลังจากอุณหภูมิถึง 400 °C กลบจะเริ่มกลายเป็นถ่านโดยกลบบดละเอียดจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนและกลบโดยทั่วไปจะเป็นสีน้ำตาลอ่อนบางส่วนยังคงเป็นสีดำปะปนอยู่ น้ำหนักจะสูญเสียไปถึงร้อยละ 75 ในช่วงนี้ การเพิ่มอุณหภูมิหลักจากนี้จะส่งผลให้น้ำหนักลดลงไม่มาก ที่อุณหภูมิ 600 °C กลบจะกลายเป็นถ่านทั้งหมดสังเกตได้จากสีของกลบจะมีลักษณะ

เป็นสีเทาขาวหลักจากเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 600-900 °C จะไม่ส่งผลต่อน้ำหนักและสีของถ่านโค้ก ดังนั้นที่อุณหภูมิ 600 °C จึงเพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์

ตารางที่ 2.3 น้ำหนักและสีของถ่านโค้กที่อุณหภูมิ [13,14]

อุณหภูมิในการเผา (°C)	ถ่านโค้กบด		ถ่านโค้ก	
	น้ำหนักที่หายไป	สี	น้ำหนักที่หายไป	สี
	(%)		(%)	
อุณหภูมิห้อง	0	อ่อน	0	เหลือง
105 °C	10.5	เหลือง	8.8	เหลือง
200 °C	47.5	น้ำตาล	5.5	น้ำตาล
300 °C	74.2	น้ำตาล	60	ดำ
400 °C	76.1	น้ำตาล	75.6	ดำ น้ำตาล
500 °C	76.5	น้ำตาล ขาว	77.4	น้ำตาล ขาว
600 °C	76.5	ขาว	77.3	ขาว
700 °C	76.5	ขาว	77.9	ขาว
800 °C	76.6	ขาว	77.7	ขาว
900 °C	76.8	ขาว	77.8	ขาว

การเผาถ่านโค้กในขณะที่มีอากาศไม่เพียงพอและอุณหภูมิต่ำจะได้ถ่านโค้กที่มีสีดำและมีปริมาณคาร์บอน (Carbon) และสิ่งที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์อยู่ในปริมาณมากถึงแม้จะเผาในอุณหภูมิสูงแต่ในการเผาที่มีอากาศไม่เพียงพอ ถ่านโค้กที่ได้ยังคงมีปริมาณคาร์บอนสูง ในการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีอากาศปริมาณจำกัดจะได้คาร์บอน (Carbon) และสิ่งที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์สูงถึงเกือบร้อยละ 40 ในกรณีที่ถ่านโค้กผ่านการเผาไหม้สมบูรณ์จะมีปริมาณซิลิกาสูง [15]

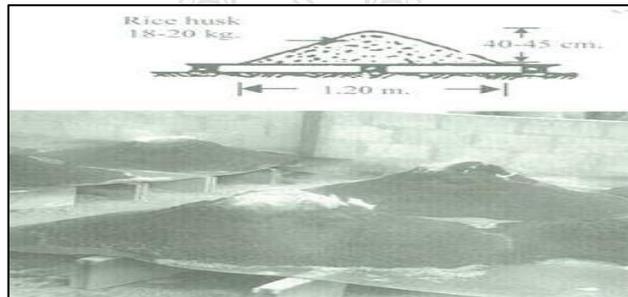
นอกจากความหนาแน่นของการทับถมกันและการเรียงตัวของเปลือกข้าวจะมีผลต่อปริมาณช่องว่างในกองเปลือกข้าวและการเผาไหม้ การเรียงตัวของเปลือกข้าวจะส่งผลต่อปริมาณช่องว่างส่งผลต่อการเผาไหม้ การเรียงตัวของเปลือกข้าวส่งผลต่อกระบวนการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวและวิธีการกระบวนการสีข้าว ดังนั้นเปลือกข้าวที่มีแล้วมีปริมาณการแตกหักและมีขนาดเล็กจะง่ายต่อการเผาในเตา ที่ใช้ถึงน้ำมัน ถ้าเปลือกข้าวมีขนาดเล็กหรือแตกละเอียดจะได้ถ่านโค้กที่มีสีเทาขาว ในกรณีที่เปลือกชิ้นใหญ่การเผาจะได้ลักษณะของถ่านโค้กเป็นสีเทาขาวเฉพาะส่วน

ที่มีอากาศเบาเพียงที่ส่วนกลางของเปลือกข้าวที่มีอากาศในปริมาณจำกัดถ้าแกลบจะมีลักษณะสีเทาและดำ

2.4.2 การเผาแกลบ

แกลบจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งและมีน้ำหนักเบา ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะเป็นการเผาไหม้แบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งแกลบจะติดไฟที่ผิวนอกแล้วจึงลามเข้าไปยังภายในกองแกลบข้างใน เชื้อเพลิงที่เกิดการเผาไหม้จะกลายเป็นเถ้า (Ash) ซึ่งเถ้าจะขวางการเข้าไปในก้อนเชื้อเพลิงของเปลวไฟ จึงทำให้แกลบเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวหรือก๊าซที่จะมีการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศที่เรียกว่า Premixed ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์กว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง โดยลักษณะการเผาไหม้ที่นิยมใช้สามารถแบ่งเป็น 4 วิธี

1. การเผาแกลบผสมดินเหนียวหรือปูนขาวที่เหลือจากอุตสาหกรรม (Lime Sludge)
2. การเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี
3. การเผาในที่โล่ง
4. การเผาแบบควบคุม เป็นต้น



ภาพที่ 2.11 การเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี [11]

2.4.3 คุณสมบัติของแกลบ

องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกข้าวจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวซึ่งความแตกต่างเท่าที่ปรากฏจะอยู่ในขั้นต่ำและนอกจากนี้ สภาพดิน ปุ๋ย อากาศ ส่งผลต่อองค์ประกอบของแกลบโดยที่สภาพของดินและปุ๋ยจะส่งผลต่อโปรแตสเซียมและโซเดียมซึ่งมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร ทั้งนี้จะไม่ต่างกันมากเมื่อแกลบมีการเผาไหม้สมบูรณ์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 90 ดังแสดงในตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังจะเป็นออกไซด์ของโซเดียมโปรแตสเซียมแคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และซิลเฟออร์ ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on

ignition: LOI) จะค่อนข้างต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 5) ปริมาณค่า LOI ส่วนใหญ่ในแก้วจะเป็นคาร์บอนและสารที่เผาไหม้ไม่หมด ถ้ามีปริมาณค่า LOI ในปริมาณสูงคือแก้วที่ผ่านการเผาไหม้ไม่หมดส่งผลต่อสมบัติการรับแรงอัดซึ่งปริมาณคาร์บอนและส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณสูงทำให้ซิลิกาตกลง

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว [16]

สารประกอบ	แก้ว	แก้วขาว	แก้วดำโรงสี
SiO ₂	86.9 – 97.3	88.33	89.95
K ₂ O	0.6 – 2.5	2.76	1.49
Na ₂ O	0 – 1.5	0.15	0.07
CaO	0.2 – 1.5	0.52	0.50
MgO	0.12 – 1.96	0.28	0.23
Fe ₂ O ₃	0 – 0.6	3.37	1.89
P ₂ O ₅	0.2 – 2.9	NA	NA
SO ₃	0.1 – 1.1	0.12	0.02
Cl	0 – 0.4	NA	NA
Al ₂ O ₃	NA	0.48	0.54
LOI	NA	3.71	4.70

2.4.4 สถานะของซิลิกาในแก้ว

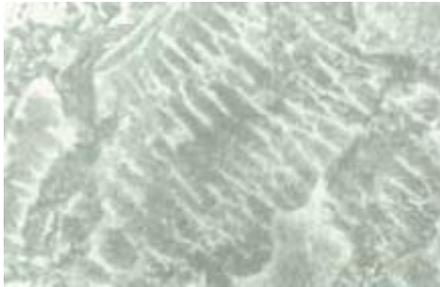
ซิลิกาเป็นสารประกอบที่อยู่มากในแก้วและส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาของแก้วแก้วจะขึ้นอยู่กับสถานะของซิลิกา ซิลิกาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 สถานะคือซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous) และซิลิกาที่เป็นผลึก (Crystalline) ซึ่งอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซิลิกาที่เป็นผลึกค่อนข้างอยู่ตัวและเฉื่อยต่อปฏิกิริยา แต่สำหรับซิลิกาที่เป็นแบบอสัณฐานซึ่งได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูงซิลิกาจะมีการเปลี่ยนแปลงผลึกเป็นลักษณะผลึกของควอตซ์ (Quartz) คริสโตบาไลต์ (Christobalite) และทรินไดมิต (Tridymite) [17]

2.3.5 ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างและความพรุนของแก้วบดละเอียด

แก้วที่ผ่านอุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไปจะยังคงรักษาความพรุนและโครงสร้างของเซลล์ไว้ได้ดังแสดงในภาพที่ 3.8 แสดงโครงสร้างของเซลล์แก้วที่มีลักษณะเป็นรูพรุนของแก้ว ที่เผาและบดลดขนาดส่วนมากยังคงเป็นลักษณะรูพรุน วิธีการบดละเอียดที่มากเกินไปอาจทำให้ลักษณะเซลล์ถูกทำลายและความเป็นรูพรุนลดลงซึ่งจะส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวของแก้ว

เริ่มต้นเผา

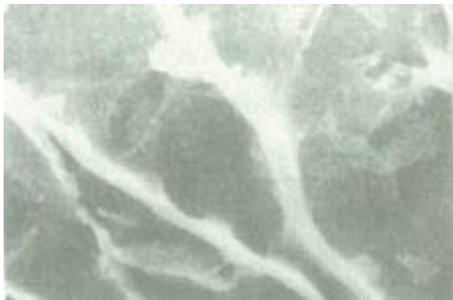
เผาที่อุณหภูมิ 400 °C



(ก) พื้นผิวอนุภาค



(ง)



(ข) ลักษณะภายในอนุภาค



(จ)



(ค) แก่ลบบด



(ฉ)

ภาพที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิต่างๆ [17]

เผาที่อุณหภูมิ 500 - 600 °C

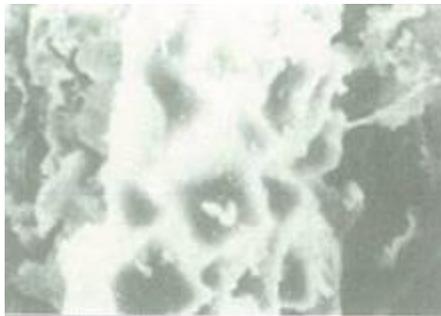
เผาที่อุณหภูมิ 700 - 800 °C



(ข)



(ง) 700 องศาเซลเซียส



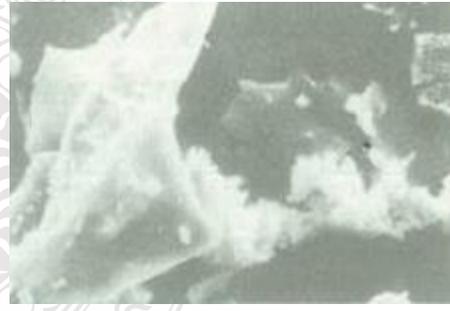
(ค)



(ฉ) 800 องศาเซลเซียส



(ฉ)



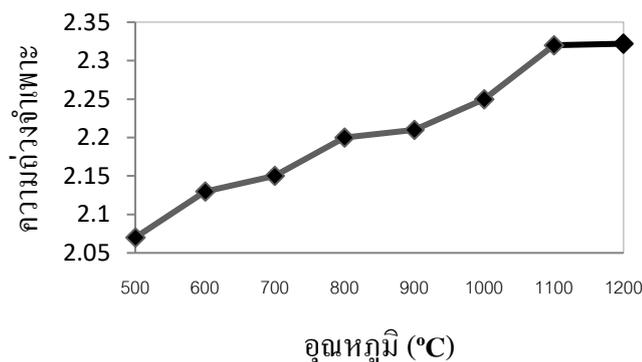
(ฉ) 800 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ) [17]

การเผาที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าแกลบ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดยระยะแรก แกลบจะเผาบริเวณจากเปลือกเข้าไปสู่ภายในอนุภาคแกลบ ทำให้มีลักษณะที่เผาไม่หมด (ภาพที่ 2.12 ก และ ข) เมื่อทำการบดลดขนาดก่อนเผาจะช่วยในการเผาไหม้ (ภาพที่ 2.12 ค) ซึ่งอัตราการให้ความร้อน และเวลาในการเผาจะส่งผลต่อคุณภาพของเถ้าแกลบที่ได้ แกลบที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 600 °C จะให้

ปริมาณเถ้าสูงกว่การเผาที่อุณหภูมิ 400 °C และจะเรียกในขั้นตอนนี้ว่า Dispersed State (ภาพที่ 2.12 ง ถึง ฉ) ที่อุณหภูมิการเผาที่ 700 °C ทำให้สีเถ้าแกลบเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีชมพู โดยช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดผลึก 800 °C (ภาพที่ 2.12 ฉ) อย่างไรก็ตามอาจพบการจับรวมกันเป็นก้อนที่อุณหภูมิดังกล่าว (ภาพที่ 2.12 ข) การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °C ทำให้เกิดการจับตัวของเถ้าแกลบมากขึ้น เนื่องจากเกิดการหลอมเกิดขึ้น

2.4.6 ความถ่วงจำเพาะความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผา แกลบ เถ้าแกลบใหม่ไม่สมบูรณ์จะมีปริมาณคาร์บอนเหลืออยู่ในปริมาณมากจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ในเถ้าแกลบที่มีการเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9-2.3 และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาดังแสดงในภาพที่ 2.13 เถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิ 500 °C มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และจะเพิ่มขึ้นเป็น 2.2 และ 2.3 ที่อุณหภูมิในการเผา 800 และ 1000 °C ตามลำดับ การเพิ่มของความถ่วงจำเพาะเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ลดน้อยลงและการที่โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลายและความพรุนลดลงที่อุณหภูมิสูง



ภาพที่ 2.13 ความถ่วงจำเพาะเถ้าแกลบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา [18]

2.4.7 ความละเอียดนอกจากความละเอียดของเถ้าแกลบจะขึ้นอยู่กับเวลาและวิธีในกระบวนการบดและยังขึ้นอยู่กับวิธีในกระบวนการเผาอุณหภูมิและปริมาณอากาศ การเผาแกลบที่อุณหภูมิ 500 °C ให้เถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูงสุด 170 ตารางเมตร/กรัม (เมื่อวัดโดยวิธี BET) ที่อุณหภูมิ 500-600 °C พื้นที่ผิวมีค่าอยู่ที่ 100-150 ตารางเมตร/กรัม ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก [21] การลดลงของพื้นที่ผิวเกิดจากการเป็นผลึกและการทำลายโครงสร้างของเซลล์ที่มีรูพรุน ในการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ในกระบวนการเผาแบบ Torbed พบว่าความละเอียดของเถ้าแกลบที่ไม่ได้บดมีค่าเท่ากับ 100 ตารางเมตร/กรัม และเพิ่มเป็น 229 ตารางเมตร/กรัม เมื่อเผาโดยการเพิ่มอากาศเข้าไป เถ้า

แกลบเทาขาวที่เผาอยู่ในช่วงอุณหภูมิพอเหมาะจะส่งผลให้บดละเอียดได้ง่ายกว่าแกลบดำโรงสี ในการบด 1 ชั่วโมงเท่ากันแกลบสีเทาขาวมีความละเอียด 14300 ตารางเซนติเมตร/กรัม (เมื่อวัดโดยวิธีของ Blaine) ส่วนแกลบดำโรงสีมีความละเอียด 9500 ตารางเซนติเมตร/กรัม [19]

2.5 ลักษณะอนุภาคผง

2.5.1 ขนาดของอนุภาค (Particles Size)

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมักใช้ลักษณะของวัสดุที่เป็นอนุภาคผงที่มีอนุภาคตั้งแต่ 35 เมส (Mesh, เมส คือจำนวนรูต่อพื้นที่ตารางนิ้ว หรือ 500 ไมครอน 200 เมส หรือ 60 ไมครอน และนอกจากนี้ยังมีผลสัมพันธ์กับการกระจายของอนุภาค ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน ขนาดของอนุภาคผงมักจะบอกจำนวนของขนาดเมช ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการคัดแยกขนาดได้ผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติคุณสมบัติของอนุภาคผงที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปมีความสำคัญต่อการศึกษาขนาดของอนุภาคยังคงไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากการนำไปใช้งานจริงยังคงมีค่าใช้จ่ายในการบดลดขนาด ซึ่งขนาดของอนุภาคขนาดเล็กเป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ดีกว่ารูปร่างที่มีขนาดใหญ่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรมากกว่าซึ่งการตรวจสอบลักษณะแสดงดังภาพที่ 2.15 และการถ่ายโอนความร้อนของอนุภาคขนาดเล็กดีกว่าก่อให้เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์อีกทั้งยังส่งผลต่อการเกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานน้อยลงและการยึดเกาะของชิ้นงานดีขึ้น [20]

2.5.2 รูปร่างของอนุภาค (Particles Shape)

โดยทั่วไปนั้นรูปร่างอนุภาคแบบทรงกลมเหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนและรูปร่างที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนคือ “Squared Egg” คล้ายกับรูปร่างของไข่สามารถตรวจสอบได้โดยการส่องด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy: SEM ดังแสดงในภาพที่ 2.14 แต่ในกระบวนการ ควรหลีกเลี่ยงอนุภาคที่เป็นสี่เหลี่ยมเนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคอยู่ในระดับต่ำและการสัมผัสอนุภาคและการกระจายตัวอาจไม่ทั่วถึง ความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมและการสัมผัสกับอนุภาคต่ออนุภาคส่งผลให้ง่ายต่อการเริ่มหลอมขึ้นรูป อย่างไรก็ตามควรหลีกเลี่ยงอนุภาคทรงกลมสิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อความหนาแน่นของการบรรจุต่ำลงอีกทั้งรูปร่างที่เป็นเส้นใยหรือหาง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเชื่อมระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคอาจก่อให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงานอีกทั้งการหลอมละลายช้าลง [21]



ภาพที่ 2.14 รูปร่างอนุภาคพลาสติก [20]



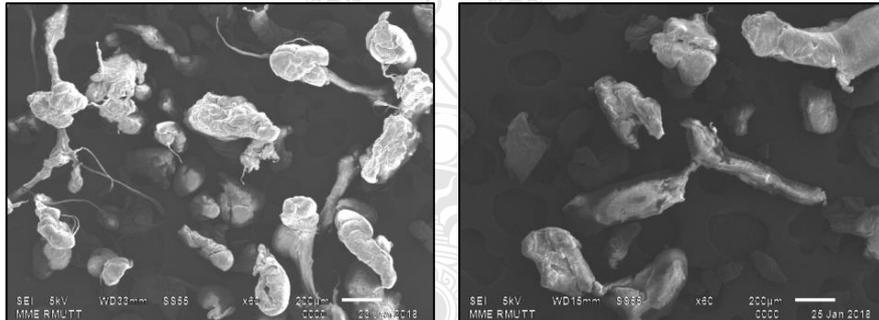
Average Thickness	The average diameter between the upper and lower surfaces of a particle at its most stable position of rest.
Average Length	The average diameter of the longest chords measured along the upper surface of a particle in the position of rest.
Average Breadth	The average diameter at right angles to the diameter of average length along the upper surface of a particle in its position of rest.
Chunkiness	Reciprocal of elongational ratio.
Circularity	Ratio of circumference of a circle with the same projected area to the actual circumference of the projected area.
Elongational Ratio	The largest particle length to its largest breadth when the particle is in a position of rest.
External Compactness	The square of the diameter of equal area to that of the profile, divided by the square of the diameter of an embracing circle.
Feret's Diameter	The diameter between the tangents at right angles to the direction of scan, which touch the two extremities of the particle in its position of rest.
Martin's Diameter	The diameter which divides the particle profile into two equal areas measured in the direction of scan when the particle is in a position of rest.
Projected Area Diameter	The diameter of a sphere having the same projected area as the particle profile in the position of rest.
Roundness Factor	Ratio of the radius of the sharpest corner to the most round corner with the particle in a position of rest.
Specific Surface Diameter	The diameter of a sphere having the same ratio of external surface area to volume as the particle.
Surface Diameter	The diameter of a sphere having the same surface area as the particle.
Stokes Diameter	The diameter of a sphere having the same terminal velocity as the particle.
Volume Diameter	The diameter of a sphere having the same volume as the particle.

ภาพที่ 2.15 การจัดหมวดหมู่ของรูปร่างอนุภาค [21]

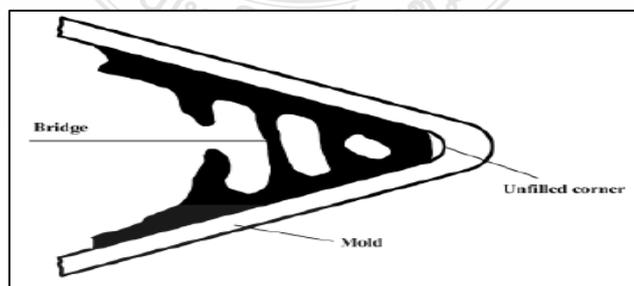
2.6 การเคลื่อนที่วัสดุพอลิเมอร์

2.6.1 การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง

ความสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน เมื่อทราบถึงการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการในด้านการเคลื่อนที่และกระจายตัวของพอลิเมอร์ ปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นมีอยู่ 2 ประการคือ ขนาดและรูปร่างของพอลิเมอร์ ขนาดของพอลิเมอร์มีที่ค่าประมาณ 35 Mesh การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ไม่ส่งผลมากนักแต่รูปร่างของพอลิเมอร์ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์มากกว่าอนุภาคของพอลิเมอร์ที่มีรูปร่างคล้ายกับหาง (Tail) ดังแสดงในภาพที่ 2.16 เมื่อพอลิเมอร์ก่อตัวเป็นชั้นในส่วนที่เป็นส่วนโค้งหรือส่วนเว้าของแม่พิมพ์เนื่องจากอัตราการไหลที่แตกต่างกันหมายความว่าลักษณะของพอลิเมอร์คล้ายหางจะหลอมละลายก่อนส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในชิ้นงาน บางชิ้นงานอาจเกิดรอยร้าวหรือไม่หลอมเป็นชิ้นงานเดียวกันส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดยการวัดค่าการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์สามารถทดสอบได้โดยเครื่อง Density Testing Apparatus พอลิเมอร์ที่ออกมาจากเครื่องทดสอบ ที่เวลาดีกว่าแสดงถึงการไหลของพอลิเมอร์ที่ดีกว่า [21]



ภาพที่ 2.16 ลักษณะของพอลิเมอร์ที่มีความแตกต่างกัน [21]



ภาพที่ 2.17 ลักษณะการหลอมละลายของพอลิเมอร์ที่ส่วนโค้ง [21]

2.6.2 การไหลของผงในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ในด้านของคุณสมบัติการไหลแบบแห้งมีความสำคัญเนื่องจากในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปความสามารถของผงในการไหลภายในแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.18 อนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมจะเป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติการไหลที่ดีที่สุด ในขณะที่รูปร่างที่มีลักษณะของหางจะส่งผลต่อคุณสมบัติการไหลนำไปสู่ปัญหาการหลอมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาคทำให้เกิดปัญหาในแม่พิมพ์หรือเกิดฟองอากาศภายในแม่พิมพ์ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากมีโอกาที่จะจับตัวเป็นก้อนและกระจายตัวได้ไม่ดี พฤติกรรมการไหลของผงในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนถูกจำแนกเป็นการไหลของผงพลาสติกแบบคุลอมบ์หรือการไหลของผงพลาสติกแบบหนืด สำหรับการไหลของผงพลาสติกแบบคุลอมบ์เป็นอนุภาคที่สำคัญในการดึงดูดให้ผงพลาสติกเกาะติดกันอย่างต่อเนื่องซึ่งในแรงดึงดูดจะถูกต้านโดยการโอนโมเมนตัมระหว่างอนุภาคผงพลาสติก

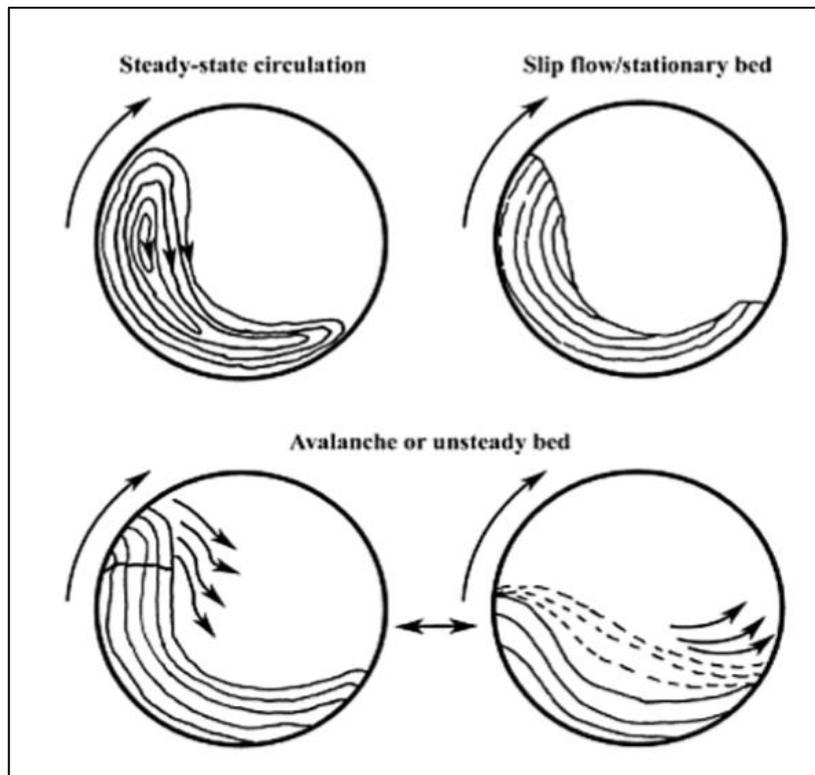
การที่ความเร็วในการหมุนของแม่พิมพ์จะทำให้การไหลของผงพลาสติกไหลอย่างต่อเนื่อง ผงพลาสติกที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์จะเกินกว่ามุมแบบไดนามิกซึ่งมุมแบบไดนามิกจะมีการไหลที่เหมาะสมต่อมุมนี้อยู่ที่ประมาณ 25 °C และ 50 °C เหนือแนวแกนหลัก ณ จุดที่พลาสติกยังไม่หลอมเหลวผงพลาสติกจะไหลทั่วแม่พิมพ์ซึ่งเป็นการไหลที่ต่อเนื่องและอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปทรงเรขาคณิตของแม่พิมพ์ ผงพลาสติกที่ไหลในรูปแบบนี้จะมีลักษณะเป็นผงแบบ Squared egg และไหลได้แบบอิสระต่อการไหลพลาสติกที่ไหลได้แบบต่อเนื่องในรูปแบบนี้จะจัดเป็นการไหลของผงพลาสติกแบบหนืด

การไหลแบบถล่ม แบบของการไหลนี้คล้ายคลึงกับหิมะถล่ม ในส่วนแรกพลาสติกอยู่ในแม่พิมพ์จะไหลด้วยความเร็วคงที่อยู่ที่พื้นผิวแม่พิมพ์ซึ่งผงพลาสติกภายในจะมีมวลเกินกว่ามุมการไหลแบบไดนามิก ณ จุดที่เป็นส่วนบนของมวลของพลาสติกจะแยกออกจากผนังแม่พิมพ์และลดหล่นหรือตกลงสู่ส่วนล่างภายในแม่พิมพ์ในส่วนที่เหลือของพลาสติกก็จะกลายเป็นแบบความเร็วคงที่และจะเกิดขึ้นอีกครั้งโดยแม่พิมพ์หมุนและเกิดการถล่มเกิดขึ้นซึ่งเป็นการไหลของพลาสติกจึงไม่สามารถจัดเป็นการไหลของผงพลาสติกแบบคุลอมบ์หรือการไหลของพลาสติกหนืด

การลื่นไหล ประเภทของการลื่นไหลเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวแม่พิมพ์เรียบมากจะเป็นรูปแบบผงพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์เป็นแบบความเร็วคงที่แม่พิมพ์จะอยู่ในลักษณะแนวนอนและผงพลาสติกจะเกิดการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับการไหลแบบถล่มแต่แรงเสียดทานของผิวแม่พิมพ์กับผงพลาสติกจะไม่สามารถป้องกันไม่ให้ผงพลาสติกเลื่อนและเคลื่อนที่ตามผิวแม่พิมพ์ ณ จุดนี้ผงพลาสติกจะเลื่อนเพียงแค่ด้านล่างของแม่พิมพ์เท่านั้น

การลื่นไหลแบบสลีปอย่างต่อเนื่องสำหรับประเภทของการลื่นไหลนี้ให้แกนนอนเป็นหลักและยังคงเป็นความเร็วคงที่ของแกนในแนวนอนและแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่ข้างใต้ผงพลาสติกที่บรรจุอย่างดี

มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เช่น โอลิฟิน จะแสดงการไหลลื่นประเภทนี้และถ้าแม่พิมพ์ได้ทำการชุบหรือการขัดแม่พิมพ์ผงพลาสติกที่เกิดการไหลจะไม่แสดงลักษณะการไหลแบบคุลอมบ์หรือการไหลหนืด [21]



ภาพที่ 2.18 ลักษณะการไหลของอนุภาคภายในแม่พิมพ์ [21]

2.7 ความหนาแน่นวัสดุพอลิเมอร์

ความหนาแน่น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาณของวัสดุ เป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของวัสดุ ความหนาแน่นสามารถแบ่งออกได้เป็น ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density) ดังแสดงในภาพที่ 2.19

2.7.1 ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density)

ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) หมายถึงความหนาแน่นของวัสดุซึ่งมีปริมาณมวลของวัสดุเอง เช่น แป้ง (Flour) เมล็ดธัญพืช (Cereal Grain) กาแฟผง นมผง เป็นต้น รวมทั้งช่องว่างระหว่างวัสดุ ในการหาค่าความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) สามารถทำได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D-1895 โดยการนำวัสดุบรรจุลงในภาชนะที่สามารถหาค่าปริมาตรได้ ปาดหรือเกลี่ย

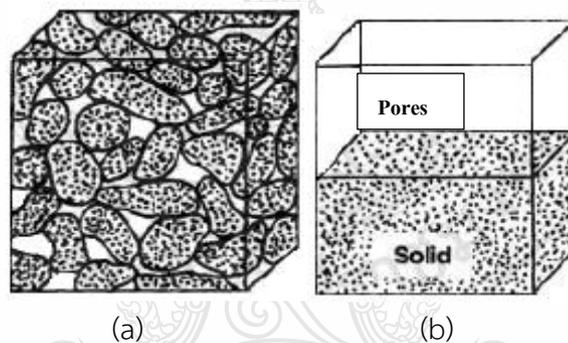
พอลิเมอร์ให้เรียบ ชั่งน้ำหนัก ปัจจัยที่มีผลต่อการหาค่า Bulk Density ได้แก่ค่าความชื้น (Moisture Content) ของวัสดุ และความสูงของระดับที่เทวัสดุลงในภาชนะการอัดแน่นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวม

ค่าความหนาแน่นรวมจะถูกรวบรวมด้วยค่าความชื้น (Moisture Content) เนื่องจากวัสดุบางชนิดจะส่งผลต่อขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุ

2.7.3 การใช้ประโยชน์จากค่าความหนาแน่นรวม

เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าความพรุน (Porosity) ซึ่งแสดงปริมาณของที่ว่างภายในกองวัสดุ ค่าความหนาแน่นรวมยังใช้เพื่อการออกแบบขนาดของบรรจุภัณฑ์บางชนิด เช่น บรรจุภัณฑ์เก็บอาหารเป็นต้น [21]

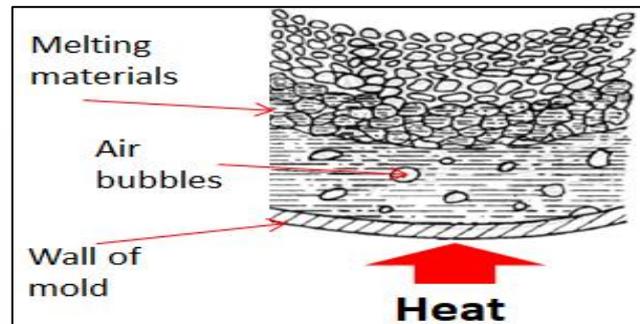


ภาพที่ 2.19 (a) ความหนาแน่นโดยรวม Bulk Density และ (b) ความหนาแน่นเนื้อ Solid Density [22]

2.8 ลักษณะการหลอมละลายพอลิเมอร์ (Sintering)

กระบวนการให้ความร้อนบางครั้งจะเรียกว่า Sintering ซึ่งเป็นการหลอมละลายของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมจากที่พื้นผิวก่อนก่อนที่จะไปแก่นกลางภายในเนื่องจากพอลิเมอร์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนดังนั้นการนำความร้อนจากผิวด้านนอกสู่ผิวแกนกลางจึงเกิดขึ้นอย่างช้ามากเมื่อเรามีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ถูกตั้งไว้จะพบว่าพอลิเมอร์ที่อยู่ติดกับผนังแม่พิมพ์จะหลอมละลายเป็นชั้นๆติดกับแม่พิมพ์ก่อน นอกจากนี้ผลของขนาดอนุภาคพลาสติกยังส่งผลต่อกระบวนการหลอมละลายอีกด้วยความร้อนจะถูกถ่ายเทอย่างช้าทำให้พอลิเมอร์ภายในสุดได้รับความร้อนช้าที่สุดถึงเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในแม่พิมพ์ ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการใช้เวลาค่อนข้างมาก ประมาณ 30 ถึง 60 นาทีต่อกระบวนการขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 2.20 ซึ่งในกระบวนการ

ซึ่งรูปแบบหมุนนี้ไม่เหมาะกับพลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอากาศภายในแม่พิมพ์จะเกิดเป็นช่องว่างส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน [24]



ภาพที่ 2.20 ลักษณะของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ [23]

2.9 สมบัติการไหลและน้ำหนักโมเลกุล (Flow Properties and Molecular Weight)

พอลิเมอร์เป็นของไหลที่มีความหนืดเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเป็นสายโซ่ที่ยาว (Long Chain Molecular) และเกี่ยวพันกันอยู่ (Molecular Entanglement) นอกจากนี้พอลิเมอร์หลอมเหลวยังไหลเป็นแบบนอนนิวตันเนียนแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic non-Newtonian) ซึ่งจะส่งผลต่อความหนืดเมื่อค่าอัตราความเค้นเฉือน (Shear Rate) ดังนั้นหากต้องการเปรียบเทียบวัสดุอื่นๆให้เทียบกันที่ความเค้นเฉือนเดียวกันโดยจะเปรียบเทียบกันที่สภาวะความเค้นเฉือนต่ำซึ่งเรียกว่า Zero Shear Viscosity

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.21 เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ (M_w) ที่ส่งผลต่อค่าความหนืดที่อัตราความเค้นต่ำมาก จากรูปพบว่าเมื่อโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลวสูงขึ้นในช่วงแรก ค่าความหนืดจะสูงขึ้นอย่างเป็นสัดส่วน จากนั้นความหนืดของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่สูงกว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ (มีค่าความชันของกราฟที่สูงขึ้น) หากลากเส้นจากจุดต่อระหว่างความชันมาแกน X จะสามารถหาค่าวิกฤตของน้ำหนักโมเลกุล (Critical Molecular Weight, M_c) ของพอลิเมอร์ชนิดนั้นได้ซึ่งเป็นจุดที่โมเลกุลขนาดใหญ่และยาวพอที่จะเกี่ยวกันระหว่างสายโซ่ค่า M_c ของพอลิเมอร์อยู่ระหว่าง 10,000 ถึง 40,000 ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ค่า M_c ของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลเพื่อการเคลื่อนไหว (Molecular Flexibility) คือโมเลกุลมีความยืดหยุ่นมากจึงมีค่า M_c น้อย เช่น Polyethylene มีค่า M_c ต่ำกว่า Polystyrene เพราะ Polyethylene มีความยืดหยุ่นสูงกว่า

ตารางที่ 2.5 ตารางตัวอย่างค่า M_c ของพอลิเมอร์ชนิดต่าง [24]

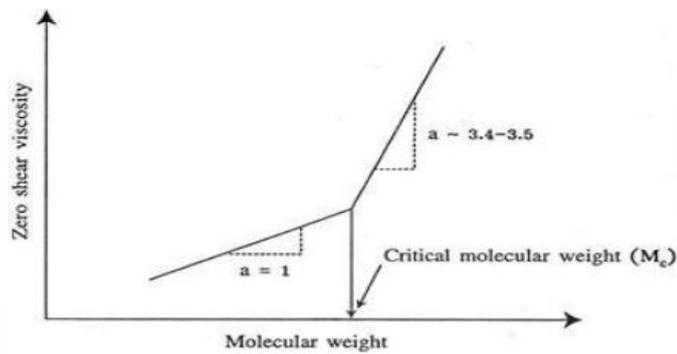
พอลิเมอร์	ค่า M_c
Linear low density polyethylene	4,000
Polyisobutylene	17,000
Polyvinyl acetate	29,200
Polystyrene	38,000
Polydimethyl siloxane	35,200
Polymethyl methacrylate	10,400

ตารางที่ 2.6 กรณีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์
หลอมเหลว ค่าคงที่ [24]

กรณี	เงื่อนไข	ค่าคงที่ a
$M_w < M_c$	ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุล เฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ หลอมเหลว	1

ตารางที่ 2.7 กรณีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์
หลอมเหลว ค่าคงที่ [24]

กรณี	เงื่อนไข	ค่าคงที่ a
$M_w > M_c$	ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดย น้ำหนักของพอลิเมอร์หลอม เหลวและการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณการเกี่ยวพันกันของ โมเลกุล	3.4 หรือ 3.5



ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log (ความหนืด ณ อัตราเฉือนต่ำ) และ Log (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก) [24]

2.10 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)

กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนเป็นกรรมวิธีการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวงโดยมีการพัฒนาระบบการผลิตตั้งแต่ 1940 เป็นต้นมา ในช่วงแรกยังไม่แพร่หลายเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปค่อนข้างสูง ผลิตได้จำนวนน้อยและมีข้อจำกัด ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาพลาสติกผง (Plastic Powder) ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์เนื่องจากพลาสติกที่ขนาดอนุภาคเล็กจึงส่งผลต่ออัตราการไหลภายในแม่พิมพ์และหลอมละลายได้ดีกว่าพลาสติกที่มีลักษณะเป็นเม็ดใหญ่ เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ส่งผลต่อเชิงเศรษฐศาสตร์ ให้ความประหยัดต่อชิ้นงาน และชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงไม่มีความเค้น (Stress) กับชิ้นงาน ด้วยข้อเด่นนี้เครื่อง Rotational Molding จึงสามารถเป็นคู่แข่งในตลาดกับกระบวนการขึ้นรูปอื่นๆ

ปี 1940 และต้นปี 1950 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเริ่มเติบโตอย่างช้าเพราะพลาสติกที่เหมาะสมในขณะนั้นใช้ (Celluloses) เพียงอย่างเดียว หลังจากปี 1950 เป็นต้นมา วัสดุที่เคยใช้เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุในกระบวนการขึ้นรูป ส่งผลให้กระบวนการผลิตเริ่มมีการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปอย่างแพร่หลาย ได้แก่ พอลิเอทิลีน โดยนับเป็นปริมาณถึง 90% ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความเหมาะสมของผงพลาสติกพอลิเอทิลีนในการหลอมเมื่อได้รับความร้อน ช่วยของการหลอมเหลวที่กว้าง และเสถียรภาพต่อความร้อน (Heat Stabilizer) แต่ยังมีข้อบกพร่องบางประการเช่นคุณสมบัติด้านความแข็งแรง

โดยทั่วไปเทคนิคการขึ้นรูปแบบหมุนจะนิยมใช้ขึ้นรูปพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกแต่ก็มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเทอร์โมเซตบางชนิด ซึ่งลักษณะพิเศษของกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้ ระหว่างกระบวนการผลิตจะไม่มี ความดันที่สูง (High Pressure) และอัตราเฉือนที่สูง (High Shear Rate) ซึ่ง

ลักษณะพิเศษนี้จะเป็นลักษณะที่แตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปอื่น เช่นการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ การอัดรีด ทำให้ต้นทุนการทำแม่พิมพ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนมีราคาสูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานนอกจากนี้สมบัติเชิงกลดีกว่าเทคนิคการขึ้นรูปแบบอื่นๆ

2.10.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน จะมีกระบวนการขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.22

ขั้นตอนที่ 1 เติมพลาสติกผงลงในแม่พิมพ์ (Loading) เติมผงพลาสติกที่ผ่านการคำนวณน้ำหนักดังสมการที่ (1)

$$D = \frac{M}{V} \quad (1)$$

สมการที่ 1 แสดงหาค่าความหนาแน่นจากมวลต่อปริมาตร

โดยที่ D = ความหนาแน่นของพลาสติก (g/cm^3)

M = น้ำหนักของพลาสติก (g)

V = ปริมาตรแม่พิมพ์ (cm^3)

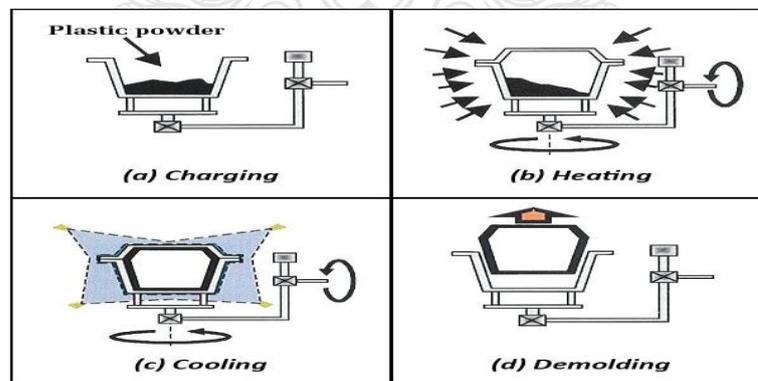
หลังจากคำนวณน้ำหนักพลาสติกที่ใส่ในแม่พิมพ์นำพลาสติกใส่ในแม่พิมพ์ปิดแม่พิมพ์และนำแม่พิมพ์เข้าในห้อง Chamber ของเตาอบเพื่อให้ความร้อน

ขั้นตอนที่ 2 ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (Heating) ให้ความร้อนแก่ด้านนอกแม่พิมพ์ หรือในเตาอบโดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 220-240 °C ในขณะเดียวกันหมุนแม่พิมพ์ในแนวแกนทั้งสองแกนพร้อมกัน (ในแนวแกนตั้งฉากและแนวแกนขนานกับพื้น) เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลาสติก (Fumbling Action) ของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ทำให้ความร้อนจากผิวภายนอกของแม่พิมพ์ส่งผ่านเข้าสู่ด้านในแม่พิมพ์และถึงผงพลาสติกทำให้แม่พิมพ์เกิดการหลอมพลาสติกจะเกิดการหลอมละลายละเหนียวติดผนังแม่พิมพ์ (Tackiness) ทำให้พลาสติกบางส่วนถูกเคลือบติดกับผิวแม่พิมพ์เป็นชั้นบางๆและพลาสติกในส่วนอื่นจะถูกเหวี่ยงไปมาเนื่องจากการเคลื่อนที่ตามแนวแกนเมื่อให้ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังพลาสติกชั้นแรกที่เคลือบติดกับแม่พิมพ์ทำให้มีความร้อนมากพอที่จะทำให้พลาสติกเคลือบในชั้นถัดไปจากพลาสติกที่เคลือบชั้นแรก อิทธิพลของการหมุนเหวี่ยงและการส่งผ่านความร้อนอย่างซ้ำต่อเนื่องทำให้เกิดการเคลือบของพลาสติกเป็นชั้นๆ จนไม่มีอนุภาคที่เคลื่อนที่ แต่เนื่องจากการนำความร้อน (Heat Conductive) ของเทอร์โมพลาสติกมีค่าต่ำมาก

จึงทำให้การเพิ่มความหนาของชั้นแต่ละชั้นเป็นไปอย่างช้าๆ จึงส่งผลให้เวลาในกระบวนการขึ้นรูป (Cycle Time) ในเทคนิคนี้ค่อนข้างนาน จึงสามารถสรุปได้ว่าการหมุนของแม่พิมพ์ช่วยให้พลาสติกสัมผัสกับแม่พิมพ์หรือชั้นของพลาสติกที่ฉาบติดกับผิวของแม่พิมพ์อยู่ก่อนหน้าแล้ว หลังจากพลาสติกหลอมตามรูปร่างของแม่พิมพ์แล้วให้ความร้อนต่ออีกระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้พลาสติกประสานกันเป็นเนื้อเดียวกันทำให้มีผิวที่เรียบมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 การหล่อเย็น (Cooling) หลังจากกระบวนการให้ความร้อนจนครบ อุณหภูมิที่ตั้งไว้สำหรับหลอมพลาสติก ให้ทำการหยุดให้อุณหภูมิและนำออกจากห้องอบ (ในกรณีที่ใช้ห้องอบสำหรับหลอมพลาสติก) นำสู่ห้องหล่อเย็น การหล่อเย็นจะใช้ลมเย็นแก่แม่พิมพ์ แต่เทคนิคใช้การฉีดน้ำเย็นเป็นฝอยหลังจากที่อุณหภูมิลดลงจึงย้ายเข้าสู่ห้องหล่อเย็น

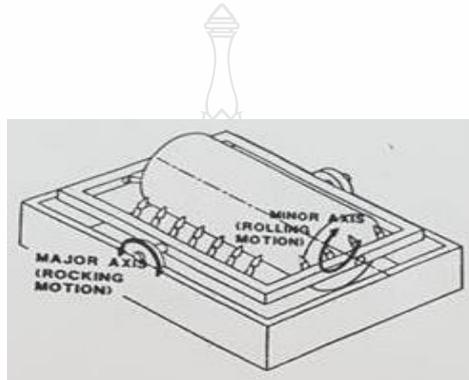
ขั้นตอนที่ 4 การปลดชิ้นงาน (Unloading) หลังจากทำการหล่อเย็นและปล่อยให้แม่พิมพ์เย็นตัวที่อุณหภูมิ 60-80 °C เนื่องจากอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิที่เกิดกิ่งผลึกในระยะเวลาที่ไม่นานเกินไป และทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์จะเห็นว่าการผลิตชิ้นงานโดยเทคนิคนี้ไม่ได้ใช้ความดัน จึงไม่เกิดแรงเค้นและแรงเฉือน ส่งผลทำให้ไม่เกิดแรงเค้นตกค้าง (Residual Stress) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มที่ดี ในส่วนของวัฏจักรการผลิต (Cycle Length) จะขึ้นอยู่กับประเภทของพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการ กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีจุดเด่น นอกจากไม่มีแรงตกค้างยังสามารถกำหนดขนาดความหนาของผนังภายในแม่พิมพ์ที่ใช้งานได้



ภาพที่ 2.22 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Rotational Molding [35]

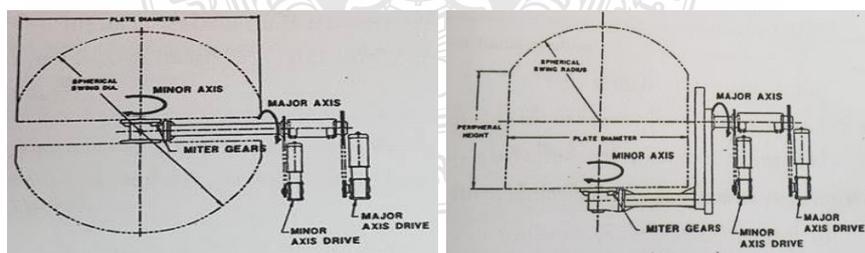
2.10.2 เครื่องขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน (Rotational Molding Machines)

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการที่มีความสำคัญต่อการขึ้นรูป ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ และรอบการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งรอบการหมุนจะหมุนตามแนวแกนตั้งฉาก และแนวแกนราบ ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.23 เป็นเครื่องแบบร็อกแอนด์โรล (Rock and Roll) แม่พิมพ์จะวางอยู่ในแนวราบ มีการหมุนตั้งสองแกน คือจะหมุนในแกนรอง (Minor Axis) และขยับขึ้นลง 45 องศา ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ส่วนแกนหลัก (Major Axis) ถูกหมุนพร้อมทั้งให้ความร้อนในเวลาเดียวกัน



ภาพที่ 2.23 Open Flame Rock and Roll Machines [26]

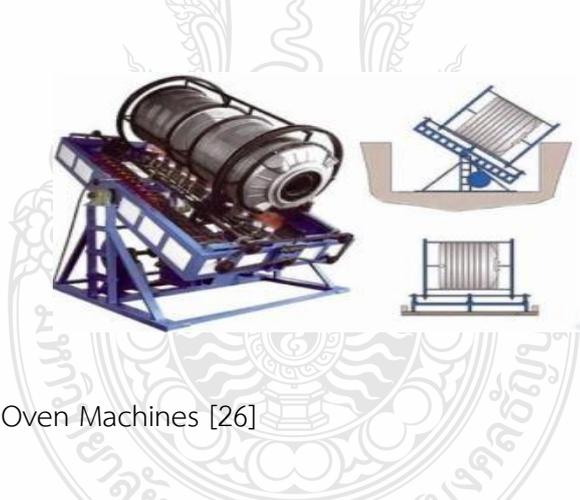
ลักษณะการหมุนที่ใช้ในเครื่อง Rotational Molding นั้นเรียกว่า “ไบแอกเซียลโรเตชัน” (Biaxial Rotation) ซึ่งเป็นการหมุนแบบสองแกน ดังแสดงในภาพที่ 2.24 เป็นลักษณะของแขนจับยึดแม่พิมพ์แบบ Straight Arm เป็นแขนยึดตรงจากตัวเครื่อง แม่พิมพ์จะถูกวางอยู่ด้านบนและด้านล่าง แกนหลังจะถูกหมุนโดยมอเตอร์แต่แกนรองจะถูกหมุนด้วยเฟลา



ภาพที่ 2.24 แสดงแขนแบบ Offset Arm เป็นแบบที่ใช้กับแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับ Straight Arm ที่มีก้ใช้กับแม่พิมพ์ของขึ้นงานขนาดเล็กจำนวนมากหลายแม่พิมพ์ [26]

ปริมาณที่เกิดจากการหมუნของแม่พิมพ์นั้นเรียกว่า “โม่สวิง” (Mold swing) ซึ่ง จะหมუნทั้งแนวแกนราบและแนวแกนตั้งฉากภายในตู้อบ (Oven) หรือตุ้ลตอณหภูมิซึ่งมีปริมาตร เปลี่ยนไปตามขนาดของแม่พิมพ์ ถ้าโม่สวิงมากแชนที่จับก็จะต้องใหญ่ขึ้นตาม เพราะโม่สวิงมากขึ้น แสดงถึงขนาดของแม่พิมพ์ที่ใหญ่และน้ำหนักของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามปริมาตรแม่พิมพ์ โดยปกติเครื่อง จะต้องระบุขนาดที่สามารถรับได้สูงสุด เช่น ตัวมีตัวเลขระบุว่า 2000/95 หมายความว่ารับน้ำหนักได้ 200 lb มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงสวิงเท่ากับ 95 inch โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมจะระบุเครื่องขึ้นรูปแบบ หมุนออกได้เป็น 7 ชนิด

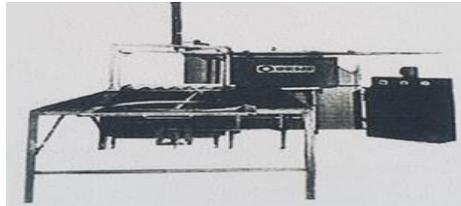
ชนิดที่ 1 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Rock and Roll Machines ดังแสดงในภาพที่ เป็นแบบ Rock and Roll แบบ Rocking Oven Machines มีหลักการทำงานคล้ายกันกับ Open Flam Rock and Roll Machines ต่างกันที่แม่พิมพ์จะถูกให้ความร้อนภายในตู้อบทำให้ลดการสูญเสียพลังงาน ความร้อนลง เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีความเร็ว เช่น Canoes, Kayaks และเสาไฟฟ้า เป็นต้น Rock and Roll Machines มีข้อดีคือ ตั้ยทุนต่ำในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่แต่มีข้อเสียคือ ผลิตได้ช้า และค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากยังต้องอาศัยแรงงานในการ เปิด-ปิด แม่พิมพ์ และระบบอื่น ที่ยังไม่เป็น ระบบอัตโนมัติ



ภาพที่ 2.25 Rocking Oven Machines [26]

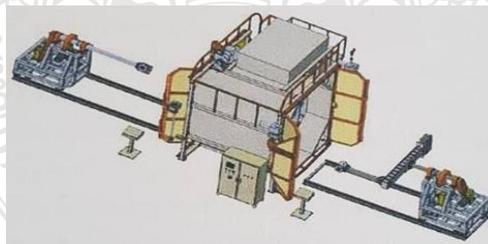
ชนิดที่ 2 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Box Oven Machines ใช้ในการผลิตลูกบอล ตุ้กตาเด็กเล่น และชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งใช้การหมუნทั้ง 2 แชนในตู้อบที่ใช้แก๊ส หรือน้ำมันในการเผาเพื่อทำ ให้เกิดความร้อน มีส่วนการหล่อเย็น อย่งง่าย โดยชิ้นงานจะเคลื่อนตัวออกจากตู้อบ หลังจากนั้นจะถูก ลดอุณหภูมิโดยใช้น้ำ หรืออากาศจากนั้นจะถูกยกวางลงบนลูกกลิ้งและเลื่อนออกมาจนถึงบริเวณเติม วัสดุ (Loading) การนำชิ้นงานออก (Unloading) ก็จะถูกเปิดแม่พิมพ์เพื่อนำชิ้นงานออกแล้วเติมวัสดุลง ไปใหม่ เนื่องจากต้องอาศัยแรงงานในหลายขั้นตอนตั้งแต่การ เปิด-ปิด แม่พิมพ์ การนำแม่พิมพ์ออกจาก

ตู้อบการนำแม่พิมพ์หล่อเย็นทำให้เครื่องล้าสมัย และถูกแทนด้วยเครื่องในลักษณะอื่น ดังแสดงในภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 Box Oven Machines [26]

ชนิดที่ 3 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle-Style Machines เป็นเครื่องที่ใช้งานง่าย ราคาไม่สูงมาก มักใช้ในการผลิตชิ้นงานจำพวกถังหรือภาชนะบรรจุขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 2.27 เครื่องลักษณะมีหลักการทำงานดังนี้ Shuttle A จะเคลื่อนที่สู่ตู้อบ เมื่อตู้อบปิดแม่พิมพ์จะถูกหมุนพร้อมทั้งให้ความร้อนจนถึงเวลาที่ตั้งไว้ แล้วจึงเคลื่อนที่ออกจากตู้อบสู่กระบวนการหล่อเย็น ในขณะที่ Shuttle B ที่ได้รับการบรรจุวัสดุจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตู้อบแทนระบบ Shuttle A เครื่องแบบนี้มีข้อดีคือให้ความประหยัดในการผลิตทั้งชิ้นงานใหญ่และชิ้นงานเล็กบำรุงรักษาง่าย ค่าใช้จ่ายสำหรับเครื่องจักรไม่สูง ง่ายต่อกระบวนการออกแบบ การจัดวางพื้นที่ติดตั้งเครื่องจักรไม่มาก ใน 1 แขนสามารถวางแม่พิมพ์ได้มากกว่า 1 แม่พิมพ์ ในตู้อบเดียวเพื่อเพิ่มปริมาณการผลิต



ภาพที่ 2.27 Shuttle-Style Machines Concept [25]

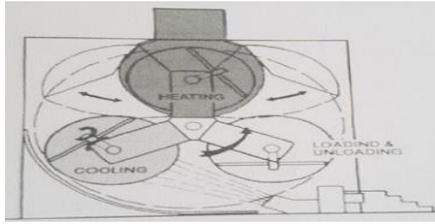
ชนิดที่ 4 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Clamshell Rotational Molding Machines เป็นเครื่องจักรที่ถูกพัฒนาในปี ค.ศ. 1980 ด้วยความต้องการเครื่องที่มีราคาต่ำใช้พื้นที่ติดตั้งเครื่องน้อย รวมไปถึงต้องการแรงงานมนุษย์น้อยได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงลักษณะการทำงานของเครื่องคือ แม่พิมพ์จะถูกให้ความร้อนในตู้อบจนได้เวลาที่ตั้ง หลังจากนั้นพดลมทำงานเป่าแม่พิมพ์เพื่อหล่อเย็น หรืออาจจะ

ใช้น้ำช่วยในเรื่องระบบหล่อเย็นโดยที่แม่พิมพ์ยังคงอยู่ในตู้อบสามารถใช้แขนได้ทั้งสองแบบ ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และเล็กขึ้นอยู่กับขนาดของตู้อบ ข้อดี ในส่วนให้ความร้อนและส่วนที่ทำการหล่อเย็นอยู่ในที่เดียวกันจึงทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งเครื่องจักรน้อย ข้อเสีย ค่อนข้างใช้พลังงานมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงจากนั้นก็ลดอุณหภูมิในห้องหลอมเหลวจนถึงอุณหภูมิหล่อเย็นและยังต้องเพิ่มอุณหภูมิใหม่สำหรับกระบวนการผลิตถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 2.28

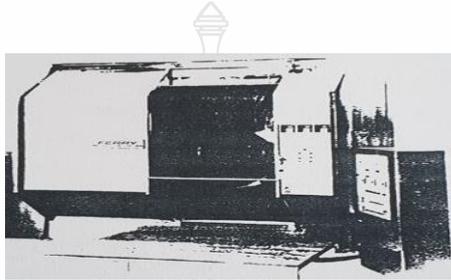


ภาพที่ 2.28 Clamshell Rotational Molding Machines [25]

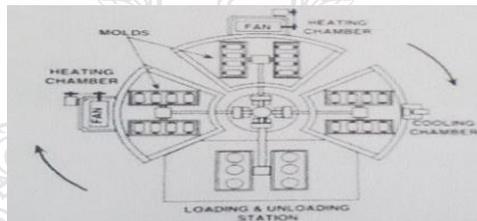
ชนิดที่ 5 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Vertical Style Machines แบ่งออกเป็นแบบ 3 แขน และ 6 แขน ทั้งสองแบบมักใช้ผลิตตุ๊กตา ของเล่น ลูกบอล ชิ้นส่วนรถยนต์ แบบ 6 แขนเหมาะสำหรับใช้กับไวนิลพลาสติก เพราะเป็นกระบวนการที่ต้องการอุณหภูมิที่ไม่สูงมากในตอนเริ่มแรก วัสดุจะไหลสัมผัสผิวในแม่พิมพ์จากนั้นจะเริ่มกลายเป็นเจล (Gel) และคงอุณหภูมิเพื่อทำการ Curing ไว้จึงจำเป็นต้องใช้หลายสถานีสำหรับกระบวนการนี้ มีข้อดีคล้ายกับ Clamshell คือต้องการพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องจักรน้อยที่แตกต่าง คือ ระบบ Vertical จะแยกส่วนเติมวัสดุและส่วนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ตู้อบและห้องหล่อเย็นจะแยกออกจากกัน การหมุนของแต่ละแขนจะใช้ระบบที่เรียกว่า แฟริสวีล (Ferris Wheel) ในแบบ 3 แขน แต่ละแขนจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนต่อไปพร้อมกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.29 เมื่อแม่พิมพ์แรกเคลื่อนจากส่วนเติมวัสดุและส่วนที่นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ไปยังตู้อบ แม่พิมพ์ที่ 3 ก็จะเคลื่อนจากส่วนหล่อเย็นมายังส่วนเติมวัสดุ และส่วนที่นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แต่ในแบบ 6 แขน จะมีการทำงานเพียง 3 จังหวะ ดังแสดงในภาพที่ 2.30 เนื่องจากมีตู้อบ 3 ห้อง และแต่ละห้องก็ใช้เวลาไม่เท่ากันตามที่กล่าวมาในข้างต้น ชีตจำกัดทั้ง 2 แบบต่างก็จะหมุนแม่พิมพ์ทั้ง 2 แขนเหมือนกัน และให้ความร้อนด้วยการเผาแก๊สให้อากาศร้อนในตู้อบ ส่วนการหล่อเย็นสามารถใช้ได้ทั้งแรงลมแรงน้ำ



ภาพที่ 2.29 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน 3-Arm Vertical Machines [26]



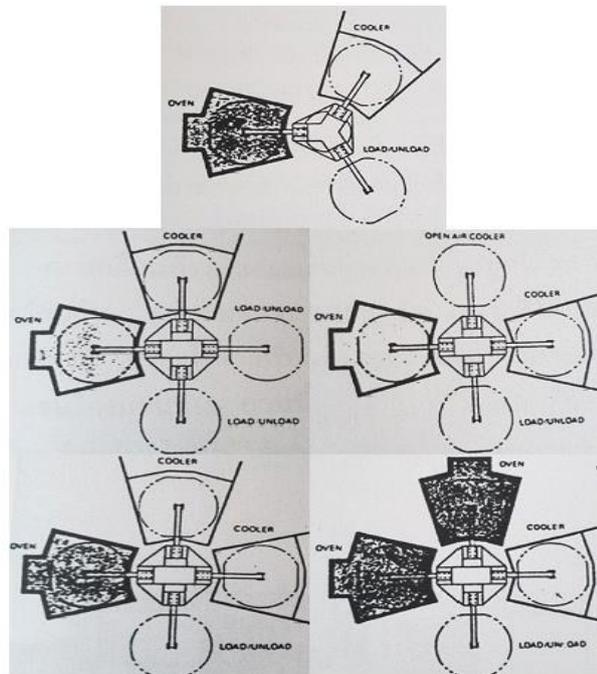
ภาพที่ 2.30 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน 6-Arm Vertical Machines [26]



ภาพที่ 2.31 การทำงานเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน 6-Arm Vertical Machines : Cycle Diagram [26]

ชนิดที่ 6 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Fixed-Arm Turret Machines เป็นเครื่องที่ได้รับการคิดค้นในช่วงปลายทศวรรษที่ 50 จนถึงต้นทศวรรษที่ 60 มีขนาดเครื่องที่เล็กที่สุดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางในการหมุน 40 นิ้ว ใหญ่ที่สุดมีขนาด 150 นิ้ว เป็นเครื่องที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน และการบำรุงรักษาสะดวก มีหลายหลายแบบเช่นแบบ 3 แขนและ 4 แขน เป็นต้น แต่ละแขนจะติดอยู่กับ Torrent ตรงกลางโดนแต่ละแขนทำมุม 120 องศา จึงอาจมีปัญหา เช่นต้องใช้เวลา การให้ความร้อนและการหล่อเย็นไม่เท่ากัน เป็นต้น สามารถแก้ไขได้ด้วยเครื่องแบบ 4 แขน ทำให้สามารถเพิ่มส่วนหลอมเหลวได้ 1 ห้อง โดยอาจเป็นส่วนให้ความร้อน หรือการหล่อเย็นตามความเหมาะสม โดยในแต่ละแขนจะทำมุม 90 องศา สำหรับภายในแม่พิมพ์ ก็อาจบรรจุแก๊สเฉื่อย เพื่อให้ค่าความดันต่ำ ป้องกันการหดตัวของพลาสติกภายในแม่พิมพ์หรือเติมไนโตรเจนเพื่อไล่ออกซิเจน ซึ่งมีผลกระทบต่ออุณหภูมิ

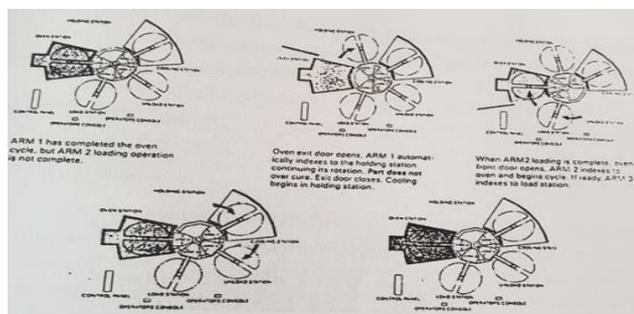
ทางการภาพของชิ้นงาน การหมุนกลับของแม่พิมพ์ภายในตู้อบก็สามารถช่วยให้ผงวัตถุดิบไหลได้ดีขึ้น ภายในแม่พิมพ์ที่มีส่วนซับซ้อนมาก ซึ่งลักษณะการทำงานของกระบวนการนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 ลักษณะการทำงานของเครื่องแบบ Fixed-Arm Turret [26]

ชนิดที่ 7 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด The Independent-Arm Machines เป็นเครื่อง ที่ได้รับความนิยมในช่วงปี ค.ศ. เป็นต้นมาและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เครื่อง Independent-Arm เป็นการนำข้อดีของเครื่องแบบ Shuttle และเครื่อง Fixed-Arm Turret มีความเป็นอัตโนมัติมากกว่าและมีความสะดวกในการใช้ในกระบวนการผลิต โดยชนิดของสถานที่ใช้ในกระบวนการ สามารถจัดได้เป็นหลายแบบ เช่น อาจจะใช้ 2 ตู้อบ 2 การหล่อเย็น และ 1 ในส่วนเติมวัสดุและส่วนนำ ชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เป็นต้น โดยจะดูจากความเหมาะสมในกระบวนการผลิตส่วนประกอบของเครื่อง จะมีส่วนขับเคลื่อนอยู่ตรงกลางแต่ละแขนจะวางขนานพื้นยื่นออกจากส่วนขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ของแต่ละ แขนจะเป็นอิสระต่อกัน คือไม่จำเป็นต้องเคลื่อนไปพร้อมกัน แต่ละแขนจะเคลื่อนไปตามสถานี ต่างๆ ตามที่ได้รับคำสั่งเวลาหรือวางโปรแกรมไว้ ซึ่งแตกต่างจากเครื่อง Fixed-Arm Turret เพราะมี เสาค้ำรับน้ำหนักเฉพาะแขนส่วนที่เหมือนกับ Shuttle ก็คือมีการใช้ตู้อบ การหล่อเย็นร่วมกันโดนให้ได้ ผลผลิตต่อเวลาที่ดีที่สุดและสามารถรับแรงสูงสุดได้มากกว่า Fixed-Arm จึงสามารถผลิตชิ้นงานที่มี

ขนาดใหญ่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.33 เป็นการทำงานของเครื่อง Rotational Molding แบบ Independent-Arm ชนิด 4 แขน 5 สถานี



ภาพที่ 2.33 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Rotational Molding แบบ Independent-Arm ชนิด 3 แขน 5 สถานี [26]

2.10.3 ระบบความร้อนและหล่อเย็น (Cooling)

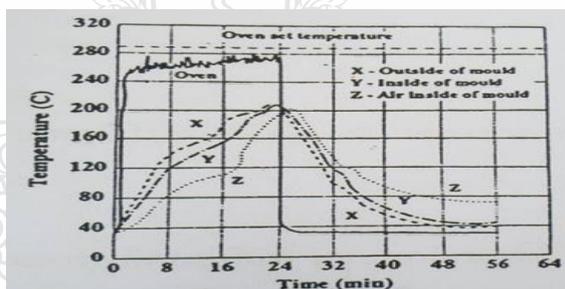
แหล่งความร้อนของการขึ้นรูปแบบหมุน คือ การเผาก๊าซหุงต้มหรือบางกรณีอาจจะใช้น้ำมันเตาภายในเตาอบ นอกจากนี้ยังมีระบบที่ทำให้เกิดการพาความร้อน (Convection) การนำหัวเผาไปยังผนังของแม่พิมพ์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปอุณหภูมิในเตาอบอยู่ในช่วง 220-400 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดที่เตาอบสามารถให้ได้คือ 480 องศาเซลเซียส ในกระบวนการขึ้นรูปบางกระบวนการมีการใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อนระบบหล่อเย็นใช้พัดลมเป่า (Blower) เพื่อพัดลมเย็นหรือใช้หัวฉีดสเปรย์เพื่อฉีดพ่นน้ำเย็นให้เป็นละอองเล็กๆ ในการหล่อเย็นพลาสติกกลุ่มกึ่งผลึก (Semi-Crystalline Plastics) ต้องมีการระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากสมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงได้จากอัตราการหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

2.10.4 แม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนี้โดยทั่วไปจะใช้แม่พิมพ์แบบสองชิ้นซึ่งจะมีระบบการหล่ออยู่ติดกับแม่พิมพ์ คุณสมบัติที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์คือจะส่งเกิดการส่งผ่านความร้อนได้ดี และมีน้ำหนักเบาเพื่อความสะดวกในการหมุน เนื่องจากความดันภายในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นต่ำทำให้การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ไม่จำเป็นต้องการเสริมแรงมาก วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ถ้าเป็นแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่มักจะทำจากเหล็กหรืออลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Sheet) ความหนาของวัสดุที่นำมาใช้ทำแม่พิมพ์อยู่ในช่วง 2-3 มิลลิเมตร นอกจากนี้จะใช้กรอบเสริมแรงเพื่อยึดแม่พิมพ์ตั้งของส่วนเข้าด้วยกัน

2.10.5 หลักการควบคุมการผลิต

การตั้งอุณหภูมิไว้หลายตำแหน่งในแม่พิมพ์ เช่นเครื่อง Rotational Molding แบบคารูเซล (Carousel) จะได้กราฟ ดังแสดงในภาพที่ 2.34 ในกรณีตั้งอุณหภูมิเตาไว้ที่ 300 °C กราฟเส้นบนแสดงเส้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของอากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์เมื่อแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าสู่ในเตาแล้วเส้นกราฟอุณหภูมิจะสูงขึ้นและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตาที่บอกทางหน้าตัวเครื่องสมรรถภาพทางความร้อนและเวลาที่ใช้ในเตาอบเครื่อง Rotational Molding สมัยใหม่ใช้อุณหภูมิอากาศภายในเตาอบเป็นตัวควบคุมผลกลับมา (Feedback) อย่างไรก็ตามเส้นอุณหภูมิเส้นนี้แสดงความสัมพันธ์โดยประมาณกับอุณหภูมิของแม่พิมพ์หรืออาจจะแสดงให้เห็นโดยเส้น X,Y และ Z อุณหภูมิสุดท้ายจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิภายในเตาเผาหรืออุณหภูมิที่ตั้งไว้ แต่จะขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้และประเภทที่ใช้ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของแม่พิมพ์ วัสดุ และความหนา ด้วยเหตุนี้ผลที่ได้จึงไม่เป็นจริงตามที่ตั้งสมมุติฐานเพื่อให้เป็นไปตามพื้นฐานของกระบวนการผลิต เมื่อพิจารณาเฉพาะเส้น Z อาจเขียนออกมาใน ภาพที่ 2.35 จากรูปแสดงขั้นตอนต่างๆเกี่ยวกับการหลอมเหลวของพลาสติกที่ปกคลุมผิวชั้นในแม่พิมพ์ [32]



ภาพที่ 2.34 แสดงการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบ และแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน [27]

2.10.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอากาศขณะให้ความร้อนกับเวลาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 เริ่มต้นพอลิเมอร์จะยังไม่เกิดการหลอมเหลวเนื่องจากยังไม่มีอุณหภูมิหลอมเหลว การไหลของพลาสติกเป็นไปอย่างอิสระภายในแม่พิมพ์จนอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นคงที่อย่างรวดเร็วจนถึงที่จุด A ซึ่งขณะนี้อุณหภูมิจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยผงพลาสติก และอากาศ เมื่อเกิดความร้อนเพียงพอผงพลาสติกจะเริ่มหลอม และเกาะที่ผนังแม่พิมพ์

ขั้นที่ 2 ที่จุด A พลาสติกหลอมเหลวจะเกิดการเกาะติดแม่พิมพ์เป็นชั้นแรกอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะช้าลงจากนั้นผงพลาสติกจะก่อตัวเป็นขั้นที่ 2 และขั้นต่อไปเนื่องจากผงพลาสติกจะ

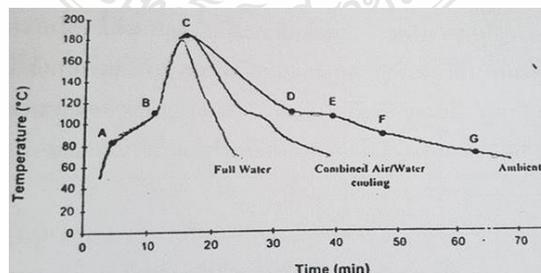
ดึงความร้อนเพื่อใช้ในการหลอมละลายทำให้อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ลดลง การที่ความร้อนเคลื่อนที่เข้า เพราะเนื่องจากพลาสติกมีสมบัติในการนำความร้อนต่ำ

ขั้นที่ 3 ที่จุดผง B ผงพลาสติกทั้งหมดที่ถูกหลอมละลายจะเกาะติดผิวชั้นในของแม่พิมพ์เป็นชั้นๆ อุณหภูมิภายในจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งพลังงานความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์จะลดลง หลังจากผ่านจุด B ไปแล้วเส้นอุณหภูมิก็ยิ่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พลาสติกที่หลอมเหลวอยู่จะเริ่มแข็งตัว และฟองอากาศที่อยู่ระหว่างผงพลาสติกด้วยกันเองลดลง ผิวชั้นในเริ่มเรียบ และมีความหนาแน่นสูงซึ่งอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์จะมีค่าสูงสุดที่จุด C ซึ่งที่จุดนี้สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของชิ้นงานโดยอาจจะทดสอบด้วยวิธีการทดสอบการต้านแรงกระแทก

ขั้นที่ 4 แม่พิมพ์จะเคลื่อนที่เข้าไปในห้องหล่อเย็น ซึ่งอุณหภูมิอากาศภายในยังคงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนก่อนถึงจุด C เนื่องจากความร้อนของอากาศและพอลิเมอร์ยังมีเหลืออยู่ ภายในห้องจะทำการหล่อเย็นให้เหมาะสม อากาศรอบๆแม่พิมพ์เริ่มเย็นตัวลง รวมทั้งการหล่อเย็นด้วยน้ำจะเร็วขึ้น ถ้าอัตราการหล่อเย็นเร็วเกินไปจะทำให้พลาสติกเกิดการบิดตัว (Warpage Problems) ถ้าเย็นตัวช้าจะส่งผลกระทบต่อเวลาในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นผลลบในแง่ของทางเศรษฐศาสตร์ ในขั้นนี้พลาสติกยังหลอมเหลวเป็นชั้น เกาะที่ผนังแม่พิมพ์

ขั้นที่ 5 วัสดุบางชนิด เช่น พอลิเอทิลีนจะมีจุดหักมุม (Kink) เป็นจุดที่ทำให้เกิดผลึกตรงกับจุด D ความร้อนที่ถูกดูดกลืนจะถูกถ่ายเทออกและอุณหภูมิภายในจะอยู่ในระดับคงที่ความยาวของเส้นกราฟแนวราบ D-E ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัสดุที่ใช้ พอลิเอทิลีนแสดงจุดหักมุมที่เกิดขึ้นบนตำแหน่งของเส้นกราฟที่สัมพันธ์กับการหลอมเหลวระหว่างจุด A-B ซึ่งพลาสติกเกาะกันลดลงเนื่องจากความร้อนทำร้ายความเป็นผลึกเนื่องจากการเกิดผลึกได้จะต้องใช้อุณหภูมิต่ำ

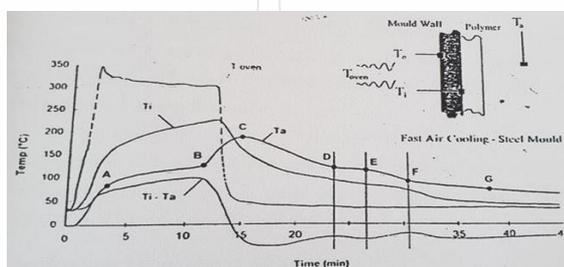
ขั้นที่ 6 ที่จุด E เส้นกราฟมีการแปรผันพลาสติกก่อตัวกันสร้างพันธะและกลายเป็นของแข็งโดยความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์ออกทำให้พลาสติกเริ่มเย็นตัว และความชันของเส้นกราฟเปลี่ยนไป ณ ที่จุด F พันธะระหว่างพลาสติกจะจับตัวกันเอง ดังแสดงในภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.35 แสดงอุณหภูมิโปรไฟล์ (Profile) ของอากาศขณะให้ความร้อน [27]

2.10.7 การหล่อเย็นแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ก็จะหมุนพร้อมไปด้วยอัตราการหล่อเย็นมากหรือน้อยจะบ่งบอกถึงคุณภาพชิ้นงานในขั้นตอนสุดท้าย แต่ถ้าส่วนต่างๆ ภายในแม่พิมพ์เกิดแยกกันการหล่อเย็นเร็วก็จะเกิดได้ยากที่สุดที่จุด G เป็นจุดนำชิ้นงานออก (De-Molding Point) ซึ่งขนาดอุณหภูมิอากาศในโพรไฟล์จะไม่เปลี่ยนแปลง ขณะผ่านสภาวะต่างๆ หลายแบบประกอบด้วยวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ขนาดแม่พิมพ์ ความหนาของแม่พิมพ์ ความหนาส่วนอื่นๆ และอุณหภูมิเตาอบ ลักษณะเด่นที่คล้ายกันก็คือตำแหน่งต่างๆ ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะซึ่งต้องใช้การควบคุมอย่างชำนาญและแน่นอนโดยอุปกรณ์ที่ใช้วัดโดยทั่วไปคือโรโตล็อก (Rotolog) แสดงดังภาพที่ 2.36



ภาพที่ 2.36 แสดงอุณหภูมิอากาศภายในและอุณหภูมิแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน [27]

2.10.8 การไหลของพอลิเมอร์ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ลักษณะการไหลของพอลิเมอร์นั้นสามารถเริ่มต้นอธิบายได้จากขั้นตอนที่ได้ทำการเติมผงพลาสติกลงในแม่พิมพ์ ซึ่งในตอนนี้ผงพลาสติกจะไหลเคลื่อนที่ลงไปสู่ก้นแม่พิมพ์อย่างอิสระ จากนั้นทำการปิดลอคแม่พิมพ์แล้วนำเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปโดยให้ความร้อนทั้งสองทิศทาง คือ แกนตั้งและแกนนอน ก็จะทำให้ความร้อนเริ่มแพร่เข้าสู่ส่วนด้านในของแม่พิมพ์ ซึ่งในขั้นตอนนี้ผงพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์จะได้รับความร้อนและจะเริ่มหลอมเหลวคล้ายของเหลวหนืดภายในแม่พิมพ์ตามการหมุนของแม่พิมพ์ในสองทิศทางพร้อมไหลสัมผัสไปตามรูปร่างหรือรูปทรงของแม่พิมพ์และเกิดการเกาะเคลือบผิวดแม่พิมพ์เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นผงพลาสติกที่เหลืออยู่จะหลอมเหลวและไหลไปตามลักษณะการหมุน รูปร่างของแม่พิมพ์อยู่ที่มีความหนาเพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าการหมุนของแม่พิมพ์ในสองทิศทางจะมีผลต่อความสม่ำเสมอของความหนาของพลาสติกที่เคลือบแม่พิมพ์ รวมทั้งชิ้นงานที่ได้ เพราะว่าการหมุนของแม่พิมพ์ในสองทิศทางนั้นจะส่งผลให้พลาสติกหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนเกิดการกระจายตัว และเกาะเคลือบทั่วแม่พิมพ์ หลังจากพลาสติกหลอมเหลวผ่านขั้นตอนการหล่อเย็น พลาสติกหลอมเหลวนั้นจะเกิดการแข็งตัวตามชั้นที่เคลือบอยู่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตามรูปร่างของแม่พิมพ์

2.10.9 ผลผลิตของการขึ้นรูปแบบหมุน

ผลผลิตจากการขึ้นรูปแบบหมุนนี้เป็นชิ้นงานกลวงที่มีความหนาของผนังค่อนข้างคงที่ในช่วง 3-6 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งมุมและเหลี่ยมของชิ้นงานค่อนข้างหนากว่าส่วนอื่นเล็กน้อย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความร้อนสูงซึ่งผลผลิตที่ได้จากการผลิตด้วยเทคนิคนี้ ได้แก่ถังบรรจุขนาดใหญ่ต่างๆ ของเด็กเล่น เป็นต้น

นอกจากนี้เทคนิคนี้เหมาะสมกับการผลิตชิ้นงานขนาดเล็กที่เป็นแม่พิมพ์แบบหลายช่อง (Multi-Cavity Mold) ตัวอย่างของผลผลิตจากเทคนิคการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน เช่น ถัง (Bin) รถขนของ (Tote Trucks) ท่อ (Pipes and Duct) ถึงขนาดใหญ่ (สำหรับบรรจุน้ำมันเชื้อเพลิงเก็บสารเคมีถึงส้วม) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.37 ผลผลิตของการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน [28]

2.10.10 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบหมุนนี้จะมีข้อดีคือ เครื่องขึ้นรูปและแม่พิมพ์มีราคาต่ำเหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลผลิตขนาดใหญ่ลักษณะชิ้นงานที่ได้มีความหนาสม่ำเสมอและชิ้นงานเป็นชิ้นเดียวกันจึงทำให้ไม่เกิดรอยเชื่อม (Weld Lines) หรือรอยดำหนิ เนื่องจากการถอดชิ้นงาน (Ejection Marks) รวมทั้งข้อเสียจากกระบวนการผลิตน้อยสามารถควบคุมขนาดของความหนาได้จากการคำนวณปริมาตรวัสดุที่ใส่ลงไปแม่พิมพ์สามารถเปลี่ยนแม่พิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปได้เร็วกว่ากระบวนการอื่น ด้านข้อเสีย ของกระบวนการขึ้นรูปคือ ไม่เหมาะแก่การผลิตชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า 0.75 mm หรือโครงสร้างของแม่พิมพ์มีลักษณะซับซ้อนเกินไปและการที่แม่พิมพ์มีรูปร่างการหักมุม (Sharp-Cornered-Shapes) มากเกินไป ใช้เวลาในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ช้าถ้าเปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่าและใช้เวลาช้าในการผลิตชิ้นงานขนาดเล็ก

ช้ากว่าเทคนิคการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์มาก ไม่สามารถทำการขึ้นรูปแบบหมุนได้กับพลาสติกทุกชนิด [29]

2.11 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composite)

2.10.1 พอลิเมอร์คอมโพสิตหรือพอลิเมอร์ผสม

คือการนำวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมรวมกันเพื่อช่วยสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ จึงเป็นที่นิยมมากกว่าการสังเคราะห์พอลิเมอร์ใหม่ เช่น ใช้เวลาในการผลิตต่ำ ราคาถูกกว่าสังเคราะห์พอลิเมอร์ อีกทั้งยังทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย เช่น การทำให้พอลิสไตรีนมีความเหนียว ไม่เปราะแตกง่าย โดยนำพอลิสไตรีนไปผสมกับยางจึงเรียกว่า (HIPS ; High Impact Polystyrene) การนำวัสดุมารวมกันจำเป็นต้องทราบถึงองค์ประกอบของวัสดุที่จะนำมาผสมกันด้วย เช่น โครงสร้าง สมบัติของวัสดุ และความเข้ากันได้ของวัสดุแต่ละชนิด หากพอลิเมอร์ที่นำมาไม่สามารถเข้ากันได้ดี จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ต่ำลง

การผสมพอลิเมอร์ประกอบด้วย 2 เฟสคือ เมทริกซ์เฟส และดิสเพอร์สเฟส ซึ่งเมทริกซ์เฟสคือ เฟสที่ส่งผลเป็นหน้าที่หลัก และเฟสที่ 2 คือ ดิสเพอร์สเฟส คือวัสดุที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์โดยอาจจะอยู่ในลักษณะรูปร่างต่างๆ เช่นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน พอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งพอลิสไตรีนทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์เฟส และพอลิบิวตะไดอินทำหน้าที่เป็นดิสเพอร์สเฟส ทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะลดลงเพราะอนุภาคของดิสเพอร์สเฟสไปช่วยในด้านการรับแรงกระแทกเพราะมีความอ่อนนุ่มมากกว่า เป็นต้น การผสมพอลิเมอร์ผสมจะถูกแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

ประเภทที่ 1 การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง (Reactive Blending) การผสมลักษณะนี้จะต้องมีหมู่ฟังก์ชันเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิเมอร์หรือวัสดุที่ต่างชนิดกันส่งผลให้เกิดโครงสร้างพันธะทางเคมี

ประเภทที่ 2 การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง (Non-Reactive Blending) ซึ่งในการผสมนี้ทำได้ง่ายและไม่ยุ่งยากเหมือนประเภทที่ 1 ไม่ต้องคำนึงถึงหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ซึ่งมีเครื่องมือต่างๆสำหรับการผสม เช่น เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) และเครื่องอัดรีด (Extruder) ซึ่งจำเป็นต้องให้พอลิเมอร์กระจายตัวได้ดีส่งผลต่อประสิทธิภาพการผสมอาจเรียกว่าเป็นการผสมเชิงกล โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงการผสมประเภทนี้คือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด พอลิเมอร์เชิงการค้าบางชนิดมีความเข้ากันได้สูงและบางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากมีสายโซ่โมเลกุลและความมีขั้วที่แตกต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์ที่ผสมกันนั้นไม่สามารถเข้ากันได้

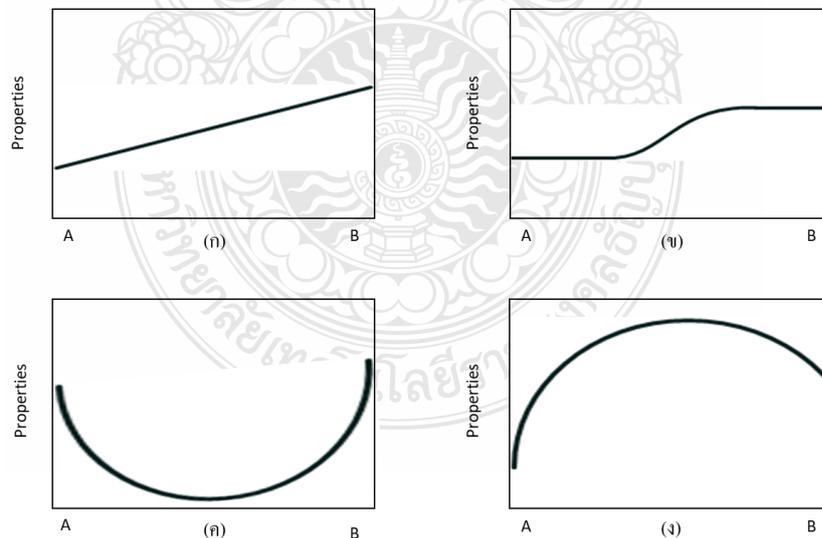
อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้พลังงานของพอลิเมอร์แต่ละชนิดยังเป็นปัจจัยสำหรับความเข้ากันอีกด้วยเช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

2.11.2 กลไกความเข้ากันได้

พอลิเมอร์เมื่อนำมาผสมกันจะเกิดสมบัติเชิงกลที่มีแนวโน้มต่ำลง เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคที่เป็นดิสเพอร์สเฟสและเมทริกซ์มีค่าที่ต่ำ (Interfacial adhesion) ผลลัพธ์ที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ เปราะ และขาดง่าย ทำให้ไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นหากจำเป็นต้องใช้พอลิเมอร์ผสมควรจะต้องเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) หรือสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างการผสม (In-Situ Chemical Reaction) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความเข้ากันของพอลิเมอร์และจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับสมบัติขององค์ประกอบในพอลิเมอร์ สันฐานวิทยาระหว่างเฟสและแรงดึงดูดระหว่างผิว

2.11.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม

อัตราส่วนผสมเป็นปัจจัยหลักสำหรับสมบัติของพอลิเมอร์ และคุณสมบัติเฉพาะเช่น ลักษณะคล้ายแก้ว ยาง หรือพอลิเมอร์กึ่งผลึก สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการผสม การจัดเรียงโมเลกุล การผสมที่สมบูรณ์จะแสดงลักษณะสันฐานวิทยาเพียงเฟสเดียว ซึ่งเป็นการง่ายที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 2.38

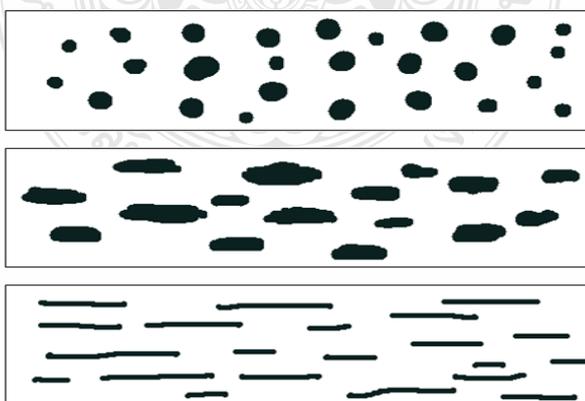


ภาพที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม

ในระบบการผสมที่พอลิเมอร์สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์อัตราส่วนผสมกับสมบัติของพอลิเมอร์มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่มเติม ดังแสดงในภาพที่ (ก) สำหรับการผสมส่วนมากต้องการผสมที่เข้ากันได้บางส่วน (Semi Compatible) เพื่อให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายภายในเมทริกซ์เฟสซึ่งแต่ละเฟสจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันเมื่อทำค่าไปสร้างกราฟจะได้กราฟที่มีรูปตัวเอส ดังแสดงในภาพที่ (ข) โดยที่พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์เฟสจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลักและแสดงสมบัติของชิ้นงาน สำหรับกราฟที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงถึงผลของดิสเพอร์สเฟสหรือพอลิเมอร์ผสม สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความเข้ากันน้อยมากจะเกิดการแยกเฟสเกิดขึ้น โดยดิสเพอร์สเฟสจะมีขนาดอนุภาคที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ในระหว่างเฟสจะเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆหรือไม่มีเลยก็ได้ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ทำให้ไม่นิยมนำไปใช้งานและจะได้กราฟอัตราส่วนรูปตัวยู ดังแสดงในภาพที่ (ค) ส่วนระบบสุดท้ายจะพบได้น้อยโดยการผสมจะปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่าระบบอื่นคือ สมบัติที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่าหรือมากกว่าสมบัติเดิมของพอลิเมอร์ที่ถูกผสม ดังแสดงในภาพที่ (ง)

2.11.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

สัณฐานวิทยาอาจมีลักษณะของดิสเพอร์สเฟสกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ซึ่งลักษณะของดิสเพอร์สเฟสจะมีลักษณะเป็นแผ่น ทรงกลม หรือเส้นใน ดังแสดงในภาพที่ 2.39 ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างการผสมของพอลิเมอร์และอัตราส่วนที่ใช้งาน ความหนืด แรงตึงผิว และภาวะหรือวิธีของการผสม ขนาดของดิสเพอร์สเฟสจะถูกควบคุมด้วยการแตกตัวและการกระจาย ของดิสเพอร์สเฟส (Drop Breakout) และการรวมกลุ่ม (Coalescence) ของดิสเพอร์สเฟส สำหรับการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการผสมแรงตึงผิวและผิวสัมผัส ลักษณะการไหลของแต่ละองค์ประกอบ



ภาพที่ 2.39 ลักษณะของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ผสม

ในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้าด้วยกัน ในส่วนมากพอลิเมอร์จะแยกเป็น 2 เฟสและไม่หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในการผสมสมบัติการไหลและภาวะหรือกระบวนการของการผสม

2.11.5 ความสามารถในการกระจายตัว

ความสามารถสำหรับการกระจายตัวขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของวัสดุ รูปร่าง พื้นผิว ลักษณะทางเคมี และกระบวนการผลิต เช่น ลักษณะของเคมีของฟิลเลอร์คือความแข็งแรงและลักษณะพิเศษของพันธะ พื้นผิว ที่มีความแตกต่างกัน ส่วนสมบัติเชิงกลและกายภาพลักษณะของฟิลเลอร์จะเป็นตัวกำหนดแนวโน้มในการจับรวมเป็นกลุ่มก้อน

ในส่วนของคุณาตอนุภาคส่งผลต่อการกระจายของฟิลเลอร์ พื้นผิวของฟิลเลอร์ที่มีอนุภาคใหญ่กว่า 1 ไมครอนจะมีแรงผลักรวมตัวกันเป็นก้อนน้อยและค่อนข้างอ่อน สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่า 1 ไมครอน จะยิ่งเข้าใกล้สถานะคอลลอยด์และมีแนวโน้มในการเกาะกลุ่มกันเอง จำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อป้องกันการรวมตัวกัน สำหรับกระบวนการที่มีการเติมฟิลเลอร์มีผลต่อการกระจายตัวในผลิตภัณฑ์ เทคนิคที่นิยมใช้ คือ การเคลือบผิวเพื่อเปลี่ยนลักษณะทางเคมีที่ผิว และลดแรงดึงดูดที่เกิดระหว่างอนุภาคกับอนุภาค หรือลดแรงที่จะทำให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน

2.12 การทดสอบสมบัติเชิงกล

2.11.1 การทดสอบแรงกดอัด (Compression) ซึ่งจะแสดงลักษณะของคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัดในสภาพนี้ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับสมบัติความแข็งแรง และการยึดติด (Adhesion) ของเนื้อพอลิเมอร์เป็นหลักเนื่องจากพอลิเมอร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงให้อยู่ในลักษณะเส้นตรงและป้องกันไม่ให้เกิดการโค้งงอของวัสดุจะเกิดการเสียรูป ดังแสดงในภาพที่ 2.40



ภาพที่ 2.40 เครื่องทดสอบแรงกดอัด

2.11.2 การทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test) การทดสอบการกดทะลุตามมาตรฐาน ASTM D3787 เป็นการทดสอบแรงที่ทะลุมาที่ผิวพลาสติกเพื่อวัดความแข็งของผิวพลาสติก หรือฟิล์ม โดยชิ้นงานทดสอบนี้จะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร หรือทรงกลมตามมาตรฐาน ASTM D3787 เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ เช่น ความแข็งแรง ความทนทาน ความเหนียว และการดูดซับพลังงาน ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ 4.4 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้ตามมาตรฐาน ASTM D3787 ระบุว่าชิ้นงานต้องถูกยึดระหว่างแผ่นกดสองแผ่นของฟิกซ์เจอร์ที่มีการให้แรงกดที่สม่ำเสมอบนชิ้นงานเพื่อป้องกันการเลื่อนของชิ้นงานในระหว่างการทดสอบพลังงานที่ใช้สำหรับการทดสอบจะต้องมีค่าสูงพอที่ความเร็วจะไม่ลดลงมากกว่า 20 % เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้นของการทดสอบจนถึงค่าแรงสูงสุด นอกจากนี้มีการระบุว่าหากพลังงานที่ใช้ในการทดสอบมีค่าอย่างต่ำ 3 ค่าสูงกว่าค่าพลังงานที่จุดของแรงสูงสุดจะส่งผลให้ความเร็วลดลงต่ำกว่า 20 %



ภาพที่ 2.41 เครื่องทดสอบการกดทะลุ

2.11.4 Scanning Electron Microscopy: SEM

เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy เป็นเครื่องใช้ในการศึกษาวัสดุศาสตร์เครื่องมือชนิดนี้ถูกใช้ในการตรวจลักษณะรูปร่างภายในระดับจุลภาค ลักษณะความเสียหายศึกษาระดับโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ประเมินการเคลือบแบบบาง สํารวจสิ่งแปลกปลอมบนพื้นผิวและวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ ลักษณะการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscopy: SEM เป็นเครื่องมือซึ่งจะยิงลำแสงอิเล็กตรอนเป็นจุดลงบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างและมีการรวบรวมลำแสงอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกจากชิ้นงานตัวอย่างและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพที่ 2.42 ได้ภาพของเครื่อง SEM [32] ในการทำงานปืนอิเล็กตรอนจะยิงลำแสงอิเล็กตรอนออกภายในคอลัมน์สุญญากาศและจะถูกโฟกัสเป็นจุดเล็กๆกระทบลงบนชิ้นตัวอย่าง ขดลวด Scanning จะยอมให้ลำแสงสแกนบนพื้นที่เล็กๆของผิวตัวอย่างนั้น ลำแสงอิเล็กตรอนที่สะท้อน

กลับและกระจายเป็นมุมต่ำ (Low-angle Backscattered Electrons) จะมีอันตรปฏิกิริยากับส่วนที่นูนออกมาของพื้นผิวและก่อให้เกิดลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับและกระจายตัวจากอะตอมของโลหะที่เป็นตัวอย่างเพื่อสร้างสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะถ่ายภาพที่มีกำลังขยายตั้งแต่เล็กน้อยจนถึง 300 เท่าของเครื่อง Optical Microscope (ประมาณ $10\ \mu\text{m}$ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า) ค่า resolution ของเครื่อง SEM ส่วนใหญ่จะประมาณ 5 nm ด้วยกำลังขยายที่มีช่วงกว้าง (ประมาณ 5 – 100,000x)



ภาพที่ 2.42 เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscopy ; SEM

2.12 การบดลดขนาดของแข็ง

2.12.1 การแยกขนาดของเถ้าแกลบด้วยเครื่องแยกขนาด (Sieve Analysis)

คือวิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือความละเอียด (Fineness) โดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ ซึ่งช่องของตะแกรงทดสอบนั้นจะมีการจัดเรียงขนาดที่แตกต่างกันซึ่งตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้บนตะแกรง (Sieve) เกิดจากการนำลดขนาดต่างกันมาสานเป็นช่องและบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (Mesh) หมายความว่าจำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้วจะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งอาจจะยาวกว้าง 0.1 นิ้ว ทำจากลวดที่มีขนาดต่างกันจึงจำเป็นต้องบอกขนาดช่องหรือ Aperture Size ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วย

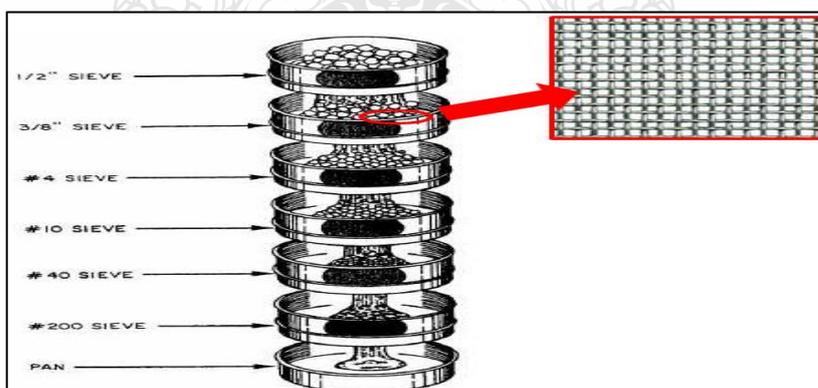


ภาพที่ 2.43 ตะแกรงแยกขนาด (Sieve Analysis)

ตะแกรงมาตรฐานที่นิยมใช้ได้แก่

- ตะแกรงแบบอังกฤษ (British Standard)
- ตะแกรงแบบไทเลอร์ (Tyler Standard)
- ตะแกรงแบบอเมริกัน (ASTM)

โดยในเมชเบอร์เดียวกันของตะแกรงแต่ละมาตรฐานจะมีขนาดช่อง (Aperture Size) ที่ต่างกัน ก็ได้ตัวอย่างเช่น ตะแกรงขนาด 100 เมชแบบไทเลอร์มีขนาดช่อง 0.147 มิลลิเมตร แบบอังกฤษมีขนาดช่อง 0.152 มิลลิเมตร และแบบอเมริกันมีขนาดช่อง 0.149 มิลลิเมตร ดังนั้นตะแกรงมาตรฐานทุกแบบจะต้องแสดงรายละเอียด ทั้งขนาดเมชและขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 2.44



ภาพที่ 2.44 ขนาดของช่องรูตะแกรง (Aperture Size)

2.12.2 การบดลดขนาดของแข็ง การบดลดขนาดขั้นแรกคือการทำให้พลาสติกที่เป็นรูปร่างรูปทรงต่างๆให้กลายเป็นเศษพลาสติกเกล็ดเล็กๆให้มีขนาดประมาณ 0.5-2.0 เซนติเมตร ซึ่งการบดลด

ขนาดนี้จะอยู่ในการย่อยขั้นที่สอง โดยเครื่องที่ใช้ในการบดลดขนาดในขั้นนี้คือเครื่องบด Bosco หลักการทำงานของเครื่องบด จะเป็นเครื่องโม่อัดพลาสติกซึ่งจะมีใบอยู่ด้านบนเมื่อใส่ขวดพลาสติกใบมีดจะกระทบกับพลาสติกและจะได้เป็นเศษชิ้นส่วนพลาสติกหล่นลงมาในตะแกรงความกว้างของรูตะแกรงจะมีขนาด 0.1-2 เซนติเมตร เมื่อใบมีดตีจนได้ขนาดที่เหมาะสมเศษพลาสติกจะหล่นตามช่องตะแกรง ส่วนที่มีขนาดใหญ่จะถูกวนใบมีดตีซ้ำจะกว่าจะมีขนาดเล็กกว่าช่องตะแกรง ดังแสดงในภาพที่ 2.45



ภาพที่ 2.45 เครื่องบดแบบใบมีด Bosco

2.12.3 การบดละเอียดโดยเครื่องเพาเวอร์โรเซออร์ หลักการทำงานคือการใช้ โม่ตี จะแตกต่างจากขั้นตอนแรกคือโม่อัดขั้นตอนนี้เมื่อใส่เศษพลาสติกไปในเครื่อง เครื่องบดลดขนาดจะใช้ลมดูดเศษพลาสติกเข้าไปในห้องเครื่องเพื่อทำการบดจากเศษเล็กให้กลายเป็นอนุภาคผง เครื่องบดผงชนิดนี้มีข้อเสีย เนื่องจากการตีเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความร้อนสะสมอาจจะทำให้พลาสติกละลายติดผนังห้องเครื่องได้ลักษณะเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2.46



ภาพที่ 2.46 เครื่อง Pulverizer ที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรม

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิสิทธิ์ โฆษิตชัยยงค์ และคณะ [33] ได้ศึกษาการใช้อนุภาคเถ้าลอยเพื่อเป็นสารตัวเติมการลดต้นทุนสำหรับพอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเพื่อทดสอบผลกระทบของกรรมวิธีและสภาวะในการเตรียมวัสดุผสมรวมถึงปริมาณเถ้าลอยในอัตราส่วน 20-40% โดยน้ำหนักโดยเริ่มแรกเตรียมวัสดุชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางดัชนีการไหล 4.0 กรัมต่อ 10 นาที และอนุภาคเถ้าลอยที่ 75 ไมครอนและผสมแบบในงานวิจัยศึกษากรรมวิธีที่มีผลต่อค่าความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลในขั้นตอนการผสมแบบหลอมเหลว (Melt Blending Method) ความสามารถในการขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปได้ โดยการสังเกตความสมบูรณ์ของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานมีความสมบูรณ์ตลอดในช่วงอุณหภูมิของการเตรียมวัสดุผสมในขณะที่ค่าความทนแรงดึงสูงสุด (Maximum Tensile Stress) และค่าระยะยืดตัวที่จุดขาด มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิผสมเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจาก การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้วัสดุมีความหนืดลดลงทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวในพอลิเอทิลีน แต่เมื่อพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนอาจเกิดการเสื่อมสภาพโดยมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงทำให้มีแนวโน้มของสมบัติลดลง การผสมแบบแห้ง (Dry Blending Method) เถ้าลอยที่ 40 %wt. ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยเกิดแนวโน้มที่เกาะกลุ่มกันเอง (Self Agglomeration) การหลอมรวมกันของวัสดุผสมเกิดขึ้นที่พอลิเอทิลีนเป็นสาเหตุให้วัสดุไม่สามารถเกาะผนังแม่พิมพ์จึงไม่สามารถขึ้นรูปได้

E.P. Ayswarya และคณะ [34] ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลการใช้เถ้าแกลบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติพลาสติก HDPE โดยวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเถ้าแกลบโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction: XRD และใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope: SEM ขนาดและอนุภาคของ RHA/HDPE ผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการผสมเถ้าแกลบกับ HDPE โดยที่ไม่มีการ Compatibilizer เถ้าแกลบจะไม่ได้ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีมากนักในทางกลับกันเมื่อใช้ HDPE ร่วมกับ MA-g-HDPE เพื่อปรับสภาพเมื่อนำไปผสมทำให้มีค่า Tensile Strength เพิ่มขึ้น ประมาณ 18 % และยังมีค่า Elongation at Break ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลจากการทดสอบ XRD พบพีกส่วนที่เป็นผลึกของเถ้าแกลบและส่วนที่เป็นอสัณฐานส่วนใหญ่จะเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิมากกว่า 650 องศาเซลเซียส พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบด้วย ซิลิคอน แคลเซียม แมกนีเซียมและโพแทสเซียมอีกทั้งอลูมิเนียมและเหล็กพบอยู่ในปริมาณน้อย

นิลุบล เผือกบัวขาว [2] ศึกษาการใช้งานพลาสติกที่ชนิดพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณ ขนาดอนุภาค และการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยสารคู่ควบปฏิกริยา 4 ชนิด ได้แก่ กรดสเตียริก (SA) สารคู่ควบปฏิกริยาไซเลน (AMPTES และ GPTMS) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (MA-g-HDPE) จากการศึกษาสมบัติ

เชิงกลของพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ (Recycle High Density Polyethylene: rHDPE) เปรียบเทียบกับพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงบริสุทธิ์ (Virgin HDPE: vHDPE) พบว่าค่าดัชนีการไหลหลอมของ rHDPE เท่ากับ 7.92 g/10 min จึงใช้พอลิเอทธิลีนเกรดเดียวกันที่มีค่าดัชนีการหลอมไหลใกล้เคียงกันคือ vHDPE เกรดฉีด มีค่าดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 6.00 g/10 min เพื่อเทียบสมบัติเชิงกล พบว่าสมบัติเชิงกลของ rHDPE มีค่าต่ำกว่า vHDPE โดยค่าการต้านแรงดึงลดลง 40 เปอร์เซ็นต์ในส่วนค่ามอดูลัสของยังส์ลดลง 7.13 เปอร์เซ็นต์ และค่ามอดูลัสของแรงดัดลดลง 40 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุที่ r-HDPE มีสมบัติเชิงกลลดลงเป็นผลเนื่องจาก r-HDPE ได้รับความร้อนในกระบวนการขึ้นรูป และถูกทำให้เป็นอนุภาคสำหรับขึ้นรูปใหม่ เป็นสาเหตุให้ r-HDPE เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลบางส่วนขาดออก น้ำหนักโมเลกุลและความยาวของสายโซ่จึงลดลง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลลดลงโดยเฉพาะความสามารถในการยึดตัว r-HDPE มีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดลดลง 97.25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ v-HDPE ซึ่งอาจอธิบายว่า เมื่อความยาวสายโซ่ของพอลิเมอร์ลดลง โอกาสที่สายโซ่จะเกิดการเกี่ยวพันกันขณะทำการยึดดึงจึงลดลงตามไปด้วย

Ektinai Jansri [35] และคณะ ศึกษาความเป็นไปได้ของการขึ้นรูปสองชั้นระหว่าง Polypropylene ; PP และ Linear Low Density Polypropylene ; LLDPE ซึ่งตัวแปรในการเปรียบเทียบคือ โพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์โดยที่ขนาดของ PP ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า LLDPE จะถูกผสมโดยวิธีการผสมแบบแห้งที่อัตราส่วน 50-50 (%wt.) ผลการทดลองที่ได้จากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC) พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างไรก็ตามจากกล้องจุลทรรศน์แบบ ดิจิตอลแสดงให้เห็นถึงการแยกเฟสที่ต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเฟสหรือการก่อตัวของชั้นสองคือความสามารถในการแยกอนุภาคของแข็งขณะหมุนซึ่งผลการศึกษาพบว่าผลของการให้อุณหภูมิมีผลต่อสมบัติเชิงกลและความที่พื้นผิวไม่เรียบของวัสดุ PPhomo/LLDPE มีโมดูลัสและมีผิวที่ดีกว่า PPcopol/LLDPE โดยที่อุณหภูมิห้องการแยกของอนุภาคจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับขณะหลอมเหลว ขณะที่แม่พิมพ์หมุนอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านบนของชั้นการไหลหรือภายในแม่พิมพ์ (Free Surface) อนุภาคเล็กจะซึมผ่านช่องว่างของอนุภาคใหญ่ซึ่งกลไกนี้เกิดได้เมื่ออนุภาคมีความสามารถในการไหลสูงและการกระจายขนาดอนุภาคที่เหมาะสมอนุภาคมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอจะลดความสามารถในการผ่านของวัสดุทำให้ส่งผลต่อรูปแบบการแยกอนุภาคก่อนที่จะเริ่มกระบวนการรูปแบบการผสมของการหลอมละลายขึ้นอยู่กัอัตราการก่อตัวของการหลอมละลายในอัตราที่ต่ำการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวแม่พิมพ์กับอนุภาคจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆซึ่งอนุภาคจะค่อยๆกลายเป็นของเหลวแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคกับผิวแม่พิมพ์จะเกิดขึ้น อนุภาคที่ติดกับพื้นผิวแม่พิมพ์จะแสดงให้เห็นว่ามีแรงยึดเกาะมากดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูงช่วยให้สามารถรับความร้อนและละลายได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่และยังมีแรงยึดเกาะที่เพียงพอทำให้การยึดติดกับพื้นผิวแม่พิมพ์เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

ดังนั้นที่ผิวแม่พิมพ์จะลักษณะของการหลอมของอนุภาคขนาดเล็กที่สูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ปริมาณของอนุภาคเล็กที่หลอมติดแม่พิมพ์นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการซึมผ่านช่องว่างระหว่างพลาสติกซึ่งลักษณะรูปร่าง รูปทรงก็จะส่งผลเดียวกัน

สุภโชค ต้นพิชัย [36] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและเพตจากขวดพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน ถูกเตรียมเป็นผงด้วยกระบวนการพัลเวไรเซชัน อัตราส่วนของเพต 0, 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 ต่อพอลิโพรพิลีน 100 ส่วนใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิโพรพิลีนเป็นตัวเชื่อมประสานทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ผลจากการศึกษาพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดพัลเวไรเซชันนั้นทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออกส่งผลให้มีค่าดัชนีการไหลสูงขึ้นแต่สมบัติเชิงกลต่ำลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด เมื่อเพิ่มปริมาณเพตในพอลิเมอร์ส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มต่ำลงแต่โมดูลัสตัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลด้านอื่นมีแนวโน้มลดลงจากปริมาณการใส่เพตที่มากขึ้น

จักรวาล วงศ์ศักดิ์ [37] ศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนโดยใช้พอลิคาร์บอเนตเพื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทธิลีนเชิงการค้าและหัววัสดุทดแทนพอลิเอทธิลีน จากการทดลองพบว่าพอลิคาร์บอเนตมีค่าน้ำหนักโมเลกุลสูงมีแนวโน้มขึ้นรูปยาก ขณะที่พอลิคาร์บอเนตขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 250 μm สามารถขึ้นรูปได้ยากกว่าพอลิคาร์บอเนตขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 250 μm ขณะที่การกระจายความหนาของชิ้นงานพบว่า พอลิเอทธิลีนมีการกระจายความหนาดีกว่าพอลิคาร์บอเนต กรณีการขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตมีความหนาของผนังแตกต่างกันถึง 2 เท่า การทนการเจาะทะลุของพอลิคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่าพอลิเอทธิลีน แต่ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าสูงกว่า ซึ่งการศึกษานี้ขึ้นรูป น้ำหนักโมเลกุลของอนุภาค ส่งผลต่อค่าความหนืดซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนอีกทั้งเวลาต่อกระบวนการขึ้นรูปที่นานยังส่งผลต่อสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา

N. Kazemi และคณะ [38] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างไม้ (WPCs) พลาสติกกรีไซเคิลพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน ต่อพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิโพรพิลีนเชิงการค้า ถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลวโดยเครื่อง Brabender Plasticorder ขึ้นรูปโดยกระบวนการกดอัดโดยใช้อุณหภูมิ 170 °C และ 190 °C หลังจากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกล โดยแรงโค้งงอ และแรงดึง ผลการศึกษาพบว่าวัสดุผสมพอลิโพรพิลีน คอมโพสิตมีความแข็งแรงและการทนรับแรงกว่าพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงแต่มีค่าการทนแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิเอทธิลีนคอมโพสิต อีกทั้งวัสดุคอมโพสิตที่ทำจากพลาสติกกรีไซเคิลผสมซีลี้อย่างจากเปลือกไม้แสดงการต้านทานการดัดงอที่มากกว่าพลาสติกทางการค้าซึ่งเป็นผลมาจากผลึกที่เพิ่มขึ้น คุณสมบัติการรับแรงดัดหรือแรงเจาะทะลุที่สูงขึ้นของพลาสติกกรีไซเคิลมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของผลึกโครงสร้าง การเพิ่มขึ้นของผลึกเป็นผลจากการลดน้ำหนักโมเลกุลที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างการรีไซเคิล

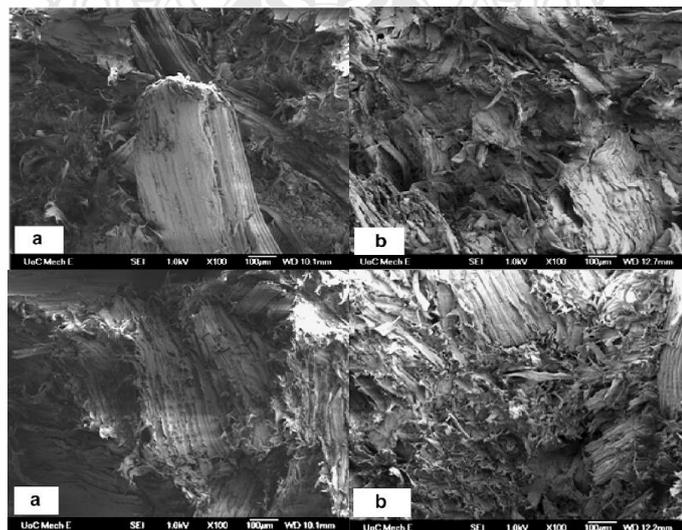
Greco และคณะ [39] ศึกษาคุณภาพและอิทธิพลของรูปร่างและขนาดของการบดต่อ อุณหภูมิโดยใช้ผงและใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพของผงโดยใช้พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลในงานวิจัยนี้รูปร่างของอนุภาคทั่วไปสำหรับผงที่ได้รับอุณหภูมิแตกต่างกัน พอลิเอทธิลีนถูกตัดให้ขาดออกจากกันเกิดเป็นหางยาวเป็นผลมาจากความเหนียวของวัสดุที่อุณหภูมิต่ำความเหนียวจะสูงไม่สามารถจัดเรียงรูปร่างใหม่ได้ส่งผลให้พื้นผิวเกิดความหยาบและเป็นรูปร่างที่ปกติ ดังแสดงในภาพที่ 2.47

ที่อุณหภูมิสูงหางซึ่งได้จากการลดขนาดจะหดตัวเข้าไปสู่อุณหภูมิหลักได้ซึ่งพลังงานที่ได้เหล่านี้จะลดลงเมื่ออนุภาคหลักได้รับความร้อนซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นสาเหตุให้บริเวณดังกล่าวเกิดการหลอมละลายและเกิดการยึดติดระหว่างผงและเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันซึ่งไม่เหมาะสมต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน เกิดขนาดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งการเกิดขึ้นของรูปร่างดังกล่าวเกิดจากเกณฑ์ของเฮย์วูดซึ่งเป็นการแสดงระดับพลังงานที่แตกต่างกันสำหรับผง L M และ H สำหรับอนุภาค H ขนาดเฉลี่ยสูงเมื่อเปรียบเทียบกับผง M และ L อาจเป็นผลมาจากการหลอมของอนุภาคผงหลอมรวมกันเป็นอนุภาคเดี่ยวที่อุณหภูมิสูง การหลอมรวมเข้าด้วยกัน ความเป็นทรงกลมและการหลอมเป็นลักษณะทรงกลมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งบ่งชี้ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นอัตราการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันจะดีขึ้นในทางกลับกัน ขณะที่อุณหภูมิต่ำลงอนุภาคจะถูกยึดออกอย่างมาก ขนาดของโครงสร้างลดลงจากผง L เป็นผง H แสดงว่าความหยาบของชิ้นงานลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งตรวจสอบได้จากเวฟเลตพลังงานที่ระดับ R1 และ R2 จะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้นที่ (R3 และ R4) ที่ระดับนี้พลังงานของลักษณะทั้งสามจะมีค่าใกล้เคียงกัน

	Powders L	Powders M	Powders H
Heywood criteria			
Area $\times 10^{-2}$ (mm ²)	4.95 \pm 2.19	4.32 \pm 2.04	9.75 \pm 2.90
Circularity	0.267 \pm 0.148	0.415 \pm 0.162	0.472 \pm 0.0921
Roundness	0.297 \pm 0.172	0.462 \pm 0.143	0.541 \pm 0.0898
Elongation	2.29 \pm 1.07	1.63 \pm 0.390	1.51 \pm 0.219
Fractal analysis			
D	1.17 \pm 0.0426	1.15 \pm 0.0492	1.12 \pm 0.0319
D _{tex}	1.07 \pm 0.0232	1.08 \pm 0.0251	1.07 \pm 0.0162
D _{struct}	1.38 \pm 0.149	1.25 \pm 0.110	1.20 \pm 0.0727
Wavelet analysis			
R ₀	1.16 \pm 0.179	1.06 \pm 0.0981	1.02 \pm 0.0237
R ₁	0.113 \pm 0.118	0.0639 \pm 0.0623	0.0284 \pm 0.0172
R ₂	0.0199 \pm 0.0216	0.0166 \pm 0.0187	0.0103 \pm 0.00635
R ₃	0.00270 \pm 0.00250	0.00277 \pm 0.00219	0.00218 \pm 0.00106
R ₄	4.22E-4 \pm 2.98E-4	4.42E-4 \pm 3.83E-4	3.52E-4 \pm 1.65E-4

ภาพที่ 2.47 ค่าพลังงานของความแตกต่างวัสดุทั้งสามชนิดโดยใช้วิธีของ Heywood [39]

Kamal B. และคณะ [40] ศึกษาความเสถียรของสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมพลาสติกโดยใช้พลาสติกกรีไซเคิลประเภทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและซีลี้อยูกล้อมรวมให้เป็นเนื้อวัสดุเดียวกันโดยกระบวนการอัดรีดหลังจากนั้นผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดโดยให้ความร้อนที่ 200 °C โดยชิ้นงานที่ได้มีขนาด 165×152×6.4 มิลลิเมตร เปรียบเทียบระหว่างวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารเชื่อมประสานและไม่เติมสารเชื่อมประสาน ชิ้นงานถูกวิเคราะห์การทดสอบแรงกดอัด ลักษณะการแตกหักโดยใช้ Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบของคอมโพสิตที่ใส่ซีลี้อยู่ร้อยละ 30 สามารถมองเห็นอนุภาคหลุดออกและเส้นใยที่ผ่านการทดสอบการต้านแรงดึงจนขาด ลักษณะเหล่านี้บ่งบอกว่าการเชื่อมประสานพันธะของฟิลเลอร์และเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ไม่ดีนอกจากนี้การเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของอนุภาคยังส่งผลต่อการแตกหัก บ่งชี้ว่าการกระจายตัวของฟิลเลอร์ไม่ดีภายในชิ้นงานพอลิเอทิลีน ดังนั้นพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุคอมโพสิตด้วยการเติมฟิลเลอร์ที่ต่ำกว่าเป็นการเสียรูปของพอลิเมอร์มากกว่าฟิลเลอร์ที่เติม ดังแสดงในภาพที่ 3a, 3b และ 4a ซึ่งระหว่างเมทริกซ์และฟิลเลอร์นั้นจะเกิดช่องว่างระหว่างกันส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่ต่ำลง ภาพที่ 4b เป็นการเติมสารเชื่อมประสาน 3 %wt. ระหว่าง rHDPE 47:50 % พบว่าภายใต้ SEM แสดงถึงช่องว่างระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และซีลี้อยู่เกิดช่องว่างน้อยมากแสดงถึงการพันธะอินเตอร์เฟสที่ดีจะเห็นได้ว่ารอยร้าวผ่านเส้นใยไม่ซึ่งสิ่งนี้บ่งบอกถึงการถ่ายโอนความเครียดจากเมทริกซ์ที่อ่อนไปฟิลเลอร์ที่เติมการแพร่กระจายแรงได้ดีส่งผลให้การทดสอบแรงดึง ความแข็งแรงและโมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.48 ภาพจากเครื่อง Scanning Electron Microscopy ; SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า ของพลาสติกกรีไซเคิลและซีลี้อยู่ [40]

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

No.	Author	Material	Method	Result
1.	อภิสิทธิ์ โฆษิตชัยยงค์ และคณะ	- Fly Ash - MDPE	Rotational Molding	สภาวะการขึ้นรูปโดยวิธีการผสมแบบแห้ง จากการผสมเถ้าลอยที่ 40 %wt. ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากการเกิดการเกาะกลุ่มกันเองในมางกลับกันวิธีการผสมแบบหลอมเหลวสามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วน 40 %wt
2.	Ayswarya E.P. และคณะ	- RHA - HDPE - MA-g-HDPE	Compression Molding	วัสดุที่เติมเถ้าแคลสส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากความเข้ากันได้ต่ำระหว่างอนุภาคในทางกลับกันวัสดุที่ใส่ MA-g-HDPE จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น
3.	นิลุบล เพือกบัวขาว	- HDPE - rHDPE - กรดสเตียริก (SA) - AMPTES and GPTMS - MA-g-HDPE	Bold Molding	r-HDPE เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลบางส่วนขาดออก น้ำหนักโมเลกุลและความยาวของสายโซ่จึงลดลง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ v-HDPE ซึ่งอาจอธิบายว่า เมื่อความยาวสายโซ่ของพอลิเมอร์ลดลง โอกาสที่สายโซ่จะเกิดการเกี่ยวพันกันขณะทำการยืดดึงจึงลดลงตามไปด้วย
4.	Ektinai Jansri และคณะ	- PPhomo - PPcopo - LLDPE	Rotational Molding	ขณะที่แม่พิมพ์หมุนอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านบนของชั้นการไหล อนุภาคเล็กจะลอดผ่านช่องว่างของอนุภาคใหญ่ อนุภาคมีรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอจะลดความสามารถสำหรับ

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

No.	Author	Material	Method	Result
4.	Ektinai Jansri และ คณะ	- PPhomo - PPcopo - LLDPE	Rotational Molding	การผ่านของวัสดุทำให้ส่งผลต่อ รูปแบบการแยกอนุภาคก่อนที่
5.	สุภาโชค ตันพิชัย	- PET - MA-g-PP	Intection Molding	พอลิพรพิลีนที่ผ่านการบดด้วย เครื่องบดพัลเวโรเซอร์นั้นทำให้ สายโซ่โมเลกุลขาดออกส่งผลให้ค่า ดัชนีการไหลสูงขึ้น แต่มีสมบัติ เชิงกลที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับพอลิ พรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านการบด เมื่อ เพิ่มปริมาณพेटในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อดูลัสตัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมบัติเชิงกลอื่นๆมีค่า ลดลง
6.	จักรารุธ วงศ์ศักดิ์	- PC <250 μ m - PC >250 μ m LLDPE	Rotational Molding	พอลิเอทธิลีนมีการกระจายความ หนาติกว่าพอลิคาร์บอนเนต กรณี การขึ้นรูปพอลิคาร์บอนเนตมีขนาด ความหนาของผนังแตกต่างกันถึง 2 เท่า การทนการเจาะทะลุของพอลิ คาร์บอนเนตค่าต่ำกว่าพอลิเอทธิลีน แต่ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าสูงกว่า
7.	Kazemi N. และ คณะ	- rHDPE - WPCs - HDPE - PP	Rotational Molding	ผลการศึกษาพบว่าวัสดุผสมพอลิโพร พิลีน คอมโพลีตมีค่าความแข็ง และการทนรับแรงกว่าพอลิเอทธิลีน ความหนาแน่นสูงแต่มีค่าการทน แรงกระแทกต่ำกว่าพอลิเอทธิลีนค อมโพลีต อีกทั้งวัสดุคอมโพลีตที่ทำ จากพลาสติกกรีไซเคิลผสมขี้เลื่อย

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

No.	Author	Material	Method	Result
7.	Kazemi N. และคณะ	- rHDPE - WPCs - HDPE - PP	Rotational Molding	จากเปลือกไม้แสดงการต้านทานการดัดงอที่มากกว่าพลาสติกทางการค้า
8.	Greco และคณะ	- HDPE	Rotational Molding	ที่อุณหภูมิสูงทางซึ่งได้จากการลดขนาดจะหดตัวเข้าไปสู่อุณหภูมิหลักได้ซึ่งพลังงานที่ได้เหล่านี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิได้รับความร้อน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นสาเหตุให้บริเวณดังกล่าวเกิดการหลอมละลายและเกิดการยึดติดระหว่างผงและเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันซึ่งไม่เหมาะสมต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน
9.	Kamal B. และคณะ	- HDPE - Sawdust	Compression Molding	ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบของคอมโพสิตที่ใส่ขี้เลื่อยร้อยละ 30 สามารถมองเห็นอนุภาคหลุดออกและเส้นใยที่ผ่านการทดสอบการต้านแรงดัดงอจนขาด ลักษณะเหล่านี้บ่งบอกว่าการเชื่อมประสานพันธะของฟิลเลอร์และเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ไม่ดีนอกจากนี้การเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของอนุภาคยังส่งผลต่อการแตกหัก

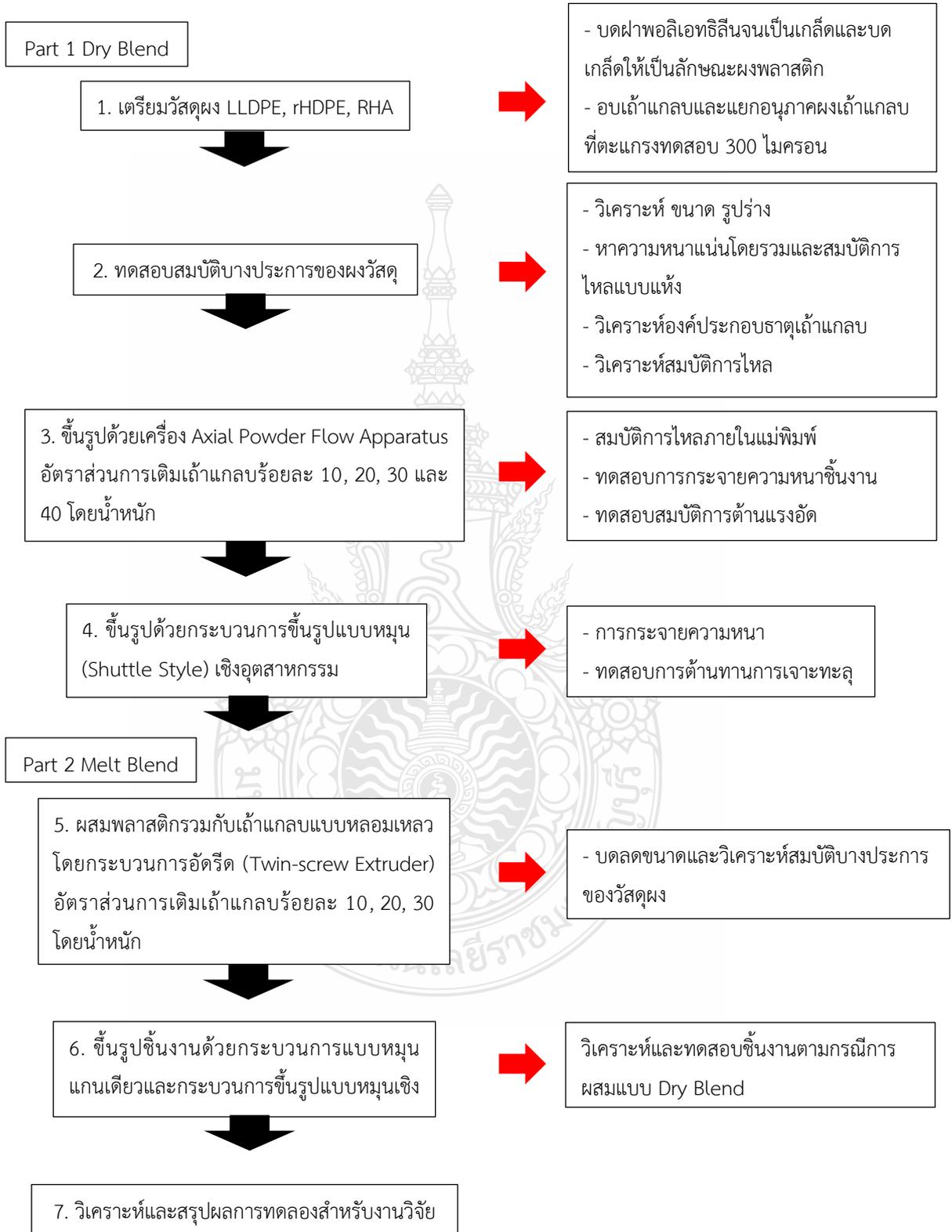
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินการ (ต่อ)

แผนการดำเนินงานวิจัย																				
ขั้นตอนการดำเนินงาน	2560			2561												2562				
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
5. ทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ																				
6. ทดสอบการขึ้นรูปแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ																				
7. ทดสอบสมบัติบางประการของตัวอย่างที่ขึ้นรูปได้																				
8. สรุป/รายงานผลการวิจัย																				



3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 3.1



3.3 วัสดุในงานวิจัย

3.3.1 พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (Recycle High Density Polyethylene: rHDPE) จากฝาขวดน้ำที่ผ่านการใช้งานและบดลดขนาดจนเป็นผง ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 (a) ฝาขวดน้ำดื่มชนิดพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งาน rHDPE และ (b) ผงที่ได้จากการบดละเอียด

3.3.2 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash: RHA) ที่ผ่านการเผา นำเข้าอบเตาโดยใช้อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 1.2-1.7 หลังจากนั้นเถ้าแกลบถูกแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงทดสอบ (Sieve) ที่ 300 ไมครอน ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 (a) เถ้าแกลบที่ยังไม่ถูกอบไล่ความชื้น และ (b) เถ้าแกลบที่ถูกอบไล่ความชื้นและถูกแยกขนาดที่ 300 ไมครอน

3.3.3 ผงพลาสติกเชิงอุตสาหกรรม พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Liner Low Density Polyethylene: LLDPE) จากบริษัท PTT Global Chemical หมายเลขทางการค้า LL9641UP เพื่อเปรียบเทียบวัสดุสำหรับงานวิจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ผงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นถูกใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปแบบหมุน

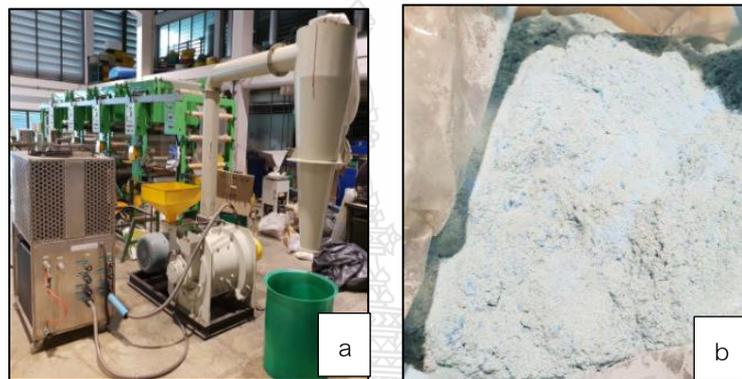
3.4 การเตรียมวัสดุสำหรับกระบวนการขึ้นรูป

3.4.1 การบดคัดแยกขนาดของพอลิเมอร์ ตัวอย่างในการทดสอบจะถูกบดหยาบด้วยเครื่อง Bossco เครื่องบดแบบไม้อัดพลาสติกซึ่งมีใบมีดอยู่ด้านในจะได้พลาสติกที่มีขนาดเฉลี่ย 1-2 เซนติเมตร พลาสติกจะถูกตัดจนสามารถผ่านตะแกรงความกว้างรูตะแกรงมีขนาด 0.1 - 0.2 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 (a) เครื่องบดใบมีด Bossco และ (b) อนุภาค rHDPE ขนาดเฉลี่ย 0.1 – 0.2 เซนติเมตร

การบดลดขนาดให้มีอนุภาคใกล้เคียงกับพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด Low Density Polyethylene; LLDPE โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 200-400 ไมครอน โดยเครื่องบดละเอียดแบบ (Pulverizer) ซึ่งเป็นกระบวนการใช้ไม้ตีจะละเอียดเป็นอนุภาคผงเครื่องจักรจะใช้ลมดูดเศษพลาสติกเข้าไปในห้องเครื่องเพื่อทำการตีผงพลาสติกจนเป็นลักษณะผงอาจจะใช้เวลานานจึงต้องมีการหล่อเย็นตลอดเวลาที่เครื่องจักรทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 (a) เครื่อง Pulverizer และ (b) ผงพลาสติกชนิด rHDPE ที่ได้จากการบด

3.4.2 การคัดแยกขนาดของแก้วแกลบ เนื่องจากแก้วแกลบที่นำมาใช้ในงานวิจัยได้มาจากการเผาจึงมีอนุภาคอื่นผสมกับในแก้วแกลบและในแก้วแกลบมีการกระจายของขนาดอนุภาคและมีลักษณะอนุภาคแตกต่างกันอยู่มาก จึงต้องคัดแยกขนาดของอนุภาคโดยใช้เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) ซึ่งลักษณะของเครื่องทดสอบจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 ชั้น แต่ละชั้นจะมีขนาดแตกต่างกันโดยเครื่องจะทำการสั่นเพื่อให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กหล่นลงในแต่ละชั้น ดังแสดงในภาพที่ 3.7

วิธีการทดสอบ

- ชั่งแก้วแกลบ 400 กรัม ละใส่บนชั้นบนสุดของตะแกรงแยกขนาด Sieve
- เปิดเครื่องและจับเวลา 20-30 นาที
- นำแก้วแกลบที่ได้ชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ 3.7 เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker)

3.5 อุปกรณ์เครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัย

3.5.1 การทดสอบความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) เป็นการวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุภายในภาชนะบรรจุระหว่างวัสดุและอากาศ โดยมีค่ามาตรฐานการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ ASTM D1895 แสดงดังในภาพที่ 3.8

วิธีการทดลอง

- เตรียมผงเถ้าแกลบและผงพอลิเอทิลีนรีไซเคิล 400 กรัม
- คำนวณปริมาตรกระบอกทดสอบ (400 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
- ใส่วัสดุลงในกรวยทดสอบด้านบนจากนั้นเปิดลิ้นของกรวยทดสอบ
- หลังจากวัสดุเต็มกระบอกทดสอบนำวัสดุชั่งน้ำหนัก
- คำนวณหาค่าความหนาแน่นของวัสดุ

3.5.2 การเคลื่อนที่ของวัสดุขณะที่เป็นของแข็ง (Dry Flow) การเคลื่อนที่ของวัสดุขณะที่เป็นลักษณะของแข็ง ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนั้นไม่มีการให้แรงเค้น (Stress) และแรงดัน (Pressure) ในกระบวนการ ดังนั้นจึงอาศัยการเคลื่อนที่ของวัสดุภายในแม่พิมพ์ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของวัสดุเป็นสิ่งที่สำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการคือ ขนาดและรูปร่างของวัสดุ

วิธีการทดลอง

- ชั่งน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 400 กรัมและใส่ในกรวยทดสอบ
- เปิดลิ้นกรวยทดสอบพร้อมจับเวลาจนกว่าอนุภาคของวัสดุทดสอบไหลจากกรวยทดสอบจนหมดและบันทึกผลการทดสอบ



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบความหนาแน่นโดยรวมและอัตราการไหลขณะของแข็ง

3.5.3 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างอนุภาค กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital-Microscope) รุ่น S04-600X กำลังขยาย 25X-600X อัตราการปรับภาพ 0 – 40 มิลลิเมตร ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย ImageJ (Freeware) เพื่อบันทึกผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวมีฟังก์ชัน เช่นการคำนวณพื้นที่หรือค่าพิกเซลวัดระยะทางเชิงมุมสร้างฮิสโตแกรมและกราฟเส้นจากการรับข้อมูล อีกทั้งยังสามารถประมวลผลภาพพื้นฐานเช่นความคมชัด ความสว่าง การปรับเปลี่ยนมุมภายในภาพ การขยายเข้า ออกและสีของรูปภาพเป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง การกระจายขนาดของอนุภาคในการทดลองและความขรุขระของพื้นผิวขั้นตอนการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงดังนี้

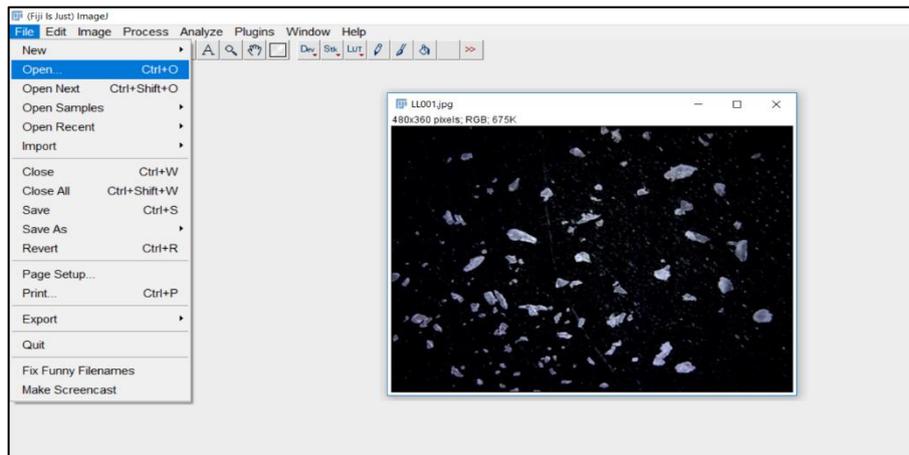


ภาพที่ 3.9 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์รูปร่างอนุภาค

สำหรับงานวิจัยนี้วิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง การกระจายขนาดของอนุภาคในการทดลองและความขรุขระของพื้นผิวขั้นตอนการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงดังนี้

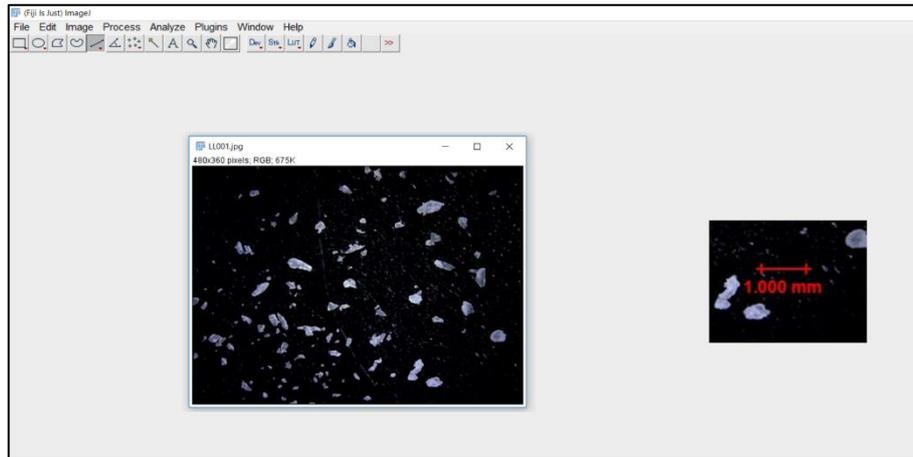
3.5.3.1 การวัดขนาดและรูปร่างของอนุภาค

- เปิดภาพที่ต้องการวัด แสดงดังภาพที่ 3.10

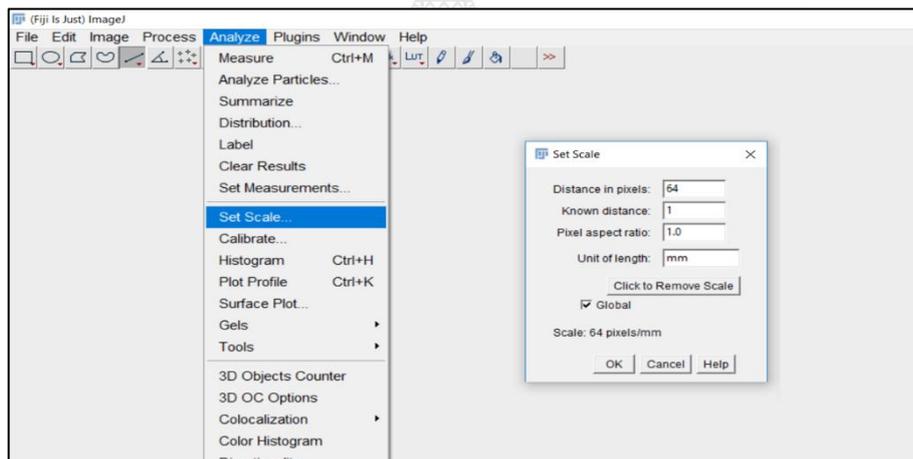


ภาพที่ 3.11 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1

- การวิเคราะห์ในแต่ละครั้งก่อนการวิเคราะห์ระยะจากการวัดพิจารณาพื้นที่อ้างอิงของภาพที่ใช้งาน เริ่มต้นด้วยเส้นตรงในแถบเครื่องมือและลากเส้นเป็นระยะทางแนวแกน x ดังแสดงในภาพที่ 3.10 และเลือกมาตราส่วนและป้อนระยะเป็นมิลลิเมตร เซนติเมตร หรือไมครอนหากต้องการให้ทุกภาพแสดงเหมือนกันให้กดที่ “Global” และกดตกลงระยะในรูปแบบพิกเซลจะเปลี่ยนอัตโนมัติด้วยความยาวของเส้นที่เลือก ดังแสดงในภาพที่ 3.11

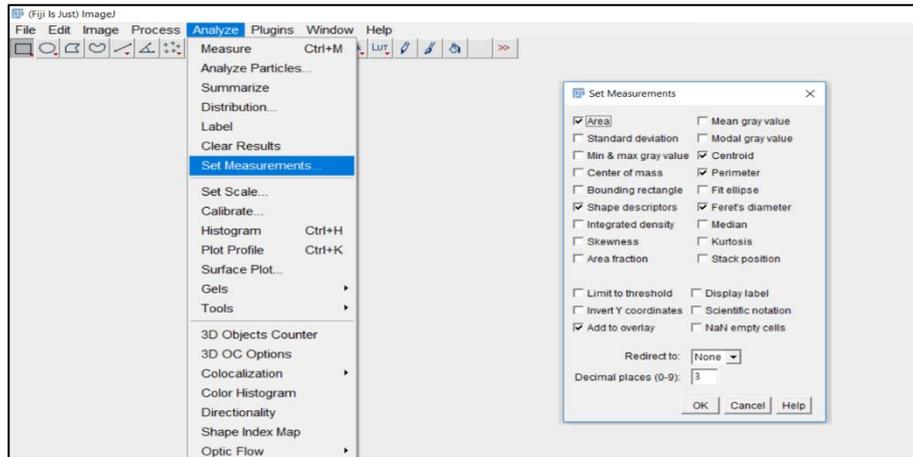


ภาพที่ 3.11 การวิเคราะห์ภาพขั้นตอนที่ 2



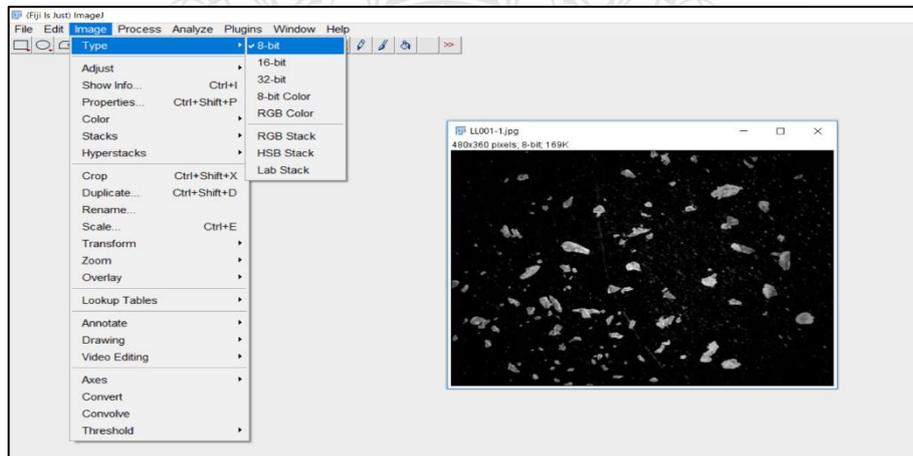
ภาพที่ 3.12 การวิเคราะห์ภาพขั้นตอนที่ 3

- เลือกประเภทของการวิเคราะห์และการแสดงผลที่ปรากฏบนตารางผลลัพธ์โดยเลือกได้จากแถบเมนูเลือก 'วิเคราะห์' จากนั้น 'ตั้งค่าการวัด' และเลือก 'ตกลง' ดังแสดงในภาพที่ 3.13

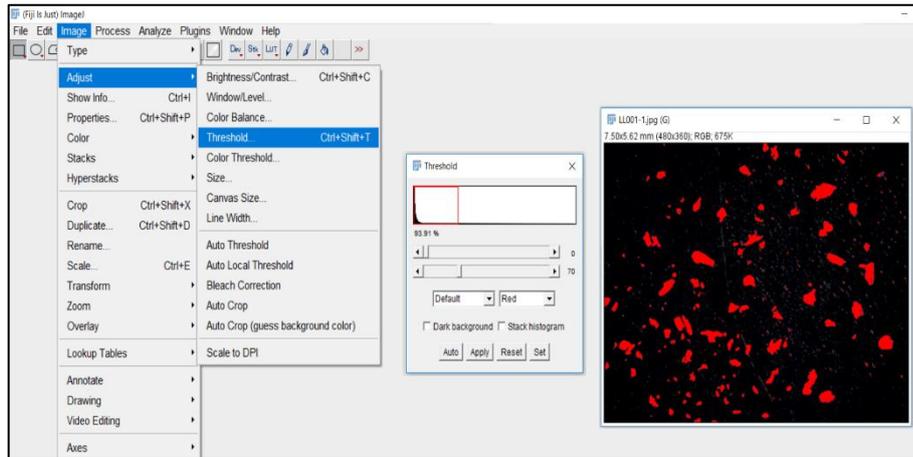


ภาพที่ 3.13 การวิเคราะห์ภาพขั้นตอนที่ 4

- ในการนับการวัดวัตถุจำเป็นต้องใช้ภาพเฉพาะต่อการวิเคราะห์ดังนั้นก็จะต้องเลือกโปรแกรมวิเคราะห์ที่เหมาะสมโดยเลือกที่ 'ภาพ' ในแถบเมนู เลือก "ชนิด" และเลือก "8 บิต" ดังแสดงในภาพที่ 3.14 หลังจากนั้นปรับภาพและปรับโหมดโปรแกรมเลือกที่ "ภาพ" ไปที่ "ปรับ" และเลือก "เริ่มใหม่" ดังแสดงในภาพที่ 3.15 จะมีกล่องข้อความแสดงสำหรับปรับภาพคมชัดตามความต้องการ

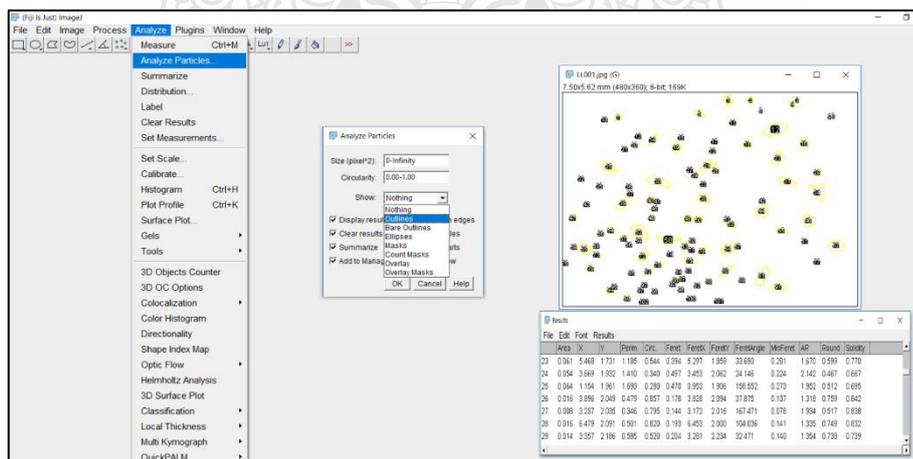


ภาพที่ 3.14 การวิเคราะห์ภาพขั้นตอนที่ 5



ภาพที่ 3.15 การวิเคราะห์ภาพขั้นตอนที่ 6

- การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยใช้คำสั่ง “วิเคราะห์อนุภาค” ดังแสดงในภาพที่ 3.16 การวิเคราะห์จะแสดงผลในการเลือกพื้นที่ที่มีอยู่ หากไม่เลือกข้อมูลดังกล่าว การแสดงจะเป็นการแสดงผลภาพทั้งหมดหลักการทำงานคือการสแกนภาพหรือการเลือกจนกว่าจะถึงขอบเขตของวัตถุ ในกล่องตอบโต้ของข้อความสามารถเลือกขนาดพื้นที่หรือขอบเขตการวัดของ 0-อินฟินิตี้ สำหรับอนุภาคที่ไม่ได้อยู่ในช่วงนี้ จะถูกข้ามไป ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์จะแสดงในตารางสรุป



ภาพที่ 3.16 การวิเคราะห์ภาพขั้นตอนที่ 7

คำอธิบายรูปร่างจะถูกคำนวณและแสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ดังนี้

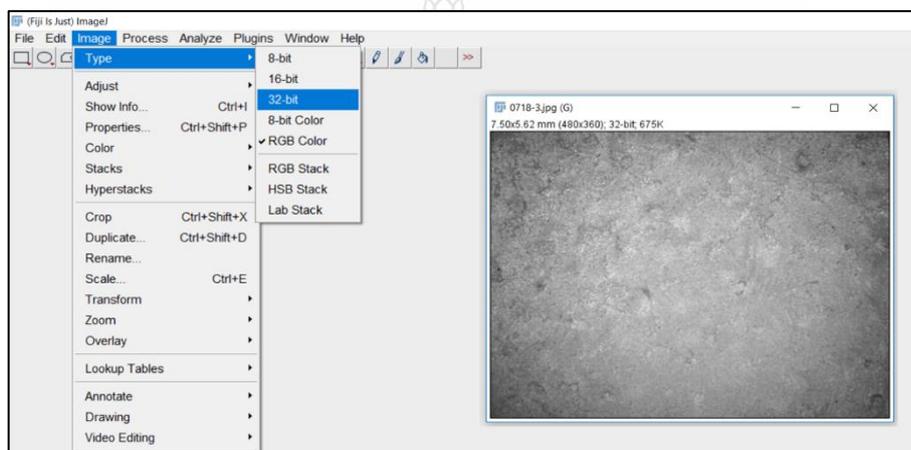
Circularity คำนวณได้จากสูตร $4\pi \times (\text{รัศมีพื้นที่})^2$ วงกลมที่สมบูรณ์บ่งบอกถึงค่าที่เข้าหา 1 ขณะที่รูปร่างที่แปลกไปจะเข้าหา 0 อย่างไรก็ตามค่าอาจไม่แม่นยำสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก

- อัตราส่วนภาพเป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ที่สุดและเล็กที่สุดของอนุภาค (กว้าง/สูง) ค่าความกลมหรือยาวจะถูกระบุโดยอัตราส่วนนี้ อัตราส่วนกว้างยาวเท่ากับ 1 หมายถึงวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสในกรณีที่วิธีอัตราส่วนกว้างยาวถึง 0 หมายถึงเส้น จะแสดงในตารางคอลัมน์ชื่อ AR
- Roundness คำนวณได้จากสูตร $4 \times (\text{พื้นที่}) \pi \times \text{ค่าแกนหลัก}^2$ หรือค่าผกผัน อัตราส่วนภาพค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึงความว่าวัตถุนั้นค่อนข้างกลมจะแสดงในตารางของ Column ชื่อ “Round”
- Solidity เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าวัตถุมีพื้นผิวที่ไม่เรียบไม่มีการเยื้องหรือการบิดเบี้ยวซึ่งคำนวณจากพื้นที่ของวัตถุที่ถูกหารด้วยพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ [(พื้นที่เรียบ/พื้นที่นูน)] ซึ่งจะแสดงในคอลัมน์ชื่อ “Solidity” เส้นผ่านศูนย์กลางของ Feret เป็นระยะทางที่ยาวที่สุดระหว่างจุดสองจุดใดๆ ตามแนวเขตการคัดเลือก จะแสดงในตารางของคอลัมน์ชื่อ “Feret” และ “FeretAngle” ในคอลัมน์เป็นมุม (0-180 องศา) ของเส้นผ่านศูนย์กลางของ Feret จากนั้นค่าต่ำสุดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่แคบที่สุดของวัตถุจะแสดงในคอลัมน์ ‘Minferet’ สำหรับคอลัมน์ของ “FeretX” และ “FeretY” เป็นพิกัดเริ่มต้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของ Feret สำหรับงานวิจัยนี้ค่า Minferet ถูกใช้เพื่อกำหนดขนาดของอนุภาคเนื่องจากค่านี้ถูกใช้โดยทั่วไปเพื่อกำหนดขนาดของอนุภาค อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับสำหรับการกรองอนุภาคด้วยตะแกรงซึ่งขณะที่ค่าเฉลี่ยของการเป็นวงกลมนั้นใช้เพื่อระบุรูปร่างของอนุภาค

3.5.4 เครื่องมือทดสอบความขรุขระพื้นผิวเป็นเครื่องมือประยุกต์ใช้ร่วมกันระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital Microscope) รุ่น S04-600X กำลังขยาย 25X-600X อัตราการรับภาพ 0-40 มิลลิเมตร ใช้ร่วมกับโปรแกรม ImageJ ฟังก์ชัน “SurfJ” เพื่อวิเคราะห์ความขรุขระพื้นผิวโดยแสดงเป็นค่าเฉลี่ยทางเลขาคณิต อีกทั้งฟังก์ชันดังกล่าวสามารถเลือกใช้กับภาพที่มีความสูงหรือต่ำบริเวณพื้นผิวโดยการใช้งาน จะเปลี่ยนรูปภาพเป็น 32 บิต หรือสแต็คที่ค่าพิกเซลแสดงระยะทาง z

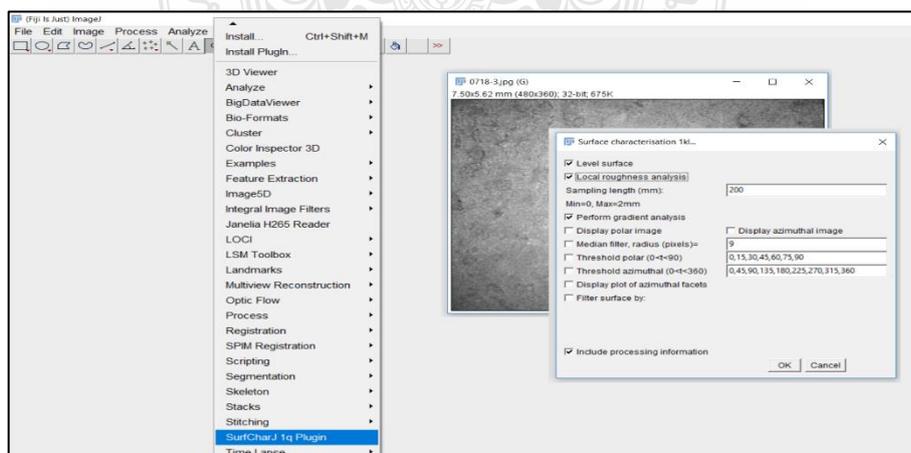
กับพื้นผิวชิ้นงานอีกทั้งผู้ใช้อาจยังต้องให้ระยะห่างตามขวางระหว่างพิกเซลที่แสดงในหน่วยเดียวกับข้อมูล ช่วง คุณสมบัติของ ImageJ ได้รับการปรับปรุงเพื่อประเมินข้อมูลความหยาบระดับพื้นผิวพร้อมกับ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต การวิเคราะห์ความขรุขระพื้นผิววัดโดยค่า R บนพื้นผิวทั้งหมดซึ่งระบุค่าความหยาบ ตามมาตรฐาน ISO 4287/2000 ซึ่งค่า Ra, Rq, Rku, Rsk, Rv, Rp และ Rt คือค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเลขคณิต ค่าเบี่ยงเบนของสแควร์รูค Kurtosis ของการวิเคราะห์ ความเบ้หรือความโค้งของชิ้นงาน จุดต่ำและสูง ของชิ้นงาน และความสูงทั้งหมดของการนำเสนอลำดับซึ่งมีวิธีวิเคราะห์ดังนี้

- เปลี่ยนภาพเป็น 32 ในแถบเมนู ดังแสดงในภาพที่ 3.17



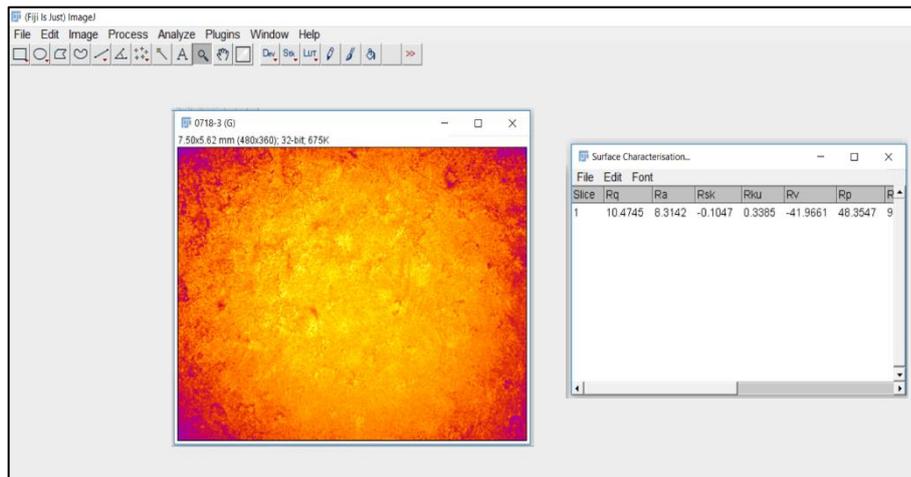
ภาพที่ 3.17 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้นตอนที่ 1

- การวิเคราะห์ด้วยคำสั่ง “SurfCharJ 1q” ดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้นตอนที่ 2

- ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 3.19 ค่าความหยาบที่แสดงจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับผู้ใช้โดยเลือกจากภาพที่ปรากฏหลักจากการวิเคราะห์แสดงเฉดสีที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงความหยาบที่ต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ค่า Ra ถูกใช้สำหรับการเปรียบเทียบเพราะเป็นค่าที่ใช้กันโดยทั่วไป



ภาพที่ 3.19 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้นตอนที่ 3

3.5.4 เครื่องมือทดสอบวิเคราะห์ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index; MFI) ใช้ทดสอบอัตราการไหลของวัสดุขณะหลอมเหลวโดยมีค่ามาตรฐานตาม ASTM D 1238 ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจะใช้การเคลื่อนที่ของวัสดุขณะที่เป็นของแข็งและหลอมเหลว ดังนั้นการทดสอบอัตราการไหลเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ดังแสดงในภาพที่ 3.20 ในการทดสอบค่าดัชนีการไหล (MFI) รุ่น 6425 ของบริษัท CEAST ประเทศอิตาลี จะใช้น้ำหนักอนุภาคพลาสติก 8 กรัม น้ำหนักที่ใช้กด 2.16 กิโลกรัม อุณหภูมิ 190 °C หลังจากได้ตัวอย่างทดสอบทำการชั่งน้ำหนักและคำนวณหาค่าดัชนีการไหล



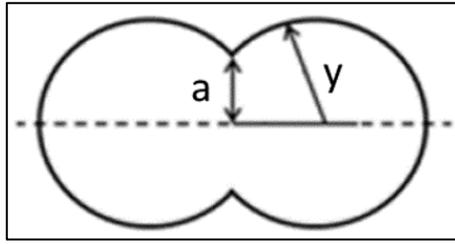
ภาพที่ 3.20 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index: MFI)

3.5.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุก่อนการขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้ใช้การตรวจสอบจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM , JSM-6510, JEOL, JAPAN) ดังแสดงในภาพที่ 3.21 เพื่อศึกษารูปร่างของวัสดุที่ใช้สำหรับงานวิจัยและศึกษาวัสดุหลังผ่านกระบวนการขึ้นรูป เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการ



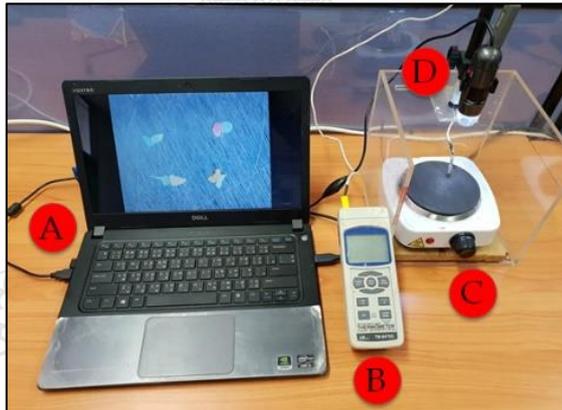
ภาพที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

3.5.5 เครื่องวิเคราะห์อัตราการหลอมของพลาสติก การวัดอัตราการหลอม (Sintering Rate) ของอนุภาคพลาสติกภายใต้สภาวะแรงเฉือนศูนย์ (Zero Shear Condition) เป็นค่าความสัมพันธ์ของระยะเวลา (Time) ต่ออุณหภูมิ (Temperature) อนุภาคจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมได้อย่างสมบูรณ์โดยความสมบูรณ์วัดได้จากมุมที่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 แสดงการหลอมรวมระหว่างพอลิเมอร์ 2 อนุภาค

แสดงให้เห็นค่า y คือพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคทั้ง 2 อนุภาคและ a คือรัศมีของอนุภาคในแต่ ละอนุภาคเมื่อนำ y/a มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่า อนุภาคทั้ง 2 หลอมรวมกันอย่างสมบูรณ์ เหมาะ สำหรับการสังเกตพฤติกรรมกรรมการหลอมของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในกรทดสอบ ดังแสดง ในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 เครื่องทดสอบอัตราการหลอมของพลาสติก

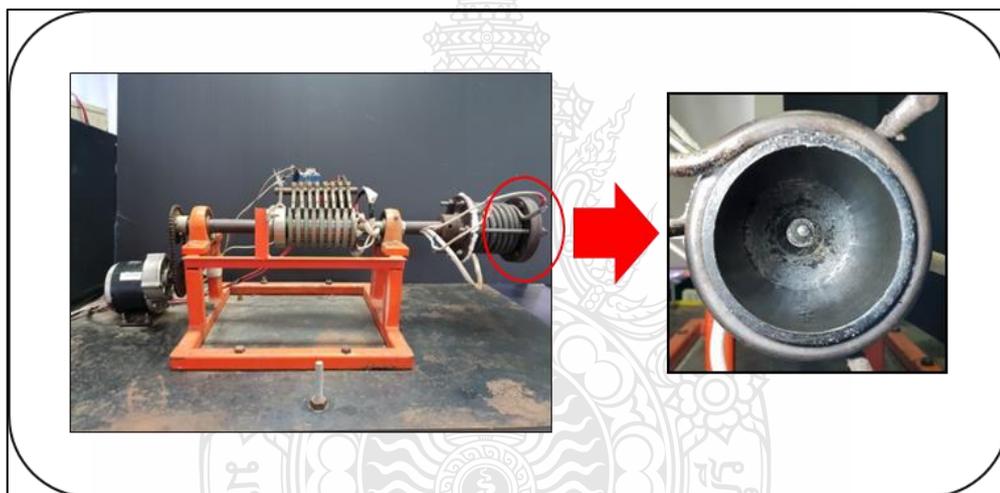
A คือ โปรแกรมประมวลผลประกอบด้วยคอมพิวเตอร์และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย ImageJ (Freeware)

B คือ อุปกรณ์การวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Temperature Data Logger) สามารถบันทึก อุณหภูมิตามช่วงเวลาที่ต้องการได้โดยต่อหัววัดอุณหภูมิ Thermocouple

C คือ ระบบให้ความร้อน (Heater Plate) สามารถให้ความร้อนสูงสุด 350 °C และสามารถ ปรับอัตราการให้ความร้อนได้ 6 ระดับ

D คือ กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital Microscope) รุ่น S04-600X กำลังขยายสูงสุด 25X-600X

3.5.6 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus) เครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบแกนเดียวสำหรับทำสอบการไหลของพลาสติกภายในแม่พิมพ์ต่อเวลาที่ใช้ในการกระบวนการขึ้นรูปและช่วงอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูป คณะวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประกอบด้วยเพลาคความยาว 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ปรับความเร็วรอบได้ 7-300 รอบต่อนาที แม่พิมพ์รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ความยาว 90 มิลลิเมตร ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าอุณหภูมิสูงสุด 400 °C ระบบระบายความร้อนเป็นพัดลมตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสามารถปรับอัตราการระบายความร้อน 3 ระดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus)

3.5.7 กระบวนการขึ้นรูป กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนใช้เครื่องขึ้นรูปแบบ Shuttle Style Machine ดังแสดงในภาพที่ 3.25 ถูกออกแบบภายในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ใช้เชื้อเพลิงแก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas : LPG) ในการให้พลังงานความร้อนรอบการหมุน 6 รอบต่อนาที หมุนตามแนวแกน X และ Y 360 องศา หล่อเย็นด้วยลม แม่พิมพ์มีขนาด 31 × 20 × 5 เซนติเมตร น้ำหนักที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นรูปกับชนิดพลาสติกโดยสามารถคำนวณได้จากการนำ ความหนาแน่นของพลาสติกที่ใช้ × ปริมาตรของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.25 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style Machine

3.5.8 กระบวนการผสมแบบ Melt Blend โดยเครื่อง Twin Screw Extruder ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รุ่น Plastograph ของบริษัท Brabender ของประเทศเยอรมนี โดยมีการหมุนของสกรูแบบ Co-Rotating มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 mm และมีค่า L/D เท่ากับ 40 โดยนำอัตราส่วนในการผสมแบบแห้ง ใช้ในการผสม เพื่อทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคแก้วกลมภายในพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วหลังจากผสมแบบหลอมเหลวจะถูกทำให้เป็นเม็ดพลาสติกอีกครั้งและทำการบดให้มีลักษณะเป็นรูปร่างผงอีกครั้ง เพื่อปรับให้เหมาะสมต่อกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนโดยเครื่อง Pulverizer และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 เครื่อง Twin Screw Extruder ใช้สำหรับกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว

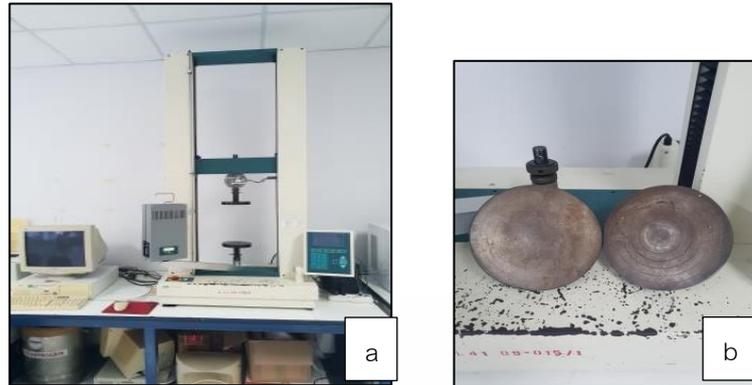
3.6 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเชิงกล

3.5.1 เครื่องมีวัดค่าการกระจายความหนาของชิ้นงานเป็นเครื่องมือชนิด Thickness Measurement Apparatus เพื่อใช้วัดค่าความหนาของชิ้นงานในแต่ละส่วน จากตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ จะใช้ส่วนด้านบนของกล่องทำการวัดความหนาในแต่ละจุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานกล่อง ดังแสดงในภาพที่ 3.27



ภาพที่ 3.27 เครื่องทดสอบ Thickness Measurement Apparatus และตัวอย่างในการสุ่มทดสอบของการกระจายความหนา

3.5.2 การทดสอบสมบัติด้านการรับแรงอัด (Compressive Strength) เนื่องจากเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus) เป็นเครื่องที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์ ดังนั้นตัวอย่างชิ้นงานจึงมีรูปแบบที่เฉพาะและไม่สามารถทดสอบด้วยมาตรฐานทาง ASTM ได้ ในการดำเนินงานทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบและจัดสร้างหัวชิ้นงานทดสอบขึ้นเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง rHDPE ถูกเติมด้วยแก้วกลบ กับ LLDPE เชิงอุตสาหกรรม เท่านั้น โดยหัวจับชิ้นงานเป็นหัวจับทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.28 (b) ซึ่งใช้ร่วมกับเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Hounsfield Model TG18 ทำสอบตามมาตรฐาน ASTM D3787 ดังแสดงในภาพที่ 3.28 (a) ชิ้นงานถูกใช้ในการทดสอบนี้เป็นทรงกระบอกกรวงตามลักษณะแม่พิมพ์ของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวมีความยาว 90 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร มีความหนา 3 มิลลิเมตร ข้อมูลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

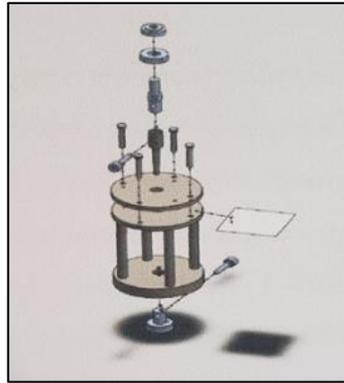


ภาพที่ 3.28 (a) เครื่องทดสอบการรับแรงแบบกดอัด (Compressive Strength) และ (b) หัวทดสอบการรับแรงแบบกดอัด

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการรับแรงกดอัด (Compressive Strength)

Load	500 นิวตัน
Extension	50 มิลลิเมตร
Test Speed	50 มิลลิเมตรต่อนาที
Test End Point	45 มิลลิเมตร

3.5.3 การทดสอบสมบัติด้านการเจาะทะลุ (Puncture Test) เป็นการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความเหนียวจนไม่สามารถทดสอบการทนแรงกระแทกด้วยวิธีอื่น ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบหัวจับชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.29 ถูกใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ยี่ห้อ Hounsfield Model TG18 มาตรฐานการทดสอบ D-3787 ชุดทดสอบ Puncture Test ประกอบด้วย ฐานยึดชิ้นเป็นการทดสอบแรงกด (Ring Clamp) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชุดจับชิ้นงานทดสอบ 120 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่นจับชิ้นงาน 44.45 มิลลิเมตร และหัวเจาะชิ้นทดสอบแบบหลุมทำจากโลหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ในการเจาะทะลุผิวพลาสติกเพื่อทดสอบความแข็งแรงลักษณะชิ้นงานเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 100 × 100 มิลลิเมตรสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบเช่น ความแข็งแรง ความเหนียว และการดูดซับพลังงาน เป็นต้น ข้อมูลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.29 เครื่องการทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test)

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test)

Load	300 นิวตัน
Extension	30 มิลลิเมตร
Test Speed	300 มิลลิเมตรต่อนาที
Test End Point	28 มิลลิเมตร



บทที่ 4

ผลการทดลอง

การศึกษานานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวัสดุที่ใช้สำหรับงานวิจัยโดยจะถูกแบ่งเป็น 2 ชนิด ฝาขวดน้ำดื่มชนิด (High Density Polyethylene: HDPE) หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash: RHA) โดยความแตกต่างชนิดของฝาขวดน้ำดื่มที่ระบุถึงหมายเลขซีซีเคิลหมายเลข 2 และไม่ระบุหมายเลขซีซีเคิลด้วยเทคนิคการทดสอบสมบัติด้านความร้อน (Differential Scanning Calorimetry: DSC) ขึ้นต่อมาวัสดุสำหรับงานวิจัยสำหรับการตรวจสอบสัณฐานวิทยาเพื่อเทียบกับพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปแบบหมุนโดยการตรวจสอบ ขนาด รูปร่าง การกระจายขนาด โดยกล้องกำลังขยาย 600X (Digital Microscope 600X) และโปรแกรมทำงาน ImagJ สำหรับการวิเคราะห์อนุภาคผงพลาสติก และทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปโดยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว และนำกรณีตัวอย่างขึ้นรูปโดยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนโดยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style เพื่อเปรียบเทียบระหว่าง พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเชิงการค้า (Linear Low Density Polyethylene: LLDPE), rHDPE (Recycle High Density Polyethylene: rHDPE) และ rHDPEผสมร่วมกับเถ้าแกลบ (rHDPE : RHA) ทดสอบการด้านการเจาะทะลุและวิเคราะห์บริเวณที่เสียรูปร่างของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเถ้าแกลบด้วยเทคนิควิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF)

จากผลการวิเคราะห์พบองค์ประกอบของธาตุจากเทคนิค X-ray Fluorescence: XRF ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถศึกษาและวิเคราะห์ทางเคมี ได้อีกทั้งยังวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพแบบไม่ต้องทำลายชิ้นงาน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวหรือธาตุหลายธาตุพร้อมกันได้ (Simultaneous) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า SiO_2 มีปริมาณสูงสุดอยู่ที่ 73.72 %, K_2O 1.63 %, Al_2O_3 1.79 %, CaO 1.07 %, Fe_2O_3 0.69 %, MgO 0.55 %, P_2O_5 0.73 %, TiO_2 0.13 % และองค์ประกอบธาตุอื่นๆรวมกันอีกประมาณ 2 % ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวอาจเป็นผลจากการผสมระหว่างเถ้าแกลบ ปุ๋ยและดินในแต่ละพื้นที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบธาตุภายในแก้วเคลือบ

Compound	Concentration (%)
SiO ₂	73.72
K ₂ O	1.63
Al ₂ O ₃	1.79
CaO	1.07
Fe ₂ O ₃	0.69
MgO	0.55
P ₂ O ₅	0.73
TiO ₂	0.13
Na ₂ O	0.10
MnO	0.09
SO ₃	0.16
Cl	0.05
ZrO ₂	0.03
ZnO	0.01
Rb ₂ O	0.01
SrO	0.01

4.2 การวิเคราะห์สมบัติอนุภาคผงเบื้องต้น

4.2.1 คุณสมบัติของผง

การกระจายขนาดเฉลี่ยของอนุภาคพลาสติกและค่าความกลมแสดงให้เห็นถึงความสามารถและประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน สำหรับ LLDPE มีการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 254 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.638 ซึ่งเป็นลักษณะที่ค่อนข้างกลมส่งผลต่ออัตราการไหลแบบแห้งมีค่า 9.4 sec กรณีของ rHDPE มีการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 255 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.560 ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่ง rHDPE ลักษณะพลาสติกถูกดึงยืดจนขาดในลักษณะพลาสติกอ่อนก่อกำให้เกิดลักษณะคล้ายหาง อนุภาคมีลักษณะเหมือนเส้นใยหรือเข็มและรวมถึงการปรากฏตัวของอนุภาคที่ผิดปกติคล้ายหางซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคอื่นบริเวณรอบทำให้ประสิทธิภาพการไหลต่ำ และอาจส่งผลให้การอัดตัวหรือประสิทธิภาพการบรรจุลดลงส่งผลให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ในกรณีอัตราการไหลแบบแห้ง ในกรณีแก้วเคลือบมีการกระจายขนาดเฉลี่ยอยู่ที่

174 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.480 มีรูปร่างลักษณะที่กระจายรูปร่างหลายลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 4.2

ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมส่วนแรกเป็นพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง (Dry Blend) อัตราส่วนแก้วแก่ลบร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นมวลรวม 0.293, 0.297 และ 0.312 g/cm^3 มีแนวโน้มของความหนาแน่นโดยรวมเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการอนุภาคพลาสติกที่ใช้ มีลักษณะเป็นหางสูงก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค อนุภาคแก้วแก่ลบบสามารถแทรกช่องว่างของอนุภาคพลาสติกส่งผลให้ความหนาแน่นมวลรวมดังกล่าวมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแก้วแก่ลบบที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อการเคลื่อนที่สู่ช่องว่างระหว่างอนุภาค

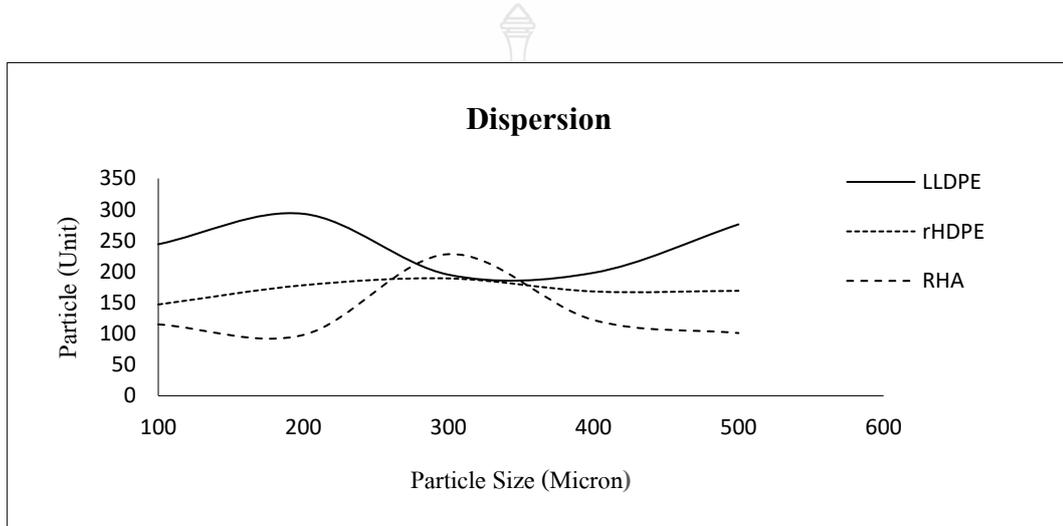
พอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มของความหนาแน่นมวลรวมลดลง อาจเป็นผลจากการหลอมรวมวัสดุเป็นอนุภาคเดียวกันเกิดการกระจายอนุภาคแก้วแก่ลบบได้ดีผลของการกระจายขนาดอนุภาคส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดความหนาแน่นโดยรวมของพอลิเมอร์ มักขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคที่เหมาะสม ซึ่งจากกระบวนการแก้วแก่ลบบผ่านการผสมแบบอัตรัดแก้วแก่ลบบส่วนใหญ่กระจายภายในอนุภาคพลาสติก และมีปริมาณรูที่ เกิดจากความไม่เข้ากันระหว่างแก้วแก่ลบบและพลาสติก ดังนั้นค่าความหนาแน่นโดยรวมจึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใส่แก้วแก่ลบบที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับอัตราการไหลแบบแห้งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเป็นผลมาจากรูปร่างซึ่งการเพิ่มขึ้นของรูปร่างที่ผิดปกติแสดงให้เห็นอัตราการลดลงของการไหลอนุภาค [39,41-42]

4.2.2 ค่าดัชนีการไหล

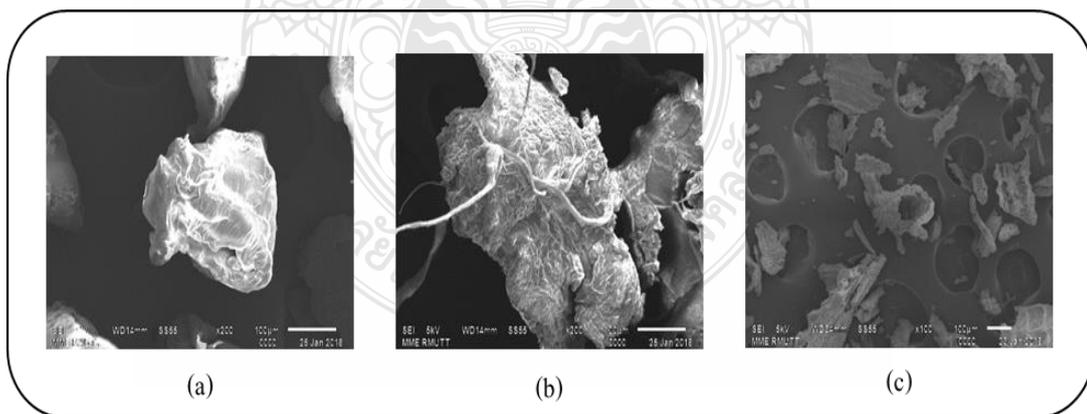
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบดัชนีการไหลหรือ Melt Flow Rate มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238 ใช้อุณหภูมิสำหรับการทดสอบเดียวกันหมดคือ 190 $^{\circ}\text{C}$ น้ำหนักกด 2.16 kg ค่าความหนืดส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน พอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูงมีความเป็นไปได้ยากสำหรับกระบวนการขึ้นรูปนี้เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนไม่มีแรงใดๆกระทำต่อพอลิเมอร์ สำหรับการเคลื่อนที่ ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูงสามารถขึ้นรูปได้ยากกว่าพอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำ จากการทดลอง LLDPE และ rHDPE มีค่าดัชนีการไหลอยู่ที่ 4 และ 7.88 $\text{g}/10\text{min}$ ตามลำดับ

สำหรับพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งผสมแก้วแก่ลบบอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีการไหล 4.62, 2.85 และ 1.95 $\text{g}/10\text{นาท}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอนุภาคของแก้วแก่ลบบขวางการเคลื่อนที่ของพลาสติก ซึ่งแก้วแก่ลบบมีลักษณะเป็นของแข็งไม่เกิดหลอมละลาย จากงานวิจัยของ นิลุบล [2] ได้กล่าวไว้ว่าวัสดุที่มีลักษณะเป็นของแข็งไม่เกิดการหลอมละลายจะขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ส่งผลให้ความหนืดมีแนวโน้มสูงขึ้น

ในส่วนพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวผสมเข้าเกลบอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีการไหล 4.47, 3.87 และ 3.31 g/10นาที่ การผสมแบบหลอมเหลวนี้นี้เป็นการผสมแบบอัดรีด ส่งผลให้เกิดการกระจายของอนุภาคเข้าเกลบได้ดีจากกระบวนการผสม วัสดุทั้งสองชนิดหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกันจึงมีค่าดัชนีการไหลลดลงไม่แตกต่างกันมาก การผสมแบบวิธีนี้ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นและเกิดการแยกออกจากกันที่มากขึ้นจึงเป็นส่วนหนึ่งให้ค่าดัชนีการไหลมีค่าที่สูงขึ้น (หรือเกิดความหนืดต่ำลง) ดังแสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 ช่วงการกระจายขนาดอนุภาค LLDPE, rHDPE และ RHA



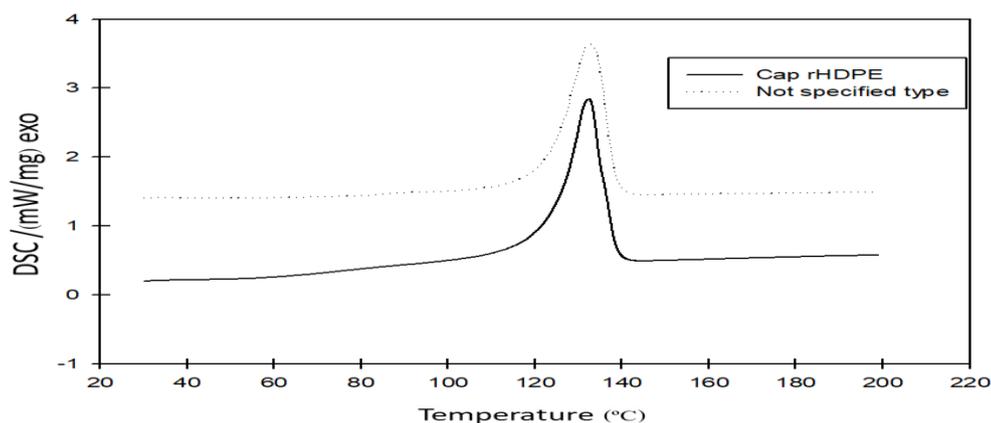
ภาพที่ 4.2 ลักษณะรูปร่างผงพลาสติก (a) LLDPE, (b) rHDPE และ (c) RHA

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของผงและเม็ดแก้ว

Material	Particle Size (μm)	Circularity	Bulk Density (g/cm^3)	Dry Flow (Sec)	Melt Flow Index ($\text{g}/10\text{min}$)
LLDPE	254	0.639	0.384	9.4	4
rHDPE	255	0.560	0.292	-	7.88
RHA	174.1	0.480	0.282	12.67	-
rHDPE : RHA Dry 10 %wt.	-	-	0.293	-	4.62
rHDPE : RHA Dry 20 %wt.	-	-	0.297	-	2.85
rHDPE : RHA Dry 30 %wt.	-	-	0.312	-	1.95
rHDPE : RHA Melt 10 %wt.	291	0.466	0.287	-	4.47
rHDPE : RHA Melt 20 %wt.	380	0.472	0.233	-	3.87
rHDPE : RHA Melt 30 %wt.	354	0.514	0.222	-	3.31

4.3 ผลวิเคราะห์ลักษณะฟลาวด์น้ำ

จากการทดสอบฟลาวด์น้ำดื่มที่ระบุชนิดและไม่ระบุชนิดโดยการทดสอบสมบัติด้านความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry: DSC) ซึ่งแสดงถึงสมบัติการนำความร้อนของ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แสดงในภาพที่ 4.3



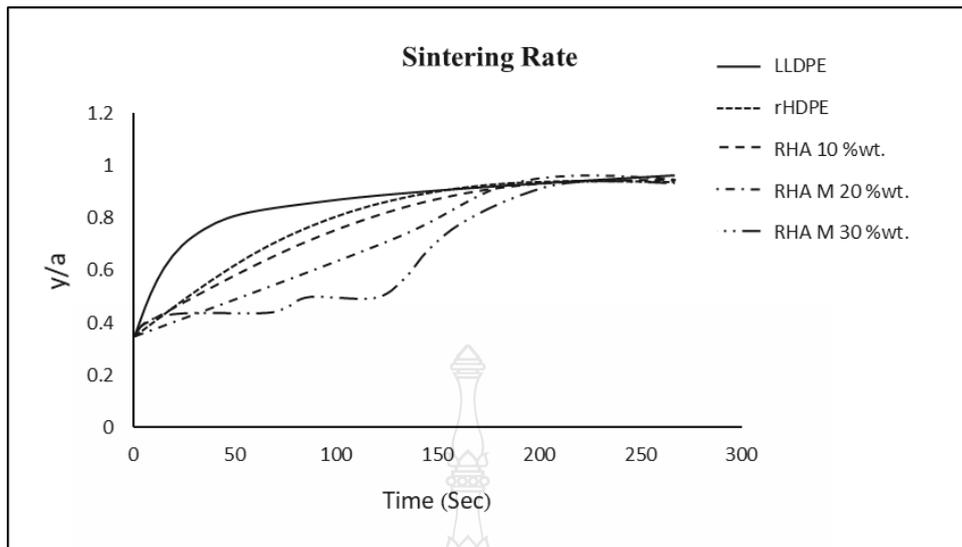
ภาพที่ 4.3 ผลทางความร้อนของพอลิเมอร์สองชนิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry: DSC)

ผลของสมบัติการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนทั้งสองชนิดแสดงถึงกราฟที่บ่งชี้ถึงอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุ (Glass Transition Temperature) โดยฟลาชวอร์ระบุหมายเลขรีไซเคิล หมายเลข 2 มีอุณหภูมิการหลอมละลาย 132.4 °C ฟลาชวอร์ระบุหมายเลขรีไซเคิลมีอุณหภูมิการหลอมละลาย 132.7 °C พบว่าลักษณะอุณหภูมิการหลอมละลายวัสดุทั้งสองชนิดใกล้เคียงกัน คาดว่าฟลาชวอร์ระบุหมายเลขรีไซเคิลเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

4.4 การวิเคราะห์ทางความร้อน Sintering Rate

การทดลองอัตราการหลอมรวมกันของพอลิเมอร์มีความสำคัญต่อการคาดเดาอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปกระบวนการ สำหรับการทดสอบนี้ตัวอย่างทดสอบถูกวางไว้บนแผ่นให้ความร้อนและพอลิเมอร์ใช้สำหรับการทดสอบจะวางผิวสัมผัสติดกัน โดยที่เมื่อเริ่มให้ความร้อนวัสดุเกิดการขยายตัวของอนุภาคจากวัสดุสองอนุภาคที่มีผิวสัมผัสติดกันกลายเป็นอนุภาคเดียวกัน LLDPE เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นลักษณะพลาสติกนิ่มคล้ายยางที่อุณหภูมิ 84 °C อนุภาคหลอมเป็นอนุภาคเดียวกันอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 120.5 °C rHDPE เริ่มเปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิ 87.2 °C และหลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกันที่อุณหภูมิ 127.6 °C ซึ่ง วัสดุทั้งสองชนิดส่งผลต่ออัตราการได้รับความร้อนและความหนืดของวัสดุอุณหภูมิที่ได้รับจึงมีอุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนแปลงสถานะของพอลิเมอร์แตกต่างกัน [42-44]

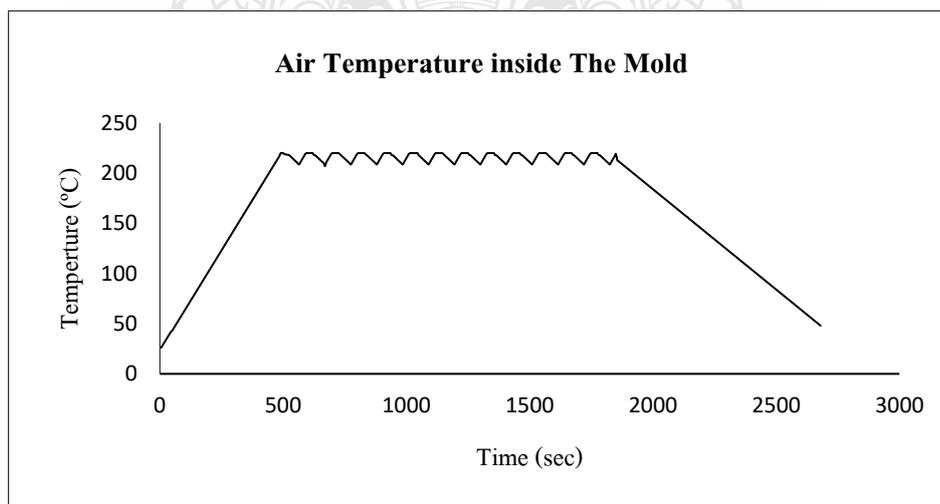
ในกรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะที่อุณหภูมิ 107.6 °C หลอมรวมเป็นอนุภาคเดียวกันอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 132.7 °C ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า rHDPE มีอุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว อาจเป็นผลจากความหนืดของวัสดุส่งผลต่ออัตราการหลอมความหนืดสูงจะใช้อุณหภูมิสูงสำหรับการหลอมละลาย อีกทั้งอนุภาคแก้วที่ผสมกับพลาสติกก่อให้เกิดการขวางสายโซ่โมเลกุลความสามารถในการส่งผ่านความร้อนระหว่างอนุภาคพลาสติกต่ำลง ในปริมาณการเติมแก้วที่เพิ่มขึ้น การส่งผ่านความร้อนจะต่ำลงเนื่องจาก พลาสติกและแก้วไม่สามารถหลอมเป็นอนุภาคเดียวกันอย่างสมบูรณ์ก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค ดังนั้นการส่งผ่านความร้อนของอนุภาคจึงต่ำ



ภาพที่ 4.4 ผลแสดงค่าการนำความร้อนของ LLDPE, rHDPE และ rHDPE : RHA

4.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus)

ชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว เพื่อทดสอบลักษณะการหมุนภายในแม่พิมพ์โดยแม่พิมพ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 mm ยาว 90 mm ผนังแม่พิมพ์มีความหนา 4 mm ให้ความร้อนโดยกระแสไฟฟ้าผ่านตัวส่งสัญญาณ (Slip ring) โดยใช้พัดลมอุตสาหกรรมสำหรับการทำให้ชิ้นงานเย็นตัว ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิภายในเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว

Technical Parameter	value
ขนาดชิ้นงานทดสอบ (d*h)	60*90 mm
ปริมาณวัสดุที่ใช้ความหนา 3 มิลลิเมตร	49 g
อุณหภูมิภายนอกแม่พิมพ์	220 °C
อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์	180 °C
รอบการหมุน	7 rpm
เวลาสำหรับกระบวนการขึ้นรูป	0-48 min

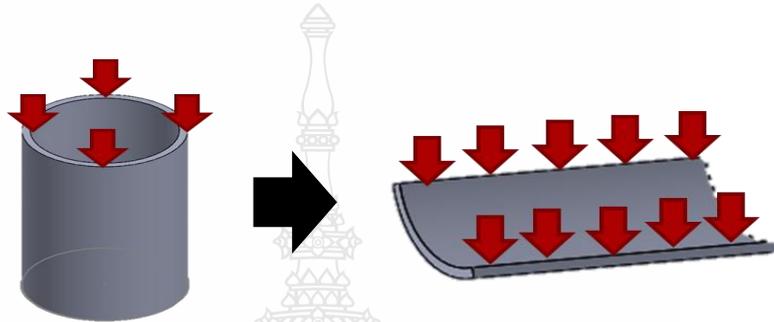
จากภาพที่ 4.5 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ถูกตั้งให้สูงถึง 240 °C เนื่องจากเกิดการสูญเสียในชั้นบรรยากาศและให้อุณหภูมิขึ้นรูปประมาณ 190 °C กระบวนการหล่อเย็นให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 50-60 °C ทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ชิ้นงานที่ได้ตามอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.6 โดยที่ LLDPE, rHDPE และพอลิเมอร์ผสมแก้วแบบแห้งอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 พอลิเมอร์ผสมแก้วแบบหลอมเหลวอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก สามารถขึ้นรูปได้ตามแบบแม่พิมพ์ กรณีของการเติมแก้วแบบแห้งอัตราส่วนร้อยละ 30 ไม่สามารถขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่แก้วภายในแม่พิมพ์ขึ้นรูปเกาะกลุ่มกันเอง (Self-Agglomeration) ส่วนที่หลอมตัวของวัสดุเกิดขึ้นเฉพาะในส่วนของพลาสติกกรีไซเคิลจึงเป็นสาเหตุให้เนื้อวัสดุผสมที่เหลืออยู่ไม่สามารถยึดเกาะผิวแม่พิมพ์ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป [33]



ภาพที่ 4.6 ชิ้นงานทดสอบจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว

4.6 การกระจายขนาดความหนาชิ้นงาน

การกระจายความหนาชิ้นงานจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียวแสดงถึงประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ของวัสดุ โดยลักษณะการเคลื่อนที่ที่ดีควรมีการกระจายความหนาที่เท่ากันหรือมีความใกล้เคียงกันทุกบริเวณ งานวิจัยนี้ชิ้นงานถูกตัดตามแนวยาวและวัดตามแนวยาวและใช้ไมโครมิเตอร์ดิจิทัลวัดค่าความหนาและแสดงลักษณะการกระจายความหนาเป็นค่าเฉลี่ย ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ชิ้นงานทดสอบการกระจายความหนาชิ้นงาน

LLDPE แสดงการกระจายความหนาของผนังได้ดีกว่าวัสดุอื่นชนิดอื่นเนื่องจากอนุภาค LLDPE มีลักษณะที่ค่อนข้างกลมและอนุภาคมีการกระจายขนาดใกล้เคียงกันจึงส่งอัตราการหลอมละลายระหว่างอนุภาคพลาสติกและการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ได้ดีกว่าอนุภาคชนิดอื่น

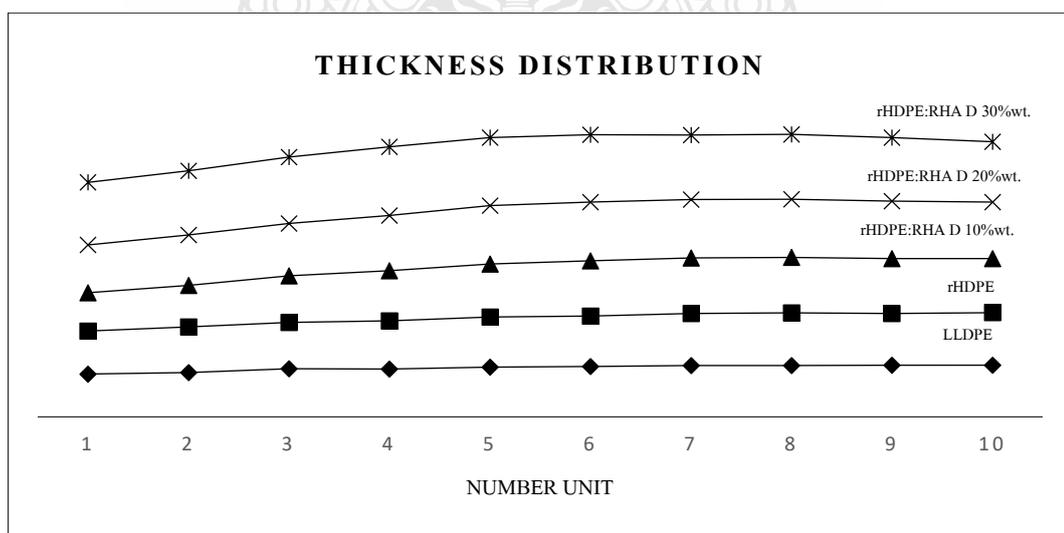
กรณี rHDPE ผ่านกระบวนการบดเป็นผงอนุภาคใหม่ จากเครื่องบดลดขนาดจากกระบวนการดังกล่าวเกิดรูปร่างที่ผิดปกติหรือมีหางจากการขาดของวัสดุเหนียว อนุภาคเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคเยอะกว่า LLDPE จากการหลอมของอนุภาคผงคล้ายทางผลกระทบนี้นำส่งผลให้ความหนาชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้น

กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งปริมาณแก้วเกลบร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับมีแนวโน้มการก่อตัวของผนังความหนาชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการใช้แก้วเกลบ เนื่องจากแก้วเกลบเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนและไม่สามารถหลอมละลายได้คล้ายกับพอลิเมอร์ อนุภาคเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 4.8

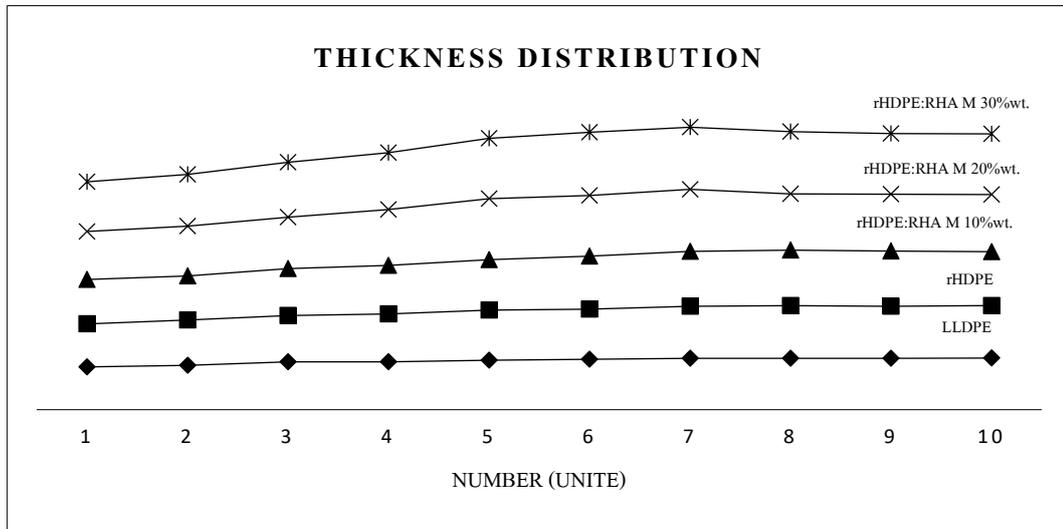
กรณีของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว เกิดลักษณะคล้ายกับพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง แสดงดังภาพที่ 4.9 จากกระบวนการผสมการกระจายอนุภาคแก้วเกลบภายในเนื้อพลาสติกกระจายตัวได้ดีและหลอมรวมเข้าด้วยกันความหนาที่ได้ภายในชิ้นงานจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การกระจายผนังความหนาชิ้นงานจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเครื่อง Axial Powder Flow Apparatus

ตำแหน่ง	การกระจายความหนา (มิลลิเมตร)							
	LLDPE	rHDPE	rHDPE : RHA Dry Blend			rHDPE : RHA Melt Blend		
			10 %wt.	20 %wt.	30 %wt.	10 %wt.	20 %wt.	30 %wt.
1	2.93	2.94	2.62	3.27	4.28	3.04	3.29	3.40
2	3.04	3.10	2.85	3.46	4.38	3.01	3.42	3.55
3	3.29	3.17	3.20	3.6	4.50	3.21	3.52	3.74
4	3.28	3.28	3.45	3.77	4.71	3.31	3.82	3.90
5	3.40	3.43	3.65	4.00	4.65	3.45	4.18	4.13
6	3.45	3.45	3.78	4.02	4.62	3.62	4.16	4.32
7	3.52	3.55	3.81	3.98	4.43	3.77	4.24	4.25
8	3.52	3.61	3.78	3.98	4.45	3.80	3.85	4.26
9	3.53	3.56	3.75	3.95	4.33	3.78	3.88	4.16
10	3.54	3.59	3.70	3.88	4.12	3.70	3.90	4.15
ค่าเฉลี่ย	3.35	3.36	3.45	3.88	4.47	3.46	3.82	3.98
	±0.06	±0.07	±0.13	±0.08	±0.05	±0.09	±0.1	±0.1



ภาพที่ 4.8 ความหนาจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน LLDPE, rHDPE, พอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง

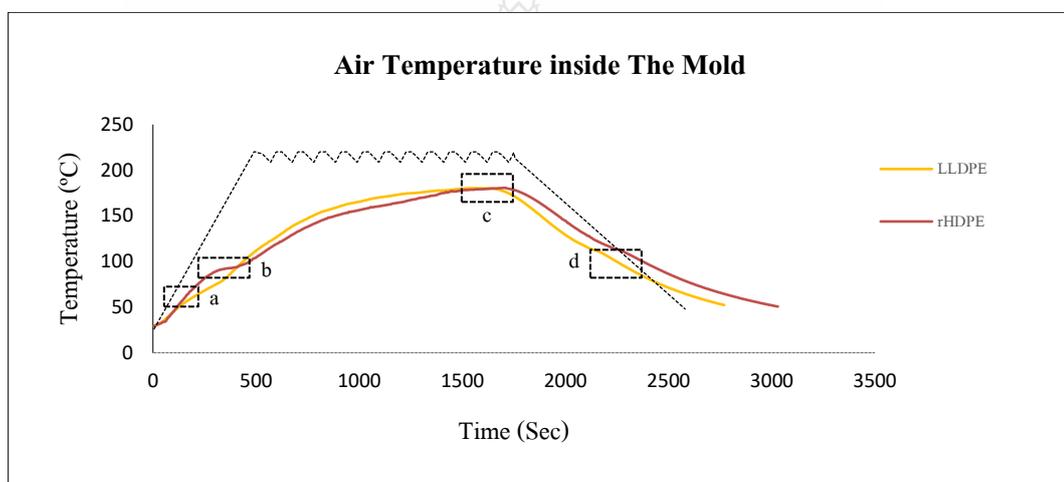


ภาพที่ 4.9 ความหนาจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน LLDPE, rHDPE และ พอลิเมอร์ผสมแบบ หลอมเหลว

4.7 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ขณะหลอมเหลว

พฤติกรรมการไหลภายในแม่พิมพ์ได้รับความร้อนโดยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว และ บันทึกข้อมูลอุณหภูมิโดยการใช้ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกชนิด LLDPE และ rHDPE แสดงในภาพที่ 4.10 บริเวณจุดแรกเริ่มรับความร้อนที่บริเวณ จุด a คือจุดที่ พลังงานความร้อนภายในผิวแม่พิมพ์เกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิภายในแม่พิมพ์สูงขึ้นพลาสติก ภายในแม่พิมพ์เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ ในจุด b อนุภาคพลาสติกภายในแม่พิมพ์จะหลอมละลาย ติดกันทุกอนุภาคและจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ จุด c คือบริเวณที่อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ถูกหยุดที่ 190 °C ซึ่งเป็นผลจากการขาดเอาอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กระบวนการ Sintering Rate และบริเวณจุด d คือ อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำและสามารถปลดชิ้นงานออกจากตัวแม่พิมพ์ ในขั้นต้นจาก ลักษณะของแข็งกลายเป็นพลาสติกอ่อนนุ่มเกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ การหลอมของอนุภาคพลาสติกชนิด LLDPE เริ่มติดที่ผิวแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิในช่วง 50 °C สำหรับ rHDPE เริ่มเกิดการหลอมติดที่บริเวณผิว แม่พิมพ์ในช่วงอุณหภูมิ 60 °C เนื่องจากความเป็นฉนวนของ LLDPE ต่ำ สายโซ่โมเลกุลสั้น จึงเป็นเหตุให้ อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ของ LLDPE มีอุณหภูมิต่ำกว่า rHDPE ที่เวลาเดียวกัน ในช่วงจุด b ซึ่งอุณหภูมิ อยู่ในช่วง 70 °C และ 88 °C ตามลำดับ rHDPE มีอัตราการหลอมละลายต่ำกว่า LLDPE ความแตกต่าง ในช่วงอุณหภูมิเกิดจากพฤติกรรมไหลที่ไม่เหมาะสมของ rHDPE เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคและ

ความเป็นฉนวนที่เพิ่มสูงขึ้นจากพอลิเมอร์ที่ก่อเป็นผนังความหนาขึ้นงาน บริเวณจุด c อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์หลอมละลายโดยสมบูรณ์ และเริ่มกระบวนการหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนพอลิเมอร์หลอมเหลว วัสดุจะเริ่มคงรูปกลับมาเป็นสถานะของแข็งอีกครั้ง จากจุด c ไปยังจุด d อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ของ LLDPE สามารถถ่ายเทอุณหภูมิได้รวดเร็วกว่า rHDPE โดยปกติแล้วค่าการนำความร้อนของวัสดุมีความสำคัญต่อกระบวนการในแง่ของเวลาในกระบวนการ ขณะที่แม่พิมพ์เริ่มหล่อเย็นพอลิเมอร์ที่ติดกับผิวแม่พิมพ์จะกลายเป็นสถานะของแข็ง การสะสมความร้อนภายในแม่พิมพ์ที่มีพอลิเมอร์แข็งติดผนังส่งผลให้การคายความร้อนมีแนวโน้มต่ำลง [45,46]

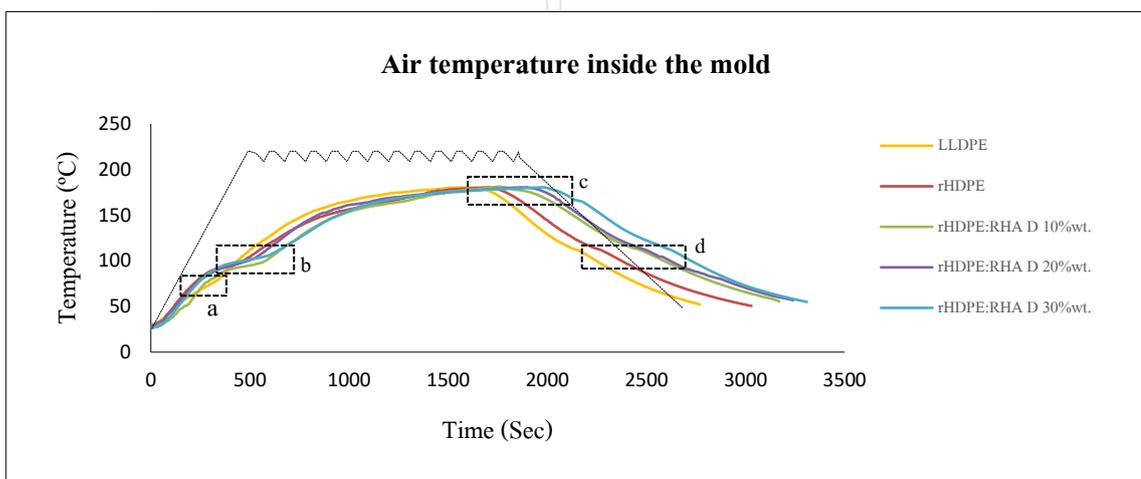


ภาพที่ 4.10 ผลแสดงอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์พลาสติก LLDPE และ rHDPE

4.7.1 กรณีของพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง

จากภาพที่ 4.11 กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ ผงพลาสติก และเม็ดแก้วที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคไปยังบริเวณผิวแม่พิมพ์ ส่งผลให้บริเวณนี้เกิดการหลอมเหลวติดผิวแม่พิมพ์เป็นช่วงเริ่มแรกเกิดเป็นการหลอมผสมกันระหว่างเม็ดแก้วและ rHDPE ซึ่งบริเวณดังกล่าวคือจุด a เป็นจุดที่เริ่มเกิดการหลอมละลายของ LLDPE เซิงการค้า rHDPE ที่อุณหภูมิประมาณ 50 และ 61 °C และการเติมเม็ดแก้วอัตราส่วน 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักมีอุณหภูมิ 66, 67 และ 72 °C ตามลำดับการเพิ่มปริมาณเม็ดแก้ว จากนั้นอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลจากการกักเก็บความหนาเพิ่มขึ้นจากการหลอมของอนุภาคพลาสติกและเม็ดแก้ว บริเวณจุด b ที่อุณหภูมิ 92, 97 และ 105 °C พลาสติกที่บริเวณนี้เกิดการหลอมติดกับพื้นผิวแม่พิมพ์ขึ้นความหนาขึ้นงานบริเวณจุดนี้มากที่สุดและอนุภาคเม็ดแก้วที่มีความสามารถในการดูดซับ

อุณหภูมิ การหลอมละลายใช้ระยะเวลามากกว่า LLDPE หลังจากกระบวนการให้ความร้อนอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์สูงถึง 190 °C ที่บริเวณจุด C ทำการหล่อเย็นโดยใช้พัดลมอุตสาหกรรมที่ การเย็นตัวของชิ้นงานแตกต่างกันโดย LLDPE อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ลดลงเร็วกว่าการเติมแก้วเคลือบอัตราส่วน 10, 20 และ 30 ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน อาจเป็นผลมาจากแก้วเคลือบที่มีปริมาณรูพรุนสูงสามารถกักเก็บอุณหภูมิความร้อนได้ [47] อีกทั้งชั้นความหนาของพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นฉนวนอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ กระบวนการขึ้นรูปโดยเติมแก้วเคลือบจึงมีแนวโน้มใช้ระยะเวลามากกว่า LLDPE เซิงการค้ำ และ rHDPE

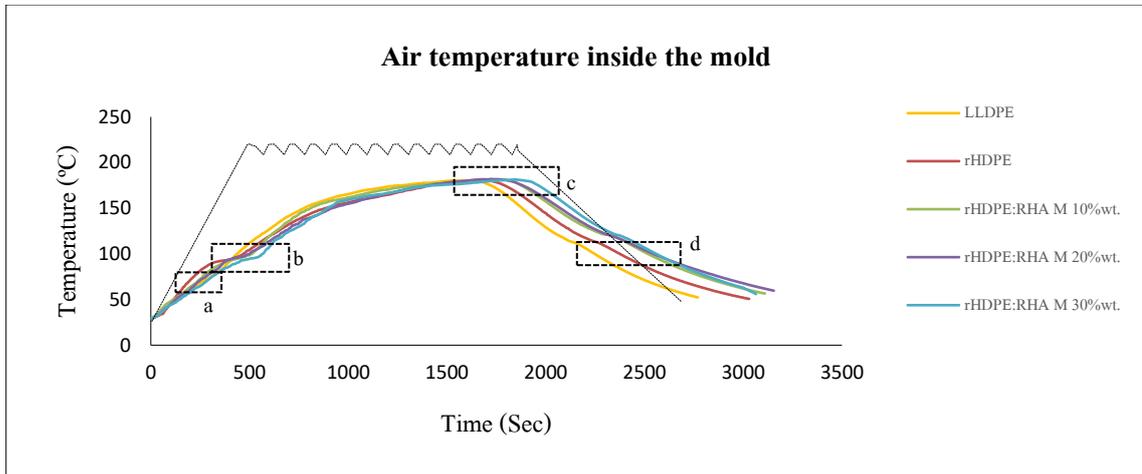


ภาพที่ 4.11 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง

4.7.2 กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว

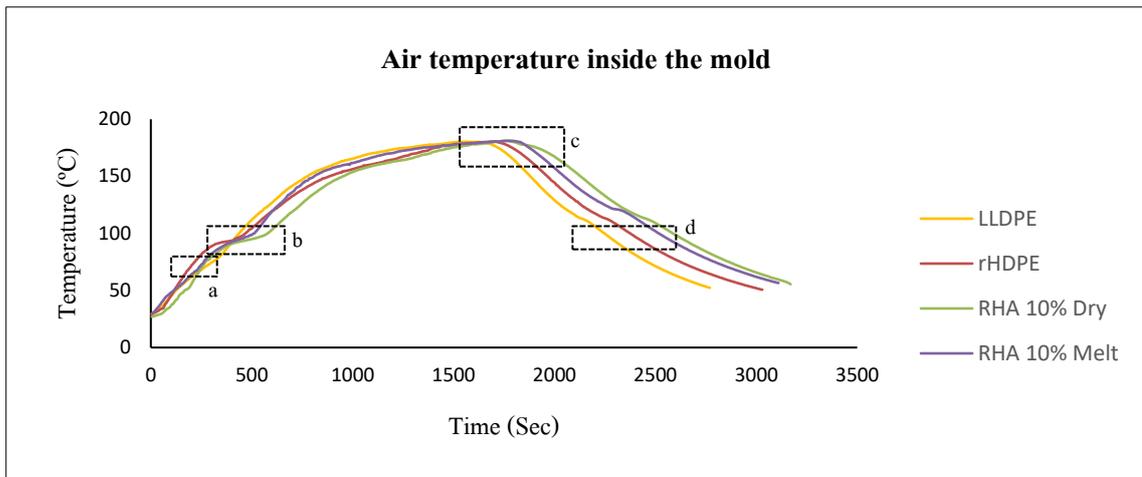
ภาพที่ 4.12 สำหรับกรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว จากลักษณะการผสมแบบหลอมเหลวของวัสดุและผ่านกระบวนการบดลดขนาดทำให้วัสดุในการทดลองนี้มีลักษณะการไหลคล้าย rHDPE ซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่ที่บริเวณผิวแม่พิมพ์เป็นอนุภาคของผงพลาสติกอนุภาคเล็กเมื่อเกิดการเคลื่อนที่และให้อุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นอนุภาคเหล่านี้จะเริ่มเกิดการหลอมติดบริเวณผิวแม่พิมพ์ ที่บริเวณจุด a พอลิเมอร์ผสมแก้วเคลือบแบบหลอมเหลวอัตราส่วน 10, 20 และ 30 มีอุณหภูมิ 64, 65 และ 66 °C เกิดเป็นการหลอมละลายเป็นชั้นภายในแม่พิมพ์ บริเวณจุด b เป็นบริเวณที่อนุภาคทั้งหมดภายในแม่พิมพ์หลอมติดกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่ง LLDPE มีอุณหภูมิ 70 °C และ rHDPE มีอุณหภูมิ 90 °C พอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวมีอุณหภูมิ 94, 96 และ 97 °C บริเวณจุด b ไปยังจุด c เนื่องจากชั้นผนังความหนาที่เพิ่มสูงขึ้นจากการหลอมของพลาสติก ส่งผลให้อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างใช้เวลานาน อาจเป็นผลจากความเป็ฉนวนของ rHDPE และแก้วเคลือบ หลังจากอุณหภูมิถึง 190 °C จะ

หยุดให้ความร้อนภายนอกและหล่อเย็นอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์จะต่ำลง จากจุด c ถึงจุด d พอลิเมอร์ผสมเข้าแกลบบแบบหลอมเหลวอัตราส่วนการเติมเข้าแกลบบร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมีเวลาในกระบวนการต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตนเองระหว่างพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว



ภาพที่ 4.12 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว

จากภาพที่ 4.13 กราฟแสดงถึงอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ของ LLDPE, rHDPE และการเติมเข้าแกลบบ 10 %wt. ของกระบวนการผสมแบบแห้งและแบบหลอมเหลว อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ของการผสมแบบหลอมแห้งใช้เวลาในกระบวนการนานกว่าวัสดุชนิดอื่นเนื่องจาก ความเป็นฉนวนและการเกิดรูพรุนสูงการถ่ายเทอุณหภูมิจึงต่ำ ที่จุด a อุณหภูมิประมาณ 50, 61, 66 และ 64 °C ตามลำดับ หลังจากนั้นพลาสติกก็จะเป็นชั้นความหนาภายในแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้นที่จุด b บริเวณนี้วัสดุจะมีความหนาบริเวณผิวแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 70, 88, 94 และ 92 °C ตามลำดับ การถ่ายโอนความร้อนจากภายนอกสู่ภายในแม่พิมพ์เป็นไปได้ยากขึ้น อีกทั้งลักษณะที่เกิดเป็นรูพรุนและช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เกิดจากการผสมเข้าแกลบบยังส่งผลให้การหลอมของพลาสติกอีกด้วย จากจุด b ไปยังจุด c LLDPE อัตราการหลอมของวัสดุใช้เวลาในกระบวนการขึ้นรูปเร็วกว่าวัสดุชนิดอื่น กระบวนการหล่อเย็นจากจุด c ไปยังจุด d การถ่ายโอนความร้อนที่ต่ำของ rHDPE ส่งผลต่อระยะเวลาในกระบวนการมากกว่า LLDPE สำหรับการเติมเข้าแกลบบอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก กรณีการผสมแบบแห้งใช้ระยะเวลามากกว่ากระบวนการผสมแบบหลอมเหลว เนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ในส่วนการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ของการผสมแบบหลอมเหลวเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า จึงส่งผลต่อการใช้เวลาในกระบวนการผลิต



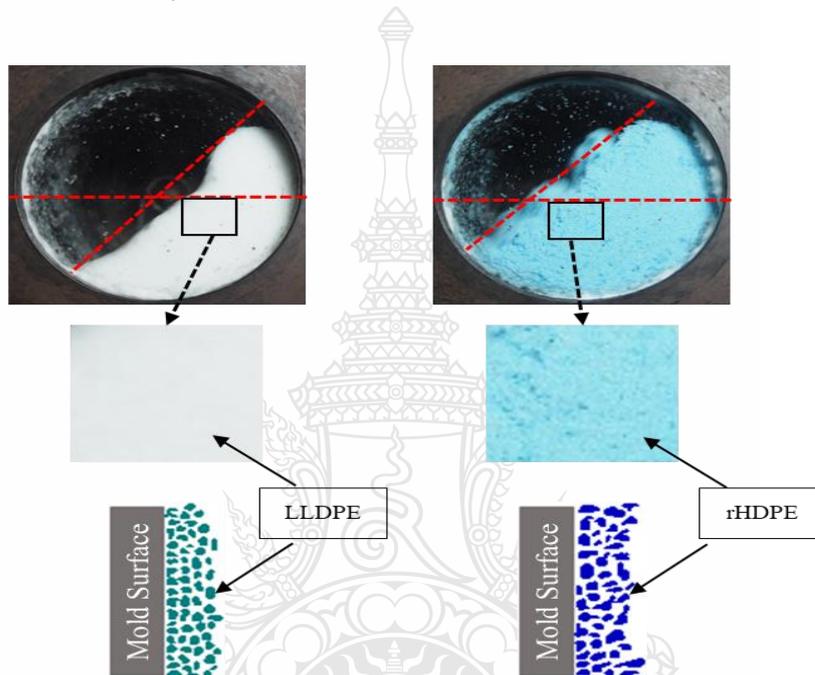
ภาพที่ 4.13 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว

4.8 การแยกอนุภาคและการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์

พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นมีลักษณะเฉพาะซึ่งขึ้นรูปกับรูปร่าง ขนาด และชนิดของวัสดุ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายโดยแยกจากลักษณะของวัสดุ การแสดงลักษณะความแตกต่างระหว่าง LLDPE, rHDPE และ พอลิเมอร์ผสม ซึ่งความแตกต่างระหว่างวัสดุแสดงให้เห็นถึงการแยกระหว่างอนุภาค การเคลื่อนที่และการหลอมละลายของวัสดุ โดยทั่วไปภายในแม่พิมพ์กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนอนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคที่มีลักษณะผิดปกติ (หาง) ไปสู่ตำแหน่งที่ต่ำกว่าพื้นผิวการไหลหรือผิวแม่พิมพ์ได้ดีกว่า [21] แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับกรณี LLDPE ที่ขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน LLDPE เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปยังผิวแม่พิมพ์ เริ่มเกิดการละลายติดผิวการไหลแบบนี้เรียกว่าการไหลแบบคูลอมบ์ จะมีมุมการไหลอยู่ที่ประมาณ 25° แต่จะไม่เกิน 50° ซึ่งจะเรียกว่า มุมการไหลแบบไดนามิกส์ เกิดการยึดติดบริเวณผิวแม่พิมพ์เมื่อได้รับความร้อนเพียงพออนุภาคจะหยุดเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ชั้นของ LLDPE จะหลอมเหลวกลายเป็น เลเยอร์ชั้นใน กลไกของการเกิดเหตุการณ์นี้แสดงได้ชัดเมื่ออนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่สูงและการกระจายขนาดของอนุภาคเหมาะสม [48]

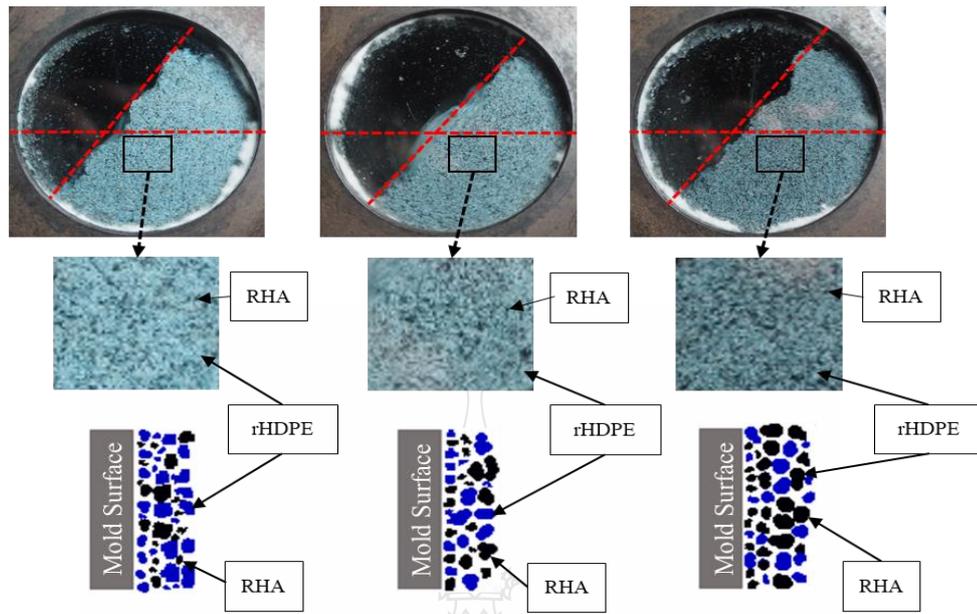
4.8.1 กรณี rHDPE รูปแบบการแยกอนุภาคเกิดขึ้นคล้ายกับกรณีในขั้นต้นในขณะแม่พิมพ์หมุน ลักษณะอนุภาคขนาดใหญ่แสดงการเคลื่อนที่ด้านบนผิวภายในแกนกลางขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ที่เวลาเดียวกันเนื่องจากรูปร่างที่ผิดปกติ (หาง) ในขณะที่รูปร่างที่มีลักษณะของหางจะส่งผลต่อคุณสมบัติการไหล นำไปสู่ปัญหาการหลอมเป็นอนุภาคเดียวกัน ทำให้เกิดปัญหาในแม่พิมพ์หรือเกิดโพรงภายในแม่พิมพ์ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากมี

โอกาสที่จะจับตัวเป็นก้อนและกระจายตัวได้ไม่ดี ส่งผลให้ rHDPE เกิดการไหลแบบถล่ม ในส่วนแรก พลาสติกอยู่ในแม่พิมพ์จะไหลด้วยความเร็วคงที่อยู่ที่พื้นผิวแม่พิมพ์ซึ่งผนังพลาสติกภายในจะมีมวลเกินกว่ามุมการไหลแบบไดนามิกส์ ณ จุดที่เป็นส่วนบนของมวลของพลาสติกจะแยกออกจากผนังแม่พิมพ์ และตกลงสู่ส่วนล่างภายในแม่พิมพ์ ในส่วนที่เหลือผนังพลาสติกก็จะกลายเป็นแบบความเร็วคงที่และจะเกิดขึ้นอีกครั้งโดยแม่พิมพ์หมุนและเกิดการถล่มเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการไหลของพลาสติกจึงไม่สามารถจัดเป็นการไหลของผนังพลาสติกแบบคูลอมบ์หรือการไหลของพลาสติกชนิด [21] ดังแสดงในภาพที่ 4.14



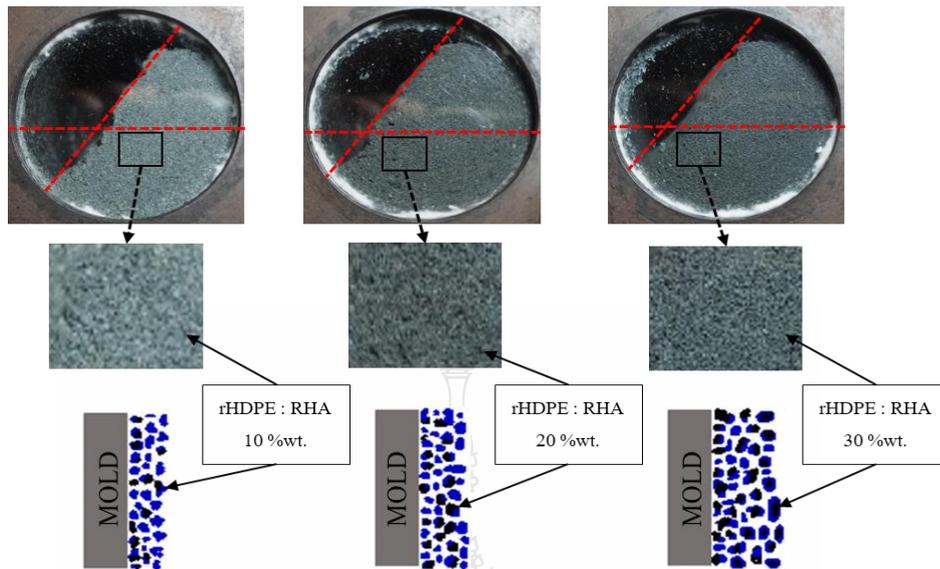
ภาพที่ 4.14 การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ของอนุภาค LLDPE และ rHDPE

4.8.2 กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแข็งพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ อนุภาคผงและเม็ดขนาดเล็กจะผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคไปยังผิวแม่พิมพ์การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์เกิดการไหลแบบถล่ม เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคผนังพลาสติกที่มีลักษณะผิดปกติ เม็ดพลาสติกจะแทรกกระหว่างอนุภาคดังกล่าวนี้ไปยังบริเวณผิวแม่พิมพ์ เมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวแม่พิมพ์พลาสติกที่มีพื้นผิวสัมผัสได้รับความร้อนเกิดการหลอมละลายในอัตราที่ต่ำและเกิดอย่างช้าที่บริเวณผิวแม่พิมพ์มีอนุภาคเม็ดและอนุภาคผงพลาสติกบริเวณนั้นที่อุณหภูมิการขึ้นรูปอนุภาคที่จุดหลอมเหลวต่ำละลายติดผิวแม่พิมพ์เป็นชั้นจนเกิดการหลอมละลายของอนุภาคพลาสติกทั้งหมดเกิดการเคลือบเม็ดพลาสติกภายในแม่พิมพ์ส่งผลให้เป็นชิ้นงานเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ของพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนเถ้าเคลือบ 10, 20, 30 โดยน้ำหนัก

4.8.3 กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว rHDPE ผสมเถ้าเคลือบถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันกับพลาสติกและบดลดขนาดเป็นอนุภาคผง คล้ายกรณีของ rHDPE ที่อุณหภูมิห้องจากลักษณะอนุภาคผงที่ผิดปกติ (หาง) เมื่อแม่พิมพ์เกิดการเคลื่อนที่อนุภาคขนาดใหญ่จะเคลื่อนเข้าสู่แกนกลางอนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างอนุภาคไปยังพื้นผิวเกิดการไหลแบบถล่ม หลังจากได้รับความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอนุภาคผงเริ่มเกิดการหลอมที่บริเวณผิวแม่พิมพ์อนุภาคเกิดการหลอมขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากเถ้าเคลือบแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคพลาสติกส่งผลให้การได้รับความร้อนระหว่างอนุภาคพลาสติกมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น อนุภาคทั้งหมดกลายเป็นของเหลวมีแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคพลาสติกและพื้นผิวแม่พิมพ์จะเกิดขึ้น หลังจากทีอนุภาคติดกับผิวแม่พิมพ์แสดงว่าแรงยึดเกาะเพียงพอที่ชนะแรงโน้มถ่วงได้เป็นชั้นฟิล์มบางๆหลายชั้นหลอมรวมกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวอัตราส่วนแก้วกลบ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

กรณีอนุภาคที่ได้รับจากการบดลดขนาดทั้ง rHDPE และ rHDPE : RHA ในขณะที่แม่พิมพ์เริ่มเกิดการเคลื่อนที่และให้ความร้อนที่เวลาเดียวกัน อนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคเนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มีรูปร่างที่ผิดปกติ และความแตกต่างของชนิดวัสดุ ปัจจัยเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนมีโอกาสที่จะหลอมเร็วกว่าอนุภาคใหญ่ อีกทั้งรูปร่างที่ผิดปกติ (หาง) เป็นกรณีสำคัญเมื่อได้รับความร้อนจะเป็นส่วนที่หลอมละลายส่วนแรกจริงเกิดเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาค

4.9 สันฐานวิทยาและความขรุขระพื้นผิว

กรณีการศึกษาสันฐานวิทยา โดยใช้กล้องดิจิตอลไมโครสโคปร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย ImageJ เพื่อศึกษาการกระจายอนุภาคและลักษณะพื้นผิวระหว่างอนุภาค (Interfacial Surface) [35,49]

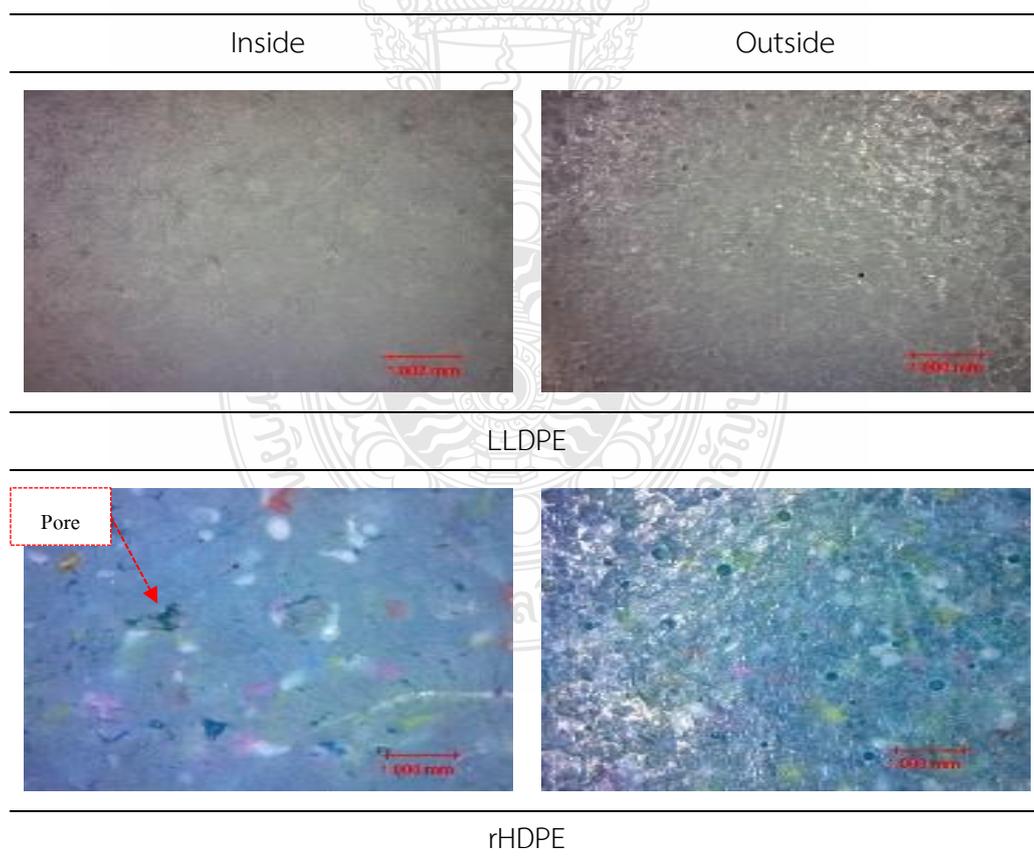
4.9.1 อนุภาค LLDPE และ rHDPE มีความแตกต่างกันของลักษณะรูปร่างอนุภาค ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝังในแม่พิมพ์ พลาสติกผ่านการใช้งานอัตราการเคลื่อนที่ต่ำ รูปร่างผิดปกติ (หาง) ก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จึงมีรูหรือฟองอากาศจากการไหลที่ไม่สมบูรณ์บริเวณผิวชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.17

4.9.2 กรณีการผสมแบบแห้งระหว่างแก้วกลบและพลาสติกผ่านการใช้งานแล้ว ภาพถ่ายแสดงถึงอัตราส่วนปริมาณการเติมแก้วกลบร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าเมื่อเติมปริมาณแก้วกลบสูงขึ้น แก้วกลบมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) เกิด

ช่องว่างระหว่างพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วและเก้าอี้เก้าอี้ แก้วแก้วแยกออกจาก rHDPE อนุภาคสองชนิดมีความสามารถเข้ากันได้ต่ำ เป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างความมีขี้ของเก้าอี้แก้วและความไม่มีขี้ของ rHDPE เมื่อปริมาณของเก้าอี้แก้วเพิ่มขึ้น การกระจายตัวที่ไม่ดีระหว่างเก้าอี้แก้วและ rHDPE ปัจจัยเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ส่งผลให้การถ่ายเทแรงระหว่างอนุภาคพอลิเมอร์ผสมได้ต่ำ ความหนาแน่นงานมีแนวโน้มเกิดการเสถียรภาพแบบเปาะขึ้น ความแข็งแรงด้านสมบัติเชิงกลจะเปลี่ยนไปจากเดิม

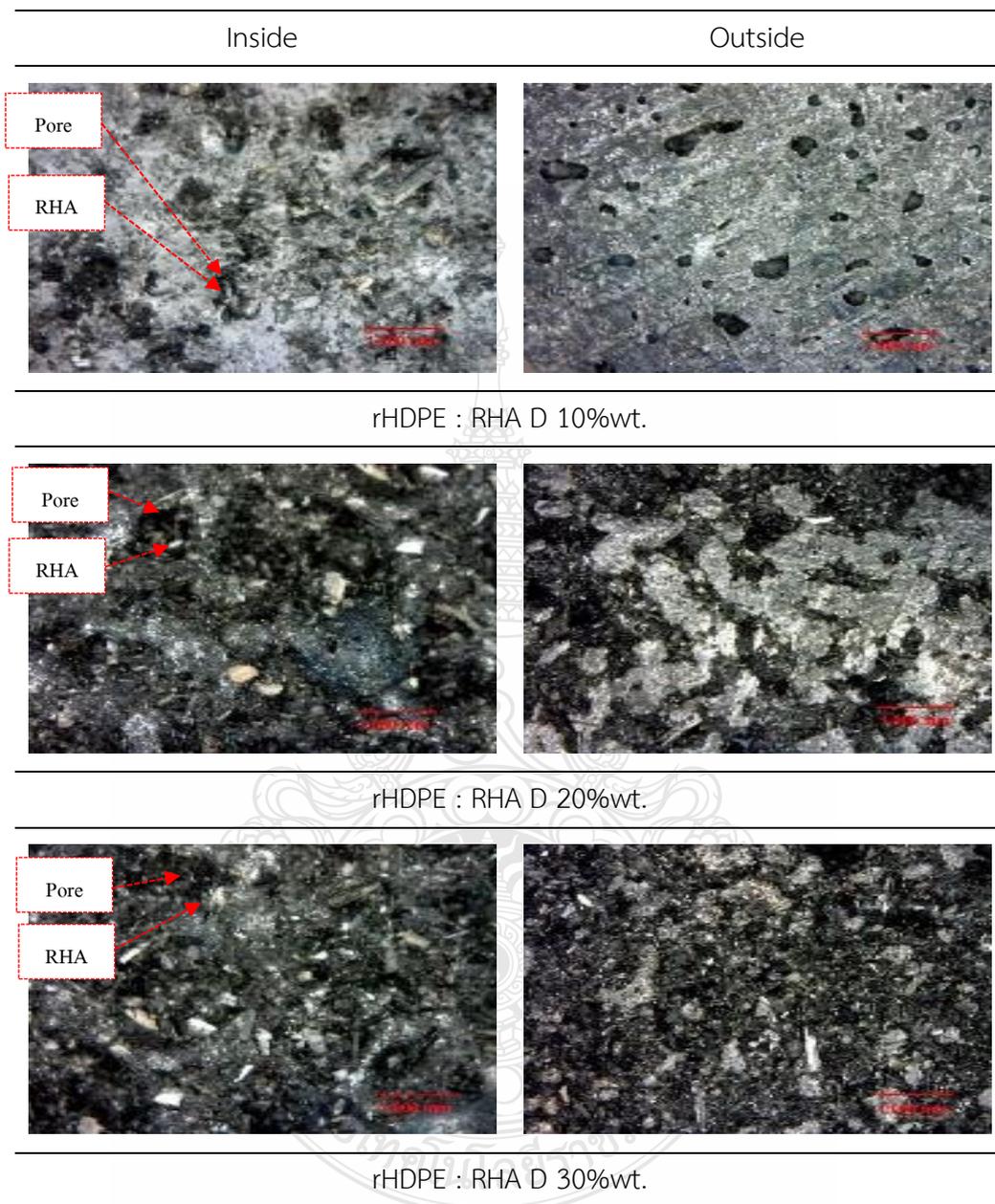
4.9.3 กรณีการผสมแบบหลอมเหลว อนุภาคเก้าอี้แก้วเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณผิวชิ้นงาน มีปริมาณน้อยอาจเป็นผลจากกระบวนการผสมก่อนหน้านี้ผลจากการทดลองเกิดขึ้นคล้ายกับกรณีในขั้นต้นเกิดรูหรือโพรงฟองอากาศบนพื้นผิวชิ้นงานเนื่องจากสมบัติการไหลที่ต่ำ ลักษณะการหลอมรวมกันของพื้นผิวด้านในเกิดเป็นรูมากกว่าผิวด้านนอก อาจเป็นผลจากการหลอมเฉพาะพลาสติกช่องว่างระหว่างอนุภาคเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการใส่เก้าอี้แก้วอัตราส่วนที่มากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.19

กรณีพื้นผิวด้านในและด้านนอกวัสดุ LLDPE



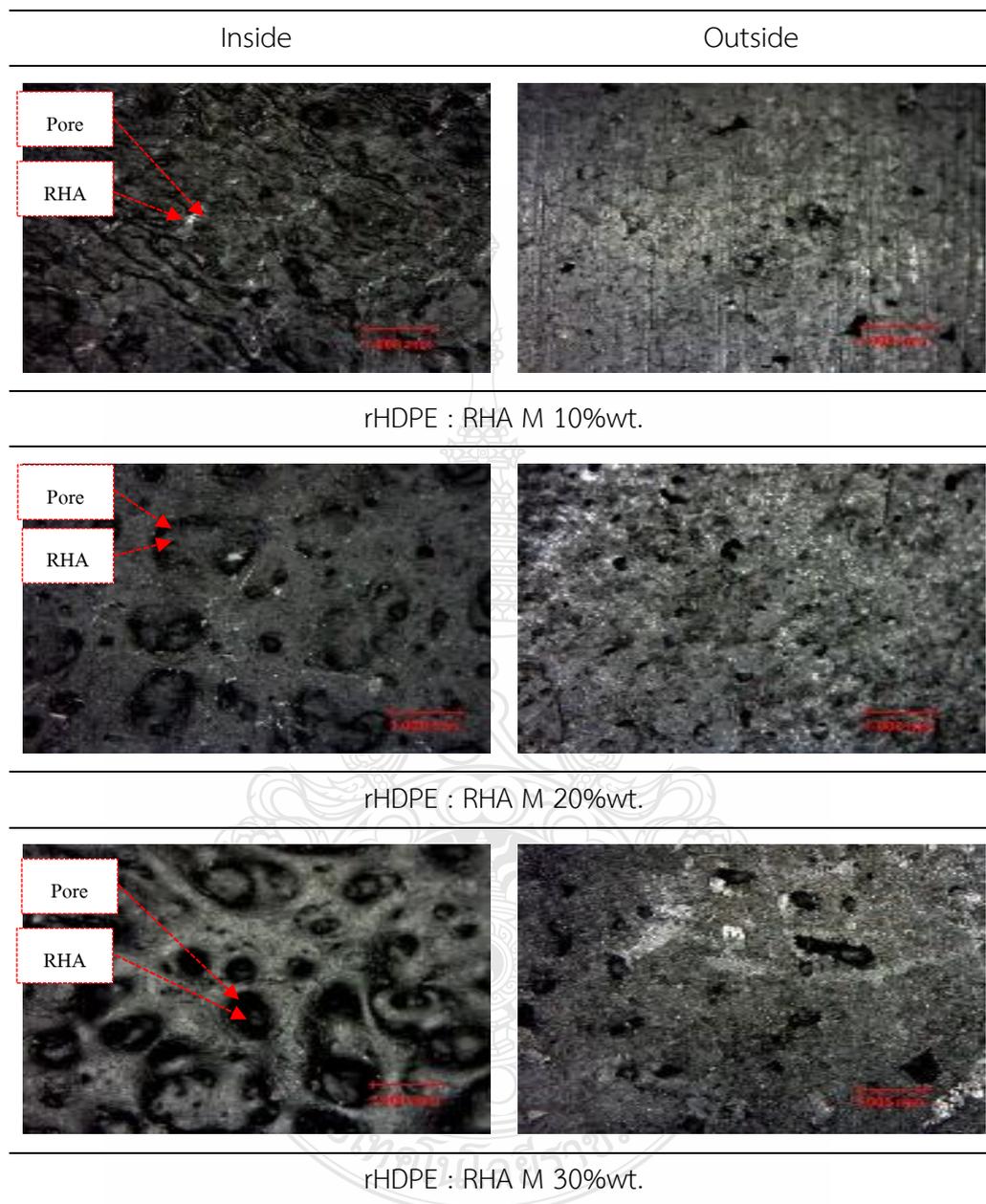
ภาพที่ 4.17 ลักษณะพื้นผิวภายในและภายนอกวัสดุชนิด LLDPE และ rHDPE

กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง



ภาพที่ 4.18 พื้นผิวภายในและภายนอกพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนเถ้าแกลบริ้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว



ภาพที่ 4.19 พื้นผิวภายในและภายนอกพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนแก้วกลบร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

การทดสอบความขรุขระพื้นผิวจากกระบวนการนี้ทดสอบโดยใช้กล้องดิจิทัลไมโครสโคปที่กำลังขยายสองร้อยเท่าหลังจากนั้นภาพถ่ายถูกวิเคราะห์โดยโปรแกรม ImageJ ฟังก์ชัน “SurfJ” เพื่อแสดงค่าของความหยาบพื้นผิวโดยค่าเฉลี่ยผล แสดงดังตารางที่ 4.5 สำหรับกรณีพอลิเมอร์บริสุทธิ์บริเวณผิวด้านนอกติดกับผนังแม่พิมพ์แสดงถึงค่าเฉลี่ยความขรุขระพื้นผิวต่ำกว่าผิวภายในแม่พิมพ์เนื่องจากบริเวณดังกล่าวได้รับความร้อนโดยตรงก่อให้เกิดการหลอมอย่างสมบูรณ์ rHDPE คล้ายกันกับกรณี LLDPE แต่ที่บริเวณผิวยานอกและภายในเกิดเป็นรูเนื่องจากวัสดุมีความสามารถในการเคลื่อนที่ต่ำเป็นผลมาจากลักษณะรูปร่างที่ผิดปกติอีกทั้งบริเวณพื้นผิวภายในแม่พิมพ์แสดงผลที่ไม่เรียบเนื่องจากมีอนุภาคพลาสติกบางส่วนเกิดการหลอมละลายยังไม่หมด ส่วนใหญ่อนุภาคดังกล่าวนี้จะเกิดจากความแตกต่างของขนาดอนุภาค สำหรับกรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งที่อัตราส่วนการผสมเข้าแก่ลบบร้อยละ 10 โดยน้ำหนักพบว่าการกระจายความขรุขระเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ตามด้วยการเติมเข้าแก่ลบบที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักตามลำดับ กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวอนุภาคมีคล้ายกับพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งซึ่งการหลอมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันส่งผลให้การกระจายของเข้าแก่ลบบภายใน rHDPE ได้ดีกว่ากรณีขั้นต้น

เมื่อปริมาณเข้าแก่ลบบที่ใช้งานสูงขึ้นเข้าแก่ลบบจะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคไปยังผิวแม่พิมพ์ส่งผลให้ที่พื้นผิวบริเวณภายในและภายนอกชั้นงานทดสอบมีปริมาณเข้าแก่ลบบแทรกอยู่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยดังกล่าว ยิ่งปริมาณเข้าแก่ลบบเพิ่มมากขึ้นเข้าแก่ลบบที่ได้จะกระจายอยู่ที่บริเวณผิวชั้นงานมากและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของพลาสติกภายในถูกแทรกด้วยเข้าแก่ลบบที่ไม่หลอมขณะอยู่ในอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลว [39]

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความขรุขระบนพื้นผิวโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว

วัสดุ	Arithmetic Mean of Surface Roughness, Ra (Micron)	
	พื้นผิวภายใน	พื้นผิวภายนอก
LLDPE	11.1644	12.4512
rHDPE	15.8319	18.4235
rHDPE : RHA D 10 %wt.	32.3569	32.0097
rHDPE : RHA D 20 %wt.	35.9881	44.5975
rHDPE : RHA D 30 %wt.	35.6057	40.8543
rHDPE : RHA M 10 %wt.	22.0039	27.1323
rHDPE : RHA M 20 %wt.	24.3006	30.4988
rHDPE : RHA M 30 %wt.	26.9348	31.5286

4.10 ผลทดสอบเชิงกลจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดียว (Axial Powder Flow Apparatus)

ผลการทดสอบเชิงกลชิ้นงานเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 60 mm ยาว 50 mm และหนา 3 mm เครื่องทดสอบเป็นการทดสอบแรงอัด (Compressive Strength) ที่สภาวะ 500 N ความเร็วในการกด 50 mm/min ซึ่งการทดสอบแสดงผลในรูปของโมดูลัสเริ่มต้น [54] ดังแสดงในตารางที่ 4.6

กราฟแสดงผลของการแตกหักวัสดุจากกระบวนการทดสอบการต้านแรงกดอัดขึ้นงานตัวอย่างที่จุด A (Point 1) คือบริเวณที่ได้สัมผัสแรงกดบริเวณจุดเริ่มต้นเมื่อเกิดการเสียรูปร่างบริเวณส่วนนี้จะเป็นส่วนแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะขึ้นงานจะเกิดการแตกร้าวบริเวณพื้นผิวชั้นในจนถึงพื้นผิวชั้นนอกเมื่อได้รับแรงกดอัดเพิ่มขึ้น บริเวณจุด B (Point 2) คือส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบริเวณต่อมา จากภาพที่ 4.21 และ 4.22 กราฟแสดงถึงผลการทดสอบกดอัดแรงวัสดุสำหรับงานวิจัย จะเห็นได้ว่าพลาสติกกรีไซเคิลลักษณะการเสียรูปของกราฟสามารถทนแรงได้จากนั้นวัสดุจะเสียรูปร่างจะสามารถกลับมารับแรงใหม่ได้อีกซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงถึงคุณสมบัติที่แข็งแรงและเปราะ (Brittle) ค่ามอดูลัสแรกเริ่ม 98.14 MPa เมื่อเทียบกับ LLDPE เจริญการค้า จากกราฟพบว่าวัสดุมีค่ามอดูลัสแรกเริ่ม 28.76 MPa ต่ำกว่า rHDPE แต่สามารถทนแรงสูงสุดได้มากกว่า อีกทั้งจากการทดลองวัสดุทำจาก LLDPE ไม่เกิดการเสียรูปร่างและคืนรูปเดิมซึ่งเป็นการแสดงถึงคุณสมบัติวัสดุเหนียว (Ductile) อาจเป็นผลจากพลาสติกกรีไซเคิลเกิดการสลายตัวโดยการแบ่งสายโซ่โมเลกุลออกเป็นหลายส่วน เมื่อได้รับความร้อนที่เพิ่มขึ้นความยาวสายโซ่โมเลกุลก็ยิ่งสั้นลง ผลของสมบัติเชิงกลที่ได้จะลดลงตามความยาวของสายโซ่โมเลกุล [44]

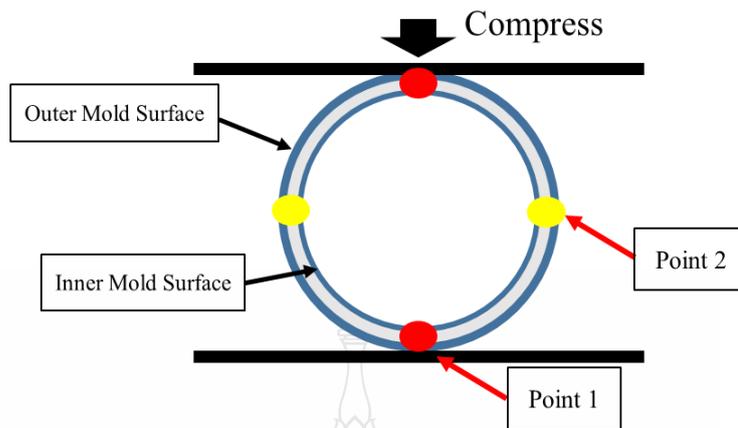
กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งเปรียบเทียบกับ rHDPE วัสดุไม่ได้ผสมกับแก้วกลบอัตราส่วน 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ค่ามอดูลัสแรกเริ่มที่ 50.98, 47.36 และ 41.79 MPa ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการผสมระหว่างพลาสติกผ่านการใช้งานและแก้วกลบมีปริมาณการเติมที่สูงขึ้นค่าการต้านแรงกดอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเข้ากันได้อย่างจำกัดหรือความสามารถสำหรับการยึดเกาะบริเวณรอยต่อของ rHDPE และแก้วกลบต่ำ การถ่ายเทแรงระหว่างอนุภาคขึ้นงานจึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมแก้วกลบ นอกจากนี้แก้วกลบเป็น อนุภาคที่มีความแข็งแรงตัวเองสูงความสามารถสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ การเสียรูปร่างจะคล้ายกับกรณีพลาสติกกรีไซเคิลที่ไม่ได้ใส่แก้วกลบแสดง ดังภาพที่ 4.21 [49]

กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวที่อัตราส่วนผสม 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักมีแนวโน้มความสามารถในการรับแรงที่ต่ำกว่ากรณี rHDPE เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดเป็นวัสดุที่มีความเข้ากันได้ต่ำและไม่เกิดแรงระหว่างพันธะต่อกัน ความสามารถสำหรับการรับแรงกดอัดจึงลดลงตามปริมาณการใส่แก้วเคลบโดยค่ามอดูลัสแรกเริ่ม 41.41, 37.75 และ 33.48 MPa ตามลำดับ

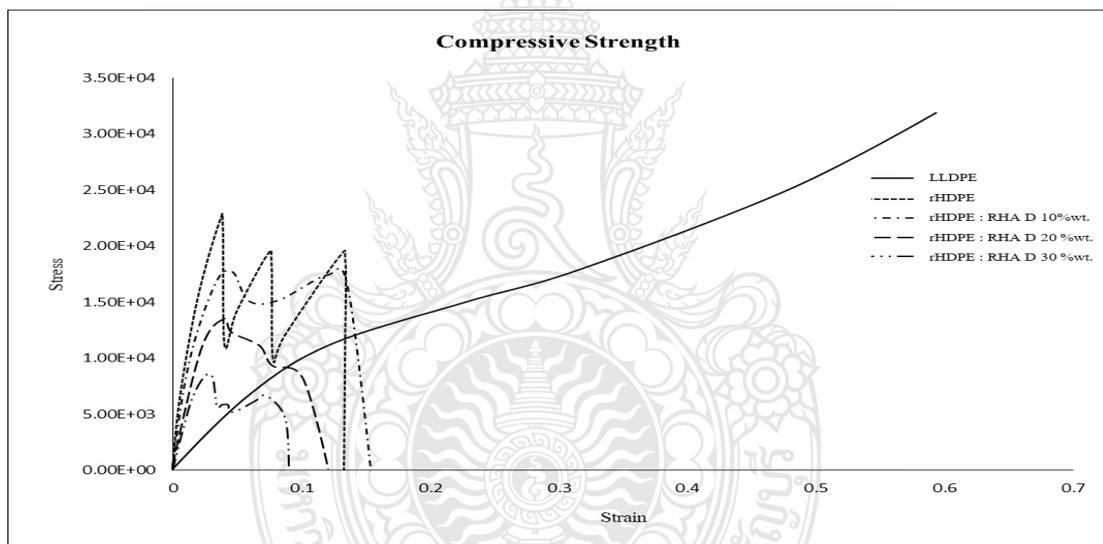
เมื่อเทียบกับพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วผสมแก้วเคลบที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 ตามลำดับทั้งในกรณีผสมแบบแห้งและผสมแบบหลอมเหลวความสามารถในการรับแรงกดอัดของชิ้นงานมีแนวโน้มต่ำลงในทั้งสองกรณี การเติมแก้วเคลบผสมแบบหลอมเหลวร้อยละ 10 ส่งผลต่อการทนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการแตกหักมากกว่ากรณีผสมแบบแห้งแสดงคุณสมบัติพลาสติกเหนียว (Ductile) มากกว่า เนื่องการกระจายของอนุภาคแก้วเคลบรวมเป็นเนื้อวัสดุเดียวกับพลาสติกมากกว่าอัตราการเกาะกลุ่มน้อย (Self Agglomeration) เมื่อเทียบอัตราส่วนแก้วเคลบโดยการผสมแบบหลอมเหลว 20 และ 30 ความสามารถในการรับแรงกดอัดลดลงมากกว่ากรณีผสมแบบแห้ง อาจเป็นผลมาจากการผสมแก้วเคลบโดยกระบวนการอัดรีดเป็นการให้ความร้อนซ้ำเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล ปริมาณการรับแรงกดอัดต่ำลง

ตารางที่ 4.6 ผลค่าโมดูลัสแรกเริ่ม (Intital Modulus)

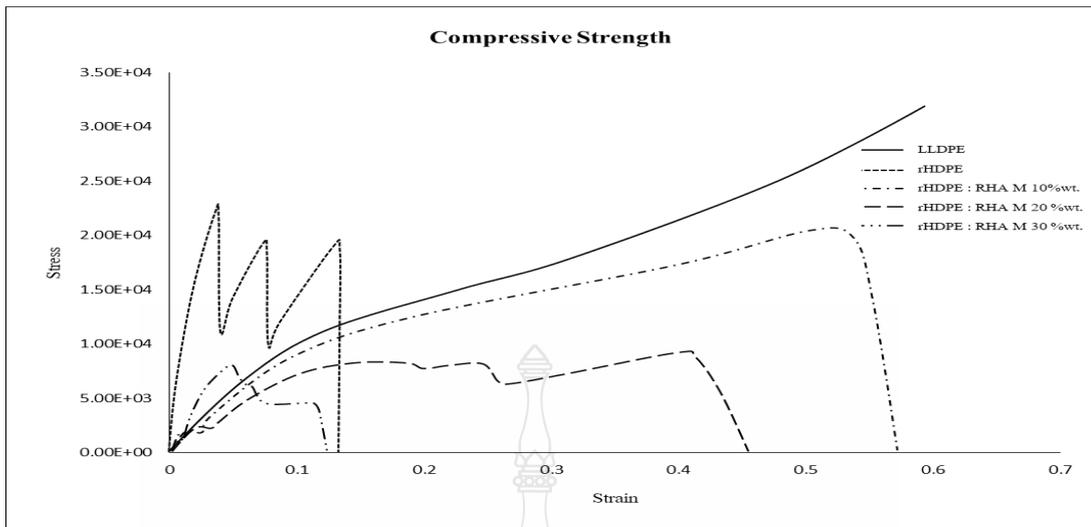
Materials	Initial Modulus (MPa)
LLDPE	28.76 ±2.28
rHDPE	98.14 ±3.14
rHDPE : RHA D 10% wt.	50.98 ±1.17
rHDPE : RHA D 20% wt.	47.36 ±2.50
rHDPE : RHA D 30% wt.	41.79 ±1.73
rHDPE : RHA M 10% wt.	41.41 ±2.94
rHDPE : RHA M 20% wt.	37.75 ±2.76
rHDPE : RHA M 30% wt.	33.49 ±2.07



ภาพที่ 4.20 กระบวนการทดสอบการต้านแรงกดอัด (Compressive Strength)



ภาพที่ 4.21 กราฟการทดสอบสมบัติการต้านการรับแรงกดอัดของพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งเปรียบเทียบระหว่าง LLDPE, rHDPE และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE, rHDPE และพอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 4.22 กราฟการทดสอบการต้านการรับแรงกดอัดของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวเปรียบเทียบระหว่าง LLDPE และ rHDPE

4.11 กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเครื่องชนิด Shuttle Style

เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนรูปแบบ Shuttle Style เป็นเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแบบสองแกน จัดสร้างขึ้นสำหรับใช้งานในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเชิงอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ทดสอบลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 30×20×5 เซนติเมตร ตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดความหนาที่ 3 มิลลิเมตร น้ำหนักวัสดุในแม่พิมพ์ 458 กรัม กระบวนการขึ้นรูปใช้อุณหภูมิ 240 °C เวลาในกระบวนการให้ความร้อนอยู่ที่ 23 นาที และอุณหภูมิสำหรับการเปิดแม่พิมพ์อยู่ในช่วง 50-60 °C จากนั้นทำการปลดชิ้นงาน ประสิทธิภาพการใช้งาน แสดงดังตารางที่ 4.7

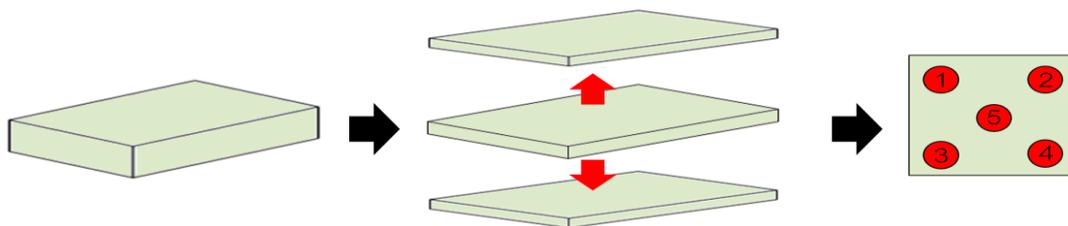
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style

Technical Parameter	Value
ขนาดแม่พิมพ์ทดสอบ	3×20×5 cm
ปริมาณวัสดุที่ใช้ ความหนา 3 มิลลิเมตร	458 g
อุณหภูมิภายในเตาอบ	240 °C
อัตราการผลิต แกนหลัก : แกนรอง	6 : 1 rpm
เวลาสำหรับกระบวนการ	0-50 min

สำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีปัจจัยที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิที่ใช้สำหรับกระบวนการ เวลา รูปร่าง ขนาด และชนิดของวัสดุเป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการกระจายขนาดของวัสดุ และชนิดที่แตกต่างกันของวัสดุ เพื่อที่จะเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้าเชิงอุตสาหกรรม จากการทดลองก่อนหน้าโดยการขึ้นรูปด้วยเครื่อง APFA เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในแม่พิมพ์ สำหรับการขึ้นรูปแบบหมุนชนิดชนิด Shuttle Style โดยใช้อัตราส่วน LLDPE 100 % โดยน้ำหนัก., rHDPE 100 % โดยน้ำหนัก., การเติมแก้วกลมผสมแบบแห้งอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 และการเติมแก้วกลมผสมแบบหลอมเหลวร้อยละ 10 และ 20 เนื่องจากการขึ้นรูปที่การเติมแก้วกลมแบบแห้งร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เกิดการเกาะกลุ่มกันเองจนไม่สามารถขึ้นรูปกล่องขึ้นงานได้ ผู้จัดทำงานวิจัยนี้จึงไม่ใช้อัตราส่วนดังกล่าวสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนโดยเครื่องขึ้นรูปเชิงอุตสาหกรรมและไม่ใช้อัตราส่วนการเติมแก้วกลมแบบหลอมเหลวร้อยละ 30 เพื่อเปรียบเทียบ

4.12 ความหนาขึ้นงานของตัวอย่างทดสอบจากกระบวนการขึ้นรูปชนิด Shuttle Style

จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนโดยเครื่องขึ้นรูปแบบ Shuttle Style ทำการตัดชิ้นงานเพื่อวัดขนาดความหนากล่องทดสอบค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยความหนาที่คำนวณได้ 3 mm ดังแสดงในภาพที่ 4.23 กล่องทดสอบที่ได้จากกระบวนการนี้ถูกวัดความหนาเพื่อทดสอบความสามารถสำหรับการกระจายตัวของวัสดุ ซึ่งปริมาณแก้วกลมที่ร้อยละ 30 ในสองรูปแบบมีแนวโน้มความสามารถในการขึ้นรูปต่ำเกิดการจับตัวเป็นก้อนจึงส่งผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ กรณีของ LLDPE การกระจายขนาดของวัสดุผงมีขนาดใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้ในขั้นต้น กรณี rHDPE การกระจายความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LLDPE เนื่องจากรูปร่างวัสดุที่ผิดปกติ (หาง) เป็นจุดที่หลอมเหลวได้ง่ายกว่า ส่งผลให้การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์เป็นไปได้ยากวัสดุที่เคลือบเป็นชั้นฟิล์มเกิดการหลอมทับถมกันจึงมีปริมาณความหนาเพิ่มขึ้นลักษณะพื้นผิวที่ได้จากวัสดุนี้จะเกิดความขรุขระมากกว่า LLDPE เป็นอย่างมาก กรณีการเติมแก้วกลมโดยวิธีแบบแห้งวัสดุทั้งสองชนิดเกิดการกระจายภายในแม่พิมพ์แก้วกลมอนุภาคเล็กหลุดผ่านช่องว่างไปสู่ผิวแม่พิมพ์บริเวณผิวชิ้นงานมีอนุภาคผงพลาสติกและแก้วกลมกระจายอยู่ ปริมาณการใส่แก้วกลมที่สูงขึ้นแก้วกลมที่บริเวณผิวยิ่งมากขึ้น การหมุนของแม่พิมพ์ส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ปริมาณการใส่สูงขึ้นมีความหนาขึ้นงานมากขึ้นเมื่อเทียบกับ LLDPE เชิงการค้า กรณีของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวการผสมแบบหลอมเหลวส่งผลให้แก้วกลมและอนุภาคผงพลาสติกหลอมรวมกันโดยกระบวนการผสม เมื่อขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนอนุภาคผงเหล่านี้กระจายภายในแม่พิมพ์หลังจากได้รับความร้อนอนุภาคผงเกิดการละลายที่บริเวณแม่พิมพ์ ซึ่งแก้วกลมที่เป็นเนื้อเดียวกันจะกระจายอยู่ในอนุภาคพลาสติกส่งผลให้การกระจายขนาดความหนามีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกว่าพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง



ภาพที่ 4.23 ลักษณะชิ้นงานทดสอบการกระจายความหนา

ตารางที่ 4.8 การกระจายขนาดความหนาโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด (Shuttle Style)

ความหนาด้านบนฝากล่อง (มิลลิเมตร)								
ชนิด	LLDPE	rHDPE	rHDPE:RHA D 10%	rHDPE:RHA D 20%	rHDPE:RHA D 30%	rHDPE:RHA M 10%	rHDPE:RHA M 20%	rHDPE:RHA D 30%
1	2.70	2.94	2.74	2.73	-	2.60	3.07	-
2	2.73	3.15	2.69	2.8	-	2.67	2.94	-
3	2.74	2.91	2.73	2.7	-	2.71	2.88	-
4	2.69	3.04	2.68	2.77	-	2.70	2.88	-
5	2.90	2.75	2.71	2.6	-	2.64	2.92	-
ความหนาด้านล่างฝากล่อง (มิลลิเมตร)								
1	3.10	3.37	3.34	3.40	-	3.37	3.3	-
2	3.17	3.50	3.37	3.40	-	3.44	3.36	-
3	3.18	3.54	3.36	3.28	-	3.49	3.2	-
4	3.16	3.64	3.35	3.31	-	3.51	3.36	-
5	3.21	3.55	3.52	3.48	-	3.55	3.39	-

4.13 สัณฐานวิทยาและความขรุขระชิ้นงานโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style

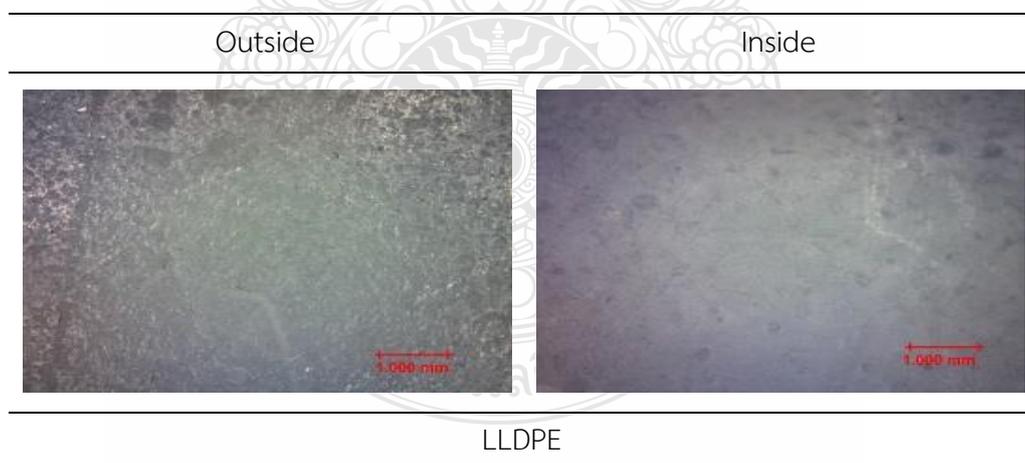
สัณฐานวิทยาถูกทดสอบเพื่อตรวจสอบการแยกหรือการหลอมรวมวัสดุเป็นชิ้นงานเดียวกัน เห็นได้ว่า LLDPE มีการกระจายบริเวณพื้นผิวภายนอกติดผิวแม่พิมพ์ที่ค่อนข้างเรียบ ลักษณะบริเวณพื้นผิวภายนอกติดกับแม่พิมพ์และภายในพื้นผิวภายในชิ้นงาน เกิดรูขึ้นซึ่งอาจเกิดจากสมบัติการไหลของพลาสติกผ่านการบดลดขนาดก่อให้เกิดรูปร่างที่ผิดปกติ ส่งผลต่อสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์ เช่นเดียวกับกับกรณีของพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งมีปัจจัยต่อสมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์พลาสติกจึง

ก่อให้เกิดรูระหว่างอนุภาค อีกทั้งระหว่างอนุภาคพลาสติกมีเถ้าเคลือบซึ่งไปขัดขวางการไหลส่งผลให้
ชิ้นงานไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และ 4.25

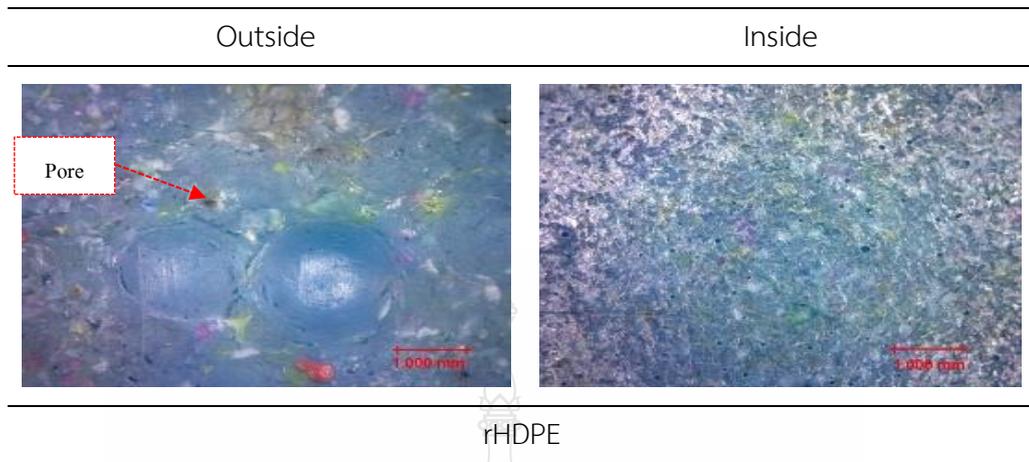
ที่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งการเติมเถ้าเคลือบปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้เถ้าเคลือบ
อนุภาคเล็กแทรกไปยังพื้นผิวเกิดการหลอมที่สมบูรณ์เกิดขึ้นพื้นผิวที่ได้จึงมีความขรุขระมาก อีกทั้งยัง
สามารถสังเกตเห็นได้ว่ามีบางส่วนหลอมละลายคล้ายกับอนุภาคพลาสติกและบางส่วนเป็นอนุภาคเถ้า
เคลือบแยกกันอย่างชัดเจนและมีโอกาสที่จะเกาะกลุ่มกันเอง (Agglomeration) ส่วนอนุภาคเถ้าเคลือบ
และพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วขนาดใหญ่ยังคงหมุนภายในแม่พิมพ์ ก่อให้เกิดการหลอมรวมกัน
ระหว่างอนุภาคใหญ่ภายในพื้นผิวชิ้นงานขึ้นในอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.26

กรณีของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวพื้นผิวชิ้นงานภายนอกที่ได้หลอมรวมเป็นเนื้อ
เดียวกันอย่างสมบูรณ์ การผสมวัสดุเป็นอนุภาคเดียวกันเมื่อเกิดการหลอมละลายพลาสติกจะหลอมและ
ติดที่บริเวณผิวแม่พิมพ์ภายนอกก่อนส่งผลให้อนุภาคเถ้าเคลือบกระจายตัวได้ดีกว่า อนุภาคเถ้าเคลือบ
เคลื่อนที่ไปยังบริเวณผิวแม่พิมพ์ได้น้อย ในส่วนพื้นผิวภายในชิ้นงานเกิดการเชื่อมกันระหว่างอนุภาค
พลาสติกแต่จะมีจำนวนช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้นตามปริมาณการใส่เถ้าเคลือบที่มากขึ้นก่อให้เกิด
ความสามารถการเข้ากันได้ต่ำ เถ้าเคลือบจะหลุดออกจากอนุภาคพลาสติกดังแสดงในภาพที่ 4.27

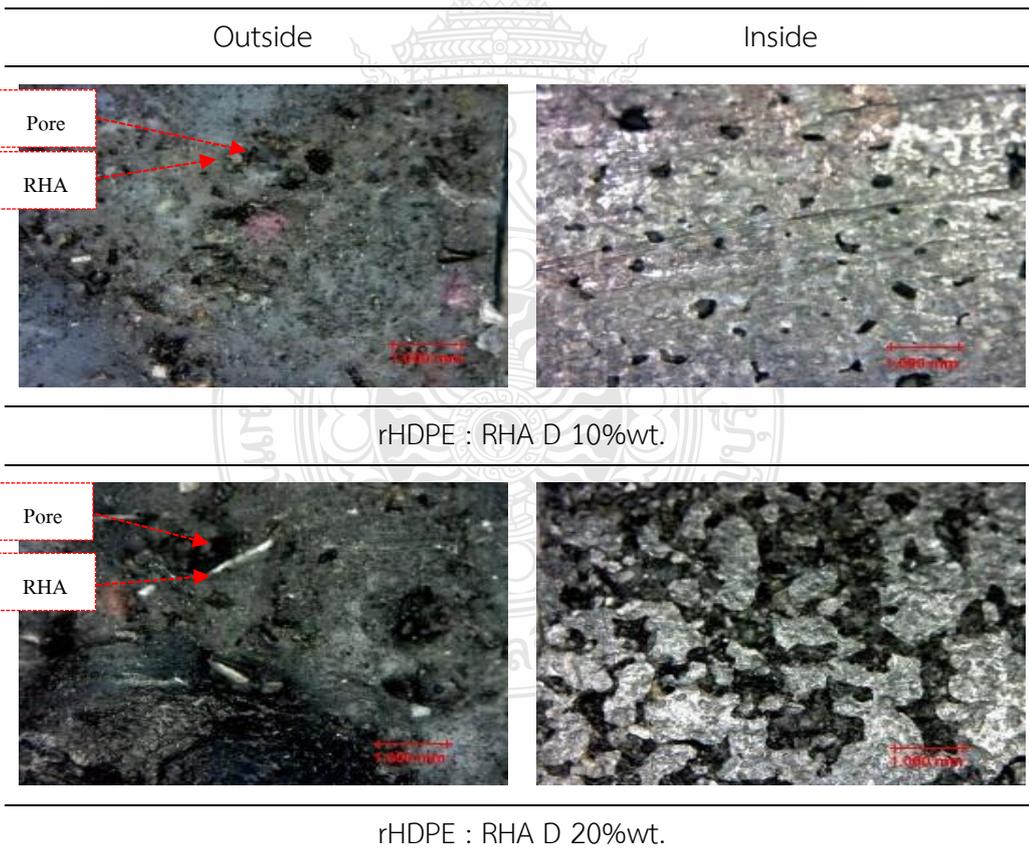
กรณีพื้นผิวด้านในและด้านนอกวัสดุ LLDPE



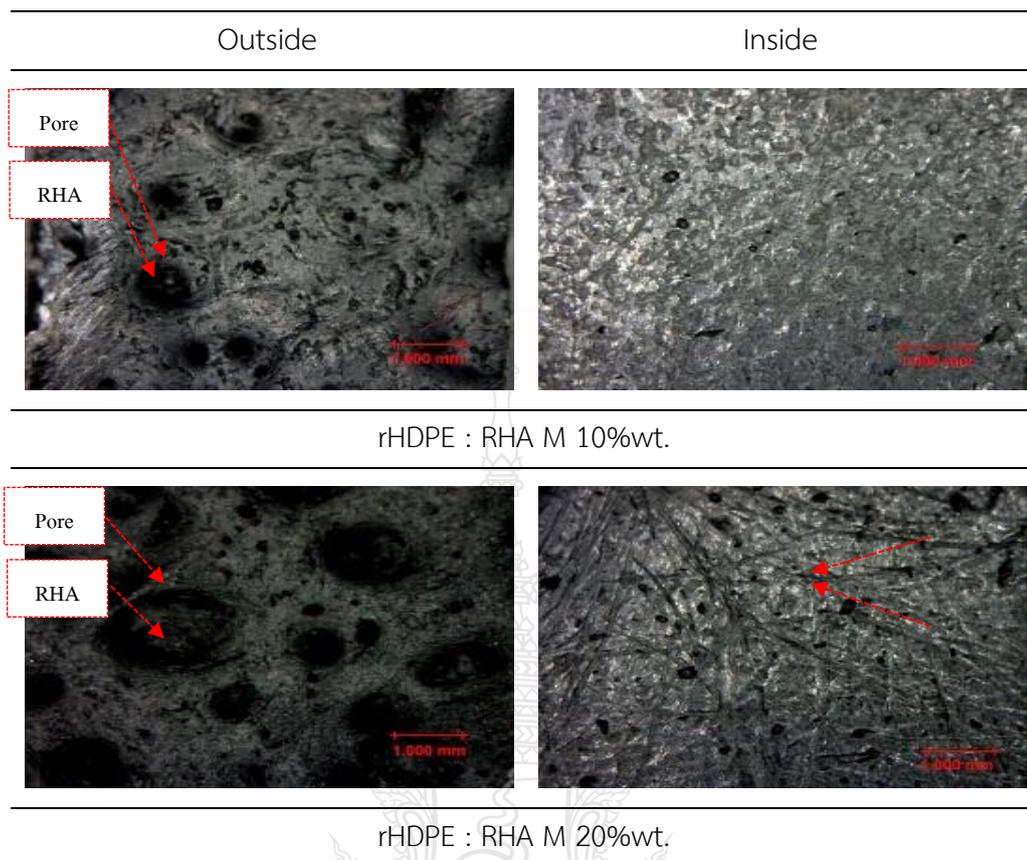
ภาพที่ 4.24 พื้นผิวภายในและภายนอกชิ้นงานตัวอย่างวัสดุ LLDPE



ภาพที่ 4.25 พื้นผิวภายในและภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุ rHDPE



ภาพที่ 4.26 พื้นผิวภายในและภายนอกของพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งอัตราส่วนแก้วแคลบรียอละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.27 พื้นผิวภายในและภายนอกของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวอัตราส่วนแก้วแอลบรียล 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

การทดลองนี้ทดสอบความขรุขระชิ้นงานโดยแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตโดยใช้กล้องดิจิทัล ไมโครสโคปกำลังขยายสองร้อยเท่าใช้ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย (ImageJ) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยกระบวนการนี้แตกต่างจากกรณีทดสอบในขั้นต้นคือเครื่องขึ้นรูปเชิงอุตสาหกรรมแบบหมุนตามแนวแกนสองแกนส่งผลให้การกระจายอนุภาคที่ได้แตกต่างกัน กรณีของพอลิเมอร์บริสุทธิ์มีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยความขรุขระพื้นผิวต่ำกว่าผิวด้านในเนื่องจากพลาสติกบริเวณนี้ได้รับความร้อนโดยตรงซึ่งเกิดการหลอมละลายบริเวณแรก เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดการเชื่อมประสานกันอย่างสมบูรณ์ซึ่งกรณีของพลาสติกรีไซเคิลมีลักษณะคล้ายกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ บริเวณผิวแม่พิมพ์มีค่าน้อยกว่าบริเวณผิวด้านในแม่พิมพ์เนื่องจากได้รับความร้อนโดยตรง กรณีนี้แตกต่างกันที่ลักษณะรูปร่างพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วจะมีรูปร่างที่ค่อนข้างกลมน้อยกว่าก่อให้เกิดการเคลื่อนภายในแม่พิมพ์ต่ำ บริเวณที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ส่งผลถึงรูระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นในชิ้นงาน สำหรับกรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งบริเวณพื้นที่ผิวด้านนอกเกิดความขรุขระมากกว่าภายในเนื่องจากการ

หมุนของแม่พิมพ์อนุภาคเถ้าแกลบที่เส็กผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคสู่บริเวณผิวแม่พิมพ์ก่อให้เกิดความขรุขระมากขึ้น กรณีพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 10 ความขรุขระพื้นผิวภายในมีค่าน้อยกว่าผิวภายนอกเนื่องจากอนุภาคระหว่างพลาสติกและเถ้าแกลบถูกหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อได้รับความร้อนโดยตรงจากแม่พิมพ์ส่วนที่เป็นพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วเกิดการหลอมละลายและเคลือบติดกับผนังแม่พิมพ์ก่อน สำหรับอัตราส่วนการเติมเถ้าแกลบที่ปริมาณสูงขึ้นจะคล้ายกันกับกรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งค่าเฉลี่ยที่ได้บริเวณผิวภายนอกมีค่ามากกว่าบริเวณผิวภายใน เนื่องจากอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่และเคลือบที่ชั้นผิวส่งผลบริเวณพื้นผิวชั้นงานมีเถ้าแกลบเหลืออยู่ [35]

ตารางที่ 4.9 ความขรุขระพื้นผิวภายในและภายนอกโดยการขึ้นรูปแบบหมุนชนิด Shuttle Style

วัสดุ	Arithmetic Mean of Surface Roughness, Ra (Micron)	
	พื้นผิวภายใน	พื้นผิวภายนอก
LLDPE	10.4007	11.8902
rHDPE	14.0389	18.6427
rHDPE : RHA D 10 %wt.	22.7941	28.4664
rHDPE : RHA D 20 %wt.	24.8286	37.8939
rHDPE : RHA D 30 %wt.	31.6392	46.8587
rHDPE : RHA M 10 %wt.	20.6361	24.9626
rHDPE : RHA M 20 %wt.	27.0896	25.4878
rHDPE : RHA M 30 %wt.	32.5221	22.0582

4.14 ผลทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture Test) ชิ้นงานถูกเตรียมโดยมีขนาด 10*10 cm สภาวะการทดสอบแรงที่ใช้ 300 N ระยะในการกดชิ้นงาน 30 mm ความเร็วในการกด 300 mm/min

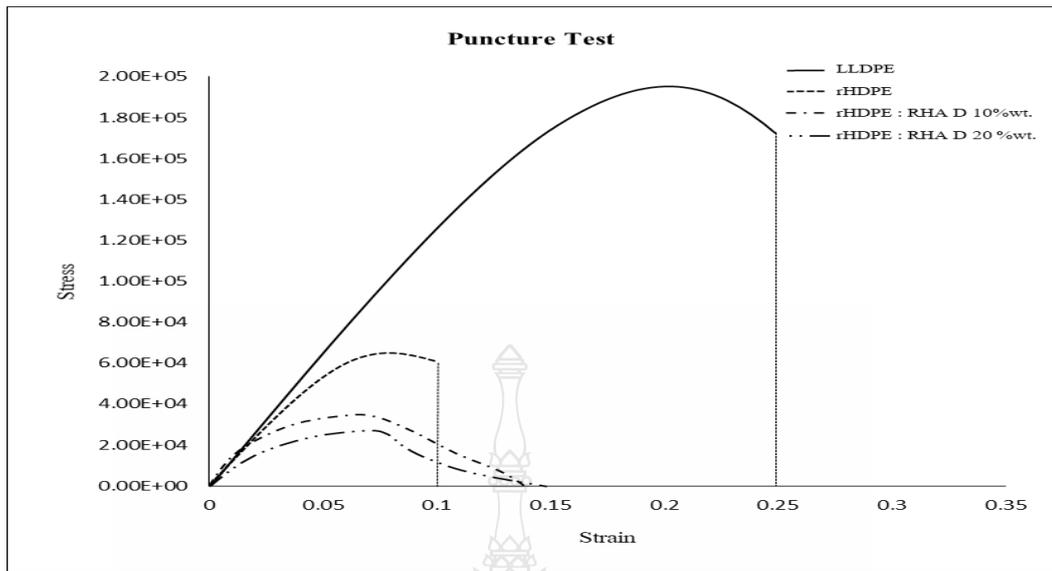
กรณี LLDPE และ rHDPE การทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุทั้งสองชนิดที่สภาวะการทดสอบเดียวกันค่าการต้านทานการเจาะทะลุมีค่า 2,128 และ 705.5 นิวตัน เนื่องจาก rHDPE ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่อีกครั้งส่งผลให้มีการต้านทานการเจาะทะลุที่ต่ำลงจากพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วกระบวนการเกิดคล้ายกับ กรณีการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนหน้าในชั้นต้นสายโซ่พอลิเมอร์ถูกสลายพันธะมีโครงสร้างสั่นลงจึงส่งผลต่อการรับแรง งานวิจัยของ Kazemi [38] มีการรายงานไว้ว่า

คุณสมบัติการรับแรงดัดหรือแรงเจาะทะลุที่สูงขึ้นของพลาสติกกรีไซเคิลมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของผลึกโครงสร้าง การเพิ่มขึ้นของผลึกเป็นผลจากการลดน้ำหนักโมเลกุลที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างการรีไซเคิลจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า LLDPE มีการยืดตัวก่อนการทดสอบจะทะลุขึ้นงานซึ่งมีเสียลักษณะรูปร่างเดิมใกล้เคียงกับลักษณะพลาสติกเหนียว (Ductility) ในส่วนของพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วจะแสดงคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ (Brittle)

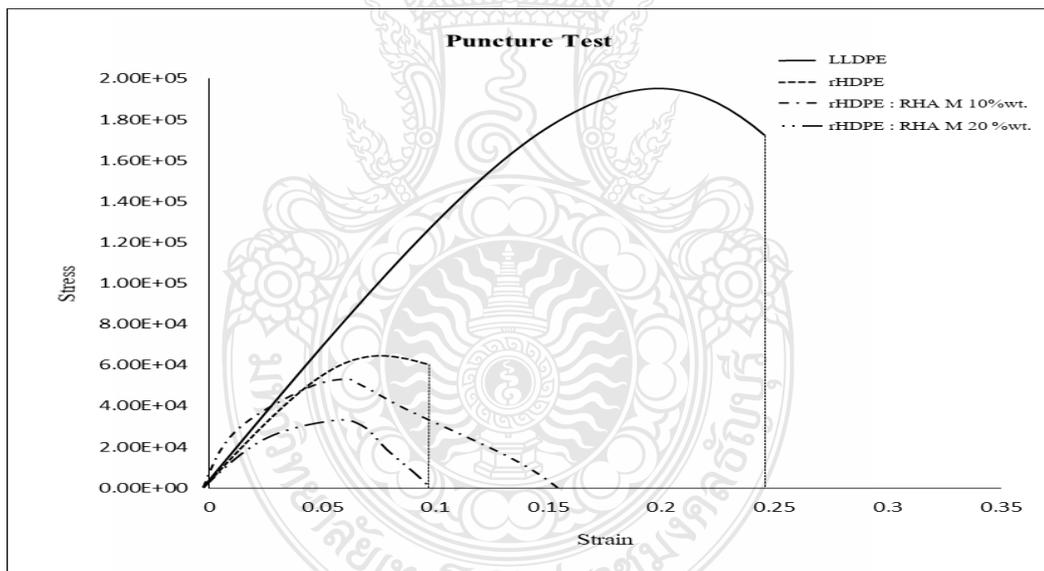
กรณีพอลิเมอร์ผสมทั้งสองรูปแบบ ความสัมพันธ์ระหว่างการถูกกดเจาะทะลุทุกกรณีสำหรับการผสมแก้วกลบ ณ จุดครากของวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์และแก้วกลบมีค่าต่ำกว่ากรณีของ LLDPE และ rHDPE มีค่าการต้านทานของวัสดุในตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มลดลงเนื่องจากแก้วกลบนั้นไปขัดขวางสมบัติการเคลื่อนของเมทริกซ์ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นไปได้ยาก ดังแสดงในภาพที่ 4.28 และ 4.29 ความสามารถในการเข้ากันของเมทริกซ์และตัวเติมนั้นมีอย่างจำกัดความสามารถสำหรับการยึดเกาะกันต่ำบริเวณส่วนนี้จึงเป็นจุดบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงานและเป็นจุดที่เมื่อเกิดแรงกระทำจะเป็นบริเวณจุดเริ่มของการเสียรูปร่าง (Crack) ของวัสดุผสมทั้งสองชนิด เมื่อมีปริมาณแก้วกลบที่เพิ่มขึ้นการยึดบริเวณที่ได้รับการทดสอบมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้จากการผสมแบบหลอมเหลวทำให้อนุภาคแก้วกลบกระจายอนุภาคภายในพอลิเอทิลีนได้ดีซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลชิ้นงานมีค่าที่สูงขึ้น [33]

ตารางที่ 4.10 ค่าการทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุ

Material	Mechanical Properties	
	Force (N)	Displacement (mm)
LLDPE	2,128	16.1
rHDPE	705.5	8.5
rHDPE : RHA D 10 %wt.	485.1	8.3
rHDPE : RHA D 20 %wt.	309.4	7.8
rHDPE : RHA M 10 %wt.	650.7	9.6
rHDPE : RHA M 20 %wt.	508.3	6.9



ภาพที่ 4.28 การทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุของพอลิเมอร์บริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมแบบแห้ง

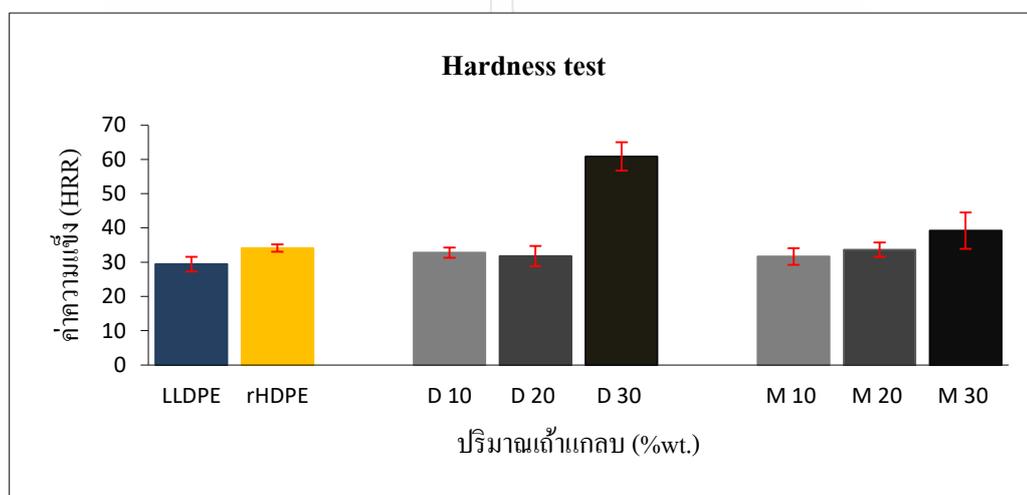


ภาพที่ 4.29 การทดสอบการต้านทานการเจาะทะลุของพอลิเมอร์บริสุทธิ์พอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว

4.15 การทดสอบความแข็งที่บริเวณผิวแบบรีอคเวล (Rockwell Hardness Test)

จากการทดลอง พบว่าค่าความแข็งบริเวณพื้นผิวชั้นงานภายนอก LLDPE มีค่าความแข็งพื้นผิวที่ผนังภายนอกประมาณ 29.4 rHDPE มีค่าความแข็งประมาณ 34.1 พอลิเมอร์ผสมแบบแห้งมีค่า

ความแข็ง 32.8, 31.7 และ 53.7 ตามลำดับในส่วนของพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวมีค่าความแข็งที่พื้นผิว 31.6, 33.6 และ 39.1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการเข้าปริมาณเข้าเกลบที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งพื้นผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเป็นกระบวนการเหวี่ยงอนุภาคภายในแม่พิมพ์ดังนั้นเกลบที่มีอนุภาคค่อนข้างเล็กจะปรากฏที่บริเวณพื้นผิวโดยส่วนใหญ่ ดังนั้นการผสมแบบแห้งที่ปริมาณการเติมเข้าเกลบร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จึงมีค่าความแข็งสูงที่สุดเป็นค่าความแข็งของเข้าเกลบ ในกรณีพอลิเมอร์ผสมเกิดแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่เข้าเกลบเนื่องจากกระบวนการผสมส่งผลให้เข้าเกลบกระจายภายในอนุภาคพลาสติกดังนั้นค่าความแข็งที่ได้จะเป็นค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 4.30



ภาพที่ 4.30 ค่าความแข็งบริเวณพื้นผิว (Rockwell Hardness Test)

4.16 ผลการทดสอบการกระจายของเข้าเกลบ

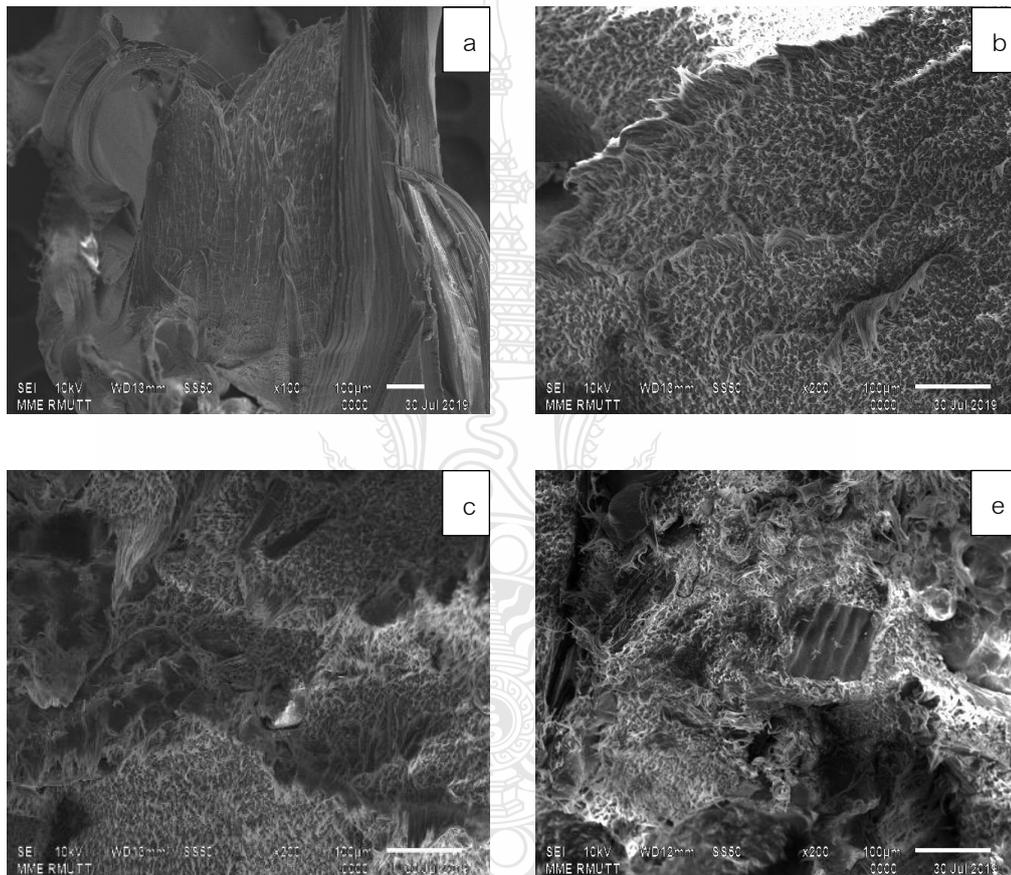
จากผลการศึกษาสัญญาณวิทยาจากตัวอย่างชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) กำลังขยาย 100 เท่า ที่บริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบการต้านการกดทะลุ ดังแสดงในภาพที่ 4.31

4.16.1 จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะการเสียรูปร่างของ LLDPE เป็นการเสียรูปร่างของเหนียวมีการดึงยืดจะขาดออกจากกันจนเป็นลักษณะของหางพลาสติกซึ่งคล้ายกันกับ rHDPE แต่ลักษณะการดึงยืดจนขาดออกจากกันของ rHDPE ต่ำกว่า LLDPE

4.16.2 พอลิเมอร์ผสมเข้าเกลบในวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry Blend) ที่การเติมเข้าเกลบร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก การกระจายของเข้าเกลบไม่ดี ปริมาณโพรงที่บริเวณชิ้นงานสูง

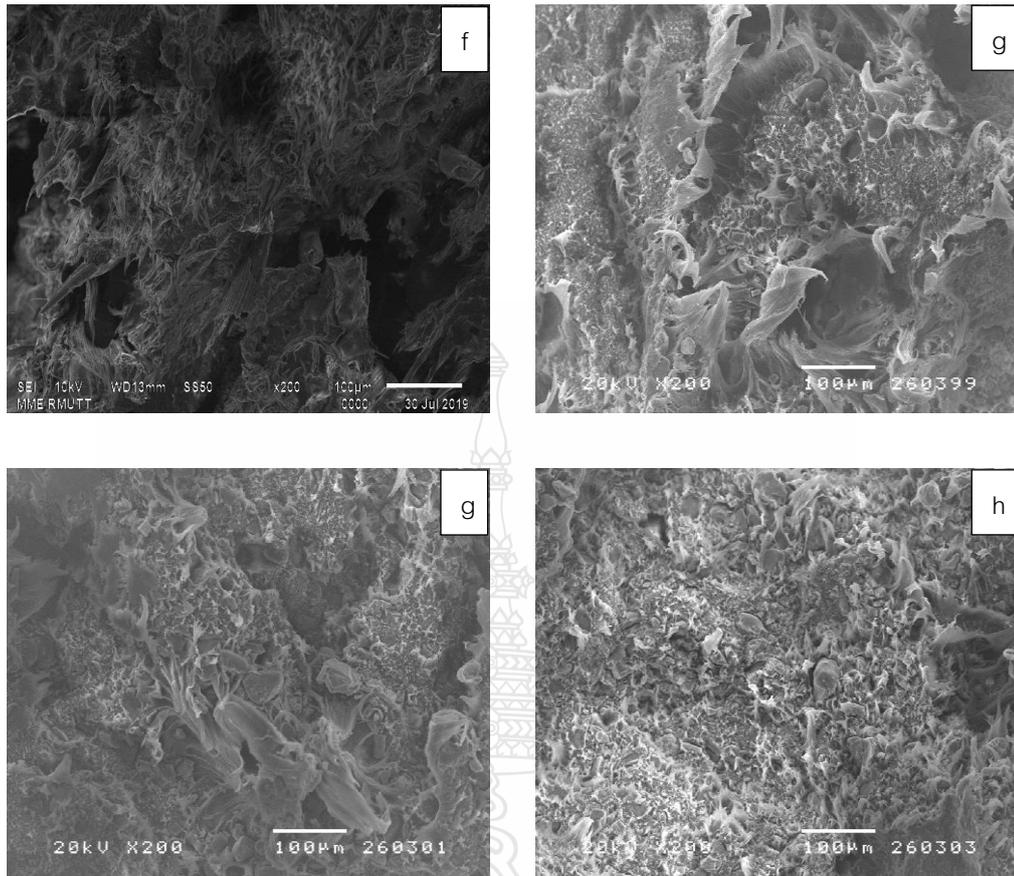
มากกว่าการเติมเส้นใยที่อัตราส่วนอื่น เส้นใยเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการรับแรงต่ำลง

4.16.3 กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว การกระจายของเส้นใยภายในอนุภาคพลาสติกกระจายตัวได้ดีขึ้นในปริมาณการเติมเส้นใยที่เพิ่มสูงขึ้น ระหว่างอนุภาคพลาสติกและเส้นใยพบว่า เกิดโพรงอากาศภายใน ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการหลอมละลายเป็นอนุภาคเดียวกันต่อการส่งผ่านแรงภายในชิ้นงานจึงมีแนวโน้มต่ำกว่า rHDPE



ภาพที่ 4.31 ลักษณะพื้นผิวจากการทดสอบการเจาะทะลุของชิ้นงานที่กำลังขยาย 100 เท่า

- (a) LLDPE, (b) rHDPE, (c) rHDPE : RHA D 10%wt., และ (d) rHDPE : RHA D 10%wt.
(e) rHDPE : RHA D 30%wt., (f) rHDPE : RHA M 10%wt., (g) rHDPE : RHA M 20%wt.,
และ (h) rHDPE : RHA M 30%wt.



ภาพที่ 4.31 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวจากการทดสอบการเจาะทะลุของชิ้นงานที่กำลังขยาย 100 เท่า

(a) LLDPE, (b) rHDPE, (c) rHDPE : RHA D 10%wt., และ (d) rHDPE : RHA D 10%wt.
 (e) rHDPE : RHA D 30%wt., (f) rHDPE : RHA M 10%wt., (g) rHDPE : RHA M 20%wt.,
 และ (h) rHDPE : RHA M 30%wt.

4.17 อัตราการสิ้นเปลืองระหว่างพอลิเอทิลีนเชิงการค้าและพอลิเอทิลีนรีไซเคิล

งานวิจัยนี้จัดทำเพื่อเทียบราคาระหว่างวัสดุในการใช้งานทั้งสองชนิดพอลิเอทิลีนเชิงการค้าและพอลิเอทิลีนรีไซเคิลซึ่งวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติทางสมบัติเชิงกลที่แตกต่างเมื่อเทียบทางความคุ้มค่าของพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วดังนี้

5.5.1 ค่าไฟฟ้าการเตรียมวัสดุพอลิเอทิลีนสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

- ใช้มอเตอร์ 3 HP 1 ตัว แรงดันไฟฟ้า 380 V กระแสไฟฟ้า 56.5 A ใช้เวลาสำหรับกระบวนการ 1 ชั่วโมง

$$P = V \times I \times PF \times \text{eff.}$$

$$P = 1.732 \times 380 \times 56.5 \times 0.85 \times 0.8 = 25286.50 \text{ W}$$

- ใช้พลังงานไฟฟ้า

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (P} \times \text{t) / 1000 = 25.28 Unit}$$

มอเตอร์ใช้ไฟฟ้าสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (คิดตามอัตราการใช้ไฟฟ้าบ้านเกิน 400 หน่วยขึ้นไฟ ตามที่ กฟน. กำหนด)

- ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น = $25.28 \times 1 \times 4.4217 = 111.8$ บาท

5.5.2 ค่าไฟฟ้าสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

- ใช้มอเตอร์ 1 HP 2 ตัว แรงดันไฟฟ้า 220 V กระแสไฟฟ้า 6.2 A ใช้เวลาสำหรับกระบวนการ 2 ชั่วโมง สูตรหาค่าลึงมอเตอร์ 1 เฟส หรือมอเตอร์เฟสเดียว (กรณีค่า eff. และ PF. ไม่ระบุใน Data Sheet จะใช้ eff. ประมาณ 0.85 และ PF ประมาณ 0.8)

$$P = V \times I \times PF \times \text{eff.}$$

$$P = 220 \times 6.2 \times 0.85 \times 0.8 = 927.52 \text{ W}$$

- ใช้พลังงานไฟฟ้า

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (P} \times \text{t) / 1000 = 1.85 Unit}$$

มอเตอร์ใช้ไฟฟ้าสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (คิดตามอัตราการใช้ไฟฟ้าบ้านเกิน 400 หน่วยขึ้นไฟ ตามที่ กฟน. กำหนด)

- ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น = $1.85 \times 2 \times 4.4217 = 16.36$ บาท

5.5.3 แก๊ส LPG ถึง 48 กิโลกรัม ราคา 1,480 บาท สามารถผลิตถังขยะจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนได้ทั้งสิ้น 9 ใบต่อแก๊ส 1 ถัง รวมเป็นมูลค่าต่อถัง 165 บาท

5.2.4 ค่าวัสดุสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ผงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นหมายเลขทางการค้า LL9641UP จากบริษัท PTT Global Chemical ถูกละ 25 กิโลกรัม ราคาถูกละ 1,350 บาท ใช้ผลิตถังขยะทั้งสิ้น 4 กิโลกรัมรวม 216 บาท (ราคากิโลกรัมละ 54 บาท)

5.2.5 ค่าวัสดุสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนผงพอลิเอทิลีนรีไซเคิล 25 กิโลกรัมรวมราคาการเตรียมวัสดุมูลค่า 486.8 บาทใช้วัสดุทั้งสิ้น 4 กิโลกรัม รวม 129.8 บาท (ราคากิโลกรัมละ 32.45 บาท)

เปรียบเทียบราคาระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงการค้าใช้สำหรับการผลิตรวมมูลค่าไฟฟ้าสำหรับกระบวนการผลิตและราคาวัสดุ 397.63 บาทต่อถัง ราคาพอลิเอทิลีนรีไซเคิลรวมมูลค่าไฟฟ้ากระบวนการผลิตและราคาวัสดุ 311.16 บาทต่อถัง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาแนวทางการกำจัดขยะประเภท HDPE โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนใหม่ถูกใช้ร่วมกับแก้วแกลบจากอุตสาหกรรมเกษตรโดยการเผาในเตาโรงสีเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นทางการค้า (Liner Low Density Polyethylene: LLDPE) วัสดุที่ใช้ในการทดลองถูกเตรียมให้มีลักษณะใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเชิงการค้า โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ลักษณะอนุภาคผง

5.1.1 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาพบว่า ลักษณะของพอลิเอทิลีนเชิงการค้ามีลักษณะที่ค่อนข้างกลมเมื่อเทียบกับ rHDPE มีลักษณะที่แตกต่างกันโดย rHDPE ถูกนำไปดัดขนาดส่งผลให้เกิดลักษณะของหาง

5.1.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย LLDPE อยู่ที่ 254 μm มีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.638 ซึ่งเป็นลักษณะที่ค่อนข้างจะกลม rHDPE มีการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 255 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ย 0.560 และแก้วแกลบมีขนาดเฉลี่ย 174 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ย 0.480 มีรูปร่างลักษณะที่กระจายรูปร่างหลายลักษณะ กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบแห้งไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากวัสดุทั้งสองต่างชนิดกัน

5.2 การวิเคราะห์ความแตกต่างวัสดุในงานวิจัย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะฟลาเวดที่ใช้ในงานวิจัยกราฟบ่งชี้ถึงอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุ (Glass Transition Temperature) ที่ 132.4 $^{\circ}\text{C}$ และพลาสติกที่ไม่ระบุชนิดรีไซเคิลมีอุณหภูมิอยู่ที่ 132.7 $^{\circ}\text{C}$

5.3 ความสามารถในการกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมแก้วแกลบ

กระบวนการขึ้นรูปการผสมแก้วแกลบในกรณีการผสมแบบแห้งสามารถผสมแก้วแกลบได้สูงสุดที่อัตราส่วน 20 %wt. กรณีพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลวสามารถผสมได้สูงสุดที่อัตราส่วน 40 %wt. ตามลักษณะรูปร่างของแม่พิมพ์

5.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการ

ผลการทดสอบเชิงกล ลักษณะการเสียรูปของ LLDPE เป็นการเสียรูปแบบเหนียวและ rHDPE เป็นการเสียรูปแบบแข็งเปราะ ผลของสมบัติเชิงกลที่ได้จะลดลงตามปริมาณการผสมระหว่าง rHDPE และ แก้วเคลบ ปริมาณการเติมที่สูงขึ้นการรับแรงมีแนวโน้มลดลง ปริมาณการเติมแก้วเคลบร้อยละ 10 โดยวิธีการผสมแบบแห้ง ส่งผลให้ค่าการทนการรับแรงได้มากกว่ากรณีแบบแห้งอัตราส่วน 20 และ 30 และกรณีการผสมแบบหลอมเหลวโดยใช้ปริมาณแก้วเคลบร้อยละ 10 โดยน้ำหนักความสามารถในการรับแรงมีแนวโน้มสูงที่สุดสำหรับ วิธีการผสม และปริมาณการใส่แก้วเคลบ ทุกกรณี

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.6.1 ควรปรับปรุงกระบวนการเตรียมวัสดุเนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสำหรับการนำพอลิเอทิลีนรีไซเคิลมาใช้งานในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนยังไม่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

5.6.2 ระหว่างวัสดุคอมโพสิตควรมีการใช้งานสารเติมแต่งในกลุ่มสารปรับสภาพพื้นผิว (Compatibilizer) เพื่อปรับสภาพให้วัสดุมีแรงยึดเกาะกันที่มากขึ้น

5.6.3 ควรศึกษาอบการหมุนของกระบวนการขึ้นรูปเพิ่มเติมอาจส่งผลให้สมบัติการไหลภายในแม่พิมพ์ดีขึ้น

5.6.4 ยังมีวัสดุจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วชนิดอื่นๆ ที่สามารถขึ้นรูปได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนและมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันและปรับปรุงคุณสมบัติได้

บรรณานุกรม

- [1] วีวรรณ ธรรมมงคล. [ออนไลน์]. ม.ป.ป. พลาสติกรีไซเคิล. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.kanchanapisek.or.th/kp11/articles.th.html> (3 กรกฎาคม 2561).
- [2] นิลุบล เพือกบัวขาว. 2550. **สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง**. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] [Oline] Avail: <http://www.plastic.net>.
- [4] เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร. **วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ 1**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] เอกสารประกอบการสอน. ม.ป.ป. **สารสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติก**. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [6] ดร.วินัย จันทร์เพ็ง, ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีดิ์, ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ และดร.กุลวดี สังข์สนิท. 2558. **การเตรียมกล่องขึ้นงานกลวงและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมจากวัสดุรีไซเคิลชนิด HDPE กับกากกาแฟโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน**. รายงานการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [7] [Oline] Avail: <http://pslc.ws/mactest/pe.htm>
- [8] [Oline] Avail: <http://nakhamwit.ac.th/Polymer.htm>
- [9] ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2546. **Polymer Rhology and Applications**. กลุ่มวิจัยและขึ้นรูปพอลิเมอร์คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] Saini D.R., Shenoy A.V. (1983). **Viscoelastic Properties of Linear Low Density Polyethylene Melt**. Eur Polym. J.19 Page 811-816.
- [11] Gupta R.K. (2000). **Polymer and Composite Rheology**. Marcel Dekker Inc. NewYork.
- [12] ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ, ผศ.ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. 2552. **เถ้าแกลบในงานคอนกรีต (Rice Husk Ash in Concrete)**. สำนักพิมพ์ไซน์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง. 31-49.
- [13] Cook D. J, (1979). **Cementitious materials based on rice husk ash**. Workshop on Production of Cement-line Materials from Agro-wastes. Peshawar. Pakistan. UNIDO/ESCAP/RCTT.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] Damar S.A. (1976). **Rice hull ash as a pozzolanic material**. M Eng. Thesis. Asian Institute of Technology. Thailand.
- [15] Hwang C.L. and Wu D.S., (1989). **Properties of cement paste containing rice husk ash**. AC ISP-114. VM Maholtra editor. Page 733-765.
- [16] ปริญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจัตร และสมนึก ประภารธนาธร. 2529. **ปูนซีเมนต์เถ้าแกลบ**. วารสารวิชาการที่อยู่อาศัย การเคหะแห่งชาติ. ปีที่ 3 เล่มที่ 2. 81-92.
- [17] Chanda S., (1997). **Waste Materials Used in Concrete Manufacturing**. William Andrew Publishing. Page 672.
- [18] Ibrahim D.m. and Helmy M., (1981). **Crystal Growth of Rice Husk Ash Silica**. Thermochemica, Acta 45. Page 79-85.
- [19] ปริญา จินดาประเสริฐ และชุมพล จันทรสม. 2530. **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอย**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้าที่ 69.
- [20] Jame L. and Crawford. (2002). **Rotational Molding Technology**, Norwich, New York.
- [21] Nugent P.J., and Crawford R.J., 1992. **Rotational Molding of Plastic**. Crawford, R.J. ed, John Wiley Sons. New York. USA.
- [22] Banu Koc, Ismail Eren and Figen Kaymak Ertekin. (2008). **Modelling Bulk Density, Porosity and Shrinkage of Quince Drying: The Effect of Drying Method**. Original Research Article. Journal of Food Engineering. Volume 85. Issue 3. Page 340-349.
- [23] Biron and Michel. (2007). **Thermoplastic and Thermoplastic Composites**. (1st ed). Burlington: Elsevier Ltd. PCPE.
- [24] Gupta R.K. (2000). **Polymer and Composite Rheology**. Marcel Dekker Inc. New York.
- [25] สิทธิชัย อยู่มั่น และเฉลิมเกียรติ เพชรเลิศ. 2556. **การวัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน**. โครงร่างปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [26] อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธ์, กวีรัตน์ มณีนวล และสุदारัตน์ บุญจำ. 2558. **ความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน**. ปรินานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [27] ศรนรินทร์ ไชศรีรินทร์ และอุดมศักดิ์ ผลอินหอม. 2543. **อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง**. ปรินานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [28] [Oline] Avail : <http://www.marketingblagger.com/reasons-to-consider-plastic-rotational-molding-for-your-next-order/>
- [29] ณรงค์ชัย โอเจริญ, อติเทพ สหธรรมปกรณ์, วิวัฒน์ ไชยนาพงษ์ และจิรวิฑูร์ เกตุโรภาส. 2539. **การสร้างเครื่อง Rotational Molding**. โครงร่างปรินานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.
- [30] Shah, Vishu. (1998). **Handbook of Plastic Testing Technology**. 2nd ed. Jon Wiley and Son. Inc.
- [32] ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ และดร.อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธ์. 2560. **การเตรียมแผ่นดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวัสดุรีไซเคิลขวด HDPE และวัสดุนาโน/ไมโครจากแร่รูไทล์ของไทย**. รายงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [33] Apisit Kositchaiyong, Santi Mitprasertporn, Ekachai Wimolmala, Treerasak Markpin and Narongrit Sombatsompop. (2010). **Utilization of fly ash particles as cost reducing agent for rotational molding polyethylene product through blending condition improvement**. Journal of Research and Innovation for Thai Industries 1.
- [34] E.P. Ayswarya, K.F. Vidya Francis, V.S. Renju and Eby Thomas Thachil. (2012). **Rice huskash A valuable reinforcement for high density polyethylene**. Materials and Design 41. Page 1-7.
- [35] E. Junsri and N. O-Charoen. (2017). **Polypropylene/polyethylene two-layered by one-step rotational molding**. J Polym Eng 2018.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [36] สุภโชค ต้นพิชัย. 2548. **พอลิเมอร์ผสมจากผงพอลิโพรพิลีนและขวดเพตใช้แล้วบดด้วยเทคนิคพัลเวอไรเซชัน**. วิทยานิพนธ์ สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- [37] จักราวุธ วงศ์ศักดิ์. 2557. **การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน**. วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [38] N. Kazemi, E. Hamidinia. and M. Tajvidi. (2005) . **Mechanical Properties of Composites from sawdust and recycle plastic**. Published online in Wiley InterScience.
- [39] Greco, A.and Maffezzoli, A. (2004). **Powder-shape analysis and sintering behavior of High density polyethylene powders for rotational molding**. Journal of applied polymer science. 92(1). 449-460.
- [40] Kamal B., Adhikary, Shusheng Pang and Mark P. Staiger, (2008). **Dimensional stability and mechanical Behaviour of wood-plastic composite based on re cycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)**. Composites: Part B 39. 807-815.
- [41] Crawford R. J., Crawford R. J. and Throne J. L. (2001). **Rotational molding technology**. William Andrew.
- [42] Command USAM. (1975). **Engineering Design Handbook : Rotational Molding of Plastic Powders**. AMC. Virginia.
- [43] Liu F. (2001). **Processing of Polyethylene and Polypropylene Foams in Rotational Molding**. University of Toronto.
- [44] Chaudhary B. I., Takacs, E. and Vlachopoulos J. (2001). **Processing enhancers for Rotational molding of polyethylene**. Polymer Engineering & Science. 41(10). 1731-1742.
- [45] Tcharkhtchi, A., Perrot, E. and Chinesta, F. (2004). **Simulation of thermal phenomena on the interface molten polymer/powder polymer during rotational molding**. International. Polymer Processing. 19(3). 296-302.

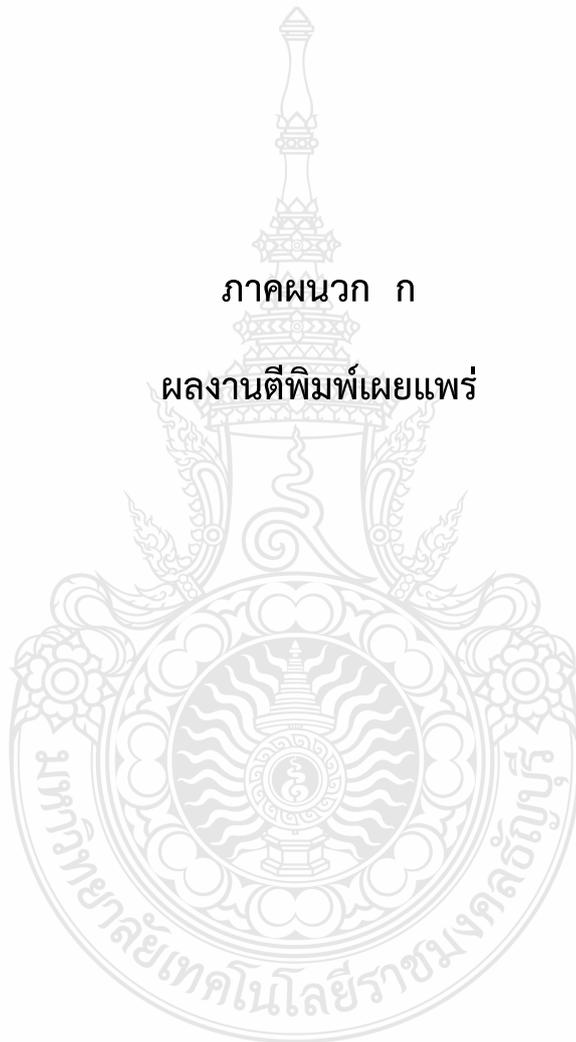
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [46] Qin, L., Ding, Y.-M., Zhu, G.-C., Yu, H.-C., Yang, W.-M. (2015). **Heat Flow Analysis and Efficiency Optimization of Rotational Molding Equipment for Large Plastic Products.** *International Polymer Processing*, 30(2), 194-201.
- [47] G.H.M.J. Subashi De Silva and B.V.A. Perera. (2018). **Effect of waste rice husk ash (RHA) on structural, thermal and acoustic properties of fired clay bricks.** *Journal of Building Engineering* 18. 252-259.
- [48] Furukawa, R., Shiosaka, Y., Kadota, K., Takagaki, K., Noguchi, T., and Shirakawa, Y. (2016). **Size-induced segregation during pharmaceutical particle die filling assessed by response surface methodology using discrete element method.** *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 35, 284-293.
- [49] นิรชา แยมบุญยิ่ง. 2547. **การนำแกลบมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิพรอพิลีนคอมพาวด์.** วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [50] Rosato, D. V., Schott, N. R. and Rosato, M. G. (2001). **Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook.** Springer Science & Business Media.



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติ (National Conferences)

B. Taprasert, E. Junsre, N. O-Charoen, “Using Rice Husk Ash as Additive in Plastic Rotational Molding,” Proceeding, Industrial Engineering Network Conference 2018 (IE NETWORK 2018), Sunee Grand Hotel and Convention Center, Ubon Ratchathani, Thailand, July 23-26 2018, MMA22, P.725-729.





IE NETWORK 2018

IE Tech for High Quality of Life

23 – 26 กรกฎาคม 2561

ณ โรงแรมสุโขทัยแกรนด์ โฮเทล แอน คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

หลักการและเหตุผล



ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม เป็นองค์กรที่จัดตั้งขึ้นเมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ.2525 เพื่อสร้างความร่วมมือด้านวิชาการ การแสดงผลงานความก้าวหน้าและแลกเปลี่ยนความรู้ทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมและสาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ของคณาจารย์และบุคลากรจากสถาบันการศึกษาและหน่วยงานองค์กรอื่น ๆ

ในปี พ.ศ.2561 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้รับเกียรติเป็นประธานจัดงานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE Networks Conference 2018) ร่วมกับภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ในระหว่างวันที่ 23-26 กรกฎาคม พ.ศ.2561 ณ โรงแรมสุนีย์แกรนด์ โฮเทล แอน คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี

วัตถุประสงค์



เพื่อเป็นเวทีในการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ประสบการณ์ งานวิจัยและสิ่งประดิษฐ์ ของนักวิชาการ นักวิจัย นิสิต นักศึกษา วิศวกร ตลอดจนบุคคลทั่วไป ในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เกิดเครือข่ายทางวิชาการและความร่วมมือในการพัฒนาองค์ความรู้ การถ่ายทอดเทคโนโลยี และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย อันส่งผลต่อการพัฒนาสังคมและประเทศให้มีความก้าวหน้าต่อไปในอนาคต

~ จ ~

 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดร.ณัฐ ลีละวัฒน์
ดร.พิศิษฐ์ จารุมนโรจน์
ดร.อมรศิริ วิชาสเดชานนท์
ดร.อริศรา เจียมสงวนวงศ์
ผศ.ดร. สිරง ปรีชานนท์
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.นภัตสงวงศ์ โอสสถิลป์
ผศ.ดร.นระเกณท์ พุ่มชูศรี
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน์
ผศ.ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร
ผศ.ดร.อังคมาลิน แสนจันทร์มิไชย
ผศ.ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย

ผศ.ประเสริฐ อัครประถมพงศ์
ผศ.ภูมิ เหลืองจามีกร
ผศ.สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา
ผศ.หฤทัย โลหะศิริวัฒน์
รศ.จिरพัฒน์ เจาประเสริฐวงศ์
รศ.ดร.จิตรา รุกิจการพานิช
รศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
รศ.ดร.ปวีณา เขาวลิตวงศ์
รศ.ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาต
รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ
ศ.ดร.ปารเมศ ชุตินา
อาจารย์วรโชค ไชยวงศ์

 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.กฤษ วงษ์เกษม
ดร.วรอุฒิ หวังวัชรกุล
ดร.สุดาร์ตน์ วงศ์วีระเกียรติ
ผศ.ดร.พรเทพ อนุสรนิตินสาร

ผศ.ดร.วิสุทธิ สุพิทักษ์
ผศ.ดร.สุวิษภรณ์ วิชกุล
อาจารย์เริงทิวา ทิพย์ศักดิ์
อาจารย์สุวิวัฒน์ สืบสานกุล

 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร.สาลินี สันติธีรากล
ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์
รศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
รศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินทิว
ผศ.ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช

ผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว
รศ.ดร.ชนนภา กฤตวรกาญจน์
รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ
รศ.ดร.วิมลีน เหล่าศิริถาวร
รศ.ดร.เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล

 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ดร.ธรรวรัตน์ นิยะโมสถ
ดร.ฐิติพงศ์ จำรัส
ดร.ปนิทัศน์ สุรีย์ธนาภาส
ดร.ศิริวดี อธิษฐานารด
ดร.ศิโรรัตน์ พัฒนไพโรจน์
ดร.อภิชาติ บุญมา
ผศ.ดร.คมกฤษ ปิติฤกษ์
ผศ.ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เหล่านภากุล

ผศ.ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล
ผศ.ดร.รักษน้อย อัครรุ่งเรืองกุล
ผศ.ดร.วิวัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์
ผศ.ดร.สุขอังคณา แดงกัณฑ์
รศ.ดร.กาญจนา เศรษฐ์นันท์
รศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว
รศ.ดร.ปณิธาน พีรพัฒนา
รศ.ดร.ศิรินทร์ สุขโต
ศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล

 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ดร.จินดา สุনারักษ์
อาจารย์วรินทร์ เกียรติคุณกุล
อาจารย์ศุภพัฒน์ ปิงตา

อาจารย์สุจี ภัทรพุด
อาจารย์อุษาวดี อินทร์คล้าย

 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร. กุลชาติ จุลเพ็ญ
ดร. ประกช สิริสุวัฒน์
ดร. อนินท์ มีมนต์
ผศ. ศุภเอก ประมูลมาก
ผศ. สุรัตน์ ตริยวนพงศ์
ผศ.ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์

ผศ.ดร. ศิริชัย ต่อสกุล
ผศ.ดร.กมลทล ทองศรี
ผศ.ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ
ผศ.ประจักษ์ อ่างบุญตา
รศ.ดร. ณฐา คุปต์ชัยเยียร

 มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.โพธิ์งาม สมกุล
ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ
ผศ.ดร.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

ผศ.ดร.สมลักษณ์ วรรณมถล กิเยลาโรว่า
ผศ.ภาณุ บุรณจารุกร
ผศ.ศิษญา สิมารักษ์

 มหาวิทยาลัยมหิดล

ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย
ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ
ดร.เอกชัย วารินศิริรักษ์
ผศ.ดร.รณชัย ศิริเวธนูกุล
ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์
ผศ.ดร.ศุภชัย ราชภูริศิริ

ผศ.ดวงศ สุกี้กิตย
ผศ.ธนา สาตรา
ผศ. ดร. สรนาถ ไธฏ
รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์
รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

 มหาวิทยาลัยรังสิต

ดร. ประพล จิวะพรทิพย์
ดร. สมพร พรหมดวง
ดร.พิชญ มั่นสปีติ
ผศ.ดร.ธนวรรณ อัสวโพบูลย์

ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ โกญจนาท
อาจารย์ศิลปชัย วัฒนเสย
อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

 มหาวิทยาลัยศิลปากร

ดร.วรฤทัย ชูเกียรติ
ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม
ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์

รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
อาจารย์เกษรินทร์ พูลทรัพย์

 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผศ.ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว
ดร.สุรียา จิรสถิตสิน
ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล
ผศ.ดร.รัชชานา สินธวาลัย
ผศ.ดร.สุภาพรพรรณ ไชยประพัทธ์
ผศ.ดร.อุจน์ สังข์พงศ์

ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ
รศ.ดร.ธเนศ รัตน์วิไล
รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
รศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์
รศ.วนิดา รัตน์มณี
รศ.สมชาย ชูโฉม

 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.จรัสวรรณ โกยวานิช	ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย
ดร.เชาวลิต หามนตรี	ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มนรรรัตน์
ดร.นพดล สุกแสงปัญญา	ผศ.ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข
ดร.นิรันดร์ พิสุทธิอานนท์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
ดร.เพชรพล ตันตวิรุห์	รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
ดร.พลชัย โชติปราชญ์กุล	รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์
ดร.ภาสุ พูนภักดี	รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต
ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข	รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย	อาจารย์รณน เจียรตระกูล
ผศ.ดร.มนัสชนก จงประสิทธิ์พร	

 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส	รศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
ดร.กิตติมา ศิลปะษา	ผศ.ดร.สมบัติ สินธุเขาวน
รศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ	ผศ.ดร.นลิน เพ็ชรทอง
ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์	ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
ดร.จรวัยพร แสนทวีสุข	ผศ.ตะวันฉาย โพธิ์หอม
ผศ.ดร.ธารชуда พันธนิกุล	อาจารย์โท แสงเทียน
ดร.กลิน รั้งสิกรรพุม	อาจารย์ล่อง ฝโลตม
อาจารย์ณัดกิง ศรีโชค	อาจารย์ธน ทองกลม

IE NETWORK 2018

**กำหนดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561 (IE Network Conference 2018)
วันที่ 23-26 กรกฎาคม พ.ศ.2561 ณ โรงแรมสุโขทัยแกรนด์ โฮเทล แอน คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี**

วัน/เวลา	รายละเอียด	หมายเหตุ
วันจันทร์ที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ.2561		
15.00-18.00 น.	ลงทะเบียน	ชั้น 5
วันอังคารที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ.2561		
08.00-09.00 น.	ลงทะเบียน	ชั้น 5
09.00-10.00 น.	พิธีเปิด โดย รองศาสตราจารย์ ดร.นงนิตย์ ชีระวัฒน์สุข อธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
10.00-10.30 น.	บรรยายพิเศษ เรื่อง "IE กับการรักษาสิ่งแวดล้อมเพื่อคุณภาพชีวิต" โดย ศาสตราจารย์อัมพิกา ไกรฤทธิ	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
10.30-10.45 น.	รับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
10.45-11.20 น.	การบรรยาย เรื่อง "Enhance of competitiveness for industry using smart transportation" โดย รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
11.20-12.00 น.	การบรรยาย เรื่อง "Agricultural supply Chain" โดย ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปทุมบุญกุล	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
12.00-13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน	ห้องอาหาร ชั้น 4
13.00-17.30 น.	นำเสนอผลงานวิชาการ	ตามกำหนดการนำเสนอบทความ
13.00-17.30 น.	แข่งขันเขียนโปรแกรม Lindo Optimization Modeling Competition 2018	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
14.30-14.45 น.	รับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
15.00-17.00 น.	ประชุมสามัญหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม	ห้อง VIP3 ชั้น 4
18.00-22.00 น.	งานเลี้ยงรับรอง "คืนรอยยิ้มแห่ง ยามแสงสุกสี ใจอันแห่งสยาม"	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
วันพุธที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ.2561		
08.30-10.30 น.	นำเสนอผลงานวิชาการ	ตามกำหนดการนำเสนอบทความ
10.30-10.45 น.	รับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม	หน้าห้องประชุม
10.45-11.30 น.	การเสวนา เรื่อง "เทคนิคการตีพิมพ์งานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติ (Technical Writing)" ดำเนินรายการโดย รองศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิลาละโส เสวนาโดย <ul style="list-style-type: none"> • ศาสตราจารย์ ดร.วรัศนี ขจิตวิยานุกุล • ศาสตราจารย์ ดร.ตรีเทพ เมลาศิริวงษ์ทอง • ศาสตราจารย์ ดร.ก้องกิติ พุสวัสดี • รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์ 	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
11.30-12.00 น.	การบรรยายพิเศษ เรื่อง "การประกอบวิชาชีพสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม" โดย <ul style="list-style-type: none"> • ดร.มานพ ศรีสุลโยจิตติ • รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร 	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
12.00-13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน	ห้องอาหาร ชั้น 4
13.00-17.30 น.	นำเสนอผลงานวิชาการ	ตามกำหนดการนำเสนอบทความ
14.45-15.00 น.	รับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
วันพฤหัสบดีที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ.2561		
	รายละเอียด	หมายเหตุ
	โปรแกรมทัศนศึกษากระบวนการผลิตสินค้าพื้นบ้าน และศึกษาวัฒนธรรมพื้นเมือง	ทั้งนี้รายละเอียดสามารถดูรายละเอียดได้ที่ Website : ienetwork.eng.ubu.ac.th

กำหนดการนำเสนอบทความ



วันจันทร์ที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ.2561

ช่วงเวลา	ห้องประชุมทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
15.00 - 18.00 น.	ลงทะเบียนเข้าร่วมงานประชุมช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561

วันอังคารที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ.2561

ช่วงเวลา	ห้องประชุมทับทิมสยาม 3 ชั้น 5						
08.00 - 09.00 น.	ลงทะเบียนเข้าร่วมงานประชุมช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561						
09.00 - 10.30 น.	พิธีเปิด/การบรรยายพิเศษ เรื่อง "IE กับการรักษาสังแวดล้อมเพื่อคุณภาพชีวิต"						
10.30 - 10.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง						
10.45 - 12.00 น.	การบรรยายพิเศษ เรื่อง "Enhance of competitiveness for industry using smart transportation" และ การบรรยายพิเศษ เรื่อง "Agricultural supply Chain"						
12.00-13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน						
13.00 - 14.45 น.	ห้องประชุม						
	A1	A5	A7	B3	B4	ปทุมชาติ	ปทุมทิพย์
	QME 1	QME 8	MMA 1	SME 1	LSC 1	OHP 1	ORT 1
	QME 2	QME 9	MMA 2	SME 2	LSC 2	OHP 2	ORT 2
	QME 3	QME 10	MMA 3	SME 3	LSC 3	OHP 3	ORT 3
	QME 4	QME 11	MMA 4	SME 4	LSC 4	OHP 4	ORT 4
	QME 5	QME 12	MMA 5	SME 5	LSC 5	OHP 5	ORT 5
	QME 6	QME 13	MMA 6	SME 6	LSC 6	OHP 6	ORT 6
14.45 - 15.00 น.	พักรับประทานอาหารว่าง						
	QME 15	QME 25	MMA 8	SME 8	LSC 8	OHP 8	ORT 8
	QME 16	QME 26	MMA 9	SME 9	LSC 9	OHP 9	ORT 9
	QME 17	QME 27	MMA 10	SME 10	LSC 10	OHP 10	ORT 10
	QME 18	QME 28	MMA 11	SME 11	LSC 11	OHP 11	ORT 11
	QME 19	QME 29	MMA 12	SME 12	LSC 12	OHP 12	ORT 12
	QME 20	QME 30	MMA 13	SME 13	MMA 18	OHP 13	ORT 13
	QME 21	QME 31	MMA 14	SME 14	MMA 19	OHP 14	ORT 14
15.00 - 17.30 น.	QME 22	QME 32	MMA 15	SME 15	MMA 20	OHP 15	ORT 15
	QME 23	QME 33	MMA 16	SME 16	MMA 21	OHP 16	ORT 16
	QME 24	QME 34	MMA 17	SME 17	MMA 22	OHP 17	ORT 17
	QME 25	QME 35	MMA 18	SME 18	MMA 23	OHP 18	ORT 18
13.00 - 17.30 น.	แจ้งชั้นเขียนโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ Lindo ณ ห้องประชุมทับทิมสยาม 3 ชั้น 5						
15.00 - 17.00 น.	ประชุมสามัญหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ณ ห้อง VIP 3 ชั้น 4						
18.00 - 22.00 น.	งานเลี้ยงรับรอง "คืนโฮมฮักแพง ยามแลงสุซึ๋ ไออีแห่งสยาม" ณ ห้องประชุมทับทิมสยาม 3 ชั้น 5						

สารบัญ



	หน้า
คำนำ	ก
สารจากอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ข
สารจากคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ค
สารจากประธานจัดงานประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561	ง
หลักการและเหตุผล	จ
วัตถุประสงค์	ฉ
สาขาวิชาในการประชุมวิชาการ	ณ
รายชื่อคณะกรรมการดำเนินการจัดประชุม	ช
ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ	ญ
กำหนดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561	ต
กำหนดการนำเสนอบทความ	ถ
สารบัญ	ด
รหัสบทความ	ค

รหัสบทความ



- ☞ Quality, Management and Economy (QME)
- ☞ Material, Manufacturing and Automation (MMA)
- ☞ Safety, Maintenance, Ergonomics and Environment (SME)
- ☞ Logistic and Supply Chain (LSC)
- ☞ Operations Research, Heuristics and Production Planning (OHP)
- ☞ Other Related Topics (ORT)

~ ต ~

MMA 13	การปรับปรุงกระบวนการทดสอบโครงสร้างสำหรับจับยึดสิ่งของบนหลังคารถยนต์ ด้วยระเบียบวิธีไฟในดัดเอลิเมนต์ <i>สมเสียง จันทาลี ฤกษ์วัลย์ จันทราสา และ ชยาคุณน์ สว่างคุณ</i>	678
MMA 14	การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปถ้วยรับน้ำยางพาราจากซีเมนต์ <i>สุชาติ จันทรมณี สิริพิงค์ อวษภาค อภิวัฒน์ อ่อนรักษ์ และ อุดม กาญจนะ</i>	683
MMA 15	การออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยเหง้ามันสำหรับปลา <i>สุชุม ไชยชัยมงคล มนตรี พิพัฒน์ไพบูลย์ และ สุวัฒน์ เฌรโต</i>	690
MMA 16	การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสร้างแรงบิดมาตรฐานด้วยน้ำหนักถ่วงคงที่ ช่วงการวัด 0-100 นิวตัน-เมตร <i>วิศรุต คงสกุล</i>	694
MMA 17	ประสิทธิภาพของดอกกักตุนเมล็ดสูงในการเพิ่มอัตราการผลิตด้วยการเพิ่ม อัตราป้อน <i>สุกัญญา อรรถลชน้อย ณัฐริกา แจ่มพรมมา มนูญ เทพกิจอารีกุล และ ประเมศวร์ เบ้าวรรณ</i>	700
MMA 18	อิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน <i>ชาติรี หอมเขียว สุรสิทธิ์ รัชวิวงศ์ และ วรพงศ์ บุญช่วยแทน</i>	706
MMA 19	การลดความสูญเสียในกระบวนการติดตั้งท่อขึ้น <i>อานนท์ เลิศวงษ์ไพศาล ธนาวิดิ เพชรยศ ทวีวัฒน์ ปาอิน และ อีร์วัฒน์ ประวีติ</i>	711
MMA 20	อิทธิพลทางความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอลูมิเนียมหล่อ สำหรับการผลิตแท่งความแข็งอ้างอิง <i>พงศธร สุทธิตระกูลพร วิชรากร ยศวิริยะพาณิชย์ ธนอม ลีตระกูล สมนึก วัฒนศรีกุล และ สิทธิพงศ์ มหาสมบัติ</i>	716
MMA 21	การศึกษาสมบัติการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของกระเบื้องเคลือบดินเผาสูงหลังคา ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนที่ได้จากการเตรียมแร่แกนติกลูโคซิน <i>พนิดา คำมีสิทธิ์ วิทยา ทรงกิตติกุล สมัญญา สงวนพรรค อนุชา วรรณก้อน และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์</i>	721
MMA 22	การใช้เส้นใยเป็นวัสดุเติมแต่งในงานขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน <i>บรรณรต ทาประเสริฐ เอกตินัย จันทร์ศรี และ ณรงค์ชัย โอเจริญ</i>	725
MMA 23	การศึกษาคุณสมบัติด้านทานสารเติมแต่งในสีน้ำมันของฟิล์มเคลือบ <i>สุวัฒน์ เอื้อวิระวัฒน์ และ ณรงค์ชัย โอเจริญ</i>	730



การใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุเติมแต่งในงานขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน Using Rice Husk Ash as Additives in Plastics Rotational Molding

บรรณรต ทาประเสริฐ¹ เอกทินัย จันทร์ศรี¹ และ ณรงค์ชัย โอเจริญ¹
¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: bannarot_t@gmail.commuttac.th

Bannarot Taprasert¹, Ektinai Jansri¹ and Narongchai O-Charoen¹
¹Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi
E-mail: bannarot_t@gmail.commuttac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการใช้เถ้าแกลบเพื่อเป็นสารเติมแต่งสำหรับผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคือพลของอัตราส่วนผสมขนาดและรูปร่างของเถ้าแกลบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว รวมถึงปริมาณเถ้าแกลบ 0-40 %wt. ที่จะส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน และสมบัติเชิงกลบางประการของชิ้นงาน ผลการวิจัยพบว่าเมื่อนำพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนเกรดทางการค้าสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนจะมีค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index : MFI) เปรียบใกล้เคียงกันแต่มีลักษณะสัณฐานที่แตกต่างกันโดยลักษณะของพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีลักษณะอนุภาคที่มีความเป็นวงกลมต่ำกว่า และในส่วนของลักษณะเถ้าแกลบมีลักษณะรูปร่างและขนาดที่ไม่แน่นอนแตกต่างกันค่อนข้างมาก ส่งผลให้การกระจายตัวในชิ้นงานพลาสติกไม่ดี สำหรับผลของสภาวะในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ผ่านการเติมเถ้าแกลบจะมีอัตราการแพร่ผ่านออกซิเจนจากผนังแม่พิมพ์ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมเถ้าแกลบ ในด้านของสมบัติเชิงกลเมื่อเติมเถ้าแกลบในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้แนวโน้มสมบัติเชิงกลต่ำลง

คำหลัก : กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน, เถ้าแกลบ, พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล

Abstract

Study on the use of rice husk ash as an additive for the recycled high-density polyethylene (rHDPE) products that have already been molded using the rotational molding process. This study investigated the effect of compounding ratio, the size and shape of the rHDPE / rice husk ash. The rice husk ash content was 0-40% by weight, which affected the rotational molding process and some mechanical properties of the specimens. The results of this study show that when the rHDPE is used in comparison with commercial grade for the rotational molding process, the average of Melt Flow Index (MFI) similarity but different in morphology. The characteristics of the rHDPE powders are characterized and found that they are lower in the circularity. In rice husk ash, the shape and size were quite different. This results in the poor distribution inside the plastic products. The effect of the molding conditions, the addition of rice husk ash increased the rate of mold temperature diffusion. In terms of mechanical properties, the higher the amount of rice husk ash, the lower the mechanical properties trend.

Keywords : Rotational Molding, Rice Husk Ash, Recycled High Density Polyethylene



1. Introduction

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ในรูปแบบของใช้และบรรจุภัณฑ์เนื่องจากสมบัติส่วนใหญ่มีน้ำหนักเบาไม่เป็นสนิม ราคาถูก และขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย ปัจจุบันพลาสติกสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะพบลักษณะที่โดดเด่นแตกต่างกัน กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกอย่างหนึ่งซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลม มีขนาดค่อนข้างใหญ่ สมบัติเชิงกลดี เนื่องจากกระบวนการไม่มีความเค้นตกค้างในตัวผลิตภัณฑ์แต่ยังมีข้อจำกัดในการเลือกวัตถุดิบ [1]

การนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาใช้ซ้ำเป็นวิธีการที่ช่วยบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อม รวมถึงสามารถลดต้นทุนการผลิตทางอุตสาหกรรมแต่พลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมักพบปัญหาในด้านการสูญเสียสมบัติบางประการเมื่อมีการนำมาใช้ซ้ำจึงเป็นไปได้ยากสำหรับการควบคุมคุณภาพให้คงที่ จึงต้องใช้ร่วมกับพลาสติกบริสุทธิ์เพื่อควบคุมคุณภาพทำให้ต้นทุนการผลิตในส่วนของวัสดุไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่ากลุ่มขยะพลาสติกมีลักษณะเป็นขวด ขุนหรือแอลลอนที่ใช้บรรจุของเหลวมีขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าขวด เกือบทั้งหมดใช้วัสดุเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) เนื่องจากสมบัติของการทนสารเคมีมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดอื่น ก่อให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิตน้อย และพบวัสดุชนิดนี้ถูกทิ้งเป็นจำนวนมากในแต่ละทิ้งขยะหลังการใช้งาน แต่ในทางตรงข้ามมีการนำเอาเม็ดพอลิเอทิลีนมาใช้ไม่มากนักเนื่องจากสมบัติบางประการที่สูญเสียไปอีกทั้งการควบคุมคุณภาพเป็นไปได้ยาก [2], [3]

ในขณะที่กากเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash : RHA) ก็เป็นวัสดุเหลือใช้อีกชนิดหนึ่งที่อาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลซึ่งได้มากแกลบหลังจากการสีข้าว มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดเถ้าแกลบที่เหลือจากการเผาปริมาณมากในปัจจุบันมีการศึกษาเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะการผสมในคอนกรีตแต่ยังไม่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากวัสดุอื่นโดยเฉพาะเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้งานได้มากกว่าโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการลดขนาด ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบยังคงต้องมีการวิจัยและพัฒนาโดยเฉพาะการใช้งานระยะยาว ความคงทนการกัดกร่อนของสารเคมีและในด้านความเข้ากันระหว่างวัสดุหลักและเถ้าแกลบ [4], [5]

ดังนั้นในงานวิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญในการใช้งานพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ซ้ำอย่างเหมาะสมเพื่อนำมาใช้ผลิตขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนโดยการเติมวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่ผ่าน

การใช้งานในโรงไฟฟ้าชีวมวลเป็นสารแทนเนื้อ (Filler) นอกจากนี้ในงานวิจัยในด้านสภาวะการผลิตที่เหมาะสม เช่น การเตรียมวัสดุ ลักษณะรูปร่างความสามารถในการหลอมเหลวและความสามารถในการขึ้นรูปของพลาสติกรีไซเคิล เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

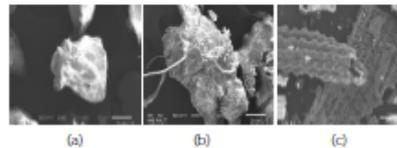
2. Experimental

2.1 Material

ในงานวิจัยใช้พลาสติกชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene : LLDPE) เกรด LL9641UP จากบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด มีอัตราการไหล 4 g/10min เพื่อใช้ทดสอบเปรียบเทียบกับพลาสติกรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง (Recycle High Density Polyethylene : rHDPE) ที่ได้จากฟาร์มชาน้ำ มีอัตราการไหล 7.23 g/10min (190 °C/2.16 kg)

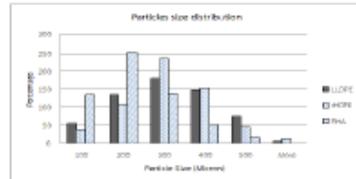
อนุภาคผงเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash : RHA) จากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ขนาดประมาณ 200-300 micron

ในงานวิจัยได้มีการจัดเตรียมวัสดุให้มีความใกล้เคียงกับวัสดุเชิงการค้า โดยจะทำการลดขนาดวัสดุที่เตรียมได้ด้วยเครื่องบดแบบในเม็ดและควบคุมขนาดอนุภาคโดยกำหนดระยะเวลา 15 นาทีครั้ง



รูปที่ 1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค a. อนุภาคผงพลาสติกชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น LLDPE, b. อนุภาคผงพลาสติกรีไซเคิลชนิดความหนาแน่นสูง rHDPE และ c. อนุภาคผงเถ้าแกลบ RHA

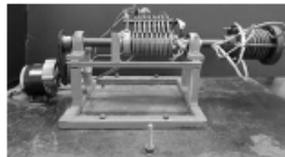
โดยการศึกษาลักษณะรูปร่างด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 200x ลักษณะของผลที่ใช้ในการทดสอบจะมีความแตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน แสดงในรูปที่ 1 ลักษณะขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงคำนวณได้จากการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ขนาด ImageJ วัสดุเมื่อผ่านการลดขนาดจะถูกทำให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของ LLDPE การตรวจการค้าเพื่อเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างการกระจายขนาดของอนุภาคผงแสดงรูปที่ 2 จะเห็นว่าขนาดอนุภาคของพอลิเอทิลีนการทางการค้าและพอลิเอทิลีนที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงระหว่าง 200-400 micron



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของอนุภาคผง LLDPE อนุภาคของแข็ง rHDPE และอนุภาคของอนุภาค RHA

2.2 Equipment and Experimental Procedure

เครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบแกนเดี่ยว ของคณะวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี แสดงในภาพที่ 3 เป็นระบบหมุนประกอบด้วยเพลามีความยาว 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm เกียร์แบบโซ่สามารถปรับความเร็วรอบได้ 7-300 rpm แม่พิมพ์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm ยาว 90 mm ระบบทำความร้อนแบบไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการขึ้นรูปสูงสุด 400 °C ติดตั้งบริเวณรอบผิวด้านนอกของแม่พิมพ์ระบายความร้อนโดยใช้พัดลมตามมาตรฐานอุตสาหกรรมทั่วไปสามารถปรับอัตราการระบายความร้อนได้ 3 ระดับ



รูปที่ 3 เครื่องขึ้นรูปแบบแกนเดี่ยว Axial Powder Flow Apparatus

2.3 Experimental Procedure

การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบใช้เครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบทวิ مخروط (Double Cone Mixer) โดยเวลาการผสม 15 นาที โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบถูกแบ่งเป็น 2 ชนิด rHDPE ที่ได้จากฝ่ายวัด ผสมรวมกับเถ้าแก้ว และถูกเปรียบเทียบกับ LLDPE เกรดทางการค้า โดยการผสมจะถูกแบ่งเป็น 5 สูตรการผสมดังนี้ rHDPE 100 %wt, rHDPE/RHA 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 %wt. ในการขึ้นรูปใช้เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแกนเดี่ยว (Axial Powder Flow Apparatus) ใช้ผงวัสดุ 49 g ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 180 °C เป็นเวลา 20-30 min รอบการหมุน 7 rpm จนกระทั่งวัสดุทั้งหมดเคลือบติดผิวแม่พิมพ์ หลังจากนั้นทำการหล่อเย็นโดยใช้พัดลมเป่าชิ้นงานจนอุณหภูมิต่ำลงเหลือประมาณ 50-60 °C หลังจากนั้นปลดชิ้นงานออก ชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่ขึ้นงานที่ได้จะมีขนาดหน้าประมาณ 3 mm

ความหนาแน่นมวลรวม (Bulk Density) และอัตราการไหลแบบแห้งตรวจสอบได้โดยมาตรฐาน ASTM 1895-96 ซึ่งอธิบายถึงลักษณะการไหลขณะเป็นของแข็ง คุณสมบัติของลักษณะการไหลขณะเป็นของเหลวถูกตรวจสอบโดย Melt Flow Index (CEAST 8331) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 และตรวจสอบอัตราการหลอมรวมกัน (Sintering Rate) ของวัสดุในช่วงอุณหภูมิ 30-200 °C อัตราการให้ความร้อนและระบายความร้อนที่ 5 °C/นาที ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล 600x ทำงานร่วมกับโปรแกรม ImageJ วิเคราะห์ความหนาของผิวชิ้นงาน เพื่อใช้ทดสอบความแตกต่างของอนุภาคของการผสมและสมบัติเชิงกลจะถูกทดสอบในรูปของกราฟบีบแรงอัด

3. Results and Discussion

3.1 Powder Properties

ความหนาแน่นมวลโดยรวมและอัตราการไหลแสดงในตารางที่ 1 อนุภาคที่มีขนาดเล็กส่งผลให้อัตราการไหลที่เร็วทำให้ความหนาแน่นมวลรวมเพิ่มขึ้นและมีอัตราการไหลแบบแห้งที่ 0.39 g/cm³ และ 9.8 sec ตามลำดับ สำหรับ rHDPE และเถ้าแก้วจะถูกนำมาเปรียบเทียบโดยการกระจายขนาดของอนุภาคและขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีความคล้ายคลึงกัน แต่จะมีความแตกต่างในเรื่องของลักษณะของอนุภาคผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของผง LLDPE มีอัตราการไหลที่เร็วเนื่องจากมีอนุภาคของผงพลาสติกมีลักษณะค่อนข้างกลมจึงมีความหนาแน่นสูงเนื่องจากช่องว่างระหว่างพลาสติกที่ซึ่งแตกต่างจากรHDPE ที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีทางแสดงในรูปที่ 1 จึงส่งผลต่อสมบัติการไหลแบบแห้ง

ตารางที่ 1 Powder Properties

Materials	Bulk Density (g/cm ³)	Dry flow (sec)
LLDPE	0.39	9.8
rHDPE	0.30	-
RHA	0.28	12.67

3.2 Melt Flow Index (MFI)

การทดสอบค่าดัชนีการไหลของของเหลวผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2 พบว่า rHDPE ที่ได้มาจากฝ่ายวัดน้ำผ่านกระบวนการ Injection Molding มีแนวโน้มลดลงซึ่งอาจเกิดจากสายไดโนแลกซ์ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปจะถูกทำให้สายโซ่ไดโนแลกซ์ถูกทำลายหรือแยกออกจากกัน หรือเกิดการขยายออกหรือแม้กระทั่งการเกิดการเชื่อมโยงกัน เป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนและการสลายตัวของอนุโมลอิสระผลที่เกิดจากการสลายตัวจะส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลและการกระจาย



น้ำหนักโมเลกุล [6] และเมื่อผสมเข้าแก่ลบใน sHDPE ที่ปริมาณ
เข้าแก่ลบ 10%, 20%, 30%, 40% จะมีค่าอัตราการไหลอยู่ที่
4.62, 2.85, 1.95, 0.79 g/10 min ตามลำดับพบว่าอัตราการ
ไหลต่ำลงจากเดิม ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเข้าแก่ลบจะไปส่งผลให้อัตรา
การไหลของพลาสติกลดลง อาจเป็นผลมาจากลักษณะรูปร่างของ
ผงเข้าแก่ลบที่มีลักษณะต่างๆเข้าไปขัดขวางสมบัติการไหลของ
พลาสติก

ตารางที่ 2 The Melt Flow Index (MFI)

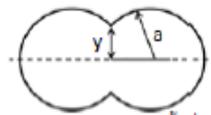
Materials	MFI (g/10min) (190 °C/2.16 kg)
LLDPE เจริญการค้า	4
sHDPE	7.23
sHDPE:RH40:10	4.62
sHDPE:RH40:20	2.85
sHDPE:RH40:30	1.95
sHDPE:RH40:40	0.79

3.3 Sintering rate

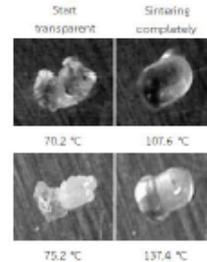
การดำเนินการทดสอบในขั้นต้นเริ่มจากอนุภาคสอง
อนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันจะอุกวางให้หน้าสัมผัสติดกันบน
แผ่นทำความร้อนหรือมีการให้ความร้อนคงที่โดยการเปลี่ยนแปลงที่
เกิดขึ้นทางกายภาพและทางความร้อนจะถูกบันทึกข้อมูลโดย
กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ความ
สมบูรณ์ของการหลอมเหลวจะถูกวัดด้วยมุมสัมผัสของอนุภาค
ระหว่างการหลอม อธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง y หารด้วย
 a ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นกระบวนการ Sintering Rate จะมีค่า
สมบูรณ์ได้มีสูตรการคำนวณดังต่อไปนี้ [7]

$$y/a - 1 \quad (1)$$

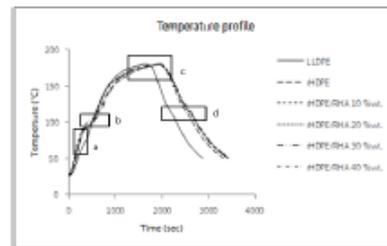
ผลของการทดสอบอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการหลอมเหลว
พลาสติก LLDPE เริ่มจากอุณหภูมิห้องและทำการให้ความร้อน
จนผงพลาสติกเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพที่ 70.2 °c และ
อุณหภูมิของ sHDPE เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ 75.2 °c และเมื่อ
ให้ความร้อนจนอนุภาคผงพลาสติกหลอมจากอนุภาคสองอนุภาค
เป็นอนุภาคเดียวกันของ LLDPE ที่อุณหภูมิ 107.6 °c ของ
sHDPE ที่อุณหภูมิ 137.4 °c แสดงในรูปที่ 5.



รูปที่ 4 Schematic of Particles Sintering พื้นที่หน้าตัดระหว่าง
อนุภาคผงพลาสติกสองอนุภาคที่หลอมและเข้าหากันจนที่ค่า
เข้าใกล้ 1



รูปที่ 5 การหลอมละลายของอนุภาคผงพลาสติก a คือพลาสติกชนิด LLDPE
และ b คือพลาสติกชนิด sHDPE



รูปที่ 6 Internal Air Temperature of Polymer Composite แสดงถึงอัตรา
การขึ้นรูประหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

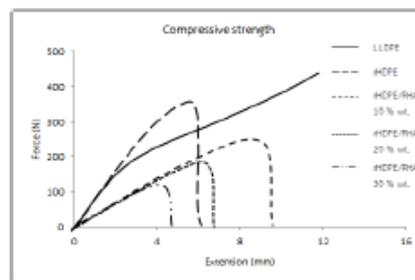
3.4 Temperature Profile of Air Inside the Mold

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายใน
แม่พิมพ์ [8] แสดงในแผนภูมิรูปเส้นในรูปที่ 6 จุดเริ่มแรก a เป็น
จุดแรกที่ความร้อนผ่านเข้าสู่แม่พิมพ์ อุณหภูมิอากาศภายใน
แม่พิมพ์เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น หลังจากอุณหภูมิเริ่ม
หลอมติดแม่พิมพ์ อนุภาคของผงพลาสติกจะสามารถละลาย
ติดกับแม่พิมพ์ที่ประมาณ 70 °c จากนั้นอัตราการให้อุณหภูมิ
เพิ่มขึ้นจนถึงจุด b ซึ่งในจุด b จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้
อนุภาคพลาสติกเกาะติดกันอย่างสมบูรณ์โดยที่อนุภาคของ
พลาสติกไม่เกิดการเคลื่อนที่โดยอนุภาคของ LLDPE จะแสดง
อุณหภูมิประมาณ 85 °c ตามด้วยอนุภาคของ sHDPE ที่ประมาณ
98 °c และวัสดุผสมเข้าแก่ลบจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ที่ 105 °c
เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ตั้งไว้จุด c พลาสติกจะติด
กับผิวแม่พิมพ์เป็นรูปทรงกลมแบบแม่พิมพ์หลังจากนั้นจะทำให้
อุณหภูมิลดลงเพื่อทำให้โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเกิดผลึกแล้ว
จึงปลดออก จากการทดลองพบว่าที่ เข้าแก่ลบ 40 %wt. ไม่
สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากไม่สามารถรักษารูปร่างแม่พิมพ์ที่
ใช้ในการขึ้นรูป [9]



3.5 Mechanical Properties

สมบัติเชิงกลได้รับการทดสอบตามลักษณะรูปร่างที่ขึ้นรูปได้โดยเครื่องทดสอบ Axial Powder Flow Apparatus โดยมีลักษณะชิ้นงานเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 60 mm ยาว 40 mm และหนา 3 mm โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงในโหมดการใช้งานการทดสอบกำลังอัดที่โหลด 10 kN โดยกำหนดความเร็วที่ใช้ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลของค่าโมดูลัสจะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับ LLDPE เชิงการค้ำ อาจมีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพของความร้อนของโมเลกุลใน sHDPE (ฝ่ายวัด) ซึ่งเคยผ่านกระบวนการขึ้นรูป จึงทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนลดลง ผลดังกล่าวจึงเป็นเหตุให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีแนวโน้มค่าจะมีลักษณะแข็งและเปราะที่ต่ำกว่า 0 %wt. ในอิทธิพลของการผสมระหว่าง sHDPE และเม็ดพลาสติกที่เพิ่มปริมาณเม็ดพลาสติกในวัสดุผสมส่งผลให้สมบัติด้านการรับแรงกดอัดต่ำลงตามปริมาณเม็ดพลาสติกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดพลาสติกมีแนวโน้มที่จะจับกันเป็นกลุ่มกันเอง (Self-Aglomeration) [10] และความไม่เข้ากันระหว่าง sHDPE และเม็ดพลาสติกทำให้อายุการใช้งานทดสอบไม่มีความต่อเนื่อง ไม่สม่ำเสมอ อาจกล่าวได้ว่าอนุภาคเม็ดพลาสติกไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงในพอลิเอทิลีนได้



รูปที่ 7 ค่าการต้านทานแรงอัด Compressive Strength

4. Conclusion

สำหรับงานวิจัยนี้ข้อขาดอนุภาคและรูปร่างลักษณะของผงพลาสติกและเม็ดพลาสติกมีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกล เมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่ออัตราการไหลของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณที่ใส่ในพอลิเอทิลีนรีไซเคิล ในด้านสมบัติเชิงกลเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนรีไซเคิลกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นพบว่าพอลิเอทิลีนรีไซเคิลสามารถรับแรงกดอัดได้น้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นและเมื่อเติมเม็ดพลาสติกมีแนวโน้มทำให้สมบัติเชิงกลต่ำลง แม้ว่าผลการศึกษานี้เบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถใส่ปริมาณเม็ดพลาสติก แต่ยังมีตัวแปรสำคัญที่อาจ

ส่งผลต่อการขึ้นรูปเช่นการผสมแบบหลอมเหลว (Melt Blend) และความเร็วในการหมุน ในส่วนตัวแปรจะถูกพิจารณาในขั้นต่อไป

5. Acknowledgment

ขอขอบพระคุณ บริษัทน้ำดื่มเมฆ เองจำกัดสำหรับเช่าชุดน้ำรีไซเคิลและภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับเครื่องมือการขึ้นรูปและทดสอบ

6. References

- [1] จักรวรวรค์ศักดิ์, การศึกษาความไม่บริสุทธิ์ของพอลิเมอร์บนดิน โภชนาการขึ้นรูปแบบหมุน, คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557
- [2] Greco A and Maffezzoli A, Powder-Shape Analysis and Sintering Behavior of High - Density Polyethylene Powders for Rotational Molding, Applied polymer, 2004
- [3] สุภาวรัตน์ รักษ์ลณี, ขาดพลาสติกชนิดรีไซเคิลจากขวดนมที่ผลิตจาก HDPE, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556
- [4] ประชุม คำพูน และคณะ, การศึกษาคอนกรีตผสมเศษเม็ดพลาสติกเสริมแผ่นยางธรรมชาติ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [5] Ayswarya E, Francis K, Renju V and Thachil T, "A valuable reinforcement for high density polyethylene", Materials and Design 41, 2012
- [6] Kocsis K "Polypropylene: an AZ", Springer Science & Business Media, 2012
- [7] Castellanos G "Effect of processing history on the sintering of ethylene copolymers", International Polymer Processing 18, 2003
- [8] Junsri E, O-Chaoren , H-Hamada, Possibility of Polypropylene / Polyethylene two-layered in Rotational molding, J Polymer Eng, 2018
- [9] Tcharkhtchi A, Perrot E, Chinesta F, Int. Polym. Process, 19, 2004
- [10] Kositvhaiyong A, Mitprasertpom S, Wilmolmala E, Markpin T and Sombatsompom N, Utilization of fly ash particles as cost reducing agent for rotational-moulded polyethylene product through blending condition improvement, วารสารวิจัยและนวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมไทย, 1, 2553



LE NETWORK 2018

การประชุมเชิงปฏิบัติการของงานนิเทศกรรมการ ประจำปี พ.ศ.2561

ขอแสดงความยินดีกับผู้ที่ได้เข้าร่วม

บรรณารักษ์ ทาประเสริฐ เอกทินัย จันทร์ศรี และ ณรงค์ชัย โอเจริญ

ได้เข้าร่วมงานสัมมนาของงานทางวิชาการในครั้งนี้

การใช้ได้แลกเปลี่ยนเรียนรู้ดีเติมเต็มแต่ในงานชั้นรูปพลาสติกแบบหมุน

ระหว่างวันที่ 23-26 กรกฎาคม 2561 ณ โรงแรมสุโขทัยไฮเทค แคม คอมเพล็กซ์ เซ็นเตอร์ ๑.๑๐๒๐๒๖๖๖

(รองคณบดี) ดร.พิชญ์ ปิศาจะไธ

ประธานจัดงานประชุมเชิงปฏิบัติการของงานนิเทศกรรมการ ประจำปี พ.ศ.2561

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายบรรณรต ทาประเสริฐ
วัน เดือน ปีเกิด	12 กรกฎาคม 2537
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 183 หมู่ 1 ตำบลปากห้วย อำเภอรัญประเทศ จังหวัดสระแก้ว 27120
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	081-9823557
อีเมล	bannarot_t@mail.rmutt.ac.th, bannarotball2@gmail.com

