

ความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวางในงานฉีดพลาสติกด้วยการเติมเถ้าแกลบ

WELD – LINE STRENGTH IN PLACTIC INJECTION MOLDING WITH
RICE HURK ASH

พรมวิวัฒน์ พรมเลน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ความแข็งแรงของเชื่อมขวางในงานฉีดพลาสติกด้วยการเติมเถ้าแกลบ

พรมวิวัฒน์ พรมเลน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอ
รับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of
Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright
owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.



พรมวิวัฒน์ พรมเลน

(นายพรมวิวัฒน์ พรมเลน)

COPYRIGHT©2021

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI


ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2564

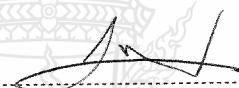
คณะวิศวกรรมศาสตร์

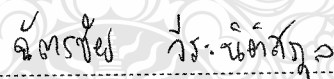
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

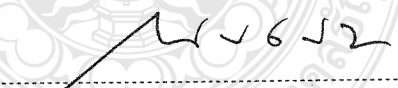
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวางในงานฉีดพลาสติกด้วยการเติมเถ้าแกลบ
Weld-Line Strength in Plastic Injection Molding with Rice Husk Ask
ชื่อ - นามสกุล นายพรมวิวัฒน์ พรมเลน
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา 2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



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


..... กรรมการ
(อาจารย์ภูตินันท์ เอื้อวงศ์สุวรรณ, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, Ph.D.)


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

วันที่ 1 เดือน เมษายน พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวางในงานฉีดพลาสติกด้วยการเติมแก้วกลม
ชื่อ – นามสกุล	นายพรมวิวัฒน์ พรมเลน
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) เป็นเมทริกซ์หลักและแก้วกลม (RHA) เป็นสารเติมแต่ง แล้วศึกษาอิทธิพลของขนาดและอัตราส่วนผสมแก้วกลม ที่มีผลกระทบต่อการเกิดรอยเชื่อมขวาง (Weld line) และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฉีดพลาสติก

จากการทำวิจัยได้ศึกษาแก้วกลมขนาด 300 และ 800 ไมโครเมตร ที่อัตราผสม 10, 20, 30, และ 40% โดยน้ำหนักเป็นสารแต่งเติม เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) ผสมด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทิศทาง เพื่อศึกษาอิทธิพลของแก้วกลมที่มีต่อรอยเชื่อมขวางในพลาสติกและผลกระทบต่อสมบัติทางกล จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อใช้แก้วกลมขนาด 300 ไมโครเมตร สามารถขึ้นรูปได้ที่ทุกอัตราส่วนผสมได้แก่ 10, 20, 30, และ 40% โดยน้ำหนักของแก้วกลม แต่พบว่าเมื่อใช้แก้วกลมขนาด 800 ไมโครเมตร จะสามารถนำไปขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ที่อัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนักของแก้วกลมเท่านั้น และจากผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น พบว่ามีแนวโน้มที่จะมีสมบัติทางกลลดลงเมื่อมีการเติมแก้วกลมมากขึ้น แต่ก็พบว่าทำให้ค่ามอดูลัสของการต้านทานการดัดงอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับระหว่างเม็ดพลาสติก HDPE ใหม่ เม็ดพลาสติก rHDPE พลาสติกผสมระหว่าง rHDPE และแก้วกลมขนาด 300 ไมโครเมตร ที่ทุกอัตราส่วนผสม และ พลาสติกผสมระหว่าง rHDPE และแก้วกลมขนาด 800 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนผสมแก้วกลม 10% โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1277, 764.3, 688.5, 728, 1916, 2541 และ 933.4 MPa ตามลำดับ ส่วนค่ามอดูลัสของการต้านทานการดึงได้เท่ากับ 255.42, 160.5, 241.1, 234.66, 517.34, 924.96 และ 242.6 MPa ตามลำดับ

ทำให้สามารถได้ข้อสรุปจากงานวิจัยนี้ว่า การเติมแก้วกลบลงใน rHDPE ไม่ได้เพิ่มความแข็งแรงของการเกิดรอยเชื่อมขวางในงานฉีดพลาสติก แต่สามารถช่วยเพิ่มมอดูลัสได้สูงขึ้นเมื่อมีการเติมแก้วกลบมากขึ้น ในขณะที่ขนาดของแก้วกลบที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นถึง 800 ไมโครเมตร มีแนวโน้มทำให้สามารถขึ้นรูปได้ยากมากขึ้น

คำสำคัญ : การฉีดพลาสติก, รอยเชื่อมขวาง, แก้วกลบ, พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล



Thesis Title Weld-Line Strength in Plastic Injection Molding with Rice Husk Ash

Name – Surname Mr. Promvivat Promlan

Program Materials Engineering

Thesis Advisor Narongchai O-Charoen, Ph.D.

Academic year 2021

ABSTRACT

This study investigated the use of recycled high density polyethylene (rHDPE) as the primary matrix and rice husk ash (RHA) as the additive and then examined the influence of the size and ratio of rice husk ash mixture that affected the weld-line formation and mechanical properties of plastic injection molding.

In this research, rice husk ash of 300 and 800 μm at mix ratios of 10, 20, 30, and 40% by weight as additive were added to used high density polyethylene (rHDPE), and it was mixed by a dry blending method, and then molded by an injection molding process using a mold with a bi-directional plastic entrance to study the influence of rice husk ash on weld-line in plastic and its effect on mechanical properties. The results showed that when using 300 μm rice husk ash, it could be molded at all mix ratios 10, 20, 30, and 40% by weight of rice husk ash. However, it revealed that when using 800 μm rice husk ash, it was able to be completely molded at a mixture ratio of 10% by weight of rice husk ash only. From the results of the strength test of the weld-line, it indicated that there was a tendency to decrease mechanical properties when more rice husk ash was added. However, it showed that the modulus of bending resistance tended to increase compared to the new HDPE resin, rHDPE resin, rHDPE plastic composite and rice husk ash of 300 μm at all mix ratios and a plastic mixture of rHDPE and rice husk ash of 800 μm in size at 10% by weight of rice husk ash mixture ratio was 1277, 764.3, 688.5, 728, 1916, 1998 and 933.4 MPa, respectively. The modulus of tensile strength was 255.42, 160.5, 241.1, 234.66, 517.34, 924.96 and 242.6 MPa, respectively.

In conclusion, this study indicated that the addition of rice husk ash to rHDPE did not improve the weld-line strength in plastic injection molding but could increase the modulus with the addition of more rice husk ash. While the size of rice husk ash, as large as 800 μm , tends to make it more difficult to mold.

Keywords: Plastic injection molding, Weld-line, Rice husk ash, Recycled high density polyethylene



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเพราะได้รับความกรุณาอย่างสูงจากหลายๆ ฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์และกรรมการสอบ ผศ.ดร.ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และผู้ทรงคุณวุฒิ ดร.ภูตินันท์ เอื้อวงศ์สุวรรณ ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องและภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ สำหรับการทดสอบสมบัติของวัสดุ และขอขอบคุณอาจารย์ สุนทร วีระเดชสิกุล กรุณาให้คำปรึกษาส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง เด็กชายปริพรรห์ พรมเลน พี่ เพื่อน น้อง ภาควิชาวัสดุและโลหการ และบริษัทไปรษณีย์ไทย ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากการวิจัยครั้งนี้ขาดตกบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย



พรมวิวัฒน์ พรมเลน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(5-6)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(7-8)
กิตติกรรมประกาศ.....	(9)
สารบัญ.....	(10-11)
สารบัญตาราง.....	(12-13)
สารบัญรูป.....	(14-18)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(19)
บทที่ 1 บทนำ.....	20
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	20
1.2 วัตถุประสงค์.....	21
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	22
1.4 ประโยชน์ที่คาดหวังว่าจะได้รับ.....	23
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.1 พลาสติกรีไซเคิล.....	24
2.2 พอลิเอทิลีน.....	28
2.3 ความเป็นกึ่งก้านของโมเลกุล.....	33
2.4 แกลบและแก้วแกลบ.....	34
2.5 ความหนาแน่นวัสดุพอลิเมอร์.....	42
2.6 สมบัติการไหลและน้ำหนักโมเลกุล.....	43
2.7 วัสดุคอมโพสิต.....	45
2.8 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก.....	48
2.9 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	49
2.10 หลักการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเทอร์โมพลาสติก.....	51
2.11 การไหลของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์ฉีด.....	51
2.12 การไหลแบบน้ำพุ.....	55
2.13 รอยเชื่อมขวาง (WLED LINE).....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 ระยะทางการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์.....	63
2.15 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุล(Orientation) และการหดตัวของเทอร์ โมพลาสติก.....	67
2.16 กรทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก.....	80
2.17 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	96
2.18 การ बदลดขนาดของแข็ง.....	97
2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	99
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	104
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	104
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	105
3.3 วัสดุในงานวิจัย.....	106
3.4 การเตรียมวัสดุสำหรับกระบวนการขึ้นรูป.....	107
3.5 เครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัย.....	108
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	114
4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ.....	114
4.2 ผลผลการทดสอบสมบัติด้านความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC) ฝาขวดน้ำดื่ม.....	115
4.3 การวิเคราะห์หาค่าประกอบของแก้วเคลือบด้วยเทคนิควิเคราะห์.....	116
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ความหนาแน่นและดัชนีการไหล.....	117
4.5 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์.....	119
4.6 สมบัติทางกล.....	120
4.7 การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา.....	128
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	135
5.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกล.....	135
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	136
บรรณานุกรม.....	137-142
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่(ประชุมวิชาการ).....	143-161
ประวัติผู้เขียน.....	162

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	เกรดพอลิเอทิลีนเชิงพาณิชย์โดยใช้ความหนาแน่นของพลาสติกเป็นตัวกำหนด.....	28
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกข้าว.....	35
ตารางที่ 2.3	น้ำหนักและสีของแกลบที่อุณหภูมิต่างกัน.....	36
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ.....	38
ตารางที่ 2.5	ตัวอย่างค่า M_c ของพอลิเมอร์ชนิดต่าง.....	43
ตารางที่ 2.6	กรณีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์ หลอมเหลวละค่าคงที่.....	44
ตารางที่ 2.7	กรณีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์ หลอมเหลวละค่าคงที่.....	44
ตารางที่ 2.8	ค่าอัตราส่วนเส้นทางไหลของพลาสติกบางชนิด.....	55
ตารางที่ 2.9	การหดตัวในการฉีดพลาสติกที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล.....	72
ตารางที่ 2.10	การหดตัวของเทอร์โมพลาสติกบางชนิด.....	78
ตารางที่ 2.11	ตารางสูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดึงต่อแบบ 3 จุด.....	84
ตารางที่ 2.12	เวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบความแข็งของพลาสติกด้วยเทคนิครี็อกเวลล์.....	86
ตารางที่ 2.13	เทคนิคการทดสอบความแข็งแบบรี็อกเวลล์ประเภทต่าง ๆ ในการทดสอบพลาสติก.....	86
ตารางที่ 2.14	ความแข็งรี็อกเวลล์ของพลาสติกประเภทต่าง ๆ.....	87-88
ตารางที่ 2.15	ประเภทการทดสอบความแข็งแรงและระดับของมอดูลัสของพลาสติก.....	89
ตารางที่ 2.16	พิภคขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอดตามมาตรฐานต่าง ๆ.....	92
ตารางที่ 2.17	เปรียบเทียบความเร็วในการตัดและการใช้สารหล่อลื่นในการตัดต่อความต้านทานแรงกระแทกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตตามมาตรฐาน BS.....	96
ตารางที่ 3.1	แผนการดำเนินการ.....	104
ตารางที่ 4.1	แสดงองค์ประกอบของแกลบเฉลี่ยต่ออนุภาค ด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM).....	117

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นและดัชนีการไหลของ rHDPE และ RHA.....	118
ตารางที่ 4.3 สภาวะควบคุมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบ.....	119
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองขึ้นรูปตามสภาวะควบคุม.....	119
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของ HDPE, RHDPE ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	120



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 พลาสติกกรีไซเคิล 7 ชนิด.....	25
รูปที่ 2.2 บรรจุภัณฑ์ชนิด HDPE.....	28
รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน.....	29
รูปที่ 2.4 ลักษณะของโครงสร้างที่ความหนาแน่นสูง.....	29
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างที่ความหนาแน่นต่ำ.....	29
รูปที่ 2.6 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของ Polyethylene.....	30
รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Polyethylene.....	32
รูปที่ 2.8 ความยาวของสายโซ่หลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	33
รูปที่ 2.9 ความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุล (a) สายโซ่เส้นตรงไม่มีกิ่งก้าน, (b) กิ่งก้านสั้น, (c) กิ่งก้านยาวไม่เป็นระเบียบและ (d) กิ่งก้านแบบแห.....	34
รูปที่ 2.10 แกลบและถั่วแกลบดำโรงสี.....	34
รูปที่ 2.11 การเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี.....	37
รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของถั่วแกลบเผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	39-40
รูปที่ 2.13 ความถ่วงจำเพาะถั่วแกลบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา.....	41
รูปที่ 2.14 (a) ความหนาแน่นโดยรวม Bulk Density และ (b) ความหนาแน่นเนื้อ Solid Density.....	42
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log (ความหนืด ณ อัตราเครียดเฉือนต่ำ) และ Log (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก).....	44
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะและการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ในวัสดุคอมโพสิต.....	46
รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงภายในวัสดุคอมโพสิตแต่ละประเภท ทั้งแบบเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว.....	47
รูปที่ 2.18 เครื่องฉีดพลาสติก.....	48
รูปที่ 2.19 โครงสร้างเครื่องฉีด.....	48
รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบเครื่องฉีด.....	49
รูปที่ 2.21 ส่วนของกระบอกฉีด และ สกรูฉีดพลาสติก.....	50
รูปที่ 2.22 การเหือนของของไหลจากการไหลในท่อ.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 การเสียรูปที่เกิดจากการเฉือน	52
รูปที่ 2.24 การไหลของของไหลชนิดต่าง ๆ	53
รูปที่ 2.25 การเกิดชั้นพลาสติกแข็งในแม่พิมพ์เมื่อพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบ.....	54
รูปที่ 2.26 การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ที่เหมือนน้ำพุ.....	55
รูปที่ 2.27 ตำแหน่งการไหลในแม่พิมพ์ที่เหมือนน้ำพุ.....	56
รูปที่ 2.28 ความเร็วในการไหลของพลาสติก.....	56
รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการไหลบริเวณ ด้านหน้าของการไหล (Flow Front)..	57
รูปที่ 2.30 ความเร็วในการไหล.....	57
รูปที่ 2.31 ขั้นตอนการเกิดรอยเชื่อมขวางและร่องบากรูปตัววี (V- shaped).....	58
รูปที่ 2.32 ภาพจำลองพื้นที่รอยเชื่อมขวาง.....	59
รูปที่ 2.33 ตัวอย่างชิ้นส่วนขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดที่มีรอยเชื่อมขวางที่มองเห็นได้.....	59
รูปที่ 2.34 จำนวนทางเข้าพลาสติกกับตำแหน่งรอยเชื่อมขวาง.....	60
รูปที่ 2.35 การออกแบบรูน้ำล้นและการออกครีบเพื่อในการประสานกันของพลาสติก.....	61
รูปที่ 2.36 การวางแนวรอยเชื่อมขวางของพอลิเมอร์และเส้นใยในบริเวณแนวเชื่อมขวาง.....	62
รูปที่ 2.37 การเกิดร่องบากที่อุณหภูมิต่างๆ.....	62
รูปที่ 2.38 การใช้ความเร็วในการฉีดต่ำ.....	64
รูปที่ 2.39 ระยะทางการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ที่ เกิดจากความเร็วในการฉีด.....	64
รูปที่ 2.40 การไหลแบบน้ำพุ (Fountain effect).....	65
รูปที่ 2.41 สมมุติฐานการเกิดขึ้นเชิงตัวในของทางการไหล.....	65
รูปที่ 2.42 กราฟการหาค่าพลูเรียรน์มเบอร์.....	67
รูปที่ 2.43 สายโซ่โมเลกุลวางตัวไปตามบริเวณที่มีความเร็วในการไหลแตกต่างกันมีการ ยึดเป็นเส้นตรงและเกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล.....	67
รูปที่ 2.44 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์.....	69
รูปที่ 2.45 คาคการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่สวนต่างๆ ของความหนา.....	69
รูปที่ 2.46 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตามความยาวของผลิตภัณฑ์.....	70
รูปที่ 2.47 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE.....	72
รูปที่ 2.48 ผลของความหนาผนังผลิตภัณฑ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.49 ผลของอุณหภูมิกระบอกฉีดที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE.....	73
รูปที่ 2.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิโพลีสไตรีน.....	74
รูปที่ 2.51 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน.....	75
รูปที่ 2.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิหลอมเหลว ในกระบวนการฉีด.....	76
รูปที่ 2.53 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิหลอมเหลว ในกระบวนการฉีด (ประเภทอสัญฐาน).....	77
รูปที่ 2.54 การหดตัวและการหดตัวภายหลังของพลาสติกชนิดต่างๆ ในการทดลองฉีด.....	79
รูปที่ 2.55 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และการบวมที่มีต่อการหดตัวภายหลังของ POM (Acetal)..	80
รูปที่ 2.56 รูปหลังการทดสอบแรงดึง.....	81
รูปที่ 2.57 รูปการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด.....	83
รูปที่ 2.58 การทดสอบแบบบรีกเวลล์.....	85
รูปที่ 2.59 ผลกระทบของเวลาต่อการทดสอบความแข็งแบบบรีกเวลล์.....	87
รูปที่ 2.60 การทดสอบแบบไอซอดและชาร์ปี.....	91
รูปที่ 2.61 หน่วยสำหรับพลังงานกระแทก.....	91
รูปที่ 2.62 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแบบไอซอด.....	92
รูปที่ 2.63 ประเภทของความเสียหายของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบคาน (ก) แตกหักสมบูรณ์ (ข) แตกหักแบบบานพับ (ค) แตกหักบางส่วน (ง) ไม่แตกหัก.....	93
รูปที่ 2.64 เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscopy ; SEM.....	97
รูปที่ 2.65 เครื่องบดแบบใบมีด Bosco.....	97
รูปที่ 2.66 ตะแกรงแยกขนาด (Sieve Analysis).....	98
รูปที่ 2.67 ขนาดของช่องรูตะแกรง (Apertrue Size).....	99
รูปที่ 2.68 ความแตกต่างขนาดอนุภาคหลังจากการบดลดขนาด.....	99
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	105
รูปที่ 3.2 (a) ฝาชวดน้ำดื่มที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล 2 (b) ฝาชวดน้ำดื่มที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล 2 บดลดขนาด.....	106

สารบัญรูปรู (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.3	(a) ถ้ำแกลบที่ยังไม่ถูกอบไล่ความชื้น และ (b) ถ้ำแกลบที่ถูกอบไล่ความชื้นและถูกแยกขนาดที่ 300, 800 ไมครอน.....	106
รูปที่ 3.4	เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE)หมายเลขทางการค้า HD1600J.....	107
รูปที่ 3.5	(a) เครื่องบดใบมีด Bossco และ (b) อนุภาค RHDPE ขนาดเฉลี่ย 10 - 20 มิลลิเมตร.....	107
รูปที่ 3.6	เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) และ ชุดตะแกรงลดขนาด.....	108
รูปที่ 3.7	เครื่องทดสอบความหนาแน่นโดยรวมและอัตราการไหลขณะของแข็ง.....	109
รูปที่ 3.8	เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index ; MFI).....	109
รูปที่ 3.9	เครื่อง (Scanning Electron Microscope ; SEM).....	110
รูปที่ 3.10	เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Materials Testing Machine.....	110
รูปที่ 3.11	เครื่องการต้านการดัดงอ Universal Materials Testing Machine.....	111
รูปที่ 3.12	เครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว.....	111
รูปที่ 3.13	เครื่องทดสอบแรงต้านการกระแทก.....	112
รูปที่ 3.14	เครื่องบากชิ้นงาน (notching).....	112
รูปที่ 3.15	เครื่องฉีดพลาสติก.....	113
รูปที่ 3.16	แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก.....	113
รูปที่ 4.1	ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ และตำแหน่งรอยเชื่อมขวางในชิ้นงาน.....	115
รูปที่ 4.2	ผลทางความร้อนของพอลิเมอร์สองชนิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC).....	116
รูปที่ 4.3	ผลแสดงองค์ประกอบของถ้ำแกลบเฉลี่ยต่ออนุภาค.....	117
รูปที่ 4.4	ลักษณะรูปร่างและพื้นผิว (a) RHDPE, (b) ถ้ำแกลบ (RHA).....	118
รูปที่ 4.5	กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบความทนแรงกระแทก.....	121
รูปที่ 4.6	กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบความแข็งที่ผิว.....	122
รูปที่ 4.7	กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบความต้านทานการดัดงอ.....	123
รูปที่ 4.8	กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบยังส์มอดูลัส ของแรงต้านทานการดัดงอ.....	124
รูปที่ 4.9	กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบความทนแรงดึง.....	125

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบยังสัมมอดูลัส ของความทนแรงดึง.....	126
รูปที่ 4.11 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบการยืดตัว ณ จุดขาด.....	127
รูปที่ 4.12 บริเวณชิ้นงานทดสอบสัณฐานวิทยา.....	128
รูปที่ 4.13 รูป (a) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (b) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ RHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมครอน.....	128-129
รูปที่ 4.14 รูป (c) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (d)) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ RHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมครอน.....	129-130
รูปที่ 4.15 รูป (f) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (g) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ RHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 30% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมครอน.....	131-132
รูปที่ 4.16 รูป (h) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (i) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ RHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 40% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมครอน.....	131-132
รูปที่ 4.17 รูป (j) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (k) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ RHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักขนาด 800 ไมครอน.....	133
รูปที่ 4.18 แสดงสัณฐานวิทยาของ RHDPE และ RHDPE เมื่อเติม RHA.....	134

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

HDPE	High Density Polyethylene
rHDPE	Recycle High Density Polyethylene
RHA	Rice Husk Ash
D	Density
M	Mass
V	Volume
ASTM	American Standard Test Method
°C	องศาเซลเซียส
mm.	มิลลิเมตร
MFI	Melt Flow Index



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและกำลังพัฒนาไปสู่ประเทศอุตสาหกรรม จึงมีสิ่งของที่เหลือใช้จากกระบวนการทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่ถูกทิ้งไว้จำนวนมาก ซึ่งเป็นมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมพลาสติกก็มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในวงการเกษตร อุตสาหกรรมและครัวเรือน พลาสติกกลายเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันในยุคปัจจุบัน เนื่องจากพลาสติกไม่เป็นสนิมมีน้ำหนักเบาสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและหลากหลาย จึงทำให้พลาสติกเป็นวัสดุที่มีความนิยมอย่างมาก ปัจจุบันการขึ้นรูปพลาสติกยังสามารถทำได้หลายวิธีและการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding process) เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ได้รับความนิยมมาก อีกทั้งยังสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำและให้อัตราการผลิตที่สูง จึงได้มีการพัฒนาให้สามารถขึ้นรูปได้กับวัสดุหลายประเภทเพื่อใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ทั้งภายในและภายนอก เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์เครื่องใช้ในครัวเรือน ของเล่นสำหรับเด็ก และอื่นๆ อีกมากแต่ในการผลิตมักเกิดข้อบกพร่องขึ้นหลายอย่าง ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ พบข้อบกพร่องที่เกิดจากแนวเชื่อมขวางของพลาสติกที่ไหลมาชนกันในแม่พิมพ์ (weld line) ซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านส่วนประกอบต่างๆ ของชิ้นงานซึ่งถือเป็นสิ่งกีดขวาง (obstacle) การไหลภายในแม่พิมพ์ หรือในกรณีที่มีทางเข้าภายในแม่พิมพ์มากกว่าหนึ่งตำแหน่ง (multi gate) นอกจากนี้การเกิดรอยเชื่อมขวางของพลาสติกยังเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกันมากส่งผลให้ชิ้นงานเกิดรอยตำหนิที่สังเกตเห็นได้ตรงบริเวณรอยเชื่อมขวางของพลาสติก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล โดยเฉพาะรอยประสานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหล จุดบกพร่องในชิ้นงานจะทำให้ความสามารถทางกลลดลงถือว่าสำคัญมาก จึงมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเพื่อหาวิธีการและวัสดุที่นำมาช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับรอยเชื่อมขวางในชิ้นงาน

การนำของเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ซ้ำอีกครั้งหรือการรีไซเคิล (Recycle) เป็นวิธีที่ดีสำหรับการลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งประเทศไทยประสบปัญหาการกำจัดขยะพลาสติกที่เกิดจากขวดน้ำดื่มและของเหลือใช้จากกระบวนการสีข้าว จากสถิติการใช้ขวดพลาสติกสูงถึงปีละ 4,000 ล้านขวด ขวดน้ำดื่มที่วางขายอยู่ประเทศแบ่งออกเป็นขวดใส (PET) 957 ล้านใบและขวดขุ่น (PE) 2,880 ล้านใบ โดยขวดน้ำดื่มหนึ่งขวดฝาขวดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ขวด ฝาขวด ฉลาก และฝาขวดมีปริมาณเท่ากับ 1 ใน 3 ของขวด ขยะที่เกิดจากขวดน้ำดื่มมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมากก่อให้เกิดมลภาวะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม [1] และค่าประเมินปริมาณขยะพลาสติกที่

ประเทศไทยปล่อยลงสู่ทะเลสูงเป็นอันดับ 5 ของโลก มีพลาสติกเพียง 5% เท่านั้นที่ถูกนำมารีไซเคิลอย่างมีประสิทธิภาพ ราว 10% ถูกนำมาเผากำจัด อีก 40% ถูกฝังกลบ ในขณะที่อีกกว่า 30% หรือหนึ่งในสาม ถูกทิ้งอยู่ในระบบนิเวศโดยเฉพาะในทะเลและมหาสมุทร [2] อีกทั้งข้าวเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญมาก ในปีหนึ่งจะมีการเก็บเกี่ยวข้าวได้ทั่วโลกประมาณ 600 ล้านตัน ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากที่สุด มีกำลังการผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน ในปีหนึ่งๆ ประเทศไทยได้กลบจากกระบวนการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน และในแต่ละตัน (1,000 กิโลกรัม) ของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบประมาณ 200 กิโลกรัม และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบ (rice husk ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กิโลกรัม [3]

โดยการศึกษาครั้งนี้มุ่งทำการศึกษาการนำเถ้าแกลบ (RHA) เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) ที่มีอิทธิพลต่อรอยเชื่อมขวางของพลาสติกและผลกระทบต่อสมบัติทางกล ที่ขนาด 300, 800 ไมโครเมตร อัตราผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทิศทางเข้า เพื่อศึกษาอิทธิพลเถ้าแกลบ (RHA) ต่อรอยเชื่อมขวางของพลาสติก และผลกระทบต่อสมบัติทางกล เช่น ความทนแรงกระแทก ความแข็งที่ผิว การต้านทานการดัดงอ ความทนแรงดึง และสัณฐานวิทยาของวัสดุ เพื่อเป็นแนวทางหรือเป็นทางเลือกการนำของเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ซ้ำอีกครั้งหรือการรีไซเคิล (Recycle) ให้ได้วัสดุดิบใหม่ที่มีสมบัติทางกลเหมาะกับการใช้งานภายในอุตสาหกรรมและครัวเรือน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมเถ้าแกลบและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทิศทางเข้า

1.2.2 เพื่อศึกษาการนำเถ้าแกลบและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วผสมด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทิศทางเข้า

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดและอัตราส่วนผสมเถ้าแกลบ เมื่อนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่มีผลกระทบต่อรอยเชื่อมขวางและสมบัติเชิงกลในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทิศทางเข้า

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 เตรียมวัสดุสำหรับการวิจัยคือ เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) จากบริษัท PTT Global Chemical หมายเลขทางการค้า HD1600J พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Recycle High Density Polyethylene : rHDPE) ที่ได้จากฝาขวดที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล หมายเลข 2 บดลดขนาดด้วยเครื่องตัดแบบสองใบมีด และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash : RHA) เป็นอนุภาคผงโดยการคัดแยกขนาด (Sieve) ที่ขนาด 300 , 800 ไมโครเมตร

1.3.2 เตรียมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) วัสดุหลักผสมกับเถ้าแกลบ (RHA) ในอัตราส่วน 10, 20, และ 30% โดยน้ำหนัก ทั้งขนาด 300 , 800 ไมโครเมตร และผสมด้วยวิธีการการผสมแบบแห้ง (Dry Blend)

1.3.3 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding process) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทิศทางเข้า พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูป อุณหภูมิหลอมเหลว 210 - 245 องศา ความเร็วการฉีด 35 cm³/s ความดันในการฉีด 1,500 bar ปริมาณในการฉีด 35 cm³ เวลาในการฉีด 35 วินาทีเป็นต้น ใช้เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น ALLROUNDER 470C GOLDEN EDITION บริษัท ARBURG (Thailand) Co., Ltd.

1.3.4 ทดสอบสมบัติทางกลและการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

1.3.4.1 ทดสอบความทนแรงกระแทก ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ที่มีรอยบาก (notched) ตามมาตรฐาน ASTM D256

1.3.4.2 ทดสอบสมบัติค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงาน แบบ Rockwell ตามมาตรฐาน ASTM D 785

1.3.4.3 ทดสอบสมบัติการต้านการดัดงอ และย้งส์มอดูลัส ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์เซล (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D790

1.3.4.4 ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง เพื่อหาความทนแรงดึง ย้งส์มอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์เซล (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D638

1.3.4.5 ตรวจสอบสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อหาความเข้ากันได้และการกระจายตัวของส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดหวังว่าจะได้รับ

ศึกษาการนำเอาแก้ว (RHA) เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) มีอิทธิพลที่มีรอยเชื่อมขวางในชิ้นงานพลาสติกและผลกระทบต่อสมบัติทางกล เพื่อเป็นแนวทางหรือเป็นทางเลือกการนำของเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ซ้ำอีกครั้งหรือการรีไซเคิล (Recycle) เพื่อลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม และได้วัตถุดิบใหม่ที่มีสมบัติทางกลเหมาะกับการใช้งานภายในอุตสาหกรรมและครัวเรือน



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกรีไซเคิล

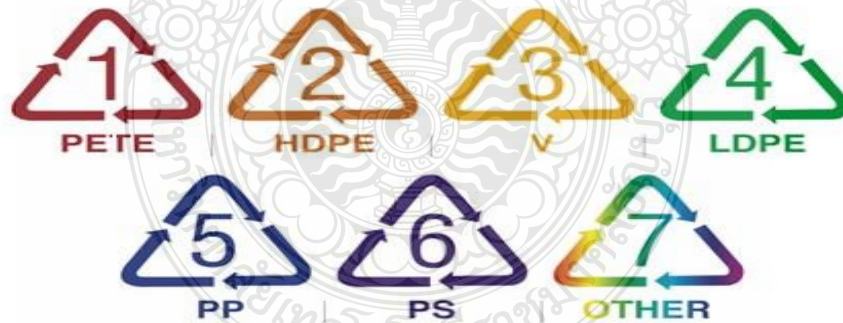
ปัจจุบันพลาสติกได้มีบทบาทในชีวิตประจำวัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนการใช้งาน เนื่องจากพลาสติกสามารถใช้ทดแทนวัสดุอื่นๆ ได้หลายประเภท เช่น เหล็ก ไม้ ยาง เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกขึ้นรูปได้ง่ายและสามารถขึ้นรูปได้หลายกระบวนการ เช่น กระบวนการฉีดพลาสติก เป่า อัดรีด ขึ้นรูปแบบหมุน อีกทั้งพลาสติกมีราคาถูกและน้ำหนักเบา พลาสติกสามารถปรับปรุงและแต่งเติมสมบัติตามต้องการได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additive) เช่น สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารเสริมแรงสภาพทางพลาสติก (Plasticizer) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารเสริมแรง (Filler) สารหล่อลื่น (Lubricant) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) และผงสี (Pigment) เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้มากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มาจากพลาสติกมีมากขึ้น ทำให้สามารถเลือกใช้งานพลาสติกได้หลากหลายรูปแบบและมีการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของพลาสติกได้ตลอดเวลา ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มาจากพลาสติกสามารถออกแบบให้มีความสวยงามและยังสามารถใช้งานได้หลายอย่าง เช่น อุตสาหกรรม ครุฑเรือ การใช้งานพลาสติกมีความนิยมนำมาใช้จึงส่งผลให้เกิดขยะที่มาจากพลาสติกมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งหรือการรีไซเคิล เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะจากพลาสติกและการนำกลับมาใช้ใหม่ ยังเป็นการลดภาระทางสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เมื่ออุณหภูมิสูงจะหลอมเหลวและเมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะเริ่มแข็งตัว พลาสติกประเภทนี้ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีน (PE) พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอสเตอร์ (PET) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น และเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) เป็นพลาสติกที่นำไปขึ้นรูปพลาสติกประเภทนี้ไม่สามารถนำมาหลอมเพื่อกลับมาใช้อีกได้ ตัวอย่างของพลาสติกประเภทนี้ ได้แก่ อีพอกซี (Epoxy) โพลียูเรเทน (PUR) ฟีนอลิก (Phenolic) เมลามีน (Melamine) เป็นต้น [4]

2.1.1 ประเภทพลาสติกรีไซเคิล

การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่เป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้แล้วกลับมาใช้อีกครั้ง ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่างๆ โดยพลาสติกที่ใช้ในการหลอมขึ้นรูปใหม่ให้เป็นผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งออกเป็น 7 ประเภทดังนี้ พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate : PET) มีลักษณะ สี สามารถป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้และความยืดหยุ่นสูง และสามารถนำมารีไซเคิลเป็นเส้นใยได้ สำหรับทำใยสังเคราะห์ เสื้อกันหนาว พรหม พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) เป็นพลาสติกเหมาะสำหรับ

ผลิตถุงหิ้ว ขวดน้ำดื่มแบบขุ่น ขวดบรรจุภัณฑ์สำหรับสารเคมี หรือถังน้ำ เพราะมีความยืดหยุ่นสูงและสามารถป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ นิยมนำมารีไซเคิลเป็น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า ขวดน้ำมันเครื่อง ลังพลาสติก ไม้เทียม เป็นต้น พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 3 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride : PVC) เหมาะสำหรับท่อน้ำ ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า กระเป๋าหนังเทียม ประตูปวีซีซี เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แข็งแกร่งทนสารเคมี ทนน้ำ สามารถทำเป็นสีสันทากหลายได้ นิยมนำมารีไซเคิลเป็นท่อน้ำประปาหรือรางน้ำสำหรับการเกษตร กรวยจราจร เฟอร์นิเจอร์ เคเบิล แผ่นไม้เทียม เป็นต้น พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) เหมาะสำหรับนำมาเป็นถุงเย็นใส่อาหารแช่แข็ง เพราะมีความยืดหยุ่นสูงเหนียว ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี ไม่เหมาะสำหรับบรรจุอาหารร้อน พลาสติก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถนำมารีไซเคิลเป็น ถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหิ้ว พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 5 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) เหมาะสำหรับทำถุงร้อนบรรจุอาหารหรือผลิตกล่องบรรจุอาหารสำหรับนำเข้าไมโครเวฟ เพราะมีความยืดหยุ่นสูง ทนสารเคมี นิยมนำมารีไซเคิลเป็นกล่องแบตเตอรี่ในรถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชนและกรวยสำหรับน้ำมัน ไฟท้าย พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 6 พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) เหมาะสำหรับทำเป็นโฟม กล่อง ถ้วย จาน เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปไม่ซับซ้อน สามารถเพิ่มสีสันทและลวดลายได้ นำมารีไซเคิลเป็นจำพวก ไม้แขวนเสื้อ ไม้บรรทัด กระเป๋า เทอร์โมมิเตอร์ แผงสวิทช์ไฟ ฉนวนกันความร้อน เป็นต้น พลาสติกรีไซเคิลหมายเลข 7 หมายถึงสัญลักษณ์สำหรับพลาสติกชนิดอื่นๆ หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกหลายชนิดร่วมกัน [5]



รูปที่ 2.1 พลาสติกรีไซเคิล 7 ชนิด [6]

ขยะพลาสติกเป็นมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมสามารถกำจัดได้หลายวิธีเช่น การนำไปฝัง การนำไปทำเชื้อเพลิง การนำกลับมาใช้ใหม่เป็นอีกวิธีการที่สามารถนำพลาสติกกลับมาใช้ไปอย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ และการคัดแยกประเภทของพลาสติกเป็นสิ่งที่สำหรับมากเพื่อให้ได้พลาสติกก่อนนำไปรีไซเคิล โดยปกติแล้วพลาสติกที่มีการปะปนกันนั้นจะแบ่งเป็นหลายเฟส ถึงแม้ว่าโครงสร้างทางเคมีจะคล้ายกันแล้ว แต่ก็ไม่สามารถเข้ากันได้ ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะมีโครงสร้างของโมเลกุลที่คล้ายกันแต่มีความแตกต่างกันที่ความหนาแน่นของโมเลกุล และการสารเติมแต่งยังจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการรีไซเคิลของพลาสติก สารเติมแต่งบางชนิดเมื่อใช้ร่วมกันแล้วไม่สามารถแสดงคุณสมบัติเด่นตามที่ต้องการออกมาได้ แต่ก็มีสารเติมแต่งบางชนิดเมื่อผสมลงในพอลิเมอร์จะช่วยให้เกิดพันธะเคมีระหว่างพอลิเมอร์ 2 ประเภท ที่มีความเข้ากันไม่ได้ เช่น สารเติมแต่งจำพวก Compatibilizer จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรีไซเคิล เป็นต้น ดังนั้นการรีไซเคิลพลาสติกจึงเป็นที่สนใจอย่างมาก การพัฒนาเทคโนโลยีในช่วงหลายปีที่ผ่านมาทำให้การรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือการรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary Recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุรภูมิ (Quaternary Recycling)

ประเภทที่ 1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) เป็นการนำเอาขวดพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อน ที่เกิดในกระบวนการผลิตหรือกระบวนการขึ้นรูปมาใช้ซ้ำภายในโรงงานโดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือผสมพลาสติกใหม่ในอัตราส่วนต่างๆ

ประเภทที่ 2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary Recycling) หรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่เป็นการนำเอาพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วทำความสะอาด บด หลอม และขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้งการรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งเป็นเทคนิคต่างๆดังนี้ การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical Recycling) เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมมากในปัจจุบันโดยการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภทและสี ล้างทำความสะอาดก่อนที่จะนำมาบดเป็นชิ้นเล็กและหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่เพื่อสมบัติที่ต้องการก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการขึ้นรูปโดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนั้นจะเป็นตัวกำหนดในการใช้งานและปริมาณที่จะต้องนำไปผสม ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกคือเมื่อพลาสติกถูกกระบวนการรีไซเคิลและขึ้นรูปใหม่ในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพลดลงปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพลาสติกทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและมีราคาถูกลง จนบางครั้งไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน สาเหตุสำคัญสำหรับการรีไซเคิลนี้ เนื่องจากพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมีการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกจากหลายสิ่ง เช่น สี ฉลาก กาว ทำให้เมื่อนำพลาสติกกลับมาขึ้นรูปอีกครั้งจึงทำให้สีเข้มขึ้นและการขึ้นรูปใหม่ยังจะทำให้

เกิดการขาดหรือสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ การขาดหรือสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลจะส่งผลให้สมบัติทางกลในด้านต่างๆ ลดลง เพราะฉะนั้นการเติมสารเติมแต่งเป็นอีกวิธีการที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลได้ โดยวิธีการทางเคมี (Chemical Modification) เนื่องจากพลาสติกกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติการขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้นการปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดทำให้พลาสติกกรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกันกับพลาสติกบริสุทธิ์ การปรับปรุงสามารถใช้ได้กับพลาสติกชนิดเดียวกันหรือพลาสติกผสม ในกรณีพลาสติกชนิดเดียวสามารถเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี แต่ถ้าเป็นพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากัน Compatibilizer การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Co Extrusion and Co Injection Molding) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างเป็นชั้นๆ โดยผิวหน้าจะเป็นพลาสติกชนิดใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงป้องกันรอยขีดข่วนและมีสีสม่ำเสมอ ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกกรีไซเคิล

ประเภทที่ 3 การรีไซเคิลแบบตติภูมิถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้ การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical Recycling) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแยกออก (Depolymerization) ซึ่งจะได้มอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกจะได้เป็นสารตั้งต้นที่มีประสิทธิภาพสูง และการรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างเกิดการแตกหรือขาดด้วยความร้อนซึ่งจะแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation)

ประเภทที่ 4 การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ พลาสติกสามารถนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหินที่ 23 MJ/Kg ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

แม้ว่าการรีไซเคิลพลาสติกยังไม่นิยมมากแต่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ทำให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร การนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนำกลับมาใช้ใหม่เป็นอีกหนทางที่จะช่วยให้รักษาทรัพยากรธรรมชาติซึ่งในยุคเทคโนโลยีที่กำลังพัฒนา ก้าวหน้า อาจจะต้องมีการปรับเปลี่ยนลักษณะการใช้พลาสติก เพื่อไม่ให้พลาสติกที่ใช้งานแล้วไปเป็นขยะแต่กลายเป็นมูลค่าเพิ่มหรือทรัพยากรสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม [7]

2.2 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงแข็งแรง ลักษณะเป็นสีขาวขุ่น นิยมใช้สีเป็นตัวเพิ่มสีส่น และมีความสามารถในการยืดตัวสูง ไม่แตกหัก ยกเว้นขวดน้ำดื่มที่มีลักษณะเป็นสีขุ่น สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและราคาถูก ทนต่อสารเคมี พอลิเอทิลีนเป็นที่นิยมใช้งานได้หลากหลายประเภท เพราะมีความสามารถในการทนความชื้นได้ดีและทนต่อสารเคมี จึงนำมาใช้ในการบรรจุภัณฑ์ประเภท น้ำยาทำความสะอาด แชมพูสระผม ถังหอนมผง ถังกาแฟ เป็นต้น ในปัจจุบันพอลิเอทิลีนถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงมีการจัดประเภททางการค้าของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน แบ่งออกเป็นเกรดต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการใช้งานเชิงพาณิชย์โดยใช้ความหนาแน่นของพลาสติกเป็นเกณฑ์กำหนดดังแสดงตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 บรรจุภัณฑ์ชนิด HDPE [6]

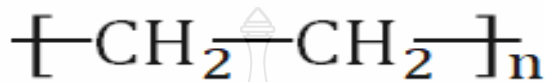
ตารางที่ 2.1 เกรดพอลิเอทิลีนเชิงพาณิชย์โดยใช้ความหนาแน่นของพลาสติกเป็นตัวกำหนด [8]

Polyethylene	Density (g/cm ³)	Type
High Density Polyethylene , HDPE	0.941-0.965	Homopolymer
Medium Density Polyethylene , MDPE	0.926-0.940	Homopolymer
Low Density Polyethylene , LDPE	0.910-0.925	Homopolymer
Liner Low Density Polyethylene , LLDPE	0.925-0.940	Copolymer
Very Low Density Polyethylene , VLDPE	< 0.910	Copolymer

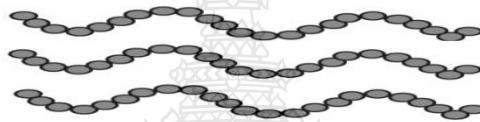
2.2.1 โครงสร้างพอลิเอทิลีน

โครงสร้างสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นแตกต่างกัน จะมีลักษณะของโครงสร้างเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แตกต่างกันที่ลักษณะของโครงสร้างที่มีความเป็นกิ่งก้านของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดเช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจะมีโครงสร้างภายในโมเลกุลที่มีกิ่งก้านน้อย

ทำให้มีการเรียงตัวที่ชิดติดกันทำให้เกิดความหนาแน่นภายในจึงส่งผงถึงน้ำหนักของโมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ขณะที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะมีกิ่งก้านมาก ทำให้การเรียงตัวกับแบบต่างๆ จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลต่ำ ไม่แข็งแรง ส่งผลต่อสมบัติ เช่น ความแข็งแรง ความแข็งเปาะ แต่จะมีข้อดีที่แตกต่าง เช่น มีความเหนียวสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [9]



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [10]



รูปที่ 2.4 ลักษณะของโครงสร้างที่ความหนาแน่นสูง [11]



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างที่ความหนาแน่นต่ำ [11]

กระบวนการสังเคราะห์พอลิเอทิลีน เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติม (Addition Polymerization Reactor) คือปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ที่เกิดจากมอนอเมอร์ของสารอินทรีย์ชนิดเดียวกันที่มี C กับ C จับกัน ด้วยพันธะคู่มารวมตัวกันเกิดสารพอลิเมอร์เพียงชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.6

พอลิเอทิลีนจะเกิดความเค้นได้ในขณะที่แช่อยู่ในของเหลว ในขณะที่ไม่มีของเหลวจะเกิดความเค้นต่ำ และเกิดการแตกหัก พอลิเอทิลีนมีความสามารถทนกรดและด่างได้ดี จึงนิยมใช้ทำภาชนะบรรจุกรดและด่าง หรือสารออกซิไดซ์แรงๆ ได้ ในการพิมพ์รูปภาพหรือตัวหนังสือบนผิวของพอลิเอทิลีนเป็นไปได้ยาก เนื่องจากผิวมีความเรียบและมันเงา ลักษณะผิวคล้ายกับเทียน ในการเตรียมผิวเพื่อสำหรับพิมพ์ต้องด้วยการ ลนด้วยเปลวไฟออกซิอะเซทิลีนหรือเปลวไฟแก๊ส เพื่อให้เกิดออกไซด์บนผิวอีกชั้นหนึ่งก่อนหรืออาจกัด พื้นผิวด้วยสารเคมี

2.2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)

พลาสติกประเภท HDPE พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง คุณสมบัติเบื้องต้นมีความหนาแน่น 0.92 - 0.95 และจุดหลอมเหลวที่ 130 °C มีความหนาแน่นระหว่างโมเลกุลสูง แตกหักยากเนื่องจากมีความเหนียว ค่อนข้างนิ่ม จึงนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น แชมพู ถังร้อนชนิดสีขุ่น ขวดนม เป็นต้น เม็ดพลาสติก HDPE ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่า เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง ทำให้มีคุณสมบัติเด่นหลากหลายเช่น สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความเหนียว ทนต่อแรงดึง และคุณสมบัติภายนอกของพอลิเอทิลีนมีลักษณะ ขาวขุ่น มีแสงผ่านได้น้อยกว่า LLDPE และ LDPE, สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่เปิดกรดต่างไม่ไวต่อสารเคมี มีความยืดหยุ่น เหนียวค่อนข้างนิ่ม และมีความสามารถในการรับแรงทนความต้านทานด้านต่างๆได้ดี เช่น ความสามารถในการรับกระแทกหรือการตัดงอ มักใช้งานเป็นภาชนะที่ต้องรับน้ำหนัก ป้องกันการผ่านของอากาศได้ต่ำจึงไม่เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้การอัดอากาศ ทนความเย็นต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้ใช้บรรจุอาหารแช่แข็ง การขึ้นรูปขวดสามารถใช้ HDPE จะทำให้น้ำหนักขวดลดลงได้มากกว่า LDPE 40% เนื่องจากสามารถเป่าขวดบางได้มาก พอลิเอทิลีนผลิตโดยการอัดแก๊สเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการเติมสารที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่างๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขมัน) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (เป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้)

2.2.4 คุณสมบัติทางกายภาพพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่มีกิ่งก้านน้อย เมื่อความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้มีความแข็งแรง และส่งผลให้ความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีความหนาแน่นลดลงจะทำให้ผิวแตกร้าวได้ง่าย ทนต่อความร้อนได้ไม่มากเท่าที่ควร แต่สามารถทนสารเคมีได้ดี ทนอุณหภูมิสูง 110-120 °C ได้ในช่วงเวลาสั้นๆ แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิในหม้ออัดไอน้ำได้ เท้าพลาสติกชนิด Polypropylene ทนสารเคมีได้มากกว่า Low Density Polypropylene ทนต่อสภาพอากาศได้ดีแต่สภาพอากาศสามารถซึมผ่านได้

2.2.5 การใช้งานพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

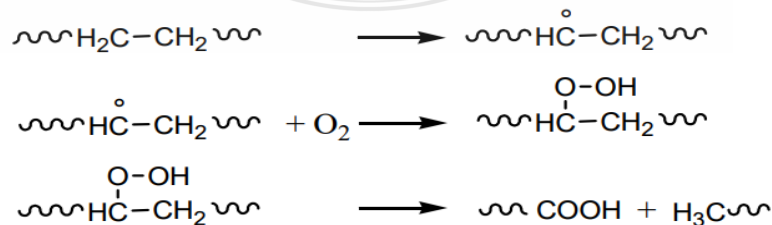
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง มีความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายได้หลายชนิด มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงกระแทก และไม่แตกร้าวง่าย นิยมนำมาใช้ผลิตภาชนะบรรจุจากกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) เนื่องจากคุณสมบัติการหดตัวของพลาสติกในแม่พิมพ์ ทำให้เวลาปลดขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์เป็นไปได้ง่าย ภาชนะที่ผลิตจาก HDPE เช่น ขวดบรรจุน้ำยาซักผ้า น้ำยาทำความสะอาด ขวดบรรจุนมสด ถังบรรจุน้ำมันเครื่อง โตะ แก้ว เป็นต้น นอกจากนี้ HDPE ยังใช้เป็นพื้นผิวงลขยเพื่อป้องกันการรั่วซึมจากสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

2.2.6 ความปลอดภัยในการใช้งาน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมากกว่า PC (Polycarbonate) และ PVC (Polyvinyl Chloride) ซึ่งอาจจะมีการปล่อย Bisphenol A ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และมีข้อดีมากกว่าภาชนะที่ทำจากวัสดุประเภท อื่นๆ เช่น แก้ว กระจก โลหะ เนื่องจากภาชนะที่ใช้ในการบรรจุอาหารต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง ผู้บริโภคจึงควรคำนึงถึงความปลอดภัยของภาชนะ ว่ามีการทำปฏิกิริยากับอาหารที่บรรจุหรือไม่ และมีการปล่อยสารปนเปื้อนมาสู่อาหารหรือไม่ [8]

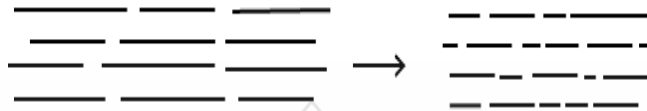
2.2.7 กระบวนการรีไซเคิล

ขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูง พอลิเอทิลีนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) อาจสลายตัวหรือเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้นบนสายโซ่จากนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศกลายเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และเกิดการสลายตัวต่อไปโดยแบ่งสายโซ่ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1. ได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเช่นเดิม ส่วนที่ 2. ได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ปลายข้างหนึ่งกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลลดลงได้ ตัวอย่างของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง เช่น สมบัติการทนแรงกระแทก สมบัติการทนแรงดึง



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Polyethylene [5]

ในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการรีไซเคิลหากในกระบวนการแยกพลาสติกไม่มีประสิทธิภาพ จะมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกส่งผลให้สมบัติบางประการของพลาสติกลดลง



รูปที่ 2.8 ความยาวของสายโซ่หลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [2]

สำหรับพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลจะมีคุณสมบัติลดลงกว่าพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ ในกระบวนการขึ้นรูปใหม่นั้นควรนำผสมพลาสติกใหม่ร่วมกับพลาสติกรีไซเคิลเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ โดยพลาสติก HDPE ที่นิยมนำกลับมาขึ้นรูปใหม่นั้นจะได้เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น ถาดขนมปัง ขวดน้ำดื่ม ขวดแชมพู ถังแกลลอน ถังขยะ เป็นต้น

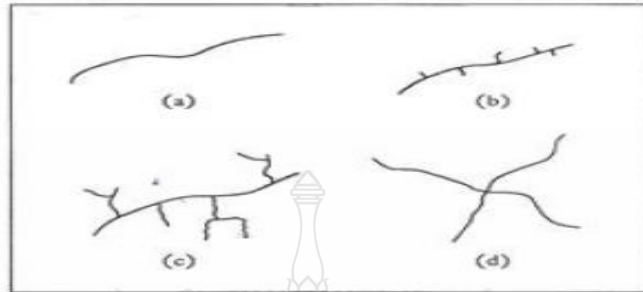
2.3 ความเป็นกิ่งก้านของโมเลกุล (Chain Branching)

ความเป็นกิ่งก้านสายโซ่ของโมเลกุล โดยในสายโซ่โมเลกุลหลัก จะมีความยาวของสายโซ่โมเลกุล จากการผลิตพอลิเมอร์สายโซ่โมเลกุลอาจเกิดกิ่งก้านขึ้นได้ เช่น สังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ziegler-Natta ซึ่งเป็นสารผสมที่สำคัญระดับหนึ่งของสารเคมีที่โดดเด่นในด้านความสามารถในการทำให้เกิดพอลิเมอร์เชิงซ้อนของโอเลฟินส์ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ในลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน จึงมีการควบคุมการเกิดกิ่งก้านของสายโซ่ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติด้านการไหล แบ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุลเป็น 3 ประการ คือ

ความหนืดที่ต่างกันจะสามารถแบ่ง พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านกับไม่มีกิ่งก้านได้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวและการอัดตัวของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งก้านจะสามารถไหลตัวได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้าน ซึ่งในหลักการนี้สามารถเทียบได้กับพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลวได้แต่จะต้องมีความยาวเฉลี่ยของกิ่งก้านใกล้เคียงกัน

น้ำหนักโมเลกุลหรือความยาวของกิ่งก้าน พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านยาวจะทำให้ความสามารถในการไหลลดลงจะมีความหนืด ตรงข้ามกับกิ่งก้านสั้นจะส่งผลให้ความสามารถให้การไหลดี ค่าความหนืดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือน้ำหนักโมเลกุล และการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านยาวจึงส่งผลต่อค่าความหนืด พบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) มีค่าความหนืดที่อัตราครีดยืดเฉือนต่ำ สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่มีความเป็น

เส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene) แต่มีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)



รูปที่ 2.9 ความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่โพลีเอทิลีน (a) สายโซ่เส้นตรงไม่มีกิ่งก้าน, (b) กิ่งก้านสั้น, (c) กิ่งก้านยาวไม่เป็นระเบียบและ (d) กิ่งก้านแบบแห [13]

2.4 แกลบและเถ้าแกลบ

ข้าวเป็นผลผลิตที่สำคัญของประเทศ ในปีหนึ่งจะมีผลผลิตข้าวจากเกษตรกรประมาณ 600 ล้านตัน ประเทศไทยมีกำลังผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน ซึ่งเป็นเปลือกข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ซึ่งโดยปกติในกระบวนการสีข้าว ข้าวเปลือก 100 ตัน จะได้แกลบ 23 ตัน [14]



รูปที่ 2.10 แกลบและเถ้าแกลบตำโรงสี

ส่วนประกอบของแกลบ คือ กลีบเลี้ยง หาง เปลือก เมล็ด และข้าวเมล็ด มีอยู่ประมาณ 20-24 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวเปลือก ซึ่งเป็นของที่เหลือจากกระบวนการสีข้าว ลักษณะทั่วไปของแกลบจะมีขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ความชื้นของแกลบไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ส่วนมากได้มาจากโรงสีข้าว แกลบส่วนมากถูกใช้งานได้หลายอย่าง เช่น ผสมกับดินเพื่อปรับสภาพดิน เชื้อเพลิง เป็นต้น นอกจากนี้

แกลบยังมีมูลค่าสูงถ้าสามารถควบคุมคุณสมบัติให้ได้ตามที่ผู้ซื้อกำหนด ส่วนจุดด้อยของแกลบคือมีปริมาณขี้เถ้าประมาณ 16-18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกข้าว [15]

คุณสมบัติ	
สี	เหลือง/ทอง
ความยาว (มิลลิเมตร)	5 - 10
ความกว้าง (มิลลิเมตร)	2.5 - 5.0
ความแข็ง (Moh Scale)	5.5 - 6.5
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ม ³)	96 - 160

เปลือกข้าวมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ เซลลูโลส (Cellulose) ลิกนิน (Lignin) และเพนโทซาน (Pentosan) รวมกันประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์และสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Component) ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์จึงไม่เหมาะแก่การนำไปเป็นอาหารสัตว์ สมบัติทางกายภาพของเปลือกข้าวพบว่าเปลือกข้าวมีความแข็งประมาณ 6.6 ตามโมสเกล และเนื่องจากแกลบให้ความร้อนคิดเป็นครึ่งหนึ่งของถ่านหิน ซึ่งความร้อนจากการเผาสูงถึงประมาณ 13×10^6 จูล/กิโลกรัม ทำให้มีความพยายามในการใช้เถ้าแกลบเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นแกลบส่วนใหญ่จึงใช้ในการเผาเพื่อนำเอาพลังงานไปใช้ เช่น การเผาอิฐ และการเผาในโรงสี และในปัจจุบันมีการนำแกลบไปใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กและอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในจังหวัด นครราชสีมา นครสวรรค์ และร้อยเอ็ด เป็นต้น การใช้งานแกลบและเถ้าแกลบโดยทั่วไป มักจะใช้เป็นแหล่งในการสกัดซิลิกาซึ่งมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมากมายเนื่องจากปริมาณแกลบที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีแนวทางการใช้งานแกลบและเถ้าแกลบได้ 7 ประเภทดังต่อไปนี้

- ประเภทที่ 1 การใช้งานแกลบเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน
- ประเภทที่ 2 การใช้งานแกลบเพื่อเป็นแหล่งผลิตซิลิกา (SiO_2)
- ประเภทที่ 3 การใช้งานซิลิกาจากแกลบเพื่อเป็นวัตถุดิบในงานเซรามิกส์
- ประเภทที่ 4 การใช้งานซิลิกาจากแกลบเพื่อผลิตซิลิกอน (Si)
- ประเภทที่ 5 การใช้งานแกลบเพื่อผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4)
- ประเภทที่ 6 การใช้งานเถ้าแกลบในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า
- ประเภทที่ 7 การใช้งานเถ้าแกลบในอุตสาหกรรมคอนกรีต เป็นต้น

2.4.1 แกลบกับอุณหภูมิ

การให้ความร้อนกับแกลบจะทำให้แกลบสูญเสียความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แสดงน้ำหนักและสีของแกลบที่เปลี่ยนไปที่อุณหภูมิ 100 °C ความชื้นและน้ำจะถูกกำจัดออกด้วยกระบวนการให้ความร้อนซึ่งแกลบจะคงสภาพเดิม เมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็น 200 °C แกลบจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล กระบวนการเผาไหม้เริ่มต้นโดยน้ำหนักของแกลบจะลดลง น้ำหนักของแกลบโดยทั่วไปจะลดลง 15 เปอร์เซ็นต์และถ้าแกลบที่ผ่านการบดลดขนาดจะมีน้ำหนักลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 300 °C การเผาไหม้จะเกิดมากขึ้นโดยแกลบจะเปลี่ยนลักษณะของสีเป็นสีเทาเข้มและสีดำ น้ำหนักของแกลบจะลดลงกว่าเดิมหลังจากอุณหภูมิถึง 400 °C แกลบจะเริ่มกลายเป็นเถ้า โดยแกลบบดละเอียดจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนและแกลบโดยทั่วไปจะเป็นสีน้ำตาลอ่อนบางส่วนยังคงเป็นสีดำปะปนอยู่ น้ำหนักจะสูญเสียไปถึง 75 เปอร์เซ็นต์ในช่วงนี้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหลักจากนี้จะส่งผลให้น้ำหนักลดลงไม่มาก ที่อุณหภูมิ 600 °C แกลบจะกลายเป็นเถ้าทั้งหมด เห็นได้จากสีของแกลบจะเป็นสีเทาขาว หลักจากเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 600-900 °C จะไม่ส่งผลต่อสีของเถ้าแกลบและน้ำหนัก เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมิ 600 °C จึงเพียงพอต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

ตารางที่ 2.3 น้ำหนักและสีของแกลบที่อุณหภูมิ [16,17]

อุณหภูมิในการเผา (°C)	แกลบบด		แกลบ	
	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

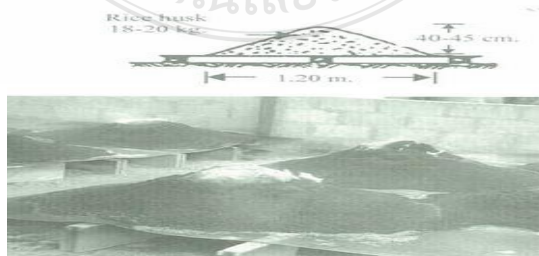
การเผาแกลบในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำและมีอากาศไม่เพียงพอจะทำให้แกลบที่มีสีดำ มีปริมาณคาร์บอน (Carbon) และสิ่งที่ไม่สมบูรณ์อยู่ในปริมาณมาก ถึงแม้การเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงแต่มีปริมาณอากาศไม่เพียงพอ แกลบที่ได้จะมีปริมาณคาร์บอนที่สูง ในการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีอากาศปริมาณจำกัดจะได้คาร์บอน (Carbon) และสิ่งที่ไม่สมบูรณ์สูงถึงเกือบ 40 เปอร์เซ็นต์ในกรณีที่แกลบผ่านการเผาไหม้สมบูรณ์จะมีปริมาณซิลิกาสูง [18]

ขนาดของกองแกลบการทับถมกันเป็นปริมาณมากๆ จนเกิดความหนาแน่นมีผลต่อช่องภายในกองเปลือกข้าวส่งผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ การทับถม ปริมาณ และการเรียงตัวของเปลือกข้าวจะทำให้เกิดช่องว่างและจะส่งถึงการเผาไหม้ การจัดเรียงตัว รูปร่างและขนาดของเปลือก ขึ้นอยู่กับกระบวนการสีข้าวและชนิดของข้าวเปลือก ซึ่งมีผลต่อกระบวนการการเผาไหม้ ดังนั้นเปลือกข้าวที่มีแล้วมีปริมาณการแตกหักและมีขนาดเล็กจะง่ายต่อการเผาในเตาที่ใช้ถังน้ำมัน แต่ถ้าเปลือกข้าวมีขนาดเล็กหรือแตกละเอียดจะได้เถ้าแกลบที่มีสีเทาเทา ในขณะที่เปลือกข้าวที่มีขนาดใหญ่การเผาไหม้จะได้ลักษณะของเถ้าแกลบเป็นสีเทาขาวเฉพาะส่วนที่มีอากาศเพียงพอ ส่วนตรงกลางกองของเปลือกข้าวที่มีอากาศปริมาณไม่เพียงพอเถ้าแกลบจะมีสีเทาและดำ

2.4.2 การเผาเถ้าแกลบ

แกลบจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งและมีน้ำหนักเบา ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะเป็นการเผาไหม้แบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งแกลบจะติดไฟที่บริเวณด้านนอกของกองแล้วจะลามเข้าไปยังภายในกองเถ้าแกลบด้านใน เชื้อเพลิงที่เกิดการเผาไหม้จะกลายเป็นเถ้า (Ash) ซึ่งเถ้าจะขวางการเข้าไปในก้อนเชื้อเพลิงของเปลวไฟ ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์กว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง โดยลักษณะการเผาไหม้สามารถแบ่งเป็น 4 วิธี

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



รูปที่ 2.11 การเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี [15]

2.4.3 คุณสมบัติของเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกข้าวจะมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับข้าวแต่ละชนิดที่ใช้ในการเพาะปลูก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพ ดิน ฝน อากาศ และปุ๋ยที่ใช้ ทุกอย่างจะส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ โดยที่สภาพของดินที่ใช้เพาะปลูกและปุ๋ยจะส่งผลต่อเคมีในดิน เช่น โปแตสเซียม โซเดียม ซึ่งมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควรแต่จะไม่ต่างกันมากเมื่อเถ้าแกลบมีการเผาไหม้สมบูรณ์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีอยู่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังจะเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และซิลเฟอร์ ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on ignition, LOI) จะค่อนข้างต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 5) ปริมาณค่า LOI ส่วนใหญ่ในแกลบจะเป็นคาร์บอนและสารที่เผาไหม้ไม่หมด ถ้ามีปริมาณค่า LOI ในปริมาณสูงคือแกลบที่ผ่านการเผาไหม้ไม่หมดจะส่งผลต่อสมบัติการรับแรงอัด ซึ่งปริมาณคาร์บอนและส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณสูงทำให้ซิลิกาลดต่ำลง

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ [19]

สารประกอบ	เถ้าแกลบ	เถ้าแกลบขาว	เถ้าแกลบดำโรงสี
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 ₅	NA	0.48	0.54
LOI	NA	3.71	4.70

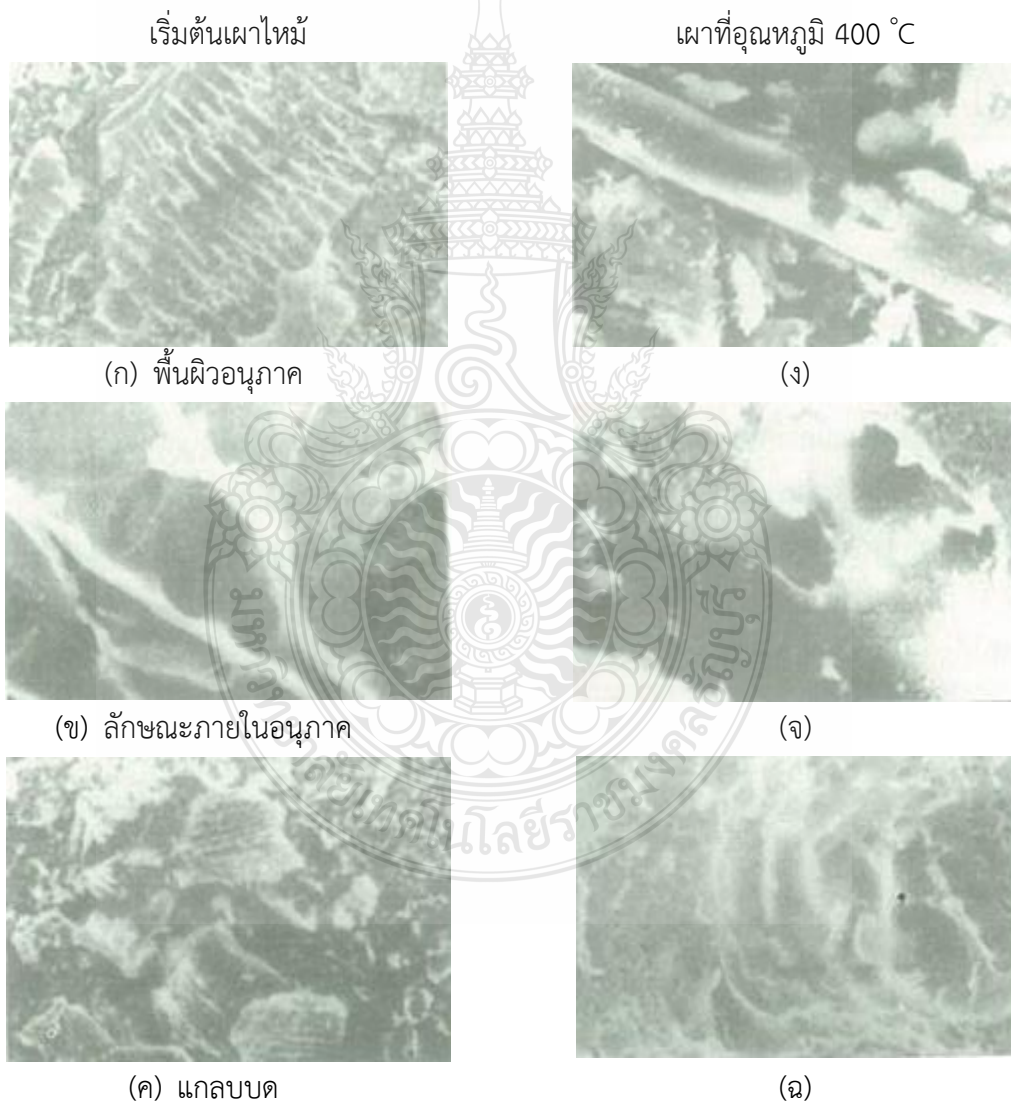
2.4.4 สถานะของซิลิกาในเถ้าแกลบ

ในเถ้าแกลบจะมีซิลิกาเป็นสารประกอบอยู่ปริมาณมากและจะส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบจะขึ้นอยู่กับสถานะของซิลิกา ซิลิกาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous) และซิลิกาที่เป็นผลึก (Crystalline) ซึ่งอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา

ซิลิกาที่เป็นผลึกค่อนข้างอยู่ตัวและเฉื่อยต่อปฏิกิริยา แต่สำหรับซิลิกาที่เป็นแบบอสัณฐานซึ่งได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูงซิลิกาจะมีการเปลี่ยนแปลงผลึกเป็นลักษณะผลึกของควออตซ์ (Quartz) คริสโตบาลไลท์ (Cristobalite) และทริดีไมต์ (Tridymite)

2.3.5 ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างและความพรุนของเก้าแถบบดละเอียด

เก้าแถบที่ผ่านอุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไปจะยังคงรักษาความพรุนและโครงสร้างของเซลล์ไว้ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของเซลล์เก้าแถบที่มีลักษณะเป็นรูพรุนของเก้าแถบ ที่เผาและบดลดขนาดส่วนมากยังคงเป็นลักษณะรูพรุน วิธีการบดละเอียดที่มากเกินไปอาจทำให้ลักษณะเซลล์ถูกทำลายและความเป็นรูพรุนลดลงซึ่งจะส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะและพื้นผิวของเก้าแถบ [20]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของเก้าแถบเผาที่อุณหภูมิต่างๆ [20]

เผาไหม้ที่อุณหภูมิ 500 - 600 °C

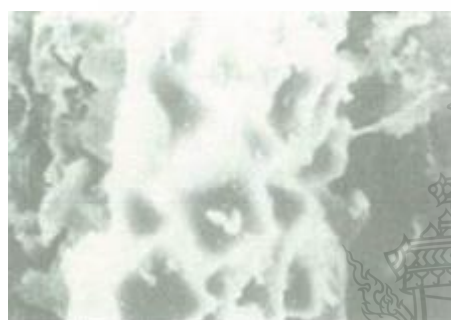
เผาไหม้ที่อุณหภูมิ 700 - 800 °C



(ข)



(ญ) 700 องศาเซลเซียส



(ค)



(ฎ) 800 องศาเซลเซียส



(ฉ)



(ฏ) 800 องศาเซลเซียส

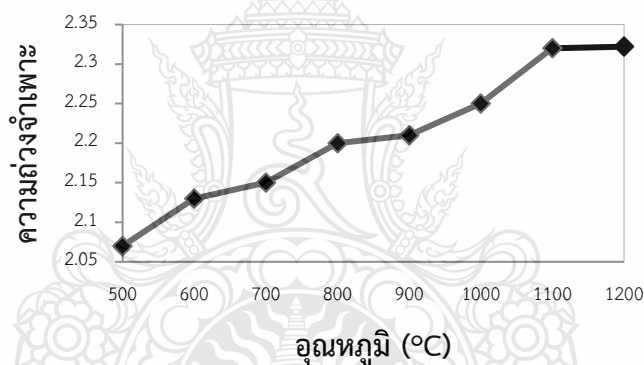
รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ) [20]

การเผาไหม้มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าแกลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยระยะแรกแกลบจะเผาบริเวณจากเปลือกด้านนอกก่อน และลามเข้าไปสู่ภายในของแกลบ ทำให้มีลักษณะที่เผาไหม้ไม่หมด (รูปที่ 2.12 ก และ ข) การบดลดขนาดก่อนเผาจะช่วยในการเผาไหม้ (รูปที่ 2.12 ค) ซึ่งเวลาในการเผาไหม้และอัตราการให้ความร้อนจะส่งผลต่อคุณภาพของเถ้าแกลบที่ได้ แกลบที่ถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 600 °C จะให้ปริมาณเถ้าสูงกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C และจะเรียกในขั้นตอนนี้ว่า Dispersed State (รูปที่ 2.12 ง ถึง ฉ) ที่อุณหภูมิการเผาที่ 700 °C ทำให้สีเถ้าแกลบเปลี่ยนจากสี

เทาเป็นสีชมพู โดยช่วงอุณหภูมิ 800 °C นี้จะเกิดผลึก (รูปที่ 2.12 ญ) จากการเผาไหม้พบว่ามีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอุณหภูมิดังกล่าว (รูปที่ 2.12 ฎ) การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °C ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเถ้าแกลบมากขึ้นเนื่องจากเกิดการหลอมเกิดขึ้น

2.4.6 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผาแกลบ การเผาไหม้เถ้าแกลบที่ไม่สมบูรณ์จะมีปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ในปริมาณมากและจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ในเถ้าแกลบที่มีการเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.9-2.3 และจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เถ้าแกลบเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 500 °C มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และจะเพิ่มขึ้นเป็น 2.2 และ 2.3 ที่อุณหภูมิในการเผา 800 และ 1000 °C ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความถ่วงจำเพาะ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ลดลงและการที่โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลายและที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความพรุนเถ้าแกลบลดลง



รูปที่ 2.13 ความถ่วงจำเพาะเถ้าแกลบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา [21]

2.4.7 ความละเอียด

ความละเอียดของเถ้าแกลบ ขึ้นอยู่กับวิธีในกระบวนการบด เวลาในการบดและยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกระบวนการเผาไหม้และปริมาณอากาศ การเผาแกลบที่อุณหภูมิ 500 °C ให้เถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูงสุด 170 ตร.ม./กรัม (เมื่อวัดโดยวิธี BET) ที่อุณหภูมิ 500-600 °C พื้นที่ผิวมีค่าอยู่ที่ 100-150 ตร.ม./กรัม ที่อุณหภูมิสูงมากขึ้นกว่านี้พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก [21] การลดลงของขนาดพื้นที่ผิวเกิดจากการเป็นผลึกและการทำลายโครงสร้างของเซลล์ที่มีรูพรุน ในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 750 °C ในกระบวนการเผาแบบ Torbed พบว่าความละเอียดของเถ้าแกลบที่ไม่ได้บดมีค่าเท่ากับ 100 ตร.ม./กรัม และเพิ่มขึ้นเป็น 229 ตร.ม./กรัม การเผาไหม้โดยการเพิ่มปริมาณอากาศเข้าไปเถ้าแกลบเทาขาวที่เผาอยู่ในช่วงอุณหภูมิพอเหมาะจะส่งผลให้บดละเอียดได้ง่ายกว่าเถ้าแกลบดำโรงสี ในการบด 1 ชั่วโมงเท่ากัน

ถ้ากลบสีเทาขาวมีความละเอียด 14300 ตารางเซนติเมตร/กรัม (เมื่อวัดโดยวิธีของ Blaine) ส่วนถ้า
กลบดำโรงสีมีความละเอียด 9500 ตารางเซนติเมตร/กรัม [22]

2.5 ความหนาแน่นวัสดุพอลิเมอร์

ความหนาแน่น หมายถึง อัตราส่วนผสมระหว่างมวลต่อปริมาณของวัสดุ สมบัติทางกายภาพ
ของวัสดุ (Physical Properties) ความหนาแน่นของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น ความหนาแน่นรวม
(Bulk Density) และความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

2.5.1 ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density)

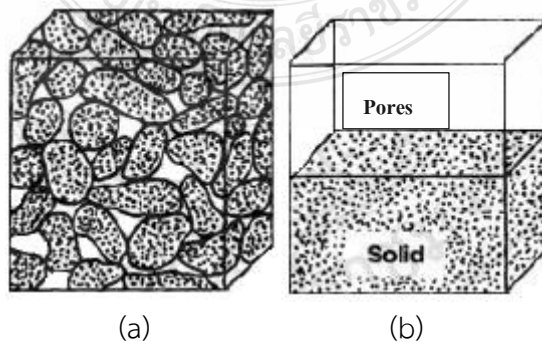
ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) หมายถึงความหนาแน่นของวัสดุ ซึ่งมี
ปริมาณมวลของวัสดุเอง เช่น แป้งมันสำปะหลัง เม็ดข้าวโพด ข้าวเปลือก ผงแป้ง เม็ดพอลิเมอร์ เป็นต้น
รวมตัวกันช่องว่างระหว่างวัสดุ ในการหาค่าความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) มาตรฐานการ
ทดสอบ ASTM D-1895 สามารถทำได้ โดยการนำวัสดุบรรจุลงในภาชนะที่มีขอบสามารถหาค่าปริมาตร
ได้ ปาดหรือเกลี่ยให้เรียบเสมอกับขอบแล้วไปชั่งน้ำหนัก ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นโดยรวม ได้แก่ค่า
ความชื้น (Moisture Content) ของวัสดุ และระดับความสูงของวัสดุที่เทลงมาถึงภาชนะทำให้เกิดการ
อัดแน่น ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวม

ค่าความชื้นของวัสดุ (Moisture Content) จะผลต่อความหนาแน่น เนื่องจากวัสดุ
บางชนิดจะมีการเกาะกลุ่มหรือจับตัวกัน ทำให้ขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป

2.5.3 การใช้ประโยชน์จากค่าความหนาแน่นรวม

ใช้คำนวณหาค่าความพรุน (Porosity) ซึ่งแสดงถึงช่องว่างภายในของวัสดุ ค่าความ
หนาแน่นรวมยังใช้เพื่อการออกแบบขนาดของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับเก็บวัสดุ เช่น ไซโลอาหารสัตว์
ไซโลเก็บปนู เป็นต้น [23]



รูปที่ 2.14 (a) ความหนาแน่นโดยรวม Bulk Density และ (b) ความหนาแน่นเนื้อ Solid Density [24]

2.6 สมบัติการไหลและน้ำหนักโมเลกุล (Flow Properties and Molecular Weight)

พอลิเมอร์เป็นของเหลวที่มีความหนืด เนื่องจากความยาวของสายโซ่โมเลกุล (Long Chain Molecular) และเกี่ยวพันกันอยู่ (Molecular Entanglement) การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวยังเป็นการไหลแบบนอนนิวโตเนียนและแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic non-Newtonian) ซึ่งจะส่งผลต่อความหนืด และค่าอัตราความเค้นเฉือน (Shear Rate) เมื่อต้องการเปรียบเทียบวัสดุหลายชนิด ให้เทียบกับค่าความเค้นเฉือนให้สถานะควบคุมเดียวกัน โดยจะเปรียบเทียบกับที่สถานะความเค้นเฉือนต่ำซึ่งเรียกว่า Zero Shear Viscosity

น้ำหนักโมเลกุลกับความหนืดของพอลิเมอร์มีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ (M_w) ที่ส่งผลต่อค่าความหนืดที่อัตราความเค้นต่ำมาก จากรูปพบว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวจะมีน้ำหนักของโมเลกุลเฉลี่ยสูงขึ้นโดยในช่วงแรกอัตราส่วนค่าความหนืดจะสูงขึ้น จากนั้นความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะเพิ่มขึ้น และเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อผ่านจุดค่าวิกฤตของน้ำหนักโมเลกุล (Critical Molecular Weight, M_c) และจะสูงที่สุดกว่าส่วนที่สูงกว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ เมื่อลากเส้นจากจุดต่อระหว่างความชันมาแกน X ค่าความชันจะสามารถคำนวณหาค่าวิกฤตของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ซึ่งเป็นจุดที่โมเลกุลขนาดใหญ่ และยาวพอที่จะเกี่ยวกันระหว่างสายโซ่ค่า M_c ของพอลิเมอร์อยู่ระหว่าง 10,000 ถึง 40,000 ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ค่า M_c ของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลเพื่อการเคลื่อนไหว (Molecular Flexibility) คือโมเลกุลมีความยืดหยุ่นมากจึงมีค่า M_c น้อย [25]

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างค่า M_c ของพอลิเมอร์ชนิดต่าง [15]

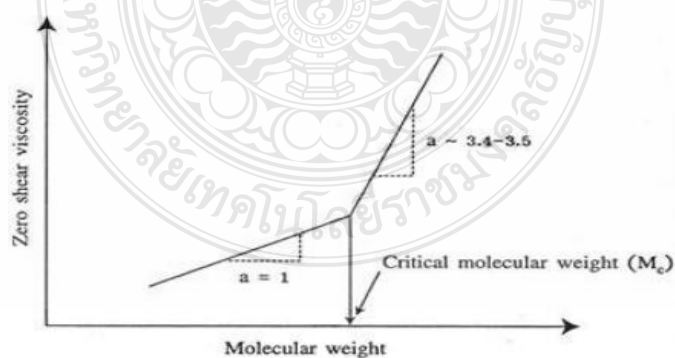
พอลิเมอร์	ค่า M_c
Linear low density polyethylene	4,000
Polyisobutylene	17,000
Polyvinyl acetate	29,200
Polystyrene	38,000
Polydimethyl siloxane	35,200
Polymethyl methacrylate	10,400

ตารางที่ 2.6 กรณีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวค่าคงที่ [15]

กรณี	เงื่อนไข	ค่าคงที่ a
$M_w < M_c$	ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลว	1

ตารางที่ 2.7 กรณีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวค่าคงที่ [15]

กรณี	เงื่อนไข	ค่าคงที่ a
$M_w > M_c$	ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเกี่ยวพันกันของโมเลกุล	3.4 หรือ 3.5



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log (ความหนืด ณ อัตราเฉือนต่ำ) และ Log (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก) [15]

2.7 วัสดุคอมโพสิต (Composite material)

วัสดุคอมโพสิต หมายถึง การนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดที่มีพื้นฐานสมบัติเชิงเคมี และฟิสิกส์ที่มีความแตกต่างกันมาผสมกันแล้วทำให้วัสดุที่ได้มีโครงสร้างใหม่ที่มีสมบัติดีขึ้น โดยยังคงความสามารถแยกวัฏภาค (Phase) ของวัสดุแต่ละประเภทในเนื้อวัสดุคอมโพสิตได้ ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนเมตริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

2.7.1 ส่วนเมตริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนที่ช่วยห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อให้ส่วนเสริมแรงอยู่ในตำแหน่งคงที่ และมีการจัดเรียงตามที่กำหนด โดยทั่วไปเมตริกซ์มักจะมีความเหนียวสูงแต่มีความแข็งแรงและมีโมดูลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง หน้าของเมตริกซ์ในวัสดุคอมโพสิต คือช่วยรักษาความเสถียรของรูปร่างและขนาด รักษาการกระจายตัวของส่วนเสริมแรงทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียหายภายใต้อุณหภูมิหรือแรงกระทำได้ในระดับหนึ่งและช่วยป้องกันส่วนเสริมแรงเสียหายจากสิ่งแวดล้อมได้ ในปัจจุบันเมตริกซ์ที่นิยมใช้ส่วนมากได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก เป็นต้น สำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเมตริกซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset)

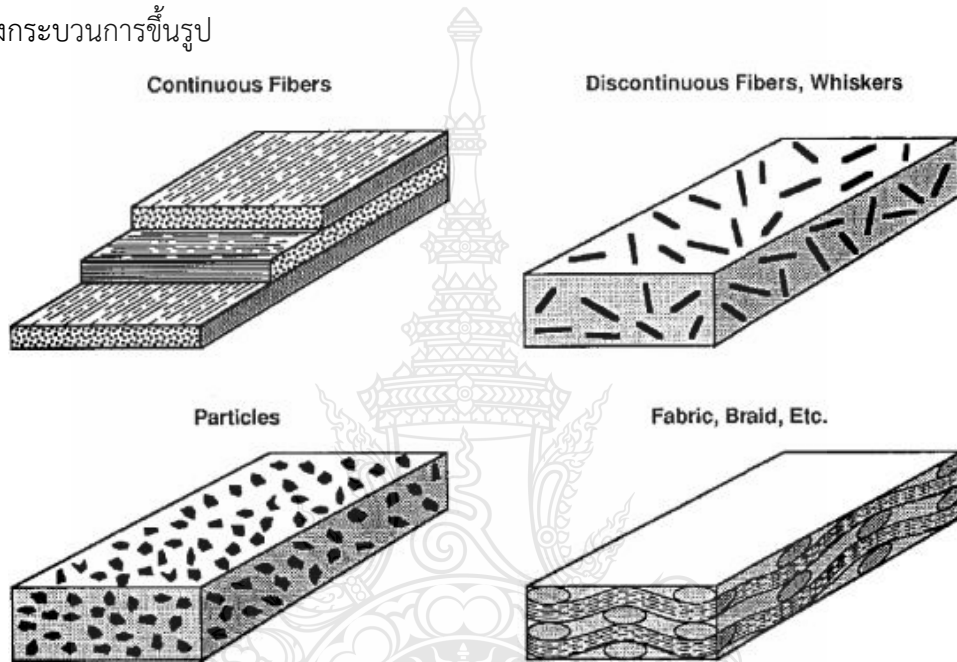
เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีคุณสมบัติที่เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวลงจนสามารถเปลี่ยนรูปร่างและเมื่อได้รับความเย็นจะแข็งตัวคงรูปไว้ได้ เทอร์โมพลาสติกมักมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์น้อยมากจึงสามารถเกิดการหลอมเหลวได้ หรือเมื่อผ่านด้วยแรงสูงก็ยังไม่ทำลายโครงสร้างเดิมทำให้สามารถนำกลับมาหลอมเพื่อใช้ใหม่ได้โดยที่สมบัติไม่เปลี่ยนแปลง

เทอร์โมเซต (Thermoset) เป็นพลาสติกที่มีการทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและมักทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี มีความคงรูปหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นตัวลงจะมีความแข็งมาก ไม่เกิดการอ่อนตัวอีกและไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อให้ความร้อน ซึ่งแตกต่างจากเทอร์โมพลาสติกเทอร์โมพลาสติก แต่ถ้าให้อุณหภูมิสูงเกินไปก็จะเกิดการแตกไหม้สลายไป เทอร์โมเซตพลาสติกนี้มักจะมีโมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมาก จึงทำให้ไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ การขึ้นรูปพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่างๆ โดยการทำให้อยู่ในรูปของหลอมเหลวที่มีความหนืดต่ำที่สามารถไหลไปตามแบบหรือแม่พิมพ์ได้

2.7.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงและค่าโมดูลัสที่สูงมากกว่าเมตริกซ์ เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิตที่ส่งผ่านมาจากเมตริกซ์ ประสิทธิภาพของส่วนเสริมแรงนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรงเป็นสำคัญ สารที่ใช้เสริมแรงอาจมี

ลักษณะและรูปร่างได้หลายแบบ เช่น แผ่น เส้นใย อนุภาคขนาดเล็ก และพื้นผิวเป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) โดยอาจเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง หรือ เส้นสั้นก็ได้ ตัวอย่างเส้นใยที่นิยมใช้ในวัสดุคอมโพสิต เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) และเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เป็นต้น โดยมากเส้นใยที่จะนำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตควรมีคุณสมบัติดังนี้ คือ มีขนาดและลักษณะพื้นผิวของเส้นใยที่สม่ำเสมอ มีค่าโมดูลัส มีความแข็งแรงสูงและไม่เกิดการเสียหายไปในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

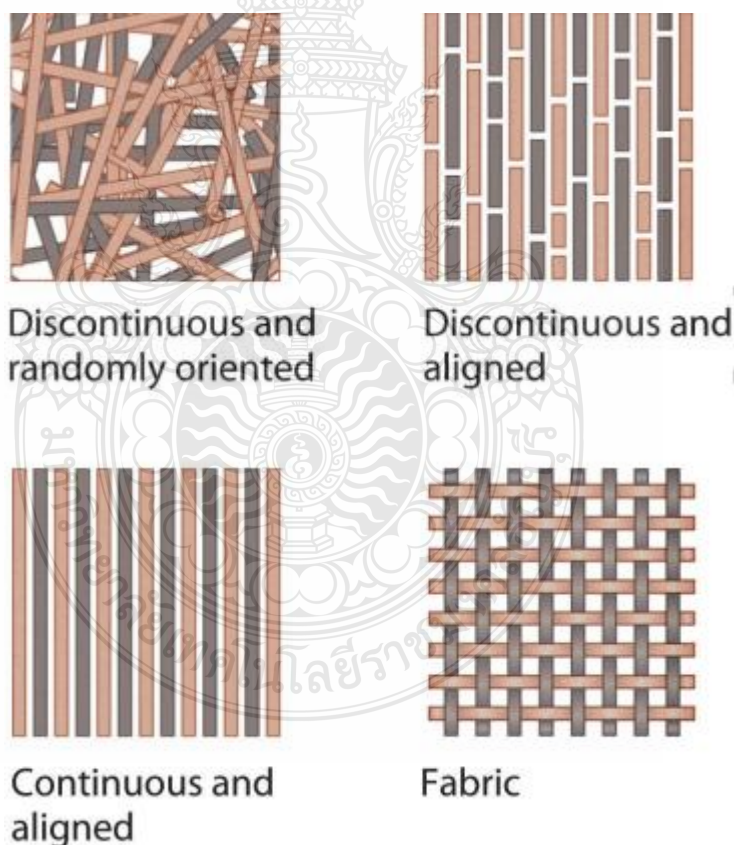


รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะและการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ในวัสดุคอมโพสิต [26]

ความยาวของเส้นใยในการเสริมแรงวัสดุคอมโพสิต ส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้น และความเครียดบนปลายเส้นใย กล่าวคือเมื่อความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้บริเวณปลายเส้นใยมีความเค้นและความเครียดลดลง ทำให้เส้นใยทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงที่ส่งผ่านมาจากเมตริกซ์และเส้นใยดี เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตการยึดเกาะกันระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต โดยวัสดุแต่ละประเภทจะมีกลไก และความสามารถในการยึดติดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเส้นใยและเมตริกซ์ที่นำมาใช้

2.7.3 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตสามารถจำแนกได้เป็นประเภทต่างๆ โดยอาจจำแนกตามประเภทของเมทริกซ์ การจัดเรียงของเส้นใย และประเภทของสารเสริมแรง โดยเราสามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามชนิดของเส้นใยได้ดังนี้ คือ วัสดุคอมโพสิตเส้นใยสั้น (Discontinuous or short-fiber system) ซึ่งมีทั้งแบบจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน (Unidirectional) และจัดเรียงแบบสุ่ม (Random) และวัสดุคอมโพสิตชนิดเส้นใยยาว (Continuous or long-fiber system) ที่อาจจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน (Unidirectional) และขัดกันเป็นผ้า (Fabric) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยยาวจะสามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยยาวได้ง่ายทำให้สามารถคาดการณ์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต เช่น ความแข็งแกร่ง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) ได้ แต่ในทางตรงข้ามเมื่อเส้นใยสั้นในคอมโพสิตจะไม่สามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยได้สมบูรณ์ จึงคาดการณ์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตได้ยาก และสมบัติของวัสดุคอมโพสิตในแต่ละจุดอาจมีความแตกต่างกันด้วย [56]



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงภายในวัสดุคอมโพสิตแต่ละประเภททั้งแบบเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว [26]

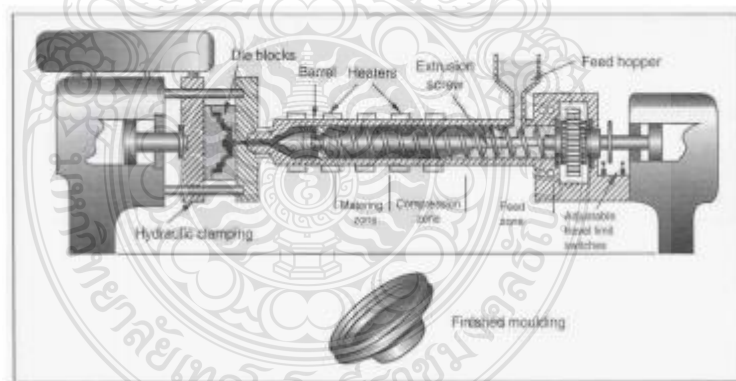
2.8 โครงสร้างและการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

เครื่องฉีด (Injection Machine) หมายถึง เครื่องจักรที่ทำการแปรสภาพวัสดุเม็ดพลาสติกจากของแข็ง ให้เป็นของเหลว ทำการฉีดและปล่อยให้แข็งตัวในแม่พิมพ์แบบปิดสนิทตามลักษณะรูปร่างที่ต้องการ โดยมี 2 ส่วนหลักที่สำคัญดังรูปที่ 2.18 – 2.19

2.8.1 ชุดฉีด (Injection Unit) ทำหน้าที่หลอมเหลวเม็ดพลาสติกจากของแข็งเป็นของเหลวในสกรู เกลียวหนอนซึ่งสกรูเกลียวหนอน ทำหน้าที่ส่งถ่ายพลาสติกเหลวต่อไปยังหัวฉีด และฉีดพลาสติกตามอัตรา การฉีดที่ต้องการไปยังชุดแม่พิมพ์ฉีด



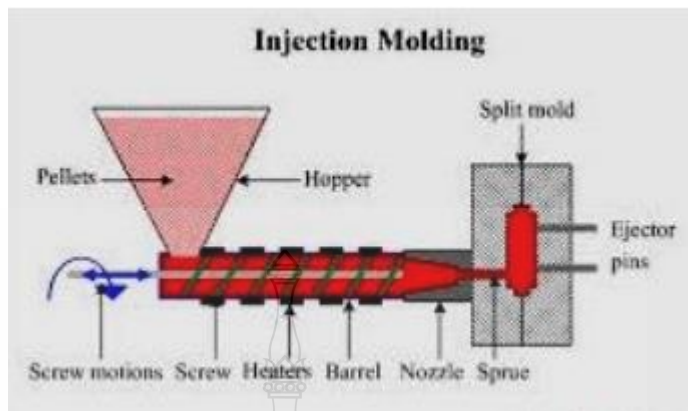
รูปที่ 2.18 เครื่องฉีดพลาสติก [27]



รูปที่ 2.19 โครงสร้างเครื่องฉีด [27]

2.8.2 ชุดปิดเปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) ทำหน้าที่ในการปิดแม่พิมพ์เพื่อต้านแรงดันสูงที่เกิดจากการฉีด [27]

2.9 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

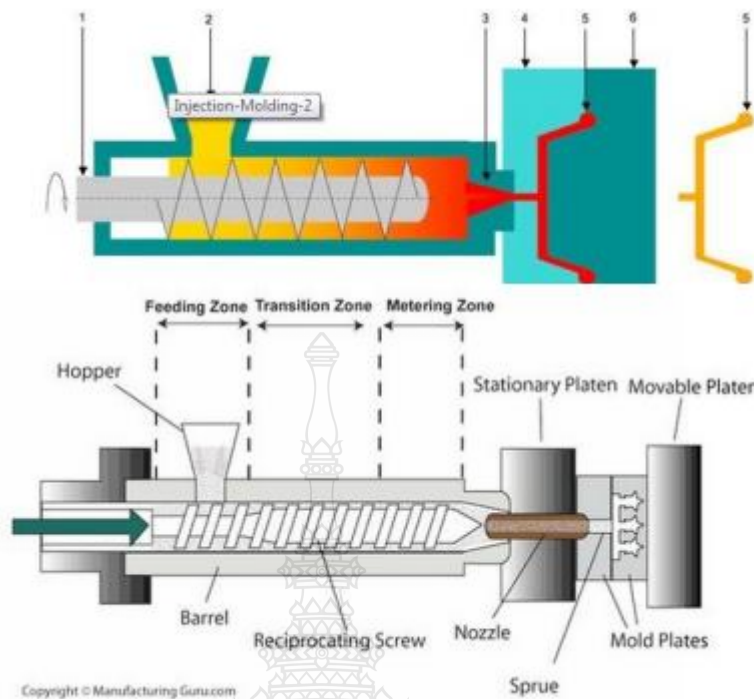


รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบเครื่องฉีด [28]

กระบวนการฉีดขึ้นรูป เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันสูง เครื่องจักรที่ใช้ในการนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เป็นที่นิยมแพร่หลาย มีส่วนประกอบสำคัญ ดังรูปที่ 2.20 คือ

2.9.1 ฮอปเปอร์ (Hopper) อุปกรณ์ส่วนนี้มีลักษณะเป็นกรวยขนาดใหญ่ เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพลาสติกและสารเติมแต่ง เพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก

2.9.2 กระจกฉีดและสกรู (Injector and screw) เป็นส่วนสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติก ทำหน้าที่หลอมเหลวพลาสติก และสร้างแรงดัน เพื่อฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ประกอบด้วยกระจกตรงติดอยู่กับที่ ส่วนต้นของกระจกเป็นที่ติดตั้งฮอปเปอร์ ตรงส่วนกลาง และส่วนปลายของกระจก มีเครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ปลายของกระจกจะต่อเข้ากับหัวฉีด ภายในของกระจกนี้ เป็นสกรูที่มีความยาวสั้นกว่ากระจกเล็กน้อย มีลักษณะเป็นเกลียวหยาบ หมุนป้อนส่วนผสมของพลาสติก ให้เคลื่อนที่เข้าสู่กระจก สามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับ เพื่อเพิ่มแรงดันให้พลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ส่วนของกระบอกฉีด และ สกรูฉีดพลาสติก [28]

2.9.3 หัวฉีด (nozzle) เป็นส่วนต่อปลายกระบอกฉีดพลาสติก เข้ากับช่องทางไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ หัวฉีดมีรูขนาดเล็ก เพื่อให้พลาสติกหลอมเหลว ไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว

2.9.4 มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (Driven motor) มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก สำหรับหมุนสกรู และขับเคลื่อนสกรู เพื่อฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์

2.9.5 แม่พิมพ์ (mold) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่าง ที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต แม่พิมพ์ โดยทั่วไป มักออกแบบให้มี 2 ชั้น เพื่อให้สะดวกต่อการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้ ต้องมีช่องทางไหลของ พลาสติกหลอมเหลวต่อจากหัวฉีด เข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ เรียกว่า สปรู (sprue)

2.9.6 ตัวหนีบยึดแม่พิมพ์ (Hydraulic clamp unit) ตัวหนีบยึดแม่พิมพ์ซึ่งมักเรียกกันว่า แคลมป์ เป็นกลไก สำหรับเปิดและปิดฝาแม่พิมพ์ ขับเคลื่อนด้วยกำลังไฮดรอลิก อุปกรณ์ส่วนนี้ยังรวมทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่ออุ่นแม่พิมพ์ก่อนฉีดและอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวก่อนถอดออกจากแม่พิมพ์

2.9.7 ชุดควบคุมกลาง (Central control) เป็นชุดควบคุมเครื่องจักรรวมทุกส่วน ได้แก่ อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุมความดัน และอุปกรณ์ตั้งเวลา [28]

2.10 หลักการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเทอร์โมพลาสติก

สมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดเป็นผลิตภัณฑ์เกิดจากการผสมผสานระหว่างสมบัติที่มีอยู่ในเม็ดพลาสติก สมบัติที่เป็นผลจากกระบวนการฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพลาสติก ตัวแปรที่มีผลต่อ กระบวนการฉีดคือ เวลา อุณหภูมิความดัน และอัตราการไหล อุณหภูมิจริงและความดันในทุกส่วนของพลาสติกเหลวจะไม่เท่ากับค่าที่ตั้งไว้กับเครื่องฉีด เพราะเกิดการสูญเสียและการหน่วงเวลา ระหว่างจุดที่ไซปลังงานความร้อนกับพลาสติกเหลว ค่าที่แตกต่างกันนี้ยังขึ้นอยู่กับอัตราการฉีด ชนิดของพลาสติก เวลาที่พลาสติกอยู่ในกระบอกฉีด ระยะทางที่พลาสติกเหลวไหลและตำแหน่งของ ท่อหล่อเย็นในแม่พิมพ์เป็นต้น พลาสติกที่มีการนำความร้อนต่ำทำให้การควบคุมอุณหภูมิให้ ถูกต้องอาจทำได้ยาก เพราะอุณหภูมิของชุดให้ความร้อนอาจอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่กำหนดไว้จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในทางปฏิบัติแต่ในเครื่องฉีดพลาสติกแบบใหม่จะมีชุดควบคุม อุณหภูมิที่มีความแม่นยำ และการปรับปรุงแบบของเกลียวหนอนก็ทำให้อุณหภูมิพลาสติกเหลว สม่าเสมอดีขึ้นด้วย [29,30]

2.11 การไหลของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์ฉีด

สมบัติการไหลของพลาสติกหลอมสามารถบ่งบอกถึงลักษณะของกระบวนการได้ความ เข้าใจถึงสมบัติการไหลช่วยในการออกแบบเกลียวหนอนให้เหมาะสม และช่วยในเรื่องสภาวะในการดำเนินการ (Operating conditions) การศึกษาสมบัติการไหลของพลาสติกหลอมจัดเป็นศาสตร์หนึ่ง ที่มีชื่อเฉพาะว่า รีโวลยี (Rheology)

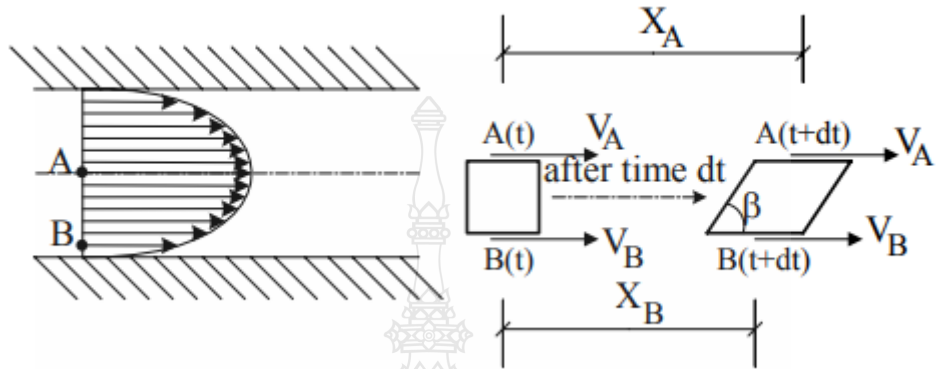
คำจำกัดความพื้นฐานที่ใช้ในการไหลของของไหล สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.11.1 การไหลแบบลาก (drag flow) เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสของขอบเขตบริเวณหนึ่งหรือมากกว่า เปรียบเทียบกับขอบเขตอื่น ที่มีของไหลบรรจุอยู่ลักษณะเฉพาะของการไหลแบบลากเรียกว่าการไหลแบบคูเอต (Couette flow) เช่น พื้นผิวของเกลียวหนอน (Injection screw surface) เนื่องจากเกลียวหนอนหมุนอยู่ในกระบอกที่อยู่หนึ่ง ในขณะที่ขอบเขตหนึ่งเคลื่อนที่สัมผัสกับอีก ขอบเขตหนึ่ง จึงทำให้เกิดการไหลแบบลาก

2.11.2 การไหลแบบใช้ความดัน (Pressure flow) เกิดจากความแตกต่างของความดันในของไหลเกิดขึ้น เช่น การไหลผ่านตาย (Die) ของเครื่องอัดรีดจะเกิดแรงขับ (Driving force) ซึ่งเกิด จาก

ความดันตรงทางเข้าตาย (Die inlet) สูงกว่าความดันตรงทางออก (Outlet) ทำให้พลาสติก เหลวไหลผ่านตาย เรียกว่าความดันหลักของตาย (Die head pressure)

2.11.3 การเฉือน (Shear) เกิดจากความแตกต่างของความเร็วในทิศทางที่ตั้งฉากกับการไหล ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การเฉือนของของไหลจากการไหลในท่อ [31]

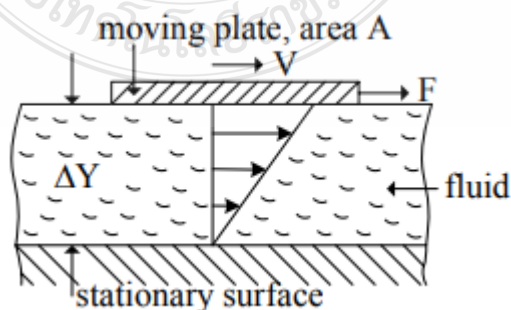
2.11.4 การยืดออก (Elongation) เกิดจากความแตกต่างของความเร็วในทิศทางเดียว กับทิศทางการไหล

2.11.5 การไหลแบบความเร็วเท่ากัน (Plug flow) เกิดจากการไหลที่ทุกๆ ส่วนของการไหล (Fluids elements) เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่า ๆ กันโดยไม่มีการเฉือนเกิดขึ้น

2.11.6 อัตราการเฉือน (Shear Rate) เกิดจากความแตกต่างของความเร็วต่อระยะทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล การเฉือนของของไหลที่เกิดจากการไหลในท่อ

2.11.7 ความเครียดเฉือน (Shear strain) เกิดจากการกระจัด (Displacement) ในทิศทางของการไหลต่อหน่วยของระยะทางที่ตั้งฉากในช่วงเวลานั้น

2.11.8 ความเค้นเฉือน (Shear stress) เป็นความเค้นเฉพาะที่จำเป็นโดยเกี่ยวข้องกับการเสียรูป (Deformation) รูปที่ 2.23



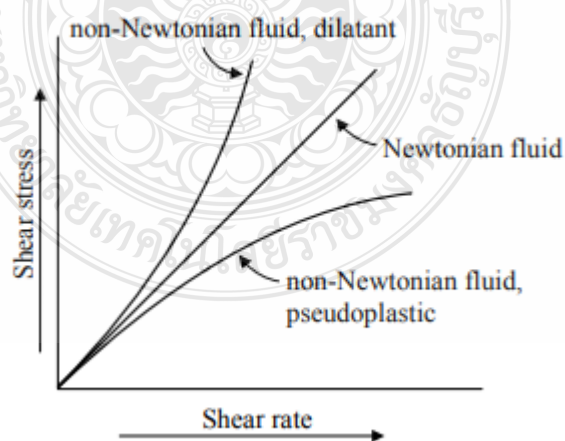
รูปที่ 2.23 การเสียรูปที่เกิดจากการเฉือน [31]

2.11.9 ความหนืดที่เกิดจากการเฉือน (Shear viscosity) คือความต้านทานต่อการไหลที่เกิดจากการเฉือน ซึ่งในปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative) หาความหนืดได้จากอัตราส่วนของ ความเค้นเฉือน (Shear stress) กับอัตราการเฉือน (Shear rate)

2.11.10 ของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluids) ของไหลชนิดนี้ความหนืดไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน โดยทั่วไปได้แก่ ของเหลวที่มีความหนืดต่ำและก๊าซ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน จะได้กราฟเส้นตรง รูปที่ 2.24

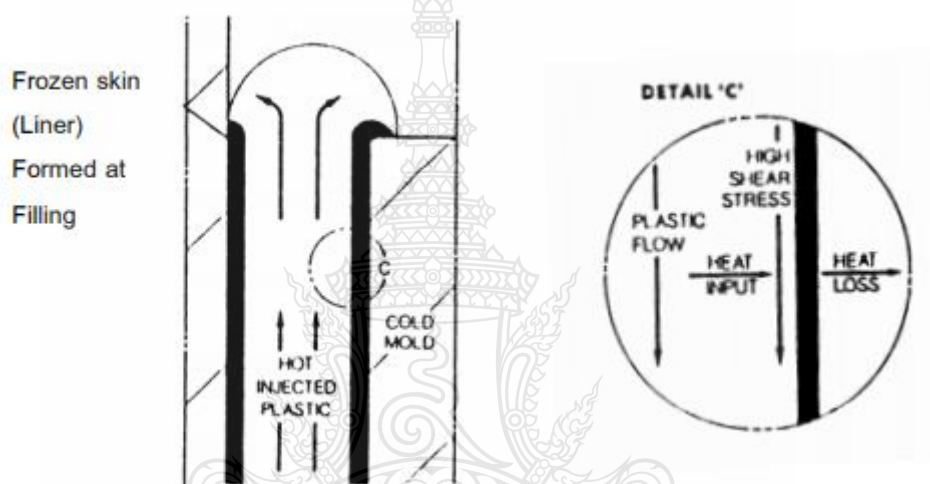
2.11.11 ของไหลแบบนิวโทเนียน (Non-Newtonian fluids) ของไหลชนิดนี้ความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน รูปที่ 2.24 ของไหลประเภทนี้ได้แก่

1. พอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง ได้แก่พลาสติกเทียม (Pseudo plastics) หรือ เซียร์ทินนิง (Shear thinning) คือ พอลิเมอร์ที่มีความหนืดลดลง เมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น
2. ของไหลแบบไดลาแทนท (Dilatant) หรือ เซียร์ทิกเคนนิง (Shear thickening) คือ ของไหลที่มีความหนืดสูง เมื่ออัตราการเฉือนสูง ได้แก่ ทรายดูด (Quicksand) ทรายตามชายหาด (Moist beach sand) เป็นต้น
3. ของไหลแบบบิงกแฮม (Bingham plastics) เช่น น้ำซอสชนิดข้น (ketchup)
4. ทิโซโทรปค (Thixotropic) ความหนืดของของไหลจำพวกนี้จะลดลงไปตามเวลาของการกวน เมื่ออัตราการเฉือนคงที่ เช่น น้ำราดสลัด (Mayonnaise) และสีเป็นต้น
5. รีโอเพคติก (Rheopectic) ความหนืดของของไหลจำพวกนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาของการกวน เมื่ออัตราการเฉือนคงที่ เช่น แร่ยิปซัมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ รูปที่ 2.24 ของไหลประเภทที่ 1 2 และ 3 จัดเป็นของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา ในขณะที่ของไหลประเภท 4 และ 5 จะขึ้นอยู่กับเวลา



รูปที่ 2.24 การไหลของของไหลชนิดต่าง ๆ [31]

การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์นั้นเป็นเรื่องที่ซับซ้อน โดยปัจจัยทางด้านผนังโพรงแบบแม่พิมพ์ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่พลาสติกเหลวแข็งตัว เมื่อพลาสติกเหลวเข้าสู่โพรงแบบผิวนอกของพลาสติกจะสัมผัสกับผนังโพรงแบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จะกลายเป็นพลาสติกแข็งไปทันที รูปที่ 2.25 ขณะที่แกนกลางของพลาสติกยังหลอมเหลวอยู่ พลาสติกเหลวที่ฉีดตามเข้าไปจะไหลอยู่ในแกนกลางนี้ โดยดันพลาสติกเหลวที่อยู่บริเวณนั้นให้ไหลต่อไป เกิดเป็นสวนหน้าของการไหลขึ้นมาใหม่ การไหลของพลาสติกที่ถูกดันไปนี้เป็นการผสมกันระหว่าง การไหลไปข้างหน้า (Flow Front) กับการไหลออกข้างนอก (Melt front) จะสัมผัสกับผนังของโพรงแบบ และกลายเป็น ทางไหลพลาสติกใหม่ที่ไหลเข้ามาตามช่องที่มีผนังเป็นพลาสติกแข็ง [32]



รูปที่ 2.25 การเกิดชั้นพลาสติกแข็งในแม่พิมพ์เมื่อพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบ [33]

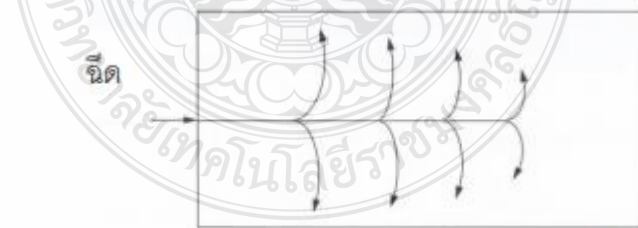
พลาสติกเหลวจะไหลเต็มโพรงแบบหรือไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของผลิตภัณฑ์ที่ฉีด ระยะทางที่พลาสติกเหลวไหลและตัวแปรในการฉีด คือ อุณหภูมิพลาสติกเหลวและแม่พิมพ์วิธีการใช้กันมากในการออกแบบคือ อัตราส่วนเส้นทางไหล (Flow path ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ ระยะทางไหลกับความหนาของช่องทางไหลตารางที่ 2.8 โดยมีข้อกำหนดว่า ถ้าอัตราส่วนเส้นทางไหลมากกว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของหน้าตัดแล้ว การไหลของพลาสติกเหลวจะเต็มแม่พิมพ์ ความยาวของการไหลคือระยะทางวัดจากทางเขา (Gate) ของพลาสติกเหลวไปถึง จุดที่ห่างที่สุดในโพรงแบบ สวนความหนาของช่องทางไหลอาจมีผลต่ออัตราส่วนนี้อยู่บ้าง แต่ ผลิตภัณฑ์ฉีดพลาสติกมักจะมี ความหนาที่ไม่แตกต่างกันมากนัก สิ่งที่น่าสนใจคือ อุณหภูมิ พลาสติกเหลวในช่วงที่มีค่าสูง จะฉีดโดยที่มีอัตราส่วนเส้นทางไหลสูง ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถใช้เป็น แนวทางเกี่ยวกับการออกแบบกระบวนการฉีด

ตารางที่ 2.8 ค่าอัตราสวนเส้นทางไหลของพลาสติกบางชนิด [33]

Thermoplastic	Flow path ratio
PPS	150
PP	150 – 350
PS	150
PS (toughened)	130
PSU	30 – 150
PVC (plasticized)	Up to 180
PVC (unplasticized)	60

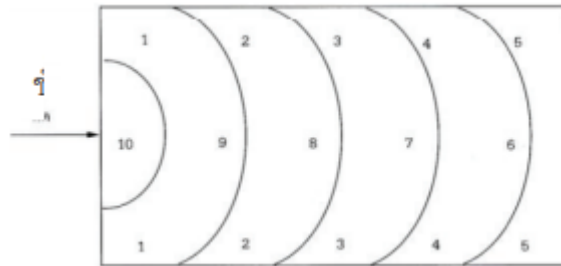
2.12 การไหลแบบน้ำพุ

พลาสติกไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีดจะมีลักษณะการไหลเหมือนน้ำพุ กล่าวคือน้ำพุเมื่อขึ้นไปสูงสุดจนหมดแรงก็จะตกลงมาแสดงในรูปที่ 2.26 ส่วนการไหลของพลาสติกเหลวที่เข้าแม่พิมพ์นั้น พลาสติกเหลวครั้งแรก ที่ไหลเข้าไปก่อนจะอยู่ตำแหน่งด้านหน้า เมื่อพลาสติกเหลวครั้งที่สองไหลเข้าไปก็จะไปแทนที่พลาสติกครั้งแรก พลาสติกครั้งแรกจะถูกขยับดันไปอยู่ด้านข้างของผิวแม่พิมพ์ พลาสติกเหลวครั้งที่สามไหลเข้าไปจะไปแทนที่พลาสติกครั้งที่สอง โดยพลาสติกครั้งที่สองจะถูกขยับดันไปอยู่ด้านข้างของ ผิวแม่พิมพ์ และอยู่ด้านหน้าของพลาสติกครั้งแรกซึ่งจะเป็นเช่นนี้ตลอดไป การไหลตัวของพลาสติกเข้าสู่โพรงแบบ ถึงแม้ว่าแม่พิมพ์จะมีส่วนพลาสติกเหลวที่ไหลเข้าแม่พิมพ์เพิ่มเติมจะเกิดการไหลตามแนวการไหลเท่านั้น คือหยุดการขยับดันพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์ให้ไปอยู่ด้านข้างของผิวแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ที่เหมือนน้ำพุ [34]

ตัวเลข 1-10 ที่แสดงลำดับการไหลของพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ตั้งแต่ครั้งแรก (หมายเลข 1) และ พลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ครั้งสุดท้าย (หมายเลข 10)



รูปที่ 2.27 ตำแหน่งการไหลในแม่พิมพ์ที่เหมือนน้ำพุ [34]

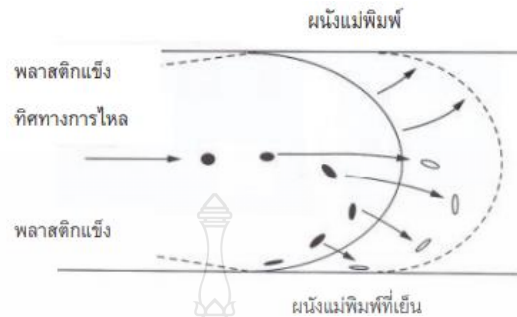
ลักษณะเวกเตอร์ความเร็วในการไหลของ พลาสติกเหลวจะเป็นไปตามแสดงในรูปที่ 2.27 นั่นคือ พลาสติกเหลวบริเวณตรงกลางของช่องทางการไหล จะมีความเร็วในการไหลมากที่สุด ส่วนพลาสติกเหลว ที่ผิวแม่พิมพ์จะไหลช้าที่สุด เนื่องจากผนังแม่พิมพ์ที่ เย็นและเกิดการแข็งตัวของพลาสติก และรูปแบบการ ไหลของพลาสติกเหลวตรงบริเวณด้านหน้า (Flow Front) ของการไหลจะมีลักษณะเหมือนน้ำพุ [34]

พลาสติกที่ไหลอยู่ตรงกลางของช่องทางการ ไหลมีการไหลตัวได้เร็วที่สุดนั้นจะมีการไหลแหวกออกไปด้านข้างที่ผนังแม่พิมพ์ด้วย ดังนั้นพลาสติกที่ตำแหน่งด้านท้ายสุดของการไหล จะมีความเร็วในการไหลที่เท่ากันแสดงในรูปที่ 2.28 เนื่องจากพลาสติก บริเวณตรงกลางของช่องทางการไหลมีการไหลออกไปทางด้านข้างแทนที่จะไหลพุ่งออกไปข้างหน้า ทำให้ความเร็วการไหลลดลง การเย็นตัวของผนังของโพรงแบบการเกิดชั้นของพลาสติกแข็งที่ผิวของแม่พิมพ์ ปรากฏการณ์สำคัญที่เป็นสาเหตุให้การไหลแบบนี้ไม่เหมือนกับการไหลระหว่างแผ่นประกบคู่ขนานนั้นคือ การไหลแบบนี้ (Fountain Flow) [35]



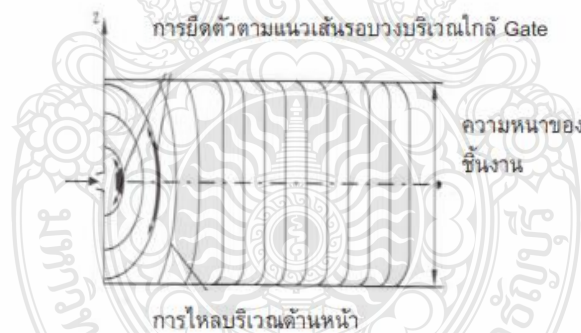
รูปที่ 2.28 ความเร็วในการไหลของพลาสติก [35]

พลาสติกหลอมเหลวไม่สามารถเข้าถึงผนังของโพรง แบบได้อย่างง่ายดายแต่ก็มีแนวโน้มการไหลลงมาจาก ตรงกลางของทางไหล สู่ผนังของโพรงแบบ ซึ่งการไหลในรูปแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการไหลบริเวณ ด้านหน้าของการไหล (Flow Front) [35]

ตลอดระยะ ทางการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์จะพบว่า ความเร็วในการไหลของพลาสติก บริเวณตรงกลางของช่องทางการไหลจะลดลงเรื่อย ๆ ตลอดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลและ ลักษณะ ทางด้านหน้าของช่องทางการไหล ความเร็วในการไหลตรงกลางของช่องทางการ ไหลที่ลดลง ตามระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้น [36]



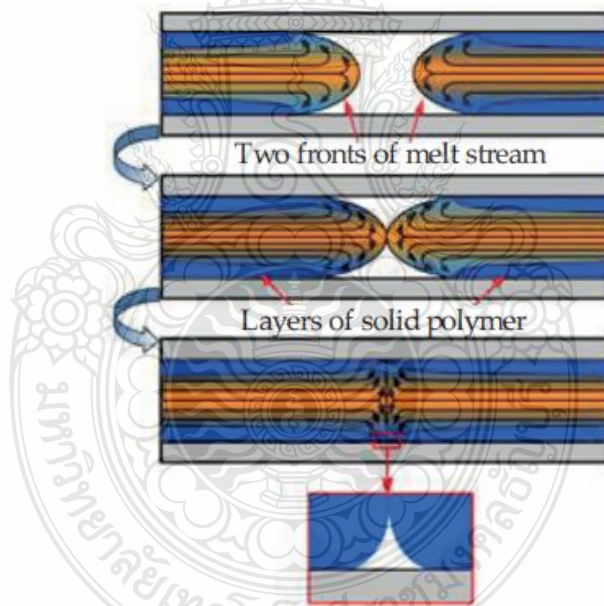
รูปที่ 2.30 ความเร็วในการไหล [36]

2.13 รอยเชื่อมขวาง (WLED LINE)

ในการออกแบบชิ้นงานพลาสติกแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกนั้น ในบางครั้งก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการไหลของพลาสติกหลอมเหลวแบบสองทิศทางแล้วมาชนกันได้ ซึ่งจะทำให้การเกิดรอยเชื่อมขวางในชิ้นงานแล้วทำให้สมบัติทางกลลดลงและทำให้ผิวชิ้นงานเกิดรอยได้ เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างผิวหน้าพลาสติกที่มาต่อชนกันนั้นมีการประสานกันไม่ดีเท่าที่ควร สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิด

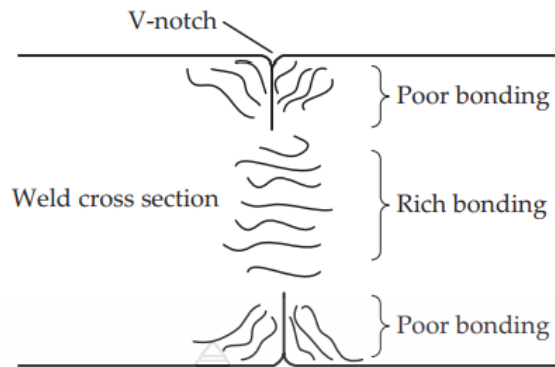
จากอากาศบริเวณตรงกลางรอยเชื่อม และการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ไหลตั้งฉากกับทิศทางการไหล และสารแต่งเติมที่เติมเข้าไป [37]

กลไกการเกิดรอยเชื่อมขวาง รอยเชื่อมขวางที่รอยประสานกันของพลาสติกจะสามารถมองเห็นได้ ที่ผิวบริเวณพลาสติกหลอมเหลวที่มาประสานกัน ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกนั้น พลาสติกหลอมเหลวจะไหลเข้าโพรงแม่พิมพ์ด้วยความเร็วและมีความหนืดที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุและมีการเย็นตัวจากการหล่อเย็นซึ่งชิ้นงานจะมีการเย็นตัวที่ไม่เท่ากัน พลาสติกจะเย็นตัวจากส่วนที่ติดกับโพรงแม่พิมพ์หรือด้านนอกของชิ้นงานเข้ามาภายในชิ้นงานและจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อพลาสติกเย็นตัวและอุณหภูมิต่ำไหลมาประสานกันมานั้นจะเกิดร่องบากรูปตัววี (V-shaped) ที่บริเวณผิวชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการเกิดร่องบากรูปตัววีเกิดจากอากาศและก๊าซที่รวมตัวกันอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของรอยประสาน อีกหนึ่งทางการแก้ปัญหาคือการเปิดช่องระบายอากาศเพื่อช่วยให้อากาศและก๊าซภายในโพรงแม่พิมพ์มีทางออก การระบายอากาศและก๊าซภายในออกได้เร็วยังสามารถช่วยในเวลาการฉีดพลาสติกลดลง ลักษณะการเกิดร่องบากรูปตัววี (V- shaped) แสดงไว้ในรูปที่ 2.31



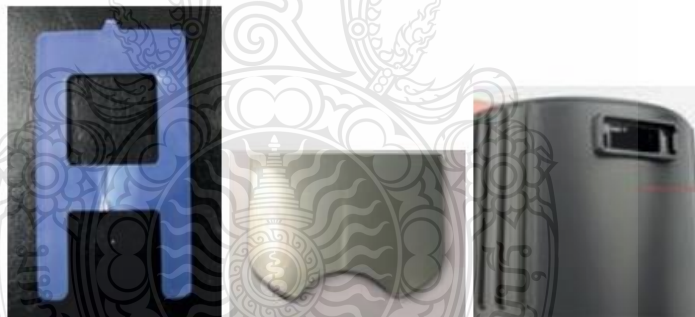
รูปที่ 2.31 ขั้นตอนการเกิดรอยเชื่อมขวางและร่องบากรูปตัววี (V- shaped) [38]

การเกิดร่องบากรูปตัววีนั้น ไม่ได้ทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่องที่บริเวณผิวเท่านั้น (ผิวขรุขระและเปลี่ยนสี) ร่องวีนั้นยังทำให้เกิดความเค้นตกค้าง ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานอ่อนตัวเมื่อเกิดการยืดหรืออง



รูปที่ 2.32 ภาพจำลองพื้นที่รอยเชื่อมขวาง [40]

รูปที่ 2.32 แสดงโครงสร้างบริเวณพื้นที่เกิดรอยเชื่อมขวาง จากลักษณะการไหลของพลาสติก หลอมเหลวในแม่พิมพ์เป็นการไหลแบบน้ำพุ ดังนั้นบริเวณตรงกลางจากไหลได้เร็วกว่าบริเวณด้านข้างที่ ติดกับแม่พิมพ์ทำให้บริเวณตรงกลางมีการประสานกันดีกว่าบริเวณด้านข้าง และลักษณะการไหลแบบ น้ำพุทำให้เกิดร่องบากรูปตัววีจึงทำให้บริเวณด้านข้างหรือบริเวณร่องบากมีความแข็งแรงน้อยกว่า บริเวณตรงกลาง บริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางมักจะสังเกตได้ง่ายที่พื้นผิวของชิ้นงาน แสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างชิ้นส่วนขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดที่มีรอยเชื่อมขวางที่มองเห็นได้ [41,42]

สาเหตุของการเกิดรอยเชื่อมขวางในส่วนต่างๆ ของชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็นกรณีที่เกี่ยวข้องดังนี้ [41]

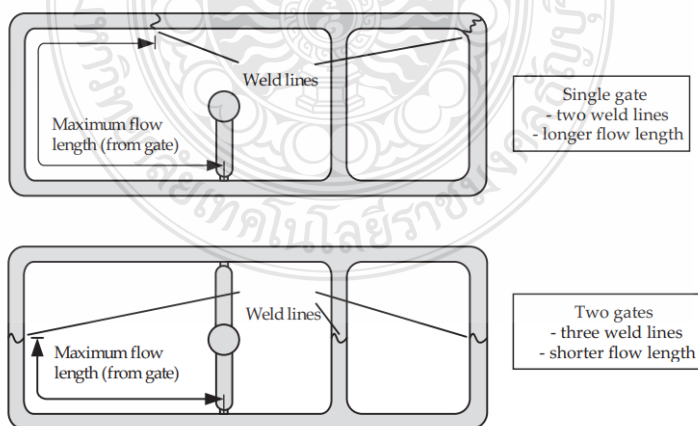
- การสร้างแม่พิมพ์ (จำนวนทางเข้าพลาสติก, จำนวนรู, ความหนาของผนังแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน,
- โครงสร้างที่สลับซับซ้อน และอัตราการไหลของวัสดุที่ไม่เท่ากัน
- สมบัติของวัสดุ (ความหนืด สารเติมแต่ง อนุภาคของขนาด และสี)

- การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด (การออกแบบระบบระบายอากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ ตำแหน่งทางเข้า)
- สถานะการฉีด (ความเร็วในการฉีดต่ำเกินไป อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำเกินไป อุณหภูมิหลอมเหลวและความดันในการฉีดที่ต่ำเกินไป)

บริเวณพื้นที่ที่เกิดรอยเชื่อมขวางมักจะเกิดข้อบกพร่องจากกระบวนการขึ้นรูปฉีด ทั้งการออกแบบแม่พิมพ์และเทคโนโลยีต่างๆ ก็ยากที่จะทำให้สมบูรณ์ได้ เป็นผลมาจากการออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างที่สลับซับซ้อนเป็นหลัก โดยพื้นผิวที่มีความเรียบสูงและมีความมั่นใจว่าการเกิดรอยรอยของรอยเชื่อมขวาง จะสามารถมองเห็นได้เด่นชัดกับชิ้นงานที่มีสีเข้มหรือแบบใส และสถานะที่สามารถเกิดได้ผลกระทบจากสารแต่งเติม เช่น สี ผงโลหะ และสารแต่งเติมประเภทอื่นๆ

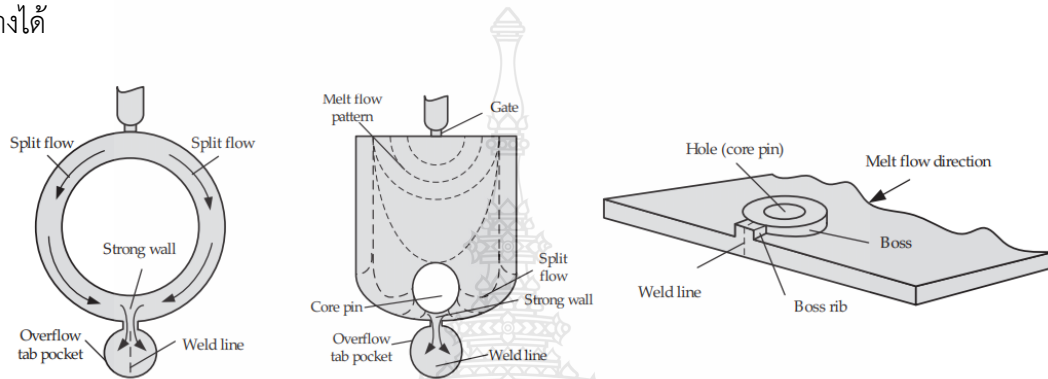
2.13.1 การสร้างแม่พิมพ์ ลักษณะการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ จะทำให้เกิดรอยเชื่อมขวางส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงและผิวของชิ้นงาน ประการแรกต้องตรวจสอบว่าบริเวณผิวหน้าของรอยเชื่อมขวางนั้นมีการประสานกันอย่างถูกต้อง

ตำแหน่งของรอยเชื่อมขวางขึ้นอยู่กับทางเข้าของพลาสติก การวางตำแหน่งทางเข้าต้องอยู่ในบริเวณที่สามารถเกิดรอยเชื่อมขวางได้ จำนวนทางเข้าที่มีหลายช่องทางสามารถปิดช่องทางเพื่อจำกัดเส้นทางการไหล อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนทางเข้าเป็นการลดระยะทางในการไหล เพื่อรักษาอุณหภูมิหลอมเหลวและรักษาความเร็วในการฉีดได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวาง แสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 จำนวนทางเข้าพลาสติกกับตำแหน่งรอยเชื่อมขวาง [40]

ในการออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ ควรออกแบบให้การไหลของพลาสติกสามารถไหลได้อย่างสะดวก การออกแบบควรพิจารณาออกแบบทิศทางการไหลของพลาสติก ในส่วนที่มีขนาดที่ไม่เท่ากันให้เหมาะสมและกรณีของชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นวงแหวนหรือมีรูก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยเชื่อมขวางได้ ถ้าชิ้นงานที่เป็นลักษณะวงแหวนที่มีความบางหรือบริเวณที่มีรูเจาะอยู่ขอบชิ้นงาน การออกแบบให้มีรูระบายพลาสติกหรือการออกแบบให้มีคريب เพื่อให้พลาสติกล้นออกมาจะช่วยให้การไหลภายในแม่พิมพ์ดีขึ้นและช่วยในการประสานกันของพลาสติกที่ไหลมาชนกันได้ดีขึ้น และเพิ่มความแข็งแรงให้รอยเชื่อมขวางได้



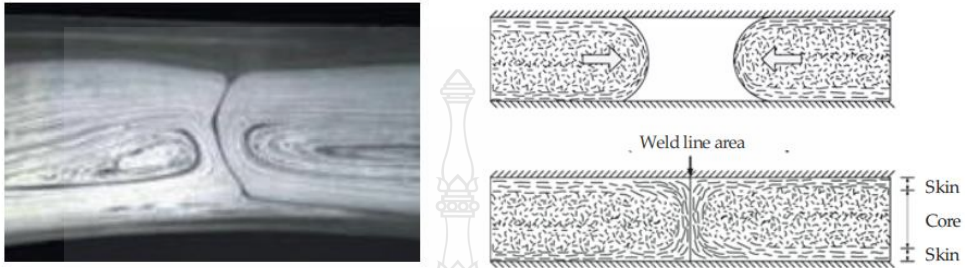
รูปที่ 2.35 การออกแบบรูน้ำล้นและการออกคريبเพื่อในการประสานกันของพลาสติก [44]

เงื่อนไขอีกประการหนึ่ง ที่สำคัญสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด คือ ความหนา ประเภทของวัสดุ และอัตราการหดตัว ความแตกต่างของความหนาสำหรับการขึ้นรูป ของพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน การหดตัว 25% ในขณะที่พอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกมีการหดตัว 15%

2.13.2 สมบัติของวัสดุ ประเภทของวัสดุสำหรับการขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวาง ในกรณีของพอลิเมอร์แบบอสัณฐานความแข็งแรงจะสูงกว่าพอลิเมอร์แบบกึ่งอสัณฐาน พลาสติกที่มีอัตราการหลอมเหลวที่สูงจะทำให้ความสามารถในการไหลในแม่พิมพ์ได้ดีและทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น ในการทดสอบพอลิเอธิลีน พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่มีรอยเชื่อมขวาง โดยมีดัชนีการไหล 0.35 กรัม/10 นาที ลดลงประมาณ 16% เมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรง ของพอลิเอธิลีนที่มีอัตราหลอมเหลว 21.30 กรัม/10 นาที ลดลงเล็กน้อยอยู่ประมาณ 3-5% เท่านั้น

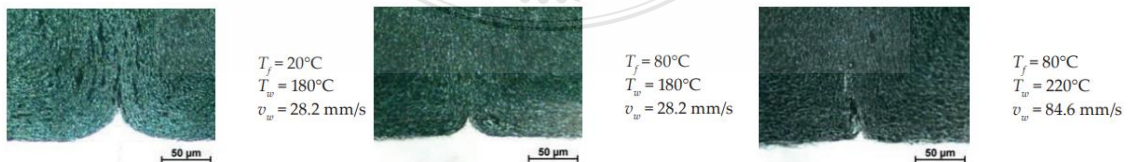
สมบัติที่ลดลงของการขึ้นรูปที่มีรอยเชื่อมขวาง เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลบริเวณด้านของรอยประสานและการเติมสารแต่งเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเติมเส้นใยลงในพอลิเมอร์จะส่งผล

ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงให้ลดลง เนื่องจากอนุภาคของเส้นใยจะจัดเรียงตัวขนานกับทิศทางการไหล และการใช้เม็ดสีมีผลกระทบที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งอนุภาคความยาวและความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง จัดเรียงตัวของโมเลกุล ไม่เพียงแต่ส่งผลถึงสมบัติด้านความแข็งแรงเท่านั้นแต่ยังรวมถึงสีในบริเวณรอย เชื่อมขวาง และยังมีฟิลเลอร์ปริมาณมากสมบัติด้านความแข็งแรงในบริเวณที่มีรอยเชื่อมขวางก็ยิ่งลดลง



รูปที่ 2.36 การวางแนวรอยเชื่อมขวางของพอลิเมอร์และเส้นใยในบริเวณแนวเชื่อมขวาง [43,45]

2.13.3 สภาวะในการขึ้นรูป ความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวาง สามารถปรับปรุงได้โดยการ ปรับพารามิเตอร์ในการฉีด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวางคือ อุณหภูมิ แม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลว และความเร็วในการฉีด พอลิเมอร์จะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์เมื่อสัมผัสกับ ผนังแม่พิมพ์ที่มีความเย็น พอลิเมอร์จะสร้างชั้นของพอลิเมอร์ที่ผนัง แม่พิมพ์ ดังนั้นความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่ก่อตัวเป็นชั้นจะส่งผลต่อขนาดของรอยบาก ในการทดสอบโพลีโพรพิลีน + แป้ง 20% แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์มีอิทธิพลมากที่สุดต่อความลึกของรอยบาก ที่เกิดจากการไหลชนกันของพลาสติก การเพิ่มความเร็วในการฉีดและเพิ่มอุณหภูมิหลอมเหลววัสดุจะส่งผลดีต่อสภาพของพื้นผิวใน บริเวณรอยเชื่อมขวาง การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์และความเร็วในการฉีดส่งผลให้ความลึก V-notch ลดลง 50% และความกว้างของรอยเชื่อมขวางในชิ้นงานโพลีสไตรีน



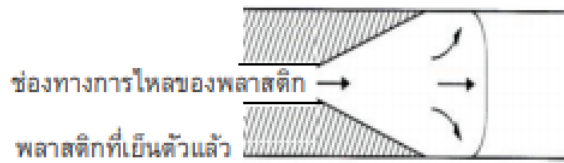
รูปที่ 2.37 การเกิดร่องบากที่อุณหภูมิต่างๆ [39]

การเกิดรอยเชื่อมขวางในชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของส่วนประกอบการผลิตที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีความต้องการด้านความแข็งแรงสูงและสภาพพื้นผิว ที่มีสี ความเงาหรือความเรียบสม่ำเสมอ บริเวณที่เกิดรอยเชื่อมขวางที่สามารถมองเห็นได้ ถือเป็นข้อบกพร่องของพื้นผิว เนื่องจากรูปแบบการเย็นตัวที่มีการเย็นตัวแบบไล่ระดับอุณหภูมิมีนัยสำคัญ การเย็นตัวแบบไล่ระดับอุณหภูมิส่งผลต่อวัสดุในแม่พิมพ์และทำให้เกิดความเครียดจากความร้อนขึ้นและเย็นตัวอย่างรวดเร็วในแม่พิมพ์ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหล่อเย็นความเค้นอัดจะเกิดขึ้นที่ชั้นนอกของวัสดุ ในขณะที่ภายในจะเกิดความเค้นดึงขึ้นนอกจากนี้ยังมีความเครียดทางรีโอโลยี ซึ่งส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการไหลของวัสดุความเครียดเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์และสภาวะการฉีดอีกด้วย ทั้งหมดนี้ทำให้เกิดสภาวะความเครียดภายในกับชิ้นส่วนพลาสติก สถานะดังกล่าวซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเกิดรอยเชื่อมขวางและอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนลดลง การเรียงตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดขึ้นซึ่งบางส่วนถูกยึดออกไปในแนวตั้งฉากกับการไหล การเรียงตัวของโมเลกุลที่ไม่เป็นไปตามทิศทาง การไหลเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สมบัติทางกลลดลง นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาความร้อนที่มากเกินไปอาจจะทำให้พลาสติกเสื่อมสภาพได้

ในการออกแบบชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดนั้น ควรคำนึงถึงสภาวะการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ แล้วการพิจารณาถึงบริเวณที่จะเกิดรอยเชื่อมขวางให้อยู่ในจุดที่ไม่สำคัญหรือบริเวณที่มองไม่เห็น สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้าพลาสติกสำหรับขึ้นรูป การทดลองขึ้นรูปด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์ก่อนการสร้างแม่พิมพ์จะสามารถทำให้รู้ถึงจุดบกพร่องและสภาวะการไหลแบบในแม่พิมพ์ การทำให้รอยเชื่อมขวางสามารถประสานกันได้ดีโดยการเลือกพารามิเตอร์ในการฉีดขึ้นรูป ส่วนมากจะเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วในการฉีด อย่างไรก็ตามวิธีที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการฉีดวัสดุ ในกรณีของพอลิเมอร์ที่มีสารตัวเติมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมเส้นใย ให้เพิ่มอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ แต่จากนั้นก็จำเป็นต้องปรับทิศทางอนุภาคของสารตัวเติมให้อยู่ในทิศทางเดียวกับการไหล [37]

2.14 ระยะเวลาการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์

พลาสติกในแม่พิมพ์ฉีดจะไหลไปได้ระยะทางมากเท่าไรนั้น จะอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนืด ของพลาสติก อุณหภูมิเหลวของพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความเร็วฉีด ความดันฉีด เป็นต้น แต่ที่ควรพิจารณามากที่สุดคืออัตราการไหลของพลาสติกเหลวขณะที่ไหลอยู่ในแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ตามปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาเพราะพลาสติกที่กำลังไหลอยู่ในแม่พิมพ์นั้นจะเกิดการเย็นตัวไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่เย็น ทำให้ช่องทางการไหลของพลาสติกเหลวที่มีอยู่จริงลดลง แสดงในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 การใช้ความเร็วในการฉีดต่ำ [46]

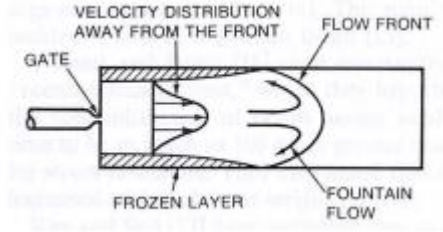
จะพบว่าการใช้ความเร็วฉีดที่สูงกว่าพลาสติกจะไหลได้เป็นระยะทางที่ยาวกว่า เนื่องจากพลาสติกสามารถไหลได้ปริมาณมากกว่า (อัตราการไหลมากกว่า) ไม่ใช่เพราะพลาสติกไหลได้เร็วกว่าตามความเร็วของสกรูของเครื่องฉีดพลาสติกสาเหตุคือ หากใช้ ความเร็วฉีดสูง พลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า ชั้นของพลาสติกที่เย็นตัวเป็นของแข็งจึงมีความหนาที่น้อยกว่า นั่นคือความหนาของช่องทางการไหลของพลาสติกเหลวที่ยังคงมีขนาดความกว้างมากกว่า ทำให้พลาสติกมีอัตราการไหลที่มากกว่า (แต่ความเร็วการไหลอาจลดลงได้ [46])

การฉีดภายใต้เงื่อนไขการใช้เวลาฉีดมากใช้ความเร็วฉีดต่ำและใช้ความดันฉีดสูงจะทำให้เนื้อของพลาสติกเกาะติดผนังมาก การฉีดภายใต้เงื่อนไขใช้เวลา ฉีดสั้นใช้ความเร็วฉีดสูงและใช้ความดันฉีดต่ำ จะทำให้เนื้อของพลาสติกเกาะติดผนังน้อย แสดงในรูปที่ 2.39 [47]



รูปที่ 2.39 ระยะทางการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ที่เกิดจากความเร็วในการฉีด[47]

ปรากฏการณ์สำคัญที่เป็นสาเหตุให้การไหลแบบนี้ไม่เหมือนกับการไหลระหว่างแผ่นประกบคูขานานั้นคือ การไหลแบบน้ำพุ (Fountain effect) พลาสติกหลอมเหลว ไม่สามารถเข้าถึงผนังของโพรงแบบ ได้อย่างง่ายๆ แต่ก็มีแนวโน้มการไหลลงมาจากตรงกลางของทางไหลสู่ผนังของโพรงแบบ ซึ่งการไหลในรูปแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.40

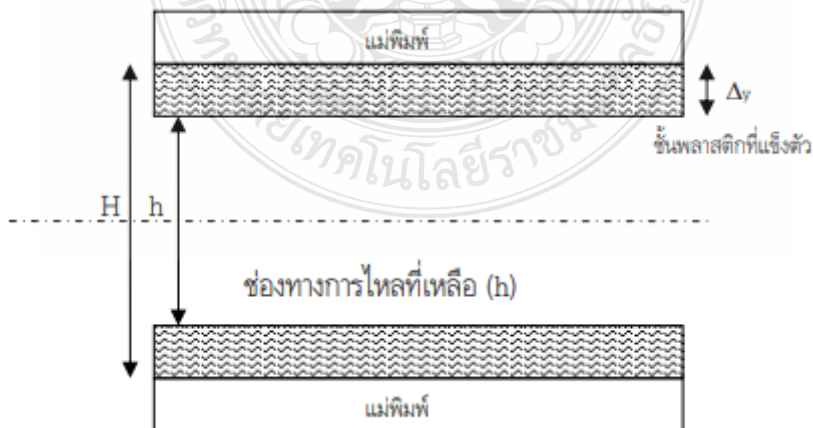


รูปที่ 2.40 การไหลแบบน้ำพุ (Fountain effect) [48]

จากความสัมพันธ์ของกฎปริมาตรคงที่นั้น อาศัย Q อัตราการไหลจากสกรูฉีด โดยที่ A คือขนาด พื้นที่หน้าตัดสกรูฉีดหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตรและ v คือความเร็วในการฉีดหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที l คือระยะทาง และ t คือเวลา สมการที่ (2.1)

$$Q = WH \frac{dl}{dt} \quad (2.1)$$

การไหลของพอลิเมอร์ เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำกว่าอุณหภูมิพลาสติกเหลว ทำให้เกิดชั้นการแข็งตัวที่ เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา การพิจารณาได้สมมุติว่าการแข็งตัวนั้นเกิดขึ้นที่เวลาหนึ่งตามสัดส่วนของ ระยะทางและความหนาของชั้นงาน ผลการแข็งตัวทั้งหมดในของทางการไหล อาศัยความสัมพันธ์การเย็นตัว ของแบ็คเลย์ $s \Delta y = Ct$ ดังรูปที่ 2.41 โดย C และ s เป็นค่าคงที่ สวน Δy คือชั้นพลาสติกเหลวที่เกิดการ แข็งตัว s คืออัตราสวนเวลาที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวโดยใช้เวลาประมาณ $1/3$ ของเวลาที่พอลิเมอร์ไหล ไปตามระยะทาง สมการที่ 2.3 ได้สรุปความสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดชั้นการแข็งตัวของพลาสติกที่เปลี่ยนแปลง ไปตามเวลา



รูปที่ 2.41 สมมุติฐานการเกิดขึ้นแข็งตัวในของทางการไหล

เมื่อการพิจารณาของทางการไหลที่แข็งตัวตลอดของทางการไหล $\Delta y = H/2 = Ct$ ดังนั้น s $H/2 = Ct$ เพราะฉะนั้น $1/3 f H C = 2t$ โดยที่ $f t = t$ และ $s = 1/3$ ของเวลาที่พอลิเมอร์ไหลไปตามระยะทางเมื่อแทนสมการ C และ $H - h y = 2 \Delta$ ลงในสมการที่ 2.2 แกสมการจะได้ 2.3

$$\Delta y = Ct^s \quad (2.2)$$

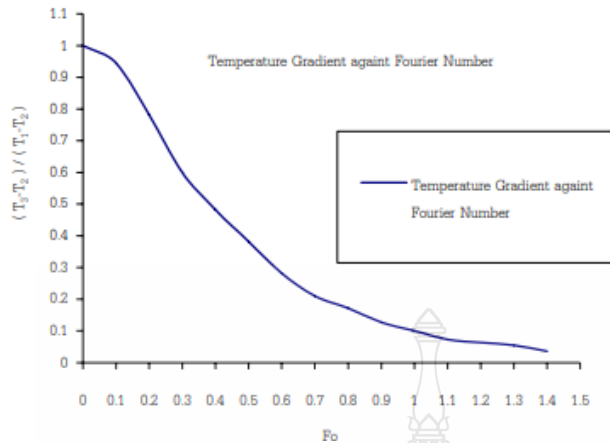
$$h = H \left(1 - \left(\frac{t}{t_f} \right)^{1/3} \right) \quad (2.3)$$

การหา t_f คือเวลาทั้งหมดที่ทำให้วัสดุมีการแข็งตัวตลอดทั้งหน้าตัดซึ่งอาศัยค่า α การกระจายตัวทางความร้อนของพลาสติกดังสมการที่ 2.4 และค่า F_0 พูเรียรน์นเบอร์เพื่อแทนลงในสมการที่ 2.6 การหาค่าการกระจายตัวทางความร้อนของพลาสติก มีตัวแปรดังต่อไปนี้ Kheat คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมี หน่วย (W/M - °C) โดยที่ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะหน่วย (J/Kg -°C) และ ρ คือความหนาแน่นหน่วย g/cm³ ของวัสดุ

$$\alpha = \frac{K_{heat}}{\rho C_p} \quad (2.4)$$

การหาค่า F พูเรียรน์นเบอร์นั้นอาศัยกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.35 และอาศัยผลต่างของอุณหภูมิที่ใช้ คือ อุณหภูมิไหลอมเหลว (T_1) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (T_2) อุณหภูมิการปลดชิ้นงาน (T_3) แทนค่าลงในสมการ (Gradient Temperature) = $(T_3 - T_1)/(T_1 - T_2)$ เมื่อได้ค่า (Gradient Temperature) หาจุดตัดบนกราฟความสัมพันธ์ และลากเส้นตรงตัดกับแกน F_0 และแทนค่า α กับ F_0 ลงในสมการที่ 2.5 โดยที่ thickness คือความหนาของช่องว่างในแม่พิมพ์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

$$t_f = \frac{F_0 \cdot \left(\frac{\text{thickness}}{2} \right)^2}{\alpha} \quad (2.5)$$

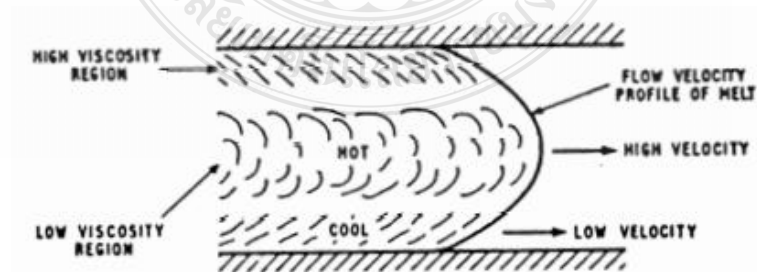


รูปที่ 2.42 กราฟการหาค่าฟลูเวียรน์มเบอร์ [49]

2.15 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุล (Orientation) และการหดตัวของเทอร์โมพลาสติก

การควบคุมความหนืดของพลาสติกนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าแม่พิมพ์จะถูกฉีดให้เต็มได้โดยมี ความดันตามต้องการเพราะสิ่งนี้มีผลต่อการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล และผลที่ตามมาคือสมบัติของ ผลิตภัณฑ์ ในขั้นสุดท้าย ดังรูปที่ 2.43 พลาสติกเหลวที่ไหลเข้าโพรงแบบจะมีความเร็วที่แกนกลางสูงกว่าความเร็วที่ ชั้นนอกเนื่องจาก [48]

1. ความเสียดทานระหว่างพลาสติกเหลวกับผนังแม่พิมพ์
2. ที่ชั้นนอกจะมีความหนืดสูงกว่าเนื่องจากผนังแม่พิมพ์ทำให้อุณหภูมิลดลง ความเร็วในการฉีดต่ำทำให้มีการเฉือน (Shear) และความหนืด (Viscosity) ของพลาสติกเหลวชั้นนอกมีค่าสูงขึ้นไปอีก โดยปกติสายโซ่โมเลกุลในพลาสติกเหลวจะมีสภาพเป็นเส้นสายขดกันอยู่ อย่างไรก็ตามสายโซ่โมเลกุล บางส่วนอาจอยู่บริเวณที่มีความเร็วต่ำกว่าส่วนอื่น จึงมีความพยายามที่จะยืดสายดังกล่าวออกไปจาก สภาพที่เป็นขดใหญ่กลายเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 สายโซ่โมเลกุลวางตัวไปตามบริเวณที่มีความเร็วในการไหลแตกต่างกันมีการ ยืดเป็นเส้นตรงและเกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล [33]

การจัดเรียงทิศทางโมเลกุล คือ จำนวนของสายโซ่โมเลกุลที่มีการวางแนวและยึดให้ตรงมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับ

1. อัตราการเฉือน (Shear rate) หากมีค่าต่ำทำให้มีเวลาสำหรับสายโซ่โมเลกุลในบริเวณที่มีความเร็วต่างกัน ในการจัดผลึกโดยปราศจากความเค้นสวนกันและทำให้ยึดออกได้น้อย

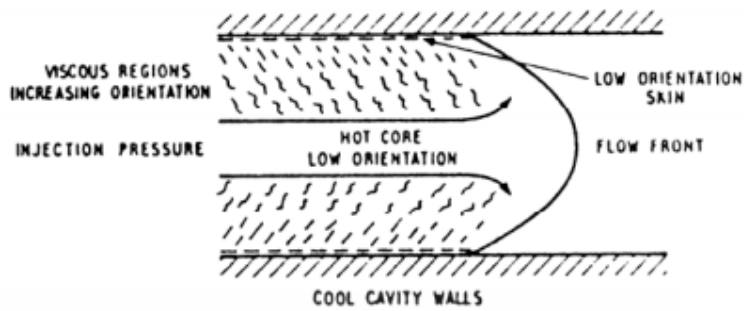
2. อุณหภูมิพลาสติกไหลในระดับสูง ผลที่ตามมาคือความหนืดต่ำทำให้สายโซ่ โมเลกุลจัดผลึกกัน โดยมีความเค้นต่ำ จึงลดการยึดตัวและการวางแนวปัจจัยเหล่านี้ย่อมมีผลซึ่งกันและกัน อัตราการเฉือนต่ำแต่มีอุณหภูมิพลาสติกไหลต่ำก็ สามารถทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลได้มากเช่นกัน

2.15.1 ผลของแม่พิมพ์และขนาดของทางเข้า (Gate) ที่มีต่อการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือ รูปร่างของเส้นทางไหล (Sprue, Runner, Gate) ที่พลาสติก หล่อไหลผ่านซึ่งมีหน้าตัดขนาดใหญ่ ความเร็วของพลาสติกเหลวจะต่ำกว่าส่วนที่มีหน้าตัดขนาดเล็ก เพราะในรอบเวลาการฉีดหนึ่งๆ ปริมาตรพลาสติกที่เท่ากันจะใช้เวลาต่างกันในการไหลผ่านเส้นทางที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากัน ดังนั้นเส้นทางไหลที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราการเฉือนต่ำ ความหนืดสูงและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลจะเกิดขึ้นน้อยด้วย นี่คือนิวตันที่สำคัญที่สุดในการหาขนาดของทางเข้า ขณะที่ทางเข้าขนาดเล็กจะถูกขัดเซยด้วยการลดความหนืดของพลาสติกเหลว ซึ่งเกิดขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการเฉือนและอุณหภูมิที่เป็นผลมาจากพลาสติกเหลวไหลผ่านทางเข้าแคบ ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น แต่บางครั้งก็เป็นผลดีเช่น การเพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลวจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ฉีดมีความมันเงา แต่ในกรณีอื่นจะทำให้พลาสติกเหลวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ เช่น ไนลอน (Nylon) หรืออะคริลิก (Acrylic) จะมีไอน้ำระเหยออกมาเมื่อฉีดพลาสติกชนิดนี้ที่อุณหภูมิสูงๆหรือฉีด พลาสติกที่มีการเติมสารที่ระเหยได้ ใอน้ำหรือสารระเหยอาจควบแน่นที่ผนังแม่พิมพ์และเกิดรอยตำหนิที่ผิว เช่น รอยคล้ายไมคา (Mica-marking) ขึ้นที่ผลิตภัณฑ์ในกรณีคล้ายกันนี้คือพลาสติกที่ไม่เสถียรภาพทางความร้อน เช่น พีวีซี (PVC) อาจเกิดการแตกตัว ทำให้เกิดรอยที่ผิวได้เช่นกันหรือ บางครั้งอาจทำคุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง

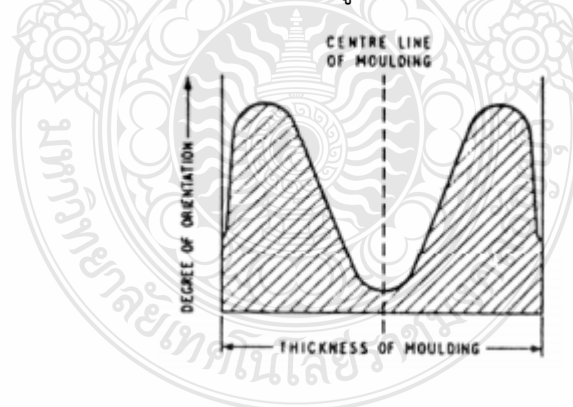
2.15.2 ลักษณะของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลบริเวณความหนาของหน้าตัด

ในขณะที่พลาสติกเหลวไหลเข้าไปในโพรงแบบ ซึ่งมีความเร็วสูงในแกนกลางจะไหลออกทิศทางตั้งฉากทางไหล เมื่อสัมผัสกับผนังของแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะแข็งตัวทันที เนื่องจากพลาสติกส่วนนี้มีอุณหภูมิสูงและมีการเฉือนน้อยจึงมีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเพียงเล็กน้อย ทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลน้อย อย่างไรก็ตามพลาสติกที่อยู่ถัดไปจากชั้นพลาสติกแข็งนี้ก็ยังคงหลอมเหลว เพราะมีชั้นพลาสติกแข็งภายนอกเป็นฉนวนกันไม่ให้พลาสติกเหลวสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ แต่พลาสติกเหลวยังคงสูญเสียความร้อนไปเรื่อย ๆ จนมีความหนืด เพิ่มขึ้นภายใต้ความดันฉีด พลาสติกเหลวที่มีความหนืดสูงนี้จะไหลต่อไป ถึงแม้จะช้าลงกว่าที่แกนกลางก็ตาม การเฉือนภายใต้สภาพเช่นนี้ทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมาก รูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ [33]

เมื่อพลาสติกเหลวไหลเต็มโพรงแบบไม่มีการเหนียว สามารถคลายตัวออกไปอยู่ในรูปขดปกติ การคลายตัวออกจะเป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากความหนืดเพิ่มขึ้นจะเกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการเหนียว ผิวของพลาสติกที่ติดอยู่กับผนังแม่พิมพ์จะเกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลน้อยแต่พลาสติกที่อยู่ไกลผิว ซึ่งเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมากจะเกิดการคลายตัวออกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับแม่พิมพ์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่วนที่มีการจัดเรียง ทิศทางโมเลกุลมาก จะมีการคลายตัวออกมาก เพราะมีความร้อนสะสมการคลายตัวออกเช่นนี้ นำไปสู่ความแตกต่างของการจัดเรียง ทิศทางโมเลกุล ตลอดความหนาของผลิตภัณฑ์โดยมีค่าน้อยที่ แกนกลางและค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่บริเวณด้านข้างทั้งสองของเส้นกึ่งกลางในผลิตภัณฑ์ความแตกต่างนี้ รูปที่ 2.45 ลักษณะความแตกต่างนี้พลาสติกแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน จะขึ้นอยู่กับสมบัติและสภาวะในการฉีด

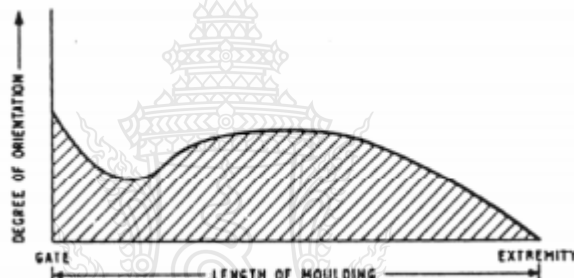


รูปที่ 2.45 ค่าการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่ส่วนต่างๆ ของความหนา [33]

2.15.3 ลักษณะการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตามทางไหลของพลาสติกเหลว

เมื่อพิจารณาการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตามเส้นทางพลาสติกเหลว พบว่าขึ้นอยู่กับ การเกิดขึ้นพลาสติกเหลวซึ่งมีความหนืดและการเหนียวสูงบริเวณใกล้ผนังแม่พิมพ์ ความหนาของชั้นดังกล่าวจะน้อยที่สุดตรงหน้าทางไหลเพราะเกิดขึ้นและเย็นตัวลงในระยะเวลาสั้นที่สุด ขณะที่ชั้น

พลาสติกเหลวบริเวณใกล้ทางเข้าจะมีความหนามากที่สุดเพราะเกิดขึ้นก่อน อย่างไรก็ตามพลาสติกเหลวที่ไหลเข้ามาใหม่อย่างสม่ำเสมอจะมีความร้อนและการเฉือนสูง เนื่องจากทางเข้าแคบทำให้อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่บริเวณทางเข้าสูงขึ้น การเย็นตัวและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลจึงเกิดขึ้นน้อยลง ความแตกต่างในการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเกิดขึ้นตามความยาวของผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดขึ้นน้อยที่สุดที่หน้าทางไหล และเพิ่มขึ้นมากที่สุดห่างจากทางเข้าระยะหนึ่งรูปที่ 2.46 การใช้อัตราการฉีดสูง ไม่เพียงทำให้พลาสติกเหลวไหลได้ดี เนื่องจากการลดความหนืดแต่ยังทำให้ไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ก่อนที่จะเย็นตัวลง การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลอาจเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนืดที่มีอยู่หลังจากพลาสติกเหลวไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ แล้วยังคงให้ความดันย่ำ (Holding pressure) เพื่อส่งพลาสติกเหลวเขาไปชดเชยก่อนที่จะเย็นตัวลงและผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัว (Shrinkage) อย่างไรก็ตาม เมื่อการย่ำพลาสติกเหลวเพิ่มขึ้นส่งผลให้การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลบริเวณทางเข้าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.46 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตามความยาวของผลิตภัณฑ์ [33]

2.15.4 ผลของสภาพการฉีดที่มีต่อการเกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล

ผลของสภาพการฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ที่มีต่อการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลนั้น การเพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลว จะลดความหนืดความเค้นเฉือนและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลลง อีกทั้งทำให้พลาสติกเหลวมีการคลายตัวออกมากขึ้น การลดความหนืดทำให้ความดันที่ถ่ายเทจากเกลียวหมุนไปยังโพรงแบบเพิ่มขึ้น ในระหว่างพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบ อัตราการเฉือนและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในสภาวะต่างกันการเปลี่ยนอุณหภูมิพลาสติกเหลว สามารถส่งผลให้การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ อย่างไรก็ตาม การคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลจะส่งผลให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลน้อยลง เวลายุ่ำ (Holding time) ทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกเหลวส่วนหนึ่งถูกชดเชยเข้าไปในพลาสติกเหลวที่กำลังเย็นตัวลงและเป็นเช่นนี้จนกว่าความดันย่ำจะลดลง หรือพลาสติกเหลวที่ทางเข้าแข็งตัวการเพิ่มความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน ส่งผลให้การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเพิ่มขึ้นด้วย

การเพิ่มความหนาผลึกพันธ์จะช่วยลดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล เพราะการเย็นตัวที่ช้าลงของหน้าตัดสวนที่หนา จะทำให้ความหนืดลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนในการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มเวลาในการคลายตัวออกให้นานขึ้น โดยชะลอการเย็นตัวการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ก็เป็นการลดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลในผลึกพันธ์พลาสติกอีกด้วย

2.15.5 ผลของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่มีต่อการหดตัว

ผลกระทบของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล คือ การทำให้พลาสติกมีการหดตัวมากขึ้น การเย็นตัวของพลาสติกเหลวด้วยการหล่อเย็นเป็นสาเหตุใหญ่ประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการหดตัว ส่วนหนึ่งจะเกิดจากการคลายตัวออกของสายโซ่โมเลกุลที่มีการจัดเรียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากพลาสติกเหลวไหลเข้าเต็มโพรงแบบแล้ว กรณีของการหดตัวจากการเย็นตัวอุณหภูมิพลาสติกเหลวในโพรงแบบสูงขึ้น การหดตัวก็จะมากขึ้นโดยเกิดขึ้นในช่วงการหล่อเย็น อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิพลาสติกเหลวสูงขึ้น ความหนืดจะน้อยลงทำให้ความดันฉีดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อความดันฉีดเท่ากัน พลาสติกเหลวที่อยู่ในโพรงแบบจะมีความดันสูง หากอุณหภูมิพลาสติกเหลวมีค่าสูงขึ้น จะทำให้การหดตัวมีคามากขึ้น ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่อุณหภูมิพลาสติกเหลวที่มีค่าสูง จะต้องใช้เวลาในการหล่อเย็นมาก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกเหลวที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline polymer) มีเวลาในการจัดผลึกกลายเป็นกลุ่มของผลึก ด้วยเหตุนี้ที่อุณหภูมิพลาสติกเหลวสูงผลึกพันธ์จะมีความหนาแน่นสูงและปริมาตรเล็ก ในทำนองเดียวกันเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการหล่อเย็นมากขึ้นเช่นกัน การฉีดพลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นผลึก จะได้ผลึกพันธ์ที่มีความหนาแน่นสูงและผลที่ตามมาคือมีการหดตัวมาก

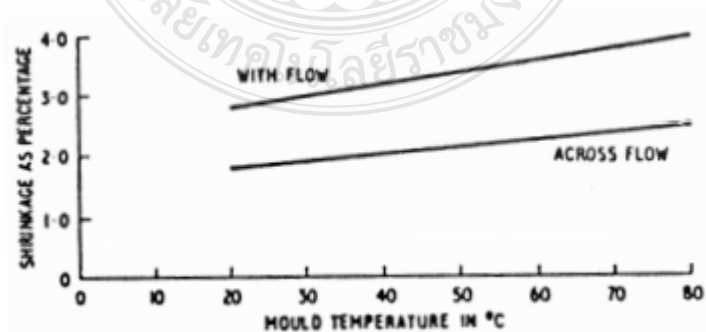
2.15.6 ผลจากการหดตัวไม่เท่ากันเนื่องจากการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล

จะเห็นได้ว่าผลึกพันธ์ที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมากขึ้น สายโซ่โมเลกุลจะวางแนวไปตามทิศทางไหล แต่หลังจากพลาสติกเหลวหยุดไหลสายโซ่โมเลกุลจะพยายามคืนสู่สภาพปกติคือมีลักษณะเป็นขด ลักษณะเช่นนี้ทำให้ความยาวของผลึกพันธ์ในทิศทางไหลลดลง จำนวนสายโซ่โมเลกุลที่วางแนวในทิศทางทำมุมกับเส้นทางไหล จะน้อยกว่าที่วางแนวในทิศทางไหลอยู่มาก ด้วยเหตุนี้เมื่อเกิดการคลายตัวออกการหดตัวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางไหลจะมีค่าน้อย ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.9 ถึงแม้ว่าค่าจริงสำหรับผลึกพันธ์จะขึ้นอยู่กับตัวแปรของพลาสติกและสภาพการฉีด เนื่องจากการหดตัวโดยการเย็นตัวซึ่งเกิดขึ้นในการฉีดพลาสติกโครงสร้าง อัมมูฐาน (Amorphous polymer) มีค่าน้อยกว่าพลาสติกโครงสร้างเป็นผลึกมากกว่าพลาสติกที่มีโครงสร้างอัมมูฐานจึงมีการหดตัวน้อยกว่า ถึงแม้จะมีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่ไม่เท่ากันในสองทิศทางอยู่ด้วยกันก็ตาม

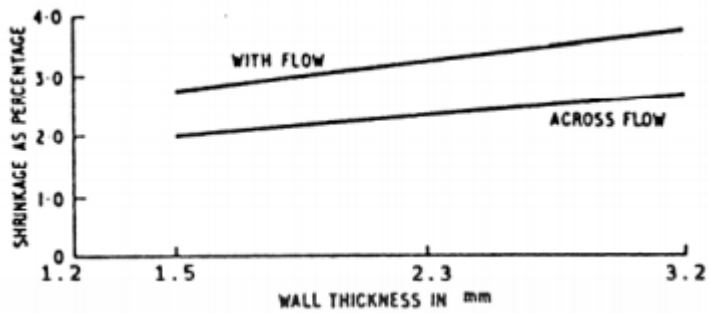
ตารางที่ 2.9 การหดตัวในการฉีดพลาสติกที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล [33]

ชนิดของพลาสติก	การหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	
	ในทิศทางการไหล	ตั้งฉากการไหล
Acetal Copolymer	2.0-2.2	1.8-2.1
Polypropylene	2.6-2.8	2.2-2.5
Polyethylene HD	2.8-3.2	1.8-2.0

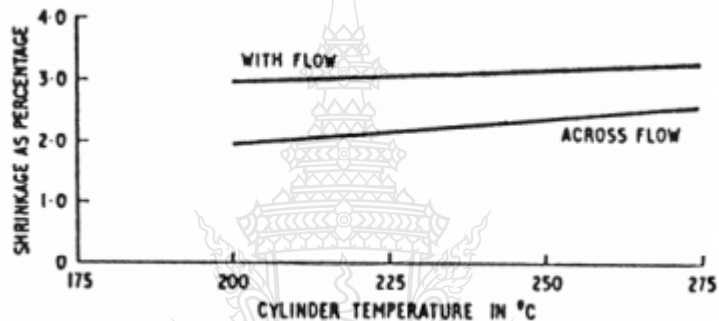
2.15.7 ผลของสภาพการฉีดพลาสติกที่มีต่อการหดตัวเนื่องจากการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล
 ขณะที่การฉีดยังเกิดขึ้นในพลาสติกเหลวระหว่างที่ไหลเข้าสู่โพรงแบบ ทำให้เกิดการ
 จัดเรียงทิศทางโมเลกุลและความหนืดของพลาสติกเหลวลดลงทันทีเมื่อการฉีดยุติลง ความหนืดจะ
 เพิ่มขึ้นและการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลไปอยู่ในรูปขดจะเกิดช้าลง อย่างไรก็ตามสภาพการฉีด
 พลาสติกที่ใช้เวลานานกว่าในช่วงก่อนที่พลาสติกจะแข็งตัว ทำให้เพิ่มการคลายตัวของสายโซ่
 โมเลกุล เนื่องจากการคลายนี้จะเกิดก่อนในทิศทางที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมากที่สุด ความ
 แตกต่างของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลในตอนแรกระหว่างทิศทางทั้งสองจึงลดลง ด้วยเหตุนี้สภาพการ
 ฉีดพลาสติกที่ทำให้เวลาในการคลายตัวออกนานขึ้น อาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการหดตัวมากกว่า และมีความ
 แตกต่างมากขึ้นระหว่างการหดตัวในทิศทางการไหลกับทิศทางที่ตั้งฉากกับการไหล สภาพดังกล่าวก็คือ
 แม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิสูงและผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา ผลที่เกิดขึ้นสามารถดูได้จากการฉีดโพลีเอทิลีนชนิด
 ความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) รูปที่ 2.47-49 การใช้อุณหภูมิพลาสติกเหลวสูง อาจ
 ทำให้การหดตัวเท่าเดิมมากขึ้นหรือน้อยลงได้เพราะ การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลลดลงและการเพิ่มความ
 ดันสูงขึ้นจะช่วยถ่วงดุลการเพิ่มการหดตัว เนื่องจากการเย็นตัวและการเพิ่มความหนาแน่นใหม่มีคามากขึ้น
 หรือน้อยลง รูปที่ 2.47 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลลดลงเมื่ออุณหภูมิพลาสติกเหลวเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.47 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE [33]



รูปที่ 2.48 ผลของความหนาผนังผลิตภัณฑ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE [33]



รูปที่ 2.49 ผลของอุณหภูมิกระบอกฉีดที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE [33]

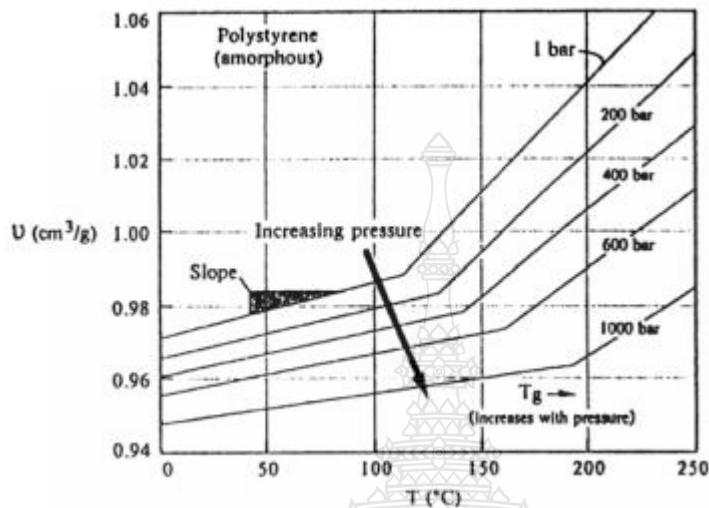
2.15.8 ผลของทางเขา (Gate) ที่มีต่อการหดตัว

สิ่งที่ควรพิจารณาอีกอย่างหนึ่งก็คือ การใช้ทางเข้าแคบเพราะทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลอาจเกิดมากหรือการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อพลาสติก เหลวไหลผ่านทางเข้าแคบ ๆ ต้องใช้เวลาในการคลายตัวออกมากขึ้น นอกจากนี้ทางเข้าที่มีขนาดเล็ก ทำให้พลาสติกเหลวบริเวณทางเข้าแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ความสามารถในการย้ายพลาสติกเพื่อชดเชย การหดตัวลดน้อยลง

2.15.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิพลาสติกเหลว

เนื่องจากโพลิเมอร์มีสมบัติการขยายตัวทางความร้อนในทิศทางบวกและมีสถานะของการหลอมเหลวเป็นแบบอัดตัวสูง (Highly compressible molten stage) ทำให้ปริมาตรที่บ่งบอก การครอบคลุมมวลของวัสดุมีผลต่ออุณหภูมิและความดัน เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร จำเพาะและอุณหภูมิพลาสติกเหลวมาเขียนเป็นแผนภูมิ พบว่าโพลิเมอร์ประเภท ออสัญฐาน กับโพลิเมอร์ ประเภทกึ่งผลึกจะมีลักษณะแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.50 และ 51 แผนภูมิพีวีที (PVT diagram) แสดงให้

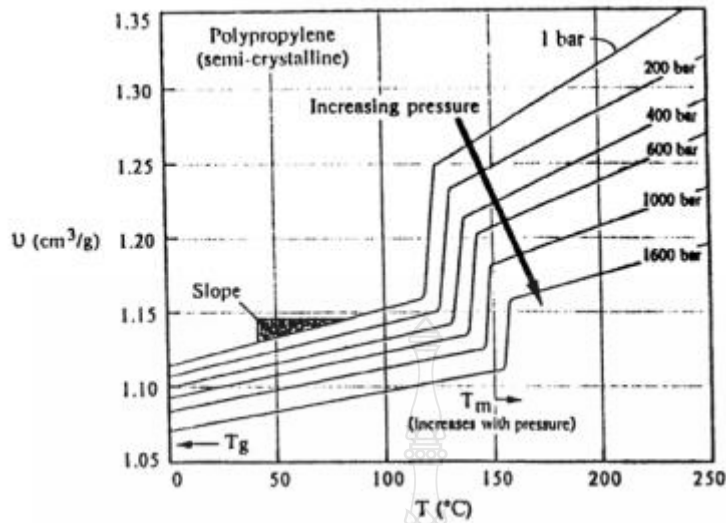
เห็นถึงโพลิเมอร์ที่มีการอัดตัวมากขึ้น เมื่อมีการใช้อุณหภูมิพลาสติกไหลและความดันมากขึ้นในกระบวนการฉีด ตัวแปรในกระบวนการฉีดที่มีผลได้แก่ ความดันอัด จะมีผลอย่างมากต่อขนาดของผลิตภัณฑ์ [39]



รูปที่ 2.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิโพลิสไตรีน [31]

จากรูปที่ 2.50 พบว่าโพลิเมอร์ประเภทอสัณฐานและประเภทกึ่งผลึก (รูปที่ 2.51) จะมีความคล้ายกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกล่าวคือ ปริมาตรจำเพาะจะเพิ่มขึ้น (ความดันคงที่) เนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนและปริมาตรจำเพาะจะลดลงตามความดัน (อุณหภูมิคงที่) เนื่องจากผลของความสามารถในการอัดตัว (Compressibility effects) แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือวัสดุ ประเภทกึ่งผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดตรงอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลว เมื่อโพลิเมอร์ ประเภทกึ่งผลึกในโพรงแบบเย็นตัวลงในขณะที่ ส่วนของอสัณฐานที่หลอมเหลวแล้วจะเย็นและแข็งตัวเมื่อถึงอุณหภูมิของการเป็นผลึกแล้ว ด้วยเหตุนี้ปริมาตรจำเพาะจึงลดลงในช่วงที่มีการเปลี่ยนวัฏภาค (Phase) โดยโมเลกุลของโพลิเมอร์จะรวมตัวกันเป็นผลึกมากขึ้นในบริเวณที่เกิดผลึก

จากรูปที่ 2.43 การเปลี่ยนวัฏภาคของโพลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึกจากโพลิเมอร์ประเภทอสัณฐานไปเป็นโพลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึก ซึ่งมีผลต่อการหดตัวมากกว่าโพลิเมอร์ประเภทอสัณฐาน เพราะการหดตัวขึ้นอยู่กับความดันที่ไซดเซยเนื่องจากความร้อน



รูปที่ 2.51 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน [31]

2.15.10 ผลของกระบวนการฉีดที่มีต่อการหดตัว (Shrinkage)

การหดตัว เกิดจากการอัดตัวและการขยายตัวของพลาสติกเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งพลาสติกเหลวที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline) จะมีการหดตัวมาก เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะโครงสร้างในส่วนที่เป็นผลึก ในทางทฤษฎีสามารถหาขนาดของการหดตัวได้จากแผนภูมิความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิพลาสติกเหลว ซึ่งได้มาจากการวัดอย่างเหมาะสม ผลิตภัณฑ์ที่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระ ดังสมการการหดตัวของปริมาตร S_v

$$S_v = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \frac{V}{V_c} \quad (2.6)$$

V_c คือ ปริมาตรของโพรงแบบที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (cm^3)

V คือ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (cm^3)

ผลิตภัณฑ์เริ่มหดตัวและมีขนาดเล็กกว่าโพรงแบบ เมื่อความดันในโพรงแบบลดลงหลังจากทางเข้าแข็งตัว (Gate freezes) ในขณะนี้ความดันยังไม่สามารถเติมพลาสติกเหลวเข้าไปในโพรงแบบได้อีก และน้ำหนัก G ไม่เปลี่ยนแปลง

$$G = \frac{V_c}{V_{p=1}} \quad (2.7)$$

น้ำหนักนี้จะเท่ากับน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นสุดท้ายที่อุณหภูมิบรรยากาศ

$$G = \frac{V_c}{V_{Ta}} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 10 และ 11 จะคำนวณอัตราส่วนปริมาตรได้

$$\frac{V}{V_c} = \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \quad (2.9)$$

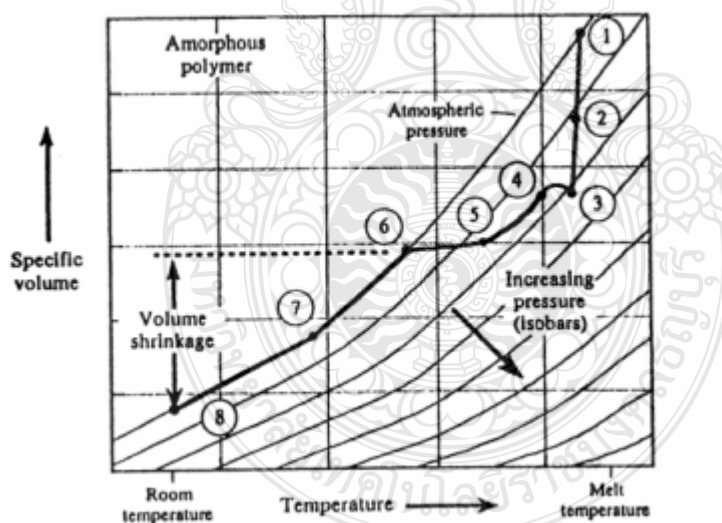
ดังนั้น ขนาดของการหดตัวคือ

$$S_v = 1 - \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \quad (2.10)$$

$V_{p=1}$ คือปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่ความดันบรรยากาศ (cm^3/g)

V_{Ta} คือปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (cm^3/g)

ถ้าวัดความดัน และ อุณหภูมิพลาสติกเหลวในขณะฉีด ดังรูปที่ 2.51 นำผลที่ได้มาบันทึกลงในแผนภูมิพีวีที (PVT diagram) ของวัสดุจะสามารถหาปริมาตรจำเพาะทั้งสองได้ทันที

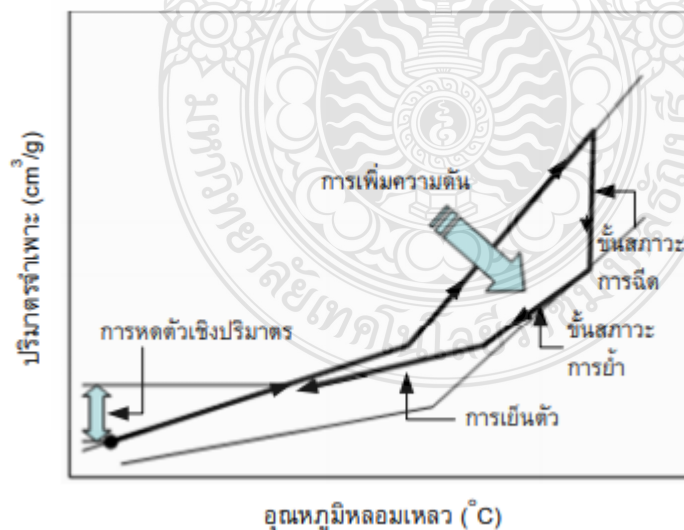


รูปที่ 2.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิหลอมเหลว ใน กระบวนการฉีด [31]

จากรูปที่ 2.51-2.52 สามารถอธิบายลักษณะการทำงานเป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- (1) ความดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่พลาสติกเหลวที่อยู่ส่วนหนาของปลายเกลียวไหลผ่านทางวิ่ง (Runner) ไหลเข้าใกล้ทางเข้า (Gate) จนถึงโพรงแบบ

- (1)-(2) พลาสติกเหลวไหลเข้าเต็มโพรงแบบ
- (2) พลาสติกเหลวเต็มโพรงแบบ (ความดันเท่ากับศูนย์)
- (2)-(3) เขาสู่ขั้นการย่ำ (Packing phase)
- (3) สลับจากความดันฉีด (Injection pressure) ไปเป็นความดันย่ำ (Holding pressure)
- (3)-(4) การสลับระหว่างความดันย่ำกับความดันที่สูญเสียไป เนื่องจากวัสดุเกิดการไหลกลับเมื่อเกิด การเปลี่ยนแปลงความดันขึ้น
- (4) ความดันลดลงถึงระดับความดันย่ำ
- (4)-(5) ความดันลดลง เนื่องจากการหล่อเย็นโดยพลาสติกเหลวยังคงไหลต่อไป เพื่อชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นเป็นผลทำให้ปริมาตรจำเพาะลดลง
- (5) ทางเขาแข็งตัว (Freeze-off) ปองกันไม่ให้วัสดุไหล จัดเป็นขั้นสุดท้ายของขั้นการย่ำ
- (5)-(6) ความดันลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงและหดตัว (Shrinkage) โดยไม่มีการหดเขยใด ๆ
- (6) ความดันลดลงถึงความดันบรรยากาศ
- (6)-(7) ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงด้วยความดันคงที่
- (7) แม่พิมพ์เปิดออก ผลิตภัณฑ์ถูกปลดออก
- (8) ความสมดุลทางความร้อนจัดเป็นปริมาตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (ไม่คำนึงถึงสัณฐานวิทยา หรือความชื้นที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตร)



รูปที่ 2.53 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิหลอมเหลว ใน กระบวนการฉีด (ประเภทออสันฐาน) [52]

2.15.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว

การหดตัวขึ้นอยู่กับตัวแปรในการฉีดพลาสติก เช่น ความดัน อุณหภูมิ อัตราการฉีดพลาสติก และขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านผลิตภัณฑ์ เช่น ความหนาของผนัง ระยะห่างจากทางเขารวมทั้งขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านชนิดของพลาสติก เช่น

- 1) ชนิดและปริมาณสารที่เติม (Filler)
- 2) ระดับของความเป็นผลึก (Degree of crystalline) เป็นต้น

ดังนั้นการคำนวณค่าที่แน่นอนของการหดตัวจึงไม่อาจทำได้วิธีที่ดีที่สุดคือการเรียนรู้จาก การทดลอง ดังค่าการหดตัวที่ไหวในตาราง 2.10

ตารางที่ 2.10 การหดตัวของเทอร์โมพลาสติกบางชนิด [33]

Material	% Shrinkage	Material	% Shrinkage
PA 6 (Nylon)	1.0-1.5	PC	0.8
PA 6-GF	0.5	POM	2.0
PA 66	1.0-2.0	PVC rigid	0.5-0.7
PA 66-GF	0.5	PVC soft	1.0-3.0
LDPE	1.5-3.0	ABS	0.4-0.6
HDPE	2.0-3.0	PP	1.2-2.0
PS	0.5-0.7	CA	0.5
SAN	0.4-0.6	CAB	0.5

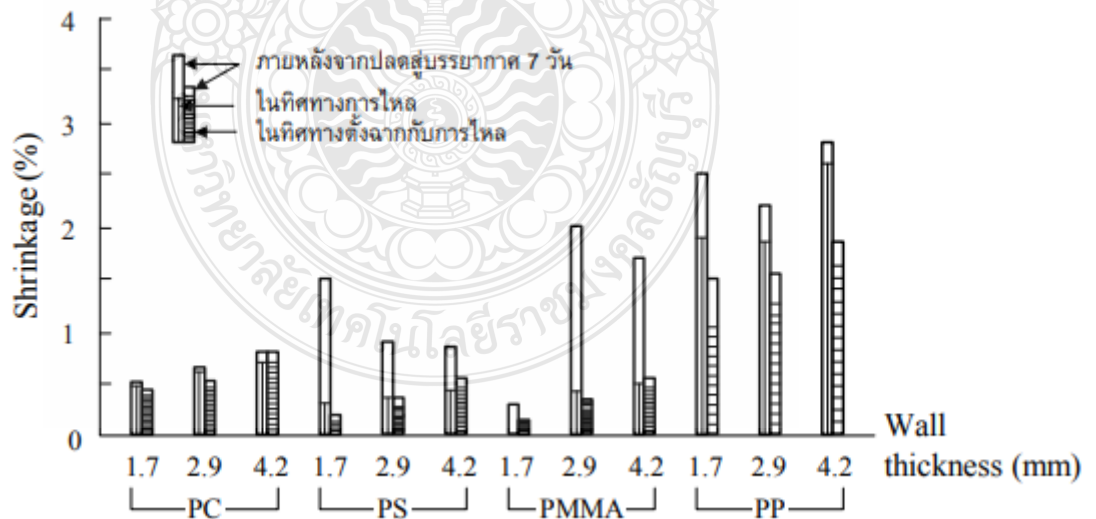
หลักปฏิบัติโดยทั่วไปคือ ควรตรวจสอบการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ฉีดครั้งแรก ในการทดสอบแม่พิมพ์ที่ยังไม่ได้ชุบแข็ง หากจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงสิ่งใดก็ยังสามารถทำได้ในตอนนี้ ดังนั้นผู้ออกแบบแม่พิมพ์ควรใส่ใจกับเรื่องนี้เป็น

- 1) เพื่อขนาดคอร์ใหญ่
- 2) เพื่อขนาดโพรงแบบให้เล็ก

ลักษณะเช่นนี้ทำให้แก้ไขได้โดยการตัดปาดเนื้อโลหะออก สุดท้ายจะต้องเพื่อการหดตัว ภายหลังของพลาสติกโครงสร้างเป็นผลึกด้วย ซึ่งอาจมีค่าประมาณ 10% ของการหดตัวเมื่อผลิตภัณฑ์ถูกปลดสู่บรรยากาศ การหดตัวภายหลังจะน้อยลง เมื่ออุณหภูมิพลาสติกเหลวสูงขึ้นโดยเฉพาะอุณหภูมิแม่พิมพ์เพราะการจัดโครงสร้างใหม่เป็นผลึก (Crystallization) เกือบจะเสร็จสมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการฉีด

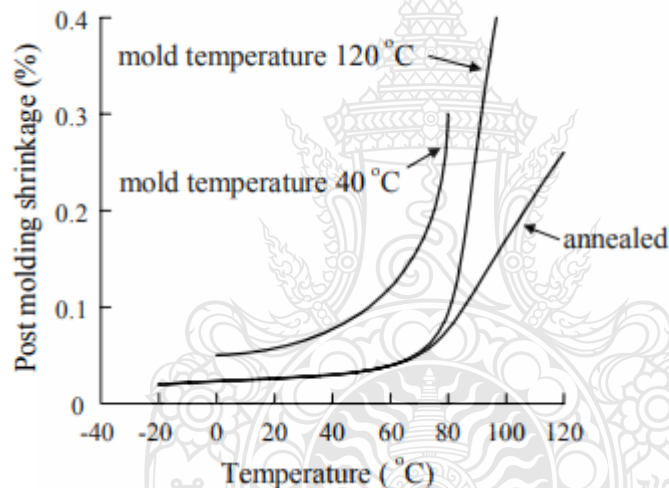
2.15.12 การหดตัวภายหลัง (Post molding shrinkage)

หลังจากผลิตภัณฑ์ถูกปลดสู่บรรยากาศแล้วขนาดของผลิตภัณฑ์ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งขึ้นกับพลาสติกหลายชนิดด้วยสาเหตุจากการปรับโครงสร้างใหม่เสถียรภาพและจากที่อธิบาย ไปแล้วข้างต้น การเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดจะเกิดขึ้นกับพลาสติกโครงสร้างอสัณฐาน โดยเฉพาะพลาสติกไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic) ที่สามารถปรับความชื้นถึงระดับปกติแต่สำหรับพลาสติกโครงสร้างกึ่งผลึก การจัดโครงสร้างให้เป็นผลึกยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการหดตัวภายหลัง การหดตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นใน 24 ชั่วโมงแรกหลังจากกระบวนการเสร็จสิ้น และต่อจากนั้นจะเกิดขึ้นที่ละน้อยอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง การจัดผลึกโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายหลังจะมีอัตราเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ พลาสติกไฮโกรสโคปิก เช่น ไนลอน การดูดความชื้นจะทำให้เกิดการจัดผลึกโครงสร้างได้ง่ายขึ้นแม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง แต่การหดตัวภายหลังที่เกิดขึ้นจะลดลงบางส่วนจากการขยายตัวเนื่องจากมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น การดูดความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญของพลาสติกชนิดนี้ในการควบคุมขนาดหลังจากกระบวนการเสร็จสิ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนขนาดอาจเพิ่มขึ้นทั้งในพลาสติกโครงสร้างกึ่งผลึกและอสัณฐาน จากสาเหตุการคลายความเค้น (Orientation stress) ที่อุณหภูมิก่อนจุดอ่อนตัว (Softening point) ดังรูปที่ 2.54 แสดงการหดตัว (Shrinkage) และการหดตัวภายหลัง (Post molding shrinkage) ของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกชนิดและความหนาต่างกัน อย่างไรก็ตามควรทำความเข้าใจว่าการหดตัวภายหลังจะเกิดที่อุณหภูมิสูงและไม่ส่งผลถึงการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ แต่เป็นการแสดงถึงข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาเมื่อผลิตภัณฑ์ถูกใช้ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน[41]



รูปที่ 2.54 การหดตัวและการหดตัวภายหลังของพลาสติกชนิดต่างๆ ในการทดลองฉีด [33]

โดยทั่วไปการหดตัวและการหดตัวภายหลัง จะเกิดขึ้นในทิศทางการไหลมากกว่าในทิศทางตั้งฉากกับการไหล เพราะมีการคลายตัวออกในทิศทางการไหลมากกว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามากจะมีการหดตัวการคลายตัวออก การจัดผลึกโครงสร้างมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีผนังบางเนื่องจากเย็นตัวช้ากว่า แต่การหดตัวภายหลังจะน้อยกว่า เพราะการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่เป็นสาเหตุของการหดตัวภายหลัง ได้คลายตัวออกในหน้าตัดสวนหน้าระหว่างกระบวนการฉีดและความหนาแน่นจริงกับความหนาแน่นสูงสุดจะต่างกันไม่มาก สภาพการฉีดที่นำไปสู่การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเกิดขึ้นน้อยที่สุดและความหนาแน่นสุดท้ายมากที่สุด จะช่วยลดการหดตัวภายหลัง ดังรูปที่ 2.55 ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวภายหลังสำหรับพลาสติกอะซีทัล (Acetal) การใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงกว่าจะมีการหดตัวภายหลังน้อยกว่าและทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทนต่อการเสีรูปร่างได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เย็นโดยไม่เกิดการหดตัว



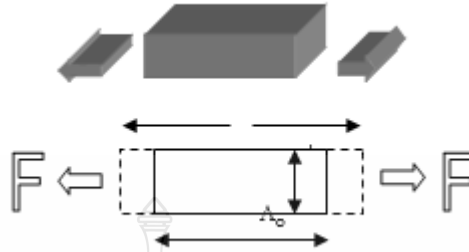
รูปที่ 2.55 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และการบ่มที่มีต่อการหดตัวภายหลังของ POM (Acetal) [33]

2.16 การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก (Physical Properties) 54 จินตมัย

2.16.1. การทดสอบแรงดึง (Tensile)

การทดสอบแรงดึงถือได้ว่าเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมและเป็นที่รู้จักมากที่สุดก็ได้ สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุโดยในการทดสอบจะเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานในทิศทางตรงข้ามกันเพื่อสร้างแรงดึงในชิ้นงานถึงแม้ในทางทฤษฎีการทดสอบประเภทนี้จะสามารถใช้งานในการทดสอบวัสดุได้ทุกประเภทหากแต่ในทางปฏิบัติแล้ว การทดสอบแรงดึงมักจะใช้ในการทดสอบวัสดุประเภทโลหะและโพลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่ไม่นิยมใช้งานในการทดสอบเซรามิก

มิกทั้งนี้เนื่องจากความยากของการเตรียมชิ้นงาน การยึดจับ และการติดตั้งในการทดสอบอันเนื่องมาจากความเปราะซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของเซรามิกที่เป็นข้อจำกัดในการทดสอบ [51]



รูปที่ 2.56 รูปหลังการทดสอบแรงดึง [54]

โดยทั่วไปแล้วชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงนี้จะอยู่ในรูปของชิ้นงานที่มีลักษณะเรียวยาว (อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้างมีค่ามาก) และปลายทั้งสองสามารถถูกยึดโดยเครื่องทดสอบได้การใช้ชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น มักจะไม่เหมาะต่อการทดสอบโดยทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากการที่ชิ้นงานดังกล่าวสามารถที่จะแตกหักหรือขาดในบริเวณใดก็ได้ ตลอดความยาวของชิ้นงาน เนื่องจากขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากัน ทำให้ทุกบริเวณตกอยู่ภายใต้ความเค้นที่ใกล้เคียงกัน ทำให้การแตกหักอาจเกิดขึ้นนอกบริเวณที่ทำการวัดความเครียดบนชิ้นงานก็ได้ และยังมีโอกาสสูงที่จะเกิดการแตกหักในบริเวณจับยึดทั้งสองข้าง เนื่องมาจากความเสียหายของวัสดุที่เกิดจากแรงบีบที่ใช้จับชิ้นงานจึงทำให้ผลการทดสอบจากการใช้ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ อาจจะมีค่าที่ต่ำกว่าสมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้ยกเว้นแต่ในการทดสอบฟิล์มหรือแผ่นพลาสติกบางหรือชิ้นงานบางประเภท ที่การเตรียมชิ้นงานทำได้ลำบาก ที่อาจจะยังคงต้องใช้ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการทดสอบเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวชิ้นงานทดสอบแรงดึงนั้นจึงถูกกำหนดให้มีลักษณะรูปร่างที่มีพื้นที่หน้าตัดในบริเวณที่ต้องการวัดความเครียดอยู่ในบริเวณตรงกึ่งกลางชิ้นงานและมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่สำหรับการจับยึดในบริเวณปลาย หรือมีลักษณะคล้ายที่ยกน้ำหนัก (Dumbbell) โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมก็ได้ การออกแบบเช่นนี้ก็เพื่อที่จะกำหนดได้ว่าชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงที่สุด (เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดต่ำที่สุด) ไม่แตกหักในบริเวณจับยึด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว การที่จะทดสอบชิ้นงานเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางนั้นยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยอีกด้วยไม่ว่าจะเป็นการเตรียมชิ้นงานทดสอบ การติดตั้งชิ้นงานทดสอบ และความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ เป็นต้น ประเภทของชิ้นงานทดสอบแรงดึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่

1) ดัมเบลแบบเอวแคบ (narrow-waisted dumbbell)

ชิ้นงานประเภทนี้เป็นชิ้นงานทดสอบทั่วไปสำหรับพลาสติก เหมาะสำหรับใช้ทดสอบพลาสติกทั้งแข็งและอ่อนนอกจากใช้ในการทดสอบแรงดึงแล้วชิ้นงานประเภทนี้ยังสามารถนำไปใช้ทดสอบแรงดัดและทดสอบแรงกระแทกได้โดยการตัดปลายทั้งสองข้างสำหรับยึดจับทั้ง

2) ดัมเบลแบบเอวกว้าง (broad-waisted dumbbell)

ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการทดสอบพลาสติกอ่อนนุ่มโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่สามารถยืดตัวได้สูง ได้แก่ วัสดุจำพวกยางต่าง ๆ หรือพลาสติกนิ่ม

3) ดัมเบลแบบกระดูกสุนัข (dog bone dumbbell)

ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตในกรณีที่ใช้ชิ้นงานแบบดัมเบลโค้งเข้าไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมสำหรับการทดสอบในปัจจุบัน

4) แบบสี่เหลี่ยมปัจจุบัน (parallel-side strip)

ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุเชิงประกอบ ในกรณีที่มีการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงมีผลทำให้การตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลทำได้ลำบากและผลการทดสอบไม่แน่นอน แต่การใช้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้อาจจะประสบปัญหาของการแตกหักบริเวณที่จับยึดได้ง่าย ดังนั้น เพื่อการป้องกันปัญหานี้ แผ่นประกบจึงมักถูกติดตั้งเพื่อใช้ในการเสริมแรงบริเวณจับยึดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในบริเวณนั้น นอกจากวัสดุเชิงประกอบแล้ว ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ยังถูกใช้ในการทดสอบฟิล์มพลาสติกอีกด้วย

2.16.2. การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural)

การทดสอบการดัดงอเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่ซึ่งนิยมใช้ในการทดสอบพลาสติกและมักใช้เป็นวิธีประมาณค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ เนื่องจากวิธีนี้จะไม่ค่อยมีปัญหาซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์ระหว่างชิ้นงานและเครื่องทดสอบเหมือนทดสอบแรงดึง นอกจากนี้การกระจายตัวของแนวแรงยังถูกจำกัดอยู่เพียงแต่ในบริเวณที่จะเกิดการเสียหายอีกด้วย อย่างไรก็ตาม สภาพของแรงดึงที่เกิดขึ้นในชิ้นงานของการทดสอบสองประเภทนี้จะแตกต่างกัน โดยในการทดสอบแรงดึงนั้นชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด (uniform tension) แต่ในการทดสอบแรงดึงดัดงอชิ้นงานจะได้รับแรงดึงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด (non-uniform tension) เนื่องจากในสภาวะที่ชิ้นงานถูกดัดงอนั้น ชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดึงสูงสุดบนพื้นผิวหนึ่งและได้รับแรงอัดสูงสุดบนพื้นผิวด้านตรงข้าม ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของวัสดุเนื้อเดียวกันภายใต้แรงดัดงอล้วน ๆ (pure bending) พื้นผิวด้านล่างจะอยู่ภายใต้แรงดึง ในขณะที่พื้นผิวด้านบนของชิ้นงานจะอยู่ภายใต้แรงอัด ถ้าวัสดุนี้มีค่ามอดูลัสของแรงดึงและแรงอัดที่เท่าเทียมกัน บริเวณแนวกึ่งกลาง

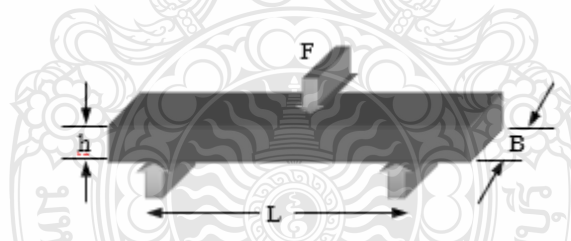
ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะเป็นจุดเปลี่ยนแปลงของสภาพแรงดึงสู่แรงอัดและมีค่าแรงกระทำในบริเวณนั้นเท่ากับศูนย์

โดยทั่วไปแล้วการทดสอบนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะ แต่ไม่เหมาะกับการทดสอบพลาสติกอ่อนที่สามารถจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงดัดได้มาก เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดงอนี้จะถูกต้องในกรณีที่การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุในระดับต่ำ วัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้น และอยู่ภายใต้แรงดัดงอนล้วน ๆ (pure bending) เท่านั้น ดังนั้นโดยทั่วไปมักจะไม่ใช่ทดสอบที่เกินระดับความเครียด 5%

โดยทั่วไป การทดสอบการดัดงอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดัดงอนแบบ 3 จุด (three-pointed bending) และการดัดงอนแบบ 4 จุด (four-pointed bending)

1) การดัดงอนแบบ 3 จุด

การทดสอบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับ การทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ต่ำ หัวกดที่ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (round knife edges) หรือเพลาลโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกดและชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างน้อย 3.2 มิลลิเมตรและมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกดและ 1.5 เท่าของความหนา



รูปที่ 2.57 รูปการทดสอบการดัดงอนแบบ 3 จุด[54]

ชิ้นงานทดสอบสำหรับชุดรองรับ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อเป็นการลดความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration) ที่อาจจะเกิดขึ้นในบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักในบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นงานทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16 : 1 ถึง 60 : 1

ตารางที่ 2.11 ตารางสูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด [54]

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก
ความเค้น	$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2}$	$\sigma = \frac{8FL}{\pi D^2}$
ความเครียด	$\epsilon = \frac{6Yh}{L^2}$	$\epsilon = \frac{6YD}{L^2}$
มอดุลัส	$E = \frac{L^3}{4Bh^3} \left(\frac{F}{Y} \right)$	$E = \frac{L^3}{3\pi D^4} \left(\frac{F}{Y} \right)$

โดยที่ F คือ แรงกระทำ
 L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้ง 2 ด้านหรือระยะสเปน (span length)
 h คือ ความหนา
 B คือ ความกว้าง
 Y คือ ระยะการดัดงอของชิ้นงาน
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทรงกระบอกตัน
 ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง F และ Y ในวงเล็บจะเท่ากับความชันในช่วงแรกของกราฟที่สัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการดัดงอของชิ้นงานในช่วงที่กราฟยังเป็นเส้นตรง

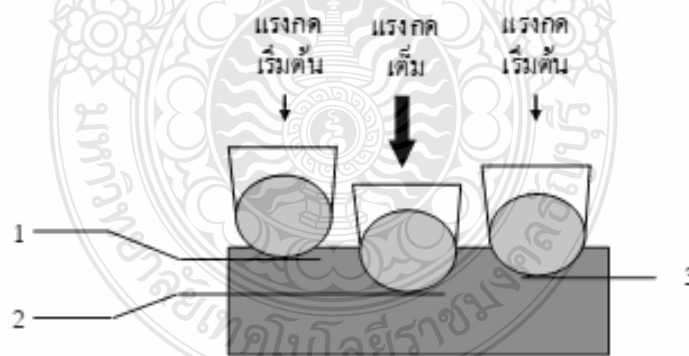
2.16.3 การทดสอบความแข็ง (hardness test)

คำจำกัดของความแข็ง (hardness) นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายหลากความหมายในแง่หนึ่งความแข็งอาจหมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการขีดข่วน (resistance to scratch) หรืออาจหมายถึง ความสามารถต่อการต้านทานการกดหรือเจาะทะลุโดยวัสดุอื่น (resistance to indentation) หรืออาจหมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการขัดสี (resistance to abrasion) หรืออาจหมายถึงความต้านทานของวัสดุในการต้านทานการกัดแต่งหรือการตัด (resistance to machining) ดังนั้นในการวัดความแข็งเพื่อให้ตรงตามคำจำกัดความต่าง ๆ เหล่านี้ เทคนิคหรือวิธีการที่ใช้ในการทดสอบจึงต้องมีความแตกต่างกันไปด้วย

1) การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell)

การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ถูกริเริ่มนำมาใช้งานโดย Stanley P. Rockwell ในช่วงปี ค.ศ. 1920 และจากนั้นเป็นต้นมาถือได้ว่าเป็นเทคนิคการทดสอบความแข็งที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในการใช้งาน เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ง่ายต่อการปฏิบัติ รวดเร็วและมีหลายสเกลทดสอบให้เลือกใช้งานครอบคลุมเกือบทุกประเภทของวัสดุ อีกทั้งผลการวัดที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบมากนัก เนื่องจากการวัดจะเป็นการทำงานของเครื่องมือตั้งแต่ต้นจนจบ หลักการของการวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของการเสียรูปร่างอย่างถาวรที่เกิดขึ้นกับวัสดุได้รับแรงกดด้วยหัวกด โดยในการทดสอบจะเริ่มโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มต้นออกแรงกด (minor lode) ให้กับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งความลึกที่หัวกดทะลุลงไปเมื่อชิ้นงานจะถูกบันทึกไว้ ขั้นตอนนี้จะช่วยในการปรับสภาพเครื่องทดสอบให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน และเป็นการลดความผิดพลาดของการทดสอบจากความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวชิ้นงาน เพราะแรงกดเริ่มต้นนี้จะทำให้หัวทดสอบกดลงไปเมื่อชิ้นงานที่ความลึกค่าหนึ่งดังนั้นผลกระทบจากความขรุขระของผิวงานที่ต่างกันหรือเศษสิ่งสกปรกหรือวัสดุที่หลงเหลือบนผิวงานก็จะถูกขจัดออกไปได้
2. จากนั้นเพิ่มแรงกดเพิ่มเติมเพื่อให้แรงกดรวมมีค่าเท่ากับแรงกดเต็ม (major load) จึงถูกกดผ่านหัวกดลงบนชิ้นงานทดสอบบริเวณเดิมโดยไม่มีการเลื่อนชิ้นงานทดสอบ
3. หลังจากกดแช่เป็นระยะเวลาที่กำหนด แรงกดเพิ่มเติมนั้นจะถูกนำออกคงเหลืออยู่แต่แรงกดเริ่มต้นเท่านั้น



รูปที่ 2.58 การทดสอบแบบร็อกเวลล์ [54]

ตารางที่ 2.12 เวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบความแข็งของพลาสติกด้วยเทคนิครีอ็อกเวลล์ [54]

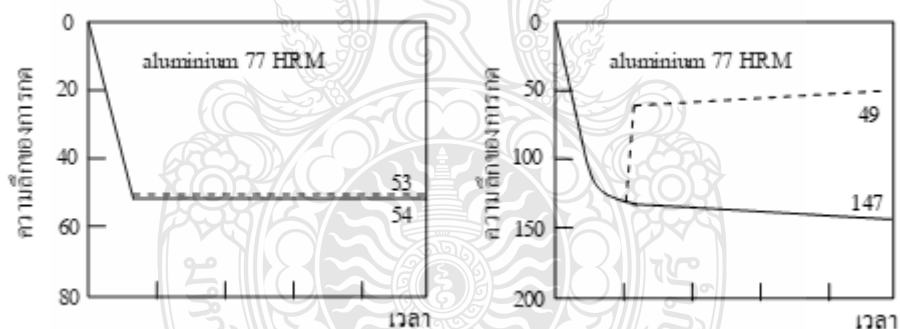
ขั้นตอนของการทดสอบ	เวลา (วินาที)
แรงกดเริ่มต้น	5 - 10
การเพิ่มแรงกดจากแรงกดเริ่มต้นไปสู่แรงกดเต็ม	5 - 10
แรงกดเต็ม	15
การอ่านค่าหลักจากนำแรงกดเต็มออก	15

ค่าความแข็งรีอ็อกเวลล์นี้จะเป็นค่าที่ไม่มีหน่วยเนื่องจากการเปรียบเทียบเท่านั้นว่าวัสดุที่ถูกกดลงไปแล้วคืนตัวได้มากหรือน้อย ถ้ามีการคืนตัวต่ำจะเป็นวัสดุที่มีความแข็งต่ำ แต่ถ้าถูกกดลงไปและคืนตัวได้มากจะมีค่าความแข็งสูงกว่า วัสดุสำหรับการทดสอบความแข็งนี้โดยปกติแล้วควรที่จะเป็นแผ่นแต่อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนของอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็สามารถใช้เทคนิคในการทดสอบได้เช่นกัน รวมไปถึงชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นผิวโค้ง หัวกดที่ใช้งานการทดสอบแบบรีอ็อกเวลล์จะมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ หัวกดทรงกรวยมุม 120 องศาโดยมีปลายกรวยจะทำมาจากเพชรจึงเหมาะต่อการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งสูง ในขณะที่หัวกดบอลจะทำจากเหล็กชุบแข็งหรือทั้งสแตนคาร์ไบด์เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่า ในกรณีของการทดสอบพลาสติกจะเป็นการใช้หัวกดที่เป็นลูกบอลเท่านั้น และมีการใช้งานอยู่ด้วยกัน 5 สเกลหลัก ได้แก่ R, L, M, E และ K ดังแสดงในตาราง 2.13

ตารางที่ 2.13 เทคนิคการทดสอบความแข็งแบบรีอ็อกเวลล์ประเภทต่าง ๆ ในการทดสอบพลาสติก

สเกล	ลักษณะหัวกด	แรงกดเริ่มต้น (กิโลกรัม)	แรงกดเต็ม (กิโลกรัม)	ช่วงการวัด	ระดับความแข็งของพลาสติก
R	ลูกบอลขนาด 1/2 นิ้ว	10	60	$115 \geq HRR \geq 0$	ต่ำ
L	ลูกบอลขนาด 1/4 นิ้ว	10	60	$115 \geq HRL \geq 0$	ต่ำ
M	ลูกบอลขนาด 1/4 นิ้ว	10	100	$115 \geq HRM \geq 0$	ต่ำ
E	ลูกบอลขนาด 1/8 นิ้ว	10	100	$115 \geq HRE \geq 0$	สูง
K	ลูกบอลขนาด 1/8 นิ้ว	10	150	$115 \geq HRK \geq 0$	สูง
α	ลูกบอลขนาด 1/2 นิ้ว	10	60	$120 \geq HRR \geq -100$	ต่ำ

การเลือกใช้สเกลในการทดสอบความแข็งแรงรีกเวลล์จะขึ้นอยู่กับระดับความแข็งแรงของพลาสติกที่จะต้องทำการวัดความแข็งแรง โดยสเกล E และ K จะใช้ทดสอบพลาสติกที่มีความแข็งแรงมาก และใช้สเกล M, L และ R ในการทดสอบพลาสติกที่มีความนิ่มลดลงไปตามลำดับ นอกจากการทดสอบความแข็งแรงรีกเวลล์แบบนี้แล้ว ยังมีวิธีทดสอบความแข็งแรงรีกเวลล์อีกประเภทซึ่งกำหนดอยู่ในวิธี B ของ ASTM D785 ซึ่งเป็นวิธีทดสอบที่คำนึงถึงสมบัติทางวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ของพลาสติก ซึ่งมีผลทำให้สมบัติของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไปกับเวลาในการทดสอบ ดังแสดงในรูป จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบระหว่างการทดสอบรีกเวลล์ที่มีแรงกดเต็มอยู่ในระหว่างการบันทึกค่าความแข็งแรงและการนำแรงกดเต็มออกเพื่อบันทึกค่าความแข็งแรงตามปกติ อะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะจะไม่มีค่าแตกต่างกันมาก ในขณะที่พลาสติกจะแสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนเนื่องจากการคืนตัว (recovery) ของพลาสติก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบเพิ่มเติมเพื่อเป็นการคำนึงถึงสมบัติประเภทนี้ในการทดสอบความแข็งแรงของพลาสติก โดยเป็นการทดสอบที่ใช้สเกล R เป็นหลัก แต่แทนที่จะนำแรงกดเต็มออกเพื่อบันทึกค่าความแข็งแรงก็จะเป็นการบันทึกค่าความแข็งแรงในขณะที่ยังมีแรงกดเต็มอยู่บนชิ้นงานทดสอบ โดยบันทึกภายหลังจากเวลา 15 วินาทีหลังจากให้แรงกดเต็ม วิธีการทดสอบประเภทนี้เรียกว่า การทดสอบรีกเวลล์แบบแอลฟา



รูปที่ 2.59 ผลกระทบของเวลาต่อการทดสอบความแข็งแรงแบบรีกเวลล์ [54]

ตารางที่ 2.14 ความแข็งแรงรีกเวลล์ของพลาสติกประเภทต่าง ๆ [54]

พลาสติก	HRM
HDPE	<
PE-GF	<
PP	<60
PP-GF	30-65

พลาสติก	HRM
PVC Hard	50-70
PVC Soft	<100
PS	80-85
SAN	90
SB	<65
ABS	25-50
ASA	<
PMMA	105
POM	80-95
POM-GF	90
PA6	40-60
PA6,6	75-80
PA6,6-GF	100
PA6,10	55
PA12	50-65
PA6,12	70-75
PC	60-75
PC-GF	20-90
PPO/PS	40-85
PPO/PS-GF	85-95
PEI	110
PEI-GF	110
PF (Type 12-13)	110-115
PF (Type 31-85)	103-114
UF (131-131.5)	>107
MF (150-157)	115

2.16.4 การเลือกใช้เทคนิคต่างๆในการทดสอบความแข็ง

1) ระดับความแข็งของวัสดุ

ในการที่จะวัดค่าความแข็งของวัสดุได้อย่างแม่นยำนั้น ควรจะทราบความแข็งโดยประมาณของวัสดุที่ทำการวัดก่อน ทั้งนี้เนื่องจากการวัดความแข็งแบบต่างๆก็มีความเหมาะสมของการทดสอบในระดับความแข็ง ต่างๆกันการใช้เทคนิคการวัดที่ใช้วัสดุแข็งไปทำการทดสอบวัสดุที่ไม่แข็งแรงอาจจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหาย หรืออาจจะไม่สามารถแสดงค่าได้ หรือถึงแสดงค่าได้ก็อาจไม่น่าเชื่อถือ และในทางตรงกันข้ามก็เป็นจริงเช่นกัน คือการใช้เทคนิคที่เหมาะสมกับวัสดุนั้นไปทำการทดสอบวัสดุแข็ง นอกจากนี้อาจทำให้อุปกรณ์วัดเกิดการเสียหายได้

ตารางที่ 2.15 ประเภทการทดสอบความแข็งและระดับของมอดูลัสของพลาสติก[54]

ระดับของมอดูลัส (modulus)	ตัวอย่างพลาสติก	ประเภทของการทดสอบ ความแข็ง
ต่ำ	ยาง	ชอร์A
	โพลีไวนิลคลอไรด์ชนิดนิ่ม	ชอร์D
	โพลีเอทิลีน	ชอร์D
	โพลีโพรพิลีน	
ปานกลาง	โพลิสไตรีนชนิดทนแรง	ร็อกเวลล์R
	กระแทก	ร็อกเวลล์R
	โพลีไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง	ร็อกเวลล์R
	เอบีเอส	ร็อกเวลล์ R
	โพลิสไตรีน	ร็อกเวลล์M
สูง	ไนลอน	ร็อกเวลล์M
	โพลีเอซิทิล	ร็อกเวลล์M
	อะคริลิก	ร็อกเวลล์M
	โพลีคาร์บอเนต	ร็อกเวลล์M

2.16.4 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (impact test)

ความต้านทานต่อแรงกระแทกจึงถือได้ว่าเป็นหนึ่งในสมบัติทางกลของพลาสติกที่จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อนำพลาสติกชนิดนั้น ๆ ไปใช้งานในลักษณะที่อาจจะต้องประสบกับแรงกระแทก

ตัวอย่างเช่น หมวกกันน็อก หรือกันชนรถยนต์ เป็นต้น แต่นอกจากนี้ แม้ผลิตภัณฑ์จะไม่ได้ถูกออกแบบเพื่อทำหน้าที่ในลักษณะที่ต้องต้านทานแรงกระแทกอย่างไม่ตั้งใจได้เช่นกัน ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้อย่างง่ายดายในการใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น การหล่นของผลิตภัณฑ์จากที่สูงลงกระทบบนโดยอุบัติเหตุ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้ว เมื่อพลาสติกอยู่ในภาวะประสพกับแรงกระแทก จะสามารถเกิดการเสียหายได้หลายแบบ ซึ่งอาจจะแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่

1. แตกหักแบบเปราะ (brittle fracture)

การแตกหักประเภทนี้จะมีลักษณะที่พลาสติกเกิดการแตกหักอย่างเฉียบพลันโดยไม่เกิดการครากตัวแต่อย่างใด ตัวอย่างของพลาสติกที่มักเกิดการแตกหักประเภทนี้ ได้แก่ โพลีสไตรีน

2. การเกิดรอยแตกระดับน้อย (small-scale cracking)

การประลัยประเภทนี้ ผลิตภัณฑ์จะเกิดการครากและเกิดรอยแตกเพียงเล็กน้อยในชิ้นงาน โดยไม่เกิดความเสียหายโดยรวมต่อรูปทรงหรือสมบัติการใช้งาน

3. เกิดการคราก (yielding)

ผลิตภัณฑ์จะเกิดการครากอย่างเห็นได้ชัดและเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างชัดเจน นอกจากนี้อาจจะเกิดการฝ้าตัวสีเนื่องจากความเค้น (stress whitening) โดยไม่เกิดรอยแตกแต่อย่างใด

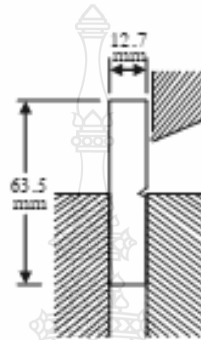
4. การแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture)

การแตกหักประเภทนี้ พลาสติกจะเกิดการครากตัวและมีรอยแตกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากนำไปสู่การแตกหักของวัสดุ ตัวอย่างพลาสติกที่มักเกิดการแตกหักประเภทนี้ ได้แก่ โพลีคาร์บอเนต

2.16.4.1 การกระแทกด้วยแรงดันของคาน (flexed beam impact)

วิธีการทดสอบแบบนี้เป็นการใช้แรงกระแทกในการตัดชิ้นงานซึ่งมีรูปร่างเป็นคานยาว (beam) ให้เกิดการแตกหัก สองวิธีหลักที่นิยมใช้ในการทดสอบแบบนี้ ได้แก่ การทดสอบแบบไอซอด (Izod) และชาร์ปี (Charpy) ซึ่งตั้งชื่อเทคนิคการทดสอบตามนักโลหะวิทยาผู้คิดค้นเทคนิคการทดสอบเหล่านี้ขึ้นในช่วงศตวรรษที่ 20 ความแตกต่างของการทดสอบทั้งสองแบบนี้ ได้แก่ ลักษณะการจับยึดของชิ้นงานและลักษณะการกระแทกของหัวทดสอบต่อชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ โดยในการทดสอบแบบไอซอดนั้นชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดให้อยู่ในแนวตั้งในลักษณะของคานยื่น (cantilever) ในขณะที่การทดสอบแบบชาร์ปีนั้น ชิ้นงานจะถูกวางอยู่บนแท่นรับในแนวนอนโดยไม่มีกรจับยึดแต่อย่างใด (supported beam)

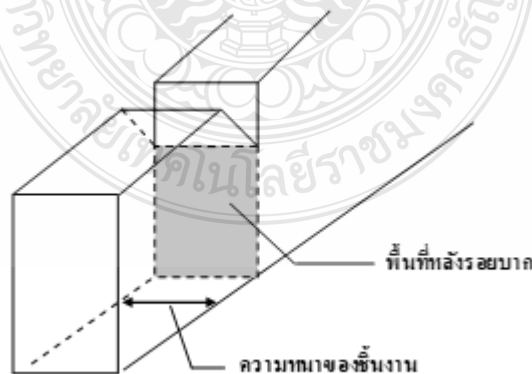
ในการทดสอบแบบชาร์ปี ชิ้นงานด้านที่ไม่มีรอยบากจะเป็นด้านที่ถูกกระแทกโดยหัวกระแทก แต่ในกรณีของการทดสอบแบบไอซอดแล้ว ชิ้นงานทดสอบอาจจะมีการบากหรือไม่ก็ได้ แต่หากมีการบากโดยทั่วไปแล้วชิ้นงานด้านที่มีรอยบากจะเป็นด้านที่ถูกกระแทกโดยหัวทดสอบ ยกเว้นในกรณีที่ต้องการศึกษาความต้านทานต่อแรงกระแทกในแบบที่ไม่มีรอยบากจึงจะใช้ด้านที่ไม่มีรอยบากเป็นด้านที่ถูกกระแทกเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกเหล่านี้จะใช้เครื่องทดสอบแบบค้อนเหวี่ยงเป็นหลัก



รูปที่ 2.60 การทดสอบแบบไอซอดและชาร์ปี [54]

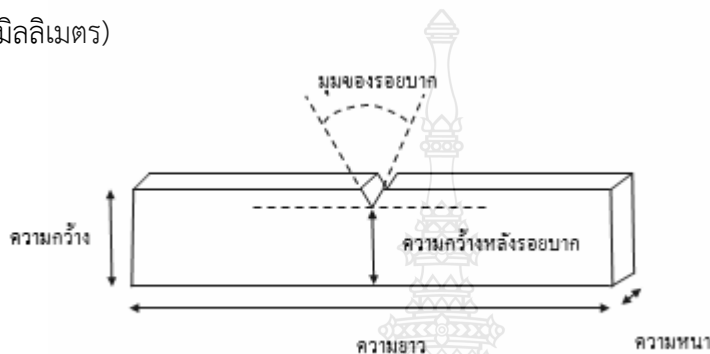
$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานต่อแรงกระแทก} &= \frac{\text{พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก (จูลส์)}}{\text{พื้นที่บริเวณหลังรอยบาก (ตารางมิลลิเมตร)}} \quad (2.11) \\ \text{(จูลส์/ตารางมิลลิเมตร)} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานต่อแรงกระแทก (จูลส์/มิลลิเมตร)} &= \frac{\text{พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก (จูลส์)}}{\text{ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)}} \quad (2.12) \end{aligned}$$



รูปที่ 2.61 หน่วยสำหรับพลังงานกระแทก[54]

ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบไอซอดนี้จะมีลักษณะเป็นคาน แต่จะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไปตามการเลือกใช้ความหนาของชิ้นงานจากการขึ้นรูปหรือตัดจากแผ่นพลาสติก หรือตามกำหนดของมาตรฐานแต่ละประเภท เช่น ASTM ISO JIS BS หรือ DIN แต่ทั่วไปแล้วจะมีความหนาอยู่ระหว่าง 3.17-12.7 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีการใช้การบากในชิ้นงาน รอยบากนั้นจะต้องอยู่ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ขนาดของมุมของรอยบากโดยทั่วไปแล้วจะทำมุมกัน 45 องศา และมีขนาดของรัศมีปลายรอยบากให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับ การทดสอบว่าต้องการใช้รอยบากกี่คม (0.25 มิลลิเมตร) หรือที่อ (1.0 มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.62 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแบบไอซอด[54]

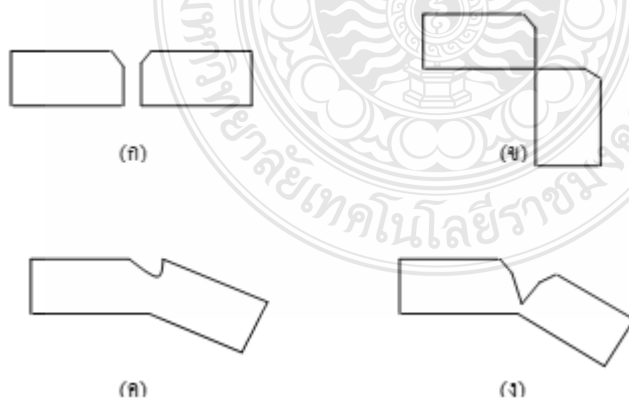
ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบชาร์ปีจะอยู่ในรูปของคานเช่นเดียวกับการทดสอบแบบไอซอด หากแต่ส่วนใหญ่จะมีขนาดที่ยาวกว่าและหนากว่าทั้งนี้ขนาดก็จะแตกต่างกันออกไปเช่นเดียวกันตามการเลือกใช้ความหนาของชิ้นงาน หรือตามกำหนดของมาตรฐาน ในกรณีที่มีการใช้การบากในชิ้นงาน รอยบากนั้นจะต้องอยู่ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ขนาดของมุมของรอยบากโดยทั่วไปแล้วจะทำมุมกัน 45 องศา และมีขนาดของรัศมีปลายรอยบากให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับ การทดสอบว่าต้องการใช้รอยบากที่คมหรือที่อ นอกจากนี้แล้วรอยบากลักษณะของสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความลึกเท่าหนึ่งในสามของความกว้างชิ้นงานก็มีการใช้งานเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2.16 พิกัดขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอดตามมาตรฐานต่าง ๆ[54]

ประเภท	ความยาว (มิลลิเมตร)	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความกว้างหลังรอยบาก (มิลลิเมตร)
ISO 180 (1)	80.0 ± 2	10.0 ± 0.2	4.0 ± 0.2	80.0 ± 0.2
ISO 180 (2)	63.5 ± 2	12.7 ± 0.2	12.7 ± 0.5	10.0 ± 0.2
ISO 180 (3)	63.5 ± 2	12.7 ± 0.2	6.4 ± 0.3	10.0 ± 0.2
ISO 180 (14)	63.5 ± 2	12.7 ± 0.2	3.2 ± 0.2	10.0 ± 0.2
ASTM D256	60.30 – 63.35	12.7 ± 0.15	3.17 – 12.7	10.16 ± 0.05

ในกรณีของการทดสอบแบบชาร์ปี ชิ้นงานที่ทดสอบจะต้องมีการแตกหักสมบูรณ์จึงจะถือว่าค่าพลังงานต้านทานแรงกระแทกที่ทดสอบได้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ต่างจากในกรณีของการทดสอบแบบไอซอดซึ่งชิ้นงานในการทดสอบอาจจะไม่ต้องเกิดการแตกหักสมบูรณ์ก็ได้ ดังนั้นเมื่อชิ้นงานทดสอบผ่านการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด ควรจะต้องมีการระบุว่ชิ้นงานมีการแตกหักได้หรือไม่อย่างไร แต่การตัดสินใจว่าชิ้นงานถือว่าเกิดการแตกหักหรือไม่และอย่างไรนั้น อาจเกิดความไม่ชัดเจนขึ้นได้และอาจขึ้นกับหลักเกณฑ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นในบางมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ISO 180 และ ASTM D256 จึงได้กำหนดหลักเกณฑ์ในการตัดสินการเสียหายของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกไว้ดังนี้

- แตกหักสมบูรณ์ (complete break) ได้แก่ การที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ และแยกออกจากกันเป็นสองชิ้นหรือมากกว่า ใช้สัญลักษณ์ว่า C
- แตกหักแบบบานพับ (hinge break) ได้แก่ การที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักไม่สมบูรณ์ ชิ้นส่วนของชิ้นทดสอบยังคงติดอยู่กับเศษเนื้อวัสดุที่มีความบางแต่ชิ้นงานด้านหนึ่งไม่สามารถรับน้ำหนักของชิ้นงานอีกด้านหนึ่งของรอยบากได้เมื่อถือชิ้นงานในแนวตั้งจะมีลักษณะคล้ายบานพับ ใช้สัญลักษณ์ว่า H
- แตกหักบางส่วน (partial break) ได้แก่ การที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักไม่สมบูรณ์ โดยมีระยะการแตกหักอย่างน้อย 90% ของความกว้างของชิ้นงานหลังรอยบากและไม่มีลักษณะของการแตกหักแบบบานพับ ใช้สัญลักษณ์ว่า P
- ไม่แตกหัก (non-break) ได้แก่ การที่ชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก เพียงแต่เกิดการดัดงอและ/หรือเกิดการฝ้าตัว (stress whitening) เท่านั้น ใช้สัญลักษณ์ว่า NB



รูปที่ 2.63 ประเภทของความเสียหายของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบคาน (ก) แตกหักสมบูรณ์ (ข) แตกหักแบบบานพับ (ค) แตกหักบางส่วน (ง) ไม่แตกหัก[54]

2.15.4.2 รอยบาก

โดยปกติแล้วในการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกแบบแรงดัดของคาน(ไอซอด และชาร์ปี) มักจะมีการบาก (notching) ชิ้นงานทดสอบเพื่อก่อให้เกิดจุดอ่อนของชิ้นงานในบริเวณนั้นและเพื่อประโยชน์ในการกำหนดให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบเปราะในบริเวณรอยบาก ไม่เกิดการแตกหักบริเวณจับยึด นอกจากนี้เนื่องจากในการใช้งานจริงนั้น ผลิตภัณฑ์ที่เราใช้งานมักจะมีจุดที่มีความเค้นสูงอยู่ในชิ้นงานอยู่เสมอ ซึ่งจุดเหล่านี้มักจะเป็นจุดอ่อนหรือจุดบกพร่องในชิ้นงานที่แตกหักเสียหายมักเกิดขึ้นบริเวณดังกล่าว ดังนั้น การบากชิ้นงานยังมีประโยชน์ต่อการศึกษาความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุในแง่ของการช่วยลดการกระจายตัวของผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากที่ชิ้นงานจะเกิดการแตกหักในบริเวณใดก็ได้

การทำรอยบากนี้เป็นการสร้างความเข้มของความเค้นประเภทหนึ่ง โดยจะก่อให้เกิดความเค้นในแนว 3 แกน (triaxial stress) ในบริเวณนั้นซึ่งจะแตกต่างจากชิ้นงานในบริเวณใกล้เคียงที่จะอยู่ในสภาพความเค้นในแกนเดียว (uniaxial stress) ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดความไม่ต่อเนื่องของรูปทรงเรขาคณิต (geometrical discontinuity) ขึ้นในบริเวณรอยบากดังแสดงในรูป ความเค้นในแนว 3 แกนนี้เองจะมีผลก่อให้เกิดความเปราะได้

ในการบากชิ้นงานนั้น รัศมีของปลายรอยบากจะมีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุ รอยบากที่คมหรือมีรัศมีปลายรอยบากน้อยจะมีผลทำให้พลาสติกมีความทนทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าชิ้นงานทดสอบที่มีรอยบากที่ทื่อกว่าหรือมีรัศมีของปลายรอยบากมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือรอยบากสามารถเปลี่ยนสมบัติของพลาสติกประเภทเดียวกันจากเหนียวเป็นเปราะได้ ตัวอย่างเช่น โพลีคาร์บอเนตเมื่อรับแรงกระแทกด้วยชิ้นงานที่มีรัศมีปลายรอยบากที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่ไม่รอยบาก พบว่าการประลัยของชิ้นงานเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plastic deformation) โดยสังเกตได้จากระดับของการดัดงอของชิ้นงานที่มากโดยไม่เกิดการแตกหักขึ้นแต่อย่างใด แสดงสมบัติของความเหนียว แตกต่างจากเมื่อชิ้นงานได้รับการบากโดยที่มีรัศมีที่ปลายรอยบากเท่ากับ 1.02 มิลลิเมตร การเสียหายของชิ้นงานจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวรเช่นเดิม หากแต่เริ่มมีการฉีกขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นที่ปลายของรอยบาก เมื่อรัศมีที่ปลายรอยบากถูกลดลงเหลือ 0.13 มิลลิเมตร ลักษณะของการเสียหายของวัสดุจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ มีลักษณะแตกหักแบบเปราะที่ระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำและชิ้นงานแตกหักเป็นสองชิ้นแยกออกจากกัน โดยทั่วไปรอยบากที่ถือว่าคนมักจะมีรัศมีของปลายรอยบากเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร ในขณะที่รอยบากที่ทื่อจะมีรัศมีของปลายรอยบากมากกว่า โดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ 1-2 มิลลิเมตร ดังนั้น จึงเป็นสิ่งที่ควรพึงระลึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่จะต้องหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างเฉียบพลัน เช่น รู หรือ ช่องว่างที่สามารถเป็นจุดอ่อนหรือจุดบกพร่องของวัสดุได้

นอกจากรัศมีปลายรอยบากจะมีผลต่อความทนทานต่อแรงกระทำของพลาสติกแล้ว ความลึกของรอยบากที่กินเข้าไปในเนื้อพลาสติกก็ยังมีผลเช่นเดียวกัน โดยวัสดุที่มีรอยบากตื้นจะสามารถทนทานต่อแรงกระทำได้สูงกว่าชิ้นงานที่มีรอยบากลึก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระทำและลักษณะของรอยบากนั้นสามารถประมาณได้ โดยใช้กลศาสตร์แตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanic : LEFM) ได้เช่นเดียวกับในกรณีของรอยแตก

ตั้งสมการ

$$IP = 1.0 K_{Ic} \left[\frac{1}{r} \right]^{1/2} + 2 a \quad (2.13)$$

- โดยที่
- r คือ รัศมีของปลายรอยบาก
 - a คือ ความลึกของรอยบาก
 - K_{Ic} คือ แฟกเตอร์ของความเข้มความเค้น
 - IP คือ ความทนทานต่อแรงกระทำ

โดยทั่วไปนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงกระทำและแฟกเตอร์ของความเข้มความเค้นนี้ ถึงแม้จะแปรผันตามกันก็ตาม หากแต่อาจมีค่าไม่เหมือนกันในพลาสติกแต่ละประเภทก็ได้ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกต่างชนิดกันจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ารัศมีของปลายรอยบากและความลึกของรอยบาก (notch sensitivity) ที่ไม่เท่ากัน การเลือกใช้ขนาดของรอยบากในการทดสอบสมบัติทางแรงกระทำ

นอกจากนี้ในการตัดจะต้องไม่ก่อให้เกิดความร้อนหรือความเค้นสูงเกินไปในบริเวณรอยบาก ดังนั้นความเร็วในการตัดและการใช้สารหล่อลื่นในระหว่างการตัดล้วนแต่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานต่อแรงกระทำของพลาสติกได้ทั้งสิ้น สำหรับเทอร์โมพลาสติก ความเร็วในการตัด 53.3-150 เมตรต่อนาที และอัตราการป้อน 88.9-160 มิลลิเมตรต่อนาที โดยไม่ใช้การหล่อเย็นพบว่าให้รอยบากที่ดี

ตารางที่ 2.17 เปรียบเทียบความเร็วในการตัดและการใช้สารหล่อลื่นในการตัดต่อความต้านทานแรง
กระแทกของโพลีเมทิลเมทาคริเลตตามมาตรฐาน BS [54]

ความเร็วในการตัด ด้วยใบมีด 8.75 เซนติเมตร (รอบ/นาที)	สารหล่อลื่น	ความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (J/m)	
		ใบมีดเก่า	ใบมีดใหม่
50	ใช่	29.37	25.63
50	ไม่ใช่	25.10	23.50
405	ใช่	22.96	22.96
405	ไม่ใช่	24.03	22.43

2.17 Scanning Electron Microscopy (SEM)

เครื่อง Scanning Electron Microscopy เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับการศึกษาวัดศาสตร์และเครื่องมือชนิดนี้ถูกใช้ในการตรวจลักษณะรูปร่างภายในระดับจุลภาค ลักษณะความเสียหายระดับโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ประเมินการเคลือบแบบบาง ส่องรังสีแกมมาบนพื้นผิวและวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ ลักษณะการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เป็นเครื่องมือซึ่งจะยิงลำแสงอิเล็กตรอนเป็นจุดลงบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างและมีการรวบรวมลำแสงอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกจากชิ้นงานตัวอย่างและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.64 ได้ภาพของเครื่อง Scanning Electron Microscopy [55] ในการทำงานป้อนอิเล็กตรอนจะยิงลำแสงอิเล็กตรอนออกภายในคอลัมน์สุญญากาศและจะถูกโฟกัสเป็นจุดเล็กๆกระทบลงบนชิ้นตัวอย่างขดลวด Scanning จะยอมให้ลำแสงสแกนบนพื้นที่เล็กๆของผิวตัวอย่างนั้น ลำแสงอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับและกระจายเป็นมุมต่ำ (Low-angle Backscattered Electrons) จะมีอันตรปฏิกิริยากับส่วนที่พุ่งออกมาของพื้นผิวและก่อให้เกิดลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับและกระจายตัวจากอะตอมของโลหะที่เป็นตัวอย่างเพื่อสร้างสัญญาณทางอิเล็กตรอนิกส์ 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) [25]



รูปที่ 2.64 เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscopy ; SEM [25]

2.18 การบดลดขนาดของแข็ง

2.18.1 การบดลดขนาดของแข็ง การบดลดขนาดขั้นแรกคือการทำให้พลาสติกที่มีรูปร่างรูปทรงต่าง ๆ เสียรูปกลายเป็นเศษพลาสติกขนาดเล็ก ๆ มีขนาดประมาณ 5-20 มิลลิเมตร ซึ่งการบดลดขนาดนี้จะอยู่ในการย่อยขั้นที่สอง โดยเครื่องที่ใช้ในการบดลดขนาดในขั้นนี้คือเครื่องบด Bosco แบบ 2 ใบมีด หลักการทำงานของเครื่องบดจะเป็นเครื่องโม่อัดพลาสติกซึ่งจะมีใบมีดอยู่ด้านใน เมื่อใส่ฝาขวดพลาสติกที่จะทำการลดขนาดในขั้นนี้ ใบมีดจะทำการตัด ฉีก พลาสติกและจนได้เป็นเศษชิ้นส่วนพลาสติกจะหล่นลงมาในตะแกรงความกว้างของรูตะแกรงมีขนาดประมาณ 10-20 มิลลิเมตร เมื่อใบมีดตัด ฉีกจนได้ขนาดที่เหมาะสมเศษพลาสติกจะหล่นตามช่องตะแกรง ส่วนพลาสติกที่มีขนาดใหญ่จะถูกตัดซ้ำจะกว่าจะมีขนาดเล็กกว่าช่องตะแกรง ดังแสดงในรูปที่ 2.65



รูปที่ 2.65 เครื่องบดแบบใบมีด Bosco [25]

2.18.2 การแยกขนาดของเถ้าเคลือบด้วยเครื่องแยกขนาด (Sieve Analysis)

วิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือความละเอียด (Fineness) โดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ ซึ่งช่องของตะแกรงทดสอบนั้นจะมีการจัดเรียงขนาดที่ต่างกันไปซึ่งตะแกรงเหล่านี้จะติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้บนตะแกรง (Sieve) เกิดจากการนำลวดขนาดต่างกันมาสานเป็นช่องและบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (Mesh) หมายความว่าจำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้วจะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งอาจจะยาวกว้าง 0.1 นิ้ว ทำจากลวดที่มีขนาดต่างกันจึงจำเป็นต้องบอกขนาดช่องหรือ Aperture Size ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วย [25]

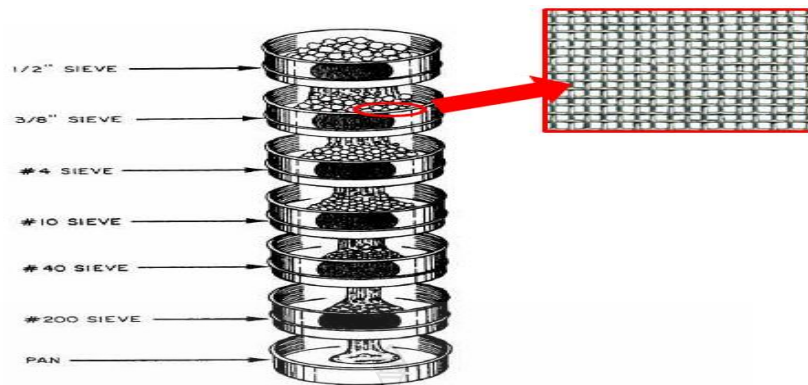


รูปที่ 2.66 ตะแกรงแยกขนาด (Sieve Analysis) [25]

ตะแกรงมาตรฐานที่นิยมใช้ได้แก่

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

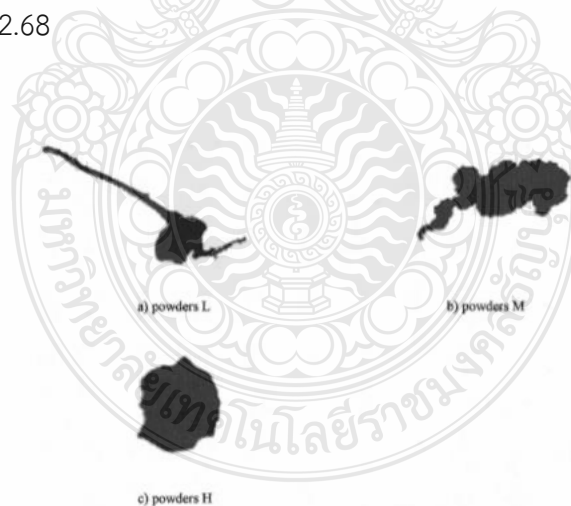
โดยในเมชเบอร์เดียวกันของตะแกรงแต่ละมาตรฐานจะมีขนาดช่อง (Aperture Size) ที่ต่างกันก็ได้ ดังรูปที่ 2.66 ตัวอย่างเช่น ตะแกรงขนาด 100 เมชแบบไทเลอร์มีขนาดช่อง 0.147 มิลลิเมตร แบบอังกฤษมีขนาดช่อง 0.152 มิลลิเมตร และแบบอเมริกันมีขนาดช่อง 0.149 มิลลิเมตร ดังนั้นตะแกรงมาตรฐานทุกแบบจะต้องแสดงรายละเอียด ทั้งขนาดเมชและขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.67



รูปที่ 2.67 ขนาดของช่องรูตะแกรง (Apertrue Size) [25]

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Greco และคณะ [56] ศึกษาอิทธิพลของขนาดและรูปร่างของการบดต่ออุณหภูมิโดยใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยครั้งนี้ใช้พอลิเมอร์ผงและจะได้รับอุณหภูมิที่ไม่เท่ากัน พอลิเอธิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิลจะถูกบด จะมีลักษณะรูปร่างคล้ายกับมีหัวและมีหางเนื่องจากการถูกดึงจนขาดโดยพอลิเมอร์จะถูกดึงยึดจนขาด ลักษณะการยึดตัวของพอลิเมอร์เกิดจากความเหนียว ความเหน็ดของวัสดุมากจากอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงรูปร่างได้ จึงส่งผลให้พื้นผิวที่ไม่เรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.68



รูปที่ 2.68 ความแตกต่างขนาดอนุภาคหลังจากการบดลดขนาด [56]

ดวงแข บุตรกุล [57] ทำการศึกษาวัสดุผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยธรรมชาติ พบว่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเนื่องจากเส้นใยหรือสารตัวเติมมีความแข็งแรงหรือค่า

มอดูลที่สูงกว่าวัสดุเนื้อหลัก คือพอลิเมอร์เมื่อวัสดุได้รับแรงจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียด ในส่วนของเส้นใยหรือสารตัวเติมน้อยกว่าเกิดในวัสดุหลักทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคหรือ interested ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักหรือเสียหายนอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยหรือสารตัวเติมจะทำให้ความไม่ต่อเนื่องของภูมิภาคเมตริกซ์ มีรอยต่อภูมิภาคหรืออินเทอร์เฟซที่ไม่แข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งแรงกระแทกลดลง

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ และคณะ [58] ศึกษาการนำผงซีลีออยไมยางพารานำมาผสมกับพีวีซี พบว่าเมื่อปริมาณผงซีลีออยที่เพิ่มสูงจะส่งผลให้แรงดึงมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากผงซีลีออยในปริมาณที่สูงจะทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีในพอลิเมอร์เมตริกซ์ เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานเมื่อให้แรงกระทำจึงไม่สามารถรับแรงได้ดีเท่าที่ควร การต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยังขึ้นอยู่กับความสามารถของ ความเค้นในการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ถ้าความเค้นไม่สามารถเคลื่อนที่หรือกระจายตัวได้อย่าง ต่อเนื่องวัสดุจะเกิดการเสีรูปร่างได้ง่าย ซึ่งอนุภาคของผงซีลีออยที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์เมตริกซ์ มีลักษณะ แข็งไม่ยืดหยุ่นส่งผลให้ความเค้นที่เคลื่อนที่มาจากพอลิเมอร์เมตริกซ์หยุด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้อีกทำให้ความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของผงซีลีออย และปริมาณผงซีลีออยที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปแทรกตัว อยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นเหตุให้การเกี่ยวพัน กันของสายโซ่พอลิเมอร์เมตริกซ์ ลดลง

A. VAXMAN และคณะ [59] ศึกษาการเกิดช่องว่าง หรือฟองอากาศ เกิดขึ้นในเส้นใยโพลี เมอร์คอมโพสิต เนื่องจากอากาศที่ถูกดักจับในระหว่างขั้นตอนการผสมและขั้นตอนการขึ้นรูป การหด ตัวที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดช่องว่างที่ปลายเส้นใย ปริมาตรช่องว่างขึ้นอยู่กับปริมาณและความยาวของ เส้นใย ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจะพบว่าช่องว่างเกิดขึ้นจากการเย็นตัวภายใต้ความดัน โดยทั่วไป ปริมาตรช่องว่างจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้นใย อัตราแรงเฉือนและอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับช่องว่างสูงขึ้นและเปลี่ยนรูปร่างของช่องว่างจากกลมเป็นลักษณะยาว กลไกการก่อตัวของ ฟองในพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวนั้นคือนิวคลีไอ และการขยายขนาดที่ตรงกลางความหนืดการ แพร่กระจายของก๊าซจากฟองอากาศขนาดเล็กไปสู่วัตถุที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากความ แตกต่างของแรงดัน ฟองจะยังคงขยายตัวภายในจะปรับสมดุลกับความดันภายนอกในการหลอม อัตรา การเติบโตของฟองส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่กระจายและความเข้มข้นของก๊าซที่ความหนาแน่นของพอลิ เมอร์ หลอมเหลวที่อุณหภูมิและความดัน การยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์กับไฟเบอร์ที่ไม่สมบูรณ์เกิดโพรง ที่ปลายของไฟเบอร์จะทำให้ไฟเบอร์หลุดออกจากเมตริกซ์ได้ ปัจจัยอื่นที่มีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดช่อง

วางหรือฟองอากาศคืออัตราการเย็นตัว เมื่อการเย็นตัวของชั้นผิวด้านนอกจะแข็งตัวเป็นลำดับแรกดังนั้นจึงยับยั้งการหดตัวของโซนด้านในที่ตามมาซึ่งส่งผลให้เกิดช่องภายใน

A.V. Ortiz และคณะ [60] ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เสริมแรงด้วย ถั่วกลีบ ดินเหนียว ดินช็อคโกแลตเบนโทไนต์บราซิล จากนั้นจะทำการฉายรังสีในเครื่องเร่งลำแสงอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนขนาด 1.5 MeV การเปรียบเทียบโดยใช้พอลิเมอร์ผ่านการฉายรังสีและไม่ฉายรังสี และได้ทำการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่ฉายรังสีและไม่ได้ฉายรังสี ทดสอบแรงดึง, ดัดงอ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ HDT, SEM และ XRD พร้อมกับการวิเคราะห์โซล - เจล สรุปผลการทดสอบแรงดึง การเสริมแรงในพอลิเมอร์ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงที่จุดขาด แต่ผลในการยึดตัวที่จุดขาดนั้นตรงกันข้าม สิ่งสำคัญคือต้องสังเกตว่าการใช้การฉายรังสีนำไปสู่การได้รับแรงดึงที่ขึ้น การรวมกันของ HDPE กับดินที่ผ่านการฉายรังสีแล้วสามารถรับแรงดึงได้ 23.16 MPa เนื่องจากความต้านทานแรงดึงที่จุดแตกหักซึ่งสูงกว่าสมบัติ HDPE ที่สามารถรับแรงดึงได้ 5.60 MPa ผลต่างกันถึง 314% และการทดสอบแรงกระแทก จะเห็นได้ว่าการรวมตัวกันของการเสริมแรงทำให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้นถึง 267.3 J/m สำหรับการรวมกัน HDPE กับถั่วฉายรังสีมันแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้น 246% เมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่ผ่านการฉายรังสีเจล ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติ HDPE สมบัติเชิงกลของวัสดุเพิ่มขึ้น 85% เนื่องจากการฉายรังสีอิเล็กตรอน

Sukhdeep Singh และคณะ [61] ศึกษาการใช้เส้นใยป่านเป็นตัวเสริมแรงและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นเมทริกซ์ ทั้งบริสุทธ์และรีไซเคิลถูกนำมาใช้เพื่อเตรียมผสมใยกล้วยง ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อทดสอบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่นแรงดึงและการดัดโค้ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมด้วยเส้นใยป่านจะผ่านการทดสอบแรงดึงและแรงดัดงอ ปริมาณเส้นใย 10%, 20% และ 30% (wt.%) จากการทดสอบการต้านทานแรงดึง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกับเส้นใย 20% ให้ความต้านทานแรงดึงและแรงต้านทานการดัดงอสูงสุดการยึดเกาะที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นเมทริกซ์ ความต้านทานแรงดึงที่ไม่ดีของคอมโพสิตเมื่อเทียบกับชิ้นงาน มีสัดส่วนที่เท่ากันของ HDPE บริสุทธ์และรีไซเคิล

Rohan Muni Bajracharya และคณะ [62] การศึกษาขยะพลาสติกจากการบริโภคและอุตสาหกรรมของประเทศออสเตรเลีย ขยะพลาสติก(PSW) ประกอบด้วย HDPE, LDPE และ PP และผสมด้วยเส้นใยไฟเบอร์กลาสสั้น (ใยแก้วสับ GF) 10–30% โดยน้ำหนัก วัสดุถูกผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิ 170 °C และอัดให้เป็นเม็ดยาว 4–5 มม. อบแห้งเป็นเวลา 24

ชั่วโมงที่ 60 °C ก่อนการฉีดขึ้นรูปเพื่อทำการศึกษาเชิงทดลองสมบัติของแรงดึงแรงอัดและแรงดัดงอ จะถูกเรียกว่า ขยะพลาสติกผสมเส้นใยไฟเบอร์กลาส (GMPC) จากการทดสอบไฟเบอร์กลาส 30 wt.% ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 25.7 MPa และ 3.07 GPa ตามลำดับเพิ่มขึ้น 238% ในโมดูลัสและแรงดึงซึ่งสูงกว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดถึง 74% สมบัติด้านดัดงอและโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นมากถึง 141% และ 357% ตามลำดับ การปรับปรุงที่ดีที่สุดจะเห็นได้ในสมบัติ เนื่องจากทิศทางของเส้นใยแก้วไปในทิศทางตามยาวของชิ้นงาน

Daniella R. Mulinari และคณะ [63] ศึกษาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวแล้ว กับเซลลูโลสจากชานอ้อยและเซลลูโลสที่ผ่านการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวแตกหักจากคอมโพสิตสามารถประเมินได้ง่ายโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์ ผลการทดลองพบว่า การเติมเซลลูโลสที่ผ่านการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง วัสดุเสริมแรงด้วยโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงนี้แสดงให้เห็นถึงความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเซลลูโลสจากชานอ้อย เส้นใยสามารถทำให้โมดูลัสเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากโมดูลัสเส้นใยสูงกว่าโมดูลัสเทอร์โมพลาสติก การเชื่อมประสานระหว่างเมทริกซ์ที่ความต้านทานแรงดึงมีปฏิสัมพันธ์ที่ดีระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ โดยเพิ่มขึ้น 24.1% และ 31.8% ตามลำดับ เซลลูโลสที่ผ่านการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแสดงค่าเฉลี่ยที่สูงขึ้น สำหรับความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง การเพิ่มขึ้นของโมดูลัสแรงดึงนี้เกิดขึ้นจากการรักษาออกไซด์และเซอร์โคเนียมออกไซด์คลอไรด์ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์

กิตติศักดิ์ อินทร์แก้ว และคณะ [64] ศึกษาผลิตและผลิตวัสดุไม้พลาสติกจากเศษไม้ยางพาราโดยใช้ซีลี้อยไม้ยางพาราผสมกับขวดน้ำเกลือ LDPE ด้วยวิธีการอัดร้อนและมีปัจจัยที่ศึกษา 3 อย่างคือ ความดัน อุณหภูมิ และอัตราส่วน ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้ของไม้พลาสติกมาเปรียบเทียบกับไม้อัดความหนาแน่นปานกลางพบว่า ฟีอัตราส่วนพลาสติกต่อซีลี้อย 70:30 โดยน้ำหนักจะมีสมบัติความหนาแน่นและความแข็งแรงดึงสูงกว่าอัตราส่วนพลาสติกต่อซีลี้อย 50:50 และ 60:40 โดยน้ำหนัก และไม้อัดความหนาแน่นสูงปานกลาง พบว่าที่ความดันสูงสูงจะทำให้ไม้พลาสติกมีสมบัติด้านความหนาแน่นและความแข็งแรงดึงสูง ไม้พลาสติกที่มีส่วนผสมของพลาสติกจะทำให้มีคุณสมบัติด้านความหนาแน่นและความแข็งแรงดึงสูงกว่าไม้พลาสติกที่มีส่วนผสมของพลาสติกต่ำ และที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเหมาะสมกับการทำไม้พลาสติกมากกว่า 110 องศาเซลเซียส

Tomari, S. Tonogai และคณะ[65] การศึกษาการก่อตัวของรอยเชื่อมขวางในชิ้นงาน เกิดขึ้นจากการไหลชนกันของพลาสติกหลอมเหลวด้วยการจำลองโพรงแม่พิมพ์ ผลการวิจัยทางเทอร์โม-รีโอยี ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบแหล่งที่มาจุดอ่อนในรอยเชื่อมขวาง ด้วยวิธีนี้พื้นที่บริเวณอินเทอร์เฟซ เกี่ยวกับการขาดระหว่างการแพร่กระจายและการเรียงตัวของโมเลกุลที่ไม่เหมาะสม แหล่งที่มาหลัก สำหรับจุดอ่อนของรอยเชื่อมขวางในชิ้นงานจะเป็น V- notch รอยที่เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นผิวที่ประสานกันไม่ดีขึ้นกับการหดตัวของพลาสติก อันเป็นผลมาจากการเรียงตัวของโมเลกุล นอกจากนี้รอยเชื่อมขวางในชิ้นงานค่อนข้างไวต่อสถานะการไหล อุณหภูมิหลอมเหลวและแม่พิมพ์ถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวาง

Malguarnera และคณะ[66] ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อสมบัติแรงดึงของรอยเชื่อมประสาน ในเทอร์โมพลาสติกฉีดขึ้นรูป รอยเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นจากการไหลของพอลิเมอร์ประสานกัน ดังนั้นจึงพบว่ารอยเชื่อมขวางในชิ้นงานจะทำให้สมบัติทางกลด้อยลง จากผลการทดสอบอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีด และแรงดันในการฉีด มีผลต่อสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงของโพลีสไตรีน (GPS) โพลีสไตรีนแรงกระแทกสูง (HIPS) และโพลิโพรพิลีน (PP) เกรดเชิงพาณิชย์ พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดคือ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ส่วนความเร็วในการฉีด และแรงดันในการฉีด มีผลเล็กน้อยต่อสมบัติด้านการต้านทานแรงดึง อุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงขึ้นจะเพิ่มทั้งความเครียดและความเครียดที่จุดขาดใน GPS อย่างมากแต่ใน HIPS อุณหภูมิหลอมที่เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นเพียงการยืดตัวให้แตกหัก และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงความเค้นและการยืดตัวให้แตกหักใน GPS แต่ไม่มากเท่ากับอุณหภูมิหลอมเหลว โพลีโพรพิลีนมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ดีขึ้นพร้อมอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น แรงดันฉีดและความเร็วการฉีดไม่มีผลต่อสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงของวัสดุใดๆ

Kim และคณะ[67] การเกิดรอยเชื่อมขวางในชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดมีความแข็งแรงลดลง วิธีการแก้ปัญหาของรอยเชื่อมขวางคือการเพิ่มอุณหภูมิหลอมเหลว รูปแบบทางทฤษฎีสำหรับความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวาง ถูกนำเสนอที่ให้ข้อมูลเชิงลึกทางกายภาพที่ครอบคลุมของกระบวนการยึดเหนี่ยวที่อินเทอร์เฟซของรอยเชื่อมขวาง แบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของโซ่โมเลกุลทั่วอินเทอร์เฟซพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ และแนวการเย็นตัวในแนวระนาบกับอินเทอร์เฟซ ทั้งสองปัจจัยจะถูกวิเคราะห์แยกออกจากกันเพื่อรู้ค่าความแข็งแรงของเชื่อมขวาง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในกระบวนการงานวิจัยจะขอกกล่าวถึงแผนการดำเนินการ วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดลอง และขั้นตอนการทดลองในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้แบ่งรายละเอียดการทำงานของโครงการวิจัยไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2560			พ.ศ. 2561	พ.ศ. 2562				
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค. - ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ค้นคว้าหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←-----→								
2. รวบรวมข้อมูล/วางแผนการทำงาน		←-----→							
3. เตรียมวัสดุผสม คัดแยกขนาดและผสมแบบแห้ง				←-----→					
4. ออกแบบอัตราส่วนผสมและทดสอบขั้นรูป				←-----→					
5. ทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ				←-----→					
6. ทดสอบขั้นรูปตามอัตราส่วนผสมและสภาวะควบคุม				←-----→					
7. ทดสอบสมบัติเชิงกล					←-----→		←-----→		
8. ทดสอบสัณฐานวิทยา					←-----→		←-----→		
9. สรุป/รายงาน							←-----→		

หมายเหตุ : ←-----→ แสดงแผนการดำเนินการ ←-----→ แสดงการดำเนินการ

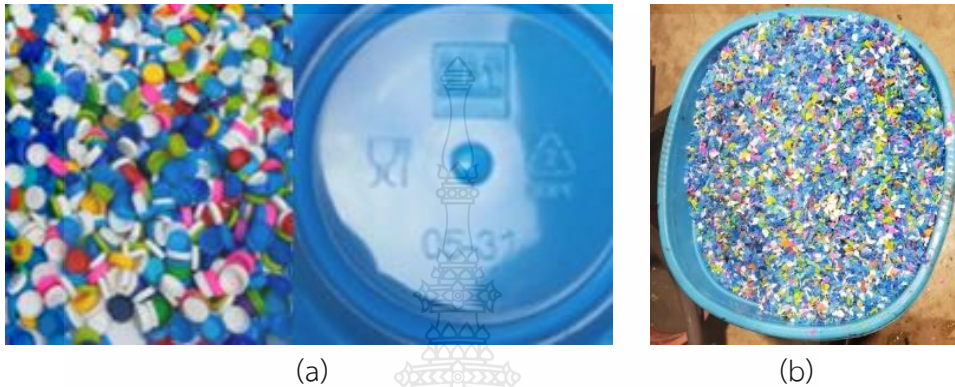
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.3 วัสดุในงานวิจัย

3.3.1 พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงผ่านการใช้งานแล้ว (Recycle High Density Polyethylene ; rHDPE) ได้จากฝาขวดน้ำดื่มที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล 2 และถูกนำมาบดลดขนาด ดังแสดงในรูปที่ 3.2



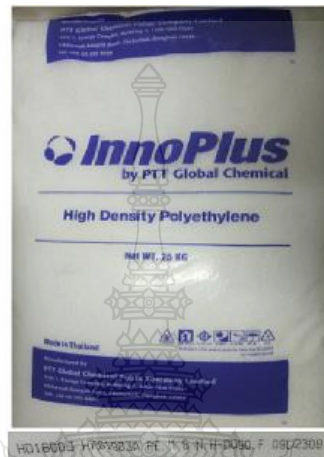
รูปที่ 3.2 (a) ฝาขวดน้ำดื่มที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล 2 (b) ฝาขวดน้ำดื่มที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 2 ที่ผ่านการบดลดขนาด

3.3.2 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash ; RHA) ที่ผ่านการเผา นำเข้าเตาอบโดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากที่มีความชื้นอยู่ในช่วง 1.2-1.7 เถ้าแกลบถูกแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงทดสอบ (Sieve) ที่ 300, 800 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 (a) เถ้าแกลบที่ยังไม่ถูกอบไล่ความชื้น และ (b) เถ้าแกลบที่ถูกอบไล่ความชื้นและถูกแยกขนาดที่ 300, 800 ไมโครเมตร

3.3.3 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) จากบริษัท PTT Global Chemical หมายเลขทางการค้า HD1600J สำหรับใช้เปรียบเทียบกับพลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) และถูกเติมด้วยเถ้าแคลบ (RHA) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) หมายเลขทางการค้า HD1600J

3.4 การเตรียมวัสดุสำหรับกระบวนการขึ้นรูป

3.4.1 การบดลดขนาดพอลิเมอร์ พอลิเมอร์จะถูกบดลดขนาดด้วยเครื่อง Bossco เครื่องบดแบบไม่อัดพลาสติก ซึ่งมีใบมีดอยู่ด้านในจะได้พลาสติกที่มีขนาดเฉลี่ย 10 - 20 มิลลิเมตร พลาสติกจะถูกตัดจนขาด และสามารถผ่านตะแกรงที่มีความกว้างรูตะแกรงมีขนาด 10 - 20 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5



(a)



(b)

รูปที่ 3.5 (a) เครื่องบดใบมีด Bossco และ (b) อนุภาค rHDPE ขนาดเฉลี่ย 10 - 20 มิลลิเมตร

3.4.2 การคัดแยกขนาดของเถ้าแกลบ ด้วยเครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) ที่มีลักษณะของเครื่องทดสอบได้แบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 ชั้น ในแต่ละชั้นจะมีขนาดที่แตกต่างกันโดยเครื่องจะทำการสั่นเพื่อให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กหล่นลงในแต่ละชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6

วิธีการทดสอบ

1. นำเถ้าแกลบมาชั่ง 400 กรัม ใส่บนชั้นบนสุดของชุดตะแกรงแยกขนาด
2. เปิดเครื่องและจับเวลา 20-30 นาที
3. นำเถ้าแกลบในชั้นขนาดที่ต้องการไปใช้งาน



รูปที่ 3.6 เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) และ ชุดตะแกรงลดขนาด

3.5 เครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัย

3.5.1 การทดสอบความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) เป็นการวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุภายในภาชนะบรรจุระหว่างวัสดุและอากาศ โดยการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นโดยรวมมาตรฐาน ASTM D1895 แสดงดังในรูปที่ 3.7

วิธีการทดลอง

1. เตรียมเถ้าแกลบและพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน 400 กรัม
2. คำนวณปริมาตรกระบอกทดสอบ (400 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
3. ใส่วัสดุลงในกรวยทดสอบ จากนั้นเปิดลิ้นของกรวยทดสอบ
4. เมื่อวัสดุเต็มกระบอกทดสอบ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของวัสดุ
6. ผสมเถ้าแกลบและผงพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ตามอัตราส่วนปริมาตร 400 กรัม แล้วทำตามข้อ 3-5
7. บันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความหนาแน่นโดยรวมและอัตราการไหลขณะของแข็ง

3.5.2 เครื่องมือทดสอบวิเคราะห์ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index : MFI) ใช้สำหรับทดสอบอัตราการไหลของวัสดุหลอมเหลว ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (MFI) ชื่อทางการค้า CEAST รุ่น Type 6542 Serial 8331 ซึ่งจะใช้น้ำหนักอนุภาคพลาสติกและเก้าแกลบตามอัตราส่วนผสม ใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่กด 2.16 กิโลกรัม เมื่อวัสดุไหลออกมา นำไปทำการชั่งน้ำหนักและคำนวณหาค่าดัชนีการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index ; MFI)

3.5.3 เครื่อง (Scanning Electron Microscope ; SEM) ชื่อทางการค้า JEOL รุ่น JSM – 6510 ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.9 เครื่อง (Scanning Electron Microscope ; SEM)

3.5.4 เครื่องทดสอบแรงดึง ชื่อทางการค้า Universal Materials Testing Machine รุ่น LR10KPlus ใช้สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Materials Testing Machine

3.5.5 เครื่องทดสอบการต้านการดัดงอ ชื่อทางการค้า Universal Materials Testing Machine รุ่น LR10KPlus ใช้สำหรับการทดสอบการต้านการดัดงอ ตามมาตรฐาน ASTM D790



รูปที่ 3.11 เครื่องการต้านการดัดงอ Universal Materials Testing Machine

3.5.6 เครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว ชื่อทางการค้า Matsuzawa รุ่น DXT-1 ใช้สำหรับการทดสอบความแข็งที่ผิว ตามมาตรฐาน ASTM D785



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว

3.5.7 เครื่องทดสอบแรงต้านการกระแทก ชื่อทางการค้า CEST รุ่น 6542 Serial 8331 ใช้สำหรับการทนต่อแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D 256



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงต้านการกระแทก

3.5.8 เครื่องบากชิ้นงาน (notching) ชื่อทางการค้า CEST ใช้สำหรับชิ้นงานทดสอบแบบชาร์ปี เพื่อก่อให้เกิดจุดอ่อนของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ISO 180 และ ASTM D256



รูปที่ 3.14 เครื่องบากชิ้นงาน (notching)

3.5.9 เครื่องฉีดพลาสติก ชื่อทางการค้า ARBURG (Thailand) Co.,Ltd รุ่น ALLROUNDER 470C GOLDEN EDITION ใช้สำหรับฉีดชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.15 เครื่องฉีดพลาสติก

3.5.10 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ใช้สำหรับฉีดชิ้นงานทดสอบ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแบบมีทางเข้า 2 ทาง ไว้ใช้สำหรับฉีดชิ้นงานทดสอบให้มีรอยเชื่อมขวาง



รูปที่ 3.16 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

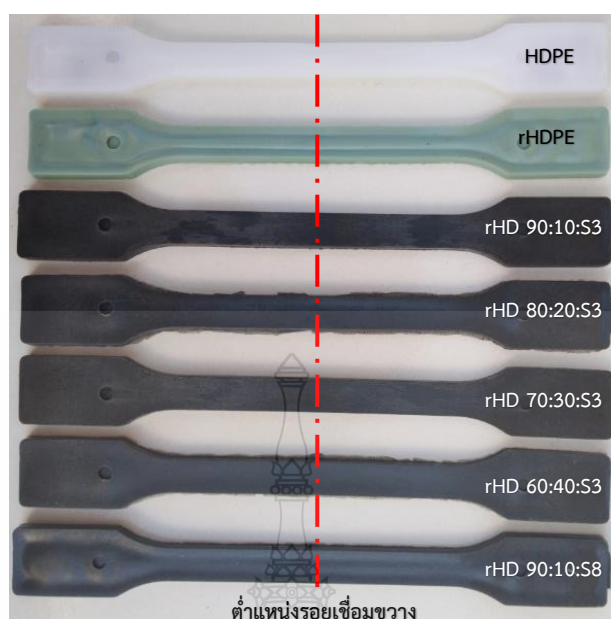
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash : RHA) เติมลงในพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Recycle High Density Polyethylene : rHDPE) ที่ได้จากฝาขวดน้ำดื่ม ที่ระบุถึงหมายเลขรีไซเคิลหมายเลข 2 ผสมด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์และฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทาง โดยกระบวนการขึ้นรูปอยู่ในสภาวะควบคุม เพื่อศึกษาอิทธิพลต่อรอยเชื่อมขวางและผลกระทบต่อสมบัติทางกล เพื่อเป็นแนวทางหรือเป็นทางเลือกการนำของเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ซ้ำอีกครั้งหรือการรีไซเคิล (Recycle)

4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิลผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) เป็นวัสดุหลักและเถ้าแกลบ (RHA) เป็นสารเติมแต่ง คัดแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงลดขนาด (Sieve) ที่ขนาด 300, 800 ไมโครเมตร ผสมด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์และฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทาง

ชื่อสำหรับชิ้นงานทดสอบ ตามอักษร 3 ตัวหน้าต่อด้วยปริมาณอัตราส่วนผสมต่างๆ และขนาดของเถ้าแกลบ เช่น rHD 90:10:S3 คือ rHDPE 90% : RHA 10% : Sieve 300 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.1 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์และฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทาง อัตราส่วนผสม HDPE, rHDPE, rHD90:10:S3, rHD80:20:S3, rHD70:30:S3, rHD60:40:S3, และ rHD90:10:S8

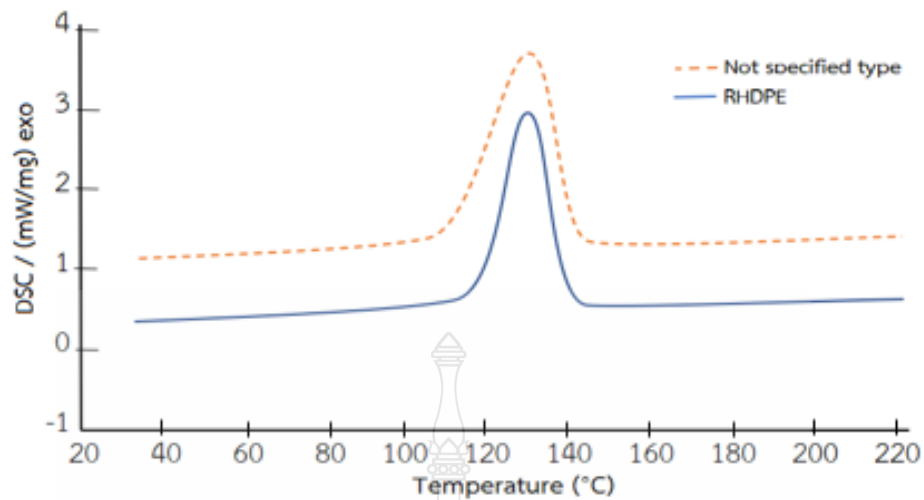


รูปที่ 4.1 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ และตำแหน่งรอยเชื่อมขวางในชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ HDPE มีสีขาวขุ่น rHDPE มีสีเขียวอ่อนขุ่น และชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของแก้วเกลบจะมีสีดำเพราะแก้วเกลบผ่านการเผา และมีสีดำเข้มหรือดำอ่อนตามปริมาณอัตราส่วนผสมของแก้วเกลบ

4.2 ผลการทดสอบสมบัติด้านความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC) ฝาขวดน้ำดื่ม

จากการทดสอบฝาขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ระบุหมายเลขซีเคิลหมายเลข 2 และฝาขวดน้ำดื่มผ่านการใช้งานแล้วที่ไม่ระบุชนิด ด้วยการทดสอบสมบัติด้านความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC) แสดงถึงสมบัติการนำความร้อนของ ฝาขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ระบุหมายเลขซีเคิลหมายเลข 2 และฝาขวดน้ำดื่มผ่านการใช้งานแล้วที่ไม่ระบุชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.2

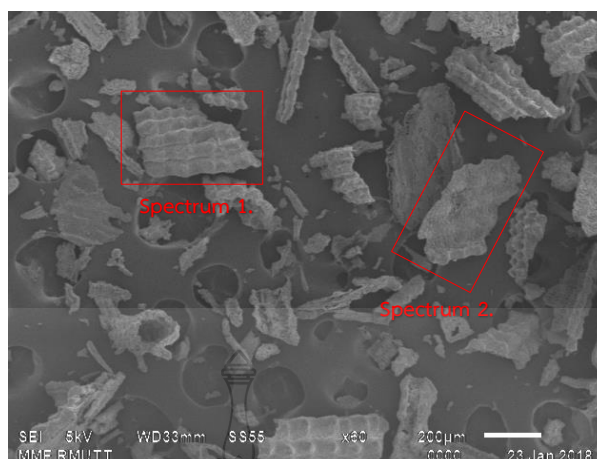


รูปที่ 4.2 ผลทางความร้อนของพอลิเมอร์สองชนิดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry : DSC)

จากการทดสอบสมบัติการนำความร้อนของพอลิเอทิลีนทั้งสองชนิด กราฟบ่งชี้ถึงอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุ (Glass Transition Temperature) ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีอุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกัน โดยฟลาชวอน้ำดีมีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ระบุหมายเลขรีไซเคิลหมายเลข 2 มีอุณหภูมิอยู่ที่ 132.5 °C และ ฟลาชวอน้ำดีที่ไม่ระบุชนิดมีอุณหภูมิอยู่ที่ 132.6 °C

4.3 การวิเคราะห์หาลักษณะประกอบของแก้วเคลือบด้วยเทคนิควิเคราะห์ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ซึ่งเป็นการศึกษาถึงโครงสร้างขนาดเล็ก และสามารถวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ช่วยในการศึกษา การกระจายตัว ปริมาณและชนิด ขององค์ประกอบธาตุของแก้วเคลือบได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 ผลแสดงองค์ประกอบของเก้าอี้เคลือบเคลือบต่ออนุภาค

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของเก้าอี้เคลือบเคลือบต่ออนุภาค ด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

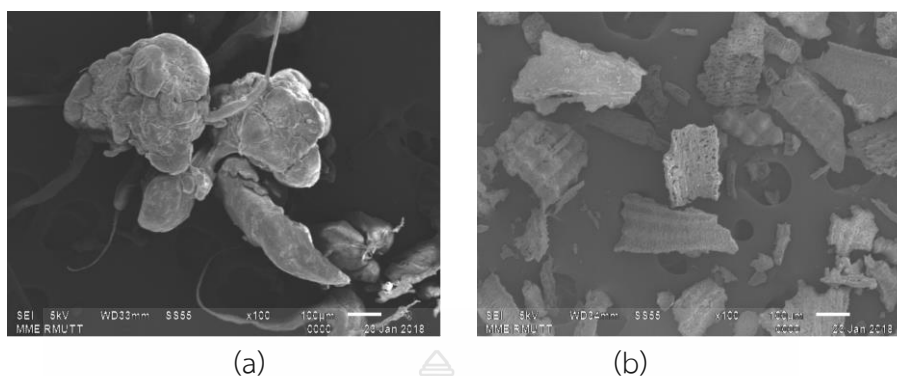
ลำดับที่	องค์ประกอบธาตุ	น้ำหนัก (%Wt.)	หมายเหตุ
1.	O ₂	60.4	SiO ₂
2.	Si	30.7	ซิลิกอนไดออกไซด์
3.	C	6.4	91.1 %Wt.
4.	Ca	0.7	
5.	K	1.0	
6.	P	0.6	
7.	Al	0.3	
8.	Mg	0.2	

4.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ความหนาแน่นและดัชนีการไหล

4.4.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า เพื่อศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา

rHDPE มีลักษณะคล้ายมีหัวและมีหางเนื่องจากการบิด พลาสติกถูกดึงยืดจนขาดส่วนที่ถูกดึงยืดออกเป็นเส้นยาวก่อนขาดลักษณะคล้ายหาง

RHA มีลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน เป็นแผ่นและเป็นรูปทรงกระบอก พื้นผิวมีทั้งเป็นพื้นผิวเรียบ ขรุขระและเป็นรูพรุน มีหลายขนาดปะปนกันและเป็นของแข็งไม่หลอมละลาย



รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปทรงและพื้นผิว (a) rHDPE, (b) เถ้าแกลบ (RHA)

4.4.2 ความหนาแน่นและค่าดัชนีการไหล สำหรับพลาสติกผสมเถ้าแกลบขนาดเถ้าแกลบ 300, 800 ไมโครเมตร อัตราส่วน 10, 20, 30, และ 40% โดยน้ำหนัก ผสมด้วยวิธีผสมแบบแห้งจาก ลักษณะทางกายภาพของพลาสติกและเถ้าแกลบ ส่งผลให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ลักษณะทางกายภาพจะทำให้ส่วนที่เป็นหางพันกันแล้วไปขัดขวางการเคลื่อนที่อนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงและ เถ้าแกลบแทรกตัวเข้าไปอยู่มีขนาดอนุภาคเล็ก ส่งผลให้การเคลื่อนที่หรือการไหลมีประสิทธิภาพต่ำ และ ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจากลักษณะทางกายภาพและเถ้าแกลบเป็นของแข็งไม่หลอม ละลายการเพิ่มปริมาณมากขึ้นของเถ้าแกลบ ส่งผลให้อัตราการไหลลดลง

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นและดัชนีการไหลของ rHDPE และ RHA

Material	Bulk Density (g/cm ³)	Melt Flow Index (g/10 min)
rHDPE	0.292	7.88
RHA	0.282	-
rHD 90:10:S3	0.293	4.62
rHD 80:20:S3	0.297	2.85
rHD 70:30:S3	0.312	1.95
rHD 60:40:S3	0.317	-
rHD 90:10:S8	0.295	2.60

4.5 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding process)

กระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์นั้น การกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นมีความสำคัญทั้งในด้านการควบคุมคุณภาพ เวลาในการผลิต ราคาต่อหน่วย และชนิดของพลาสติกจะมีความแตกต่างกันไปตามผลิตภัณฑ์ ซึ่งการผลิตที่มีลักษณะเดียวกันจำนวนมาก ๆ จำเป็นต้องมีสภาวะควบคุมเดียวกันเพื่อสะดวกแก่การควบคุมคุณภาพ ต้นทุน สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์คือ ความดัน อุณหภูมิ เวลาและระยะทาง เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 สภาวะควบคุมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

Technical Parameter	Value
ปริมาณวัสดุ	35 cm ³
ความดันการฉีด	1,500 bar
ความเร็วการฉีด	35 cm ² /s
อุณหภูมิภายนอกหลอมเหลว	210-245 °C
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	25 °C
เวลาสำหรับกระบวนการขึ้นรูป	0-35 sec

การทดสอบใช้เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น ALLROUNDER 470C GOLDEN EDITION บริษัท ARBURG (Thailand) Co., Ltd.

การเตรียมพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) วัสดุหลักผสมกับเถ้าแกลบ (RHA) ในอัตราส่วน 10, 20, และ 30% โดยน้ำหนัก ทั้งขนาด 300 , 800 ไมโครเมตร ผสมด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry Blend) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์และฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทาง ตามสภาวะ จากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองขึ้นรูปตามสภาวะควบคุม

ขนาด RHA	RHA 10%	RHA 20%	RHA 30%	RHA 40%	RHA 50%
300 ไมครอน	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปไม่ได้
800 ไมครอน	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปไม่ได้	ขึ้นรูปไม่ได้	ขึ้นรูปไม่ได้	ขึ้นรูปไม่ได้

จากตารางที่ 4.3 ผลการทดลองขึ้นรูปตามสภาวะควบคุม พบว่า RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร สามารถขึ้นรูปได้ตั้งแต่อัตราส่วน RHA 0-40% โดยน้ำหนัก และ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร สามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วน RHA 0-10% โดยน้ำหนัก

วิธีการผสมแบบแห้ง (Dry Blend) แก้วกลบขนาด 300 ไมโครเมตร สามารถขึ้นรูปได้ตั้งแต่อัตราส่วนแก้วกลบ 0-40% โดยน้ำหนัก และแก้วกลบขนาด 800 ไมโครเมตร สามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนแก้วกลบ 0-10% โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองขึ้นรูปตามสภาวะควบคุมพบว่าการเติมแก้วกลบเพิ่มในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์มีแนวโน้มยากขึ้นและขนาดของแก้วกลบมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปเช่นกัน เนื่องจากการกระจายตัวของแก้วกลบในเนื้อพลาสติกไม่ดีเท่าที่ควรและมีแนวโน้มที่จะเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวเป็นก้อน (สามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้อำนาจขยาย 1,000 เท่า รูปที่ 4.18) ทำให้สามารถยืนยันผลได้อย่างชัดเจน เมื่อมีการใช้ปริมาณแก้วกลบมากขึ้นโดยเฉพาะในกรณีที่ใช้แก้วกลบขนาดใหญ่ (800 ไมโครเมตร) สามารถขึ้นรูปได้เพียงอัตราส่วนผสมแก้วกลบที่ 10% โดยน้ำหนักเท่านั้น

4.6 สมบัติทางกล

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลประกอบไปด้วย ความทนแรงกระแทก ความแข็งที่ผิว แรงต้านทานการดัดงอ โมดูลัสแรงต้านทานการดัดงอ แรงดึง โมดูลัสแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ของ HDPE, rHDPE และ rHDPE ผสม RHA ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ และตรวจสอบพื้นฐานวิชาของวัสดุเชิงประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาอิทธิพลของ RHA ที่มีผลกระทบต่อรอยเชื่อมขวางและสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกลของ HDPE, rHDPE ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Sample	HDPE	rHDPE	rHD90:10:53	rHD80:20:53	rHD70:30:53	rHD60:40:53	rHD90:10:58
Impact strength (J/m)	0.127 ± 0.008	0.037 ± 0.012	0.029 ± 0.010	0.025 ± 0.013	0.025 ± 0.005	0.023 ± 0.005	0.031 ± 0.023
Hardness	20.6 ± 2.7	13.3 ± 2.2	11.9 ± 3.8	10.3 ± 4.2	9.95 ± 1.4	11.13 ± 3	12.38 ± 2.5
Flexural Strength (Mpa)	38.18 ± 9.5	34.1 ± 12.1	28.81 ± 9.9	22.53 ± 5.2	22.59 ± 8.5	21.47 ± 5.7	27.72 ± 11
Young's modulus (Mpa)	1,277 ± 335	764.3 ± 391	688.5 ± 374	728 ± 566	1916 ± 1199	2541 ± 621	933.4 ± 470
Tensile strength (Mpa)	22.34 ± 1.34	17.16 ± 0.5	13.53 ± 2.31	12.59 ± 1.56	9.57 ± 3.61	8.9 ± 3.17	13.19 ± 1.09
Young's modulus (Mpa)	255.42±20.19	160.5±20.63	241.1±34.52	234.66±27.40	517.34±53.71	924.96±95.65	242.6±26.16
Elongation at break %	30.01 ± 28.52	58.33 ± 96.7	6.57 ± 4.66	4.01 ± 2.45	2.07 ± 1.99	1.77 ± 1.55	5 ± 1.33

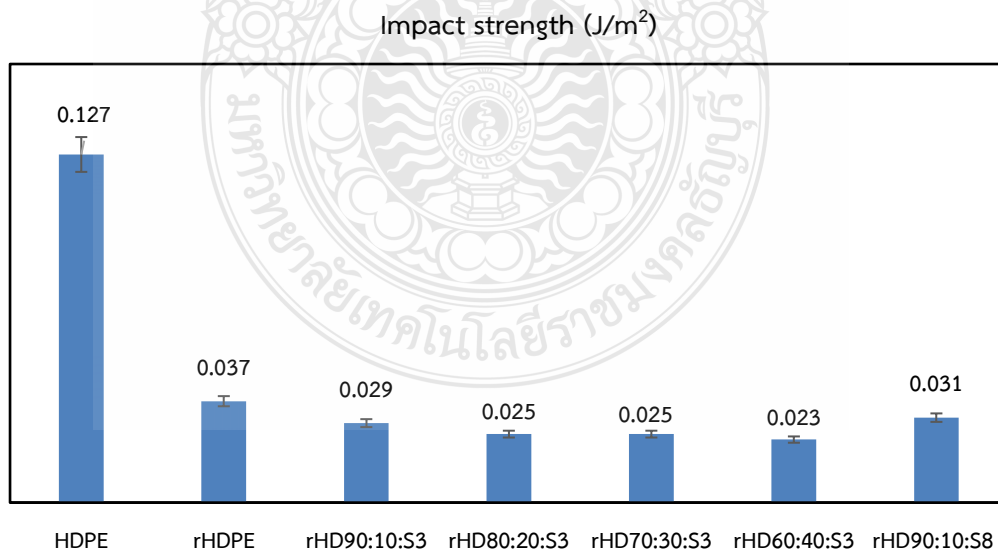
4.6.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 พบว่าความทนแรงกระแทกของ HDPE มีค่าเท่ากับ 0.127 J/m^2 และ rHDPE 0.037 J/m^2 ความทนแรงกระแทกลดลงคิดเป็นร้อยละ 71% (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ HDPE)

เมื่อเติม RHA ส่งผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกของ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ความทนแรงกระแทกมีค่าเท่ากับ 0.029, 0.025, 0.025, 0.023 J/m^2 ตามลำดับ (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 22, 32, 32, 38% ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE) และ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ความทนแรงกระแทกมีค่าเท่ากับ 0.031 J/m^2 (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 16% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 10% ขนาด 800 ไมโครเมตร ให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงสุด 0.031 J/m^2 เพิ่มขึ้นกว่าอัตราส่วนอื่นอยู่ระหว่าง 6.5 - 25 เปอร์เซ็นต์

จากผลทดสอบพบว่าที่บริเวณผิวสัมผัส (Interphase) รอยเชื่อมขวางจะมี RHA ไปแทรกตัวอยู่จึงทำให้รอยเชื่อมขวางประสานกันไม่ดีเท่าที่ควรและลักษณะการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ ที่มีลักษณะการไหลแบบ 2 ทิศทางมาประสานกันเป็นผลให้ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง และจะพบว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของความทนแรงกระแทกนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุหลัก (rHDPE) ที่จะช่วยให้การยึดเกาะและประสานกันได้ดีมากขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟสมบัตินทางกล โดยวิธีการทดสอบความทนแรงกระแทก

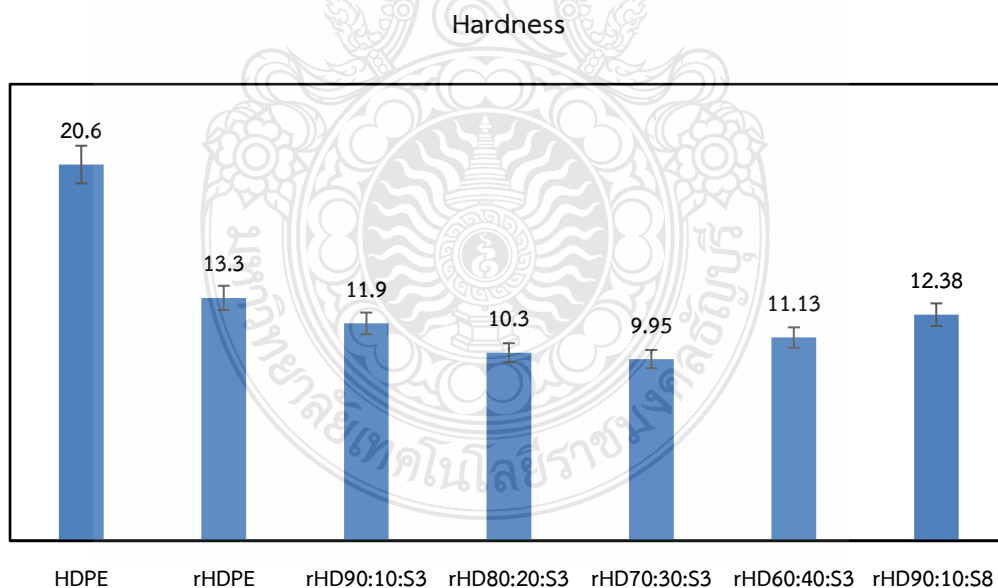
4.6.2 ความแข็งที่ผิว (Hardness)

จากตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 พบว่าความแข็งที่ผิวของ HDPE มีค่าเท่ากับ 20.6 HRR และ rHDPE มีค่าเท่ากับ 13.3 HRR ความแข็งที่ผิวลดลงคิดเป็นร้อยละ 35% (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ HDPE)

เมื่อเติม RHA ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวของ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ความความแข็งที่ผิวมีค่าเท่ากับ 11.9, 10.3, 9.95, 11.13 HRR ตามลำดับ (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 11, 23, 25, 16% ตามลำดับเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE) และ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ความแข็งที่ผิวมีค่าเท่ากับ 12.38 HRR (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 7% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 10% ขนาด 800 ไมโครเมตร ให้ค่าความแข็งที่ผิวสูงสุด 12.38 HRR เพิ่มมากขึ้นกว่าอัตราส่วนผสมอื่นระหว่าง 4 - 20 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้เนื่องจาก RHA ที่เติมนั้นไม่สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอภายใน rHDPE และมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม (Agglomerate) เมื่อปริมาณ RHA เพิ่มมากขึ้นอีกทั้งการเติม RHA เข้าไปผิวสัมผัส (Interphase) ระหว่าง rHDPE กับ RHA ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงและลักษณะทางกายภาพของ rHDPE มีความนิ่มเมื่อทำการทดสอบจึงเกิดการยุบตัว



รูปที่ 4.6 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบความแข็งที่ผิว

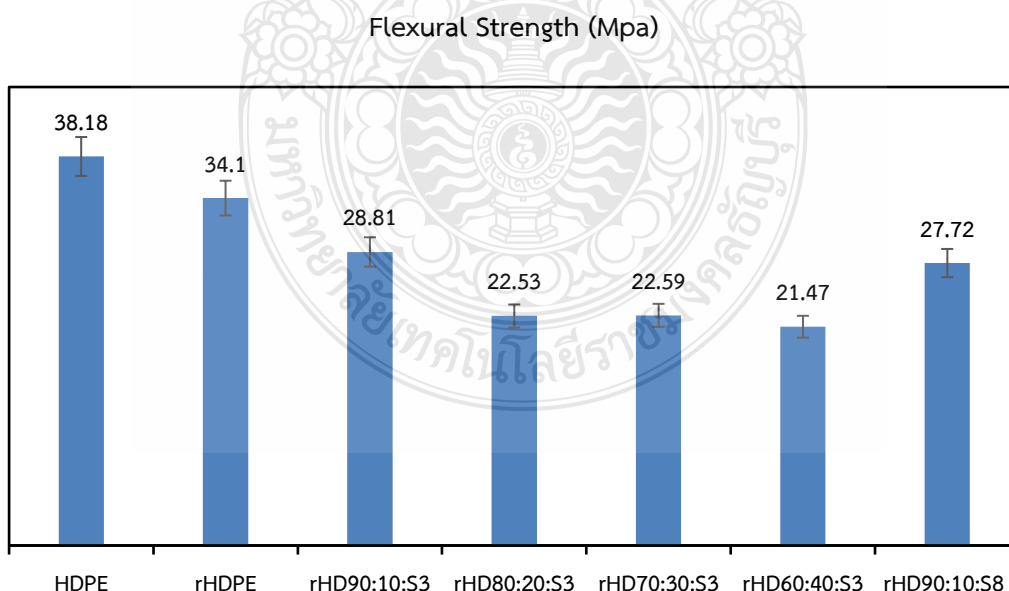
4.6.3 ความต้านทานการดัดงอ (Flexural strength)

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 พบว่าการต้านทานการดัดงอของ HDPE มีค่าเท่ากับ 38.18 และ rHDPE 34.1 Mpa ค่าความต้านทานการดัดงอของ rHDPE ลดลงคิดเป็นร้อยละ 11% (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ HDPE)

เมื่อเติม RHA ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานการดัดงอของ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ความต้านทานการดัดงอมีค่าเท่ากับ 28.81, 22.53, 22.59, 21.47 ตามลำดับ (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 16, 34, 34, 37% ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE) และ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ความต้านทานการดัดงอมีค่าเท่ากับ 27.72 Mpa (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 19% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 10% ขนาด 300 ไมโครเมตร ให้ค่าความต้านทานการดัดงอสูงสุด 28.81 Mpa เพิ่มมากขึ้นกว่าอัตราส่วนอื่นระหว่าง 4-25 เปอร์เซ็นต์

ค่าความต้านทานการดัดงอเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ก่อนเสียรูปแบบถาวร เมื่อได้รับแรงกดจะเกิดการกระจายแรงจากวัสดุหลัก (rHDPE) ไปสู่ RHA การกระจายแรงไม่สามารถกระจายได้อย่างต่อเนื่อง เกิดจากผิวสัมผัส (Interphase) ระหว่าง rHDPE กับ RHA ไม่ได้ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหาย และอีกประการปริมาณ RHA มากขึ้นส่งผลให้แรงยึดเกาะของวัสดุหลักลดลง



รูปที่ 4.7 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบความต้านทานการดัดงอ

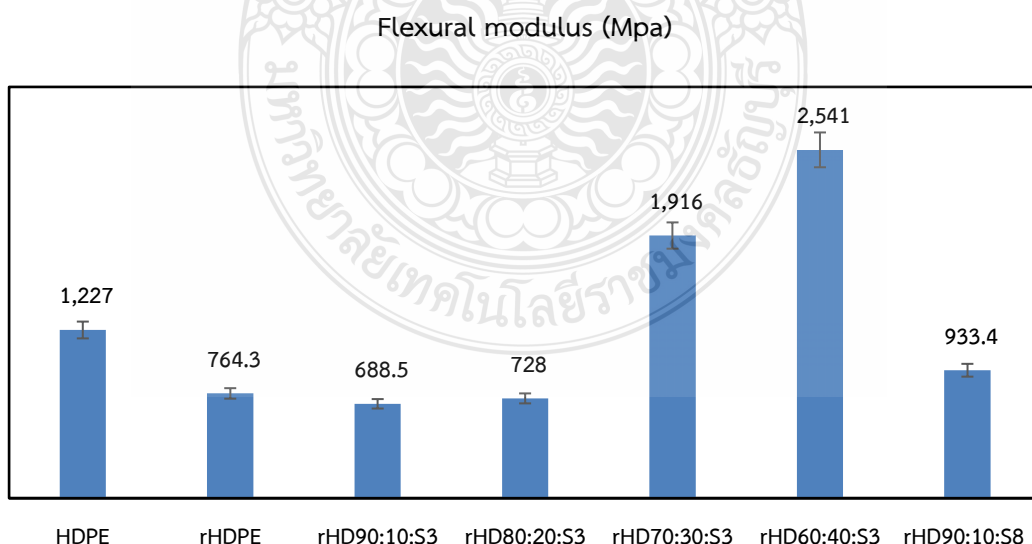
4.6.4 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 พบว่า ยังส์มอดุลัสของ HDPE มีค่าเท่ากับ 1,227 และ rHDPE 764.3 Mpa ค่ายังส์มอดุลัสของ rHDPE ลดลงคิดเป็นร้อยละ 39% (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ HDPE)

เมื่อเติม RHA ส่งผลทำให้ค่ายังส์มอดุลัสของ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ยังส์มอดุลัสมีค่าเท่ากับ 688.5, 728, 1,916, 2,541 Mpa ตามลำดับ ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20% โดยน้ำหนัก ลดลงคิดเป็นร้อยละ 10, 8% ตามลำดับ ปริมาณอัตราส่วนผสม 30, 40% โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 157, 232% ตามลำดับ (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE) และ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ยังส์มอดุลัสมีค่าเท่ากับ 933.4 Mpa เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 25% (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 40% ขนาด 300 ไมโครเมตร ให้ค่ายังส์มอดุลัสสูงสุด 2,541 Mpa เพิ่มมากขึ้นกว่าอัตราส่วนผสมอื่นระหว่าง 25-73 เปอร์เซ็นต์

ค่ามอดุลัสแรงต้านทานการดัดงอ คือ ค่าความต้านทานการเสียรูปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องจาก RHA มีความแข็งตึง (Stiffness) มากกว่า rHDPE ที่วัสดุหลัก เมื่อเติม RHA ลงไปจึงทำให้ค่ามอดุลัสแรงตึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อเติม RHA จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ค่ามอดุลัสแรงต้านทานการดัดงอมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติม RHA



รูปที่ 4.8 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบยังส์มอดุลัส ของแรงต้านทานการดัดงอ

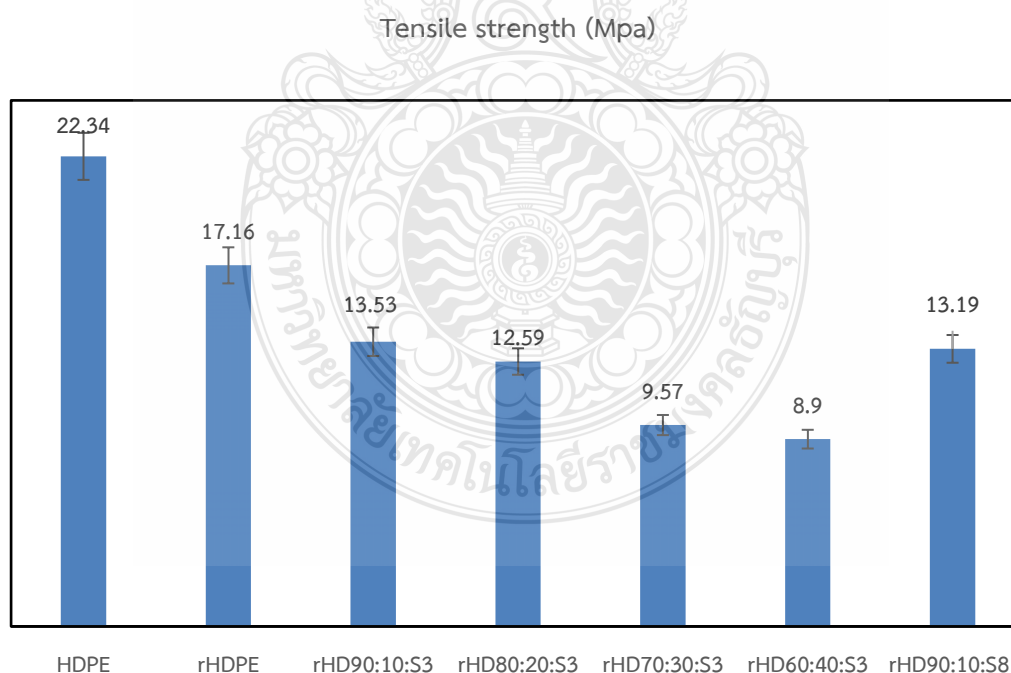
4.6.5 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9 พบว่าความทนแรงดึงของ HDPE มีค่าเท่ากับ 22.34 และ rHDPE 17.16 Mpa ความทนแรงดึงของ rHDPE ลดลงคิดเป็นร้อยละ 23% (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ HDPE)

เมื่อเติม RHA ส่งผลทำให้ค่าความทนแรงดึงของ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ความทนแรงดึงมีค่าเท่ากับ 13.53, 12.59, 9.57, 8.9 ตามลำดับ (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 21, 27, 44, 48% ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE) และ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ความทนแรงดึงมีค่าเท่ากับ 13.19 Mpa (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 23% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 10% ขนาด 300 ไมโครเมตร ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุด 13.53 Mpa เพิ่มมากขึ้นกว่าอัตราส่วนอื่นระหว่าง 3 - 35 เปอร์เซ็นต์

ชิ้นงานทดสอบมีรอยเชื่อมขวาง ลักษณะการไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์จึงมีการไหลแบบ 2 ทิศทางมาประสานกัน ที่ผิวสัมผัส (Interphase) บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมขวางเชื่อมประสาน RHA จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ และขัดขวางการไหลของ rHDPE จนกลายเป็นความบกพร่อง (Defect) ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน สอดคล้องกับค่าความต้านทานการดึง



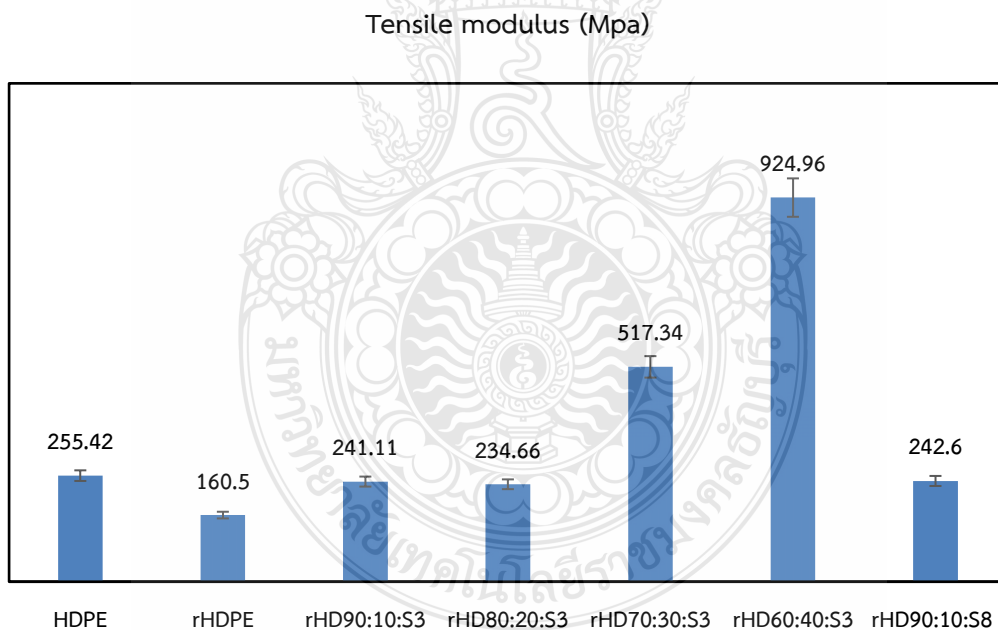
รูปที่ 4.9 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบความทนแรงดึง

4.6.6 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus)

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 พบว่า ยั่งส์มอดุลัสของ HDPE มีค่าเท่ากับ 255.42 และ rHDPE 160.5 Mpa ค่ายั่งส์มอดุลัสของ rHDPE ลดลงคิดเป็นร้อยละ 37% (เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ HDPE)

เมื่อเติม RHA ขนาด 300, 800 ไมโครเมตร ใน rHDPE ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ส่งผลทำให้ค่ายั่งส์มอดุลัสของ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ยั่งส์มอดุลัสมีค่าเท่ากับ 241.11, 234.66, 517.34, 924.96 Mpa ตามลำดับ เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 50, 46, 222, 476% ตามลำดับและ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ยั่งส์มอดุลัสมีค่าเท่ากับ 242.6 Mpa เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 51%

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 40% ขนาด 300 ไมโครเมตร ให้ค่ายั่งส์มอดุลัสสูงสุด 924.96 Mpa เพิ่มมากขึ้นกว่าอัตราส่วนผสมอื่นระหว่าง 44 - 75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.10 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบยั่งส์มอดุลัส ของความทนแรงดึง

4.6.7 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

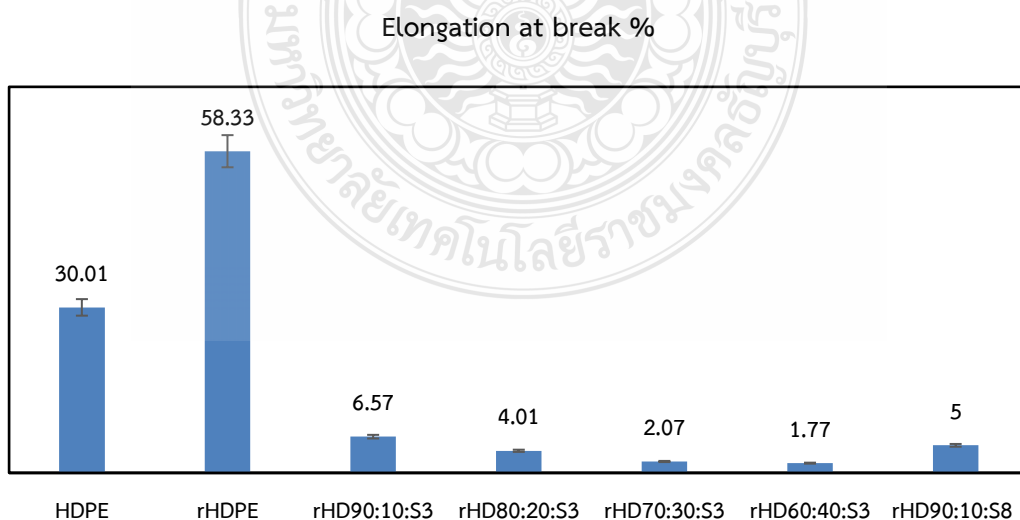
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของ HDPE มีค่าเท่ากับ 30 และ rHDPE 58.3% มีอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 93%

เมื่อเติม RHA ขนาด 300, 800 ไมโครเมตร ใน rHDPE ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้อัตราการยืดตัวของ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก มีการยืดตัวค่าเท่ากับ 6.57, 4.01, 2.07, 1.77% (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 89, 93, 97, 97 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE) และ RHA ขนาด 800 ไมโครเมตร ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก มีการยืดตัวเท่ากับ 5% (ลดลงคิดเป็นร้อยละ 91 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ rHDPE)

เมื่อนำผลของ RHDPE มาเปรียบเทียบกับ rHDPE ผสม RHA ขนาด 300, 800 ไมโครเมตร อัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบ rHDPE เมื่อเติม RHA ตามขนาดและปริมาณส่วนผสมต่างๆ พบว่าอัตราการยืดตัวลดลงอยู่ในช่วง 89 - 97 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสม 10% ขนาด 300 ไมครอน ให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด 6.57% เพิ่มมากขึ้นกว่าอัตราส่วนผสมอื่นระหว่าง 23 - 74 เปอร์เซ็นต์

จากผลการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่าการเพิ่มมากขึ้นของ RHA จะส่งผลกระทบต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เนื่องจาก RHA ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การกระจายใน rHDPE ได้ไม่ดีและมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม (Agglomerate) อีกทั้งผิวสัมผัส (Interphase) บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมขวางและผิวสัมผัสของ rHDPE กับ RHA ที่ไม่ดี อีกประการคือ RHA อยู่ในเฟสของแข็งโดยที่ RHA เป็นจุดรวมของความเครียด (Stress Concentrator) จึงส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง



รูปที่ 4.11 กราฟสมบัติทางกล โดยวิธีการทดสอบการยืดตัว ณ จุดขาด

4.7 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

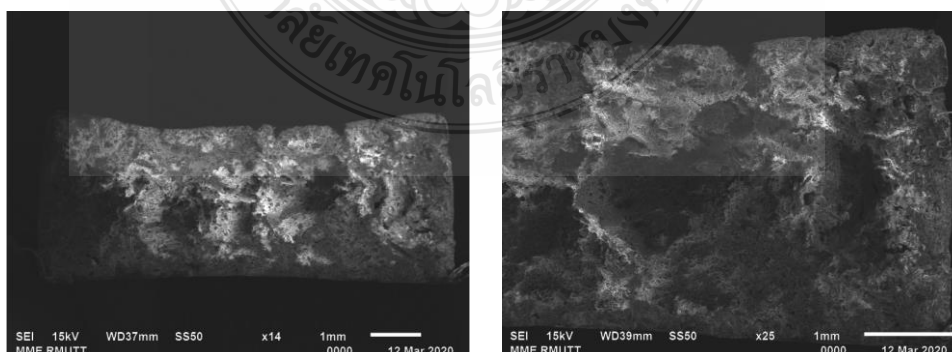
จากรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบโดยมี rHDPE เป็นวัสดุหลักและ RHA เป็นสารเติมแต่ง ผสมกันด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์และฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทาง นำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาผิวรอยแตกของชิ้นงาน ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE ของชิ้นงานทดสอบที่มีอิทธิพลต่อรอยเชื่อมขวางและผลกระทบต่อสมบัติทางกลของพลาสติก

โดยการเตรียมชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ขนาด 300 ไมโครเมตร และ RHA ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ขนาด 800 ไมโครเมตร

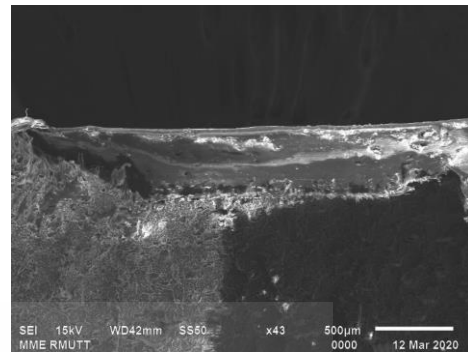
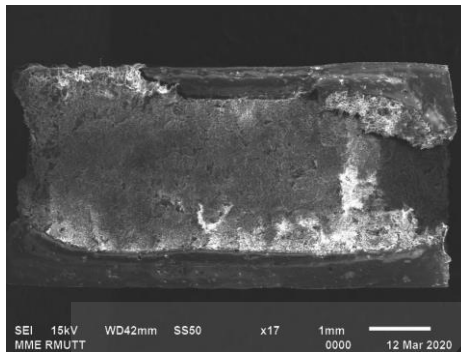


รูปที่ 4.12 บริเวณชิ้นงานทดสอบสัณฐานวิทยา

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1. ผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง (A-A) และส่วนที่ 2. ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE (B-B)



(a)



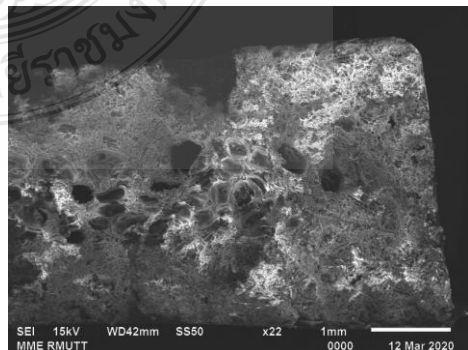
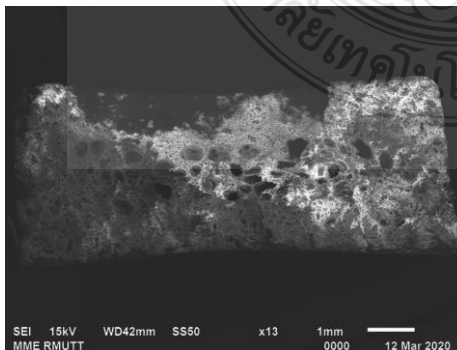
(b)

รูปที่ 4.13 รูป (a) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (b) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมโครเมตร

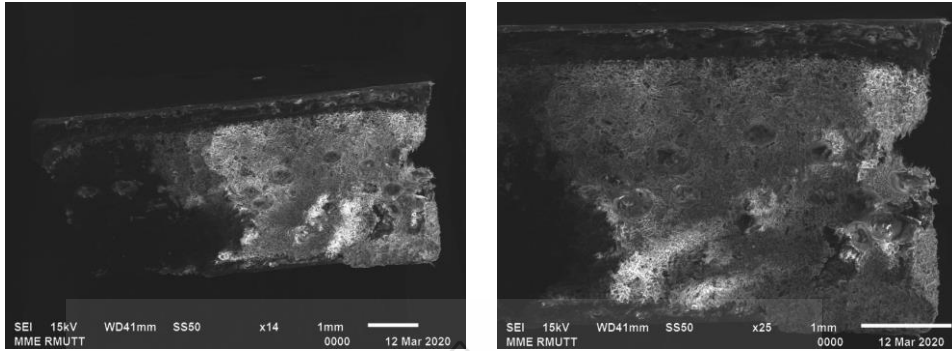
จากรูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณวิทยาผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในวัสดุหลัก rHDPE ของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระทำของ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ขนาด 300 ไมโครเมตร พบว่า

จากรูป (a) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง พบว่าบริเวณผิวสัมผัส (Interphase) รอยเชื่อมขวางมี RHA กระจายตัวบริเวณแกนกลางและมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม (Agglomerate) ผิวสัมผัสด้านข้างชิ้นงานมี RHA กระจายอยู่ด้านข้างรอบๆ ชิ้นงาน

จากรูป (b) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ใน rHDPE พบว่ามี RHA เคลื่อนที่ตามแนวทิศทางการไหลของ rHDPE อยู่บริเวณแกนกลางชิ้นงานและกระจายตัวอยู่บริเวณด้านข้างชิ้นงานบางส่วน เนื่องจาก RHA 10% โดยน้ำหนัก ขนาด 300 ไมโครเมตร มีขนาดเล็กและปริมาณที่น้อย จึงสามารถเคลื่อนที่และกระจายตัวใน rHDPE ได้



(c)

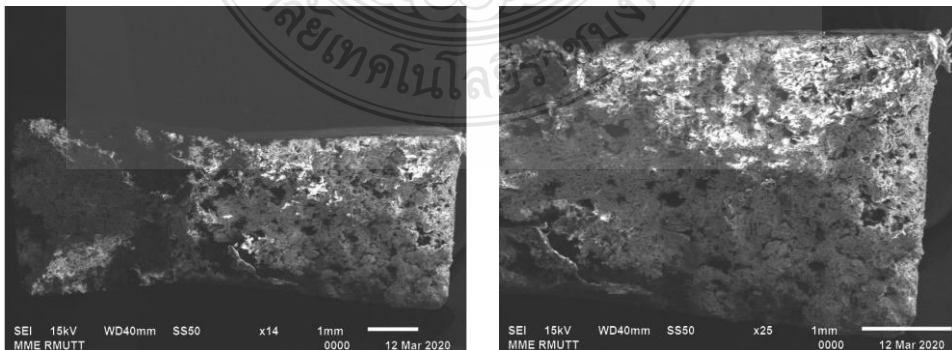


(d)

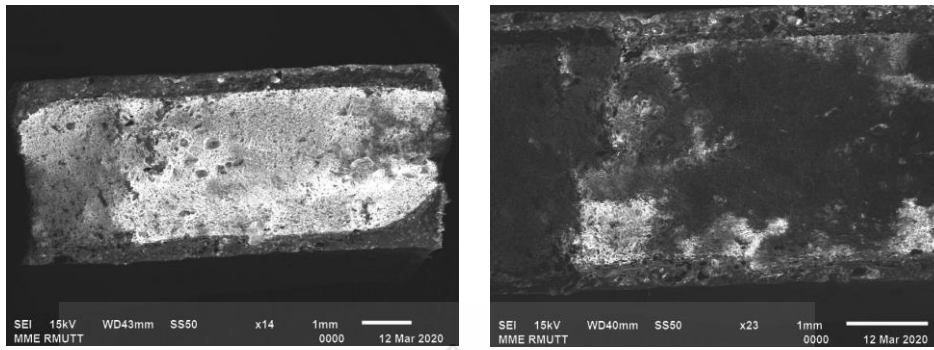
รูปที่ 4.14 รูป (c) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (d) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณวิทยาผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ใน rHDPE ของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณอัตราส่วนผสม 20% โดยน้ำหนัก ขนาด 300 ไมโครเมตรพบว่า

รูป (c) ผิวยรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง พบว่าบริเวณผิวสัมผัส (Interphase) รอยเชื่อมขวางมี RHA กระจายตัวบริเวณแกนกลางและมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม (Agglomerate) มากขึ้น ผิวสัมผัสด้านข้างชิ้นงานมี RHA กระจายอยู่ด้านข้างรอบๆ ชิ้นงาน

รูป (d) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ใน rHDPE พบว่า RHA เคลื่อนที่ตามแนวทิศทางการไหลของ rHDPE อยู่บริเวณแกนกลางชิ้นงานและกระจายตัวเริ่มเกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) กระจายกันบริเวณแกนกลางเนื่องจากปริมาณ RHA 20% โดยน้ำหนัก เริ่มมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้การเคลื่อนที่ของ RHA บริเวณแกนกลางชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ช้าลงและเคลื่อนที่ยากขึ้น ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวใน rHDPE ไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้มีการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กที่บริเวณแกนกลางชิ้นงาน



(f)



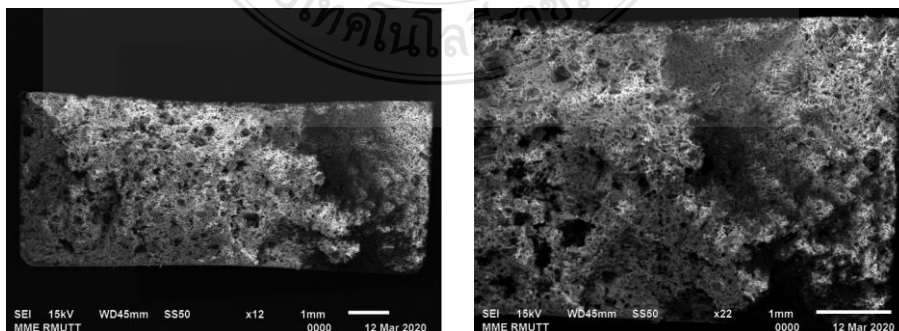
(g)

รูปที่ 4.15 รูป (f) ผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (g) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ใน rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 30% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมโครเมตร

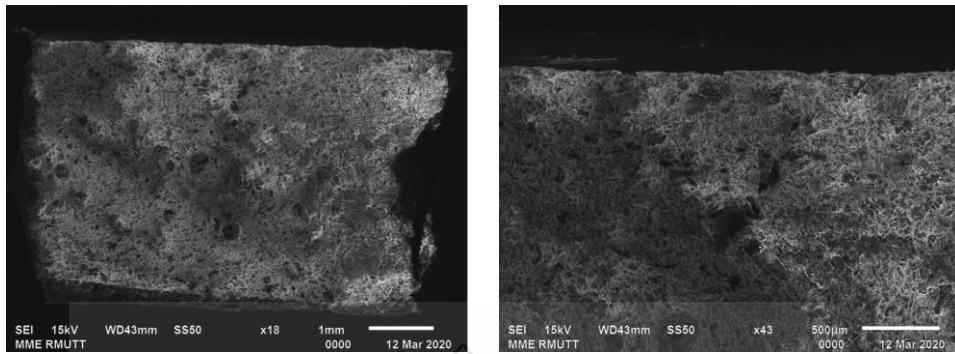
จากรูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณวิทยาผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ใน rHDPE ของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณอัตราส่วนผสม 30% โดยน้ำหนัก ขนาด 300 ไมโครเมตรพบว่า

รูป (f) ผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง พบว่าบริเวณผิวสัมผัส (Interphase) รอยเชื่อมขวางมี RHA กระจายตัวบริเวณแกนกลางและมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม (Agglomerate) มากขึ้น เริ่มจับตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็ก ผิวสัมผัสด้านข้างชิ้นงานมี RHA กระจายอยู่ด้านข้างรอบๆ ชิ้นงานมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม

รูป (g) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE พบว่า RHA เคลื่อนที่ตามแนวทิศทางการไหลของ rHDPE อยู่บริเวณแกนกลางชิ้นงาน เกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) เป็นก้อนขนาดเล็กที่บริเวณแกนกลาง เนื่องจากปริมาณ RHA 30% โดยน้ำหนัก มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความสามารถในเคลื่อนที่ของ RHA บริเวณแกนกลางชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ช้าลง ทำให้มีการกระจายตัวใน rHDPE ไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้มีการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มขนาดเล็กมากขึ้น ที่บริเวณแกนกลางชิ้นงาน



(h)



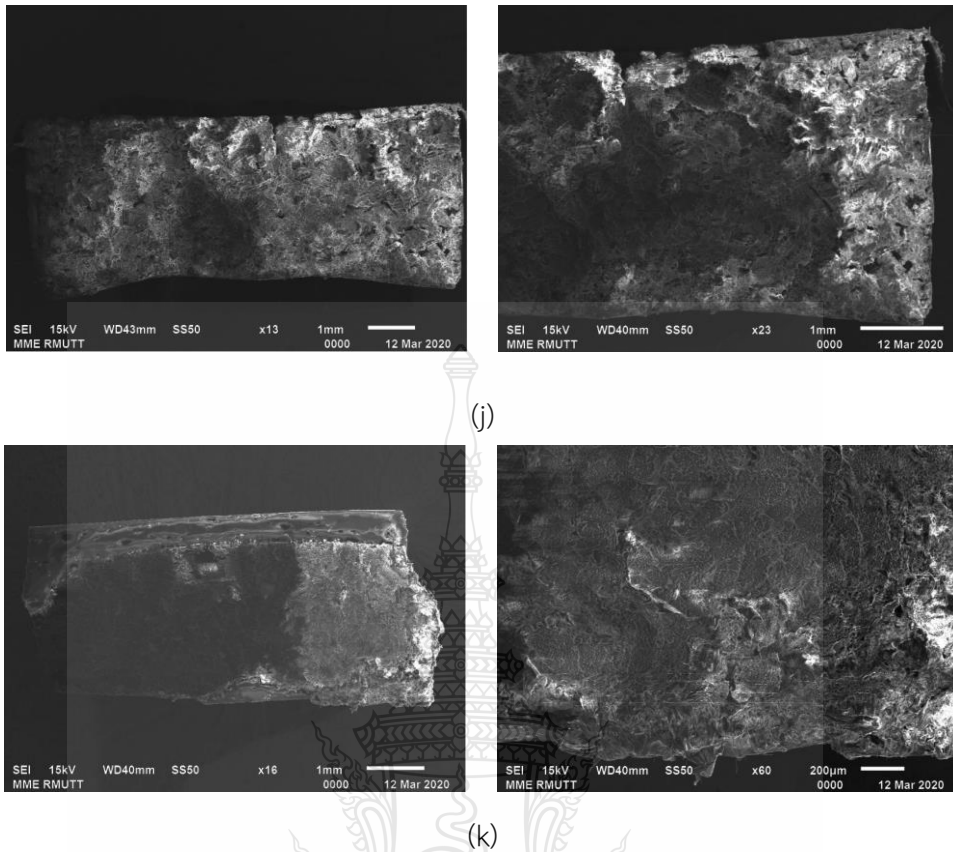
(i)

รูปที่ 4.16 รูป (h) ผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (i) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 40% โดยน้ำหนักขนาด 300 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณวิทยาผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE ของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระทำของ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณอัตราส่วนผสม 40% โดยน้ำหนัก ขนาด 300 ไมโครเมตร พบว่า

รูป (h) ผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง พบว่าบริเวณผิวสัมผัส (Interphase) รอยเชื่อมขวางมี RHA กระจายตัวบริเวณแกนกลางและมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม (Agglomerate) มากขึ้น จับตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็กและเริ่มมีขนาดใหญ่มากขึ้น ผิวสัมผัสด้านข้างชิ้นงานมี RHA กระจายอยู่ด้านข้างรอบๆ ชิ้นงานเกาะกลุ่มขนาดเล็ก

รูป (i) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE พบว่า RHA เคลื่อนที่ตามแนวทิศทางการไหลของ rHDPE มีการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) เป็นก้อนขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวอยู่บริเวณแกนกลางและด้านข้างบางส่วน เนื่องจากปริมาณ RHA 40% โดยน้ำหนัก มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความสามารถในเคลื่อนที่ของ RHA บริเวณแกนกลางชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ไม่ดี ทำให้มีการกระจายตัวใน rHDPE ไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้มีการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มมากขึ้น ที่บริเวณแกนกลางและด้านข้างบางส่วนของชิ้นงาน

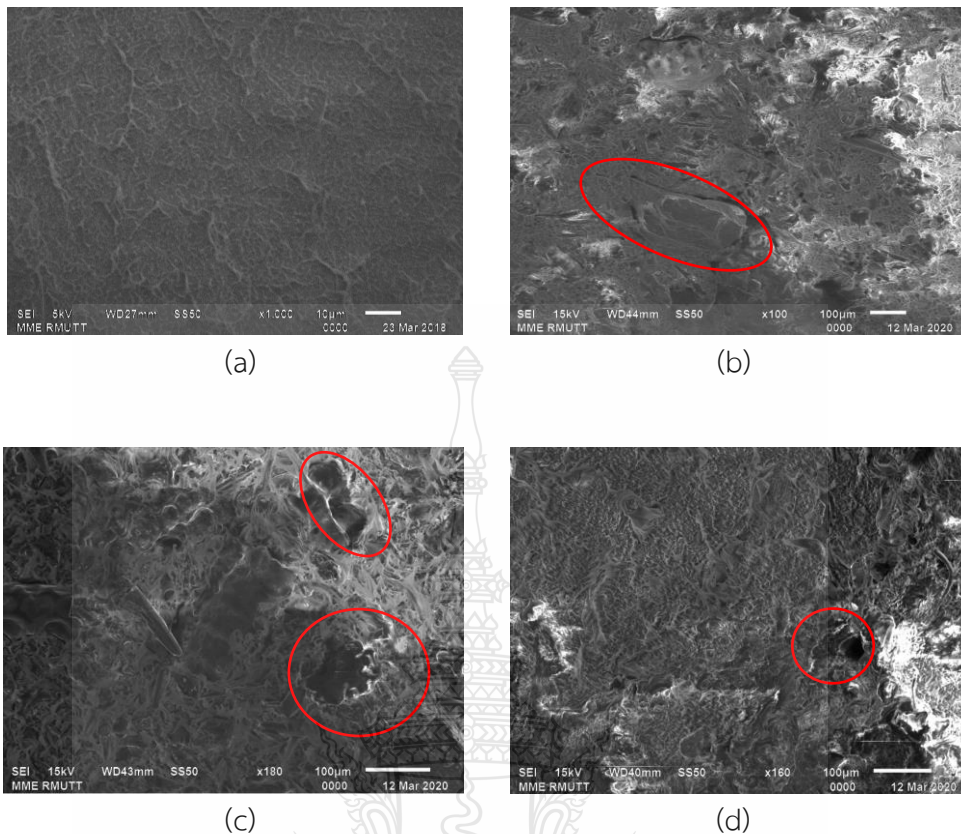


รูปที่ 4.17 รูป (j) ผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง, (k) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ในเมทริกซ์ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักขนาด 800 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.17 แสดงสัณฐานวิทยาผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ใน rHDPE ของชั้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกของ rHDPE เมื่อเติม RHA ปริมาณอัตราส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก ขนาด 800 ไมโครเมตรพบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกับรูป (a) และ (b)

รูป (j) ผิวรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมขวาง พบว่าบริเวณผิวสัมผัส (Interphase) รอยเชื่อมขวางมี RHA กระจายตัวบริเวณแกนกลางและมีแนวโน้มนเกาะกลุ่ม (Agglomerate) ผิวสัมผัสด้านข้างชิ้นงานมี RHA กระจายอยู่ด้านข้างรอบๆ ชิ้นงาน

รูป (k) ลักษณะการไหลและการกระจายตัวของ RHA ใน rHDPE พบว่ามี RHA เคลื่อนที่ตามแนวทิศทางการไหลของ rHDPE อยู่บริเวณแกนกลางชิ้นงานและกระจายตัวอยู่บริเวณด้านข้างชิ้นงานบางส่วน เนื่องจาก RHA 10% โดยน้ำหนัก ขนาด 800 ไมโครเมตร มีขนาดเล็กและปริมาณที่น้อย จึงสามารถเคลื่อนที่ได้และกระจายตัวใน rHDPE ได้



รูปที่ 4.18 แสดงสัณฐานวิทยาของ rHDPE และ rHDPE เมื่อเติม RHA

จากรูปที่ 4.18 รูป (a) แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ rHDPE ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่าลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของ rHDPE มีลักษณะเป็นริ้วบางๆ และมีลักษณะผิวเรียบ มีความเหนียว ค่อนข้างนิ่ม และยืดหยุ่น

จากรูปที่ 4.18 รูป (b – d) แสดงสัณฐานวิทยาของ rHDPE เมื่อเติม RHA พบว่า rHDPE เป็นวัสดุหลัก อยู่ในเฟสของเหลวและ RHA ซึ่งเป็นสารเติมแต่งอยู่ในเฟสของแข็ง จากกระบวนการข้างต้นแสดงให้เห็นว่า rHDPE กับ RHA มีความสามารถเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจาก rHDPE กับ RHA มีการหดและขยายตัวที่ไม่เท่ากัน [56] จึงเกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส (Interphase) ระหว่าง rHDPE กับ RHA และการยึดเกาะที่ไม่ดียังทำให้ RHA หลุดออก หลังจากการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก

การเติม RHA ลงใน rHDPE เพื่อเสริมความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวาง แต่จากการทดสอบขึ้นรูปแล้วพบว่า RHA ไม่ได้ไหลข้ามระหว่างรอยเชื่อมขวางเพื่อเป็นตัวประสาน แต่ RHA กลับมีการกระจายตัวในแนวตั้งฉากกับรอยเชื่อมขวางจึงทำให้รอยเชื่อมขวางมีความแข็งแรงลดลง และ V- notch ที่มี RHA แทรกตัวอยู่เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมขวางลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการนำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นวัสดุหลัก และเก่ากลายเป็นสารเติมแต่ง แล้วศึกษาอิทธิพลของขนาดและอัตราส่วนผสมเก่าแก่กลบ ที่มีผลกระทบต่อ การเกิดรอยเชื่อมขวางและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฉีดพลาสติก ผสมด้วยวิธีการผสมแบบแห้งแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีทางเข้าพลาสติก 2 ทิศทาง

จากการวิจัยพบว่า การเติมเก่าแก่กลบลงใน rHDPE ไม่ได้เพิ่มความแข็งแรงของการเกิดรอยเชื่อมขวางในงานฉีดพลาสติกและสมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง แต่สามารถช่วยเพิ่มค่ามอดูลัสให้สูงขึ้นเมื่อมีการเติมเก่าแก่กลบมากขึ้น ขณะที่ขนาดและอัตราส่วนผสมของเก่าแก่กลบที่เพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มทำให้สามารถขึ้นรูปได้ยากมากขึ้น เนื่องจากลักษณะการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ การเกิดรอยเชื่อมขวางและตำหนิในชิ้นงานทดสอบ อีกทั้งพฤติกรรมของเก่าแก่กลบที่มีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันเมื่อมีปริมาณเก่าแก่กลบเพิ่มมากขึ้น และช่องว่างระหว่างเก่าแก่กลบกับพลาสติกเกิดเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงาน โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

5.1.1 สมบัติทางกลด้านการทนแรงกระแทก มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเก่าแก่กลบเพิ่มขึ้น โดยพบว่าคุณค่าสูงสุดที่อัตราส่วน rHD90:10:S8

5.1.2 สมบัติทางกลด้านความแข็งที่ผิว มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเก่าแก่กลบเพิ่มขึ้น โดยพบว่าคุณค่าสูงสุดที่อัตราส่วน rHD90:10:S8

5.1.3 สมบัติทางกลด้านแรงต้านทานการตัดงอ มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเก่าแก่กลบเพิ่มขึ้น โดยพบว่าคุณค่าสูงสุดที่อัตราส่วน rHD90:10:S3 ในขณะที่ค่ายังสัมมอดูลัสมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยพบว่าคุณค่าสูงสุดที่อัตราส่วน rHD60:40:S3

5.1.5 สมบัติทางกลด้านการทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเก่าแก่กลบเพิ่มขึ้น โดยพบว่าคุณค่าสูงสุดที่ อัตราส่วน rHD90:10:S3 ในขณะที่ค่ายังสัมมอดูลัสมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยพบว่าคุณค่าสูงสุดที่อัตราส่วน rHD60:40:S3

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงรอยเชื่อมขวางยังไม่ดีเท่าที่ควร และสมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมเถ้ากลบในปริมาณเพิ่มมากขึ้น หากต้องการนำวิจัยนี้ไปใช้งานควรมีการพิจารณาเรื่องวิธีการผสม เนื่องจากวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) จะส่งผลให้การกระจายตัวของเถ้ากลบไม่ดีเท่าที่ควรและมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเถ้ากลบ

5.2.2 จากงานวิจัยและการทบทวนวรรณกรรม พบว่าบริเวณผิวสัมผัส (Interphase) ระหว่างเถ้ากลบกับพลาสติกเกิดช่องว่างและโพรงอากาศ ในการศึกษาและวิจัยครั้งต่อไปควรมีการพิจารณาเรื่องการปรับปรุงผิวของเถ้ากลบและการเติมสารประสาน (Coupling agent)



บรรณานุกรม

ไทยพลาสติก รีไซเคิล: รับผิดชอบต่อและจำหน่ายพลาสติกรีไซเคิล สืบค้นจาก

<http://www.thaiplasticrecycle.com>

มูลนิธิโลกสีเขียว, สืบค้นจาก <http://www.greenworld.or.th>

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธ์ วงษ์พาและสุรพันธ์ สุคันธปรีย์. การพัฒนาเก้าอี้พลาสติกเพื่อใช้ในงานคอนกรีต เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8 พ.ศ. (2545).วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์,(หน้า163-172)

วิวรรณ ธรรมมงคล. [ออนไลน์]. ม.ป.ป. พลาสติกรีไซเคิล. สืบค้นจาก

<http://www.kanchanapisek.or.th/kp11/articles/article-2.th.html> (3 กรกฎาคม 2561)

นิลกุล เผือกบัวขาว. (2550). สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

แม่พิมพ์ในอนาคต แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก สืบค้นจาก <http://www.plastic.net>.

เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ 1. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารประกอบการสอน. ม.ป.ป. สารสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติก. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ

และโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ดร.วินัย จันทรพิง, ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์, ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ และดร.กุลวดี สังข์สนิท.

(2558). การเตรียมกล่องขึ้นงานกลวงและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมจากวัสดุรีไซเคิลชนิด

HDPE กับกากกาแฟโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน. รายงานการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรม

วัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ สืบค้นจาก <http://pslc.ws/mactest/pe.htm>

ความรู้เรื่องโพลิเมอร์ สืบค้นจาก http://nakhamwit.ac.th/pingpong_web/Polymer.

ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. (2546). Polymer Rhology and Applications. กลุ่มวิจัยและขึ้น

รูปโพลิเมอร์คณะพลังงานและวัสดุมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Saini D.R., Shenoy A.V. (1983). Viscoelastic Properties of Linear Low Density Poly

Ethylene Melt. Eur Polym. J.19 (Page 811-816).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ, ผศ.ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2552). **เถ้าแกลบในงานคอนกรีต (Rice Husk Ash in Concrete)**. สำนักพิมพ์ไชน่า แอนด์ เอ็นจิเนียริง. (31-49).
- Gupta R.K. (2000). **Polymer and Composite Rheology**. Marcel Dekker Inc. New York.
- 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.
- Damar S.A. (1976). **Rice hull ash as a pozzolanic material**. M Eng. Thesis. Asian Institute of Technology. Thailand.
- 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).
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจิตร และสมนึก ประภารณาธร. (2529). **ปูนซีเมนต์เถ้าแกลบ. วารสารวิชาการที่อยู่อาศัย การเคหะแห่งชาติ**. ปีที่ 3 เล่มที่ 2. (81-92).
- Chanda S., (1997). **Waste Materials Used in Concrete Manufacturing**. William Andrew Publishing. (Page 672).
- Ibrahim D.m. and Helmy M., (1981). **Crystal Growth of Rice Husk Ash Silica**. Thermochemica, Acta 45. (Page 79-85).
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชุมพล จันทรม. (2530). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอย**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (หน้าที่ 69).
- Nugent P.J., and Crawford R.J., (1992). **Rotational Molding of Plastic**. Crawford, R.J. ed, John Wiley Sons. New York. USA.
- 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).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- บรรณรัตน์ ทาประเสริฐ. (2561). **ศึกษาการใช้เส้นใยแก้วเป็นวัสดุเติมแต่งในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน** วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ธีรภัทร์ สุภานิล. (2558). **การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีผ้าทอจากใยเส้นธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง**. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. **งานฉีดพลาสติก** กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น, (2540).
- การฉีดพลาสติก สืบค้นจาก <http://www.machine.in.th/review/>
- Griskey, R.G., (1995). **Polymer Process Engineering**. Chapman & Hall, New York: USA.
- Intelligent Systems Laboratory., (1999). **Injection Molding**. Department of Computer Science and Engineering, Michigan State University, USA.
- R.J.Crowford, **Plastics Engineering**, Queen's University, PERGAMON Press. 2nd Edition
- สมศักดิ์ วรมงคลชัย. (2548). **เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1-2**. บริษัท บุคเน็ท จำกัด, กรุงเทพฯ.
- Sachtling., (1987). **International Plastics Handbook**. Hanser Publisher, Munich, Vienna, New York : USA.
- วิวัฒน์ ตันติขจรโกศล และ ชัยรัตน์ แก้วดวง. (2538). **แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก**. กรุงเทพฯ : บริษัท ทีพี. พรินท์จำกัด. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ. ทยเอกสาร. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, (2545). **Mechanical Technology Magazine**. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- John M. Dealy and Kurt F. Wissbrun. (1989). **Melt rheology and its role in plastics processing : theory and applications**. New York : VAN NOSTRAND REINHOLD.
- Tim A. Osswald, Lih-Sheng (Tom) Turng and Paul J.Gramann. (2002). **Injection molding handbook**. Munich Hanser.
- Spencer, R. S. and Gilmore, G. D. **Residual strains in Injection molded polystyrene**. (1950). *Modern Plastics*. (28, 97) (Dec.1950).
- Elzbieta Bociaga, Wladyslaw Skoneczny (2020). **Characteristics of injection molded parts with the areas of weld lines**. *polimery*.2020.5.1 (335–414)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Beaumont J.P. Nagel R. Sherman R. **Successful Injection Molding Process Design and Simulation**. Hanser Publishers, (Munich 2002).
- Bociaga E., Szymanski D. **Przetwórstwo Tworzyw** (2013), 3, 150.
- Malloy R.A.: **Plastic Part Design for Injection Molding**. Carl Hanser Verlag, Munich 2011
- Wady wyprasek. Srodki zaradcze cz. 2., **TS Raport** (2015), 75, 2
- Weld Lines in Injection Molded Parts**. (accessed May 14, 2018).
<https://www.plastopialtd.com/weld-lines>
- Bozzelli J. **“What to Do about Weak Weld Lines”**. (accessed Sept. 28, 2019).
<https://www.ptonline.com/articles/what-to-do-about-weak-weld-lines>
- Weld Line Occurrence in Plastic Injection Molded Parts**. (accessed Sept. 28, 2019).
<https://www.steinwall.com/wp-content/uploads/2016/05/Weld-Lines.pdf>
- Osswald T.A., Turng L.S., Gramann P.J. **“Injection Molding Handbook”**, Hanser Publishers, Munich (2001)
- วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. (2553). **วิศวกรรมการฉีดพลาสติก**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- ประสงค์ ก้านแก้ว. **การศึกษาหาอิทธิพลความหนาของ Amorphous Thermoplastics ที่ส่งผล กระทบต่อ ดัชนีการไหล**. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม (2557)
- สถาพร ชาดาคม. **การศึกษาหาอิทธิพลของความหนาที่ส่งผลกระทบต่อระยะทางการไหล ของ เทอร์โมพลาสติกกลุ่ม Polyolefin**. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 2 ฉบับพิเศษ (ฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี) สิงหาคม (2549)
- นายโชคชัย นิเวศนรังสรรค์. **ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการสูญเสียความดันในงานฉีด**. วิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2549)
- J.A. Brydson., (1989). **Plastics Materials**. Anchor Press Ltd. Tiptree, Essex.
- Rosato, D.V. and Rosato, D.V., (1990). **Plastics Processing Data Handbook**. Chapman & Hall, London, England.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- R. Abbott, R. Combs, D. Kazmer, G. Magnant, S. Winebaum. **Elimination of Process Constraints in Plastics Injection Molding**. Molding 2003) Executive Technology Conference, New Orleans, LA : (2003).
- Rosato, D.V. and Rosato, D.V., (1995). **Injection Molding Handbook**. Chapman & Hall, New York, USA.
- จินตมัย สุวรรณประทีป การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก สมากมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์, ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ และดร.อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธ์. (2560). **การเตรียมแผ่นดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวัสดุรีไซเคิลขวด HDPE และวัสดุนาโน / ไมโครจากแร่รูไทล์ของไทย**. รายงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- Greco, A.and Maffezzoli, A. (2004). **Powder-shape analysis and sintering behavior of highdensity polyethylene powders for rotational molding**. Journal of applied polymer science. 92(1). (449-460).
- ดวงแข บุตรกุล, การผลิตคอมพาวด์วัสดุผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยธรรมชาติ, การประชุมสรีนครินทร์วิโรฒวิชาการครั้งที่ 5, วันที่ 17-18 มีนาคม (2554), SWU1188
- ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ และคณะ การผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์หลังคาอย่างธรรมชาติและไม้พีวีซีจากผงขี้เลื่อยไม้ยางพารา.การประชุมวิชาการพื้นยางไทยให้ยั่งยืน. ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (หน้า 53-60)
- A.vaxman, M.narkis (1981). **Void Formation in Short-Fiber Thermoplastic Composites**. Polymer Composites Vol. 10, (No.6:449-453)
- A.V. Ortiz (2014). **Preparation and characterization of electron-beam treated HDPE composites reinforced with rice husk ash and Brazilian clay**. Applied Surface Science 310 (331–335)
- Sukhdeep Singh (2014). **Tensile and flexural behavior of hemp fiber reinforced virgin- recycled HDPE matrix composites**. Procedia Materials Science 6 (1696 – 1702)

บรรณานุกรม (ต่อ)

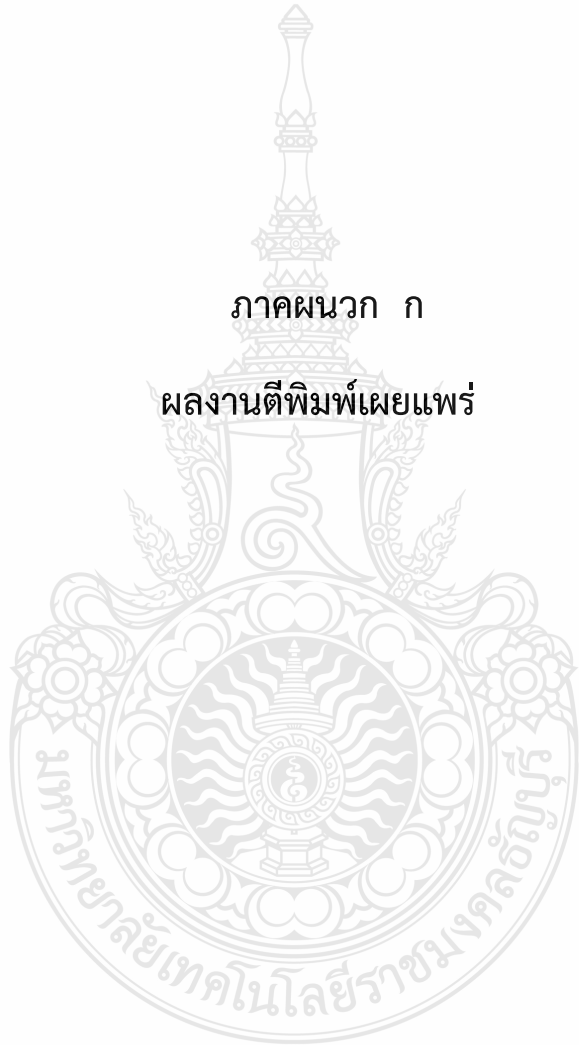
- Rohan Muni Bajracharya.(2016). **Experimental and theoretical studies on the properties of injection moulded glass fibre reinforced mixed plastics composites.** Composites: Part A 84 (393–405)
- Daniella R. Mulinari (2009). **Preparation and properties of HDPE/sugarcane bagasse cellulose composites obtained for thermokinetic mixer.** arbohydrate Polymers 75 (317–321)
- กิตติศักดิ์ อินทร์แก้ว และโกษชัย พาณิชย์. (2549). **การศึกษาและผลิตไม้พลาสติกจากเศษไม้ยางพารา.** ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- K. Tomari, S. Tonogai, T. Harada, H. Hamada, K. Lee, T. Morii, and Maekawa.(1990) **The V-Notch at Weld Lines in Polystyrene Injection Moldings.** Polym Eng Vol. 30, NO. 75 (933-936)
- Malguarnera ,Manisali. (1981). **The effects of processing parameters on the tensile properties of weld lines in injection molded thermoplastics.** Polym Eng Sci 21(10): (586–593)
- Kim S-G, Suh NP. (1986) **Performance prediction of weldline structure in amorphous polymers.** Polym Eng Sci 26(17) (1200–1206).

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติ (National Conferences)

P. Promlan, N. O-Charoen, “Using Rice Husk Ash as Additives in Plastics Injection Molding”
Proceeding, Industrial Engineering Network Conference 2018 (IE NETWORK 2018), Sunee
Grand Hotel and Convention Center, Ubon Ratchathani, Thailand, July 23-26 2018,
MMA34, P.791-795.





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

IE NETWORK 2018

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

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

วัตถุประสงค์

IE NETWORK 2018

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 วิชาสเดชานันท์
ดร.อริศรา เจียมสงวนวงศ์
ผศ.ดร. สිරง ปรีชานนท์
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.นภัตสงวงศ์ โอสสถศิลป์
ผศ.ดร.นระเกณท์ พุ่มชูศรี
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจาววัฒน์
ผศ.ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร
ผศ.ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ดิไชย
ผศ.ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย

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

✍ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.กฤษ วงษ์เกษม
ดร.วราวุฒิ หวังวัชรกุล
ดร.สุดารัตน์ วงศ์วีระเกียรติ
ผศ.ดร.พรเทพ อนุสรนิตินสาร

ผศ.ดร.วิสุทธิ สุทธิทัณฑ์
ผศ.ดร.สุวิภากรณ์ วิชกุล
อาจารย์เรีงทิวา ทิพย์ศักดิ์
อาจารย์สุวิวัฒน์ สืบสานกุล

✍ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

ผศ.ดร.วสุวัชร นาคเขียว
รศ.ดร.ชนนากล กฤตวรกาญจน์
รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ
รศ.ดร.วิมลีน เหล่าศิริถาวร
รศ.ดร.เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ดร.ธนาวรรณ นิชะโมสถ
ดร.ฐิติพงศ์ จำรัส
ดร.ปนิทัศน์ สุรีย์ธนาภาส
ดร.ศิริวดี อธิสุนารณ
ดร.ศิโรรัตน์ พัฒนไพโรจน์
ดร.อภิชาติ บุญมา
ผศ.ดร.คมกฤษ ปิติฤกษ์
ผศ.ดร.ธนา ราชภักดิ์
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เหล่านภากาศ

ผศ.ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล
ผศ.ดร.รักษน้อย อัครรุ่งเรืองกุล
ผศ.ดร.วิวัฒน์ เศรษฐสัมบูรณ์
ผศ.ดร.สุขอังคณา แดงกันท์
รศ.ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์
รศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว
รศ.ดร.ปณิธาน พีรพัฒนา
รศ.ดร.ศิรินทร์ สุขโต
ศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ดร.จินดา สุนารักษ์
อาจารย์วรินทร์ เกียรติคุณกุล
อาจารย์ศุภพัฒน์ ปิงตา

อาจารย์สุจิต ภัทรพุด
อาจารย์อุษาวดี อินทร์คล้าย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร. กุลชาติ จุลเพ็ญ
ดร. ประกช สิริสุวัฒน์
ดร. อนินท์ มีมนต์
ผศ. ศุภเอก ประมุขมาก
ผศ. สุรัตน์ ตริยวงษ์พงศ์
ผศ.ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์

ผศ.ดร. ศิริชัย ต่อสกุล
ผศ.ดร.กฤษทล ทองศรี
ผศ.ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง
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 วรรณมุล กิเยลาโรว่า
ผศ.ภาณุ บุรณจารกร
ผศ.ศิษญา สิมารักษ์

✍ มหาวิทยาลัยมหิดล

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

ผศ.ดวงศ สุกีเกียรติ
ผศ.ธนา สาตรา
ผศ. ดร. สรนาถ ไธภู
รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์
รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

✍ มหาวิทยาลัยรังสิต

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

ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ โกญจนาท
อาจารย์ศิลปชัย วัฒนเสย
อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

✍ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ดร.วรฤทัย ชูเกียรติ
ดร.สิทธิชัย แซ่เหลม
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.วันดา รัตน์มณี
รศ.สมชาย ชูโฉม

 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.จรัสวรรณ โกวานิช
ดร.เชาวลิต หามนตรี
ดร.นพดล สุกแสงปัญญา
ดร.นิรันดร์ พิสุทธิอานนท์
ดร.เพชรพล ตันพิรุฬห์
ดร.พลชัย โชติปรัยณกุล
ดร.ภาสุ พูนภักดี
ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข
ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย
ผศ.ดร.มนัสชนก จงประสิทธิ์พร

ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย
ผศ.ดร.สรรพลสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์
ผศ.ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข
รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์
รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต
รศ.ดร.สิทธิพร ทิมพิ์สกุล
อาจารย์รณน เจียรตระกูล

 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะใส
ดร.กิตติมา ศิลปะษา
รศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
ดร.จริยาภรณ์ อุนวงษ์
ดร.จรวัยพร แสนทวีสุข
ผศ.ดร.ธารชุตตา พันธน์กุล
ดร.กลิน รั้งสิกรรพุม
อาจารย์ถนัดกิจ ศรีโชค

รศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
ผศ.ดร.สมบัติ สินธเชาวน์
ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
ผศ.ตะวันฉาย โพธิ์หอม
อาจารย์โท แสงเทียน
อาจารย์ล่อง ฝโลดม
อาจารย์ธน ทองกลม

IE NETWORK 2018

**กำหนดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561 (IE Network Conference 2018)
วันที่ 23-26 กรกฎาคม พ.ศ.2561 ณ โรงแรมสุโขทัยแกรนด์ ไฮเทล 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 อีระวัฒน์สุข อธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ห้องทับทิมสยาม 3 ชั้น 5
10.00-10.30 น.	บรรยายพิเศษ เรื่อง "IE กับการศึกษาสิ่งแวดล้อมเพื่อคุณภาพชีวิต" 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 ปทุมกุล	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 ขวามั่งคั่งสุขใจ ไออีแห่งสยาม"	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 "เทคนิคการพิมพ์งานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติ (Technical Writing)" ดำเนินรายการโดย รองศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาศะโส เสนาโดย <ul style="list-style-type: none"> • ศาสตราจารย์ ดร.วรัทศน์ ชัจจ์วิจิตรกุล • ศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ เมธาศิริทรงเสถียร • ศาสตราจารย์ ดร.ก้องกิติ พูลสวัสดิ์ • 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 ศรีศุภโชค • 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 และศึกษา วัฒนธรรมพื้นเมือง	ทั้งนี้รายละเอียดสามารถดูรายละเอียดได้ที่ Website : ienetwork.eng.ubu.ac.th

กำหนดการนำเสนอผลงาน



วันพุธที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ.2561

ช่วงเวลา	ห้องประชุม						
	A1	A5	A7	B3	B4	ประชุมชาติ	ประชุมพื้นที่
08.30 – 10.30 น.	QME 35	QME 43	MMA 23	SME 18	MMA 31	OHP 18	MMA 39
	QME 36	QME 44	MMA 24	SME 19	MMA 32	OHP 19	MMA 40
	QME 37	QME 45	MMA 25	SME 20	MMA 33	OHP 20	MMA 41
	QME 38	QME 46	MMA 26	SME 21	MMA 34	OHP 21	MMA 42
	QME 39	QME 47	MMA 27	SME 22	MMA 35	OHP 22	MMA 43
	QME 40	QME 48	MMA 28	SME 23	MMA 36	OHP 23	MMA 44
	QME 41	QME 49	MMA 29	SME 24	MMA 37	OHP 24	MMA 45
	QME 42	QME 50	MMA 30	SME 25	MMA 38	OHP 25	MMA 46
10.30 – 10.45 น.	พิธีรับประธานสภาฯ						
10.45 – 11.30 น.	บรรยายพิเศษ เรื่อง "เทคนิคการดำเนินงานวิจัยในวาระวิชาการนานาชาติ" ห้องประชุมพื้นที่ สภาม 3 ชั้น 5						
11.30 – 12.00 น.	บรรยายพิเศษ เรื่อง "การประกอบวิชาชีพสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม"						
12.00 – 13.00 น.	พิธีรับประธานคณาจารย์						
13.00 – 14.45 น.	QME 51	QME 58	MMA 47	SME 26	MMA 54	OHP 26	QME 65
	QME 52	QME 59	MMA 48	SME 27	MMA 55	OHP 27	QME 66
	QME 53	QME 60	MMA 49	SME 28	MMA 56	OHP 28	QME 67
	QME 54	QME 61	MMA 50	SME 29	MMA 57	OHP 29	QME 68
	QME 55	QME 62	MMA 51	SME 30	MMA 58	OHP 30	QME 69
	QME 56	QME 63	MMA 52	SME 31	MMA 59	OHP 31	QME 70
	QME 57	QME 64	MMA 53	SME 32	MMA 60	OHP 32	QME 71
	14.45 – 15.00 น.	พิธีรับประธานสภาฯ					
15.00 – 17.30 น.	QME 72	QME 78	QME 84	SME 33	MMA 61	OHP 33	QME 90
	QME 73	QME 79	QME 85	SME 34	MMA 62	OHP 34	QME 91
	QME 74	QME 80	QME 86	SME 35	MMA 63	OHP 35	QME 92
	QME 75	QME 81	QME 87	SME 36	OHP 40	OHP 36	QME 93
	QME 76	QME 82	QME 88	SME 37	OHP 41	OHP 37	QME 94
	QME 77	QME 83	QME 89	SME 38	OHP 42	OHP 38	MMA 64
	QME 95	QME 98	QME101	SME 39	OHP 43	OHP 39	MMA 65
	QME 96	QME 99	QME102	MMA 68	OHP 44	LSC 13	MMA 66
	QME 97	QME 100	QME103	MMA 69	OHP 45	ORT 18	MMA 67
			ORT 23	ORT 22	ORT 21	ORT 19	ORT 20

** เวล่านำเสนอพร้อมตอนค่ำอีก 15 นาทีต่อความ **

สารบัญ

JE NETWORK 2018

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

รหัสบทความ

JE NETWORK 2018

- ☞ 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)

~ ด ~

MMA 34	การใช้แก้วกลายเป็นวัสดุเติมแต่งในงานขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก <i>พรมวิวัฒน์ พรมเลน และ ณรงค์ชัย โอเจริญ</i>	791
MMA 35	การเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยการเพิ่มจุดตัดเฉือน ด้านข้างของดอกกัดคาร์ไบด์ <i>ณัฐริกา แจ้งพรมมา สุกัญญา อรรถละน้อย วทีญญ เนตรสง่า และ ประเมศวร์ เข้าวรรณ</i>	796
MMA 36	การออกแบบรอยต่อของการเชื่อมกระบอกไฮดรอลิกเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด C45 กับข้อต่อตรงเกลียวในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด E355 โดยกระบวนการเชื่อม อาร์กด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ <i>ณอม คุ่มแก้ว กฤติ เอียดเหตุ และ ธนาภรณ์ ทนโนนแดง</i>	802
MMA 37	การศึกษาศสมบัติความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตพอลิคาร์บอนเนต และผงแก้ว <i>จักรายุทธ มากทอง จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และ ศรีชัย ต่อสกุล</i>	810
MMA 38	การศึกษากาธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานในสถานะของแข็งที่มีต่อแรงดึง เฉือนของรอยต่อของแผ่นทองแดง <i>กำธร สุขพิมาย ภูมรินทร์น์ ณรงค์ฤทธิ์ธำรง ศศิรินทร์ อุดมธีรสุวัฒน์ และ กรรณชัย กัลยาศิริ</i>	814
MMA 39	ผลกระทบของความหนาของชั้นออกไซด์ของเหล็กกล้าเกรด ASTM A213 T91 ที่มี ผลต่อพฤติกรรมการสึกกร่อนแบบอนุภาคของแข็งปะทะ <i>สิทธิโชค ศรีเกตุ สุเทพ จอยเอกา และ ปิโยรส พรหมดิเรก</i>	821
MMA 40	การศึกษาระบวนการเชื่อมแผ่นประสานในเตาหลอมเหล็กกล้าขณะรับแรงดัน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง <i>ฉัตรชัย โสมภีร์ ธนาภรณ์ ทนโนนแดง และ ภัสกร์ เลิศวิจิตรพันธ์</i>	826
MMA 41	สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกเกรด 409 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ <i>สุเมธ ปานจีน กฤติ เอียดเหตุ และ ธนาภรณ์ ทนโนนแดง</i>	832
MMA 42	Increasing the dimensional accuracy of U-bend product of high strength steel sheets by controlling the counter punch <i>Komgrit Lawanwong and Pongsakorn Leetrakul</i>	837
MMA 43	Increasing of hole expansion ratio of high strength steel sheet by using piercing process with counter pressure from a counter punch <i>Prasan Sengkaew Pongsakorn Leetrakul and Komgrit Lawanwong</i>	843



การใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุเติมแต่งในงานขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก Using Rice Husk Ash as Additives in Plastics Injection Molding

พรหมวิวัฒน์ พรหมเลน^{1*} และ ณรงค์ชัย โอเจริญ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*E-mail: Promvivat_P@mail.mutt.ac.th

Promvivat Promlan^{1*} and Narongchai O-Charoen¹

¹Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*E-mail: Promvivat_P@mail.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบเพื่อเป็นสารเติมแต่งสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบที่อัตราส่วน 0-30 %wt ด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) เพื่อศึกษาสมบัติบางประการของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป โดยนำเถ้าแกลบผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อการทดสอบสมบัติในด้านต่าง ๆ สมบัติทางกายภาพของวัสดุ สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว และสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index; MFI) การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์แบบสปิรัล (Spiral flow injection molding) ความแข็งที่ผิว (Hardness) การทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และการทดสอบด้วยการกด 3 จุด

(3 points bending) เป็นต้น

คำหลัก การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีดเข้าแบบ ผงเถ้าแกลบ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล

Abstract

This research studied the use of rice husk ash as an additive for the recycled high density polyethylene (rHDPE) by plastic injection molding process. This study investigated the effect of mixing ratio of rice husk ash at 0-30% wt by dry blending method to study some properties of modified materials and products. The rice husk ash mixed with rHDPE were used to mold by plastic injection molding process. To test the properties in various areas thus the physical properties of materials, the flow properties of molten polymer and some mechanical properties of products such, Melt Flow Index (MFI), Spiral Flow Injection Molding Hardness, Tensile strength and 3-point bending.

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

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาการกำจัดขยะพลาสติกและของเหลือใช้จากกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งประเทศไทยมีสถิติการใช้ขวดพลาสติกสูงถึงปีละ 4,000 ล้านขวด และค่าประเมินปริมาณขยะพลาสติกที่ลงสู่ทะเลสูงเป็นอันดับ 5 ของโลก มีพลาสติกเพียง 5% เท่านั้นที่ถูกนำมารีไซเคิลอย่างมีประสิทธิภาพ ราว 10% ถูกนำมาเผากำจัด อีก 40%

ถูกฝังกลบ ในขณะที่อีกกว่า 30% หรือหนึ่งในสาม ถูกทิ้งอยู่ในระบบนิเวศโดยเฉพาะในทะเลและมหาสมุทร [1] อีกทั้งในปีพ.ศ. 2551 ประเทศไทยได้ส่งออกข้าวประมาณ 10 ล้านตัน อุตสาหกรรมผลิตข้าวจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตแกลบเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตจำนวนมาก เถ้าแกลบที่เหลือจากการเผาไหม้แล้วจะมีปริมาณคิดเป็นร้อยละ 20-25 ของแกลบ โดยในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นให้ความสนใจ



การนำฟลาชวอดน้ำตีพิมพ์โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (rHDPE) ซึ่งจะทำให้การศึกษาสมบัติบางประการของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป โดยนำฟลาชวอดน้ำตีพิมพ์โพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงใช้งานแล้ว (rHDPE) ผสมเข้ากับ RHA ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพลาสติกจากวัสดุผสมระหว่างโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกับ RHA

2.2 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมและขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมี

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยฟลาชวอดน้ำตีพิมพ์ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล 2 (rHDPE) และ RHA ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปจากโรงสีข้าวใน จ. ปทุมธานี

3.1.1 ฟลาชวอดน้ำตีพิมพ์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (rHDPE) จะถูกลดขนาดด้วยเครื่องบดพลาสติกแบบใบมีดเพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป.

3.1.2 กระบวนการผสมแบบแห้ง (dry blend) จะถูกใช้เพื่อผสม rHDPE กับ RHA ตามอัตราส่วน 100:0 HDPE100%, rHDPE100%, และ rHDPE ตามลำดับ ผสมกับ RHA (RHA) 90:10, 80:20, 70:30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดทดสอบ

ในการเตรียมฉีดขึ้นรูปทดสอบนั้นจะใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 1 โดยการฉีดที่ละอัตราส่วนผสม HDPE100%, rHDPE100%, และ rHDPE ผสมกับ RHA (RHA) 90:10, 80:20, 70:30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เครื่องฉีดพลาสติก รุ่น ALLROUNDER 470C GOLDEN EDITION บ ริ ซึ ท ARBURG (Thailand) Co., Ltd. ชิ้นงานทดสอบจะถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D638 และมาตรฐาน ASTM D256

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Process condition	Value	Unit
Dosage volume	35.0	cm ³
Injection Speed (Q)	35.0	cm ³ /s
Injection pressure (P)	1,500	bar
Cooling Time	35	second
Melt Temperature	245	°C
Mould Temperature	30	°C

หมายเหตุ การฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์โดยใช้แม่พิมพ์ Spiral Flow ไม่ใช้คำสั่ง Holding pressure

3.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุรีไซเคิล

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุทั้งหมดจะถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการทดสอบค่าดัชนีการไหล (MFI) เพื่อทดสอบการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์แบบสไปรอล (Spiral flow injection molding) ทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256, ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638, ทดสอบสมบัติการต้านการดึงต่อ ตามมาตรฐาน ASTM D790 และทดสอบค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงาน แบบ Rockwell ตามมาตรฐาน ASTM D 785

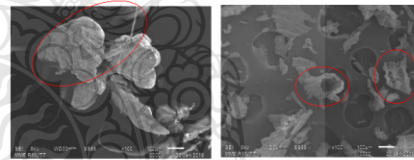
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.1.1 รูปทรงและพื้นผิว

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อดูรูปทรงและพื้นผิวของ RHA และ rHDPE ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า (แสดงในรูปที่ 1.)



(1)

(2)

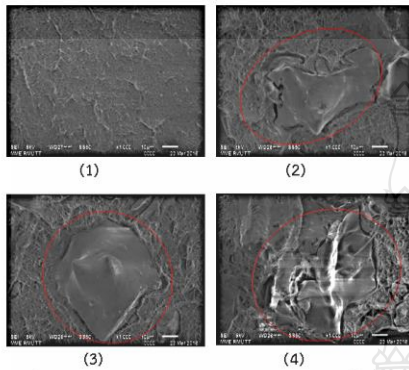
รูปที่ 1 ลักษณะรูปทรงและผิว ของ RHA และ rHDPE

1) RHA 2) rHDPE

จากรูปที่ 1. พบว่า rHDPE มีลักษณะมีหัวกลมและมีหาง (จากการบด) พื้นผิวไม่เรียบและ RHA จะมีลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน ลักษณะพื้นผิวมีทั้งเป็นพื้นผิวเรียบและพื้นผิวที่เป็นรูพรุน

4.1.2 การยึดเกาะกันระหว่าง rHDPE กับ RHA

เมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสม rHDPE กับ RHA ที่ใช้ปริมาณผสม RHA 10, 20, 30, เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก มาศึกษาสัณฐานบริเวณรอยแตก (แสดงในรูปที่ 2.)

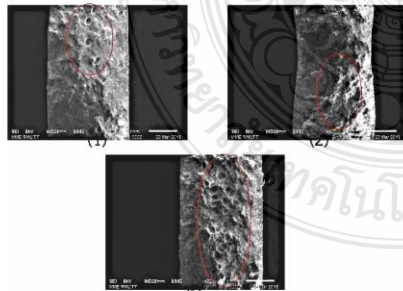


รูปที่ 2 สัณฐานวิทยาของวัสดุผสมระหว่าง rHDPE กับเส้นใยแก้ว
 1) rHDPE 100% 2) rHDPE : RHA 90:10
 3) rHDPE : RHA 80:20 4) rHDPE : RHA 70:30

จากรูปที่ 2. พบว่าการยึดเกาะกันระหว่าง rHDPE กับเส้นใยแก้ว พบว่ามีช่องว่างระหว่าง interface rHDPE กับเส้นใยแก้ว การยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์และมีโพรงอากาศอยู่ระหว่าง rHDPE กับเส้นใยแก้ว ทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานจึงเป็นสาเหตุทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีค่าลดลง

4.1.3 การกระจายตัวของเส้นใยแก้วใน rHDPE

การกระจายตัวของเส้นใยแก้วใน rHDPE ด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) การกระจายตัวขณะขึ้นรูปจึงมีแนวโน้มเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากพลาสติกที่ไหลอยู่ตรงกลางของช่องทางการไหลตัวได้เร็วที่สุด [4] และจากการไหลตัวของพลาสติกในแม่พิมพ์ส่วนที่มีความหนืดมากจะไหลช้าและอยู่บริเวณตรงกลาง ส่วนที่มีความเหลวจะไหลได้เร็วจะอยู่บริเวณด้านข้าง [2] (แสดงในรูปที่ 3.)



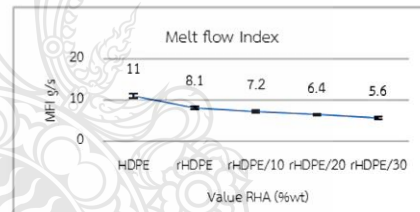
รูปที่ 3 การกระจายตัวของวัสดุผสมระหว่าง rHDPE กับเส้นใยแก้ว
 1) rHDPE : RHA 90:10 2) rHDPE : RHA 80:20
 3) rHDPE : RHA 70:30

จากรูปที่ 3. พบว่า rHDPE : RHA 90:10 แสดงในรูป 6. (1) มีอัตราส่วนเส้นใยแก้วผสมในปริมาณน้อยจึงมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเล็กๆ rHDPE : RHA 80:20 แสดงในรูป 6. (2) เริ่มมีการจับตัวของเส้นใยแก้วบริเวณตรงกลางมากขึ้น และ rHDPE : RHA 70:30 แสดงในรูป 6. (3) มีการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยแก้วบริเวณตรงกลางเป็นจำนวนมาก [5] มองเห็นเป็นหลุมและโพรงอากาศอย่างเห็นได้ชัดเจน จึงเป็นสาเหตุให้สมบัติเชิงกลลดลงเนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยแก้ว

4.2 ผลการศึกษสมบัติเชิงกล

4.2.1 การวัดค่าดัชนีการไหล (MFI) [2]

การทดสอบทำได้โดยการตั้งอุณหภูมิตามในมาตรฐานอัดพลาสติกในกระบอก ให้ความร้อนจนพอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นเนื้อเดียว อัดลูกสูบลงในกระบอกตามด้วยเพิ่มน้ำหนักกดให้เป็นไปตามมาตรฐานของพอลิเมอร์แต่ละชนิด กดให้พลาสติกหลอมไหลระยะหนึ่ง แล้วห่าน้ำหนักของพลาสติกที่ไหลออกมาในช่วงเวลา 10 วินาที ค่าที่ได้คือค่าดัชนีการไหล (MFI)

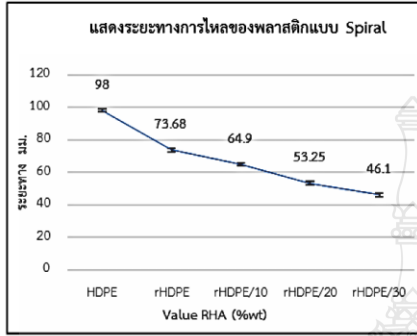


รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยแก้วกับดัชนีการไหล

จากรูปที่ 4. พบว่าการทดสอบค่าดัชนีการไหล ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า MFI ลดลงเมื่อ RHA เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน 10,20,30, เปอร์เซ็นต์ เพราะเส้นใยแก้วมีลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอนและไม่หลอมเหลว จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยแก้วมากขึ้น

4.2.2. ระยะทางการไหลของพลาสติก แบบ Spiral [2]

พลาสติกในแม่พิมพ์ฉีดจะไหลไปได้ระยะทางเท่าไรนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนืดของพลาสติก อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความเร็วฉีด ความดันฉีด เป็นต้น

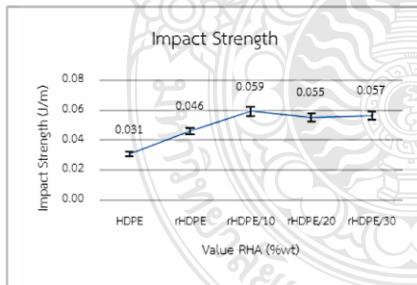


รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก้วกับระยะทางการไหลของพลาสติกแบบ Spiral

จากรูปที่ 5. จากการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์กันหอย (Spiral) ตามอัตราส่วนที่กำหนด พบว่าเมื่ออัตราส่วนของแก้วเพิ่มมากขึ้น ระยะทางการไหลของพลาสติกนั้นจะลดลงซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองการวัดดัชนีการไหล (MFL) (แสดงในรูปที่ 4.)

4.2.3 การทดสอบต่อแรงกระแทก [6]

การทดสอบที่ใช้เป็นแรงกระแทกนี้โดยใช้ก้อนขนาดมาตรฐานปล่อยลงมาสู่ชิ้นงานทดสอบ ความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุ เป็นสมบัติของวัสดุอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับพลังงานของวัสดุ



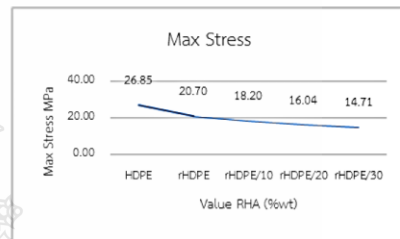
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก้วกับค่าความต้านทานแรงกระแทก

จากรูปที่ 6. เมื่อนำผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมระหว่าง rHDPE กับแก้วในอัตราส่วนต่าง ๆ กันมาพิจารณาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแก้วมากขึ้นจะทำให้การดูดซับพลังงานของวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติเชิงกลของ

แก้วสามารถช่วยดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้ดี

4.2.4 ความต้านทานแรงดึง [6]

การทดสอบแรงดึงใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของวัสดุ ในการทดสอบนี้ใช้วิธีการดึงชิ้นงานทดสอบจนขาดในเวลาสั้นๆ ด้วยอัตราคงที่ค่า Max Stress เป็นความแข็งแรงสูงสุดที่ทำให้วัสดุขาดออกจากกัน

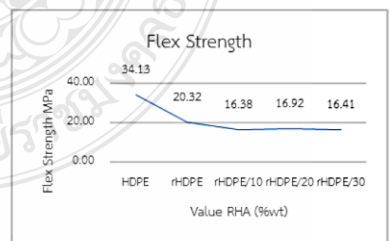


รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก้วกับค่าความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 7. เมื่อนำผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสม rHDPE กับแก้ว ในอัตราส่วนต่าง ๆ กันมาพิจารณาพบว่าเมื่อปริมาณแก้วในอัตราส่วนมากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากแก้วทำให้เกิดช่องว่างระหว่าง rHDPE เมทริกซ์กับแก้วมากซึ่งยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (แสดงในรูปที่3.)

4.2.5 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุด รับรองในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน



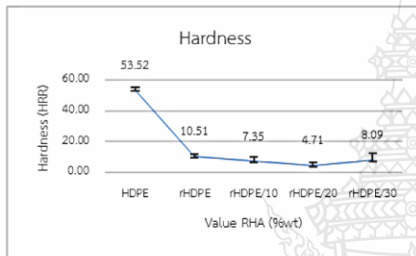
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก้วกับค่าความต้านทานการดัดงอ



จากรูปที่ 8. เมื่อทำการทดสอบแล้วพบว่า rHDPE มีความเหนียวสูง และในปริมาณอัตราส่วนที่มากจะช่วยให้มีการยึดติดกันของ rHDPE กับ RHA ได้ดีมากขึ้น

4.2.6 ความแข็งที่ผิวแบบ Rockwell [6]

การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุนั้นจะใช้วิธีวัดวัสดุที่มีลักษณะแข็งกว่าลงบนผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ เมื่อกดลงไปอย่างช้าๆ แล้ววัดรอยเว้าที่เกิดขึ้นก็สามารถหาความแข็งแรงได้



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก้วเคลือบกับค่าความแข็งที่ผิว

จากรูปที่ 9. เมื่อพิจารณาถึงค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมระหว่าง rHDPE กับแก้วเคลือบในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงานขึ้นอยู่กับกระจายตัวของแก้วเคลือบบริเวณที่กระจายอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน (แสดงในรูปที่ 3.)

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแก้วเคลือบในอัตราส่วนผสม 10, 20, 30 %wt กับ rHDPE ด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง (Dry blend) และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ แล้วนำชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์มาทดสอบสมบัติเชิงกล จากการทดสอบพบว่าสภาพการไหลของพลาสติก พลาสติกที่หลอมไหลดีจะมีลักษณะการไหลแบบน้ำพุ rHDPE หลอมไหลได้ดีจึงไหลได้เร็วกว่าแก้วเคลือบที่มีความหนืดสูงกว่าจึงไหลได้ช้าเมื่อทำการฉีดขึ้นรูป rHDPE จึงอยู่บริเวณด้านข้างและแก้วเคลือบอยู่บริเวณตรงกลาง จากสภาพการไหลดังกล่าวการผสมระหว่าง rHDPE กับแก้วเคลือบมีการกระจายตัวที่ไม่ดีและเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน การเกาะตัวระหว่าง rHDPE กับแก้วเคลือบพบว่ายังเกาะตัวกันไม่ดี ยังมีช่องว่างหรือโพรง

อากาศ จึงเป็นสาเหตุให้สมบัติเชิงกลลดลง เช่น การทนต่อแรงดึง และการทดสอบด้วยการกด 3 จุด ความแข็งที่ผิว เป็นต้น ส่วนสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น คือสมบัติต้านทานแรงกระแทก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. Plos One 10 December 2014
- [2] ประสงค์ ก้านแก้ว, การศึกษาหาอิทธิพลความหนาของ Amorphous Thermoplastics ที่ส่งผลกระทบต่อดัชนีการไหล, วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ. ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2557
- [3] เจริญ นาคะสรรค์ (2546) เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเทคโนโลยีและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี สำนักพิมพ์ไพรเมซ
- [4] John M. Dealy and Kurt F. Wissbrun. 1989. Melt rheology and its role in plastics processing theory and applications. New York : VAN NOSTRAND REINHOLD
- [5] Tim A. Osswald, Lih-Sheng (Tom) Tung and Paul J. Gramann. 2002. Injection molding handbook. Munich: Hanser
- [6] แม้น อรมสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา, ธรรมบุญ อุทุมมัน. แปลงและเรียบเรียง. วัสดุวิศวกรรม :แมคโคร-อิล อินเตอร์อินเตอร์เนชันแนล เอ็นเตอร์ไพรส์ แอลแอลซี.



ENGINE NETWORK 2018

การประชุมวิชาการสายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561

วิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ขอขอบพระทัยต่อกรรมการ

พร้อมวิวัฒน์ พร้อมเล่น และ อนุชชัย โลเจริญ

ที่ได้เข้าร่วมงานนี้ของทางวิชาการนี้ขอ

การใช้ได้แก่สเปน วิศุคเติมเต่ง โนในงานนี้ในรูปด้วยแม่พิมพ์ดีดพลาสติก

ระหว่างวันที่ 23-26 กรกฎาคม 2561 ณ โรงแรมเอเชียแกรนด์ ไฮทอลล์ แอมน คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ กรุงเทพมหานคร

(รองผู้อำนวยการฯ ตระกฤษณ์ ปิตาคะใส)

ประธานจัดงานประชุมวิชาการสายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.2561

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายพรมวิวัฒน์ พรมเลน
วัน เดือน ปีเกิด 23 พฤษภาคม 2524
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 95/49 ซอย.สายไหม 78 แขวงสายไหม
เขตสายไหม กรุงเทพฯ 10220
การศึกษา เทคโนโลยีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีแม่พิมพ์ วิทยาลัยเทคนิค
ปทุมธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 1
เบอร์โทรศัพท์ 089-1119549
อีเมล promvivat_p@mail.rmutt.ac.th,
PROMVIVAT.PROMLAN@hotmail.com

