

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ
ของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิคาร์บอเนต และ ผงเถ้าแกลบ

STUDY OF MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES
OF POLYMER COMPOSITE POLYCARBONATE
AND RICE HUSK ASH POWDER

จักรายุทธ มากทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ
ของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิคาร์บอเนต และ ผงเถ้าแกลบ

จักรายุทธ มากทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
พอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ

Study of Mechanical and Physical Properties of Polymer
Composite between Polycarbonate and Rice Husk Ash Powder

ชื่อ - นามสกุล

นายจักรายุทธ มากทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.

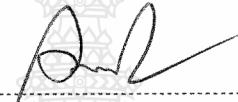
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, D.Eng.

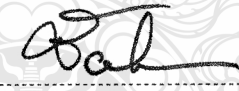
ปีการศึกษา

2562


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์कुลาชาติ จุลเพ็ญ, D.Eng.)

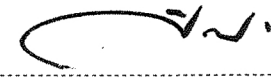

..... กรรมการ
(อาจารย์ประเสริฐ เองฉ้วน, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, D.Eng.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 26 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต และ ผงเถ้าแกลบ
ชื่อ - นามสกุล	นายจักรายุทธ มากทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, D.Eng.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยผงเถ้าแกลบ โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) โดยมีพอลิคาร์บอเนต 4 ชนิด ผสมสารเสริมแรงผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนการผสม 0, 1, 3, 5 และ 7 Phr ออกแบบการทดลองเต็มรูปแบบเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล การไหลตัว และสมบัติทางกายภาพ

ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยผงเถ้าแกลบเกิดการยืดตัวลดต่ำลง และส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการไหลตัวได้ดี ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกทดลองจากเดิมร้อยละ 81.59 กระจายตัวของผงเถ้าแกลบจะเกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิคาร์บอเนตที่อัตราการไหลสูง ทั้งนี้การฝังตัวของผงเถ้าแกลบในเมทริกซ์พอลิเมอร์ทำให้ความหนาแน่นของเมทริกซ์พอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มจากเดิมร้อยละ 6. ผลความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความสามารถในการยืดตัว มีแนวโน้มลดลงร้อยละ 60.85, 97.55 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบร้อยละ 35.88 การกระจายตัวของผงเถ้าแกลบทำให้เกิดการคงสภาพของเมทริกซ์พอลิเมอร์ การเปรียบเทียบการจำลองการขึ้นรูปกับการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพบว่าผลต่างของการยุบตัวชิ้นงานร้อยละ 2.59 และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์

พอลิคาร์บอเนต PC - C ผสมผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 ไมโครเมตร ผลของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบและพบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการเติมผงไฟเบอร์คาร์บอนและผงเถ้าแกลบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแตกต่างกัน 12.11 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : พอลิคาร์บอเนต ผงเถ้าแกลบ สมบัติทางกล

Thesis title Study of Mechanical and Physical Properties of Polymer Composite Between Polycarbonate and Rice Husk Ash Powder

Name - Surname Mr. Chakkrayut Makthong

Program Manufacturing Engineering

Thesis Adviser Associate Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.

Thesis Co-adviser Assistant Professor Jittiwat Nithikarnjanatharn, D.Eng

Academic year 2019

ABSTRACT

Four kinds of polycarbonates and two average sizes of rice husk ash powder, 17 and 29 micrometers, were studied in this paper. Polycarbonates and rice husk ash powder were mixed at the ratios of 0, 1, 3, 5 and 7 Phr by a Twin Screw Extruder machine. The objectives of this thesis includes: to study mechanical properties, flow characteristics and physical characteristics of polycarbonate reinforced with rice husk ash powder.

Stress and strain relations of polycarbonate reinforced with rice husk ash powder decreased elongation and affected the flow behavior. The impact resistance reduced from 100% to 81.59 %. The dispersion of rice husk ash powder were distributed well in polycarbonate at high flow rates. The implantation of rice husk ash powder in the polymer matrix increased the density of the polymer matrix resulting in increased hardness from the previous 100% to 106%. The maximum tensile strength, and the ability to elongate tended to decrease from 100% to 60.85 % and 97.55 % respectively. On the other hand, the modulus of elasticity increased with substantial amount of rice husk ash powder by 35.88 percent. The dispersion of rice husk ash powder caused sufficient matrix stability. The simulation of injection molding and injection molding, were compared and was it is found that the difference of the workpiece's collapse was 2.59% and that it could be completely molded.

Rice husk ash powder-polycarbonate comprising 17 micrometers rice husk ash powder specimen (PC-C) showed an increase in Young's modulus and strength. They also followed a direct relationship with the added amount of rice husk ash powder. The PC-C was compared with carbon fiber polycarbonate specimina, and it suggested that

the trends of the Young's modulus of the PC-C were higher than those of the carbon fiber polycarbonate specimina by 12.11%.

Keywords: polycarbonate, rice husk ash powder, mechanical properties.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ” สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากได้รับการอนุเคราะห์ความช่วยเหลือจาก คณาจารย์ บุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ดังนี้

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร ที่ให้คำปรึกษาและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาตลอดจนการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่มีส่วนให้การทดสอบนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีและให้คำแนะนำและแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะกรรมการทุกท่านที่สละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ข้อมูลความช่วยเหลืออันเกิดประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน สำหรับสถานที่ในการทดลองและการทดสอบในการศึกษา ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาตลอดระยะเวลาการศึกษา

หากวิทยานิพนธ์นี้บังเกิดประโยชน์แก่สังคม คณะผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอมอบคุณงามความดีนี้แก่ บิดา มารดา คณาจารย์ คณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชา ให้ความช่วยเหลือให้ผู้จัดทำสามารถทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ และภาควิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จักรายุทธ มากทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญเรื่อง	(7)
สารบัญรูป	(10)
สารบัญตาราง	(14)
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	15
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	17
1.3 ขอบเขตของโครงการ	17
1.4 วิธีการดำเนินงาน	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
2.1 พอลิเมอร์	19
2.2 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)	26
2.3 วัสดุเชิงประกอบ	30
2.4 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์	40
2.5 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยการฉีด	42
2.6 คอมพิวเตอร์ในการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	52
2.7 ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	56
2.8 การทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์	59
2.9 การทดสอบความแข็ง	64
2.10 การทดสอบทางกายภาพ	72
2.11 Minitab	73
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	78

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	83
3.1 แผนการดำเนินการ	83
3.2 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	84
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	84
3.4 การเตรียมพอลิเมอร์สำหรับขึ้นรูปการทดสอบ	85
3.5 การวิเคราะห์ Rheology	86
3.6 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	87
3.7 การทดสอบสมบัติทางกลของพอลิคาร์บอเนตและผลแก้วแกลป	87
3.8 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	92
3.9 การวิเคราะห์ผลการทดลองของพอลิคาร์บอเนตผสมผงแก้วแกลป	94
3.10 การออกแบบชิ้นงานและการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการฉีด	94
3.11 การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม SOLIDWORK Plastic	96
3.12 ทดลองฉีดชิ้นงานจริง	100
3.13 สรุปผลและเขียนรายงานวิจัย	101
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	102
4.1 การวิเคราะห์ความเค้น - ความเครียด	102
4.2 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต	105
4.3 ผลการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ	108
4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกล	115
4.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	124
4.6 การพยากรณ์	129
4.7 การวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติก	132
4.8 การคำนวณต้นทุนการผลิต	134
4.9 การอภิปรายผลการทดลอง	135

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	138
5.1 สรุปผลการวิจัย	138
5.2 ข้อเสนอแนะ	140
บรรณานุกรม	141
ภาคผนวก	148
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต	149
ภาคผนวก ข พิกัดความถี่ของชิ้นงาน	153
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบสมบัติทางกล	161
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ปัจจัยทางสถิติ	166
ประวัติผู้เขียน	171



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น	21
2.2 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง	21
2.3 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห	21
2.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	25
2.5 วิธีการวิเคราะห์ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	26
2.6 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอนเนต	27
2.7 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีในการสังเคราะห์พอลิคาร์บอนเนต	27
2.8 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	34
2.9 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ	35
2.10 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในรถยนต์	37
2.11 ภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเกลียวหนอนคู่	41
2.12 กระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	42
2.13 กระบวนการ Injection Moulding	42
2.14 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องฉีดพลาสติก	43
2.15 ลักษณะการฉีดตามแนวนอน	44
2.16 ลักษณะการฉีดตามแนวนอน	44
2.17 ลักษณะชุดฉีดตามแนวตั้ง	45
2.18 ลักษณะชุดฉีดตามแนวตั้ง	45
2.19 ชุดฉีด (Injection Unit)	46
2.20 โครงสร้างของเครื่องฉีดพลาสติก	46
2.21 การวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างด้วยโปรแกรม Solidwork Plastic	55
2.22 ตัวอย่างของเอลิเมนต์แบบต่างๆ	57
2.23 ลักษณะโซลิตเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Solid Element)	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.24	ลักษณะโซลิดเอลิเมนต์แบบ Tetrahedral	58
2.25	ลักษณะโซลิดเอลิเมนต์แบบ Shell Elements	59
2.26	เครื่อง Universal Testing Machine	60
2.27	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดตัว	60
2.28	ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง	61
2.29	การหาค่าโมดูลัสในแบบต่างๆ	62
2.30	ทดสอบแรงกระแทกแบบ Pendulum Test	62
2.31	รูปแบบการวางชิ้นงาน สำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy	63
2.32	ผลของรอยบากต่อค่าการทนแรงกระแทก	63
2.33	การทดสอบแบบ Falling Weight	64
2.34	เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell	66
2.35	แสดงภาพห้วงกุดและรอยกุดในการทดสอบความแข็ง Brinell	67
2.36	เครื่องทดสอบความแข็ง Rockwell พร้อมห้วงกุด	68
2.37	แสดงภาพการทดสอบความแข็ง Rockwell ด้วยห้วงกุดบอล (สเกล B F และ G)	69
2.38	เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D	71
2.39	การทำงานของ SEM	72
2.40	โครงสร้างจุลภาคชิ้นทดสอบที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	73
2.41	ลักษณะหน้าต่างโปรแกรม Minitab	75
2.42	ภาพรวมการใช้งานโปรแกรม Minitab	76
3.1	แผนการดำเนินงาน	83
3.2	อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบลมร้อน	85
3.3	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder).	86
3.4	เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding)	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile properties)	89
3.6 ค่าพิกัดต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I	89
3.7 ค่าพิกัดต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256	90
3.8 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) รุ่น INSTRON-9050	90
3.9 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256	90
3.10 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง	91
3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D	92
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Phenom pro	93
3.13 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	95
3.14 แฉกเครื่องมือ	97
3.15 Mesh Model จากการสร้างด้วยโปรแกรม Solidwork Plastic	97
3.16 ทางเข้าน้ำพลาสติก	99
3.17 การประมวลผลวิเคราะห์	99
3.18 สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์	100
3.19 ชิ้นงานจากการทดลองฉีดขึ้นรูปของ PC เม็ดใหม่	101
3.20 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม Solidwork Plastic	101
4.1 ความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียด ของพอลิคาร์บอเนต 4 ชนิด	104
4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด	105
4.3 พฤติกรรมความสัมพันธ์ของความหนืดเฉือน / อัตราเฉือน	107
4.4 ลักษณะชิ้นงานการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	108
4.5 ลักษณะทางกายภาพของผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร	111
4.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก	116
4.7 ผลการทดสอบค่าความแข็ง	118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด	120
4.9 ผลการทดสอบค่าการยืดตัว	122
4.10 ผลการทดลองค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น	123
4.11 การพยากรณ์ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น	130
4.12 การพยากรณ์ค่าความแข็ง	131
4.13 การจำลองการฉีกขึ้นรูปพอลิเมอร์	132
4.14 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ VGCF / RHA	137



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต	39
2.2 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต	40
2.3 แสดงตัวอย่างสเกลชนิดหัวกดและน้ำหนักกดของการทดสอบความแข็ง Rockwell	69
2.4 รายละเอียดการทดสอบความแข็งแบบ Durometer	71
3.1 อัตราผสมพอลิคาร์บอเนตกับแก้วกลบ	83
3.2 ฐานข้อมูลของ POM เกรด Delrin II 100 ในโปรแกรม Solidwork Plastic	98
3.3 พารามิเตอร์เบื้องต้นสำหรับทดลองฉีดขึ้นรูป ด้วยโปรแกรม SolidWork plastic	98
4.1 ลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM)	110
4.2 ลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	113
4.3 กำหนดปัจจัยในการออกแบบการทดลอง	124
4.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – A	125
4.5 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – B	126
4.6 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – C	127
4.7 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – D	128
4.8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อพอลิเมอร์คอมโพสิต	129
4.9 ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์	133
4.10 ผลการเปรียบเทียบการจำลองการฉีด และชิ้นงานฉีดจริง	134
4.11 การเปรียบเทียบต้นทุนของสารเสริมแรง	134

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

พอลิเมอร์ (Polymer) [1] มาจากภาษากรีกสองคำคือ Poly หมายความว่าหลายๆ หรือมาก และ Mer แปลว่าหน่วยหรือส่วน ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วพอลิเมอร์นั้นคือสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงโดยมีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นหน่วยย่อยซ้ำๆ กันซึ่งโมเลกุลนั้นจะมีลักษณะคล้ายโซ่ยาวและเกี่ยวพันกัน จึงเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นั้นแข็งแรง ซึ่งส่วนมากพอลิเมอร์จะถูกเรียกและคุ้นเคยและใช้คำว่าพลาสติก (Plastic) [2] พลาสติกเป็นวัสดุที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ทดแทนวัสดุธรรมชาติ เช่น ไม้ โลหะ หรือวัสดุธรรมชาติชนิดอื่นๆ โดยพลาสติกนั้นสามารถประยุกต์ใช้กับหลากหลายประเภทอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งในปัจจุบันนั้น พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น เช่น โทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ภาชนะบรรจุอาหาร โตะเก้าอี้ ซึ่งด้วยคุณสมบัติของพลาสติกแต่ละชนิดนั้นมีหลายอย่าง อย่าง เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อสารเคมี หลีกเลี่ยงในตัวเองทนต่อความร้อน ไม่ติดไฟง่าย เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ฯลฯ ด้วยเหตุนี้พลาสติกจึงมีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมากอีกทั้งยังประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตามความต้องการ พลาสติกในปัจจุบันนั้นสามารถแบ่งประเภทได้ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ กลุ่มเทอร์โมเซตติง [3] [4] เป็นพลาสติกที่มีคุณลักษณะพิเศษคือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ และทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก เมื่อเกิดการหลอมรวมจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรไม่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ หากใช้ความร้อนถึงอุณหภูมิวิกฤตจะเกิดสลายตัวทันที การขึ้นรูปพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปร่างลักษณะต่างๆ ต้องใช้ความร้อนสูงและแรงดันสูงในการอัดขึ้นรูปอีกด้วย พลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตติง ได้แก่ 1. เมลามีนฟอर्मัลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) 2. ฟีนอลฟอर्मัลดีไฮด์ (Phenol Formaldehyde) 3. อีพ็อกซี (Epoxy) 4. พอลิเอสเตอร์ (Polyester) 5. ยูรีเทน (Urethane) 6. พอลิยูรีเทน (Polyurethane) กลุ่มเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) [3] [5] มีคุณสมบัติเด่นคือเมื่อผ่านกระบวนการการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ พลาสติกกลุ่มนี้ยังพบมากในอุตสาหกรรมหลายประเภทในประเทศไทยและต่างประเทศ ด้วยคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวจากนั้นจะแข็งตัวเมื่อถูกกระทำทำให้เย็นลง ซึ่งเหมาะสำหรับการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ด้วยเทคนิคพื้นฐานเช่น การฉีด การอัดรีด การปั่นเป็นเส้นใย การเป่าขึ้นรูป เป็นต้น ซึ่งพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ 1. พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) 2. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) 3. พอลิไวนิล คลอไรด์ (Polyvinyl Chloride : PVC) 4. พอลิสไตรีน (Polystyrene Resins :PS)

5. อะครีโลไนไตรล - บิวทาไดอิน - สไตรีน (ABS – Acrylonitrile-butadiene-styrene : ABS) 6. อะคริลิก (Acrylic) 7. พอลิอะซีทัล (Polyacetal) 8. พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)

พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonates ; PC) [6] เป็นวัสดุทางวิศวกรรมอีกประเภทจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกและนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบโดยคุณสมบัติของ พอลิคาร์บอเนต มีความหนาแน่น (Density) $1.20 - 1.22 \text{ g / cm}^3$ มีค่าความยืดหยุ่น (Young's Modulus) $2.0 - 2.4 \text{ GPa}$ จุดหลอมเหลวสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส และกลายเป็นแก้วเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส มีความใสสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ โดยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะงานในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์เป็นชิ้นส่วนวัสดุก่อสร้างและอุปกรณ์ความปลอดภัย ซึ่งด้วยคุณสมบัติโดยรวมของพอลิคาร์บอเนตนั้นทำให้ตัววัสดุเอง มีความแข็งแรงสูง ทนต่อสภาวะอุณหภูมิได้ดี มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า การนำเอาพอลิคาร์บอเนตไปเป็นวัสดุคอมโพสิตชนิดต่างๆ ซึ่งวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) [7] หมายถึงวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุสองชนิดขึ้นไปและทำให้คุณสมบัติของวัสดุดีขึ้นหรือเกิดการมีคุณสมบัติร่วมกัน วัสดุคอมโพสิตจึงเป็นที่น่าสนใจและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดวัสดุใหม่ๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบันเพื่อทดแทนวัสดุจากธรรมชาติมากขึ้น เช่น การนำเส้นใยแก้วเสริมแรงพอลิเอสเทอร์มาใช้ทำเป็นเรือขนาดบุคคล ท่อที่ไม่มีกากัดกร่อน นอกจากนี้การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ ได้คิดค้นการผลิตเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ที่มีความแข็งแรงสูง และสามารถนำมาทำเป็นเส้นใยเสริมแรงทำให้เกิดเป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber – reinforce plastic : CFRP) คาร์บอน (Carbon) [8] ผู้ที่คิดค้นเส้นใยคาร์บอน เป็นคนแรกนั่นคือ Thomas Edison ได้คิดค้นใยคาร์บอนนี้ขึ้นมาเพื่อใช้ทำไส้หลอดไฟฟ้า คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber ,CF) เป็นเส้นใยสมรรถนะสูงที่เกิดจากการนำเส้นใยสังเคราะห์ polyacrylonitrile (PAN) ไปผ่านความร้อน 200-300 องศาเซลเซียส 30-120 นาที เพื่อปรับโครงสร้างของอะตอมใหม่ให้เสถียรแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 1000-3000 องศาเซลเซียส โดยปราศจากออกซิเจน ซึ่งจุดนี้จะทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติที่สามารถทนต่อการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดีและเมื่อเส้นใยผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูงนี้จะทำให้เส้นใยสูญเสียอะตอมอื่นไปคงเหลือไว้แต่อะตอมของคาร์บอนที่ยังคงยึดเกาะกันไว้อย่างเหนียวแน่นและปฏิกิริยานี้เรียกว่า carbonization จากนั้นจะทำการ oxidize เพิ่มอะตอมของออกซิเจนให้กับผิวของเส้นใยเพื่อเป็นการเติมเต็มให้ผิวเส้นใยและเพิ่มความแข็งแรงและนำไปเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสุดท้ายเคลือบผิวเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับเส้นใยเช่นในระหว่างการทอขึ้นรูป เรียกว่าการทำ sizing เมื่อได้ม้วนเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) แล้วก็นำไปขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆ เช่น ทอเป็นผืน นำไปตัดเป็นเส้นสั้น แปรสภาพเป็นผง แล้วแต่การใช้งานผงไฟเบอร์คาร์บอน ยังคงมีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ในประเทศไทยเป็นประเทศการเกษตรปลูกข้าวเป็นส่วนใหญ่ถ้าแกลบ (rice husk ash) [9] เป็นผลจากการนำแกลบที่ได้หลังจาก

การสีขาวไปเผา พบว่าแก้วกลบที่เผาในประเทศไทยมี SiO_2 อยู่ร้อยละ 92.28, 95.36, และ 91.84 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โพรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กฟอสฟอรัส และ ซัลเฟอร์ ปริมาณคาร์บอนในแก้วกลบกับจะแปรผันกับค่าความถ่วงจำเพาะ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมปีหนึ่งจะมีการเก็บเกี่ยวข้าวได้ประมาณ 25 ล้านตัน ดังนั้นแก้วกลบจึงมีราคาถูกและหาได้ง่าย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การนำพอลิคาร์บอเนตไปรวมผสมกับวัสดุชนิดอื่นนั้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีแต่ยังคงมีต้นทุนสูงเนื่องจากผงไฟเบอร์คาร์บอนมีราคาแพง แต่แก้วกลบสามารถหาได้ง่ายและราคาถูกอีกทั้งยังเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตทางการเกษตรในประเทศไทยและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งอีกด้วย ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่มุ่งเน้นการศึกษาการนำพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonates : PC) มาผสมกับแก้วกลบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลและศึกษาโครงสร้างหลังจากการขึ้นรูปโดยใช้พอลิคาร์บอเนตจำนวน 4 ชนิด และผงแก้วกลบขนาด 17 และ 29 ไมครอน ที่สัดส่วนผสมพอลิคาร์บอเนตและผงแก้วกลบในปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) เพื่อให้ได้เป็นเส้นใยพอลิคาร์บอเนตผสมแก้วกลบทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของโพลิเมอร์ ศึกษาสมบัติทางกลและศึกษาสมบัติทางกายภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผสมกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมออร์พอลิคาร์บอเนต (PC) ผสมการผงแก้วกลบขนาด 17 μm และ 29 μm

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาพอลิเมออร์พอลิคาร์บอเนตทั้งหมด 4 ชนิด PC - 2405, PC - 2605, PC - H2000R และ PC - 3000R ผสมกับแก้วกลบขนาด 17 μm และ 29 μm

1.3.2 ผสมพอลิเมออร์พอลิคาร์บอเนตกับแก้วกลบในปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)

1.3.3 ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile Properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I

1.3.4 ทดสอบแรงกระแทก (Impact Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256

1.3.5 ทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) ตามมาตรฐาน ASTM D2240

1.3.6 ศึกษาสมบัติทางกายภาพด้วยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิคอิเล็กตรอนไมโครสโคปีแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของพอลิเมอร์พอลิคาร์บอนเนตและแก้วกลบ

1.4.2 ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

1.4.3 จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบและออกแบบการทดสอบ

1.4.4 ดำเนินการผสมพอลิเมอร์พอลิคาร์บอนเนตโดยใช้สารเพิ่มความเสถียรภาพ จากนั้นผสมแก้วกลบในอัตราส่วน 0, 1, 3, 5 และ 7 phr

1.4.5 ผสมพอลิเมอร์พอลิคาร์บอนเนตกับแก้วกลบด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)

1.4.6 ขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางกลของพอลิคาร์บอนเนตผสมกับแก้วกลบ โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

1.4.7 ทดสอบสมบัติเชิงกลประกอบด้วย สมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile Properties) ASTM D638 สมบัติความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) ASTM D256 และทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) ASTM D2240

1.4.8 ทดสอบสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย Scanning Electron Microscopy

1.4.9 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบสมบัติเชิงกลและวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของพอลิคาร์บอนเนตผสมกับแก้วกลบ

1.4.10 สรุปผลและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ศึกษาวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอนเนตและผงแก้วกลบ

1.5.2 ได้ทราบถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์บอนเนตและผงแก้วกลบที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

1.5.3 ได้ทราบสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตพอลิคาร์บอนเนตและผงแก้วกลบที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

1.5.4 เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้พลาสติกกับส่วนตัวเติมจากธรรมชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ (Polymer)

พอลิเมอร์ [10] มาจากรากศัพท์กรีกซึ่งมีคำสำคัญ 2 คำ คือ Poly (จำนวนมาก) และ Meros (ส่วน หรือ หน่วย) พอลิเมอร์เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) ประกอบไปด้วยหน่วยซ้ำกัน (repeating unit) ของมอนอเมอร์ (Monomer) หลายๆ หน่วยมาทำปฏิกิริยากันมอนอเมอร์นี้จัดเป็นสารไมโครโมเลกุล (Micromolecule) ชนิดหนึ่ง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมด จัดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ถ้ามีมอนอเมอร์ต่างกันตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไปจัดเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) สารบางอย่างที่มีสมบัติอย่างพอลิเมอร์ เช่น สารพวกไขมันที่มี แต่หน่วยที่ไม่ซ้ำกันนั้นจะเป็นเพียงแค่สารแมโครโมเลกุลเท่านั้น ไม่จัดเป็นพอลิเมอร์

พอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ มีที่ซึ่งเกิดเองในธรรมชาติ (Natural polymer) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส โปรตีน กรดนิวคลีอิกและยางธรรมชาติ ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก เส้นใย โฟม และกาว พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เข้ามามีบทบาทมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ และพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีสมบัติต่างกันจึงนำหน้าหรือนำไปใช้งานที่ต่างกัน พอลิเมอร์ที่เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดคือพลาสติก ซึ่งเป็นคำที่ใช้อ้างถึงกลุ่มของวัสดุธรรมชาติและสังเคราะห์กลุ่มใหญ่ที่มีคุณสมบัติและการใช้งานต่างกัน พอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น ชแล็ก และอำพันที่ใช้มาเป็นเวลากว่าศตวรรษ พอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น โปรตีนและกรดนิวคลีอิกที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางชีวภาพ พอลิเมอร์ธรรมชาติอื่นๆ เช่น เซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ และไม้ พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ บากาไลต์, นีโอพรีน, ไนลอน, พีวีซี, พอลิสไตรีน, พอลิเอทิลีนไทรล และพีวีบี การศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ได้แก่ เคมีพอลิเมอร์, ฟิสิกส์พอลิเมอร์ และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

พอลิเมอร์สังเคราะห์ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกือบทุกชนิด พอลิเมอร์มีการใช้ในการยึดเกาะและการหล่อลื่นอย่างกว้างขวาง เช่นเดียวกับการใช้เป็นโครงสร้างตั้งแต่ของเด็กเล่นจนถึงยานอวกาศ มีการใช้เป็นยาทางชีวภาพในฐานะเป็นตัวขนส่งยาในสิ่งมีชีวิตพอลิเมอร์ เช่น พอลิเมทิล เมทาคริเลต ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตเรซิสในอุตสาหกรรมกึ่งตัวนำ และสารไดอิลิกทริก โพรแทสเซียมต่ำสำหรับใช้ในคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง ปัจจุบันยังมีการพัฒนาพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นได้สำหรับอิเล็กทรอนิกส์

2.1.1 โครงสร้างของพอลิเมอร์

ธีรพงษ์ แสงสิทธิ์ [11] คุณสมบัติทางโครงสร้างของพอลิเมอร์เกี่ยวข้องกับการจัดตัวทางกายภาพของลำดับ โมโนเมอร์ตลอดแกนหลักของสาย โครงสร้างมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติอื่นๆ ของพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์สายตรงอาจจะละลายหรือไม่ละลายในน้ำขึ้นอยู่กับว่าหน่วยย่อยนั้นมีขั้วหรือไม่ แต่ในกรณีของยางธรรมชาติยางธรรมชาติสองชนิดอาจจะแสดงความทนทานต่างกันแม้จะมีหน่วยย่อยเหมือนกัน นักวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์พยายามพัฒนาวิธีการเพื่ออธิบายทั้งธรรมชาติของหน่วยย่อยและการจัดเรียงตัว พอลิเมอร์ที่พบไม่ว่าจากธรรมชาติ และที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถแบ่งประเภทของพอลิเมอร์โดยแบ่งตามเกณฑ์มีอยู่ 3 เกณฑ์ด้วยกัน คือ

1. แบ่งตามการเกิดเป็นเกณฑ์ เป็น 2 ชนิด คือ

ก) พอลิเมอร์ธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โปรตีน แป้ง เซลลูโลส ไกโคเจน กรดนิวคลีอิก และยางธรรมชาติ (พอลิไอโซพรีน)

ข) พอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์เพื่อใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น พลาสติก ไนลอน ดาครอน และลูไซต์ เป็นต้น

2. แบ่งตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ เป็น 2 ชนิด คือ

ก) โฮมอพอลิเมอร์ (Homopolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน เช่น แป้ง (ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่เป็นกลูโคสทั้งหมด) พอลิเอทิลีน PVC (ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่เป็นเอทิลีนทั้งหมด)

ข) เฮเทอโรพอลิเมอร์ (Heteropolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน เช่น โปรตีน (ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่เป็นกรดอะมิโนต่างชนิดกัน) พอลิเอสเทอร์ พอลิเอไมด์ เป็นต้น

3. แบ่งตามโครงสร้างของพอลิเมอร์ แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

ก) พอลิเมอร์แบบเส้น (Chain length polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาว โซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็ง ชุ่มเหนียวกว่าโครงสร้างอื่นๆ ตัวอย่าง PVC พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้น [14]

ข) พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้น และโซ่ยาว กิ่งที่แตกจากพอลิเมอร์ของโซ่หลัก ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มากจึงมีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวต่ำยืดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำ โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่ง [14]

ค) พอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross-linking polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแห พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรงแรง และเปราะหักง่าย เช่น เบกาไลต์ เมลามีนใช้ทำถ้วยชาม แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห [14]

2.1.2 ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

วราทิพย์ นันตะนะ [12] พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) คือขบวนการเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จากสารที่มีโมเลกุลเล็ก สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ปฏิกริยาการเกิดพอลิเมอร์ชนิดเพิ่มเข้า (Additional polymer) เป็นวิธีการที่จะสังเคราะห์สารพอลิเมอร์โดยการเพิ่มต่อโมโนเมอร์เข้าด้วยกัน และไม่มีการสูญเสียอะตอมหรือโมเลกุลแต่อย่างใดการเพิ่มสารโมโนเมอร์ในการสังเคราะห์จะใช้ สารประกอบอัลคีนเป็นสารเริ่มต้น ลักษณะตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ได้แก่ polyethylene, teflon, polyvinyl chloride และ polyvinyl alcohol

2) ปฏิกริยาการเกิดพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น (Condensation polymer) เป็นวิธีการที่จะสังเคราะห์สารพอลิเมอร์ขึ้นโดยการควบแน่น วิธีนี้จะทำให้โมโนเมอร์แต่ละโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันอย่างน้อย 2 หมู่มาทำปฏิกริยาควบแน่นกัน พร้อมกับมีการกำจัดโมเลกุลขนาดเล็กออกมาซึ่งได้แก่ น้ำ แอมโมเนียหรือกรดเกลือ ตัวอย่างสารพอลิเมอร์ชนิดนี้ได้แก่ พอลีเอสเตอร์ (polyester) พอลิยูรีเทน (polyurethane) และพอลีอะไมด์ (polyamide)

2.1.3 พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

มันส์ ศรีสวัสดิ์ [10] พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก และ เทอร์โมเซตติงพลาสติก

1) เทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด ได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัวสามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลวหรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ละลายโครงสร้างเดิม ตัวอย่าง พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลีสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ ชนิดของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมพลาสติกได้แก่

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) เป็นพลาสติกที่ไอซึมผ่านได้เล็กน้อยแต่อากาศผ่านเข้าออกได้ มีลักษณะขุ่นและทนความร้อนได้พอควร เป็นพลาสติกที่นำมาใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ ถัง ขวด แทนรองรับสินค้า

- พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) เป็นพลาสติกที่ไอซึมผ่านได้เล็กน้อย แข็งกว่าโพลิเอทิลีนทนต่อสารไขมัน และความร้อนสูงใช้ทำแผ่นพลาสติก ถุงพลาสติกบรรจุ อาหารที่ทนร้อนหลอดดูดพลาสติก เป็นต้น

- พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) มีลักษณะโปร่งใส เปราะ ทนต่อการด่างอินทรีย์ และอากาศซึมผ่านได้ ควรใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น

- SAN (Styrene-acrylonitrile) เป็นพลาสติกโปร่งใสผลิตขึ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น

- ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) สมบัติคล้ายพอลิสไตรีนแต่ทนสารเคมีดีกว่า เหนียวกว่า โปร่งแสง ใช้ผลิตถ้วย ถาด เป็นต้น

- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride : PVC) ไอน้ำ และอากาศซึมผ่านได้ พอสสมควรแต่ป้องกันไขมันได้ดี มีลักษณะใส ใช้ทำขวดบรรจุน้ำมัน และไขมันปรุงอาหาร ขวดบรรจุเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ เบียร์ ใช้ทำแผ่นพลาสติกห่อเนยแข็ง ทำแผ่นแลมินเนตชั้นในของถุงพลาสติกไนลอน (Nylon) เป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก ทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ทำแผ่นแลมินเนตสำหรับทำถุงพลาสติกบรรจุอาหารแบบสุญญากาศ

- พอลิเอทิลีน เทอร์เฟธาเล (Polyethylene Terephthalate) เหนียวมาก โปร่งใส ราคาแพง ใช้ทำแผ่นฟิล์มต่างๆ บรรจุอาหาร

- พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate : PC) มีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรงยึด และแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรดแต่ไม่ทนด่าง เป็นรอยคราบอาหารจับยาก ใช้ทำถ้วยจาน ขามขวดนมเด็ก และขวดบรรจุอาหารเด็ก

2) เทอร์โมเซตติงพลาสติก

เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบ และรอยเปื้อนได้ยากคงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อน และแรงดันไม่อ่อนตัว และเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ พลาสติกประเภทนี้โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถหลอมเหลวได้ กล่าวคือ เกิดการเชื่อมต่อข้ามไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Cross Linking Among Polymer Chains) เหตุนี้หลังจากพลาสติกเย็นจนแข็งตัวแล้ว จะไม่สามารถทำให้อ่อนได้อีกโดยใช้ความร้อน หากแต่จะสลายตัวทันทีที่อุณหภูมิสูงถึงระดับ การทำพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่างๆ ต้องใช้ความร้อนสูง และ โดยมากต้องการแรงอัดด้วยเทอร์โมเซตติงพลาสติกได้แก่

- เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) มีสมบัติทางเคมีทนแรงดันได้ 7,000–135,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงอัดได้ 25,000–50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงกระแทกได้ 0.25–0.35 นิวตันเมตร ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทนความร้อนได้ถึง 140

องศาเซลเซียส และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนยาก เมลามีนใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารหลายชนิด และนิยมใช้กันมาก มีทั้งที่เป็นสีเรียบและลวดลายสวยงาม ข้อเสียคือ น้ำส้มสายชูจะซึมเข้าเนื้อพลาสติกได้ง่าย ทำให้เกิดรอยต่าง แต่ไม่มีพิษภัยเพราะไม่มีปฏิกิริยากับพลาสติก

- ฟีนอลฟอร์มาดีไฮด์ (Phenol-Formaldehyde) มีความต้านทานต่อตัวทำละลาย สารละลายเกลือและน้ำมัน แต่พลาสติกอาจพองบวมได้เนื่องจากน้ำหรือแอลกอฮอล์พลาสติกชนิดนี้ ใช้ทำฝาจากขวด

- อีพอกซี (Epoxy) ใช้เคลือบผิวของอุปกรณ์ภายในบ้านเรือน และท่อเก็บก๊าซใช้ในการเชื่อมประกอบโลหะ แก้ว และเซรามิก ใช้ในการหล่ออุปกรณ์ที่ทำจากโลหะและเคลือบผิวของพื้นและผนัง ใช้เป็นวัสดุของแผ่นกำบังนิวตรอน ซีเมนต์ และปูนขาว ใช้เคลือบผิวถนน เพื่อกันลื่น ใช้ทำโฟมแข็งใช้เป็นสารในการทำสีของแก้ว

- พอลิเอสเตอร์ (Polyester) กลุ่มของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ (-O•CO-) ในหน่วยซ้ำเป็นพอลิเมอร์ที่นำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ทำพลาสติกสำหรับเคลือบผิว ขวดน้ำ เส้นใยฟิล์ม และยาง เป็นต้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิเมอร์ฟลิกหลายบางชนิด

- ยูรีเทน (Urethane) ชื่อเรียกทั่วไปของเอทิลคาร์บาเมต มีสูตรทางเคมี คือ $\text{NH}_2\text{COOC}_2\text{H}_5$

- พอลิยูรีเทน (Polyurethane) พอลิเมอร์ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน (-NH•CO•O-) เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนต (Di-isocyanates) กับไดออล (Diols) หรือไตรออล (Triols) ที่เหมาะสม ใช้เป็นกาว และน้ำมันชักเงา พลาสติกและยาง ชื่อย่อคือ PU

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal transitions) [15]

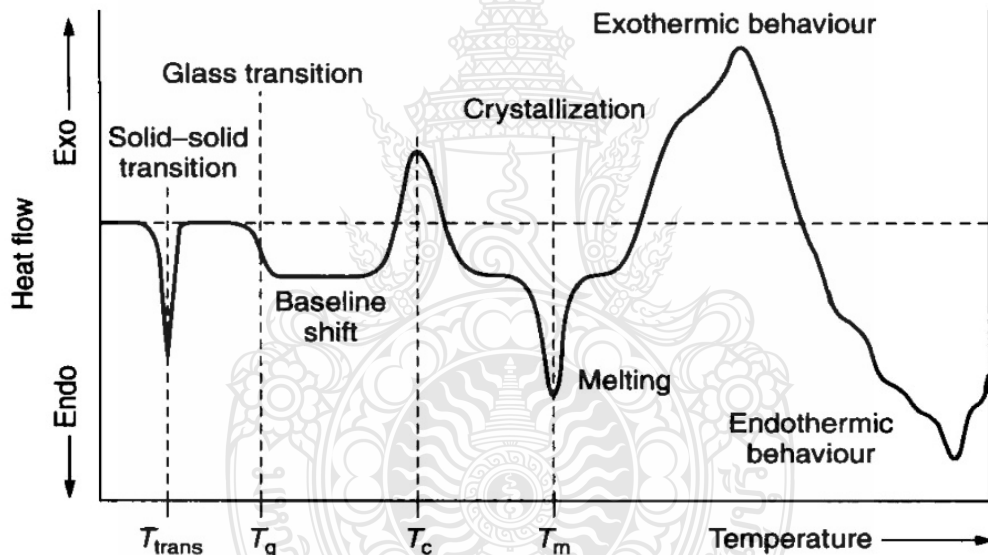
การแบ่งลักษณะความแตกต่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงทางของพลังงานที่เกิดขึ้น 3 อุณหภูมิหลักๆ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว (Glass Transition Temperature ; T_g) อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting Point Temperature ; T_m) และอุณหภูมิไหลตัว (Flow Temperature ; T_f)

อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว (Glass Transition Temperature ; T_g) หมายถึง อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีพฤติกรรมเปราะคล้ายแก้วที่อุณหภูมิ T_g สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนพลังงานทางความร้อนไม่เพียงพอที่จะเลื่อนผ่านสายโซ่อื่นได้และมีวิธีเดียวที่วัสดุจะตอบสนองต่อความเค้นทางกลคือการยืดออกหรือแตกออกจากพันธะที่ประกอบกันเป็นสายโซ่โมเลกุล

อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting Point Temperature ; T_m) คือจุดที่อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวซึ่งจะสอดคล้องกับจุดที่เป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline Regions) ที่มีการหลอมละลาย

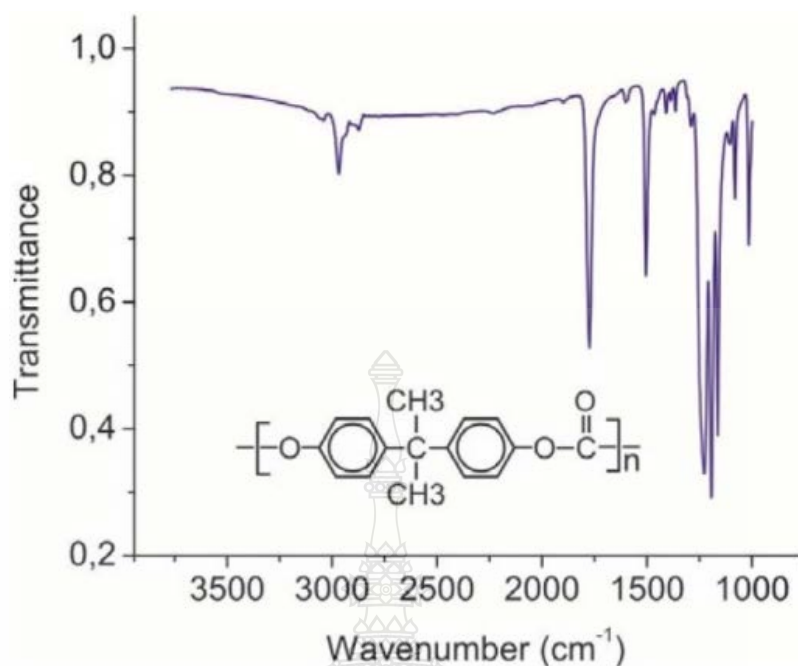
อุณหภูมิไหลตัว (Flow Temperature ; T_f) คือจุดที่อุณหภูมิของพอลิเมอร์กึ่งผลึกถูกทำให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลายพอลิเมอร์จะเกิดการไหลตัวและกลายเป็นของเหลวซึ่งพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลต่ำกว่า 500,000 g/mol จะสามารถสังเกตเห็นได้

การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบกับสารมาตรฐานเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ Differential Scanning Calorimetry (DSC) [15]

การวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติทางเคมีเป็นวิธีการหนึ่งที่ต้องทำการตรวจสอบในระหว่างการผลิตเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์และในทางวิจัยก็จะเป็นที่จะต้องทำการทดสอบความบริสุทธิ์และส่วนผสมของวัสดุเช่นเดียวกัน โดยวิธีการวิเคราะห์ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)



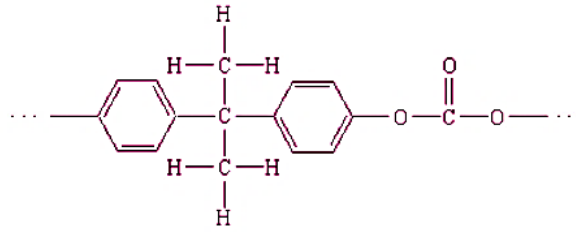
รูปที่ 2.5 วิธีการวิเคราะห์ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) [15]

2.2 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate , PC) [13]

พอลิคาร์บอเนตเป็นพลาสติกที่ได้มีการผลิตครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1953 โดยบริษัท Bayer และบริษัท General Electric โดยได้ริเริ่มการใช้งานในเชิงพาณิชย์ในปลายปี ค.ศ. 1953 จัดอยู่ในพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ประเภทสัณฐานที่มีความโปร่งใสสูงและจุดเด่นอีกข้อหนึ่งของพอลิคาร์บอเนต คือ สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อความร้อนได้สูง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกจึงเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมต่างๆ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

2.2.1 โครงสร้างของพอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ Aliphatic Polycarbonates และ Aromatic Polycarbonates โดยในส่วนของ Aliphatic Polycarbonates มักจะไม่พบในทางการค้า ทั้งสองชนิดมีโครงสร้างภายในแบบ Amorphous ในส่วนของ Aromatic Polycarbonates จะมีคุณสมบัติที่ค่อนข้างมีความเหนียวและแข็งแรงเป็นพอลิเมอร์วิศวกรรมที่มีประโยชน์มากที่สุด โครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 2.6

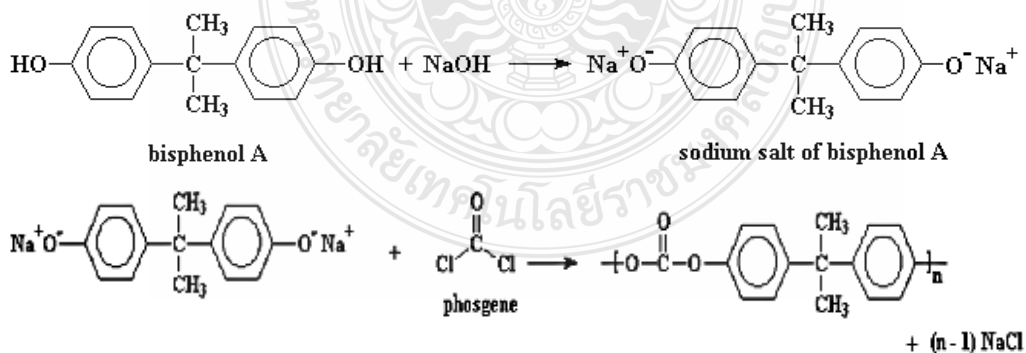


รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต [17]

พอลิคาร์บอเนตเป็นเทอร์โมพลาสติกเชิงวิศวกรรมผลิตจากการรวมตัวของเกลือโซเดียมของบิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) และฟอสจีน กรณีที่ใช้เป็นสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์มาก จะได้พอลิเมอร์ใสเหมือนน้ำ แต่ถ้าใช้สารตั้งต้นบริสุทธิ์น้อยลง จะได้พอลิเมอร์สีคล้ำสีเหลืองอ่อนๆ พอลิคาร์บอเนตค่อนข้างจะไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป แม้จะมีโครงสร้างใกล้เคียงกันก็ตาม ก็ละลายได้เฉพาะอัสทอนเท่านั้น จึงสามารถแยกส่วนที่เป็นผลึกออกมาได้ แต่อย่างไรก็สามารถละลายได้ใน คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และส่วนพวก อะซีโตน , เบนซีน , คาร์บอนเตตระคลอไรด์ จะทำให้พอลิคาร์บอเนตพองตัว แต่ไม่ถึงกับละลาย

2.2.2 การสังเคราะห์

Interfacial Process เป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิด 2 เฟส แยกออกจากกันในของเหลวเมื่อเกิดปฏิกิริยา วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมากถึงร้อยละ 95 ในทางการค้าการผลิตพอลิคาร์บอเนตเตรียมจากสารละลาย Bisphenol A และ Sodium Hydroxide จะได้เกลือโซเดียมของ Bisphenol A แล้วจึงนำมาทำปฏิกิริยากับก๊าซ Phosgene ดังปฏิกิริยาที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีในการสังเคราะห์พอลิคาร์บอเนต [17]

2.2.3 สมบัติทั่วไปของพอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตเป็นพลาสติกที่มีหมู่คาร์บอเนต (-O-CO-O-) ในสายโซ่หลักจึงทำให้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ประมาณ 145 °C อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) ประมาณ 267 °C มีความโปร่งใสสูงใช้งานที่อุณหภูมิกว้าง ตั้งแต่ -100 ถึง 145°C อัตราการหดตัวต่ำทนต่อแรงกระแทกสูงได้ดี สมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีมาก ทนสารเคมีและรอยขีดข่วนต่ำถ้าใช้งานกลางแจ้งโดยไม่มีสารป้องกันแสงอัลตราไวโอเลตนานๆ จะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เพราะ โมเลกุลของพอลิคาร์บอเนต มีความยืดหยุ่นพอสมควร เนื่องจากมี (-O-) อยู่ในสายโซ่หลัก ทำให้สามารถรับและกระจายแรงกระแทกได้สูงก่อนแตกหัก ทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิง กรดเจือจาง และแอลกอฮอล์แต่ไม่ทนต่อกรดแก่ ต่าง และสารละลายเบนซีน ติดไฟได้ช้า เมื่อดึงออกจากเปลวไฟสามารถดับเองได้ ขณะอยู่ในเปลวไฟให้เขม่าและกลิ่นฟีนอล ความหนืดสูงมีค่า MFI ประมาณ 1:10 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิ 300°C น้ำหนักกด 11.8 กิโลกรัม จัดเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีความสำคัญ มีความทนต่อแรงกระแทกดีเยี่ยม มีความโปร่งใส ทนต่อสภาพภายนอก มีเสถียรภาพของรูปร่างสูง สมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม

1) ความทนต่อความร้อน (Thermal Stability) ความทนต่อความร้อนจะเป็นตัวบ่งชี้บ่งบอกที่สำคัญของพอลิคาร์บอเนตสามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ 130 ถึง 1350 °C และทนต่อความเย็นถึง -20 °C สำหรับพอลิเมอร์แห้ง (Dry Polymer) สามารถทำให้ละลายได้ที่อุณหภูมิ 235 °C พอลิคาร์บอเนตสามารถป้องกันการติดไฟได้โดยธรรมชาติ แต่อาจจะทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additive)

2) คุณสมบัติเชิงกล พอลิคาร์บอเนตทนต่อแรงดึง และแรงกระแทก แต่ข้อเสียของพอลิคาร์บอเนต คือ ชิ้นงานที่มีความหนา ความแข็งแรงจะต่ำกว่าชิ้นงานบางๆ เนื่องจากปัญหาเกิดความเครียดตกค้างภายในชิ้น คุณสมบัติต่างๆ เช่น การทนต่อแรงดึงยืด การทนต่อแรงกระแทก การโค้งงอ และการยึดตัวนี้จะเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มมากกว่า 22,000 หลังจากนั้นจะเพิ่มเพียงเล็กน้อยส่วนความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นต่อไปอีก

3) สมบัติทางแสง พอลิคาร์บอเนต จะมีดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) อยู่ที่ประมาณ 1.584 เพราะมีสมบัติเป็นอะโรมาติกมาก พอลิคาร์บอเนตเกรดที่ใสไม่มีสีจะมีการซึมผ่านของแสงประมาณ 89% ในช่วงที่มองเห็นด้วยตา (Visible Range) และสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดสีเหลืองเกิดขึ้น แต่ปรากฏการณ์นี้สามารถป้องกันได้โดยการเติมสารต้านทานต่อแสงอัลตราไวโอเลต

4) ความเป็นผลึกและโครงสร้าง สมบัติทางแสงของพอลิคาร์บอเนตโดยปกติพอลิคาร์บอเนตจะมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐานแต่พอลิเมอร์อาจจะกลายเป็นแบบผลึกได้ที่บาง

อุณหภูมิ โดยการให้ความร้อนนานขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นและถ้าจะให้เกิดเร็วขึ้น จะใช้ตัวทำละลายหรือระบบของตัวทำละลาย เช่น อะซิโตนหรือการทำให้เป็นฟิล์มยืด หรือทำให้เป็นเส้นใยที่ 186 °C พอลิคาร์บอเนตจะมีความเป็นผลึกสูงหลอมละลายที่ 260°C มีการซึมผ่านของแก๊สต่ำและมีความต้านทานสารละลายสูง

5) พฤติกรรมการหลอมเหลว Bisphenol A Polycarbonate ที่เป็นอสัณฐานจะเกิดการเสียรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิปกติที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปประมาณ 270 ถึง 315°C และช่วงเวลาที่เกิดความเค้น (Shear Rate) อุณหภูมิประมาณ 280°C ขึ้นไป ความหนืดของการหลอมเหลว (Melt Viscosity) สามารถทำให้ลดลงและปรับปรุงพฤติกรรมไหลได้โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิการผลิต

6) พฤติกรรมการดูดความชื้น พอลิคาร์บอเนตเป็นพลาสติกในกลุ่มที่สามารถดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ดี ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตจึงต้องอบไล่ความชื้นในเม็ดพลาสติกก่อน ให้เหลือความชื้นน้อยกว่า 0.02% โดยในการอบควรใช้อุณหภูมิลมหมุนเวียนประมาณ 120 °C เป็นเวลา 6 ถึง 8 ชั่วโมง และในตัวเครื่องจักรที่ใช้ควรมีช่องระบายอากาศเพื่อใช้ระบายความชื้นอีกทางหนึ่ง

2.2.4 การใช้งานพอลิคาร์บอเนตในปัจจุบัน

พอลิคาร์บอเนตนั้นเป็นพลาสติกที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปได้ค่อนข้างหลากหลาย ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตได้แก่ กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding) กระบวนการหล่อ (Casting) การใช้งานพอลิคาร์บอเนตจึงมีขีดจำกัดบางประการอยู่ แต่ยังคงมีความสำคัญกับอุตสาหกรรมต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ พอลิคาร์บอเนตส่วนใหญ่จะใช้สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติด้านความปลอดภัยของส่วนรวมเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและมีคุณสมบัติทนความร้อนและทนไฟก็ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์ดแวร์ไฟฟ้าและการสื่อสารโทรคมนาคม นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนในตัวเก็บประจุสูงได้อีกด้วย

2) วัสดุก่อสร้าง ผู้บริโภคส่วนมากได้มีการใช้งานพอลิคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น สำหรับช่องโพร่งใส กระงกแบนหรือโค้ง

3) ในงานจัดเก็บข้อมูล รูปแบบที่สำคัญของพอลิคาร์บอเนตคือการผลิตของแผ่นดิสก์ ดีวีดีและแผ่นดิสก์ แผ่นเหล่านี้จะถูกผลิตขึ้นด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยพอลิคาร์บอเนตจะถูกทำการฉีดเข้าไปในโพรงแม่พิมพ์ที่มีด้านหนึ่งประทับตราโลหะที่มีภาพลบบของข้อมูลแผ่นดิสก์ในขณะที่ด้านอื่นๆ ที่เป็นผิวเงาผลิตภัณฑ์ทั่วไปของแผ่นภาพยนตร์รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการโฆษณา (สัญญาณแสดงการป้องกันโปสเตอร์)

4) ในส่วนของยานยนต์ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ พอลิคาร์บอเนตจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป สามารถผลิตพื้นผิวเรียบมาก ชิ้นงานที่ได้เหมาะสำหรับการตกแต่งและในส่วนการสะท้อนแสง ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิคาร์บอเนตเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและทนต่อแรงกระแทกสูง พอลิคาร์บอเนตเป็นวัสดุที่โดดเด่นสำหรับการทำเลนส์ไฟหน้ายานยนต์ แต่ไฟหน้ายานยนต์ต้องมีการเคลือบพื้นผิวด้านนอกเนื่องจากการทรอยขีดข่วนต่ำและความไวในการย่อยสลายสีม่วงเป็นพิเศษ

5) ในทางการแพทย์ พอลิคาร์บอเนตหลายเกรดที่ใช้ในทางการแพทย์ ถูกทำการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO10993-1 และ USP ขึ้นมาตรฐาน VI (บางครั้งเรียกว่า PC-ISO) Class VI โดยมาตรฐานเหล่านี้เป็นที่เข้มงวดมากที่สุดในการจัดอันดับ USP เกรดเหล่านี้จะต้องสามารถฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120°C มีความทนทานต่อรังสีแกมมา อย่างไรก็ตามงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ชี้ให้เห็นปัญหาในทางชีวภาพ จึงเป็นข้อจำกัดของพลาสติกทุกชนิดที่เกี่ยวกับการใช้งานทางการแพทย์

2.3 วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุคอมโพสิต (Composite materials) [7] ความหมายกว้างๆ ของวัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) อาจหมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้นเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ

2.3.1 วิวัฒนาการของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบในธรรมชาติ (Natural composite) ที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์เป็นระยะเวลา ยาวนานแล้ว ได้แก่ ไม้ (Wood) ที่ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) ผสมเฮมิ-เซลลูโลส (Hemicellulose) ในเมทริกซ์ลิกนิน (Lignin) สำหรับตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นในยุคก่อนประวัติศาสตร์ เช่น อิฐโบราณที่เตรียมขึ้นจากการผสมฟางข้าวกับดินเหนียว เส้นฟางข้าวจะช่วยให้ดินเหนียวมีความแข็งแรงมาก จนสามารถใช้ก่อสร้างกันขึ้นเป็นผนังเพื่อสร้างเป็นที่กำบังภัยได้ ต่อมาเมื่อมนุษย์เริ่มพัฒนารูปแบบของการดำรงชีพเป็นการเลี้ยงสัตว์และเพาะปลูก วัสดุจากธรรมชาติใกล้ตัว

ต่างๆ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากไม้ หนังสัตว์ เอ็น และกระดูกสัตว์ ถูกนำมาอัดซ้อนประกบกันด้วยกา
วธรรมชาติเพื่อให้ได้เป็นวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะในการใช้งาน โดยจะนำพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติที่เป็น
สารจำพวกโปรตีนเซลลูโลสคอลลาเจน และเคอราทิน มาประกบกันให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบ ที่มี
สมบัติแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งาน เช่น การทำคันทันและรถเทียมม้าจากชั้นไม้ที่ถูกอัดเชื่อมด้วย
กาวธรรมชาติที่ได้จากการเคี้ยวหนังปลา เขาสัตว์และกระดูก นอกจากนี้ ยังพบการใช้ซีเมนต์(Cement)
เป็นวัสดุประสานในการก่อสร้างพีระมิดในอียิปต์ วิหารทรงกลม และโรงละครสมัยโรมัน วัสดุเชิง
ประกอบในยุคปัจจุบันเริ่มต้นราวกลางคริสต์ศตวรรษที่ 20 เป็นยุคที่ความรู้ความก้าวหน้าทาง
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการพัฒนา ในระยะต้นของศตวรรษพอลิเมอร์
สังเคราะห์ชนิดแรกได้ถูกผลิตและจำหน่ายเชิงการค้า คือ เรซินฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol
formaldehyde resin) หรือเรซินฟีนอลิก (Phenolic resin) ต่อมาได้มีการเตรียมพอลิเมอร์สังเคราะห์
ชนิดอื่นๆ ได้แก่ เรซินยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวและอีพอกซี ตามลำดับ ในเวลานั้นมี
การพัฒนากระบวนการผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากๆ จากแก้วหลอมเหลว ที่เรียกว่าเส้นใย
แก้ว (Glass fiber) ออกสู่ตลาดเพื่อใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน การนำวัสดุทั้งสองประเภทดังกล่าวมา
ประกบกลายเป็นจุดเริ่มต้นของนวัตกรรมการผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ในยุคปัจจุบัน ในระยะ
เริ่มต้น เนื่องจากความต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงและขึ้นรูปให้มีรูปร่างซับซ้อนได้ จึงกลายเป็น
แรงผลักดันให้เกิดการนำเอาเส้นใยแก้วที่มีความแข็งแรงสูงมาเสริมแรงให้กับเรซินพอลิเมอร์ หรือที่รู้จัก
กัน คือ พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (Glass fiber-reinforce plastic, GFRP, FRP, GRP) และมีชื่อ
ทั่วไปคือ ไฟเบอร์กลาสส์ (Fiberglass) ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ทนแรงกระทำขณะใช้เป็นแม่แบบ
จำลองในการขึ้นรูปขึ้นงานได้ และในเวลาต่อมาวัสดุเชิงประกอบก็เริ่มมีการพัฒนาเพื่อการใช้งานมากขึ้น
เรื่อยๆ โดยใช้เป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงมากกว่าการใช้เรซินพอลิเมอร์เพียง
อย่างเดียว เช่น ตัวเรือ รวมไปถึงชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องบินด้วย แม้ว่าการเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้
เป็นเมทริกซ์จะทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติแตกต่างกันตามจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้งาน แต่
ก็ทำให้ต้องปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีการผลิตให้เหมาะสมกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่นำมาใช้ด้วย ในเวลา
เดียวกันนั้นก็เริ่มมีการพัฒนาเทคโนโลยีของยางขึ้นการบ่ม (Curing) ยางธรรมชาติกับกำมะถันทำให้เกิด
การเชื่อมโยงของโมเลกุลยางธรรมชาติเกิดเป็นยางที่มีสมบัติยืดหยุ่น นอกจากนี้ การนำผงถ่านดำ
(Carbon black) และเส้นใยอื่นๆ มาเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ยางจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของยาง
และได้วัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานได้มากขึ้น จึงสามารถนำมาใช้เป็นยาง
ล้อรถยนต์และเครื่องบินได้ช่วงกลางของคริสต์ศตวรรษที่ 20 เป็นช่วงที่เกิดสงครามโลกครั้งที่สองขึ้น ทำ
ให้ความต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และ
ยุทธโประกรณ์ต่างๆ วัสดุเชิงประกอบจึงเป็นสิ่งที่ต้องการเป็นอย่างมาก นอกจากจะนำวัสดุเชิงประกอบมา

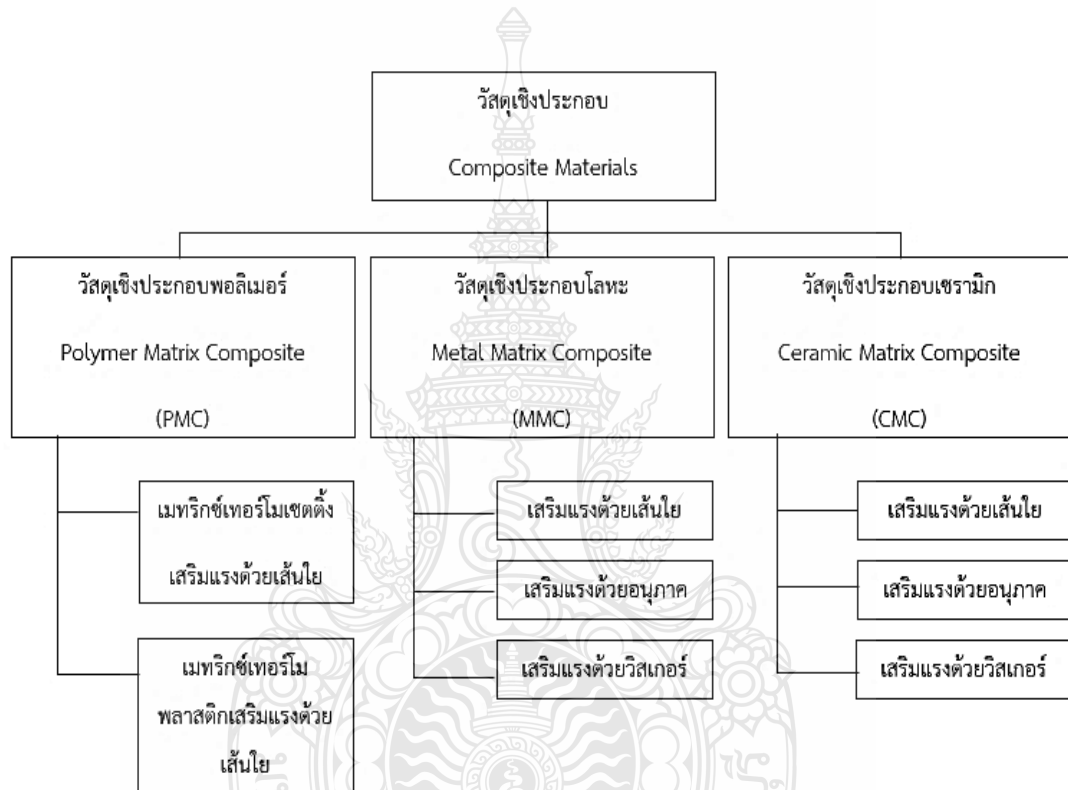
ใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบแล้วยังนำมาใช้ในงานเกี่ยวกับกิ่งโครงสร้างอื่นๆ อีกด้วย เช่น การใช้เป็นโคมใส่สายอากาศเรดาร์ที่ต้องการทั้งความแข็งแรงและสมบัติที่ไม่ดูดซับเรดาร์ อีกทั้งภาวะสงครามทำให้เกิดการขาดแคลนวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ โลหะและยางการพัฒนาเทคโนโลยีจึงเป็นไปอย่างเร่งด่วน เพื่อสังเคราะห์วัสดุที่สามารถใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติวัสดุเชิงประกอบจึงมีบทบาทมากขึ้นและมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทั้งการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบใหม่ๆ และการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 สิ้นสุดการนำวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มาใช้งานทั่วไปมีมากขึ้น เช่น การนำเส้นใยแก้วเสริมแรงพอลิเอสเทอร์มาใช้ทำเป็นเรือขนาดบุคคล ท่อที่ไม่เกิดการกัดกร่อน อ่างอาบน้ำ และเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ รวมถึงในอุตสาหกรรมรถยนต์ที่เริ่มขยายตัวมากขึ้นและต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบาและทนทานต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ทั้งการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ ที่เป็น เทอร์โมพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และกรรมวิธีการผลิตเส้นใยที่มีความแข็งแรงชนิดต่างๆ เช่น การผลิตเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ที่มีความแข็งแรงสูง และสามารถนำมาทำเป็นเส้นใยเสริมแรงทำให้เกิดเป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber-reinforce plastic, CFRP) ขึ้นวัสดุใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้เกิดตัวเลือกที่หลากหลายต่อการนำไป ใช้งานเนื่องจากสมบัติของวัสดุเชิงประกอบสามารถออกแบบให้เป็นไปตามความต้องการได้โดยปรับเปลี่ยนวัสดุเริ่มต้นที่ใช้ ในขณะที่กระบวนการขึ้นรูปมีการพัฒนาอย่างเหมาะสมทำให้สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบให้มีรูปร่างที่ต้องการได้ ทำให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบยุคใหม่ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานต่างๆ ไปจนถึงงานที่ต้องการความแข็งแรงมากๆ ได้ช่วงครึ่งหลังคริสต์ศตวรรษที่ 20 ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียังคงดำเนินต่อไป พร้อมกับความต้องการหาวัสดุที่สามารถทนความร้อนได้สูงมากเพื่อใช้สำหรับอุตสาหกรรมอากาศยาน เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบินและดาวเทียมที่ปฏิบัติหน้าที่ในอวกาศ ทำให้ต้องมีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบที่มีเมทริกซ์เป็นโลหะเนื่องจากยังไม่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ชนิดใดที่สามารถทนความร้อนที่สูงระดับนั้นได้ โดยวัสดุเชิงประกอบโลหะในระยะเริ่มแรกเป็นการนำเอาเส้นใยอนินทรีย์ เช่น เส้นใยคาร์บอน และซิลิกอนคาร์ไบด์ มาเสริมแรงให้แก่เมทริกซ์อะลูมิเนียม ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีขึ้นและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง จากนั้นก็เริ่มมีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบที่มีเมทริกซ์เป็นเซรามิกหรือวัสดุเชิงประกอบเซรามิก เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงเมทริกซ์อะลูมินา เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงเมทริกซ์คาร์บอน เป็นต้น เพื่อประยุกต์ใช้ในงานที่สัมผัสความร้อนสูง และต้องทนทานต่อการกัดกร่อน สำหรับความก้าวหน้าของวัสดุเชิงประกอบที่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ จะเป็นยุคที่พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติหลากหลายได้มีการผลิตขึ้นมามากมาย รวมทั้งการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงที่เรียกว่าเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) หรือที่รู้จักกันในชื่อทางการค้าว่า เคพลาร์ (Kevlar) และเส้นใยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงพิเศษ (Ultrahigh molecular weight

polyethylene,UHMWPE) ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติดีมากขึ้นและสามารถนำไปใช้งานที่ต้องการสมบัติเฉพาะตัวที่ไม่สามารถหาได้จากการใช้วัสดุเพียงชนิดเดียวช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 20 จนถึงปัจจุบันเรียกได้ว่าเป็นยุคแห่งวัสดุเชิงประกอบขั้นสูง (Advance composite materials) เนื่องจากนักวิทยาศาสตร์สามารถพัฒนาวัสดุเชิงประกอบและกระบวนการผลิตให้เกิดเป็นวัสดุที่มีสมบัติต่างๆ ที่ตอบสนองความต้องการและการประยุกต์ใช้ได้มากมาย ทำให้เกิดการขยายตลาดของวัสดุเชิงประกอบขั้นในวงกว้าง โดยการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ให้มีสมบัติที่ดีมากขึ้น ทนความร้อนสูงขึ้น เพื่อใช้ในงานโครงสร้างและการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์และอวกาศยานได้ ส่วนวัสดุเชิงประกอบโลหะและวัสดุเชิงประกอบเซรามิกเริ่มถูกนำมาใช้งานทั่วไป เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูงมากขึ้น เช่น เครื่องมือต่างๆ จนถึงอุปกรณ์กีฬา เป็นต้นนอกจากนี้ยังมีการนำเอาวัสดุมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปมาเสริมสมบัติซึ่งกันและกัน เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบผสม (Hybrid composite) และการพัฒนาเทคนิคการผสมวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปให้มีความเข้ากันได้ระดับอนุภาคหรือที่เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบนาโน (Nano-composite) เพื่อทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกันในวัสดุตั้งจะเห็นได้ว่าภายในเวลาเพียงไม่ถึงหนึ่งศตวรรษ วัสดุเชิงประกอบขั้นสูงก้าวเข้ามาเป็นวัสดุที่มีบทบาทอย่างมากด้านวัสดุศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงหลังปีคริสต์ศักราช 1970 ที่การพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบเป็นไปอย่างก้าวกระโดด ในปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาจะเน้นไปที่การพัฒนาเชิงควบคุมคุณภาพการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุองค์ประกอบและการเสริมสมบัติของวัสดุองค์ประกอบบางอย่าง เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

2.3.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เมทริกซ์และสารเสริมแรง ดังนั้นถ้าจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymermatrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิกส์ (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และวิสเกอร์ (Whisker) สารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบสามารถถูกจำแนกตามลักษณะเป็นอนุภาค เส้นใย และวิสเกอร์ อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปจะเรียกสารเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใย ซึ่งอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Short fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000

เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยอะรามิต เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์อาจเป็นเส้นใยแก้วเส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น ส่วนวิสเกอร์เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตรและความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวของผลึกเดี่ยว (Elongated single crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อน (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์

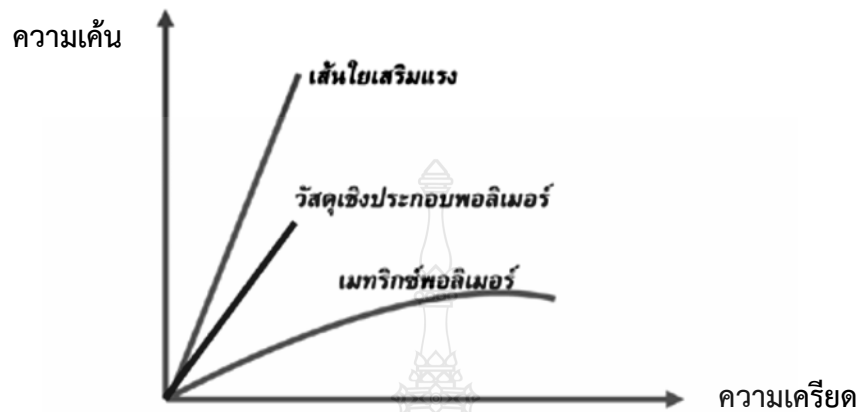


รูปที่ 2.8 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ [7]

2.3.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

โดยธรรมชาติ พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำๆ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความ

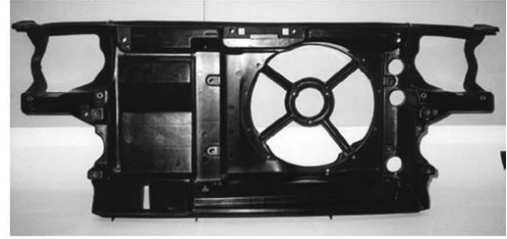
แข็งแรงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่างดังแสดงรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ [7]

แสดงถึงสมบัติเชิงกลอย่างง่ายของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เมื่อให้แรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสมบัติเชิงกลนี้จะเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกันทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ากับรูปเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติม (Filler) วัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบมาใช้สำหรับงานโครงสร้างบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนักได้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ต่างๆ สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) และเมทริกซ์-เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห และมีสมบัติแข็งเปราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล หรือการบ่มแล้วจะเกิดการคงรูปและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว มีสมบัติเหนียวและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม พฤติกรรม

เชิงความร้อนนี้จะมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบสำหรับเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจะเป็นการผสมสารเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ ก่อนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแหและหลังจากที่ปฏิกิริยาลิ้นสุดวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการคงรูปซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ในขณะที่การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่เมทริกซ์เป็นเทอร์โมพลาสติกนั้น จะใช้หลักการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวและขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยถ้าหลังจากคงรูปแล้วได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก การที่จะเลือกใช้เมทริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบ วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตอาจอยู่ในรูปของชิ้นงานกึ่งสำเร็จหรือพรีเพรก (Prepreg) เพื่อความสะดวกในการขึ้นรูป ถ้าเป็นพรีเพรกของวัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงจะเป็นเส้นใยที่อยู่ในเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง แต่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเพียงบางส่วนเท่านั้น และเมื่อจะนำมาขึ้นรูปเป็นรูปร่างที่ต้องการแล้วจึงจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลที่สมบูรณ์ พรีเพรกลักษณะนี้อาจมาในรูปแบบแผ่น ที่เรียกว่า พรีเพรกผสมเสร็จแบบแผ่น (Sheet molding compound, SMC) สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะแผ่น และพรีเพรกผสมเสร็จแบบหนา (Bulk molding compound, BMC) จะใช้สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีรูปทรง ความแตกต่างกันของพรีเพรกทั้งสองชนิดจะอยู่ที่ความยาวของเส้นใยเสริมแรงและความหนืดของเมทริกซ์ พรีเพรกแบบแผ่นมักจะทำจากเส้นใยยาวและมีความสามารถในการไหลของเมทริกซ์น้อยกว่า ส่วนพรีเพรกแบบหนามักจะทำจากเส้นใยสั้น และความสามารถในการไหลสูงเพื่อความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับพรีเพรกของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกนั้น จะอยู่ในรูปแบบที่เป็นเส้นใยแก้วสั้นๆ ในเมทริกซ์พอลิเอเลฟิน ที่เรียกว่าพรีเพรกผืนแก้วเทอร์โมพลาสติก (Glass mat thermoplastic, GMT) โดยพรีเพรกเมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวของเมทริกซ์และทำให้เป็นรูปร่างที่ต้องการก่อนที่จะถูกทำให้เย็นตัวลงและคงรูปไฟเบอร์กลาสส์หรือไฟเบอร์ เป็นตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่มีเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่มีส่วนแบ่งทางการตลาดสูง โดยทั่วไปหมายถึงเมทริกซ์พอลิเอสเตอร์หรือไวนิลเอสเตอร์ ไฟเบอร์กลาสส์จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลาง น้ำหนักเบา เช่น หลังคาถระกระบะเฟอร์นิเจอร์ขนาดเล็ก เป็นต้น ส่วนเมทริกซ์อีพอกซีจะถูกใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีกรนำเส้นใยเสริมแรงอื่นๆ ได้แก่ เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิดและมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยแก้วมาใช้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงสูงมาก ส่วนวัสดุเชิงประกอบเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติกมีส่วนแบ่งทางการตลาดน้อยกว่า มักใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียวทนทาน หรือนำไปอัดซ้อนกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น



รูปที่ 2.10 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในรถยนต์ [7]

2.3.4 องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต [14]

คอมโพสิตประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ

1) ส่วนเสริมแรง (Reinforced part) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง โดยที่ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (Fiber) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fiber) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ

2.) เมทริกซ์ (Matrix) คือ ส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง นอกจากนี้เมทริกซ์จะทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น

วัสดุเมทริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย ซึ่งอาจแบ่งชนิดของวัสดุเมทริกซ์ได้ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับส่วนเสริมแรงขึ้นรูปได้ง่าย ตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl esters) ฟีนอลิก (Phenolics) และพอลิอิมิด (Polyimides) เริ่มจากการใช้มอนอเมอร์ (Monomers)

หรือ โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิตน้อยกว่า แม้ว่าจะมีแนวโน้มการประยุกต์เป็นคอมโพสิตมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า ทนอุณหภูมิต่ำกว่า แต่มีข้อดี คือ สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง

การใช้วัสดุโลหะเป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิตนิยมใช้กับเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูงแต่มีข้อจำกัด คือ น้ำหนักของวัสดุสูง ตัวอย่างเมทริกซ์โลหะที่นิยมใช้ คือ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไททาเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) และทองแดง (Copper) ซึ่งการใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมทริกซ์นิยมใช้กับคอมโพสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อสารเคมี

วัสดุเสริมแรง Fiber reinforced plastics (FRP) [16] องค์ประกอบหลักของวัสดุเสริมแรงในส่วนต่างๆ ของพลาสติกเสริมแรงรวมทั้งการยึดเกาะระหว่างผิวของส่วนผสมต่างๆ นั้นทำให้เกิดคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น Fiber reinforced plastics (FRP) จะมีส่วนผสมหลัก 3 ส่วนคือ 1. Reinforcement/Filler จะประกอบด้วย Fibrous (Fiberglass , Carbon) , Powder (Calcium , Kaolin) และ Flake (Mica) 2. Resins จะประกอบด้วย พลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตติงและกลุ่มเทอร์โมพลาสติก 3. Additives คือสารผสมเติมแต่งที่ช่วยให้พลาสติกเสริมแรงและมีสี สันสวยงามและทนต่อแสงแดดหรือการกัดกร่อน

2.3.5 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

สามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

1) คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2) คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบหรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3) คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก

นอกจากนี้ สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต ดังนี้

1) คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีแอพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2) คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต [24]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ	1. วัตถุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูป คอมโพสิตมี
2. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก	ราคาสูง
3. สามารถทำให้มีสมบัติแข็งแรงเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้	2. มีสมบัติในแนวขวางของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงต่ำ
4. มีอายุการใช้งานนาน ด้านทานการสึกกร่อน	3. มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ
5. สามารถเพิ่มหรือลดสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า	4. มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อมเมื่อส่วนที่เป็นเมทริกซ์เกิดการเสียหาย
	5. ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
	6. ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต

2.3.6 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต [17]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิตสามารถประยุกต์ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aero spacecraft) อุปกรณ์กีฬา (Sporting goods)

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วน น้อยขึ้นไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุคอมโพสิต [18]

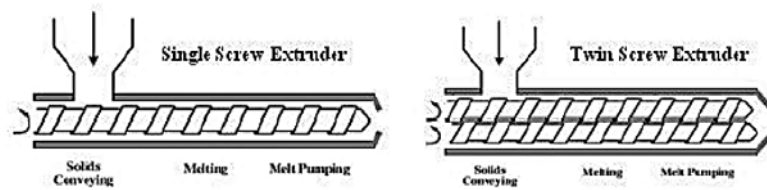
อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก ใบพัด ทางเสื่อ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ สถานีอวกาศ
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ ดาดฟ้า
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝ้าผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โต๊ะ เก้าอี้ บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจรไฟฟ้า กล้องคอมพิวเตอร์

2.4 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ [18]

พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกสามารถหลอมได้ที่อุณหภูมิสูงดังนั้นจึงนิยมขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกที่อุณหภูมิสูงและบางครั้งอาจใช้ความดันร่วมด้วย ส่วนพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตสามารถขึ้นรูปได้โดยเริ่มต้นจากเติมพอลิเมอร์เหลวลงในแม่แบบ จากนั้นเติมการเพิ่มอุณหภูมิควบคู่กับการเติม Catalyst หรือใช้ความดัน เพื่อให้เกิดการแข็งตัว (Curing) วิธีการขึ้นรูปขึ้นงานพอลิเมอร์ที่ใช้งานแพร่หลายที่สุดคือการขึ้นรูปในแม่แบบ (moulding) ซึ่งมีด้วยกันหลายเทคนิค เช่น Extrusion Process, Injection Moulding, Compression Moulding, Transfer Moulding, Injection Moulding และ Blow Moulding นอกจากนี้ยังมีวิธีการขึ้นรูปแบบอื่นอีก เช่น Casting และ Vacuum Forming เป็นต้น

2.4.1 เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ (Twin Screw Extruder)

เครื่องหลอมอัดรีดเป็นเครื่องผสมสำหรับผสมพินเลอร์หรือสารเติมแต่งอื่นๆ เข้ากับพอลิเมอร์ในลักษณะแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ได้สารผสม (Compound) ที่มีคุณลักษณะและสมบัติตามต้องการนิยมใช้ชนิดเกลียวหอนคู่มากกว่าชนิดเกลียวหอนเดี่ยว โดยแสดงภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีด ดังรูปที่ 2.11 เนื่องจากเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหอนเดี่ยวมีประสิทธิภาพของการผสมที่ให้การกระจายตัวต่ำ จึงนิยมใช้เพื่อการผสมเบื้องต้นเท่านั้น



รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเกลียวหนอนคู่ [18]

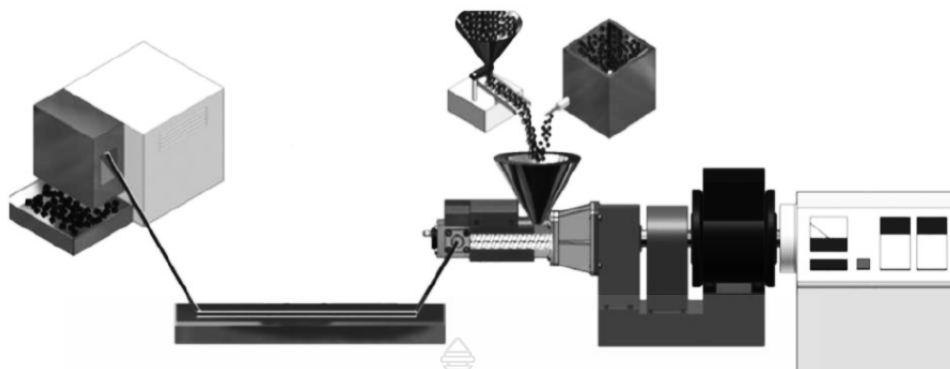
ตามหลักแล้วเทอร์โมพลาสติกทุกชนิดสามารถทำการหลอมอัดรีดได้ แต่มีข้อจำกัดคือ พลาสติกนั้นเมื่ออ่อนตัวต้องมีความหนืดสูง เพราะเมื่อพลาสติกผ่านหัวฉีดออกมา ต้องทรงรูปได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ไม่ไหลมารวมกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของพลาสติกให้เหมาะสมกับงานหลอมอัดรีด เพื่อให้การผสมมีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องคำนึงถึงการกำหนดตัวแปรต่างๆ ของเครื่องผสมด้วย ได้แก่ ความเร็วรอบของสกรู (Screw Speed) อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน (Pressure) ขนาดและความยาวของสกรู (Size) โดยนิยมแสดงด้วยอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D) นอกจากนี้ สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ถือเป็นสิ่งจำเป็นต้องพิจารณา โดยคำนึงถึงความคงทนต่อการใช้งาน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องทำการทดสอบให้ทราบถึงสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะความแข็งแรงของวัสดุ

2.4.2 กระบวนการอัดรีด (Extrusion Process) [19]

กระบวนการอัดรีดเป็นการขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่มีความต่อเนื่อง สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนและหลากหลาย สามารถขึ้นรูปได้ทั้งพลาสติกอ่อนและแข็ง ใช้ผลิตพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน การเติมสารเสริม การผสมสี และการผสมสารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์ โดยกระบวนการอัดรีดเริ่มจากเม็ดพลาสติกไหลลงสู่สกรู และลำเลียงพลาสติกไปตามการหมุนของสกรู โดยได้รับความร้อนจากแถบความร้อน และแรงเฉือนของสกรู ทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวภายในห้องหลอมเหลว และเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเข้าสู่หัวขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปถูกนำสู่ระบบหล่อเย็นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงรูป เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามสกรูที่ใช้ คือ

- เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw Extruder) เหมาะสำหรับงานทั่วไป
- เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw Extruder) ดังรูปที่ 2.12 เหมาะสำหรับงาน

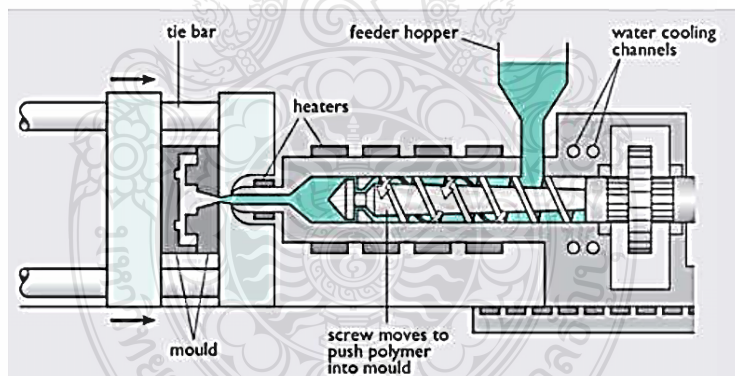
ต้องการผสมที่ดีหรือ ต้องการปริมาณการผลิตสูงๆ



รูปที่ 2.12 กระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ [36]

2.5 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยการฉีด (Injection Moulding) [19]

กระบวนการ Injection Moulding รูปที่ 2.13 เป็นกระบวนการที่ใช้แพร่หลายที่สุดในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ สามารถผลิตได้รวดเร็วเนื่องจากผลิตแบบอัตโนมัติได้ ทำให้ประหยัดค่าแรงงาน อีกทั้งสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เบา



รูปที่ 2.13 กระบวนการ Injection Moulding [20]

2.5.1 เครื่องฉีดพลาสติก [19]

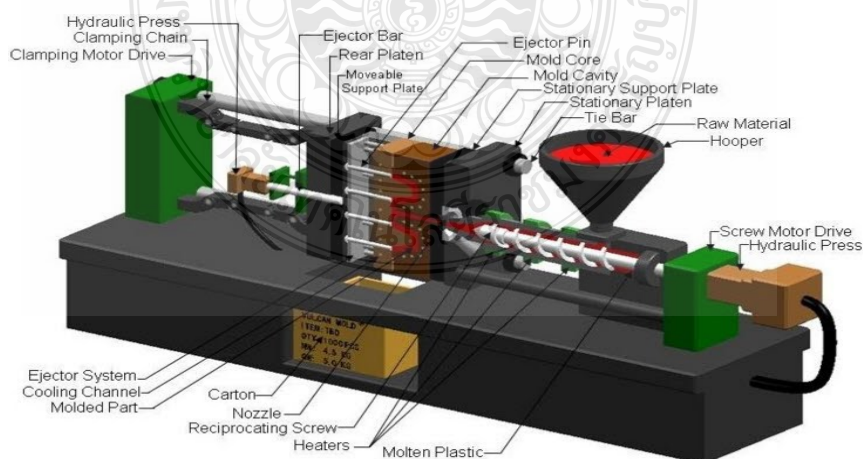
โดยทั่วไปแล้ว เครื่องฉีดพลาสติก จะมีโครงสร้างส่วนประกอบสำคัญ ซึ่งสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วน คือ

1) ส่วนชุดฉีด (Injection Unit) จะทำหน้าที่ ดึงพลาสติกเข้าสู่กระบอกลอดหลอมเหลว แล้วส่งพลาสติกเหลวไปที่หัวฉีด และทำหน้าที่ในการฉีด และรักษาความดันย้ำ ซึ่งจะมีส่วนประกอบพื้นฐานดังต่อไปนี้ คือ

- หัวฉีด (Nozzle)
- สกรู (Screw)
- กระบอกลอด (Barrel)
- แผ่นความร้อน (Heater)
- กรวยเติมพลาสติก (Hopper)
- กระบอกสูบ และลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder and pistol)
- มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (drive motor)

2) ส่วนชุดปิด - เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) ทำหน้าที่ในการยึดแม่พิมพ์ทั้งสองส่วนเคลื่อนปิด - เปิดแม่พิมพ์ ให้แรงในการปิดแม่พิมพ์ หล่อเย็นชิ้นงานฉีดพลาสติก และปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ประกอบไปด้วยแผ่นยึดแม่พิมพ์ ซึ่งมีส่วนที่เคลื่อนที่ และอยู่กับที่ เพลาหน้าเลื่อน ระบบขับเคลื่อนปิด - เปิดแม่พิมพ์ และแผ่นยึดระบบขับเคลื่อน

3) ส่วนฐานของเครื่องฉีด(Base) ทำหน้าที่คอยรับน้ำหนักของชุดฉีด และชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ยึดติดอุปกรณ์ไฮดรอลิกทั้งหมดในเครื่อง และยังทำหน้าที่เป็นถังน้ำมันไฮดรอลิก โดยส่วนใหญ่แล้วตัวฐานเครื่อง จะทำด้วยเหล็กเหนียว ที่เชื่อมประกอบเข้าเป็นฐานเครื่องเพื่อความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักมาก ๆ ได้ดี

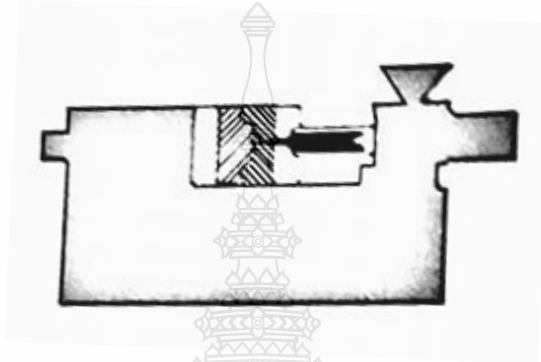


รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องฉีด

2.5.2 ลักษณะของเครื่องฉีด [22]

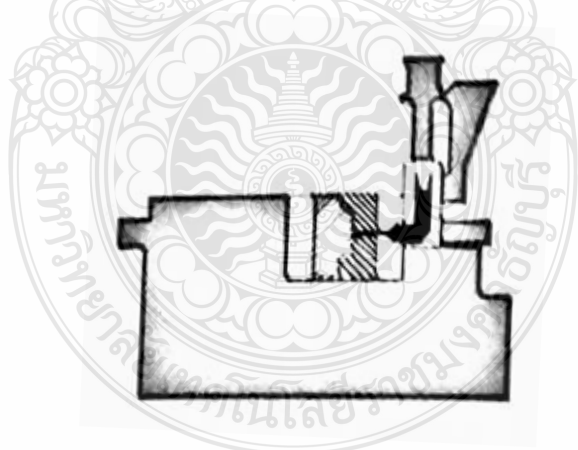
เครื่องฉีดพลาสติกมีหลายลักษณะ ซึ่งออกแบบเพื่อให้เหมาะสมในการทำงานและลักษณะการทำงานและลักษณะในการฉีด โดยสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของทิศทางการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด

แบบ ก เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โดยชุดฉีดจะวางอยู่ตามแนวนอนตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์ และพลาสติกเหลวจะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ตามแนวตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์



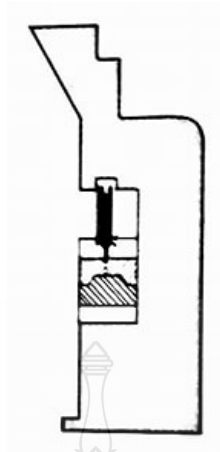
รูปที่ 2.15 ลักษณะการฉีดตามแนวนอน [22]

แบบ ข ถูกออกแบบมาเพื่อให้ง่ายต่อการทำงานโดยชุดฉีดจะถูกยกขึ้นให้อยู่ในแนวตั้งและพลาสติกเหลวจะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ตามแนวตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์



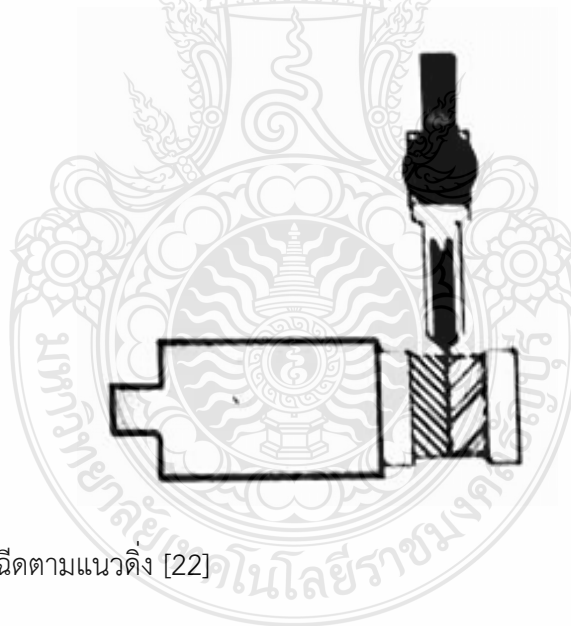
รูปที่ 2.16 ลักษณะการฉีดตามแนวนอน [22]

แบบ ค เหมาะสำหรับการฉีดหุ้มชิ้นส่วนอื่น การฉีดหุ้มด้านไขควง ด้ามมีด ด้ามประแจ หก เหลี่ยม โดยชุดฉีดจะตั้งอยู่ในแนวตั้งตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์และพลาสติกเหลวจะถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ในแนวตั้งฉากกับรอยประกบแม่พิมพ์



รูปที่ 2.17 ลักษณะชุดฉีดตามแนวตั้ง [22]

แบบ ง แบบนี้เหมาะกับการฉีดชิ้นงานที่บางแต่ยาวมากๆ ซึ่งพลาสติกจะไหลได้ดีกว่าแบบ ก โดยชุดฉีดจะตั้งอยู่ในแนวตั้งขนานกับรอยประกบแม่พิมพ์ และพลาสติกเหลวจะถูกฉีดลงในแนวตั้งเข้าตามรอยประกบแม่พิมพ์

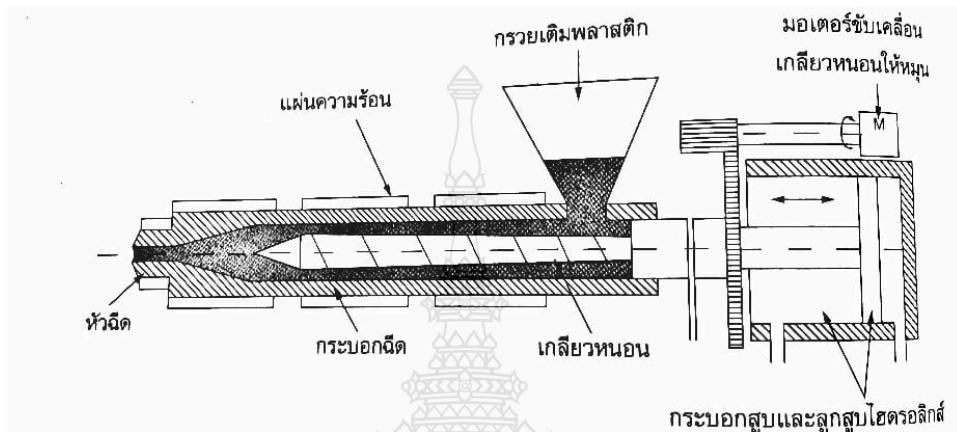


รูปที่ 2.18 ลักษณะชุดฉีดตามแนวตั้ง [22]

2.5.3 โครงสร้างของเครื่องฉีดพลาสติก

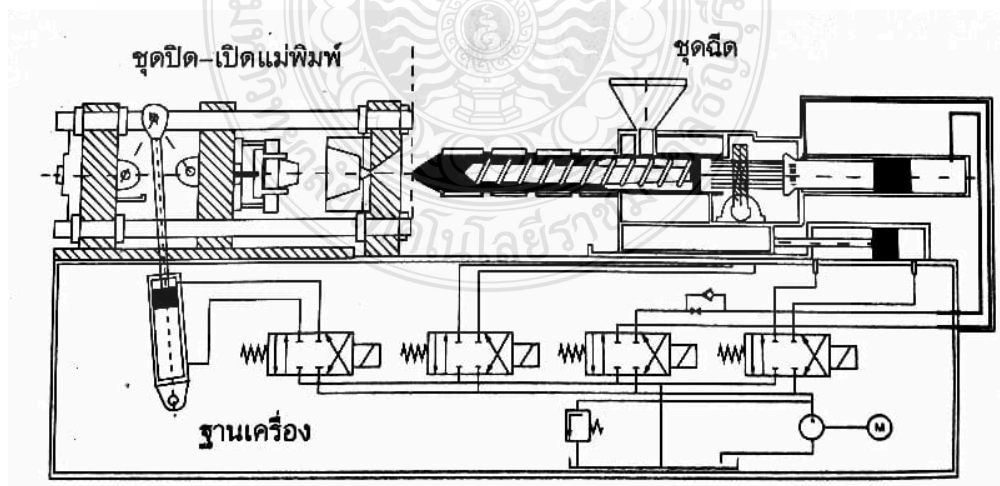
- 1) ชุดฉีด (Injection Unit) ทำหน้าที่ในการฉีดชิ้นงาน
 - (1) หัวฉีด (Nozzle)
 - (2) เกลียวหนอน (Injection Screw)
 - (3) ครอบอกฉีด (Barrel)

- (4) แผ่นความร้อน (Heater)
- (5) กรวยเติมพลาสติก (Hopper)
- (6) กระบอกสูบและลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulics Cylinder and pistal)
- (7) มอเตอร์ขับเคลื่อนเกลียวหนอนให้หมุน (Drive Moter)



รูปที่ 2.19 ชุดฉีด (Injection Unit) [22]

- 2) ชุดปิด - เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit) ทำหน้าที่ในการจับยึดแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เปิด - ปิด แม่พิมพ์ด้วยแรงที่กำหนด
- 3) ฐานเครื่อง (Base) ทำหน้าที่รับน้ำหนักของอุปกรณ์ทั้งหมดของเครื่องฉีด



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของเครื่องฉีดพลาสติก [22]

2.5.4 ขั้นตอนการฉีดพลาสติก [21]

การฉีดพลาสติกแบบ Injection Molding นี้เครื่องฉีดจะประกอบด้วยสกรู และเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กไปจนถึงชิ้นงานขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานได้หลายลักษณะงาน จึงทำให้มีความนิยมในการฉีดพลาสติกแบบนี้มาก ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนของการฉีดพลาสติกได้ 9 จังหวะ ดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าปิด โดยจะมีพารามิเตอร์คือ ความดัน (แรง) ความเร็ว และระยะทางในการเคลื่อนที่ปิดเข้าหากันของแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนมากจะแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่แม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่เริ่มเคลื่อนที่เข้าไปหาแม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่ โดยใช้ความเร็วที่ช้าเป็นระยะทางสั้นๆ ช่วงที่สองเป็นช่วงแม่พิมพ์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นเป็นระยะทางยาวๆ ช่วงที่สามเป็นช่วงที่แม่พิมพ์กำลังลดความเร็วลงในระยะทางที่เหลือไม่มากนัก ช่วงที่สี่เป็นช่วงป้องกันแม่พิมพ์เกิดความเสียหายก่อนที่แม่พิมพ์จะปิดสนิท และช่วงที่ห้าเป็นช่วงที่แม่พิมพ์ปิดสนิทหรือเรียกว่า ช่วงปิดล็อกแม่พิมพ์ ด้วยความดันหรือแรงที่สูงมาก

2) ขั้นตอนชุดฉีดหรือหัวฉีดเคลื่อนที่เข้าชนและแนบกับแม่พิมพ์ โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ ความดัน(แรง) และความเร็ว

3) ขั้นตอนสกรูเคลื่อนที่ตามแนวแกนโดยไม่มีการหมุน เพื่อขับเคลื่อนพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกฉีดให้ไหลออกจากหัวฉีดเข้าไปให้เต็มแม่พิมพ์ซึ่งเรียกว่า จังหวะฉีด (Injection Phase) โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์หลักๆ คือ ความเร็วฉีด ความดันฉีด ระยะทางการฉีด เวลาในการฉีด แต่ผู้ผลิตเครื่องฉีดพลาสติกบางบริษัทได้ออกแบบให้สกรูสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกนพร้อมกับหมุนไปได้ด้วย เพื่อป้องกันพลาสติกไปพร้อมกับการฉีด ทำให้สามารถฉีดชิ้นงานที่มีปริมาตรและน้ำหนักมากกว่าปกติได้

4) ขั้นตอนสกรูเคลื่อนที่ตามแนวแกนโดยไม่มีการหมุน เพื่อขับเคลื่อนพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์เพิ่มเติมหลังจากที่พลาสติกเหลวเต็มในแม่พิมพ์แล้ว ทั้งนี้เพื่อย้ำรักษาความดันให้พลาสติกในแม่พิมพ์มีความหนาแน่นตามที่ต้องการที่เรียกว่า ช่วงการย่ำ (Holding Phase) ชิ้นงานจะได้มีขนาดที่เที่ยงตรง มีความแข็งแรง โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์หลัก ๆ คือ ความดัน เวลา และความเร็ว (สำหรับเครื่องฉีดพลาสติกบางรุ่นหรือบางยี่ห้อ)

5) ขั้นตอนที่สกรูเริ่มหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกในกรวยเติมเม็ดพลาสติก พร้อมทั้งป้อนไปข้างหน้าของสกรูเพื่อทำการหลอมผสมและป้อนพลาสติกเหลวไปอยู่หน้าปลายสกรูฉีด ซึ่งเรียกว่า จังหวะ Plasticizing โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ ความดัน (แรง) ความเร็ว ระยะทาง โดยจังหวะการทำงานนี้จะเป็นตัวกำหนดปริมาณเนื้อพลาสติกเหลวหรือระยะถอยสกรู (ระยะตั้งเนื้อพลาสติก) ตามที่ต้องการ เนื่องจากเวลาที่สั่งให้สกรูหมุนนั้น พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายสกรูจะเกิดแรงดันจนทำให้สกรู

ถอยหลังกลับไปยังทิศทางของกรวยเติมเม็ดพลาสติกได้ และในขั้นตอนนี้จะมีการใช้แรงดันในการดำเนินการถอยหลังกลับของสกรูเพื่อควบคุมความหนาแน่นของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายสกรูฉีดให้มีค่าคงที่ที่เรียกว่า Back Pressure ตลอดจนมีการกระตุกสกรูให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนเท่านั้นในช่วงก่อนเริ่มต้นหมุนสกรูและหรือเมื่อสกรูหยุดหมุนแล้วที่เรียกว่า Suck Back หรือ Pull Back หรือ Decompression

6) ขั้นตอนการหล่อเย็นพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์ให้เปลี่ยนจากพลาสติกเหลวเป็นของแข็ง โดยจะทำงานพร้อมกับการเริ่มหมุนสกรูเพื่อหลอมและป้อนพลาสติกเหลวไปหน้าปลายสกรูฉีดในขั้นตอนที่ 5 โดยขั้นตอนที่ 5 และ 6 นี้ จะเริ่มทำงานพร้อมกันเมื่อสิ้นสุดเวลาในการย่ำรักษาความดันแล้ว

7) ขั้นตอนชุดฉีดหรือหัวฉีดเคลื่อนที่ถอยออกจากแม่พิมพ์ จะทำงานเมื่อสกรูหยุดการเคลื่อนที่แล้วกล่าวคือหยุดหมุนและหยุดถอยแล้ว โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ ความดัน (แรง) และความเร็ว

8) ขั้นตอนแม่พิมพ์เคลื่อนที่เปิดเมื่อเวลาในการหล่อเย็นจากขั้นตอนที่ 6 นั้นหมดลงแล้ว โดยจะมีพารามิเตอร์คือ ความดัน (แรง) ความเร็ว และระยะทาง ความเร็วและระยะทางในการเปิดแม่พิมพ์ส่วนมากจะมีอยู่ 3 ความเร็วและ 3 ระยะทางด้วยกัน โดยความเร็วแรกเป็นช่วงที่แม่พิมพ์เริ่มเคลื่อนที่แยกออกจากกัน ควรใช้ความเร็วที่ช้า ๆ และเป็นระยะทางสั้น ๆ ให้ชิ้นงานฉีดสามารถขยับตัวเคลื่อนที่ออกจากแม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่และติดออกมากับแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นจึงใช้ความเร็วจังหวะที่สองให้เร็วขึ้นและเป็นระยะทางที่ยาวขึ้นด้วยความเร็วในช่วงที่สามซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายก่อนจะถึงตำแหน่งที่แม่พิมพ์เปิดมากที่สุด ควรใช้ความเร็วที่ช้าลงและระยะทางสั้น ๆ เพื่อให้แม่พิมพ์สามารถหยุดได้ตรงตามตำแหน่งโดยไม่เกิดการสั่นสะเทือน ส่วนระยะในการเปิดแม่พิมพ์ก็ไม่ควรตั้งกว้างมากเกินไป แต่พอให้ชิ้นงานไม่ติดค้างอยู่ที่หน้าแม่พิมพ์หลังจากทำการกระทุ้งแล้ว หรือสามารถใช้มือหรือแขนกลจับออกมาได้ก็เพียงพอแล้ว

9) ขั้นตอนการกระทุ้งชิ้นงานให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ โดยจะมีพารามิเตอร์ของความเร็ว ความดันระยะทาง และจำนวนครั้งในการกระทุ้ง

2.5.5 ตัวแปรที่มีอิทธิพล ต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติก

คุณภาพของชิ้นงานฉีดพลาสติกนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวด้วยกัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่แตกต่างกันออกไป มีรายละเอียดดังนี้

1) อิทธิพลของชนิดพลาสติก ในงานฉีดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก กับพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก พบว่าเมื่อพลาสติกได้รับความร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น คือ ในพลาสติกพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก เมื่อพิจารณาค่าปริมาตรจำเพาะ และค่าพลังงานจำเพาะ ที่ผลึกเริ่มหลอมเหลว (Glass Transition Temperature) ค่าปริมาตรจำเพาะ และค่าพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้ว ค่า

การนำความร้อนของพาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเข้าใกล้จุดหลอมเหลวของผลึก แต่เมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวของผลึกแล้ว ค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นทันที ส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดผลึกหลอมเหลว และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อสิ้นสุดช่วงผลึกหลอมเหลวค่านี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว หมายความว่า พาร์เซียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติกต้องการความร้อนส่วนหนึ่ง เพื่อช่วยในการหลอมเหลวผลึกนั่นเอง

2) อิทธิพลของการออกแบบ เนื่องจากการออกแบบชิ้นงานจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติโดยรวมของชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติการแปรรูป ค่าการไหลของพลาสติก (Flowability) รวมไปถึงข้อจำกัดในการออกแบบแม่พิมพ์ และการฉีด ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นการออกแบบแม่พิมพ์ การออกแบบระบบทางเข้า(Gate) ระบบทางไหลของพลาสติก (Runner) หรือแม้แต่กระทั่งระบบหล่อเย็น(Cooling) ล้วนแล้วแต่มีความสำคัญกับคุณภาพของชิ้นงานทั้งสิ้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบได้แก่ การหดตัว(Shrinkage) ความหนาของชิ้นงาน(Thickness) ความเรียวของชิ้นงาน(Taper) รัศมีระหว่างผิวต่อ(Fillet) ครีบริบ(Rib) ส่วนนูนของชิ้นงาน(Boss) ส่วนที่เป็นคอคอดของชิ้นงาน(Undercut) รอยต่อ(Weld Line) ระบบทางไหลของพลาสติก(Runner) ระบบทางเข้าพลาสติก(Gate) ความแข็งแรงของชิ้นงาน(Strength) และช่องระบายอากาศในชิ้นงาน(Air ventilation) เป็นต้น

3) อิทธิพลของพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก มีบทบาทเป็นอย่างมากต่อคุณภาพชิ้นงานหากแม่พิมพ์ถูกออกแบบได้ถูกต้อง และเหมาะสมแล้ว ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานก็มีเพียงการปรับตั้งพารามิเตอร์เท่านั้น ซึ่งพารามิเตอร์ก็มีหลายค่าด้วยกัน แต่ค่าที่สำคัญได้แก่ ความเร็วในการฉีด ระยะเปลี่ยนความดันฉีดเป็นฉีดย้ำ เวลาในการรักษาความดันฉีดย้ำ เวลาในการหล่อเย็น เวลาในการหลอมเหลว และป้อนพลาสติกเหลว อุณหภูมิพลาสติกเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความดันไฮดรอลิก เป็นต้น การปรับตั้งค่าเหล่านี้ส่วนใหญ่เกิดจากการทดลองฉีดไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามต้องการ ซึ่งทำให้มีการสูญเสียเวลาและต้นทุนในการฉีดเป็นอย่างมาก หากผู้ปรับตั้งมีความรู้และความเข้าใจมากขึ้น ก็จะช่วยให้ฉีดได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและยังประหยัดเวลาและต้นทุนในการทดลองอีกด้วย

2.5.6 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับตั้งเครื่องฉีดพลาสติก [21]

1) อุณหภูมิพลาสติกเหลว (Melt Temperature) อุณหภูมิพลาสติกเหลว คืออุณหภูมิที่ปลายหัวฉีด การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานแต่ละชนิดนั้นมีตัวแปรที่สำคัญคือ ชนิดของพลาสติก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น ค่าความหนืด (Viscosity) เอนทาลปี(Enthalpy) ปริมาณจำเพาะ (Specific

Volume) เป็นต้น โดยค่าอุณหภูมิจะถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตเม็ดพลาสติกชนิดนั้นๆ ซึ่งจะกำหนดให้เป็นช่วง

2) อุณหภูมิกระบอกลัด (Barrel Temperature) โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิกระบอกลัดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง ซึ่งจะเป็นแผ่นความร้อนที่ติดอยู่กับกระบอกลัด การตั้งอุณหภูมิกระบอกลัดจำเป็นจะต้องปรับให้เหมาะสมกับการทำงาน

3) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) อุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิแม่พิมพ์มีอิทธิพลต่อความดันแม่พิมพ์ เช่นเดียวกับอุณหภูมิพลาสติกเหลว คือระหว่างจังหวะการฉีดความหนืดของพลาสติกเหลวจะเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิแม่พิมพ์จะมีอิทธิพลน้อยต่อชิ้นงานที่มีความหนา มีความหนา มาก แต่จะมีอิทธิพลมากต่อชิ้นงานบาง

4) ระยะเวลาชักสกรู (Metering Stroke) ระยะเวลาชักสกรู คือ ระยะเวลาพลาสติกเหลวหน้าสกรู โดยจะแสดงถึงปริมาตรพลาสติกเหลวที่ต้องการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1-3 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สกรู หากค่านี้ไม่ถูกคำนวณให้ถูกต้องก็จะทำให้พลาสติกเหลวที่เข้าสู่ชิ้นงานไม่พอดีกับปริมาตรที่ต้องการ

5) เวลาที่พลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกลัด (Resident Time) เวลาที่พลาสติกเหลวแช่ในกระบอกลัดนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่พลาสติกเหลวหลอมละลายหากพลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกลัดนานเกินไปจะส่งผลให้พลาสติกเสื่อมสภาพได้คำแนะนำต่างๆ ไปในการกำหนดเวลาที่พลาสติกเหลวแช่อยู่ในกระบอกลัดจะแนะนำให้ไม่ควรแช่อยู่นานเกิน 10 นาที

6) ระยะเวลาสำรอง (Cushion) ระยะเวลาสำรอง คือ ระยะเวลาที่ช่วยป้องกันการเกิดการกระแทกของหัวฉีดกับแม่พิมพ์โดยจะต้องตั้งค่านี้ไว้ภายในกระบอกลัด และยังป้องกันไม่ให้พลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงและการไหลย้อนกลับเนื่องจากปริมาณพลาสติกเหลวที่อยู่ในระยะเวลาสำรองที่เหมาะสม จะสามารถชดเชยการหดตัวของพลาสติกที่ถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ในจังหวะของการฉีดอีกด้วย

7) ความเร็วรอบสกรู (Screw Speed) ความเร็วรอบสกรู มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิพลาสติกเหลว และระยะเวลาในการหลอมเหลวและป้อนพลาสติกหากความเร็วรอบสกรูก็จะทำให้พลาสติกเหลวสูงขึ้นแต่จะทำให้ระยะเวลาในการหลอมเหลวและป้อนพลาสติกเหลวก็จะสั้นลง

8) ความดันต้านทานการถอยกลับสกรู (Back Pressure) ความดันต้านทานการถอยกลับสกรู เป็นความดันที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านท้ายของสกรูโดยทั่วไปพลาสติกที่เข้าสู่กระบอกลัดได้สม่ำเสมอหรือไม่จำเป็นต้องอาศัยความดันต้านทานการถอยกลับของสกรู เพื่อควบคุมระยะเวลาในการหมุนตัวถอยหลังของสกรูเพื่อทำการป้อนพลาสติกเข้าสู่กระบอกลัด ซึ่งหากเพิ่มความดันต้านทานการถอยกลับของสกรูให้มากขึ้น

9) ระยะเวลาเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเติมเป็นฉีดย้ำ (Change Over) การเปลี่ยนจากจังหวะฉีดเติมเป็นจังหวะฉีดย้ำ คือ เป็นการเติมเนื้อพลาสติกเหลว ปริมาตร 90-95% เข้าในโพรงแม่พิมพ์ จากนั้นจึงฉีดย้ำเพื่อเติมเนื้อพลาสติกเหลวอีก 5-10 % เข้าในโพรงแม่พิมพ์ จากนั้นรักษาความดันย้ำจนกว่ารูทางเข้าจะปิด (Gate freeze-off)

10) ความเร็วฉีด (Injection Speed) ความเร็วในการฉีด คือ ความเร็วของสกรูที่เคลื่อนที่เพื่อทำหน้าที่ดันพลาสติกเหลวให้ไปอยู่ที่หัวฉีดและเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยมีไฮดรอลิกเป็นตัวขับเคลื่อน ความเร็วฉีด และความดันฉีดจะเป็นสิ่งที่เกิดคู่กัน โดยถ้าใช้ความเร็วฉีดสูงก็จะทำให้ความดันฉีดสูงขึ้นด้วย และถ้าหากใช้ความเร็วฉีดต่ำแล้วความดันฉีดก็จะต่ำลง ซึ่งความเร็วในการฉีดนี้จะมีผลต่อการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์

11) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) การหล่อเย็นเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงในการฉีดพลาสติกโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทเทอร์โมพลาสติกเพื่อให้พลาสติกเย็นตัวก่อนที่จะทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เวลาในการหล่อเย็นยังมีผลต่อเวลาในการฉีด หากเวลาในการหล่อเย็นนานเกินไปก็จะทำให้อัตราการผลิตต่ำ หากเวลาในการหล่อเย็นเร็วเกินไปก็อาจจะทำให้ ชิ้นงานเกิดการหดตัวและบิดเบี้ยวหลัง จากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เพราะฉะนั้นในการพิจารณาเลือกขนาดโดยจะต้องยอมให้เกิดรอยบนผิวงานเล็กน้อยเนื่องมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อความยาวของชิ้นงาน ผู้ทำการวิจัยได้เลือกปัจจัยหลักที่มีผลต่อความยาวของชิ้นงานอันได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิกระบอบกฉีด แรงดันในการฉีดพลาสติก แรงดันย้ำ และความเร็วฉีด

12) ความดันฉีด (Injection Pressure) ความดันฉีด คือ ความดันที่ทำให้พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าสกรูถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งสามารถปรับจากความดันไฮดรอลิก พลาสติกเหลวจะสามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์เต็มหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับความดันฉีดเช่นกัน ความดันฉีดขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน ความสามารถในการไหลของพลาสติกเหลว และระยะทางการไหลที่ยาวที่สุด

13) แรงดันฉีดย้ำ (Holding Pressure) แรงดันฉีดย้ำเป็นขั้นตอนในการฉีดเมื่อพลาสติกถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ไปแล้วประมาณ 90-95% ความสำคัญของการฉีดย้ำคือ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ไหลย้อนกลับเนื่องจากในโพรงแม่พิมพ์มีความดันสูงกว่าซึ่งเป็นสาเหตุ ของการยุบตัวของชิ้นงานเนื่องจากการหดตัวของพลาสติก

14) เวลาในการฉีดย้ำ (Holding Time) เวลาในการฉีดย้ำมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะความเที่ยงตรงของชิ้นงาน ถ้าหากเวลาในการฉีดย้ำน้อยเกินไป จะทำให้ความดันแม่พิมพ์จะไม่คงสภาพนานพอที่จะทำให้พลาสติกเหลวแน่นเต็มแม่พิมพ์ได้ โดยแนะนำให้ใช้เวลาในการฉีดย้ำประมาณ 1-3 วินาที หากใช้เวลานานกว่านี้ก็จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียดตกค้างขึ้นในชิ้นงานได้

15) แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) การปิดแม่พิมพ์เพื่อป้องกันไม่ให้แม่พิมพ์แยกออกขณะทำการฉีด ดังนั้นแรงที่ใช้ทำการปิดแม่พิมพ์จำเป็นต้องเพียงพอไม่ให้พลาสติกเหลวไหลย้อนออกมาซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดครีบในชิ้นงาน

2.6 คอมพิวเตอร์ในการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก [21]

เครื่องจักรที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในปัจจุบันนี้ส่วนมากใช้ระบบ CNC เพราะสามารถที่จะควบคุมความละเอียดได้เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ที่มีคุณภาพให้เหมาะสมกับพลาสติกใหม่ ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือเครื่องจักรทำแม่พิมพ์ที่ใช้ระบบ CNC สามารถควบคุมขนาดของแม่พิมพ์ Cavity และขนาดของแม่พิมพ์จะสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้เพราะเครื่องจักรสามารถตั้งได้ขนาดที่แน่นอนได้ จึงทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพสูงไปด้วย เครื่องจักรเหล่านี้จะไม่เหมาะสมกับการทำให้แม่พิมพ์ที่มีคุณภาพต่ำหรือแม่พิมพ์ที่ไม่มีคุณภาพจากความต้องการที่ต่อเนื่องของคุณภาพแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ต้องการเครื่องคอมพิวเตอร์ได้เข้ามาเกี่ยวข้องมากทั้ง Hardware และ Software โดยเฉพาะโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวกับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ชิ้นส่วนมาตรฐานและชิ้นส่วนอื่นโปรแกรมการวิเคราะห์ทางด้านวิทยาศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวผลิตภัณฑ์ และแม่พิมพ์และยังสามารถส่งข้อมูลไปให้เครื่องจักร เพื่อทำการผลิตชิ้นส่วนของแม่พิมพ์ได้ ซึ่งระบบนี้ก็คือ CAD/CAE/CAM

- 1) CAD หมายถึง Computer Aided Design or Drafting
- 2) CAE หมายถึง Computer Aided Engineering
- 3) CAM หมายถึง Computer Aided Manufacturing

ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ และแม่พิมพ์จะถูกออกแบบใน CAD การวิเคราะห์และศึกษาโดยการจำลองการฉีด (Simulation) ซึ่ง CAE จะสามารถทำให้เราทราบถึงปัญหาสำคัญของการออกแบบแม่พิมพ์เหล่านี้ก็คือ

- 1) รู้ความดันในการฉีดเต็มแบบ
- 2) รู้แนวเชื่อมต่อของผลิตภัณฑ์
- 3) เพื่อทำระบบทางวิ่งให้สมดุล
- 4) เพื่อให้สามารถเลือกสภาวะต่างๆ ของการฉีดได้เหมาะสม
- 5) เวลาในการฉีด
- 6) อัตราการไหล
- 7) แรงดันในการฉีด
- 8) ความเค้นที่เกิดขึ้น
- 9) เพื่อให้สามารถทดสอบวัสดุที่ใช้ฉีดได้หลายชนิด

10) เพื่อศึกษาการไหลเต็มแบบ ในการตัดต่อของชิ้นงาน

ซึ่งปัญหาต่างๆ ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ และการออกแบบแม่พิมพ์สามารถดำเนินการและแก้ไขได้พร้อมกัน นอกจากนี้ด้วยเทคโนโลยีของ Finite Element ตัวผลิตภัณฑ์จะสามารถทำการทดสอบทางกล (Mechanical Testing) ในอุณหภูมิสถานะต่างๆ ตั้งแต่ยังอยู่ในขั้นตอนออกแบบและท้ายที่สุดจะได้ข้อมูล Drawing ของผลิตภัณฑ์ และแม่พิมพ์ และคำสั่งต่าง ๆ ที่เรียกว่า Design Data Schedule CAM จะใช้ข้อมูลทางด้าน Drawing และจะถูกนำไปแปลงเป็นชุดคำสั่งเพื่อ CAM จะใช้ข้อมูลทางด้าน Drawing และจะถูกนำไปแปลงเป็นชุดคำสั่งเพื่อส่งให้เครื่องจักรต่างๆ ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สร้างชิ้นส่วนแม่พิมพ์ต่อไป ในส่วนของ Mold Manufacturing ซึ่งคำสั่งนี้ก็คือ Manufacturing Data ส่วนข้อมูลที่ได้จาก CAE บางส่วน จะถูกส่งไปยังฝ่ายผลิต เพื่อใช้ในการวางแผน และ ควบคุมการผลิตต่อไป

2.6.1 Computer Aided Design (CAD)

วิวัฒนาการของระบบคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ (CAD) นี้ อาจถือได้ว่าเริ่มมีตั้งแต่การพัฒนากระบวนการสร้างภาพกราฟิกบนจอภาพก็ว่าได้ แต่ CAD ได้มีวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีสูงกว่าระบบกราฟิกทั่วไปอย่างมากระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ช่วยในการออกแบบ หรือ CAD นี้ อาศัยเทคโนโลยีที่เรียกว่าคอมพิวเตอร์กราฟิก ซึ่งเป็นการเขียนรูปแบบบนจอภาพเป็นหลัก แต่สามารถจัดการกับภาพที่สร้างขึ้นนี้ให้อยู่ในตำแหน่ง และ ลักษณะตามต้องการโดยที่ผู้ใช้ซึ่งส่วนมากจะเป็นวิศวกร หรือ สถาปนิก จะใส่ข้อมูลตลอดจนคำสั่งเข้าสู่ ระบบคอมพิวเตอร์ ผ่านทางอุปกรณ์รับข้อมูลเข้า ส่วนคอมพิวเตอร์ก็จะติดต่อกลับมายังผู้ใช้ โดยผ่านทางจอภาพคำสั่งที่เข้าไปนี้จะเรียก ชุดโปรแกรมสำหรับสร้างภาพที่เก็บไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ออกมาใช้ ภาพที่สร้างขึ้นเหล่านี้จากรูปทรงเลขาคณิต เช่น จุด เส้น และวงกลม เป็นต้น นอกจากนี้ผู้ใช้อย่างสามารถดัดแปลงภาพที่สร้างขึ้นโดยอาศัยคำสั่งต่างๆ เช่น การขยายภาพ การลดขนาด การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง จากตำแหน่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งบนจอภาพ การหมุนภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ได้รูปภาพที่ต้องการนอกเหนือจากระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์แล้วส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งก็คือผู้ออกแบบ ระบบคอมพิวเตอร์เป็นเพียงเครื่องมือที่ผู้ออกแบบใช้เพื่อแก้ปัญหาในการออกแบบเท่านั้น การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยงานด้านออกแบบ เป็นเพียงการอำนวยความสะดวกให้กับผู้ออกแบบเท่านั้นเหตุผลหลักของการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ คือ

1) เพื่อเพิ่มผลผลิต โดยการลดงานให้กับผู้ออกแบบ ซึ่งแต่เดิมต้องทำตั้งแต่จินตนาการออกแบบวิเคราะห์แบบ ดัดแปลงแก้ไขเขียนแบบ และให้รายละเอียดเกี่ยวกับแบบซึ่งงานเหล่านี้เมื่อนำคอมพิวเตอร์มาช่วย นอกจากจะทำให้เพิ่มผลผลิต ประหยัดเวลาแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายลงอีกด้วย

2) เพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับงาน เนื่องจากสามารถทำการวิเคราะห์แบบได้โดยใช้โปรแกรมมาช่วยอำนวยความสะดวก เช่น โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างอีกทั้งการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยงานนี้ ยังทำให้สามารถทดลองกับแบบได้หลายลักษณะ ทำให้สามารถเลือกแบบที่ดีที่สุด

3) เพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับข้อมูลผิดพลาดเนื่องจากระบบ CAD นอกจากจะให้ภาพที่ชัดเจนแล้ว ความละเอียดที่เกี่ยวกับสิ่งที้ออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือลักษณะ ทำให้การใช้รูปแบบข้อมูลมีความถูกต้องสูง การนำข้อมูลนี้ไปใช้งานอื่น ๆ ก็สามารถทำให้สะดวก

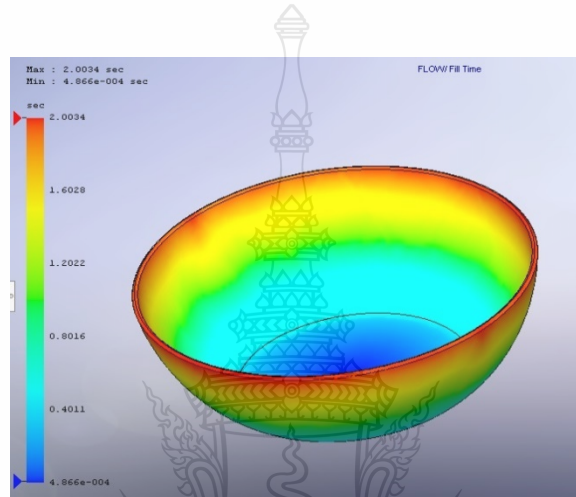
4) เป็นการสร้างฐานข้อมูลสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยปกติ CAD จะใช้ร่วมกับการนำคอมพิวเตอร์ไปช่วยในการผลิต(Computer Aided Manufacturing or CAM) ดังนั้นการส่งผ่านข้อมูลจะทำให้สะดวก ไม่จำเป็นต้องใส่ข้อมูลเข้าไปใหม่อีก การใช้งานอื่น ๆ ก็จะทำให้สะดวกขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์จะไม่ถูกใช้เมื่อผู้ออกแบบมีประสิทธิภาพมากกว่าหรือน้อยกว่าคอมพิวเตอร์ด้วยเหตุผลนี้เอง เราสามารถที่จะใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์โดยอาศัยลักษณะเด่นเฉพาะ ของคอมพิวเตอร์ และของมนุษย์ เพื่อให้ได้รูปแบบที่ดีที่สุดในการทำงาน โดยแต่ละวิธีจะสามารถช่วยเหลือจุดด้อยซึ่งกันและกันได้ งานบางอย่างมนุษย์สามารถทำได้ดีกว่าคอมพิวเตอร์และงานบางอย่างคอมพิวเตอร์สามารถทำได้ดีกว่ามนุษย์ทั้งสองอย่างนี้มีความสำคัญต่อระบบ CAD

สำหรับ CAD นั้นโดยพื้นฐานแล้วไม่ได้เจาะจงเฉพาะการพัฒนาเกี่ยวกับพลาสติกเท่านั้นอย่างไรก็ดีในการฉีดพลาสติก ซึ่งพื้นผิวต้องมีองค์ประกอบทางเรขาคณิตที่ซับซ้อนจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณเดิมที่การออกแบบผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปและแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ทั้งนี้เนื่องจากมีเวลาจำกัดและขาดความรู้ทางทฤษฎี การทดสอบต้นแบบอันยืดยาวจะทำได้ก็ต่อเมื่อทุกส่วนประกอบหรือส่วนที่สำคัญทั้งหมดได้ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วแต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์สามารถทดลองออกแบบได้หลาย ๆ แบบ ภายในระยะเวลาอันสั้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุจริงในการออกแบบเลย ความสามารถดังกล่าวทำให้วิศวกรออกแบบมีเครื่องมือที่สำคัญในอันที่จะทำให้เขาสามารถทุ่มเทเวลาให้กับการคิดสร้างสรรค์งานได้มากขึ้นกว่าแต่ก่อน โดยเพียงใช้ความคิดของเขาพร้อมกับความร่วมมือจากแผนกออกแบบระบบต่าง ๆ ก็สามารถนำมาประกอบและทดสอบได้ด้วยคอมพิวเตอร์

2.6.2 Computer Aided Engineering (CAE)

CAE เป็นเหมือนเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างกว้างขวาง ในการพัฒนาและผลิต CAE สามารถเป็นไปได้มากกว่า โปรแกรมช่วยออกแบบทางด้าน Graphic Design ทำงานกระบวนการทางวิศวกรรมหลังจากการออกแบบ เพื่อผ่านไปยังขบวนการ และ ส่งเสริมให้สามารถทำได้โดยอัตโนมัติมันเป็นไปได้ที่จะเป็นกุญแจไปสู่การสร้างต้นแบบของผลิตภัณฑ์โดยไม่ต้องทำ Model ในการออกแบบเราสามารถใช่ CAE วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ ความเค้นและการเคลื่อนที่ทางกลไก ในโปรแกรม CAE ระดับสูงจะมีโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ทางด้าน Finite Element ประกอบอยู่

ด้วย ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ทำให้ผู้ออกแบบมีขีดความสามารถในการแก้ไขปัญหา และออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยไม่จำเป็นต้องสร้าง และทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบระบบ CAE สามารถที่จะจำลองสถานการณ์ การทำงานในกระบวนการการผลิต โดยวิธีการใหม่เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมได้ด้วยวิธีการของ Simulation ซึ่งสามารถดำเนินการบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อหาการวางผังสายการผลิตหรือการไหลของกระบวนการผลิตที่เหมาะสมด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์กราฟิกทำให้มองเห็นการทำงานของกระบวนการผลิตดีเท่ากับการตัดสินใจจากผลที่ออกมาจากกระบวนการผลิตจริง



รูปที่ 2.21 การวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างด้วย โปรแกรมสำเร็จรูป

การใช้คอมพิวเตอร์พร้อมด้วยซอฟต์แวร์ในด้าน Flow Analysis เพื่อให้ผู้ออกแบบเข้าใจ Mold Filling Process ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้คอมพิวเตอร์ให้ทำการคำนวณจาก Math model เพื่อที่จะหาผลกระทบของ Mold Filling Conditions ที่จะมีผลต่อ

- 1) Distributed of Flow Pattern and Flow Vector
- 2) Shear stress
- 3) Frozen skin
- 4) Temperature, Pressure และตัวแปรอื่น ๆ

โดยอาศัยซอฟต์แวร์เป็นตัวช่วยในการคำนวณ ส่วนวิธีการคำนวณเกี่ยวกับการหดตัวนั้น จะพิจารณาถึง

- 1) ตำแหน่งของ Dimension เมื่อเทียบกับ gate
- 2) ทิศทางของ Dimension เมื่อเทียบกับการไหล

3) สภาพการขึ้นรูป (Molding conditions)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังสามารถเผื่อ Allowance ไว้สำหรับการเปลี่ยนแปลงภายหลังการขึ้นรูปขึ้นงานแล้ว รวมถึงว่า Cavity dimensions ต่างๆ จะต้องได้กับการขึ้นรูปอย่างถูกต้องเพื่อให้ได้ Dimension ของชิ้นส่วน ตามที่กำหนดไว้ และเพื่อประโยชน์ในการประสานงานระหว่างผู้ออกแบบกับผู้สร้าง tool ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีผลต่อระบบการไหลการเปลี่ยนรูปร่าง วัสดุที่ดีที่สุดในการผลิตที่เป็นแบบซับซ้อนมีทางเข้าหลายจุด ขั้นตอนแรกจะกำหนดการไหลในช่วงการฉีดวัสดุเข้าไปในแม่พิมพ์ ข้อที่ควรระลึกไว้เสมอ คือ ตำแหน่งที่เป็นเส้นเชื่อม หรือไม้ก็จุดที่เป็นทางเข้าพลาสติก ควรจะอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และพื้นผิวของโพรงแม่พิมพ์ต้องสามารถรับพลาสติกได้สม่ำเสมอ สิ่งเหล่านี้ทำให้ต้องพัฒนาแบบภาพร่าง 3 มิติ ของผลิตภัณฑ์ขั้นตอนต่อไปก็คือ

จะแตกเส้นทางการไหลตัวออกเป็นชิ้นส่วนเบื้องต้น ซึ่งมักจะเป็นรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ หลังจากที่ย้อนข้อมูล แสดงถึงรูปทรงเรขาคณิตดังกล่าว และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเข้าไปแล้ว ก็จะมีการสร้างแบบจำลองแสดงถึงกรรมวิธีการฉีดพลาสติก โดยอาศัยวิธีการคำนวณคอมพิวเตอร์จะคำนวณค่าแรงดันของการฉีดวัสดุเข้าไปในโพรงแม่พิมพ์แรงดันที่ตกและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากจุดถึงจุด ซึ่งทำให้สามารถประมาณการถึงสภาพของขบวนการรวมถึงรูปทรงของแม่พิมพ์และการขึ้นรูปได้ เช่น อัตราการฉีด ที่แรงดันที่ต้องการสามารถคำนวณให้ลดลงต่ำที่สุดได้

การวิเคราะห์แบบรีโวลจิคอล ด้วย CAE (Rheological Analysis) การวิเคราะห์การไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์พิจารณาถึงกรรมวิธีในการทำให้เต็มแม่พิมพ์ ซึ่งพิจารณาถึงชั้นความแข็ง ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน แรงดันที่ใช้ในการฉีด Cavity ความดันที่เกิดขึ้นในงานหรือในตัวแม่พิมพ์เอง กำหนดวิธีการเพื่อให้ระบบช่องทางที่น้ำพลาสติกไหลไปยังชิ้นงาน หรือทางวิ่ง ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์คือ การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ทดลองคำนวณการฉีดให้เต็ม Cavity แทนการคำนวณด้วยมือ ซึ่งเป็นการล่าช้าและมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นในแม่พิมพ์ การทดลองฉีดนับเป็นการประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการออกแบบการทำแม่พิมพ์ การทดลองฉีดเพื่อทำการวิเคราะห์แม่พิมพ์ยังสามารถวิเคราะห์ระบบทางวิ่งและความหนาของผนังให้ดีที่สุด เพื่อรักษาส่วนที่ต้องการความแข็งแรงของแม่พิมพ์ และเป็นการประหยัดวัสดุ เนื่องจากรอบเวลาการทำสั้นลง ลดความสึกหรอของเครื่องจักรและต้นทุนในการทำงาน ลดเวลาจากช่วงที่เป็นความคิด จนถึงเริ่มทำการผลิต

2.7 ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [23]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขเหมาะสมกับปัญหาที่มีความซับซ้อนจนไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยการวิเคราะห์โดยตรงได้ แบ่งขั้นตอนคร่าว ๆ ได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

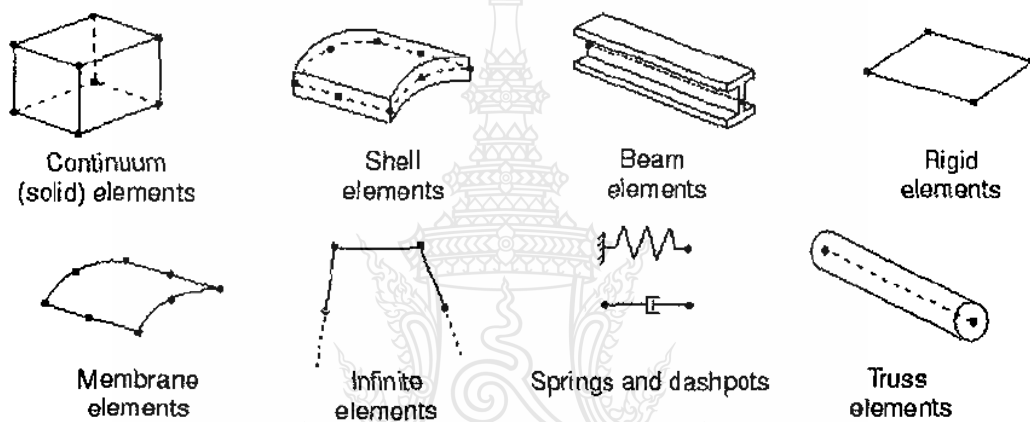
1) Pre- Processing ได้แก่การสร้างแบบจำลอง เช่นการเลือกชนิดของเอลิเมนต์
เงื่อนไขของแบบจำลอง และการเลือกแบบจำลองวัสดุ เป็นต้น

2) Analysis คือขั้นตอนของการคำนวณ

3) Post Processing คือการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ

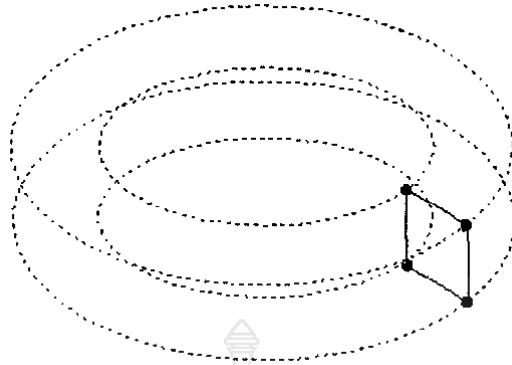
2.7.1 ชนิดของเอลิเมนต์

การเลือกใช้เอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับปัญหาเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเอลิเมนต์แบบต่างๆ
ก็เหมาะกับปัญหาต่างๆ กันไปพฤติกรรมส่วนหนึ่งของแบบจำลองก็จะขึ้นอยู่กับเอลิเมนต์ที่ใช้งานด้วย
ตัวอย่างของเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ ดูได้จากภาพที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของเอลิเมนต์แบบต่าง

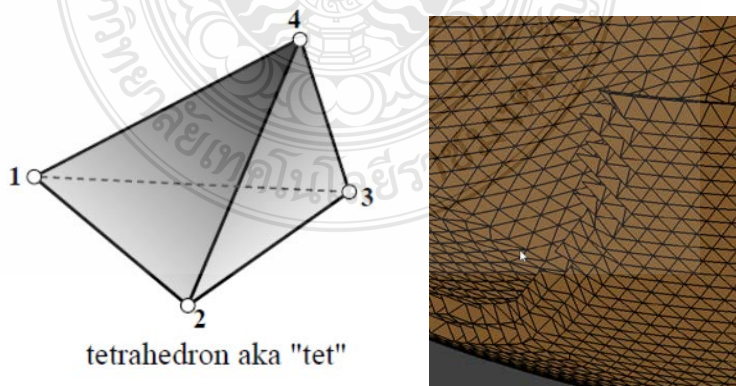
ในโปรแกรมคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีเอลิเมนต์ให้เลือกใช้มากมายหลายชนิดและยัง
แบ่งเอลิเมนต์ออกเป็นเอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง (First-Order Element) และเอลิเมนต์อันดับที่สอง
(Second-Order Element) มีความแตกต่างกันคือ เอลิเมนต์อันดับที่สองจะมีจำนวนจุด (Node) ต่อเอ
ลิเมนต์มากกว่า จึงมีความแม่นยำกว่าเอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง สามารถทำนายความเค้นได้ดีเหมาะกับงาน
ที่มีความโค้งมากๆ และปัญหาที่ชิ้นงานเกิดการงอแต่ไม่เหมาะกับปัญหาที่มีเงื่อนไขสัมผัส ปัญหาการ
กระทบ (Impact) และเป็นปัญหาที่เกิดการบิดตัว (Distort) ของเอลิเมนต์นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์
ประเภทที่เป็นแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Element) ใช้สำหรับชิ้นงานที่มีความสมมาตร
รอบแกนของชิ้นงานนอกจากจะให้ผลที่ถูกต้องเช่นเดิมและยังลดภาระในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ลง
อีกด้วย เอลิเมนต์แบบนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ลักษณะโซลิดเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Solid Element)

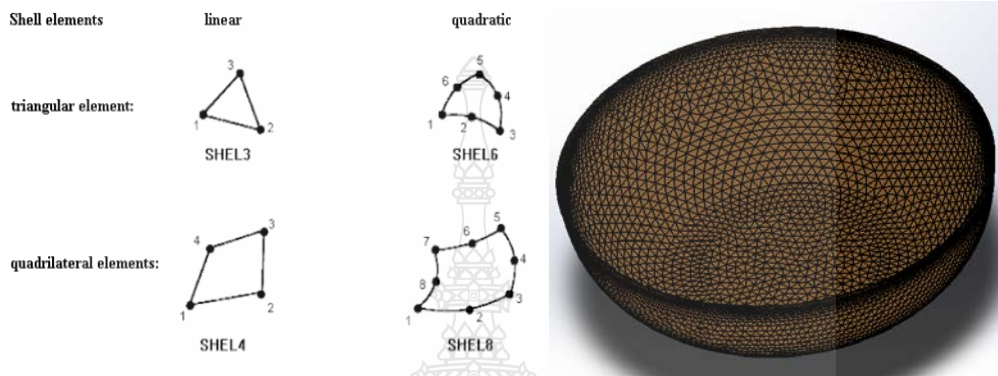
เอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติกในโปรแกรมสำเร็จรูป Plastic 2 ชนิด คือ Solid (Continuum) Element, และ Shell Element ซึ่งมีรายละเอียดของเอลิเมนต์แต่ละชนิดเป็นดังนี้

1) Solid (Tetrahedral) Element เป็นเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบการใช้ค่อนข้างกว้างใช้ใน งานหลากหลาย ใช้แทนวัสดุเนื้อเดียวที่มีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตร มีรูปแบบแล้วเหมือนรูปพีระมิดกับการแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ หลายๆ ส่วนโดยแต่ละเอลิเมนต์ต่อถึงกันด้วยหน้าของเอลิเมนต์ เหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาไม่เป็นเชิงเส้นที่มีเงื่อนไขการสัมผัสด้วย เหมาะกับวัสดุพลาสติก มีความแม่นยำในการคำนวณสูง



รูปที่ 2.24 ลักษณะโซลิดเอลิเมนต์แบบ Tetrahedral

2) Shell Elements เหมาะกับโครงสร้างที่มีมิติของความหนาน้อยกว่ามิติอื่นมาก และความเค้นในแนวตั้งฉากกับความหนาไม่มีความสำคัญมากนักเซลล์เอลิเมนต์ ความเครียดจำกัดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาด้วย ส่วนแบบความเครียดน้อยจะถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาระหว่างการวิเคราะห์ สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูป นั้นจะมี เอลิเมนต์เป็นรูป สามเหลี่ยมเท่านั้น



รูปที่ 2.25 ลักษณะโซลิตเอลิเมนต์แบบ Shell Elements

2.8 การทดสอบทางกลของพอลิเมอร์ [24]

สมบัติทางกลของวัสดุมีความสำคัญเป็นอย่างสูงต่อการนำวัสดุไปใช้งาน เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้งานพลาสติกในการทำผลิตภัณฑ์ใดก็ตาม ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นย่อมที่จะต้องมีการรับแรงกระทำไม่มากนักน้อย ซึ่งการที่ผู้ออกแบบทราบถึงสมบัติทางกลของพลาสติกที่นำมาใช้งานจะช่วยให้สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและเลือกนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

การทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การตรวจวัดสมบัติของพลาสติกในการรับภาระหรือแรงกระทำในลักษณะต่างๆ ในเชิงปริมาณ เพื่อที่ผู้ใช้งานสามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้เพื่อประโยชน์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ ไม่ว่าจะเป็นการตรวจสอบคุณภาพ การเปรียบเทียบหรือการจัดลำดับ ดังนั้นผลทดสอบที่ได้จะต้องสามารถเปรียบเทียบกันได้แม้จะทดสอบจากห้องปฏิบัติการที่แตกต่างกัน

2.8.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) [25]

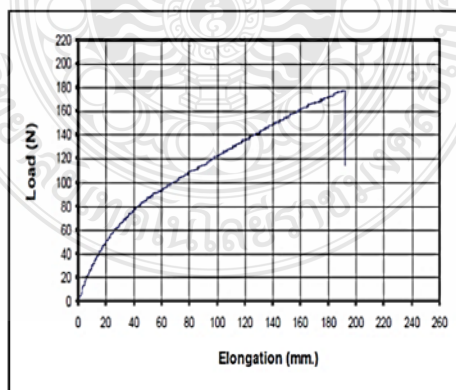
สิ่งที่สำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ คือ ชิ้นงานทดสอบซึ่งส่วนใหญ่จะมีรูปทรง Dumbbell ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่น กรณีที่เป็นยางก็จะได้จากการตีแผ่นยางเป็นรูป Dumbbell ด้วย Die (จากแผ่นยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ใน Compression Mould) ส่วนในกรณีของพลาสติก อาจจะได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบ Injection Mouldings, กระบวนการขึ้นรูปแบบ Compression moulding และได้จากการตัดแผ่นพลาสติกด้วย

Die ในทำนองเดียวกันกับยาง ถ้าหากพลาสติกดังกล่าวมีความแข็งต่ำ เช่น Plasticized PVC ในขณะทดสอบจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine ดังแสดงรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 เครื่อง Universal Testing Machine

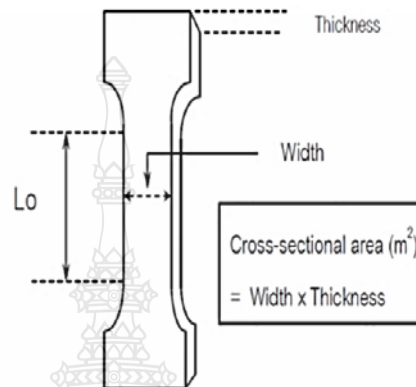
โดยจะทำการ จับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นงานบริเวณ ตรงกลาง ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ดังแสดง รูปที่ 2.27 ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึงค่าการยึดตัว



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดตัว [25]

รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะทั่วไปของชิ้นงานรูป Dumbbell สำหรับการทดสอบแรงดึง โดยในการคำนวณค่าความเครียด (Strain) จะใช้ค่า ΔL ต่อ L_0 ซึ่งต้องระวังด้วยว่าค่าที่ใช้ต้องเป็นค่าที่

มาตรฐาน กล่าวคือ ΔL ควรวัดโดยใช้ Extensometer จะแม่นยำกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่วัสดุทดสอบเป็นยางที่จะยืดตัวได้มากจนเข้าสู่บริเวณรอยคอดของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามกรณีที่เป็พลาสติกแข็งอาจจะอนุโลมให้ใช้ระยะเดินทางของมือจับ (Grip) เป็น ΔL แทนได้ เนื่องจากพลาสติกแข็งมักจะยืดตัวได้น้อยและฉีกขาดก่อนจะเกิดการยืดบริเวณรอยคอด

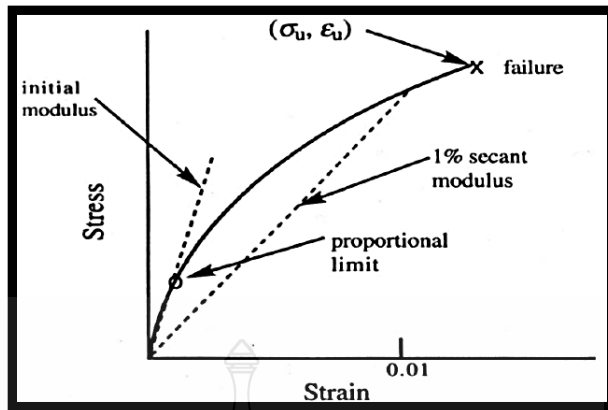


รูปที่ 2.28 ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง [25]

ส่วนค่า L_0 นั้นต้องดูตามมาตรฐานของ Standard Method ที่ใช้ทดสอบ (ASTM D638, JIS 2000, ISO, DIN) ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะมีขนาดชิ้นงานไม่เท่ากัน และมีระยะ Gauge ไม่เท่ากัน และที่สำคัญต้องไม่เข้าใจผิดว่า L_0 คือระยะระหว่าง Grip หรือ ระยะระหว่างรอยคอด ซึ่งถ้าใช้ค่า L_0 ในการคำนวณ strain ไม่ถูกต้อง จะทำให้ค่า Strain และ Modulus ที่ได้คลาดเคลื่อน และอาจมีปัญหาในการนำไปใช้อ้างอิงกับตัวอย่างข้างนอก

ในบางครั้งอาจจะรายงานผลค่าการทนแรงดึงเป็นรูปของค่า Tensile strength ซึ่งโดยปกติจะหมายถึงค่า Maximum Tensile Stress นอกจากนี้บางกรณีอาจจะรายงานผลค่า Tensile Strength ที่จุดใดๆ ก็ได้ เช่นที่จุดคราก (Yield Point) จะได้ Tensile Strength at Yield หรือที่จุดขาดจะได้ Tensile Strength Break ส่วนคำว่า Ultimate Tensile Stress (หรือ Strength) จะหมายถึงค่า Strength หรือ Stress ที่จุดสูงสุดของกราฟ ซึ่งอาจจะเป็นที่ Break Point หรือ Yield Point ก็ได้

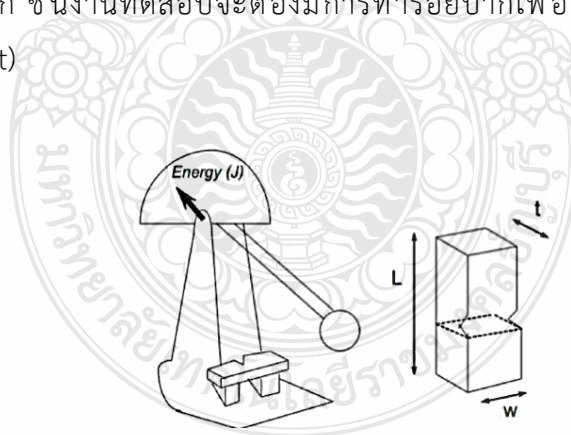
ค่าโมดูลัสที่กล่าวถึงข้างต้นนี้ จะได้จากการคิดคำนวณจากกราฟในช่วง Linear หรือช่วงที่ยังมีพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติก (ช่วงการยืดตัวหรือ Strain น้อยๆ) และบางครั้งจะเรียกค่าโมดูลัสในแบบดังกล่าวว่า Young's Modulus หรือ Initial Modulus นอกจากนี้ยังมีค่าโมดูลัสอีลาสติกหนึ่งคือ Secant Modulus ซึ่งได้จากอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดที่วัดจากช่วงต่างๆ ในเส้น กราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การหาค่าโมดูลัสในแบบต่างๆ [25]

2.8.2 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact Testing)

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์จะมีจุดเด่นตรงที่เป็นการทดสอบด้วยอัตราความเร็วสูง โดยมีรูปแบบ 2 ลักษณะ คือ แบบ Pendulum Test แสดงดังรูปที่ 2.30 และ Falling Weight Test ลักษณะการทดสอบแบบ Pendulum Test จะใช้ค้อนเหวี่ยงลงมากระแทกชิ้นงาน พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก ซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้ จากเข็มหน้าปัด ซึ่งในกรณีที่ทดสอบแล้วชิ้นงานไม่หักแสดงว่าพลังงานไม่พอ ซึ่งจะต้องเพิ่มน้ำหนักค้อนขึ้นไปอีก ชิ้นงานทดสอบจะต้องมีการทำรอยบากเพื่อให้เกิดจุดรวมแรง (Stress Concentration Point)



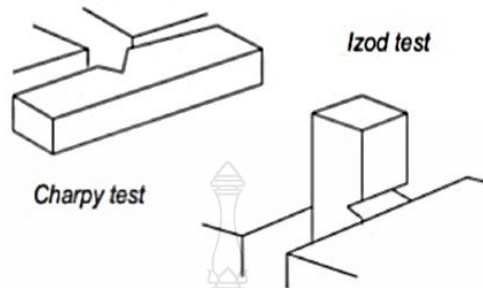
รูปที่ 2.30 ทดสอบแรงกระแทกแบบ Pendulum Test [25]

โดยจากพลังงานที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็น Impact Strength ได้จากสูตรดังนี้

$$\text{Impact strength} = \text{Energy (J)} / \text{Thicknees (m)} \quad (2.1)$$

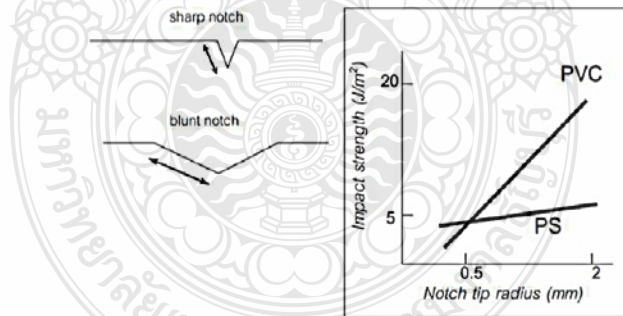
$$\text{หรือบางกรณีจะใช้สมการ} = \text{Energy (J)} / \text{Area (notch) (m}^2\text{)} \quad (2.2)$$

การวางชิ้นงานจะทำได้ 2 ลักษณะตามรูปแบบของการทดสอบกล่าวคือ ถ้าเป็นแบบ Charpy Test จะวางแนวนอน แต่ถ้าเป็นแบบ Izod Test จะวางแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 รูปแบบการวางชิ้นงาน สำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy [25]

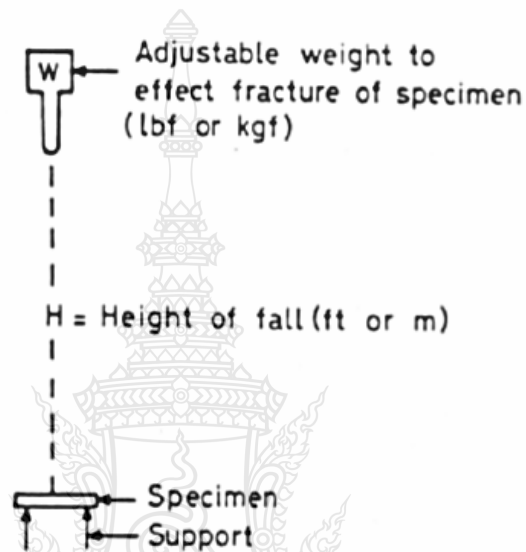
สิ่งสำคัญหรือข้อควรระวังในการทดสอบแบบ Pendulum คือขนาดของรอยบาก (Notch) ต้องคงที่ เพราะขนาดจะมีผลต่อค่า Impact Strength ที่ได้ ตัวอย่างเช่นรอยบากที่แหลมกับรอยบาก ที่ทื่อหรือ ป้านกว่าจะให้ค่าไม่เท่ากัน โดยทั่วไปแล้วรัศมีของ Notch Tip ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ Impact Strength สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ผลของรอยบากต่อค่าการทนแรงกระแทก [25]

นอกจากนั้นความเหนียวของชิ้นงานที่ได้จาก Tensile Test กับที่ได้จาก Impact Test อาจจะให้ผลไม่สอดคล้องกันก็ได้ เนื่องจากการทดสอบที่สภาวะต่างกัน โดยในกรณี Impact Test จะทดสอบด้วยความเร็วสูงมาก และที่สำคัญคือชิ้นงานจะมีรอยบากหรือจุดรวมแรง ซึ่งพอลิเมอร์บางตัวจะมีความเหนียวลดลงอย่างมากถ้าหากมีตำหนิหรือจุดรวมแรง เช่น PVC, Nylon เป็นต้น

สำหรับการทดสอบ Impact Test ในแบบสุดท้ายคือ Falling Weight Test แสดงดังรูปที่ 2.33 ซึ่งจะเหมาะกับชิ้นงานที่เป็นแผ่น Sheet หรือชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในแม่พิมพ์แล้ว เช่น หมวกกันน็อค เป็นต้น โดยในการทดสอบจะทำได้ 2 ลักษณะ คือกำหนดให้ระดับความสูงของลูกน้ำหนักคงที่ แล้วทำการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักไปเรื่อยๆ จนกระทั่งชิ้นงานแตก หรือในทางตรงกันข้าม อาจจะทำทดสอบโดยใช้น้ำหนักคงที่แล้ว ทำการปรับระยะความสูงไปเรื่อยๆ



รูปที่ 2.33 การทดสอบแบบ Falling Weight [25]

ซึ่งค่าที่ได้ จะสามารถนำมาคำนวณเป็นพลังงาน (Impact Energy) ได้ดังสมการ 2.1

$$\text{Energy (J)} = hwf \quad (2.1)$$

เมื่อ h = ความสูง (mm)

W = น้ำหนัก (Kg)

F = ค่าที่ใช้แปลงหน่วยเป็น J (Nm)

2.9 การทดสอบความแข็ง (Hardnes test)

อรรถพล ตะระ [26] กล่าวว่า ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ ซึ่งในบทนี้ได้แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแบบรอย

กด (Indentation) แบบกระดอน (Rebound) แบบขีดข่วน (Scratch) แบบสึกหรอ (wear) และในแบบของความสามารถในการกลึงไส (Machinability) โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับการกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด ส่วนการทดสอบในลักษณะการ ปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักลงบนผิววัสดุ จากนั้นวัดการกระดอนของลูกตุ้มเรียกว่าความแข็งแบบกระดอน และการทดสอบความแข็งที่สะดวกที่สุดคือการทดสอบความแข็งแบบรอยขีดข่วน โดยการขีดข่วนพื้นผิววัสดุด้วยวัสดุต่างๆ ขนาดและพื้นผิววัสดุภายใต้เงื่อนไข การทดสอบจะใช้ในการทดสอบความแข็ง การสึกหรอและความต้านทาน การขัดสีและสุดท้ายความสามารถในการกลึงไสใช้เป็นตัวบ่งบอกความยากง่ายในการกลึงวัสดุ

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอลแบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมนหรือพีรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักกดที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ส่วนความแข็งแบบกระดอน

การทดสอบความแข็งกับวัสดุโลหะส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบ Brinell หรือ Rockwell ส่วนการทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore scleroscope, Vickers, Monotron, Rockwell Superficial และเครื่องทดสอบ Herbert จะใช้ในการทดสอบโลหะที่มีความแข็งสูง หรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบผิวแข็ง นอกจากนี้ในการทดสอบความแข็งบางครั้งต้องทำการทดสอบกับวัสดุที่เล็กและบางมาก จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness tester) เช่น นูพ (Knoop) เป็นต้น

2.9.1 การทดสอบแบบความแข็ง Brinell

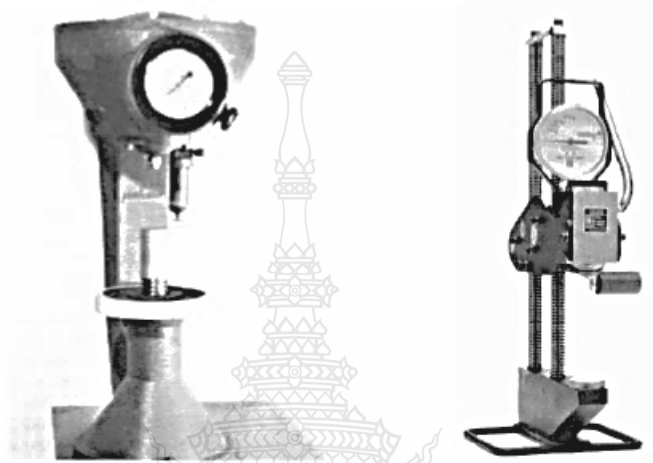
การทดสอบความแข็งหนึ่งที่ถูกใช้มาอย่างยาวนานที่สุดคือการทดสอบแบบ Brinell ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบน้ำหนักกดที่ในการกดหัวกดเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนพื้นผิวขึ้นทดสอบ โดยปกติจะใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 10 mm. กดลงบนผิวขึ้นทดสอบด้วยน้ำหนักกด 3,000 kg สำหรับโลหะแข็ง 1,500 kg สำหรับโลหะที่มีความแข็งปานกลาง และ 500 kg หรือต่ำกว่านั้นสำหรับวัสดุอ่อนนุ่ม

เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell มีหลายแบบซึ่งแตกต่างกันในหัวข้อต่อไปนี้คือ

- 1.กรรมวิธีการใส่น้ำหนักกด เช่น ใช้แรงดันน้ำมันระบบเฟืองหรือระบบคานเป็นต้น
- 2.กรรมวิธีการดำเนินการทดสอบ เช่น ใช้มือ หรือแรงขับเคลื่อน
- 3.กรรมวิธีวัดน้ำหนักกด เช่น piston กับน้ำหนักมาตรวัด Bourdon, Dynamomete หรือ ระบบคาน

4. ขนาดคือเล็กแบบตั้งโต๊ะหรือใหญ่แบบประจำที่ ดังรูปที่ 2.34

การทดสอบความแข็งแบบ Brinell สามารถใช้เครื่องทดสอบแรงดึงได้โดยใช้อุปกรณ์ช่วยยึดหัวกดลูกบอลแล้วนำแผ่นโลหะที่ต้องการทดสอบยึดเข้าอุปกรณ์แขนจับยึดชิ้นงานโดยใช้หัวกดบอลขนาด 3/64 นิ้ว และสปริง 22 ปอนด์



รูปที่ 2.34 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell [26]

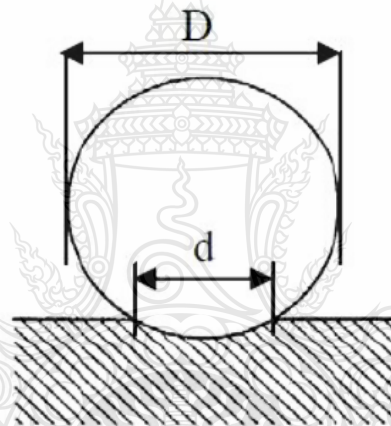
การทำการทดสอบความแข็งแบบ Brinell ให้นำชิ้นทดสอบไปวางบนแท่นวางชิ้นทดสอบแล้วยกระดับแท่นวางขึ้นจนชิ้นทดสอบสัมผัสหัวกดจากนั้นใส่น้ำหนักกดโดยการ ป้อนน้ำมันเข้าไปในทรงกระบอกหลักซึ่งเลื่อน Piston หลักลงและกดหัวกดบอลเข้าไปในชิ้นทดสอบ ซึ่งเนื้อชิ้นทดสอบจะยึดพื้นผิวหัวกดไว้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทานเล็กน้อยโดยจะใช้มาตรวัด Bourdon ในการแสดงน้ำหนักกดอย่างหยาบเมื่อใส่น้ำหนักตามที่ต้องการตาชั่งน้ำหนักด้านบนของเครื่องจะยกตัวขึ้นโดยการกระทำของ Small piston โดยต้องระวังอย่าให้มีน้ำหนักเกิดกับหัวกดมากจนเกินไป

การทดสอบตามมาตรฐานการวัดขนาดของรอยกดจะใช้เครื่องวัดไมโครมิเตอร์ผ่านกล้องจุลภาคหรือกล้องจุลภาค Brinell ซึ่งจะมีมาตรวัดโปร่งแสงปรากฏอยู่บนภาพรอยกด Brinell เป็นการทดสอบความแข็งที่ดี แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุที่แข็งมาก เนื่องจากหัวกดลูกบอลจะเกิดการเสียรูปมากเกินไป รวมทั้งการทดสอบกับชิ้นงานที่บางมากเนื่องจากรอยกดที่เกิดขึ้นอาจเกินความหนาชิ้นทดสอบ และไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุที่ผ่านการชุบผิวแข็ง เนื่องจากรอยกดจะลึกเกินความหนาของชั้นชุบแข็งทำให้ได้ค่าความแข็งของแกนกลางชิ้นทดสอบ ซึ่งอ่อนนุ่มร่วมด้วยส่งผลให้ค่าความแข็งผิวชุบผิดพลาดและตามค่าความแข็ง Brinell ปกติวัดเป็นแรงดันต่อหน่วยพื้นที่ในหน่วยกิโลกรัมต่อตาราง

มิลลิเมตร ของรอยกดที่เกิดขึ้นหลังนำน้ำหนักกดออก โดยการหาแรงที่กระทำด้วยพื้นที่รอยกดในรูปของพื้นที่ทรงกลมดังรูปที่ 2.35 โดยนำค่าแรงที่กระทำและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดแทนลงในสมการ 2.2

$$\text{BHN} = \frac{2L}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

เมื่อ BHN	คือ ค่าความแข็ง Brinell (kg mm ²)
L	คือ น้ำหนักกดที่กระทำ (kg)
D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)
d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (mm)



รูปที่ 2.35 แสดงภาพหัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็ง Brinell [25]

การทดสอบความแข็งแบบ Brinell มีข้อจำกัดและข้อเสีย คือเป็นการทดสอบทำลายซึ่งจะมีรอยกดปรากฏอยู่บนพื้นผิววัสดุหลังการทดสอบ ดังนั้นวัสดุที่ผ่านการทดสอบจะไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้อีกนอกจากนั้นเครื่องทดสอบความแข็ง Brinell มีน้ำหนักมาก ประมาณ 200 ปอนด์ จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานภาคสนาม รวมทั้งราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับเครื่องทดสอบความแข็งแบบอื่น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับ การฝึกสอน ประสบการณ์ และทัศนคติของผู้ทดสอบในการวัดรอยกด ซึ่งอาจทำให้การอ่านค่ารอยกดได้แตกต่างกันแต่ปกติแล้วความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะมีน้อย คือคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ข้อดีของการทดสอบ ความแข็งแบบ Brinell คือเป็นวิธีการทดสอบที่เก่าแก่จนเป็นที่ยอมรับและเป็นที่ยอมรับและเป็นที่คุ้นเคยของคนส่วนใหญ่ตลอดจนผลการทดสอบความแข็งที่

ได้รับยังเป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรมรวมทั้งการทดสอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็วคือประมาณ 2 นาที ในการดำเนินการทดสอบนอกจากต้นทุนค่าเครื่องมือแล้วต้นทุนอื่น

2.9.2 การทดสอบความแข็ง Rockwell

การทดสอบนี้เป็นแบบเดียวกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งหาได้จากขนาดความลึกรอยกดบนชิ้นทดสอบที่เกิดจากการกดด้วยหัวกดภายใต้น้ำหนักคงที่ แต่ที่ต่างกันคือในทางทฤษฎีการทดสอบ Rockwell จะทดสอบด้วยน้ำหนักต่างกันสามชุด กับหัวกดสามขนาด ส่วนการทดสอบ Brinell จะมีขนาดหัวกดที่ต่างไปและใช้น้ำหนักกดที่มากกว่ารวมทั้ง การทดสอบแบบ Rockwell จะมีรอยกดที่ได้มีขนาดเล็กและตื้นกว่าส่วนวัสดุที่นำมาทดสอบสามารถใช้กับวัสดุกลุ่มเดียวกันกับการทดสอบ Brinell แต่สามารถทำการทดสอบได้เร็วกว่าเนื่องการทดสอบแบบ Rockwell สามารถอ่านค่าความแข็งได้ทันทีจากหน้าปัดเครื่องตามมาตรฐาน ASTM E 18 ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 เครื่องทดสอบความแข็ง Rockwell พร้อมหัวกด [26]

การทดสอบแบบ Rockwell จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่ออกแบบมาเป็นพิเศษโดยการใส่น้ำหนักที่กระทำผ่านระบบตุ้มน้ำหนักกับระบบคานหัวกดอาจเป็นลูกบอลเหล็กกล้าแข็ง 1/16 นิ้ว 1/8 นิ้ว หรือหัวกดเพชรรูปกรวยมุม 120 ° เรียกว่า Brale ค่าความแข็งที่แสดงบนหน้าปัดเครื่องเป็นส่วนกลับของค่าความลึกรอยกด ส่วนการแสดงผลหน่วยค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักชนิดและขนาดของหัวกดที่ใช้ในการทดสอบยกตัวอย่างเช่นถ้าเลือกใช้น้ำหนักกด 100 kg และใช้หัวกดบอลเหล็กกล้า

แข็งขนาด 1/16 in. ต้องอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องในสเกล B และถ้าใช้หัวกดเพชรกับน้ำหนักกด 150 kg ต้องอ่านค่าความแข็งในสเกล C เป็นต้น

การทดสอบเริ่มแรกจะใช้น้ำหนักกดเบื้องต้น 10 kg ค้างไว้ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดเบื้องต้นบนชิ้นทดสอบ โดยสังเกตเข็มบนหน้าปัดเครื่องที่แสดงน้ำหนักกดเบื้องต้นจะเข้าสู่บริเวณที่กำหนดจากนั้นให้ใส่น้ำหนักกดแท้จริง โดยปกติถ้าใช้หัวกดบอลน้ำหนักกดแท้จริงจะอยู่ในช่วงประมาณ 60 ถึง 100 kg และถ้าใช้หัวกดเพชรจะใช้น้ำหนักกดแท้จริงได้ถึง 150 kg ส่วนหัวกดบอลจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว และหัวกดบอลขนาด 1/8 1/4 และ 1/2 นิ้ว จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่าหลังจากใส่น้ำหนักกดแท้จริงและนำน้ำหนักกดออกให้อ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องโดยที่ น้ำหนักกดเบื้องต้นยังคงค้างอยู่

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสเกลชนิดหัวกดและน้ำหนักกดของการทดสอบความแข็ง Rockwell [26]

สเกล	หัวกด	น้ำหนักกด (kg)
A	เพชร	60
B	บอล 1/6 นิ้ว	100
C	เพชร	150
D	เพชร	100
E	บอล 1/6 นิ้ว	100
F	บอล 1/8 นิ้ว	60
G	บอล 1/16 นิ้ว	150

หมายเลข	สัญลักษณ์	ความหมาย
1	D	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวบอล 1/16 นิ้ว (1.588 mm.)
3	P_0	น้ำหนักกดเบื้องต้น 10 kgf (98 N)
4	P_1	น้ำหนักกดหลัก 50 90 หรือ 140 kgf
5	P	น้ำหนักกดแท้จริง $P_0 + P_1 = 60, 100$ หรือ 150 kgf (589, 981 หรือ 1472 N)
6	---	ความลึกรอยกดที่เกิดจากน้ำหนักกดเบื้องต้น
7	---	ความลึกรอยกดที่เกิดจากน้ำหนักกดแท้จริง
8	e	ความลึกรอยกดถาวรภายใต้ น้ำหนักกดเบื้องต้นหลังนำน้ำหนักกดหลักออก ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.002 mm.
9	xx HRx	ความแข็ง Rockwell สเกล F B และ G = 130 - e

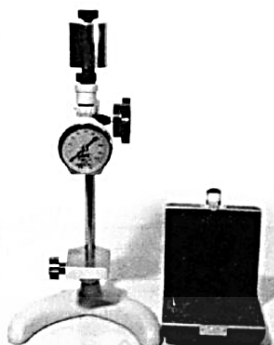
รูปที่ 2.37 แสดงภาพการทดสอบความแข็ง Rockwell ด้วยหัวกดบอล (สเกล B F และ G) [26]

การทดสอบแบบ Rockwell มีข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดในการทดสอบเช่นเดียวกับกับการทดสอบ Brinell กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell ผลที่ได้ค่อนข้างถูกต้อง และแม่นยำรวมทั้งการทดสอบทำได้รวดเร็วและได้ค่าความแข็งทันทีหลังการทดสอบโดยอ่านค่าได้ โดยตรงจากหน้าปัดเครื่อง โดยไม่ต้องทำการคำนวณใดๆ การทดสอบ Rockwell นี้เป็นการทดสอบความแข็งที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปเช่นเดียวกับ Brinell กล่าวคือการทดสอบแบบนี้ผลการทดสอบที่ได้จากวัสดุเดียวกันสามารถให้ค่าซ้ำๆ กันแม้ว่าจะทดสอบด้วยผู้ใดก็ตามและการทดสอบแบบนี้สามารถทำการทดสอบความแข็งกับวัสดุได้อย่างกว้างขวาง ข้อเสียของการทดสอบ Rockwell เป็นแบบเดียวกันกับการทดสอบ Brinell คือ เครื่องทดสอบราคาค่อนข้างสูงจึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมรวมทั้งเป็นการทดสอบแบบทำลาย

2.9.3 การทดสอบความแข็งแบบ Durometer

Durometer มีหลายชนิด การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบโดยหลักการทำงานของเครื่องแต่ละแบบจะเหมือนกัน ต่างกันเฉพาะความคมของปลายแหลมของหัวกดและขนาดของน้ำหนักกดที่ได้จากแรงส่งของสปริงขนาดต่างๆ การวัดค่าความแข็งจะได้จากค่าความลึกของรอยกด โดยค่าความแข็งจะเริ่มจาก 100 ที่ความลึกรอยกดเท่ากับศูนย์ จนถึงค่าความแข็งเท่ากับศูนย์ที่ความลึกรอยกด 0.1 นิ้ว โดยน้ำหนักกดที่กระทำกับหัวกดจะแปรผกผันกับความลึกรอยกด กล่าวคือวัสดุแข็งที่ให้ความลึกรอยกดน้อยให้เลือกใช้ Durometer ที่มีน้ำหนักกดสูงๆ ส่วนวัสดุอ่อนที่ให้ความลึกรอยกดมากให้ใช้ชนิดที่มีน้ำหนักกดต่ำๆ ขึ้นทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 1/4 นิ้ว และในการทดสอบให้เว้นระยะจากขอบขึ้นทดสอบอย่างน้อย 1/2 นิ้ว ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วย Durometer ชนิดหนึ่งไม่สามารถใช้เปรียบเทียบหรือแปลงค่าไปเป็นค่าความแข็งของ Durometer อีกชนิดหนึ่งได้

Durometer แบบ Shore เป็นเครื่องทดสอบด้วยมือซึ่งออกแบบให้ใช้ในการทดสอบความแข็งกับวัสดุอ่อน เช่น ยาง พลาสติก และวัสดุประกอบต่างๆ (Composites) รูปที่ 2.38 แสดงเครื่องทดสอบ Durometer แบบ Shore ซึ่งมีสองชนิดพื้นฐานได้แก่ Shore A กับ D ทั้งสองชนิดนี้มีขั้นตอนการทดสอบเหมือนกัน คือสปริงจะส่งน้ำหนักไปยังหัวกดซึ่งจะกดลงบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบความต้านทานต่อการเกิดรอยกดของพื้นผิวขึ้นทดสอบสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัด Durometer โดยแบบ A จะมีสปริงที่ให้น้ำหนักกดระหว่าง 56-822 กรัม ส่วนแบบ D น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 0-10 ปอนด์ ทั้งสองแบบนี้อ่านค่าความแข็งได้จาก 0-100 กล่าวคือวัสดุที่อ่านค่าได้สูงแสดงว่ามีความแข็งมากหรือมีความต้านทานต่อการเกิดรอยกดได้สูง ส่วนการแสดงผลหน่วยจะขึ้นอยู่กับชนิดที่ใช้เช่น 50A หรือ A50 เป็นต้น รายละเอียด เกี่ยวกับลักษณะของหัวกดน้ำหนักกดที่ได้จากสปริง ลักษณะการใช้งานของสเกลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2240



รูปที่ 2.38 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore [26]

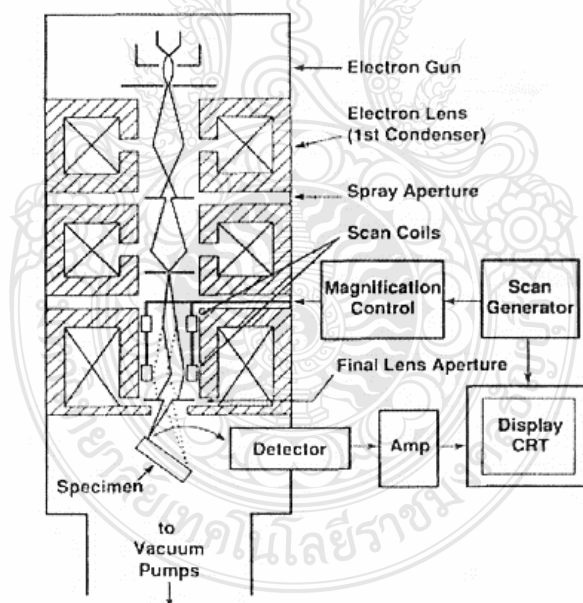
ตารางที่ 2.4 รายละเอียดการทดสอบความแข็งแบบ Durometer [26]

สเกล	น้ำหนักจากสปริง	รายละเอียดหัวกด	รูปหัวกด	ประเภทชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ
A	821 gf 1.81 lbs	กรวยมุม 35°ปลายตัด		ยางหนังเทียม wax หรือวัสดุกลุ่ม elastomer ที่อ่อนนุ่ม
B	821 gf 1.81 lbs	กรวยมุม 30°ปลายแหลม		ยางหรือ elastomer ที่มีความแข็งไม่มากนัก
C	4.5 kgf 10 lbs	กรวยมุม 35°ปลายตัด		ยางหรือพลาสติกที่มีความแข็งปานกลาง
D	4.5 kgf 10 lbs	กรวยมุม 30°ปลายแหลม		ยางหรือพลาสติกที่มีความแข็งมาก
DO	4.5 kgf 10 lbs	ครึ่งทรงกลมขนาด 3/32"		ลูกกลิ้งการพิมพ์หรือตัวกรองเส้นใยชนิดหนาแน่น
O	821 gf 1.81 lbs	ครึ่งทรงกลมขนาด 3/32"		ลูกกลิ้งการพิมพ์หรือตัวกรองเส้นใยชนิดนุ่ม
OOO	113 gf 4.0 oz	ครึ่งทรงกลมขนาด 1/2"		ยางหรือวัสดุที่อ่อนมาก เช่น open cell foam
SL	142 gf 50 oz	วงกลมขนาด Ø 0.5"		โฟมหรือพลาสติกหรือโฟมยาง

2.10 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

2.10.1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

दनัย กิจชัยนุกูล [27] ได้กล่าวว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เป็นเครื่องมือด้านวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) ได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และ SEM ยังมีคุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้น และด้วยความสามารถในการบีบลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดลึกสูง การทำงานของ SEM ส่วนประกอบ และหลักการทำงานของ SEM แสดงดังรูปที่ 2.39 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน(Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดถูกเร่งให้เกิดเคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 กิโลโวลต์ (บางเครื่องทำได้สูง ถึง 50 กิโลโวลต์) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดย แอปเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดมีขนาดต่างๆกัน ตามลักษณะการใช้งาน



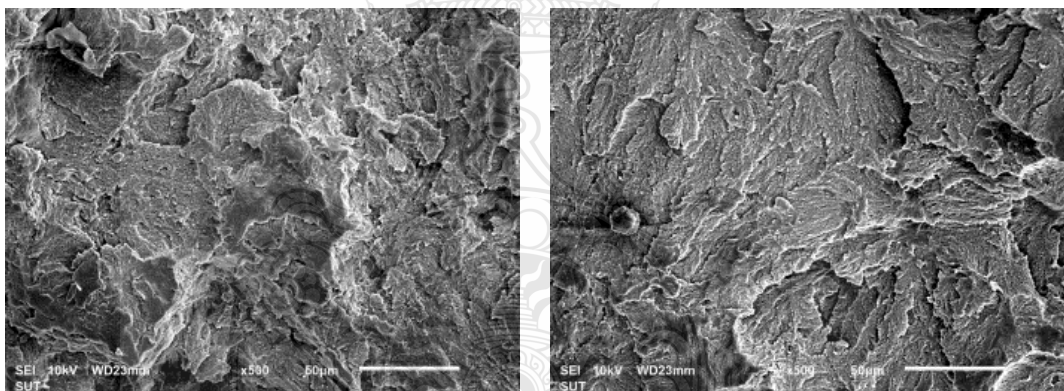
รูปที่ 2.39 การทำงานของ SEM [27]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์

ที่ทำหน้าที่ป้อนอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์สุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ตกบนผิวของตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่ที่กราดลำแสงอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำแสงอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้นแล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image : SE) สัญญาณนี้ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุดภาพที่ได้จากสัญญาณนี้เรียกว่าภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons : BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่างและแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว



รูปที่ 2.40 โครงสร้างจุลภาคขึ้นทดสอบที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [27]

2.10.2. การศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบวัดค่าความถ่วงจำเพาะ

จากทฤษฎีเบื้องต้นความหนาแน่นของวัตถุเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัตถุหนึ่งๆ โดยที่หากเป็นวัตถุเดียวกันจะมีความหนาแน่นเท่ากัน โดยความหนาแน่นจะเป็นตัวบ่งบอกว่า ถ้าสองวัตถุใดมีปริมาตรเท่ากันวัตถุใดจะมีมวลมากกว่ากัน ความหนาแน่นหาได้จากสมการที่ 2.5

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุในหน่วย kg/m^3 หรือ g/cm^3

m คือ มวลของวัตถุ

V คือ ปริมาตรของวัตถุ

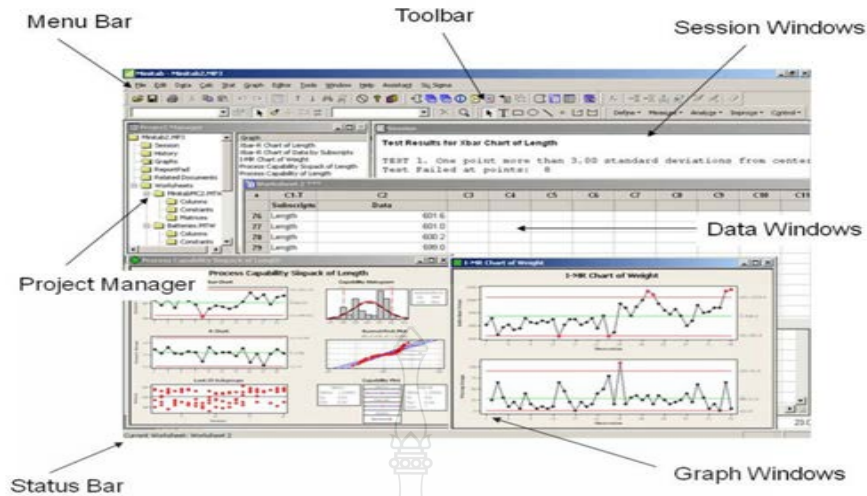
2.11 Minitab

Minitab [28] เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ประมวลผลข้อมูลทางด้านสถิติ โดยพัฒนาจากกลุ่มนักวิชาการทางด้านสถิติมากกว่า 30 ปีแล้ว โดยวิทยานิพนธ์ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 17 ซึ่งสามารถใช้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดย Minitab เข้ามามีบทบาทสำหรับผู้ผู้ใช้สถิติในส่วนของ การประมวลผล และการแสดงผลข้อมูลในลักษณะของตัวเลข และผลในลักษณะของกราฟ ประกอบกับเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนา และมีบทบาทต่อชีวิตประจำวันดังนั้น Minitab จึงถูกเลือกใช้ด้วยเหตุผลหลัก 3 ประการ คือ

- 1) ความซับซ้อนในการประมวลผล (Complexity)
- 2) ความเที่ยงตรง และแม่นยำในการประมวลผลข้อมูล (Accuracy)
- 3) ความรวดเร็ว และความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

Minitab เป็นโปรแกรมที่มีความโดดเด่นในด้านการใช้งานที่ง่าย และมีการพัฒนาปรับปรุงฟังก์ชันต่างๆ ให้สอดคล้องกับความรู้และทฤษฎีใหม่ๆ รวมถึงการประยุกต์ทางด้านสถิติโดยเฉพาะในงานด้านคุณภาพอย่างต่อเนื่อง

ดังนั้น Minitab จึงเป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดีสำหรับกลุ่มผู้ที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพด้วยหลักการ “ซิกซ์ ซิกม่า” เนื่องจาก Minitab เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับกลุ่มผู้ใช้กลุ่มนี้ แต่ไม่ได้หมายความว่าเฉพาะกลุ่มผู้ใช้กลุ่มนี้เท่านั้น Minitab ยังเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิชาการ นักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ และผู้ใช้สถิติทั่วไปถึงแม้ว่าโปรแกรม Minitab จะเป็นโปรแกรมที่ช่วยให้การทำงานของเราสะดวกขึ้นมาก แต่ความรู้ความเข้าใจในการทำงานของโปรแกรมก็ยังเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ผู้ใช้เสมอ อธิบายภาพรวม และการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 2.41



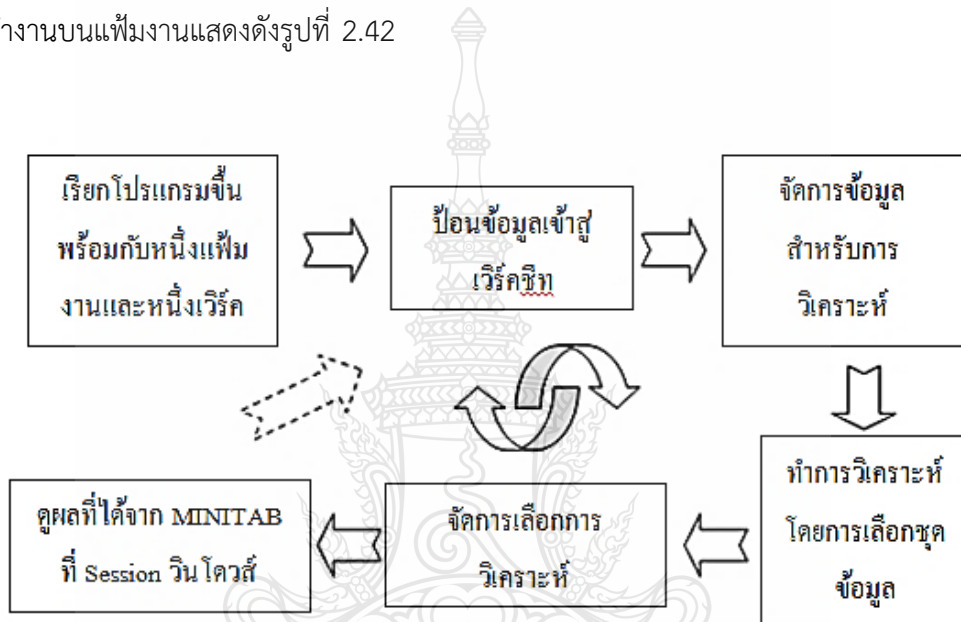
รูปที่ 2.41 ลักษณะหน้าต่างโปรแกรม Minitab [28]

2.11.1 การใช้งานโปรแกรม Minitab

- 1) การเปิดโปรแกรม หรือเริ่มต้นเข้าสู่การทำงานบนแฟ้มงาน
- 2) ป้อนข้อมูลเข้าสู่เวิร์คชีท เนื่องจากโปรแกรม Minitab เป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูล ดังนั้นเมื่อเราเปิดแฟ้มงานแล้วสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับการใช้งานโปรแกรม คือ ข้อมูลซึ่งจะเป็นการป้อนจากแป้นพิมพ์ การนำข้อมูลจากฐานข้อมูลชนิดอื่นเช่น Excel, Access หรือ Text เป็นต้น หรือการเปิดจากไฟล์เวิร์คชีทของ Minitab ก็แล้วแต่จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้เอง
- 3) การจัดการข้อมูลเป็นขั้นตอนที่สามารถข้ามไปยังขั้นตอนต่อไปได้ ถ้าหากว่าข้อมูลที่อยู่ในเวิร์คชีทมีความพร้อม และอยู่ในรูปแบบที่ถูกต้องสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ Minitab แต่ถ้าหากไม่เราจำเป็นต้องจัดการข้อมูลดังกล่าวก่อนอาจใช้ฟังก์ชันที่มีใน Minitab หรือการจัดการจากโปรแกรมอื่นก่อนนำเข้าสู่เวิร์คชีทใน Minitab ก็ได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัญหา และประสบการณ์ในการจัดการข้อมูลของผู้ใช้งานโปรแกรม ตัวอย่างขั้นตอนนี้ คือการรวมข้อมูล (Stack) การเปลี่ยนทิศทางการเรียงข้อมูล (Transpose Data) การคำนวณข้อมูล (Calculate) การสร้างชุดข้อมูลย่อย (Subset) เป็นต้น
- 4) เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเราจะเลือกฟังก์ชัน หรือตัวสถิติที่เราจะทำการวิเคราะห์ เช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การออกแบบการทดลอง (DOE) เป็นต้น
- 5) เป็นส่วนในรายละเอียดของการวิเคราะห์ใดๆที่เราเลือก โดยปกติแล้วถ้าเราใช้การตั้งค่าเริ่มต้นของโปรแกรม (Default) ซึ่งเป็นค่าที่มีการใช้ทั่วไปแล้ว เมื่อเราใส่ข้อมูลครบถ้วนตามที่โปรแกรมต้องการแล้ว เราสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้ แต่ในบางครั้งเราต้องการปรับเปลี่ยนค่าเช่น ค่า

ความเชื่อมั่น 95% เป็น 99% ในการสร้างกราฟ หรือจะเป็นการสั่งให้โปรแกรมแสดงค่า หรือเก็บค่าใดๆที่เราต้องการ เป็นต้น

6) การจัดการกับผลการประมวลผลที่โปรแกรม Minitab ดำเนินการให้ซึ่งจะออกมาใน 2 รูปแบบคือ ผลทางตัวเลขหรือตัวอักษร และกราฟ ตัวอย่างของการทำงานในขั้นตอนนี้ เช่น การสร้างรายงาน การเปลี่ยนสีกราฟ ตัดข้อมูลผิดปกติ เป็นต้น จากขั้นตอนโดยรวมทั้งหมดที่กล่าวมานี้ โดยปกติผู้ใช้งานสามารถที่จะทำซ้ำ หรือการวนหรือย้อนกลับขั้นตอนต่างๆ ได้ตลอดเวลาที่เราได้ทำงานบนแฟ้มงานแสดงดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 ภาพรวมการใช้งานโปรแกรม Minitab [28]

2.11.2 ความสามารถด้านฟังก์ชันทางสถิติและกราฟ

1) Basic Statistics เป็นฟังก์ชันพื้นฐานทางสถิติซึ่งประกอบด้วยสถิติเชิงพรรณนา (descriptive) และสถิติเชิงอนุมาน (inferential) เช่น การหาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ ค่าเฉลี่ย (mean) ค่าความแปรปรวน (variance) ค่าพิสัย (range) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีชุดคำสั่งในการ หาช่วงความเชื่อมั่น และการทดสอบสมมติฐาน (confidence interval และ hypothesis testing) โดยผลการคำนวณจะให้ทั้งผลลัพธ์บน Session และกราฟ

2) Regression Analysis เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ได้ทั้งรูปแบบสมการเส้นตรง (linear) และสมการกำลัง (polynomial) หรือรูปแบบอื่นๆที่ต้องการ รวมถึงการเก็บค่าเศษเหลือ (residual) และกราฟประกอบการวิเคราะห์

3) ANOVA เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยสามารถวิเคราะห์ปัจจัยตั้งแต่ 1. ปัจจัย (one-way) 2. ปัจจัย (two-way) หรือมากกว่า (genera) รวมถึงการแสดงผลกราฟปัจจัยอิทธิพลหลัก (main effect plot) และปัจจัยอิทธิพลร่วม (interaction effect plot) และอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

4) Statistical Quality Tools เป็นฟังก์ชันสนับสนุนงานทางด้านการวิเคราะห์ด้านคุณภาพ ประกอบด้วยหัวเรื่องหลัก 4 เรื่อง คือ Quality Tools ที่สามารถสร้างกราฟพาเรโต (pareto) รันชาร์ต (run chart) Control Charts ชุดคำสั่งสร้างแผนภูมิควบคุมมากมายหลากหลายครอบคลุมข้อมูลทุกประเภท รวมถึงคำสั่งเพิ่มเติมช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลผิดปกติ

5) Capability Analysis เป็นคำสั่งวิเคราะห์ความสามารถกระบวนการโดยการนำเอาความผันแปรข้อมูลเทียบกับข้อกำหนด (specification) ซึ่งสามารถจัดการได้ทั้งกรณีข้อมูล เป็นปกติ (normal) หรือไม่ปกติ (non-normal) และ Measurement System เป็นคำสั่งวิเคราะห์และประเมินความสามารถกระบวนการวัด เช่น Stability Bias Linearity และ GR&R

6) Design of Experiment เป็นชุดคำสั่งในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย factorial response surface mixture และ taguchi สำหรับคำสั่งการออกแบบการทดลองในโปรแกรม Minitab จะช่วยเหลือตั้งแต่การออกแบบการทดลอง การจัดเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ผลที่ได้และกราฟประกอบการแปลผล รวมถึงการหาค่าเพื่อผลลัพธ์ที่ต้องการ (Response optimizer)

7) Reliability เป็นฟังก์ชันสำหรับวิเคราะห์ค่าความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์โดยอาศัยหลักการทางสถิติ โดยมีฟังก์ชันช่วยในการหาฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Fit distribution) แบบต่างๆ และทำการวิเคราะห์ผ่านฟังก์ชันโดยอาศัยหลักการความน่าจะเป็น

8) Power and Sample Size เป็นฟังก์ชันเพื่อช่วยในการหาขนาดทดสอบ (sample size) หรือความเชื่อมั่นในการทดสอบ (power) สำหรับการทดสอบสมมติฐานแต่ละแบบ

9) Multivariate Analysis เป็นฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวแปรเช่น คำสั่ง Principal Component Factor analysis Cluster analysis เป็นต้น

10) Time Series and Forecasting เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์ข้อมูลแปรผันตามเวลาเพื่อดูแนวโน้ม ลักษณะกราฟหรือทิศทาง เพื่อใช้ในการทำนาย

11) Nonparametric เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์โดยไม่ใช้พารามิเตอร์

12) Tables เป็นฟังก์ชันที่จัดการข้อมูลที่เป็นอยู่ในรูปแบบของตารางของข้อมูลนับจำนวนความถี่ พร้อมคำสั่งการวิเคราะห์ Chi-square

13) Simulation and Distribution เป็นคำสั่งช่วยในการสรุปข้อมูลผ่านฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Distribution) เพื่อประโยชน์ในการทำการทดสอบโมเดลหรือการวิเคราะห์ที่ต้องการ

14) EDA (Explore Data Analysis) เป็นหมวดฟังก์ชันในการประเมินข้อมูลเพื่อดูลักษณะการกระจายของข้อมูล เช่นคำสั่ง Stem-and Leaf หรือ Boxplot เป็นต้น

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จักรวาล วงศ์ศักดิ์ [29] ได้ทดลองขึ้นรูปแบบหมุนได้ในบางกรณี พอลิคาร์บอเนต 2 ชนิด (PCH2000 , PCH4000) ซึ่งพอลิคาร์บอเนตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ามีแนวโน้มที่ขึ้นรูปได้ยากกว่า โดยให้ความร้อนแม่พิมพ์ 260 , 280 องศาเซลเซียส เวลาในการให้ความร้อน 10 และ 20 นาที พอลิเอทิลีน ให้ความร้อนแม่พิมพ์ที่ 240 องศาเซลเซียส เวลาให้ความร้อน 10 นาที และใช้เวลาในการหล่อเย็น ประมาณ 20-30 นาที ในขณะที่ใช้ผงพอลิคาร์บอเนตในขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 250 μm สามารถขึ้นรูปยากกว่าพอลิคาร์บอเนตในขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 250 μm ซึ่งทำให้ทราบว่าขนาดและรูปร่างของอนุภาควัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป น้ำหนักโมเลกุล ส่งผลต่อค่าความหนืด ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการขึ้นรูป และรอบในการหมุนส่งผลต่อการกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้ อีกทั้งระยะเวลาในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่ค่อนข้างนานกว่ากระบวนการขึ้นรูปชนิดอื่นส่งผลให้สมบัติเชิงกลบางประการเปลี่ยนแปลงไปด้วย

อาสลิล ทิพย์ไกรสร และ วิภู ศรีสืบสาย [30] ได้ศึกษาการค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate , MFR) ของพลาสติกประกอบระหว่าง PC และ ABS ซึ่งเติมสารตัวเติม คือ คาร์บอนแบล็ค (CB) วัดค่าอัตราการไหลโดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 265 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม ตามมาตรฐาน ASTM-D1238 พบว่าอัตราส่วน PC/ABS/CB ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนแบล็คมากกว่า 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่สามารถไหลได้ จากนั้นได้ทำการออกแบบการทดลองใหม่โดยให้คาร์บอนแบล็คไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้การออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained Mixture Designs) พบว่าอัตราการไหลของปริมาณการเติมของส่วนประกอบ 3 ชนิด มีผลทำให้อัตราการไหลของพลาสติกเปลี่ยนแปลง แนวโน้มอัตราการไหลของพลาสติกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ PC และ CB และแนวโน้มอัตราการไหลจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ ABS

วิฑูร วิมลทรง [31] ได้ทดลองใช้ผงซีลี้อยู่ไม่มาใช้ในการเสริมแรงให้กับพอลิคาร์บอเนต โดยใช้ไซเลน 2 ชนิด คือ TMS และ Z6011 รวมถึงโซเดียมไฮดรอกไซด์จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ไม่กับพอลิคาร์บอเนต ผลการทดลองพบว่าค่ามอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสแรงโค้งงอของวัสดุคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ อีกทั้งค่า

มอดูลัสแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงโค้งงอของวัสดุคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของผงซีลี้อยู่ไม่ลงไป ผงซีลี้อยู่ไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพ ทราบถึงการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคผงซีลี้อยู่ไม่ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยู่ไม่ยังส่งผลต่อค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณผงซีลี้อยู่ไม่ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของพอลิคาร์บอนเนต นอกจากนี้แล้วมีการใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด Hydrocerol HK 40B และ 5-Phenyl-1H-Tetrazole ในการขึ้นรูปเป็นโฟมคอมพอสิต ในการทดลองพบว่าสารที่ทำให้เกิดฟอง 5-Phenyl-1H-Tetrazole ปริมาณ 2 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดโครงสร้างเซลโฟมที่สม่ำเสมอและมีสมบัติการเป็นฉนวนการนำความร้อนที่ดี

เฉลิมชัย ไชยงรัตน์ ฐวิศณี ปัทมประดิษฐ์ และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ [32] ได้ศึกษาผลกระทบของความร้อนและเวลาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของพอลิคาร์บอนเนตผสม โดยอบที่อุณหภูมิ 75 , 90 , 105 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา $\frac{1}{4}$ $\frac{3}{4}$ 4 8 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่าการอบอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พอลิคาร์บอนเนตผสมจากวัสดุเหนียวเป็นวัสดุเปราะ จากการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่า เวลาที่ใช้ในการอบไม่มีผลต่อโครงสร้างหลักของพอลิคาร์บอนเนตและสัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานตัวอย่างพอลิคาร์บอนเนตผสม แต่ความร้อนส่งผลให้โครงสร้างภายในสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงเป็นระเบียบมากขึ้น

นพวรรณ โหมทอง [33] ศึกษาผลของการผสมและกระบวนการขึ้นรูปต่อความเหนียวของพอลิคาร์บอนเนตผสม Cyclohexylbiphenylcyclohexane หรือ CBC33 เป็นสารผลึกเหลวโมเลกุลต่ำกับพอลิคาร์บอนเนต 2 ชนิด PC-2600 และ PC-2405 ที่มีค่าดัชนีการไหล 19.9 และ 23.1 กรัมต่อ 10 นาทีที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ในขั้นแรกของผสมระหว่างพอลิคาร์บอนเนตและ CBC33 ใช้วิธีการกวนผสมแบบหลอมเหลวด้วยความร้อนที่อัตราส่วน 0.1 , 0.2 , 0.4 , 0.8 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CBC33 พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะถูกนำไปทดสอบความเหนียวเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอนเนตบริสุทธิ์ พบว่าอัตราส่วน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CBC33 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากที่อัตราส่วนผสมสูงกว่าสามารถลดความเหนียวของพอลิเมอร์ได้เพียงเล็กน้อย จากนั้นเปรียบเทียบผลของวิธีการผสมที่มีผลต่อความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม จากค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมด้วยวิธีการกวนผสมแบบหลอมเหลวด้วยความร้อน การผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวและการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่อัตราส่วนผสม CBC33 ผลการทดลองให้ผลของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวให้ผลค่าความเหนียวที่น้อยที่สุด นอกจากนั้นการผสมด้วยวิธีอื่นก็ส่งผลให้ค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ลดต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ อีกทางนำมาทดสอบความเหนียวของชิ้นส่วนทางวิ่ง (runner) จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป แต่ผลความเหนียวของผลิตภัณฑ์ยังไม่ชัดเจน

สุภลักษณ์ คุณประเสริฐ [34] ศึกษาเกี่ยวกับผลของการผสมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ (low molecular weight liquid crystal) กับพอลิคาร์บอเนตที่มีต่อสมบัติทางกล (mechanical property) สมบัติทางความร้อน (thermal property) โครงสร้าง (morphology) และการกระจายตัวของมวลโมเลกุล (molecular weight distribution) ของ พอลิเมอร์ผสม โดยใช้พอลิคาร์บอเนต 2 ชนิดซึ่งมีมวลโมเลกุลแตกต่างกัน (PC2600 และ PC2405) ผสมกับผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ (CBC-33) ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการผสมนี้ใช้เครื่องอินเทอร์นอลมิกเซอร์ (internal mixer) เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และเครื่องอัดรีด แบบสกรูคู่ (twin screw extruder) พบว่าค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องมือชนิดต่างๆ เมื่อใช้ผสมพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าค่าแรงบิดของเครื่องมืออื่นๆ เมื่อใช้พอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์เมื่อผสมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยใช้เครื่องอินเทอร์นอลมิกเซอร์ ค่าแรงบิดมีค่าลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ค่าแรงบิดมีค่าลดลงประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์และเมื่อผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ค่าแรงบิดมีค่าลดลงประมาณ 51 เปอร์เซ็นต์ จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ทราบว่าผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำสามารถลดความหนืดของพอลิคาร์บอเนตได้ ในขณะที่สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ โดยความแข็งแรงทางแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัส (modulus of elasticity) ของพอลิเมอร์ผสมกับพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ การผสมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำส่งผลต่อลักษณะโครงสร้าง สมบัติทางความร้อนและการกระจายตัวของมวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมเพียงเล็กน้อย

อรอุมา เจริญสุข [35] ศึกษาพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใย 3 ชนิด โดยเครื่องบดผสมแบบแกนเดี่ยวและคู่ และการบดผสมโดยใช้เครื่องมือร่วมกัน ระบบอีพอกซีกับตัวทำแข็งดีดีเอสใช้เป็นสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันระหว่างเส้นใยเสริมแรงกับพอลิคาร์บอเนต พบว่าความยาวเส้นใยในพอลิเมอร์ผสมไม่ขึ้นกับความยาวของเส้นใยเริ่มต้นทั้งระบบที่มีการใช้ระบบอีพอกซีเป็นสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ และการใช้เครื่องบดผสมภายในทำให้ขนาดของเส้นใยมีขนาดสั้นที่สุด ในขณะที่เครื่องผสมแบบแกนเดี่ยวทำให้ขนาดของเส้นใยยาวที่สุดการใช้ระบบอีพอกซีที่ 1% ในการผสมพอลิคาร์บอเนตโดยใช้เครื่องผสมอัดรีดแบบสกรูคู่พบว่า อุณหภูมิการบิดงอลดลงแต่คุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ มีค่าเพิ่มขึ้นและดีว่าพอลิคาร์บอเนตที่ไม่มีอีพอกซี และผลการวิเคราะห์ทางสถิติยังยืนยันเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นเครื่องมือที่ดีที่สุดผลของการเสริมแรงพอลิคาร์บอเนตด้วยเส้นใยคาร์บอน 5% เส้นใยเคฟลา 10% และเส้นใยแก้ว 15% โดยน้ำหนักทั้งระบบการผสมที่มีและไม่มีสารช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้อีพอกซี การศึกษาลักษณะทางกายภาพพบว่า ระบบอีพอกซี 1% สามารถทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานการแตกหักสำหรับพอลิคาร์บอเนตผสมได้ อีกทั้งยังพบว่าพอลิคาร์บอเนตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะเห็นการยึด

ติตรระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่พอลิคาร์บอนเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยเคฟลาไม่ได้มีผลทำให้เกิดการยึดติดกัน

SHUICHI TANOUÉ. [36] ศึกษาความเร็วการหมุนของสกรูต่อสมบัติเชิงกลและการนำความร้อนของคอมโพสิตโพลีคาร์บอนเนต (PC) / คาร์บอนไฟเบอร์ (VGCF) ที่เตรียมโดยเครื่องอัดรีดสกรู โดยการใช้คาร์บอนไฟเบอร์ที่มีขนาดแตกต่างกัน พบว่าความเร็วของสกรูจะมีผลต่อขนาดของไฟเบอร์คาร์บอนที่มีขนาดเล็กถึงปานกลางเป็นผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ [37] ศึกษาสมบัติเชิงกลการหลอมรวมของวัสดุผสมพอลิคาร์บอนเนตและผงไฟเบอร์คาร์บอน พิจารณาทำการศึกษาสมบัติเชิงกลระหว่างพอลิคาร์บอนเนตและผงไฟเบอร์คาร์บอนโดยการใช้พอลิคาร์บอนเนต 4 ชนิด และมี VGCF 2 ชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีอัตราส่วนที่ต่างกัน (VGCF-S มีอัตราส่วนเท่ากับ 100 % และ VGCF-H มีอัตราส่วนเท่ากับ 40 %) หลอมละลายในสภาวะอุณหภูมิแตกต่างกันออกไปโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ ซึ่งใช้ปริมาณพอลิคาร์บอนเนต 100 กรัม และใช้ VGCF 1,3,5 และ 7 phr ผลการทดลองพบว่าคุณภาพระหว่างพอลิคาร์บอนเนตและ VGCF มีค่าใกล้เคียงกับพอลิคาร์บอนเนตที่ไม่ได้ผสม VGCF

จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ [38] การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการนำความร้อนการหลอมรวมของพอลิคาร์บอนเนตและผงไฟเบอร์คาร์บอน พิจารณาการไหลของพอลิคาร์บอนเนตและผงไฟเบอร์คาร์บอนโดยใช้พอลิคาร์บอนเนต 2 ชนิด (PC-H , PC-L) และผงไฟเบอร์คาร์บอน 2 ชนิด (VGCF-S , VGCF-H) จากผลการทดลองพบว่า การนำความร้อนของพอลิเมอร์สามารถควบคุม VGCF คอมโพสิตได้ด้วยความหนืดของพอลิเมอร์เนื่องจากปริมาณของ VGCF เปลี่ยนไปตามความหนืดของวัสดุ

เจษฎา มังกะโรทัย และ อธิพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์ [39] ศึกษาผลกระทบของการเติมผงถ่านจากขี้ข้าวโพดในเส้นใยพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมผงถ่านขี้ข้าวโพดที่อัตราส่วน 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 2.5 และ 3% นั้นไม่ทำให้สมบัติของพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนไปจากเดิม ผลการกระจายตัวของเส้นใยมีลักษณะความโปร่งแสงและมีผิวสม่ำเสมอ ส่วนเส้นใยพอลิโพรพิลีนผสมผงถ่านขี้ข้าวโพดจะมีลักษณะทึบแสง มีผิวของเส้นใยขรุขระและมีการกระจายตัวของผงถ่านขี้ข้าวโพดไม่สม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด สรุปได้ว่าการเติมผงถ่านขี้ข้าวโพดที่อัตราส่วนต่างๆ นั้นส่งผลให้การหดตัวของเส้นใยลดลงและการเติมผงถ่านขี้ข้าวโพดนั้นไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีน

Yingjie Xu [40] ศึกษาเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการกระแทกของชิ้นส่วนพอลิคาร์บอนเนตที่มีอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ผลลัพธ์ของพลังงานที่เกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากการจำลองพฤติกรรมการกระแทกของพอลิคาร์บอนเนต นอกจากนี้ยังมีการจำลองพฤติกรรมกระบวนการฉีดเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการฉีดขึ้นรูปและการแตกหักของชิ้นงานของพอลิคาร์บอนเนต

Zvi Rosenberg and Roman Kositsk [41] การศึกษาการเจาะด้วยเหล็กปลายแหลมในพอลิคาร์บอเนต (PC) โดยการทดสอบการเจาะลึกโดยใช้หัวกดแบบกรวยและผลการเจาะของเหล็กกล้า 7.62 มม. จากผลการทดลองพบว่าความต้านทานต่อการเจาะทั้งสองชุดของการทดลองเป็นไปในทางเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าความไวของพอลิคาร์บอเนตไม่ได้มีบทบาทสำคัญในด้านความต้านทานต่อการซึมผ่าน อีกทั้งยังพบว่าการคำนวณสำหรับข้อสังเกตนี้โดยรวมถึงการพึ่งพาความดันของค่าความยืดหยุ่นและค่าความแข็งแรงของพอลิคาร์บอเนตในสมการ constitutive โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลข

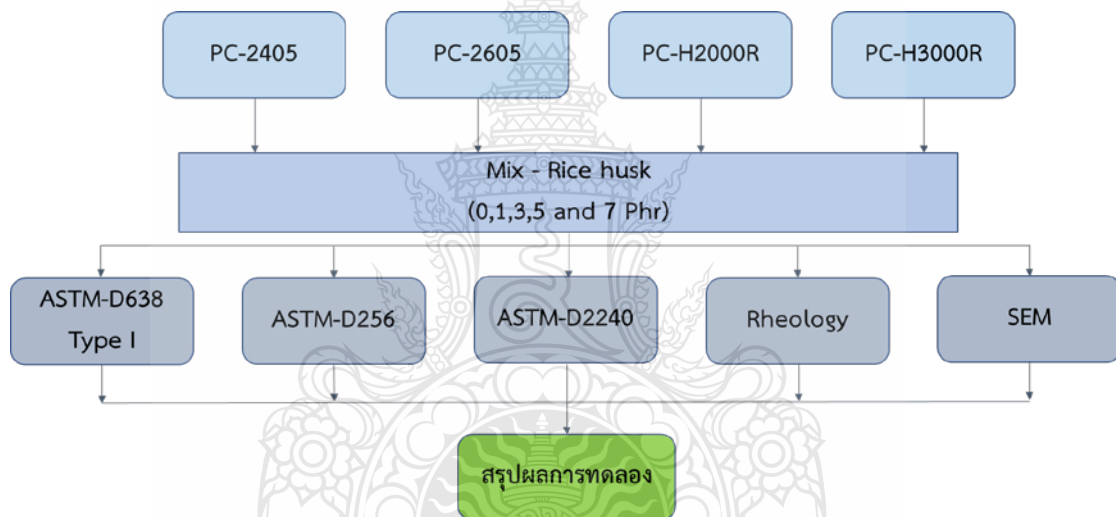
Young-Kuk Choi [42] การศึกษาการผลิตแผ่นคอมโพสิตโพลีเมอร์ที่ผสมผสานกับเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบหมุนและวิเคราะห์การกระจายตัวของเส้นใยคาร์บอน สมบัติทางไฟฟ้าและทางกลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้แสดงการกระจายตัวของ VGCF อย่างเป็นเนื้อเดียวกันในเมทริกซ์โพลีคาร์บอเนตโดยไม่มีการรวมตัวและไม่ทำให้สั้นลงของเส้นใย ปริมาณ VGCF ที่เพิ่มขึ้นยังค่อนข้างกระจายตัวได้ดีความต้านทานไฟฟ้าและความต้านทานแรงดึงลดลงทั้งสองวัสดุ ความพรุนเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มเส้นใยคาร์บอนขั้นตอนการขึ้นรูปแบบหมุนทำให้เกิดการกระจายตัวหลายทิศทางของเส้นใยคาร์บอนและเพิ่มสมบัติทางกลอีกทั้งแผ่นคอมโพสิตมีความต้านทานแรงดึงสูงเนื่องจากมีผลการประมวลผลของกระบวนการอัดขึ้นรูป

Juan Pablo Torres [43] ศึกษาพฤติกรรมและการเสียรูปของพอลิคาร์บอเนต (PC) ทำการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของการทดสอบ FWT เพื่อหาค่าการทดสอบที่ต่างกัน ในการจำลองพฤติกรรมของพอลิคาร์บอเนตในสถานการณ์แบบไดนามิกเราใช้โมเดลโครงสร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติซึ่งสามารถวัดอัตราความเครียดความดันและสภาวะอุณหภูมิของการตอบสนองการเสียรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงผลกระทบความร้อนและแรงเสียดทานจากการสัมผัสแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน เริ่มจากการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ การเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับศึกษาวิเคราะห์สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ แสดงในรูปที่ 3.1

3.1 แผนการดำเนินการ



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต (ภาคผนวก ก)

Polycarbonate Commercial code	Abbreviations	MVR (cm ³ / 10min)	MFI (g / 10 min)
PC – 2605	PC – A	12	12
PC – 2405	PC – B	19	20
PC – H2000R	PC – C	20	22
PC – H3000R	PC – D	28	30

3.2 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ เพื่อศึกษาสถานะในการขึ้นรูปอีกทั้งแนวทางในการดำเนินการในการวิจัย โดยใช้สภาวะอุณหภูมิการขึ้นรูป 280 – 300 องศาเซลเซียส และได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ [8] ศึกษาสมบัติเชิงกลการหลอมรวมของวัสดุผสมพอลิคาร์บอเนตและผงไฟเบอร์คาร์บอน พิจารณาทำการศึกษาสมบัติเชิงกลระหว่างพอลิคาร์บอเนตและผงไฟเบอร์คาร์บอนโดยใช้พอลิคาร์บอเนต 4 ชนิด และมี VGCF 2 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีอัตราส่วนที่ต่างกัน

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนต (PC-2405) จากบริษัท Makrolon
- 2) เม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนต (PC-2605) จากบริษัท Makrolon
- 3) เม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนต (PC-H2000UR) จากบริษัท Mitsubishi
- 4) เม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนต (PC-H3000UR) จากบริษัท Mitsubishi
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
- 6) เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ (Vernier Calipers)

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- 1) เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) รุ่น DCT-20L40
- 2) เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding) รุ่น BOY50R
- 3) เตาอบลมร้อน (Hot air oven)

3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Universal Tensile Properties)
- 2) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Test Strength)
- 3) เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer แบบ Shore D)
- 4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)
- 5) เครื่องทดสอบการไหลของพลาสติกด้วยเครื่อง Rheology รุ่น INSTRON CEAST

SmartRheo SR-10

3.3.4 ซอฟต์แวร์

1) โปรแกรมทางไฟไนท์อีลิเมนต์สำเร็จรูป ที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบการไหลตัวของพลาสติกหลอมเหลวในแม่พิมพ์ ตลอดจนวิเคราะห์ ตำแหน่งของเวลด์ อุณหภูมิ แรงดัน

ในการฉีดขึ้นรูป และความหนืดของพลาสติกหลอมเหลวช่วงเวลาหยุดการไหล อิทธิพลของรูปร่าง และ ตำแหน่งทางเข้า แรงบิดโมเมนต์ของชิ้นงานฉีดพลาสติก

3.3.5 การเตรียมพอลิคาร์บอเนตผสมกับผงเถ้าแกลบสำหรับการขึ้นรูป

การเตรียมพอลิคาร์บอเนตกับผงเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสม ที่สัดส่วนพอลิคาร์บอเนต 1 กิโลกรัม ต่อผงเถ้าแกลบ 1, 3, 5 และ 7 phr โดยทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 3 – 5 ชั่วโมง

3.4 การเตรียมพอลิเมอร์สำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมพอลิคาร์บอเนตกับผงเถ้าแกลบมีขั้นตอนดังนี้

1) ผสมพอลิคาร์บอเนตกับเถ้าแกลบในอัตราส่วนการผสมต่างๆ ที่น้ำหนัก 1000 กรัม ดังตารางที่ 3.1

2) นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 3 – 5 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบลมร้อน

3) นำพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากการอบในขั้นตอนที่ 2 -นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบ สกรูคู่ โดยใช้ความเร็วสกรูเท่ากับ 100 rpm และอุณหภูมิในการขึ้นรูป 280 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)

3.5 การวิเคราะห์ Rheology [44]

Rheology คือการวิเคราะห์พฤติกรรมสมบัติเชิงกลในการตอบสนองต่อแรงที่มากระทำต่อวัสดุ ซึ่งการตอบสนองของวัสดุนั้นจะอยู่ในลักษณะเสียรูปและการไหล ความสามารถการยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งค่าความหนืดก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะวัดค่าความต้านทานและสะท้อนให้เห็นถึงพลังงานในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ

- 1) บรรจุพลาสติกคอมโพลีเมอร์บอนด์และผงเถ้าแกลบลงในกระบอทดสอบ โดยใส่หัวตาย ขนาด $1 \times 10 \text{ mm}$ โดยใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- 2) ตั้งค่าโปรแกรมใช้แรงในการกด 100 Mpa เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการจากนั้นนำหัวกดใส่ปากกาจับแท่ง Piston
- 3) เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการ และกำหนดระยะเวลาในการ Pre-Heat
- 4) กดปุ่ม start พร้อมกับใช้ใบมีดตัดพลาสติกเหลว ที่เริ่มไหลออกมาทางหัวตาย ที่อยู่ด้านล่างของท่อทรงกระบอ
- 5) เครื่อง Rheology จะเริ่มการทำงานตามพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าไว้
- 6) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์ผล

3.6 ขั้นรูปชิ้นงานทดสอบ

3.6.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

1) อบไล่ความชื้นของเม็ดพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบด้วยเครื่องอัดรีดแบบ สกรูคู่ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) ขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) ด้วยอุณหภูมิ 280 – 300 องศาเซลเซียส แรงดัน 20 bar ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึงเป็นแบบ Dumbbell ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I แสดงดังรูปที่ 3.6 และชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงกระแทกเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 แสดงดังรูปที่ 3.9 สำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึงและการทดสอบแรงกระแทก ส่วนผสมละ 5 ชิ้นต่อการทดสอบ



รูปที่ 3.4 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding)

3.7 การทดสอบสมบัติทางกลของพอลิคาร์บอเนตกับผงเถ้าแกลบ

3.7.1 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Properties)

1) หลักการการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาความทนทานของวัสดุเมื่อได้รับแรงคงที่หรือได้รับแรงอย่างช้าๆ (Static Load) ซึ่งจะบอกความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่าง Polycarbonate กับ ผงเถ้าแกลบ ได้ ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะเป็นชิ้นงานแบบดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I แสดงดังรูปที่ 3.6 ความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้น

รูปด้วยความร้อน (Compression Molding) ชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่องแรงดึง Universal Testing Machine รุ่น LR 10K plus ของบริษัท LLOYD แสดงดังรูปที่ 3.5 ทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างอย่างละ 5 ชิ้น

2) สภาพะในการทดสอบจะใช้ความเร็วดึง (Cross Head Speed) 50 มิลลิเมตรต่อ นาที ด้วยน้ำหนักกด 10 กิโลนิวตัน โดยผลทดสอบที่ต้องการในงานวิจัยนี้คือ ค่า Young Modulus (Young Modulus), ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)

ค่า Young Modulus (Young Modulus) คือค่าความชันของกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve) ในช่วงบริเวณที่เป็นอีลาสติก (Elastic) ค่า Young Modulus จะเป็นการวัดความแข็งแรงของวัสดุ โดยวัสดุที่มีค่า Young Modulus สูงจะมีความสามารถในการรักษารูปร่างจากการรับแรงได้ดี

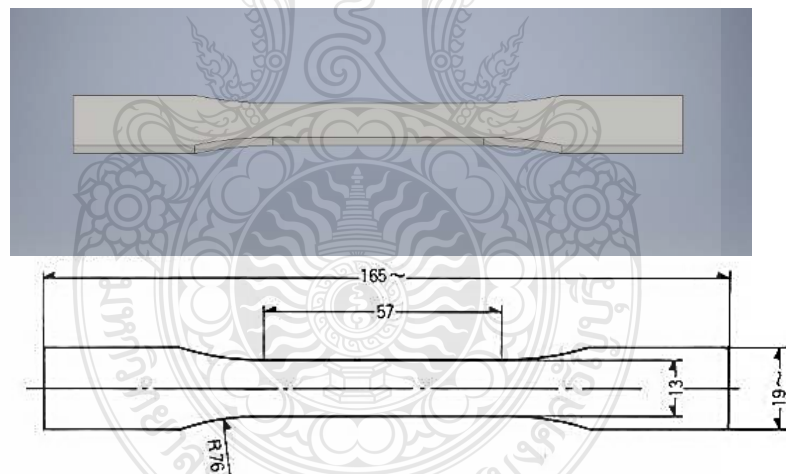
ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะสามารถรับได้

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) การยืดออกของชิ้นงานที่แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความยาวเริ่มต้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของความยาวของชิ้นงานที่ถูกดึง ถ้าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at break) จะเป็นการคิดเปอร์เซ็นต์การยืดขณะที่ชิ้นงานขาดและแตกออก

3) การเตรียมชิ้นงาน ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงโดยเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ จะเป็นชิ้นงานแบบดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Properties)

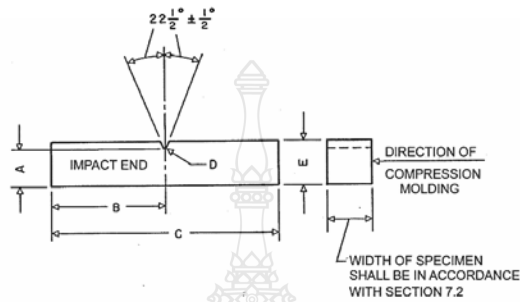


รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I

3.7.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) จะทดสอบเพื่อดูความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงอย่างทันทีทันใด โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบในการทดลองจะขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Compression Molding) ซึ่ง

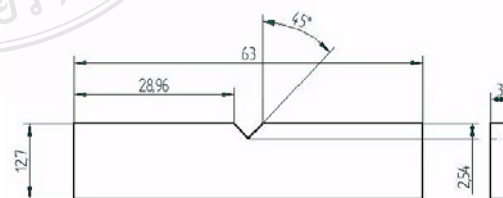
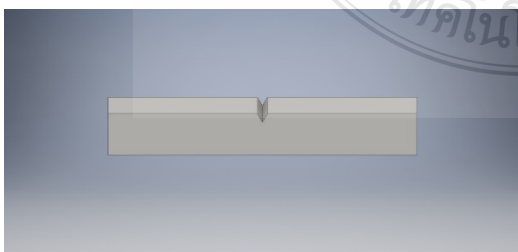
จะใช้การทดสอบแบบ Notched Izod Impact ตามมาตรฐาน ASTM D256 แสดงดังรูปที่ 3.7 วิธีดังกล่าวจะมีการทำรอยบากที่ชิ้นงาน โดยการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum Impact Testing) รุ่น CEAST 9050 แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยใช้ pendulum energy 2.7 J ที่อุณหภูมิห้องทำการทดสอบชิ้นตัวอย่าง อย่างละ 5 ชิ้น แสดงลักษณะชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 ค่าพิกัดต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) รุ่น INSTRON-9050



รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256

3.7.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็ง (Hardness) ในที่นี้หมายถึงค่าความต้านทานในการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง การทดสอบความแข็งของวัสดุมีหลายวิธี และการทดสอบความแข็งเพียงวิธีเดียวไม่สามารถตอบเกี่ยวกับสมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ บางครั้งอาจจะต้องนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอื่นๆ

การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถกระทำได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ กล่าวคือ การทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิสไตรีน, พอลิเมธิลเมทาคริเลต, และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก(plasticized PVC) และพอลิเอธิลีน

หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Durometer การใช้ durometer วัดความแข็งพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบ กดหัววัดเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของหัวเข็ม (ถึงจุด stop ring) แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ (เช่น ประมาณ 10 วินาที) ซึ่งตัวเลขที่อ่านค่าได้จาก Durometer นี้จะไม่มีหน่วย

Durometer ที่ใช้ในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบ Shore A และแบบ Shore D ดังลักษณะของวิธีการที่แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งวิธีการวัดทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด โดยทั่วไปแล้ว Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่าในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย

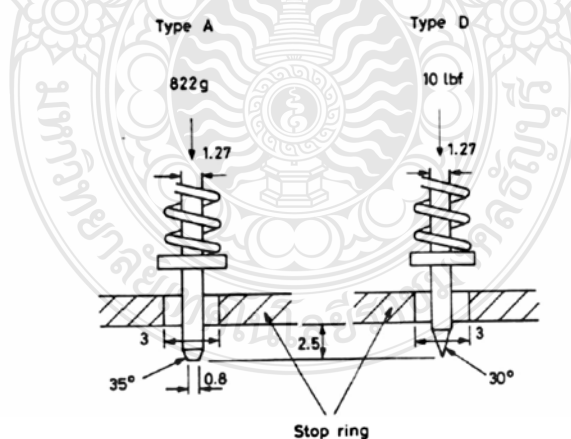


FIG. 3.23 Two types of Shore durometer.

รูปที่ 3.10 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore A และ แบบ Shore D [45]

สำหรับการทดสอบได้เลือกใช้การทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยี่ห้อ TECLOK รุ่น GS-720N Type D แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D

3.8 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

3.8.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่แตกหัก จะทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM) แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ทำให้เห็นอนุภาคใหญ่ขึ้นกว่าเดิมได้สองแสนเท่า เทคนิคนี้อาศัยการโฟกัสลำอิเล็กตรอนกราดลงบนผิวชิ้นงาน อิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับผิวชิ้นงานจะถูกถ่ายทอดผ่านระบบตรวจวัดและอิเล็กทรอนิกส์ปรากฏบนจอภาพ ในการทดสอบ SEM นี้จะทำให้เราได้เห็นถึงลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน การเข้ากันได้ของพอลิคาร์บอนเนตและผงเถ้าแกลบผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

- 1) เปิด breaker สวิตช์ที่อยู่ด้านหลังเครื่อง
- 2) เปิดสวิตช์ power ที่อยู่ด้านขวาของเครื่องเพื่อเริ่มต้นการทำงาน
- 3) เครื่องจะเริ่มทำสุญญากาศโดยอัตโนมัติซึ่งจะปรากฏไฟสีเขียวจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเมื่อสัญญาณไฟสีฟ้าหยุดกระพริบแสดงว่าสุญญากาศเสร็จสิ้นแล้ว
- 4) ติดคาร์บอนแท่งบน stab ที่ต้องการใช้และติดชิ้นงานลงบนคาร์บอนแท่ง
- 5) นำ stab ไปติดกับตัวจับและปรับระยะให้กับชิ้นทดสอบอยู่ต่ำกว่าที่วัดระดับ 1 มิลลิเมตร

- 6) กดปุ่ม EVAC/AIR เพื่อนำอากาศเข้าสู่ห้องตัวอย่าง สัญญาณไฟจะแสดงเป็นสีเหลืองและรอรอสัญญาณไฟหยุดกระพริบ (ประมาณ 1 นาที)
- 7) จากนั้นค่อยๆ ดึง stage อย่างช้าและปรับแท่นยึดชิ้นงานให้ชิ้นงานอยู่ที่จุดกึ่งกลาง
- 8) ปิดแท่นวางตัวอย่าง (ต้องแน่ใจว่าพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานจะไม่สัมผัสกับห้องใส่ชิ้นงาน)
- 9) กดปุ่ม EVAC/AIR เพื่อสุญญากาศในห้องรอกจนกว่าไฟเปลี่ยนเป็นสีฟ้าและหยุดกระพริบ (ประมาณ 3 นาที)
- 10) คลิกปุ่ม start จากนั้นเครื่องจะทำงานโดยอัตโนมัติและภาพจะปรากฏเป็นภาพกำลังขยาย 100 เท่า
- 11) หมุนแท่นชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการดูภาพ
- 12) กดดูภาพอัตโนมัติ
 - จัดตำแหน่งที่ต้องการและกำลังการขยาย
 - ปรับ brightness และ contrast (คลิกที่ปุ่ม Auto B/C)
 - ปรับโฟกัสภาพ (คลิกที่ปุ่ม Auto Focus)
 - ยืนยันภาพ จากนั้นเครื่องจะทำการบันทึกภาพ
- 13) คลิกปุ่ม save (ภาพที่ได้ขนาด 1280 × 960 พิกเซล)
- 14) จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างให้ใส่ชื่อและบันทึกภาพ
- 15) คลิกปุ่ม stop
- 16) กดปุ่ม EVAC/AIR เพื่อนำอากาศเข้าสู่ห้องชิ้นงาน รอสัญญาณไฟจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและหยุดกระพริบ (ใช้เวลาประมาณ 1 นาที)
- 17) เปิดเอาชิ้นงานออก
- 18) จากนั้นคลิกที่ปุ่ม Close เพื่อปิดโปรแกรม Phenom pro และปิดคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Phenom pro

3.9 วิเคราะห์ผลการทดลองของพอลิคาร์บอเนตกับผสมแก้วเคลบ

3.9.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกล

ผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับผงแก้วเคลบ

- 1) ผลของสัดส่วนพอลิคาร์บอเนตกับผสมแก้วเคลบต่อสมบัติต้านทานแรงดึง
- 2) ผลของสัดส่วนพอลิคาร์บอเนตกับผสมแก้วเคลบต่อสมบัติต้านทานแรงกระแทก
- 3) ผลของสัดส่วนพอลิคาร์บอเนตกับผสมแก้วเคลบต่อสมบัติต้านทานความแข็ง

3.9.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

- 1) ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

3.9.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA)

1) การวิเคราะห์ผลของสัดส่วนผงแก้วเคลบ โดยนำข้อมูลจากผลการทดลองเพื่อมาเปรียบเทียบค่า Tensile Strength, Young's Modulus, Impact Strength และ Hardness ซึ่งพิจารณาผลของค่า P-Value โดยใช้วิธีทางสถิติ แบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way Analysis of Variance) โดยกำหนดสมมติฐานได้ดังนี้

$$H_0 : \tau_i = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0$$

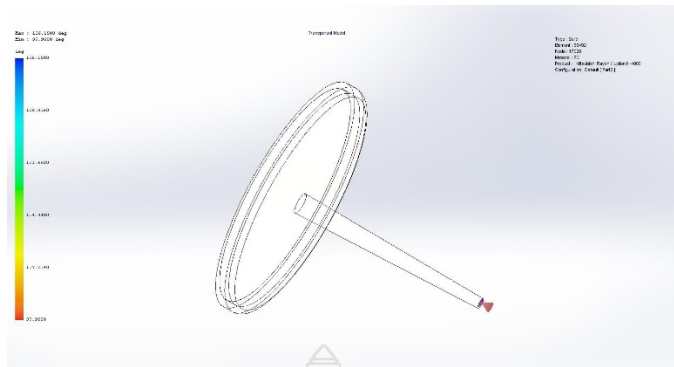
โดย τ_i คือ ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนการผสมผงแก้วเคลบ

- 2) เปรียบเทียบสมบัติทางกลที่สูงที่สุดของพอลิคาร์บอเนตกับผสมแก้วเคลบ

3.10 การออกแบบชิ้นงานและการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการฉีด

ในการออกแบบชิ้นงานสำหรับในการทดลอง จะออกแบบตามรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์ที่มีอยู่แล้ว โดยจะเลือกแบบและความหนากว้างพอที่จะให้พลาสติกเหลวสามารถไหลไปได้ไกล เพื่อที่จะสามารถสังเกตพฤติกรรมการไหลของพลาสติกเหลวในเบ้าพิมพ์ได้ง่าย โดยที่ชิ้นงานมีความหนาไม่ตอมมาก

3.10.1 การออกแบบชิ้นงาน ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการวิเคราะห์การไหลตัวของพลาสติกตามขอบเขตการวิจัย คือ ถ้วย โดยจะถูกสร้างเป็น Solid Model ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งผลการดำเนินการได้ตั้งรูปที่นำมาออกแบบและสร้างชิ้นงานในการทดลองโดย CAD ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

3.10.2 การกำหนดพารามิเตอร์

การใช้ในโปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานนั้นจะแบ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์เป็น 3 ประเภทได้แก่

1) Mesh เป็นการกำหนดขนาดของอีลิเมนต์ของตัวงานทดสอบซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานซึ่งในโปรแกรมมีให้เลือก 2 ประเภทได้แก่

- Shell mesh คือ การแบ่งอีลิเมนต์เป็นรูปทรง 2 มิติเช่นรูปทรง สามเหลี่ยมเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนและมีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร

- Solid mesh คือ การแบ่งอีลิเมนต์เป็นรูปทรง 3 มิติเช่นรูปทรงพีระมิตจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตรขึ้นไปซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Solid Mesh เพราะขนาดของชิ้นงานมีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตร

2) Material หรือวัสดุที่ใช้ในโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่พลาสติกที่ใช้ฉีด(Plastics) และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ (Mold)

- Plastics สามารถเลือกได้ 2 แบบคือ

- พลาสติกจากฐานข้อมูลในโปรแกรมซึ่งมีมาก ถึง 113 ชนิด และ พลาสติกจากผู้ใช้งานกำหนดเอง ในงานวิจัยนี้จะใช้พลาสติก Polycarbonate ในการออกแบบและจำลองชิ้นงานการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพราะเป็นชนิดเดียวกันกับพลาสติกกรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยและในขั้นตอนออกแบบการทดลองจะทำการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบพลาสติกจากการทดสอบ

- Mold คือ วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ซึ่งมีทั้งหมด 187 ชนิด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุ steel P20 เพราะเป็นชนิดเดียวกับแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดขึ้นรูปตัวอย่าง

3) Process parameter คือ พารามิเตอร์ซึ่งกำหนดให้เครื่องฉีดพลาสติกเพื่อเป็นการจำลองเงื่อนไขการปรับตั้งค่าสำหรับการฉีดขึ้นงานโดยผู้ทำวิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพในการฉีดขึ้นรูปขึ้นงานดังนี้ โดยแบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

- อุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิพลาสติกเหลว และ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ซึ่งจะส่งผลต่อแรงดันในการฉีดขึ้นรูปขึ้นงาน เวลาในการเติมเต็มของน้ำพลาสติกเหลวซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงจะทำให้พลาสติกในแม่พิมพ์ไหลได้ง่ายแต่ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของขึ้นงานอาจทำให้เกิดคลิป รอยไหม้ และการยุบตัวเป็นต้น

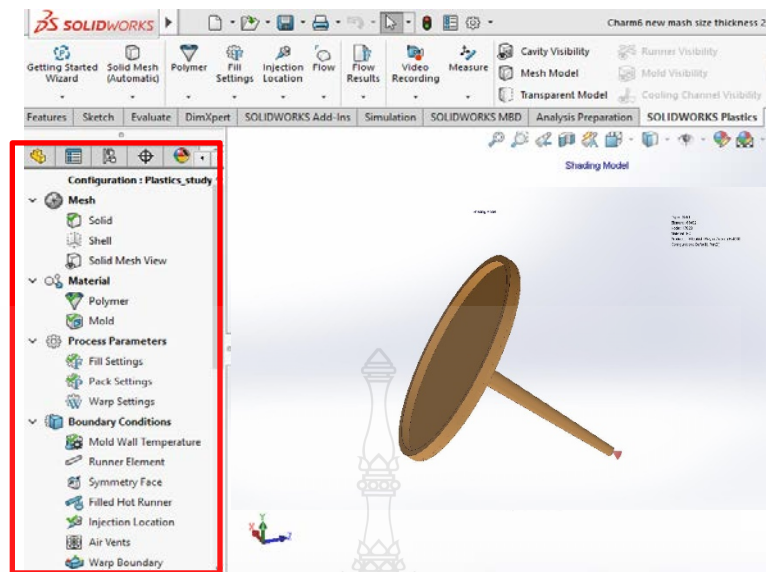
- แรงดัน ได้แก่ แรงดันในการฉีดซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของขึ้นงานโดยตรงถ้าแรงดันฉีดไม่เหมาะสมอาจเกิดการยุบตัวของขึ้นงานแต่ถ้ามากเกินไปอาจทำให้ขึ้นงานบิดงอเสียรูปได้

- เวลา ได้แก่ เวลาในการฉีดเติมเต็ม เวลาในการฉีดเข้าและเวลาในการเย็นตัว ทั้งนี้เราจะต้องทำการปรับเวลาให้เหมาะสมกับอุณหภูมิและแรงดันหากทำการปรับตั้งไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดปัญหาในการฉีดขึ้นงานได้เช่น ฉีดไม่เต็มเนื่องจากเวลาในการฉีดเติมไม่เหมาะสมหรือเกิดการบิดงอของขึ้นงานเนื่องจากเวลาในการฉีดเข้าและเวลาในการเย็นตัวไม่เพียงพอ เป็นต้น

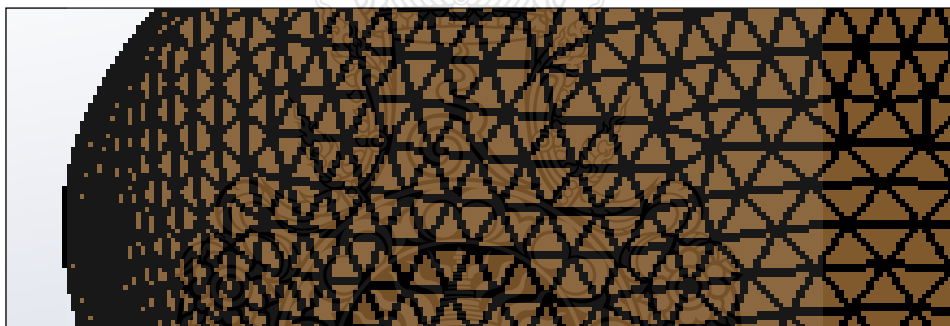
3.11 การจำลองการไหลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

3.11.1 เปิดขึ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์

โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์ได้จากการสร้าง Solid Model ด้วยโปรแกรม Solid work แล้วส่งเข้ามาในโปรแกรม Solid work Plastic โดยแปลง Solid Model ให้อยู่ในรูปของ SLDPRT โปรแกรมสำเร็จรูปทำการสร้าง Mesh Model จาก Solid Model เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้ผลดังรูป 3.15



รูปที่ 3.14 แถบเครื่องมือ



รูปที่ 3.15 Mesh Model จากการสร้างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

3.11.2 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material)

ซึ่งในการทดสอบวัสดุที่ใช้คือเม็ดพลาสติก POM จากบริษัท Dupont Engineering Polymer เกรด Delrin II 100 และคุณสมบัติในฐานข้อมูล Default ของโปรแกรมสำเร็จรูปโดยค่า อุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 200°C, อุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 90°C และอุณหภูมิการปลดชิ้นงานเท่ากับ 120°C

ตารางที่ 3.2 ฐานข้อมูลของ Polycarbonate ในโปรแกรมสำเร็จรูป

POM : DuPont Engineering Polymer / Delrin II 100	
Melt Temperature	300 °C
Mold Temperature	80 °C
Ejection Temperature	200 °C
Glass Transition Temperature	144 °C
Melt flow rate I	12 cm ³ / 10min
Flash ignition temperature	480 °C
Self ignition temperature	550 °C
Thermal Conductivity : Cross - flow	0.20 W / (m.k)

3.11.3 กำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการ (Process Parameter)

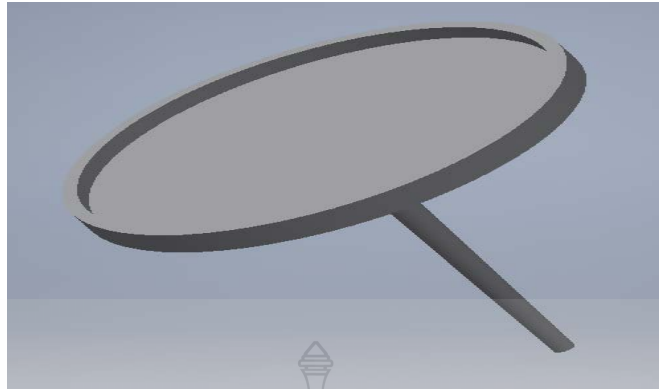
ทำการกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นเพื่อให้โปรแกรมคำนวณค่าในการตั้งเครื่องฉีดพลาสติก

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์เบื้องต้นสำหรับทดลองฉีดขึ้นรูป ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ความดันฉีดเต็ม (Max)	100 MPa
เวลาในการฉีดเต็ม	2.0 วินาที
เวลาในการฉีดย่อ	4 วินาที
เวลาในการหล่อเย็น(Packing +Cooling)	18.8 Sec
Cycle Time	24.8 sec
อุณหภูมิของแม่พิมพ์	90 °C
อุณหภูมิของในการหลอมเม็ดพลาสติก	300°C

3.11.4 กำหนดขนาดและตำแหน่งของทางเข้าน้ำพลาสติก (Boundary Condition)

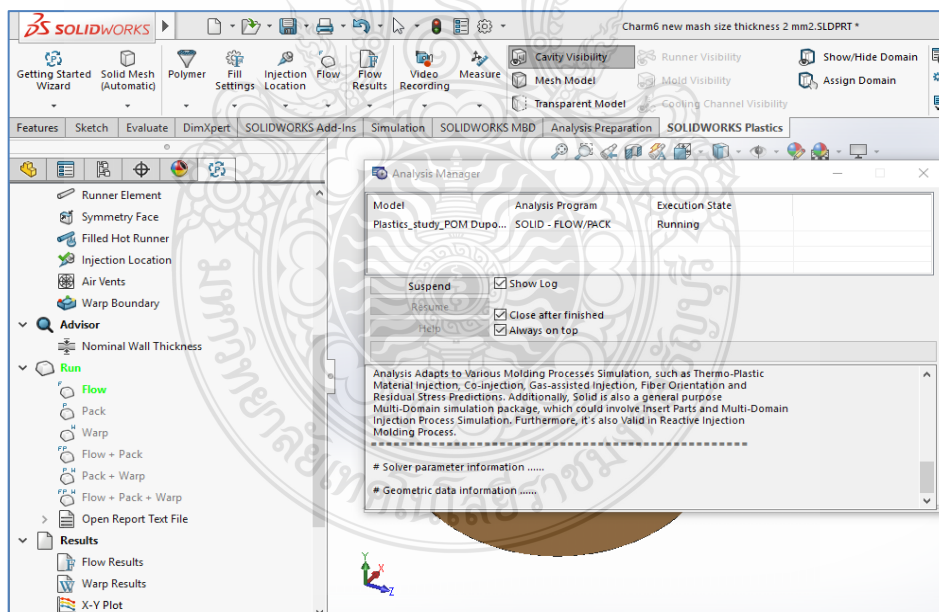
หลังจากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทำการกำหนดคุณสมบัติชิ้นงานแล้ว ลำดับต่อไปจะเป็นการออกแบบทางเข้า (Gate) น้ำพลาสติกของชิ้นงาน ซึ่งในที่นี้จะออกแบบทางเข้าของน้ำพลาสติกเป็นแบบ Pin Point Gate หรือรูเข้าแบบเข็ม รูเข้าแบบนี้เป็นแบบที่ใช้ในวัสดุประสงค์เพื่อตัดชิ้นงานให้ขาดอัตโนมัติกับคาร์วีดี ขนาดรูเข้านี้สามารถทำได้ตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ทางเข้าน้ำพลาสติก

3.11.5 ทำการประมวลผลวิเคราะห์ (Run)

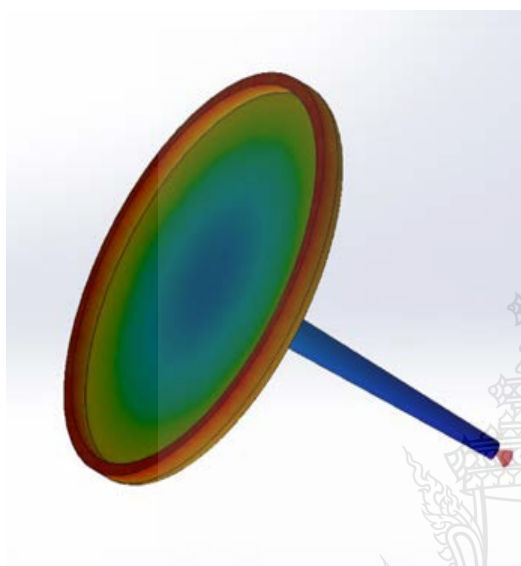
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการดำเนินการหลังจากที่ทำ Mesh Model ออกแบบทางเข้าน้ำพลาสติก ตลอดจนกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นการทำให้โปรแกรมจำลอง (Simulation) สภาพการฉีดเติมเต็มพลาสติก ว่าที่ เราออกแบบไว้พลาสติกเติมเต็มทั่วถึงทั้งชิ้นงานหรือไม่



รูปที่ 3.17 การประมวลผลวิเคราะห์

3.11.6 สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์

จากการจำลองการไหลทำให้เราสามารถทราบค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการปรับตั้งเครื่องสำหรับฉีดและนอกเหนือจากค่าพารามิเตอร์ยังสามารถคำนวณหาปริมาตรของชิ้นงานที่และน้ำหนักของชิ้นงานอีกด้วย

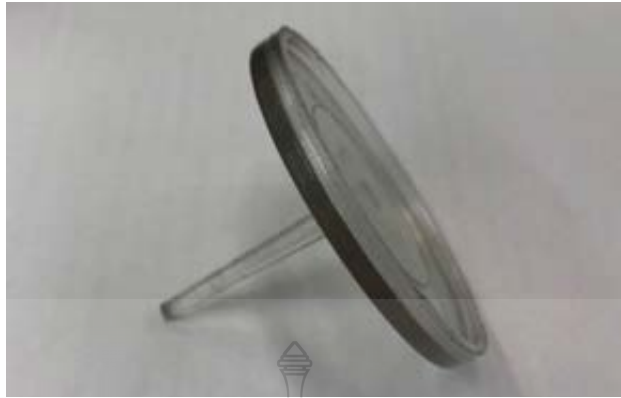


Name	Default
Type	Solid
Element	73101
Node	21250
Symmetry Face	No
Volume	60.54 (cm ³)
Mass	78.80 (G)
Size	149.45 (mm) x 53.20 (mm) x 149.45 (mm)

รูปที่ 3.18 สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์

3.12 ทดลองฉีดชิ้นงานจริง

หลังจากทราบค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการฉีดขึ้นรูปของพลาสติกกรีไซเคิลจากการทดลอง จากนั้นผู้ทำวิจัยจะนำค่าที่ได้ไปจำลองการฉีดขึ้นรูปอีกครั้งเพื่อยืนยันผลและทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดในทุกสัดส่วนการผสม เบื้องต้นผู้ทำวิจัยได้ทดลองฉีดชิ้นงานจริงโดยใช้เม็ดพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอเนต



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานจากการทดลองฉีดขึ้นรูปของ PC เม็ดใหม่

3.12.1 เปรียบเทียบผล

เปรียบเทียบการจำลองการฉีดขึ้นรูปพลาสติกกับชิ้นงานจริงที่ได้หลังจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป นำมาวิเคราะห์และสรุปผลในกระบวนการฉีดพลาสติก



รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงที่ใช้ PC เม็ดใหม่กับผลที่ได้จากการจำลอง

3.13 สรุปผลและเขียนรายงานวิจัย

สรุปผลการทดลองของการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ

จากการทดสอบและการวิเคราะห์ผล คณะผู้จัดทำจะทำการสรุปผลสมบัติทางกล และความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปใช้ประโยชน์ตามความต้องการต่อไป

สรุปผลการจำลองการฉีดพลาสติกกับการฉีดพลาสติกในกระบวนการจริงเพื่อหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นและศึกษาพฤติกรรมการไหลของพลาสติก

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต และผงเถ้าแกลบโดยพอลิคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดสอบเกรดเชิงพาณิชย์สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยบริษัท Makrolon และ Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation ที่มีอัตราการไหลแตกต่างกัน ผสมผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร ซึ่งรายละเอียดผลการดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับ โดยอธิบายผลการทดลองพฤติกรรมของพอลิคาร์บอเนตที่มีอัตราการไหลแตกต่างกันและขนาดเฉลี่ยของสารตัวเติมปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบ

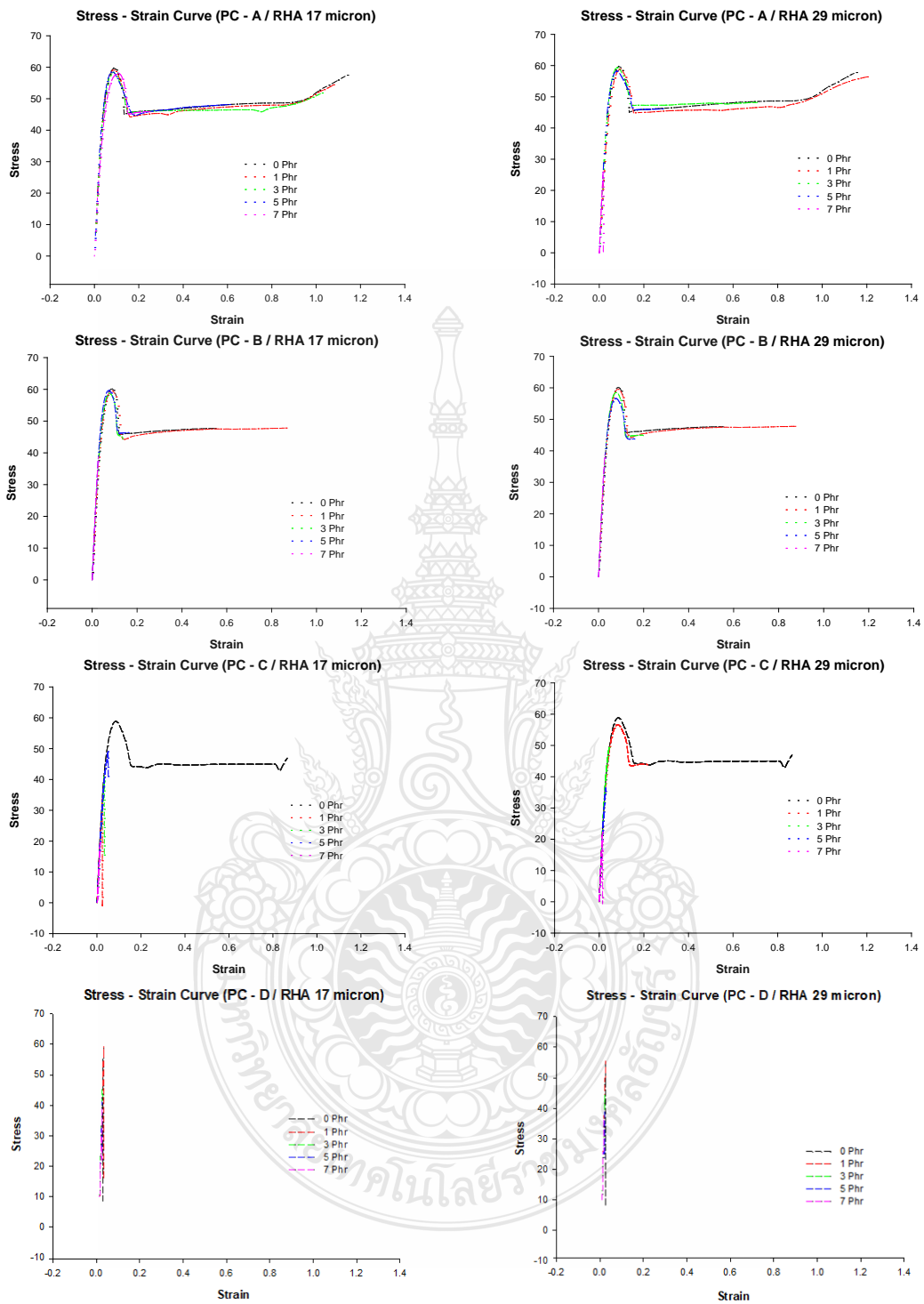
4.1 การวิเคราะห์ความเค้น – ความเครียด

จากผลการทดลองกราฟความเค้น – ความเครียด ของ PC – A ที่ ขนาดของผงเถ้าแกลบ 17 และ 29 ไมโครเมตร ในช่วงค่าความเครียด 0 – 1.4 แสดงรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบของสารตัวเติมทั้งสองขนาดพบว่าพฤติกรรมของค่าความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดมีลักษณะไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบแสดงผลให้เห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณการเติมที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้พฤติกรรมความสัมพันธ์ของค่าความเค้น – ความเครียด นั้นเปลี่ยนแปลงไป โดยพอลิคาร์บอเนตที่ยังไม่เติมสารตัวเติมนั้นจะลักษณะเป็นวัสดุแข็งและเหนียว แต่เมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบความสามารถในการยึดตัวของวัสดุนั้นลดลง ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีลักษณะแข็งและแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจากวัสดุเติม ในทางเดียวกัน PC – B พฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดจะลดลง กล่าวคือคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุลดลง เมื่อเติมเถ้าแกลบ ความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะใกล้เคียงกับ PC – A แต่อย่างไรก็ตาม PC – C การผสมสารตัวเติมที่มีขนาดเฉลี่ยที่แตกต่างกันจะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต ที่ผสมผงเถ้าแกลบขนาด 17 ไมโครเมตร ปริมาณการเติมที่เพิ่มมากขึ้นของสารตัวเติมจะส่งผลทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นมีความแข็งและแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะกราฟค่าความเค้นและความเครียดนั้นเปลี่ยนไปจากเดิมจากวัสดุที่มีความแข็งและเหนียว

แสดงกราฟ Stress – Strain ของพอลิคาร์บอเนต PC – C ที่ผสมผงเถ้าแกลบที่มีขนาดเฉลี่ย 17 พบว่าปริมาณการเติมผงเถ้าแกลบที่เติมลงพอลิคาร์บอเนตจะส่งผลต่อการยึดตัวของพอลิเมอร์อย่างเห็นได้ชัดที่ 1 Phr โดยความสามารถในการยึดตัวจะลดลงที่สัดส่วนการผสมที่เพิ่มมากขึ้นและ .ในทาง

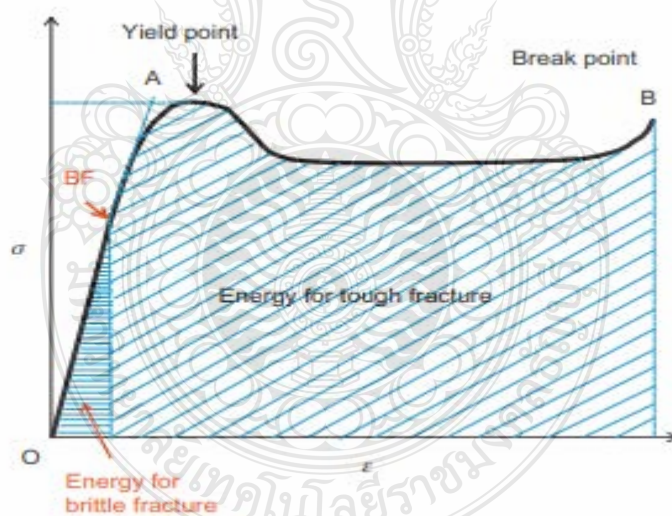
เดียวกันผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าลักษณะของพฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียด ของ PC - C จะมีคุณสมบัติแข็งและเหนียว การเติมของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่จะลดลงตามไปด้วย แต่เมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบในพอลิคาร์บอเนตจะพบว่าความเหนียวของวัสดุเดิมมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อปริมาณการเติมที่ 3 Phr พอลิเมอร์คอมโพสิตดังกล่าวจะมีคุณสมบัติแข็งและเปราะในทางตรงกันข้ามกับ PC - D ลักษณะอิทธิพลค่าความเค้นและความเครียดได้แสดงให้เห็นถึงพอลิเมอร์มีความแข็งเปราะ เมื่อผสมสารตัวเติมขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แตกต่างกันสองชนิด พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดพอลิเมอร์ชนิดนี้ที่ผ่านกระบวนการการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะมีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการผสมปริมาณการเติมที่เพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์คอมโพสิตจะมีความแข็งเปราะเช่นเดิมแต่การยึดตัวของพอลิเมอร์จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด





รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียด ของพอลิคาร์บอเนต 4 ชนิด

จากที่กล่าวมาข้างต้น PC – A, PC – B พฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติแข็งและเหนียว แต่เมื่อทำการเติมสารตัวเติมกราฟค่าความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมลักษณะของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเติมผงเถ้าแกลบจะมีความสามารถในการยืดตัวนั้นลดต่ำลง โดยการเติมผงเถ้าแกลบจะเห็นแสดงผลให้เห็นได้ชัดกับ PC – C ปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบจะส่งผลให้สมบัติของพอลิคาร์บอนเนตมีความแข็งและแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จะผลความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสัมพันธ์กับค่าสมบัติทางกล [46] ในทางตรงกันข้ามการเติมผงเถ้าแกลบจะไม่ส่งผลต่อ PC – D โดยลักษณะพฤติกรรมของพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวมีความแข็งเปราะ อีกทั้งในกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดมีความยุ่งยากในกระบวนการเนื่องจากสมบัติวัสดุที่มีความแข็งเปราะ และยังพบว่า การเติมผงเถ้าแกลบไม่ส่งผลต่อค่าความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของพฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของพอลิคาร์บอนเนตทั้ง 4 ชนิด ก็ยังไม่บ่งบอกและยังไม่ชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสารตัวเติมและปริมาณการเติมของสารเติมได้ ยังไม่ชัดเจนจึงเป็นมูลเหตุในการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลต่อแรงที่มากระทำในหัวข้อต่อไป



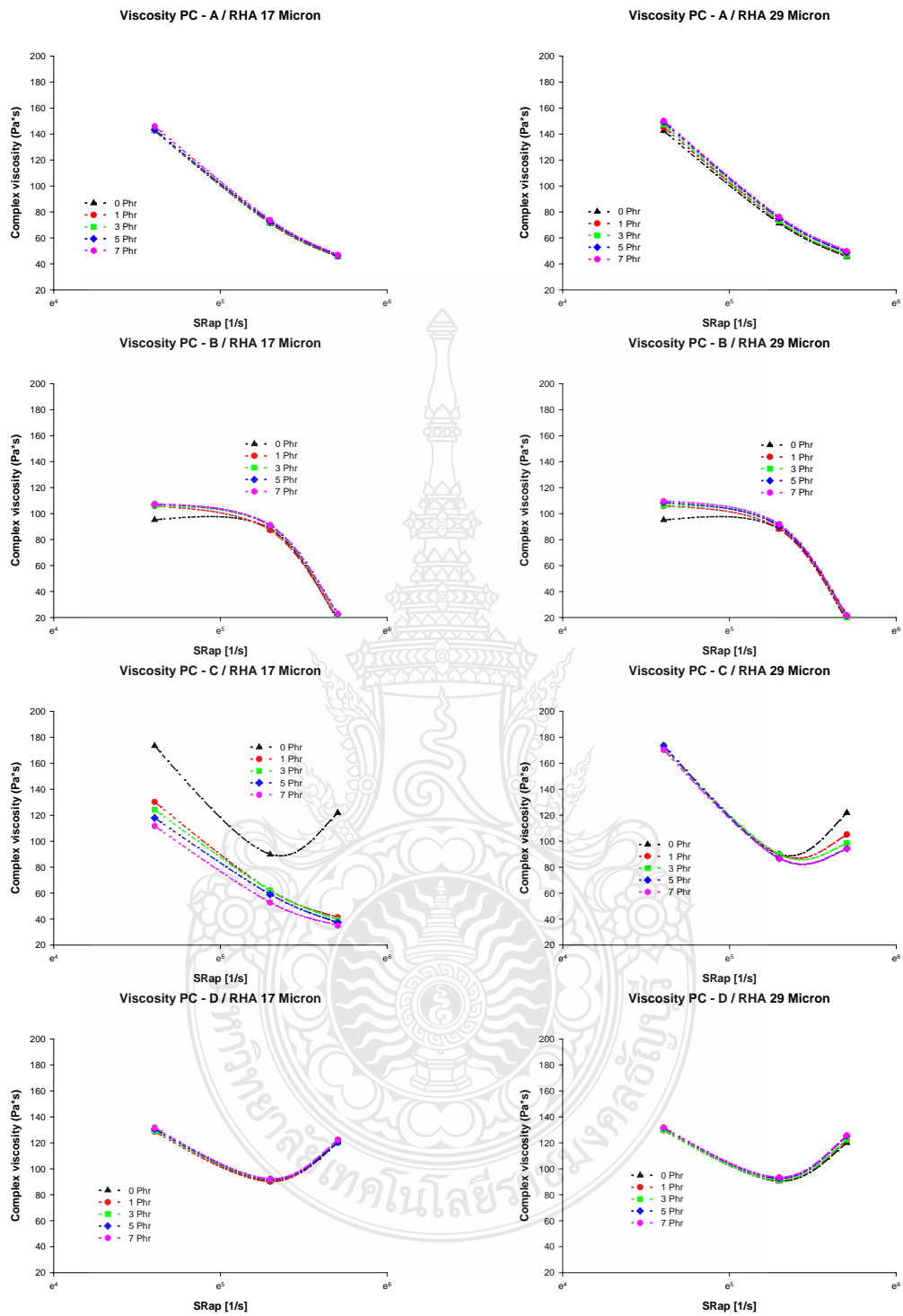
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด [46]

4.2 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต

จากผลการทดลองของ PC – A พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของค่าความหนืดเฉือนและอัตราเฉือนจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์มีค่าดัชนีการไหล 12 g / 10 min ส่งผลให้ความหนืดเฉือน

ที่มีแนวโน้มลดลงในช่วงอัตราเฉือนช่วงหนึ่งๆ เมื่อผสมผงเถ้าแกลบพฤติกรรมค่าความหนืดของพอลิเมอร์พบว่าความสัมพันธ์ค่าความหนืดเฉือนและอัตราเฉือนของพอลิเมอร์จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม อีกทั้งปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่สัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อค่าความหนืดเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางเดียวกันลักษณะรูปร่างความสัมพันธ์ของความหนืดเฉือนและอัตราเฉือนของ PC – B จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบจะมีผลอย่างเห็นได้ชัดที่ 1 Phr และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบ การทดสอบสมบัติการไหลของ PC – C จากผลการทดลองพบว่าขนาดที่ของสารตัวเติม 2 ชนิด แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสารตัวเติมทั้งสองขนาดอย่างเห็นได้ชัด โดย ผงเถ้าแกลบขนาด 17 ไมโครเมตร จะส่งผลให้การไหลตัวเพิ่มมากขึ้นและเมื่อทำการเติมสารตัวเติมในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การพฤติกรรมการไหลตัวของพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบมีค่าความสัมพันธ์ความหนืดเฉือนและอัตราเฉือนลดลง ในทางเดียวการเติมผงเถ้าแกลบที่ขนาด 29 ไมโครเมตร พบว่า ค่าความสัมพันธ์หนืดเฉือนจะลดลงเมื่ออัตราเฉือนสูงๆ เท่านั้น. อย่างไรก็ตามพอลิคาร์บอเนต PC – D พบว่าผงเถ้าแกลบขนาด 17 และ 29 ไมโครเมตร และสัดส่วนการผสม ไม่ส่งผลต่อค่าความสัมพันธ์ความหนืดเฉือน และอัตราเฉือนแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความหนืดเฉือน - อัตราเฉือน ได้อย่างชัดเจน กล่าวคือลักษณะของกราฟมีลักษณะคล้ายพาราโบลา เมื่อค่าความหนืดเฉือนจะลดลงช่วงอัตราเฉือนหนึ่งๆ แต่เมื่ออัตราเฉือนที่มากกระทำเพิ่มมากขึ้นความหนืดเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากผลค่าความสัมพันธ์ของพอลิคาร์บอเนตทั้ง 4 ชนิด สามารถสรุปได้ว่าค่าความหนืดเฉือนต่ออัตราเฉือนของพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด จะมีพฤติกรรมความสัมพันธ์ของความหนืดเฉือนต่ออัตราเฉือนที่แตกต่างกัน โดยลักษณะความสัมพันธ์ของความหนืดที่เกิดขึ้นจะมีพฤติกรรมการไหลตัวแบบซูโดพลาสติกได้แก่ PC – A และ PC – B กล่าวคือลักษณะของสายโซ่โพลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีแรงมากระทำ แต่ในทางตรงกันข้าม PC – C และ PC – D จะมีการไหลตัวแบบไคเลแทนต์ กล่าวคืออัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้น [47] ทั้งนี้การไหลตัวของพอลิคาร์บอเนตทั้ง 4 ชนิด จะมีการไหลตัวแบบไม่ราบรื่น หรือการไหลตัวแบบ นอน-นิวตันเนียน (Nonnewtonian Fluid) จากปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่สัดส่วนแตกต่างกันมีผลให้ค่าความหนืดเฉือนนั้นลดลง แต่ในทางเดียวกันขนาดของผงเถ้าแกลบจะส่งผลกับ PC – C เนื่องจากจะทำให้ค่าความหนืดเฉือนนั้นลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด



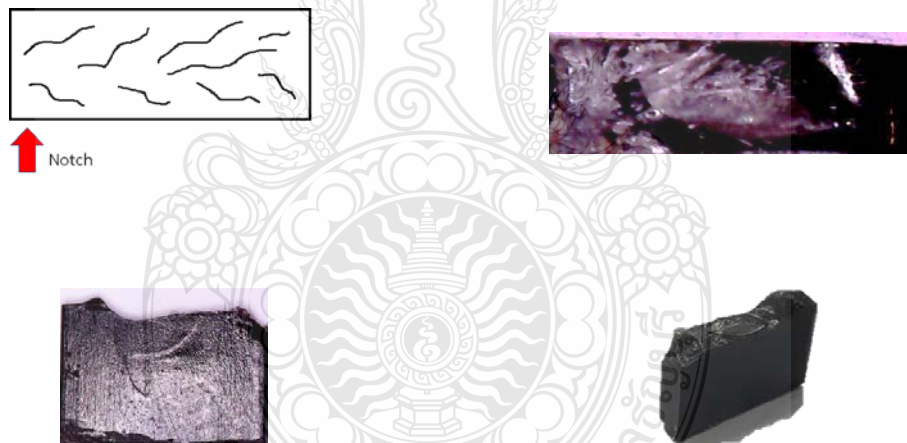
รูปที่ 4.3 พฤติกรรมความสัมพันธ์ของความหนืดเชิงซ้อน / อัตราเฉือน

แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยแสดงลักษณะความสัมพันธ์ของความหนืดเฉือนต่ออัตราเฉือนพบว่าปริมาณการเติมมีผลต่อพอลิคาร์บอนเนตทั้ง 4 ชนิด แต่อย่างไรก็ตามขนาดของสารตัวเติมยังเห็นผลยังไม่เป็นที่แน่ชัดจึงเป็นมูลเหตุให้ทำการศึกษาชิ้นงานจากการแตกหักของพอลิคาร์บอนเนต 4 ชนิด ที่ผสมผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร ว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

4.3 ผลการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ

4.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM)

การวิเคราะห์ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) เพื่อต้องการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของการแตกหักของชิ้นงาน เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.4






















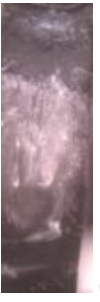
















รูปที่ 4.4 ลักษณะชิ้นงานการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ตารางที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะการแตกหักของพอลิคาร์บอนเนตและผงเถ้าแกลบซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพและพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุ จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope ; OM) พบว่า PC – A และ PC – B ลักษณะการแตกหักเดิมจะมีพื้นผิวแตกหักตามแนวแรงที่มากระทำเนื้อของพอลิเมอร์มีลักษณะดั่งยึดซึ่ง

บ่งบอกถึงความเหนียว แต่เมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบที่ 1 Phr พื้นผิวของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะเปลี่ยนแปลงไปลักษณะการขาดโดยการดึงยึดของเนื้อวัสดุน้อยลง ลักษณะทางกายภาพของวัสดุจากการแตกหักจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณการเติมที่ 3 Phr การแตกจะเกิดรอยร้าวขึ้นตามแนวแรงที่มากกระทำโดยรอยร้าวจะเพิ่มมากขึ้นและเกิดรอยแตกขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อปริมาณการผสมของผงเถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้น ในทางเดียวกัน PC – C ลักษณะทางกายภาพจากการแตกหักของพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวจะแสดงผลให้เห็นได้ชัดที่ 1 Phr รอยแตกร้าวของการแตกตามแนวแรงที่มากกระทำและเมื่อปริมาณการเติมของสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้นรอยแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงเถ้าแกลบที่ผสมลงในพอลิคาร์บอเนต ในทางตรงกันข้ามพื้นผิวของ PC – D จะมีลักษณะแตกต่างจากพื้นผิวพอลิคาร์บอเนตที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope ; OM) พบว่าเนื้อการแตกหักของ PC – D เนื้อพอลิเมอร์ไม่เกิดการดึงยึดและเกิดการแตกตามแนวแรงและเมื่อเติมผงเถ้าแกลบที่ 1 Phr การแตกร้าวของพอลิเมอร์จะมากขึ้นและไม่มีการเปลี่ยนเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้น รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของ PC – A และ PC – B จะแสดงให้เห็นเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่ 7 Phr และรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของ PC – C และ PC – D จะเกิดขึ้นให้เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณการเติม 5 Phr ซึ่งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผงเถ้าแกลบมีสมบัติเป็นอนุภาคของแข็ง จึงทำให้การแตกร้าวพบรอยแตกร้าวเนื่องจากความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เมทริกซ์มีค่าต่ำลง

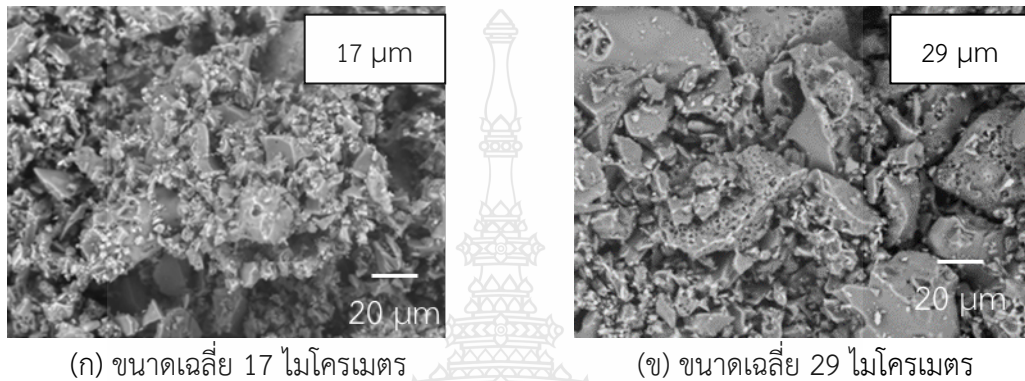
จากผลการวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของพอลิคาร์บอเนต 4 ชนิดสามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของปริมาณการเติมสารตัวเติมได้และลักษณะทางกายภาพของเนื้อวัสดุพอลิคาร์บอเนตที่มีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงก็ยังไม่สามารถวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุถึงการกระจายตัวของเถ้าแกลบในพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงเป็นมูลเหตุให้นำชิ้นงานดังกล่าววิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM)

0 Phr	RHA	1 Phr	3 Phr	5 Phr	7 Phr
	17 micron				
	29 Micron				
	17 micron				
	29 Micron				
	17 micron				
	29 Micron				
	17 micron				
	29 Micron				

4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM)

จากรูปที่ 4 ผงเถ้าแกลบที่ผ่านการบด จะมีความพรุน และมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการบด กล่าวคือเมื่อใช้เวลานานในการบดมากขึ้นจะส่งผลให้ผงเถ้าแกลบนั้นมีขนาดที่ลดลงตามไปด้วย



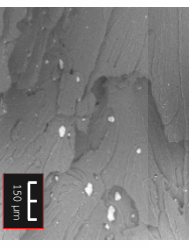
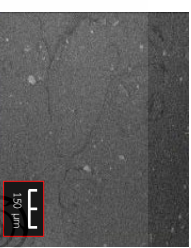
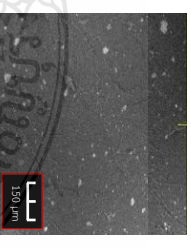
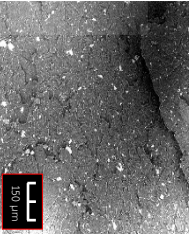
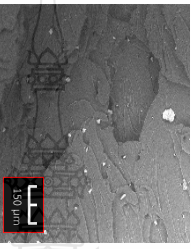
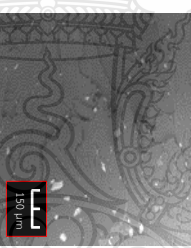

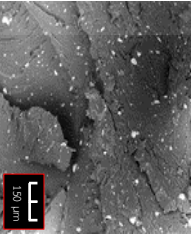
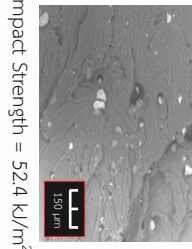


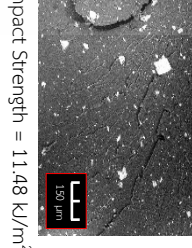

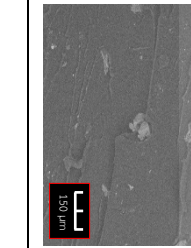
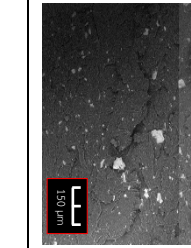
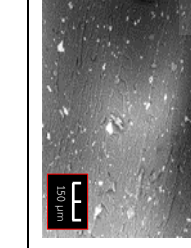
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ยที่แตกต่างกัน พบว่า ลักษณะการฉีกขาดของ PC – A จะมีลักษณะของพื้นผิวเรียบและมีลักษณะการดึงยึดของเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งบ่งบอกได้ถึงลักษณะความเหนียวโดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดที่เกิดการดึงยึดของพอลิเมอร์อย่างเห็นได้ชัด เมื่อทำการเติมสารตัวเติม 1 Phr ลักษณะทางกายภาพของ PC – A จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงแต่ลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากการฉีกขาดของแนวแรงที่มากระทำ จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดโดยพื้นผิวดังกล่าวจะมีผิวขรุขระและเกิดรอยร้าวตามแนวแรงที่มากระทำและรอยร้าวดังกล่าวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มมากขึ้น ในทางเดียวกัน PC – B จากเดิมที่ลักษณะการฉีกขาดของพื้นผิวที่มีความเรียบและการยึดตัวของเนื้อพอลิเมอร์แต่เมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์จะเริ่มเปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบอีกทั้งสีของชิ้นงานจะมีสีดำและเข้มมากขึ้น โดย PC - B โดยพื้นผิวจะมีความขรุขระและมีรอยร้าวเกิดขึ้นบริเวณที่มีเถ้าแกลบฝังตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตาม PC – C พื้นผิวที่มีความเรียบจากเดิมจะเริ่มเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวพอลิเมอร์เมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบที่ 1 Phr เกิดความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีโดยพื้นผิวดังกล่าวจะเกิดรอยร้าวและเมื่อเติมผงเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นและพื้นผิวจะเกิดรอยร้าวแปรผันตามกับปริมาณการเติมที่สูงขึ้น

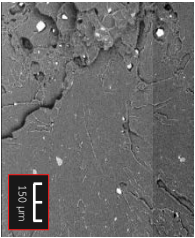

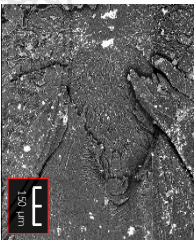
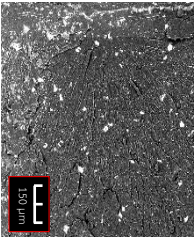
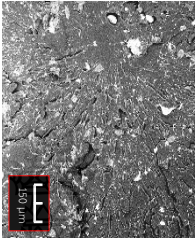
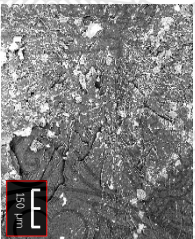

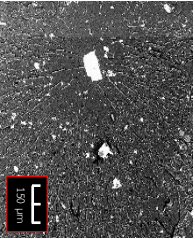


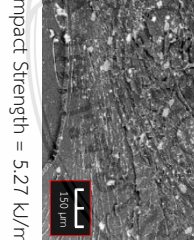

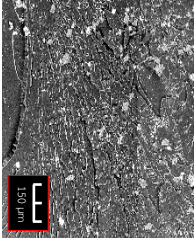
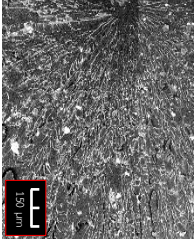
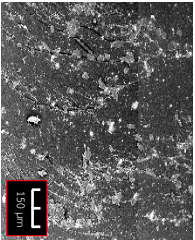

เช่นเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามกับ PC – D พอลิคาร์บอเนตที่มีอัตราการไหลสูงที่สุดในการศึกษาจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าลักษณะของเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์ดังกล่าวมีความเรียบของพื้นผิวที่เกิดจากการแตก บ่งบอกถึงวัสดุไม่มีความเหนียวสอดคล้องกับค่าความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ที่ 1 Phr พื้นผิวที่เกิดจากการแตกหักจะมีรอยร้าวจากแรงที่มากระทำเป็นจำนวนมากและเมื่อเพิ่มปริมาณของผงเถ้าแกลบลักษณะพื้นผิวก็จะมีมากขึ้น

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าปริมาณการเติมนั้นจะส่งผลให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพอลิเมอร์และการกระจายตัวของผงเถ้าแกลในเมทริกซ์พอลิเมอร์แต่ละชนิด แสดงให้เห็นว่าพอลิคาร์บอเนตที่อยู่ในช่วงอัตราการไหลกลุ่ม PC – C และ PC – D จะเกิดการกระจายตัวของผงเถ้าแกลได้ดีกว่า พอลิคาร์บอเนตกลุ่ม PC – A และ PC – B เนื่องด้วยพฤติกรรมการไหลตัวของพอลิคาร์บอเนตจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของผงเถ้าแกลระหว่างกระบวนการผสม โดยผงเถ้าแกลขนาดอนุภาคจะเคลื่อนที่และกระจายตัวได้ดีกับพอลิคาร์บอเนตที่มีพฤติกรรมการไหลตัวได้ดีลักษณะทางกายภาพที่เกิดโดยการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดนั้นชี้ให้เห็นว่าเมทริกซ์พอลิเมอร์มีความสามารถในการหลอมรวมยึดติดกับสารตัวเติมได้ดีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจะสอดคล้องกับสมบัติทางกลบางประการที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย [48] ทั้งนี้จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิดข้างต้น ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมสารตัวเติมผงเถ้าแกลที่ขนาดเฉลี่ยที่แตกต่างกัน จึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อศึกษาชนิดของพอลิเมอร์, ขนาดเฉลี่ยของผงเถ้าแกล และ ปริมาณการเติม ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM)

0 Phr	RHA	1 Phr	3 Phr	5 Phr	7 Phr
PC – A Impact Strength = 70.77 kJ/m ²	17 micron	 Impact Strength = 52.09 kJ/m ²	 Impact Strength = 18.05 kJ/m ²	 Impact Strength = 14.43 kJ/m ²	 Impact Strength = 11.82 kJ/m ²
	29 Micron	 Impact Strength = 52.09 kJ/m ²	 Impact Strength = 18.05 kJ/m ²	 Impact Strength = 14.43 kJ/m ²	 Impact Strength = 11.82 kJ/m ²
PC – B Impact Strength = 70.56 kJ/m ²	17 micron	 Impact Strength = 52.4 kJ/m ²	 Impact Strength = 17.94 kJ/m ²	 Impact Strength = 13.91 kJ/m ²	 Impact Strength = 11.48 kJ/m ²
	29 Micron	 Impact Strength = 52.4 kJ/m ²	 Impact Strength = 17.94 kJ/m ²	 Impact Strength = 13.91 kJ/m ²	 Impact Strength = 11.48 kJ/m ²

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

0 Phr	RHA	1 Phr	3 Phr	5 Phr	7 Phr
PC – C Impact Strength = 70.8 kJ/m ²	17 micron	 Impact Strength = 50.68 kJ/m ²	 Impact Strength = 13.1 kJ/m ²	 Impact Strength = 13.04 kJ/m ²	 Impact Strength = 13.03 kJ/m ²
	29 Micron	 Impact Strength = 29.68 kJ/m ²	 Impact Strength = 10.54 kJ/m ²	 Impact Strength = 5.27 kJ/m ²	 Impact Strength = 0.54 kJ/m ²
PC – D Impact Strength = 68.72 kJ/m ²	17 micron	 Impact Strength = 29.68 kJ/m ²	 Impact Strength = 10.54 kJ/m ²	 Impact Strength = 5.27 kJ/m ²	 Impact Strength = 0.54 kJ/m ²
	29 Micron	 Impact Strength = 29.68 kJ/m ²	 Impact Strength = 10.54 kJ/m ²	 Impact Strength = 5.27 kJ/m ²	 Impact Strength = 0.54 kJ/m ²

4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

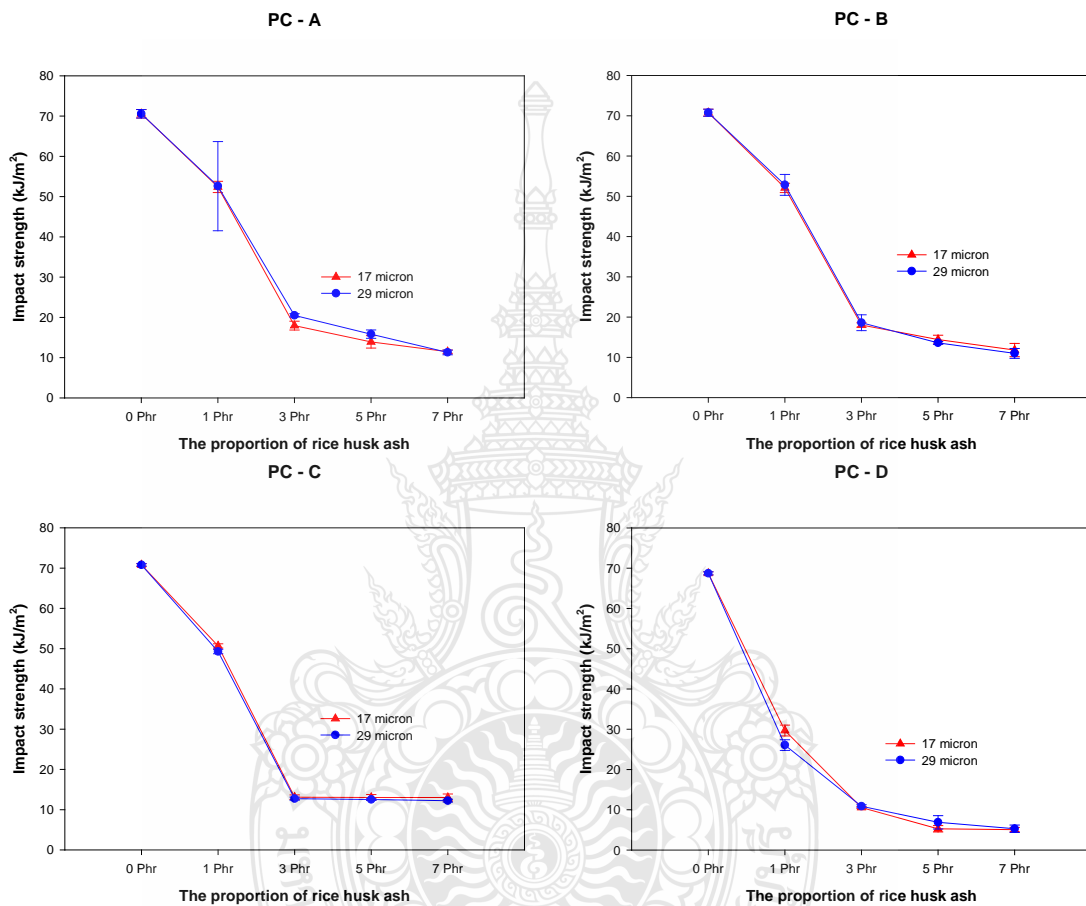
ผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต 4 ชนิด โดยการเติมสารเสริมแรงเส้นใยแก้วขนาดเฉลี่ย 17 ไมโครเมตร และ 29 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนการผสม 0, 1, 3, 5, และ 7 Phr ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อีกทั้งยังนำผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปของกราฟ เพื่อแสดงผลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่มีอัตราการไหลแตกต่างกัน และปริมาณการผสมแตกต่างกัน

4.4.1 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกระแทก

จากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบ Izod Impact อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 ของ PC – A ผสมผงเส้นใยแก้วที่มีขนาดแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเติมของสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้นในทางเดียวกันขนาดที่แตกต่างกันของสารตัวเติมมีค่าความต้านทานแรงกระแทกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของผงเส้นใยแก้วข้างต้นจะเห็นได้รอยแตกเร็วจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ลดลง ในทางเดียวกัน PC – B ผสมสารตัวเติมชนิดเดียวกันนั้นก็ยังมีแนวโน้มการลดลงของค่าความต้านทานแรงกระแทกเมื่อเติมผงเส้นใยแก้วในสัดส่วนที่มากขึ้นสอดคล้องกับผลค่าความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดเนื่องจากปริมาณการเติมส่งผลต่อความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์ อีกทั้งพอลิคาร์บอเนตเกรด PC – C ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ปริมาณการเติมมากกว่า 3 Phr ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์การแตกหักของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งการแตกหักเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มีอนุภาคของผงเส้นใยแก้วฝังตัว ชิ้นงานพอลิคาร์บอเนตดังกล่าวจะเกิดรอยแตกเร็วเป็นจำนวนมากเมื่อปริมาณการเติม 3 Phr เป็นต้นไป ในทางเดียวกันนั้น PC – D ก็ยังพบว่าผงเส้นใยแก้วมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตอย่างเห็นได้ชัดซึ่งผลการวิเคราะห์การแตกหักของชิ้นงานและลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชิ้นงานที่เกิดขึ้นของ PC – D ได้ชี้ให้เห็นว่าการแตกหักที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงและเกิดรอยร้าวจำนวนมากที่ 1 Phr และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของสารตัวเติมเพิ่มขึ้นอีกทั้งกระจายตัวของผงเส้นใยแก้วส่งผลต่อการเกิดรอยแตกเร็วในโครงสร้างทางกายภาพของพอลิคาร์บอเนตเช่นเดียวกัน ทั้งนี้การแตกหักดังกล่าวเกิดขึ้นจะการแตกที่ไม่มีการดึงยึดกล่าวคือการแตกหักของเมทริกซ์พอลิเมอร์คอมโพสิต [49]

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าพอลิคาร์บอเนตทั้ง 4 ชนิด จะมีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกันแต่เมื่อทำการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่เกิดขึ้นลดลงและค่าความต้านทานแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องอย่างมีนัยสำคัญกับ

ลักษณะการแตกหักและโครงสร้างทางกายภาพของพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวอย่างเห็นได้ชัดแต่อย่างไรก็ตามสารตัวเติมชนิดอนุภาคที่แตกต่างกันในการทดลองความต้านทานแรงกระแทกนั้นยังไม่แสดงผลถึงความแตกต่างขนาดของสารตัวเติมได้จึงได้วิเคราะห์สมบัติความแข็งวัสดุในหัวข้อถัดไป



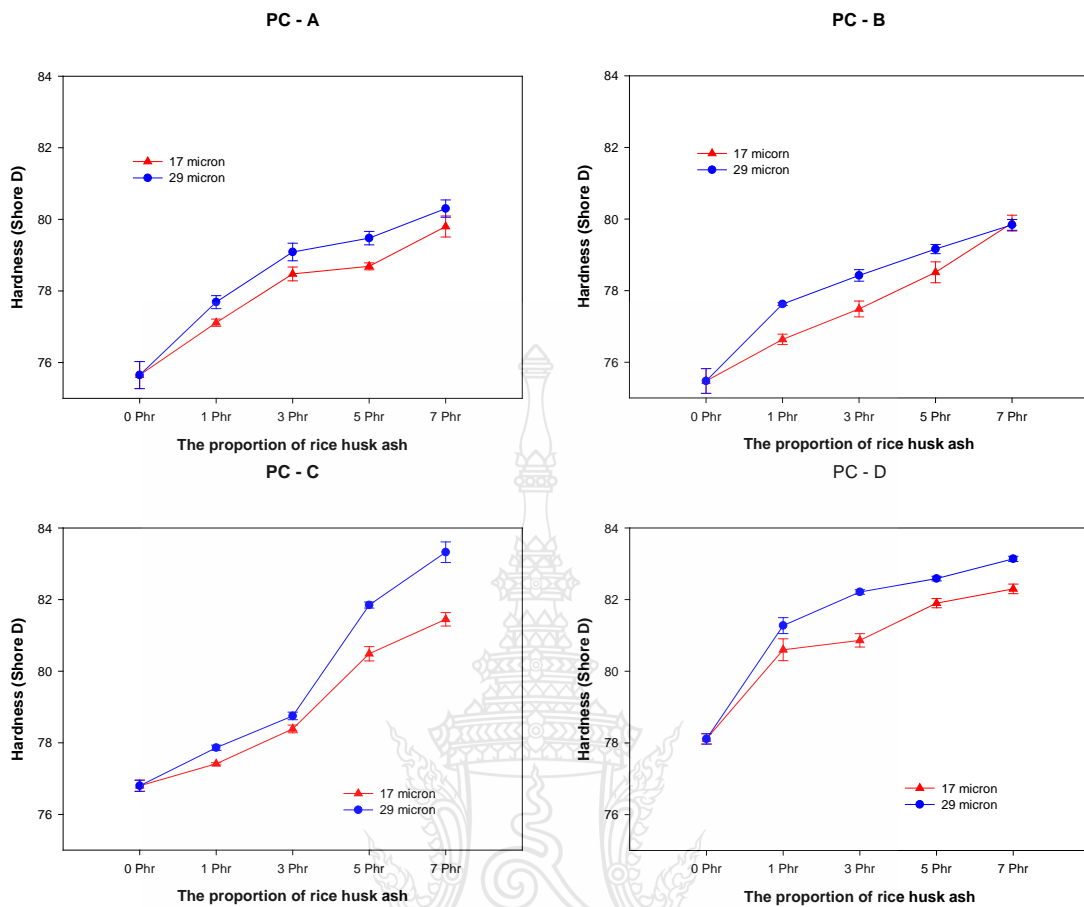
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก

4.4.2 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง

ผลการวิเคราะห์ความแข็งโดยการวิเคราะห์ความแข็งแบบชอร์ดูโรมิเตอร์ (Shore D) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ผลการทดสอบความแข็งของ PC – A พบว่าที่ขนาดผงเถ้าแกลบที่ต่างกันจะส่งผลให้ความแข็งของอนุภาคของสารตัวเติมที่ใหญ่กว่าจะมีความแข็งที่สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก อีกทั้งปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งจะแปรผันตามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในทางเดียวกันนั้น PC – B ที่ปริมาณการเติมที่ 1 Phr แสดงให้เห็นว่าขนาด

ของเก้าแกลบที่มีขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อทำการเติมใน ปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นค่าความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตดังกล่าวก็จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ อย่างไรก็ตามขนาดของสารตัวเติมที่แตกต่างกันที่ 7 Phr มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันเกิดจากความ สอดคล้องของการกระจายตัวของผงเก้าแกลบในเนื้อเมทริกซ์ที่ใกล้เคียงกัน ในทางตรงกันข้ามกับ PC – C ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ 7 Phr จะแสดงให้เห็นชัดเลยว่าขนาดของเก้าแกลบที่ มีขนาดแตกต่างกันจะมีค่าความแข็งที่แตกต่างกันอีกทั้งปริมาณการผสมส่งผลให้ค่าความแข็งนั้นแปรผัน เพิ่มขึ้นตามไปด้วยและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในทางตรงกันข้าม PC – D ค่าความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดที่ปริมาณการเติมที่ 1 Phr และจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ การเติมของผงเก้าแกลบเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือสารตัวเติมทำให้เนื้อเมทริกซ์มีความหนาแน่นเนื่องจากการ กระจายตัวของสารตัวเติม ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ [50]

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าค่าความแข็งของพอลิคาร์บอเนตทั้ง 4 ชนิด จะมีค่าแตกต่างกัน แต่เมื่อทำการเติมผงเก้าแกลบจะค่าความแข็งจะเปลี่ยนแปลงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณ ในการเติมสารตัวเติมขนาดที่ต่างกันของสารตัวเติมชี้ให้เห็นว่าขนาดของสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าความแข็งมากกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กกล่าวคือสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่จะยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้ความหนาแน่นของเนื้อเมทริกซ์เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความแข็งที่เพิ่มขึ้นของ การเติมสารตัวเติมในพอลิคาร์บอเนตนั้นก็ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลบางประการในหัวข้อต่อไป เช่นเดียวกัน



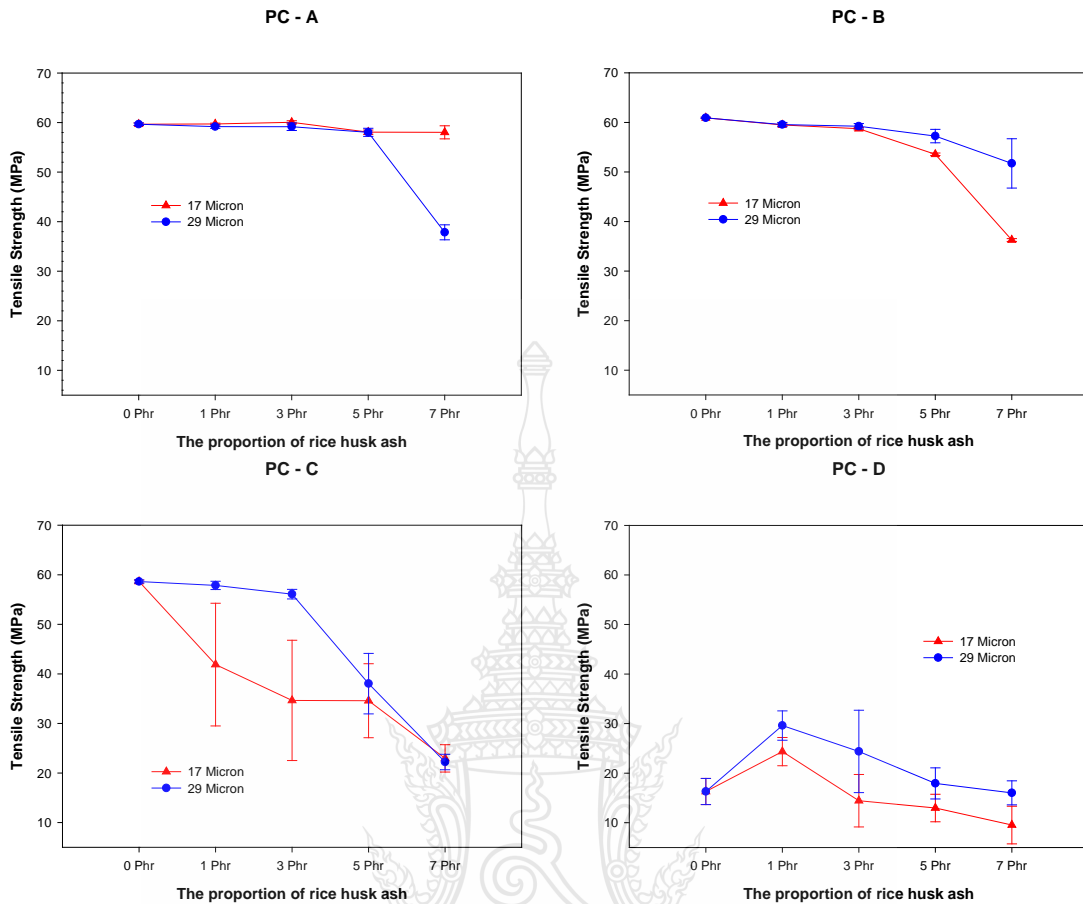
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าความแข็ง

4.4.3 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึง

ผลการทดลองของพอลิคาร์บอเนตที่มีอัตราการใช้ที่แตกต่างกันผสมผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่า PC - A ซึ่งเป็นพอลิคาร์บอเนตที่มีอัตราการใช้เถ้าแกลบที่ต่ำที่สุดในพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบผลการเติมผงเถ้าแกลบนั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมผงเถ้าแกลบที่ขนาดเล็กจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดต่ำลงจากเดิมเพียงเล็กน้อยแต่เมื่อผงเถ้าแกลบที่มีขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นเถ้าแกลบที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง ในทางเดียวกัน PC - B มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเติมของสารตัวเติมนั้นเพิ่มมากขึ้น และจะแสดงผลให้เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่ 5 Phr โดยขนาดเถ้าแกลบที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่เพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ PC - C การเติมของ

สารตัวเติมที่ผสมลงในพอลิเมอร์ก็แสดงผลให้เห็นอย่างชัดเจนมากขึ้นโดยการเติมผงแก้วเคลบในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดต่ำลง และชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างขนาดอนุภาคของสารตัวเติม ทั้งนี้ PC - D ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่สูงที่สุดในพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา พบว่าพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวนี้มีความต้านทานแรงดึงอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูงมากแต่เมื่อเติมผงแก้วเคลบทั้งสองขนาดในพอลิเมอร์ดังกล่าวทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นที่ 1 Phr และจะลดลงตามปริมาณการเติมที่เพิ่มมากขึ้นกล่าวคือพอลิคาร์บอนเนตที่เติมสารตัวเติมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดึงโดยสารตัวเติมเป็นขีดขวางการดึงในแนวแรงให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงดึงสูงสุดได้เพิ่มมากขึ้น

จะเห็นได้ว่าขนาดของผงแก้วเคลบจะมีผลกับ PC - A เนื่องจากพอลิคาร์บอนเนต PC - A นั้นเป็นเกรดที่มีอัตราการไหลต่ำทำให้ แก้วเคลบที่มีขนาดที่ใหญ่จะขัดขวางความสามารถในการรับแรงดึงได้ลดลง ในทางเดียวกันปริมาณการเติมของผงแก้วเคลบจะเห็นได้ชัดกับพอลิคาร์บอนเนต PC - B, PC - C และ PC - D เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมของสารตัวเติมดังกล่าวในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงนั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือสารตัวเติมได้ไปขัดขวางความสามารถในการรับแรงดึงของพอลิคาร์บอนเนตลดลงประกอบกับสารตัวเติมมีลักษณะเป็นของแข็ง ความสามารถในการรับแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงมีแนวโน้มลดลง ในทางเดียวกัน S.Th. Georgopoulos [51] ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตจากผลการทดลองพบว่าลักษณะการเติมของสารตัวเติมนั้นมีผลทำให้คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป ด้วยลักษณะทางกายภาพของวัสดุสารตัวเติม



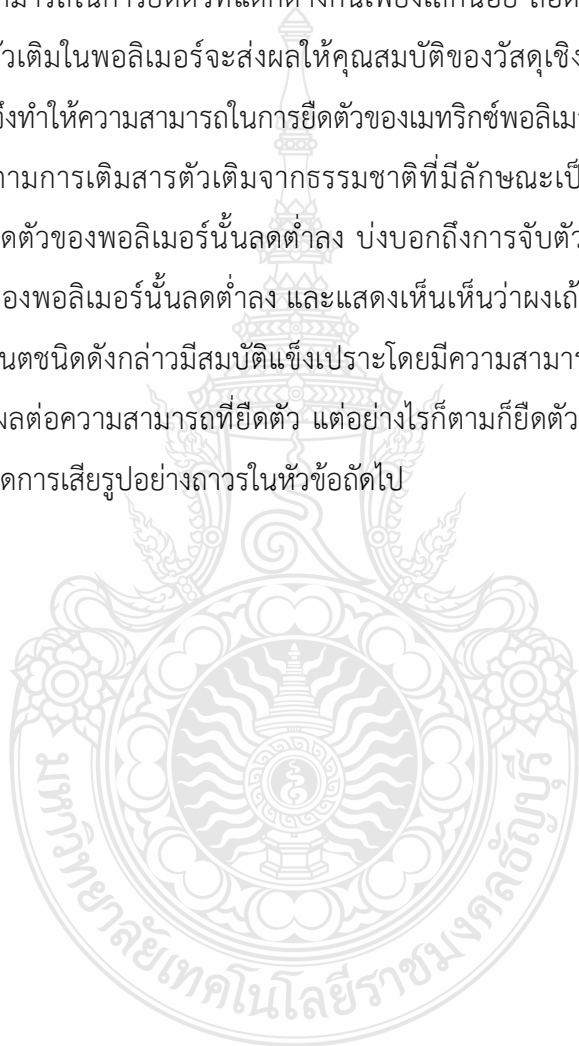
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

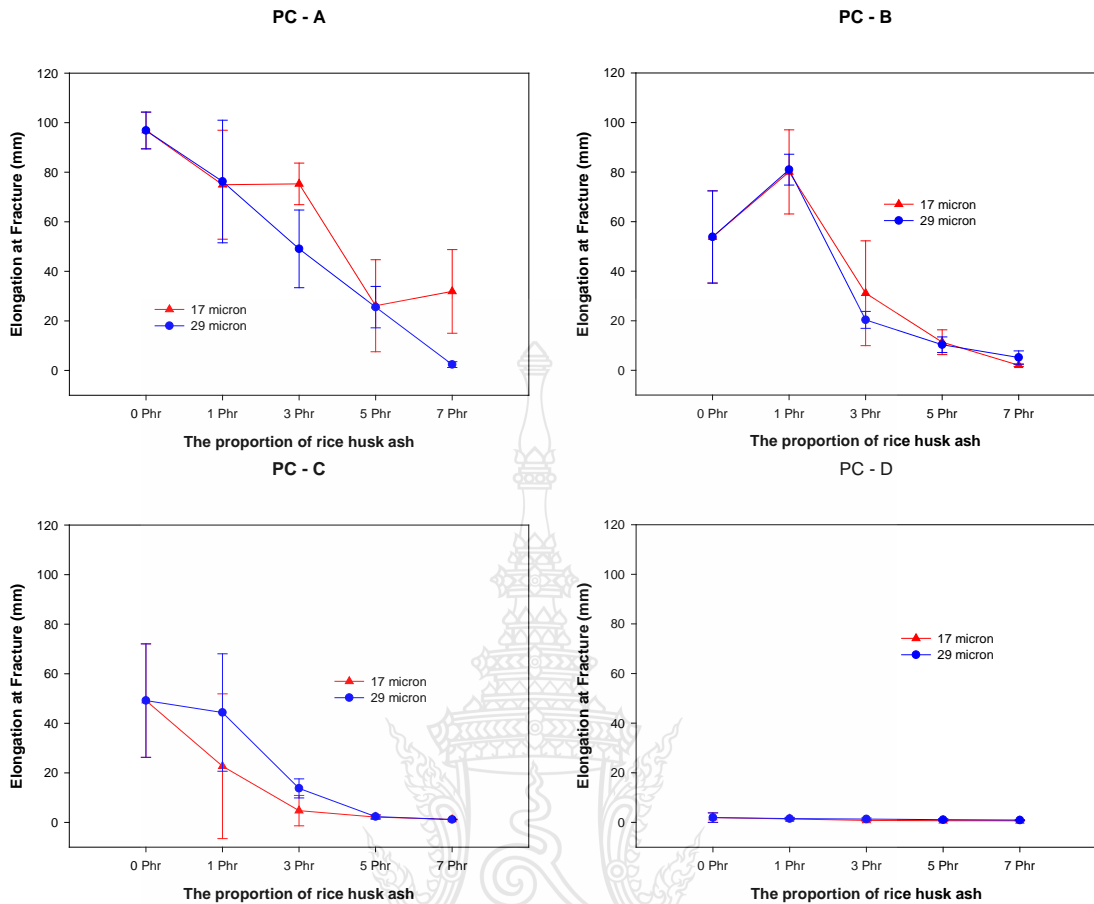
4.4.4 การวิเคราะห์ความยืดของพอลิเมอร์

จากผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่มีแนวโน้มที่ลดต่ำลง อีกทั้งในทางเดียวกัน ผลการทดลองของค่าระยะการยืดตัว ลักษณะสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นแข็งผสมกับพอลิเมอร์จากผลการทดลองการทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิคาร์บอนเนตที่มีอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 4 ชนิด มีค่าระยะการยืดตัวที่แตกต่างกัน โดยพอลิคาร์บอนเนตที่มีความหนืดสูงจะมีความสามารถในการยืดตัวที่สูงที่สุดตามลำดับ เมื่อทำการเติมสารตัวเติมผงเถ้าแกลบนั้นจะเห็นได้ว่าการเติมผงเถ้าแกลบนั้นจะส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นลดลงเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารเสริมแรงขัดขวางการยืดของเมทริกซ์พอลิเมอร์ทำให้การดึงยืดของพอลิเมอร์นั้นลดลงแต่อย่างไรก็ตามขนาดของผงเถ้าแกลบก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าขนาดเฉลี่ยของผงเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการยืดตัวที่ต่ำกว่าผงเถ้าแกลบที่มีขนาดเล็กกว่าเนื่อง

ด้วยความสามารถในการยึดตัวต้องอาศัยการยึดของเมทริกซ์พอลิเมอร์แก้วขนาดเล็กจึงมีประสิทธิภาพในการยึดตัวที่ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตาม PC – D พอลิคาร์บอเนตที่มีอัตราการใช้สูงที่สุดในการศึกษา เมื่อทำการผสมผงแก้วกลบที่มีปริมาณการเติมที่แตกต่างกันนั้นส่งผลต่อความสามารถในการยึดตัวที่ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องด้วยสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวมีความสามารถในการยึดตัวต่ำ สอดคล้องกับค่าความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด อีกทั้งยังพบว่าขนาดที่แตกต่างกันของผงแก้วกลบส่งผลต่อความสามารถในการยึดตัวที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirui Fu [52] การเติมสารตัวเติมในพอลิเมอร์จะส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการยึดตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์นั้นลดน้อยลง

แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารตัวเติมจากธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งส่งผลให้ความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์นั้นลดต่ำลง บ่งบอกถึงการจับตัวแน่นของเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์ทำให้การยึดตัวของพอลิเมอร์นั้นลดต่ำลง และแสดงให้เห็นเห็นว่าผงแก้วกลบไม่ส่งผลต่อ PC – D เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตชนิดดังกล่าวมีสมบัติแข็งแรงโดยมีความสามารถในการยึดตัวต่ำทำให้การเติมของผงแก้วกลบไม่ส่งผลต่อความสามารถที่ยึดตัว แต่อย่างไรก็ตามก็ยึดตัวที่ลดต่ำลงบ่งบอกถึงการคงสภาพก่อนพอลิเมอร์เกิดการเสีรูปร่างอย่างถาวรในหัวข้อถัดไป



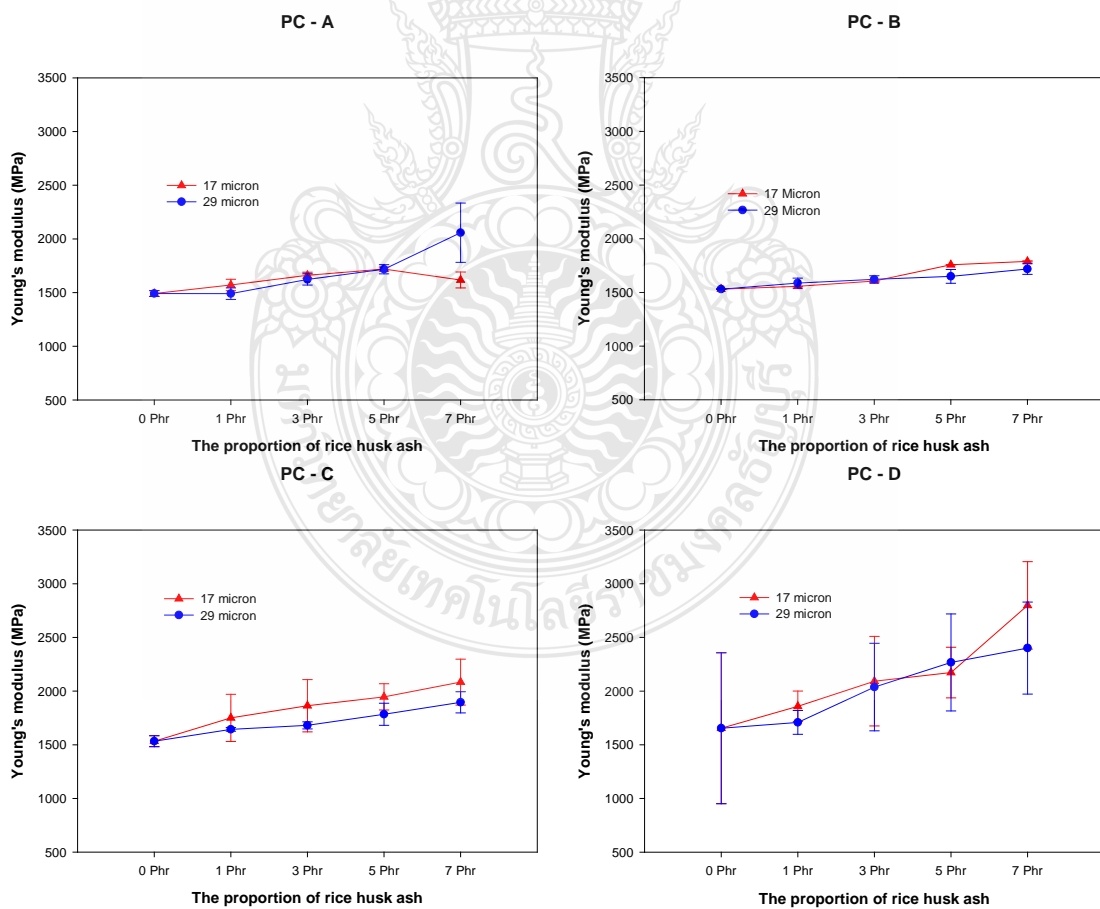


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าการยืดตัว

4.4.5 การวิเคราะห์ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

ผลค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตพอลิคาร์บอนเนตและผงเถ้าแกลบจากผลการทดลองพบว่าการเติมสารเสริมแรงอนุภาคนั้นมีผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นจะเห็นได้ว่าการเติมผงเถ้าแกลบทั้งสองขนาดนั้นจะส่งผลแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแปรผันตามปริมาณการผสมที่เพิ่มมากขึ้นในพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร ซึ่งการผสมของเถ้าแกลบทั้งสองขนาดทำให้สามารถทำความเข้าใจกับได้ของพอลิเมอร์และสารตัวเติมโดยจากผลการทดลองของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นทั้งนี้เนื่องด้วยผงเถ้าแกลบนั้นมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งและมีรูปร่างและรูปร่างไม่แน่นอนทำให้เมื่อเมทริกซ์พอลิเมอร์ไปจับตัวโดยรอบบริเวณพื้นผิวของเถ้าแกลบทำให้ระหว่างพอลิเมอร์คอมโพสิตเกิดการรับแรงในแนวตั้งสารตัวเติมจึงไปขัดขวางการดึงยึดของเนื้อพอลิเมอร์ให้เกิดความเสียหายมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามขนาดก็มีผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอีกด้วยโดย

ขนาดของสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กจะมีความเข้ากันได้ของเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์และสารตัวเติมได้ดีกว่า เนื่องด้วยลักษณะทางกายภาพของสารตัวเติมผงเถ้าแกลบมีรูปร่างไม่แน่นอนนอนการจับตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์รอบผงเถ้าแกลบนั้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของขนาดผงเถ้าแกลบที่มีขนาดเล็กสูงกว่า ผงเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า PC – A และ PC – B จะเกิดความเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณการเติมที่ 5 Phr จะมีผลให้การเติมสารตัวเติมนั้นแสดงผลให้เห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นจะแปรผันตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบในสัดส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น และผลการทดลองของ PC – C และ PC – D แสดงให้เห็นถึงขนาดของผงเถ้าแกลบที่แตกต่างกันมีผลให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแตกต่างกันไปอีกด้วย ทั้งนี้ยังบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ของผงเถ้าแกลบที่มีผลต่อพอลิคาร์บอนเนตทั้ง 4 ชนิด สอดคล้องกับงานของ Prashant Jindal [53] การปรับปรุงคุณสมบัติพอลิคาร์บอนเนต โดยการเติมสารเสริมแรงนั้นจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกลนั้นมีแนวโน้มดีขึ้น ทั้งนี้จากการแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบพบว่าปริมาณการเติมและขนาดของผงเถ้าแกลบจะมีผลอย่างเห็นได้ชัดกับ PC – C และ PC – D



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

4.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากผลการทดลองข้างต้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองพบว่าการเติมผงเถ้าแกลบนั้นส่งผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต จึงนำผลการทดลองดังกล่าววิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนต ผสมผงเถ้าแกลบขนาด 17 และ 29 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนการผสม 0, 1, 3, 5 และ 7 Phr โดยการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลองเต็มรูปแบบ (Full factorial design) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยการแบ่งชนิดของพอลิคาร์บอเนตและสารตัวเติมเติมที่ส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกล โดยแสดงปัจจัยในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.3 และแสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตในภาคผนวก ง

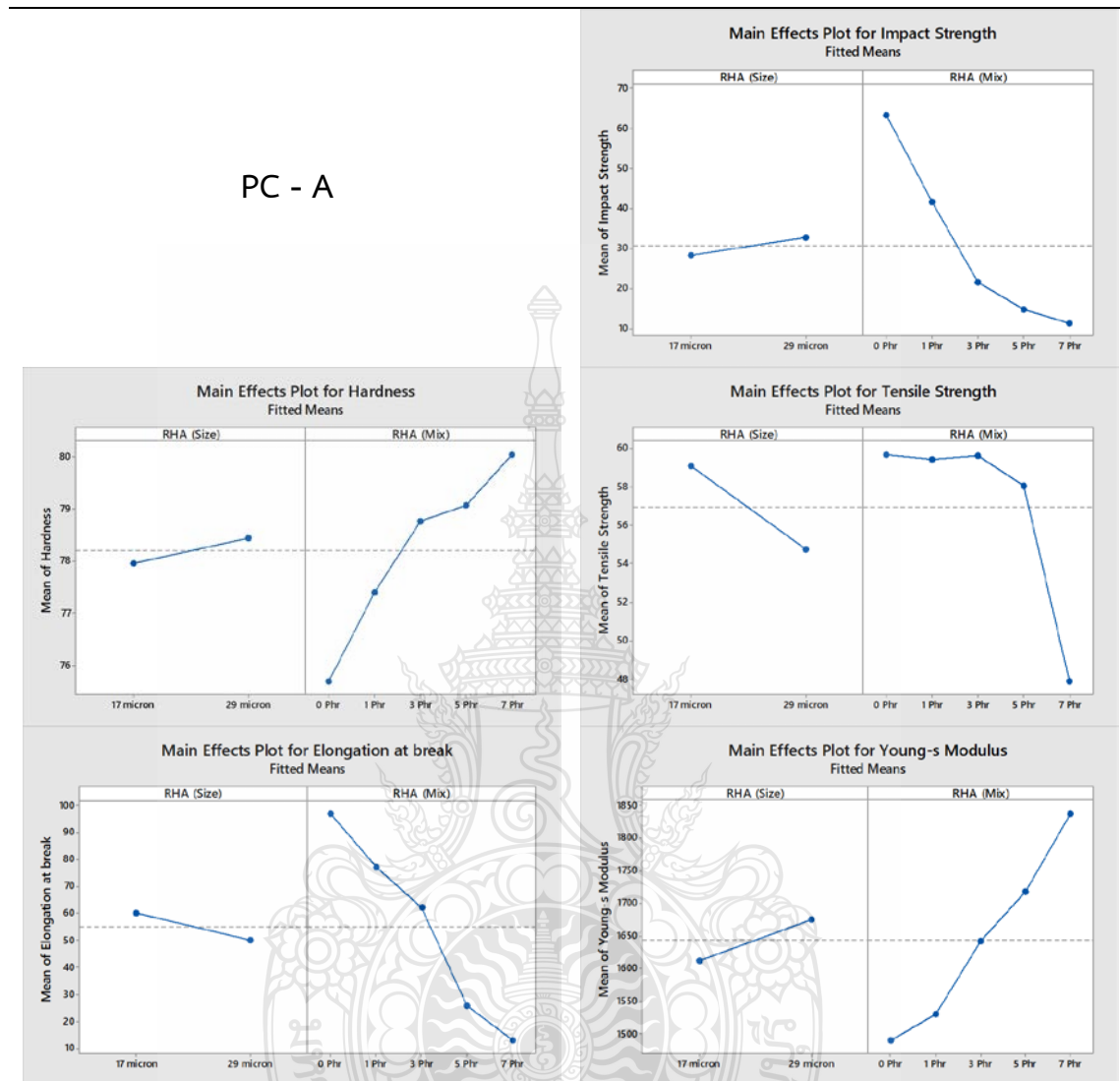
ตารางที่ 4.3 กำหนดปัจจัยในการออกแบบการทดลอง

Factor	Level
RHA (Size)	17 and 29 micron
RHA (Mix)	0, 1, 3, 5 and 7 Phr

4.5.1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล

ผลกาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PC – A พบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ลดลงซึ่งขนาดของผงเถ้าแกลบจะมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า P – Value เท่ากับ 0.000 อีกทั้งการกระจายตัวของข้อมูลจะมีความผันแปร 95.12 % และในทางเดียวกันนั้นปัจจัยดังกล่าวจะมีผลต่อค่าความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยมีค่า P – Value เท่ากับ 0.038 และค่าความแปรของชุดข้อมูล 97.42 % ปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบและขนาดของผงเถ้าแกลบส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (R-sq = 73.25%) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองข้างต้นพบว่าตรงกันข้ามสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กจะมีผลให้การรับแรงดึงสูงสุดได้มากกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งยังสามารถมีความสามารถในการยืดตัวได้ดีกว่าอีกด้วย (R-sq = 98.59%) แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยร่วมของปริมาณการเติมของสารตัวเติมและขนาดของผงเถ้าแกลบที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อค่าระยะการยืดตัวโดยมีค่า P – Value เท่ากับ 0.090 ในทางตรงกันข้ามปัจจัยเดี่ยวขนาดของสารตัวเติมส่งผลต่อค่าระยะการยืดตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบส่งผลต่อค่าระยะการยืดตัวที่ความเชื่อมั่น 95 %

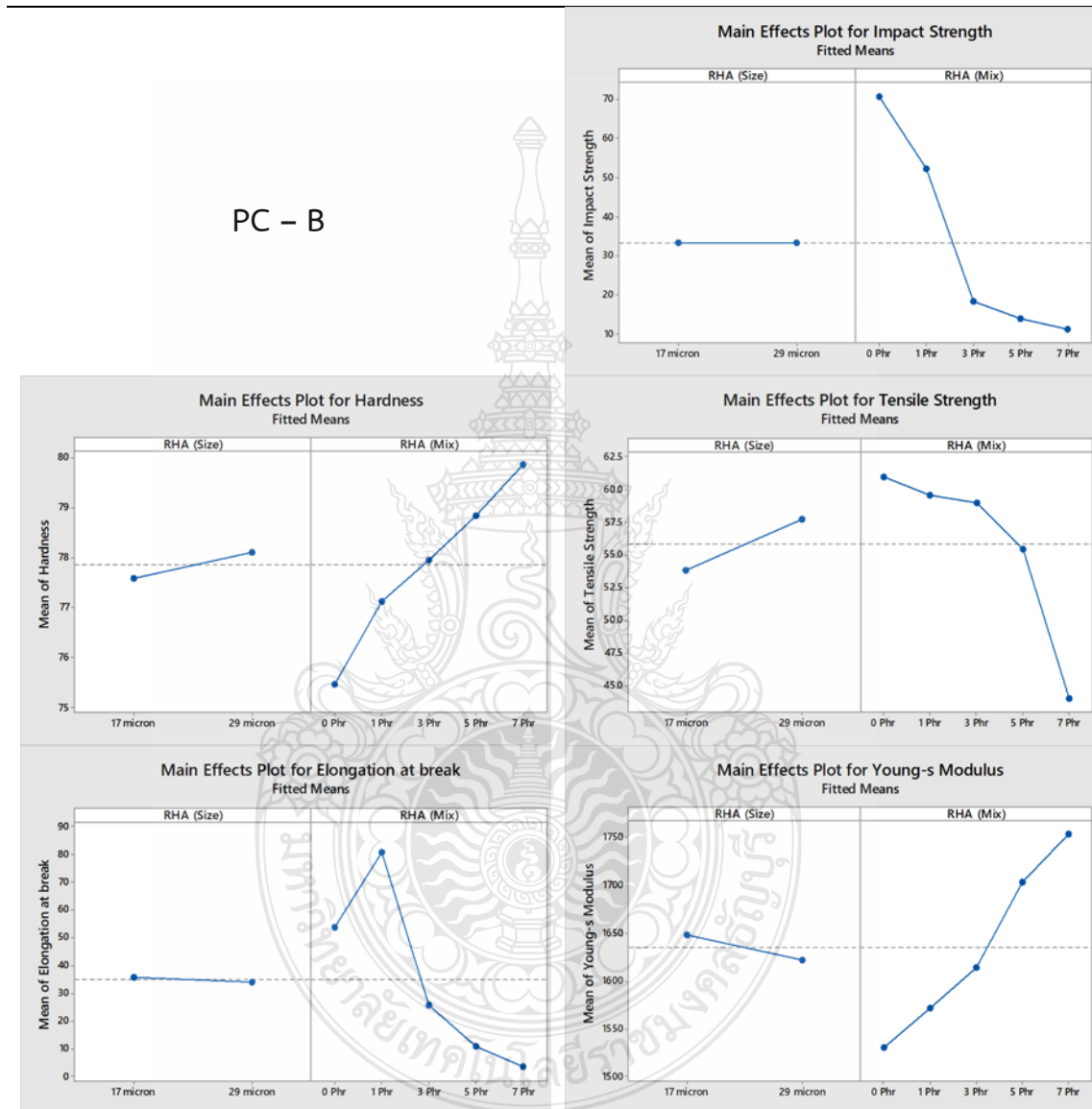
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – A



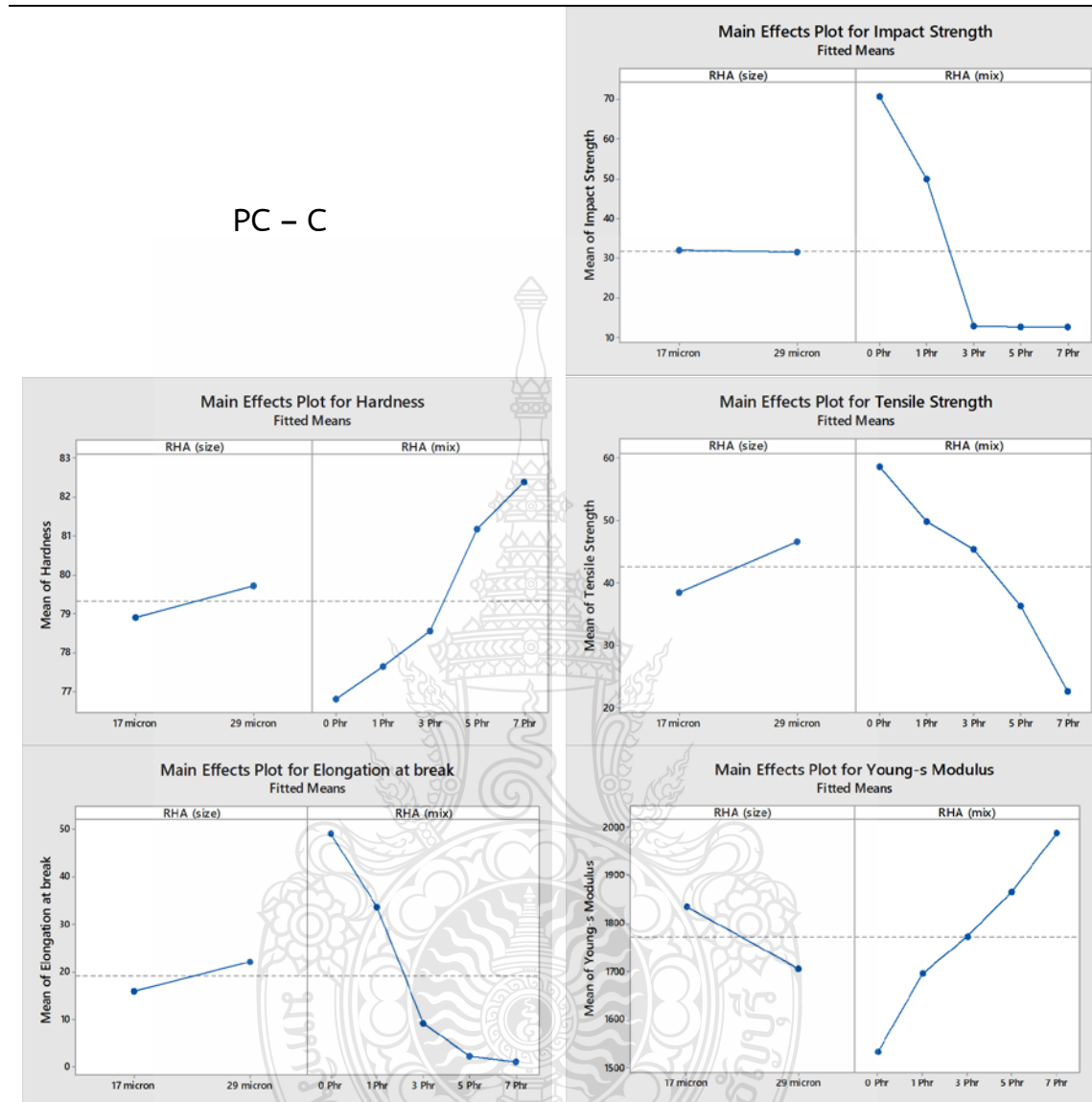
จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 17 แสดงถึงกราฟปฏิสัมพันธ์ของผงเถ้ากลบที่ขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร โดยปฏิสัมพันธ์ของขนาดผงเถ้ากลบที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าผงเถ้ากลบที่มีขนาดเล็ก P- Value 0.000 (R-sq = 97.87 %) และในทางเดียวกันกับจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอีกด้วย โดยมีความผันแปรของข้อมูล 94.87 % แต่ในทางตรงกันข้ามขนาดของผงเถ้ากลบที่มีขนาดเล็กจะส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นได้ดีกว่าผงเถ้ากลบที่มีขนาดใหญ่ (R-sq = 88.68 %) ปริมาณการเติมที่เพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก แต่อย่างไรก็ตามขนาดของผงเถ้ากลบจะมีส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่าความผันแปรของข้อมูล 99.66 % ในทางเดียวกันระยะการยืดตัวของ PC – B การเติมสารตัวเติมที่

ขนาดแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าระยะการยืดตัวที่ค่า p - Value = 0.693 แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมนั้นส่งผลต่อค่าระยะการยืดตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (R -sq = 84.41)

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – B

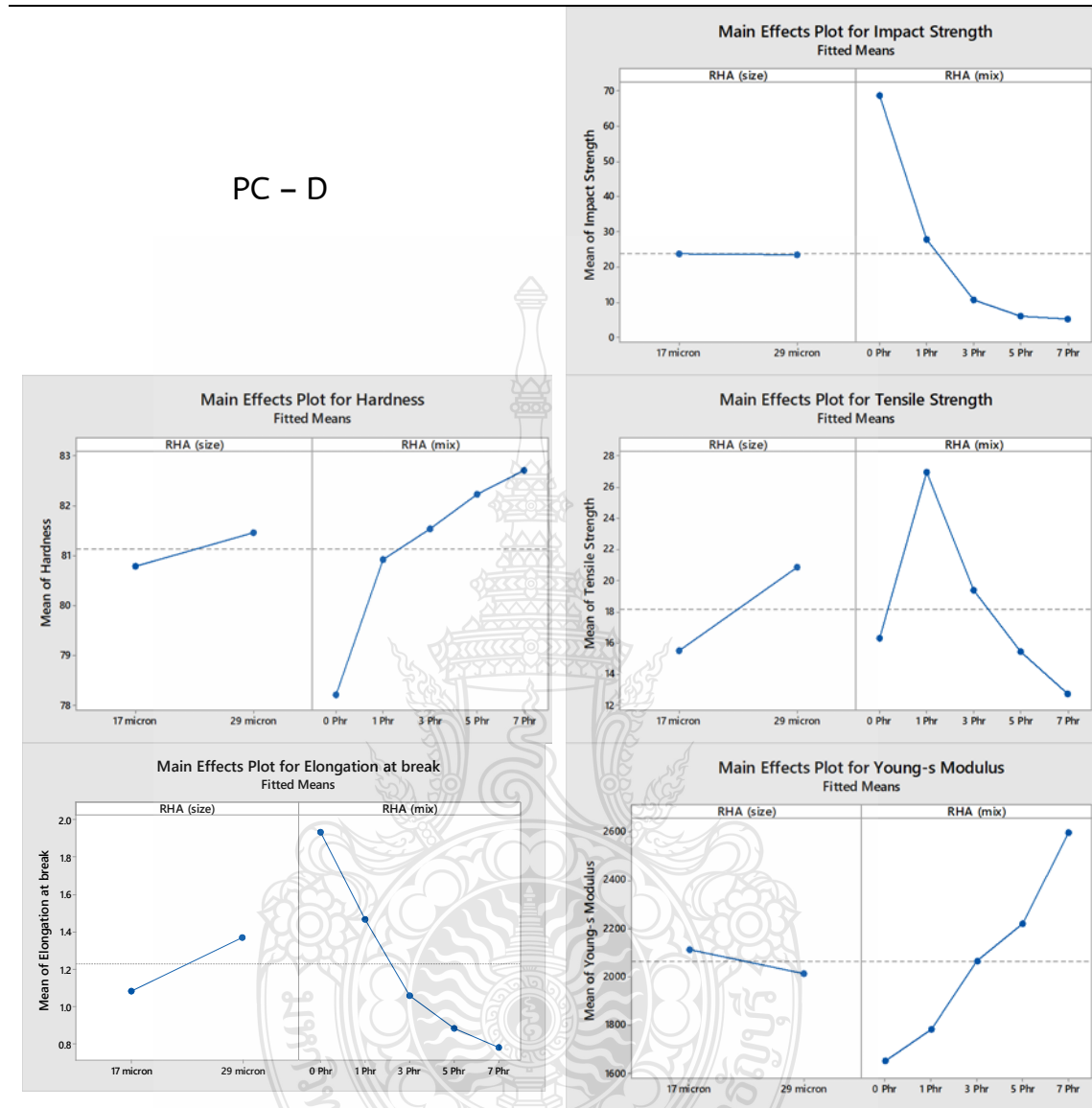


ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – C



การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 17 ของ PC – C พบว่าปริมาณการเติมและขนาดของผงแก้วเคลือบของผงแก้วเคลือบมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก (P-value = 0.000, 0.001) ซึ่งมีความผันแปรของชุดข้อมูล 99.95 % ในทางตรงกันข้ามค่าแข็งจะเพิ่มมากขึ้นปัจจัยร่วมของสารตัวเติมขนาดที่แตกต่างกันและปริมาณการเติมเพิ่มขึ้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ความผันแปรของชุดข้อมูล 99.50 % แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความสามารถในการยืดตัวของพอลิเมอร์นั้นลดลงตามไปด้วยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (R-sq = 82.25 %) สารตัวเติมขนาดที่แตกต่างกันจะมีผลทางสถิติต่อสมบัติเชิงกลเว้นแต่การยืดตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล PC – D



จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ PC – D ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าขนาดและปริมาณการเติมของผงเถ้ากลบจะส่งผลต่อค่าความแข็งของพอลิเมอร์ (P-value = 0.000) ความผันแปรของชุดข้อมูล 98.68 % และในทางเดียวกันการลดลงของความต้านทานแรงดึงสูงสุดก็เป็นผลจากขนาดและการเติมสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (R-sq = 66.89 %) อีกทั้งปริมาณการเติมจะมีผลเป็นอย่างมากต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น P-value = 0.001 แต่ในทางตรงกันข้ามปริมาณการเติมสารตัวเติม และขนาดที่แตกต่างกันของสารตัวเติมจะไม่ส่งผลต่อค่าระยะการยืดตัว แต่อย่างไรก็ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลถึงการลดลงของค่าความต้านทานแรงกระทำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.5.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปัจจัย

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิคาร์บอเนตทั้ง 4 ชนิด ผสมผงแก้วกลม 17 และ 29 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนการผสม 0, 1, 3, 5 และ 7 Phr จากผลการทดลองพบว่า สารตัวเติมและปริมาณการเติมที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง PC – A โดยมีค่าความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และระยะการยืดตัว คิดเป็นร้อยละ 34.5, 45.6 และ 43.2 อีกทั้งสารตัวเติม ยังช่วยสามารถเพิ่มความแข็งของพอลิเมอร์ดังกล่าว 22.3 % และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 16.7 % ในทางเดียวกัน PC – B จะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความแข็งและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นร้อยละ 15.8 และ 24.1 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการเติมของสารตัวเติมนั้นจะส่งผลต่อแนวโน้มการลดลงของ ค่าความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ระยะการยืดตัว ร้อยละ 33.1, 42.9 และ 40.5 แต่เมื่อทำการเติมผงแก้วกลมและสัดส่วนการผสมที่ต่างกันจากผลการวิเคราะห์พบว่า PC – C จะมีแนวโน้มลดลงของค่าความต้านทานแรงกระแทกคล้ายกับ PC – A, PC – B แต่การลดลงที่ 1 Phr จะลดลงจากเดิมเพียง 13.4 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ PC – C จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าร้อยละ 46.8 เปอร์เซ็นต์ แต่ในทางเดียวกันนั้น PC – D จะมีค่าความแข็งเพิ่มสูงต่างจากพอลิเมอร์คอมโพสิตข้างต้นด้วยปริมาณการเพิ่มที่มากถึง 42.9 เปอร์เซ็นต์ และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 49.4 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อพอลิเมอร์คอมโพสิต

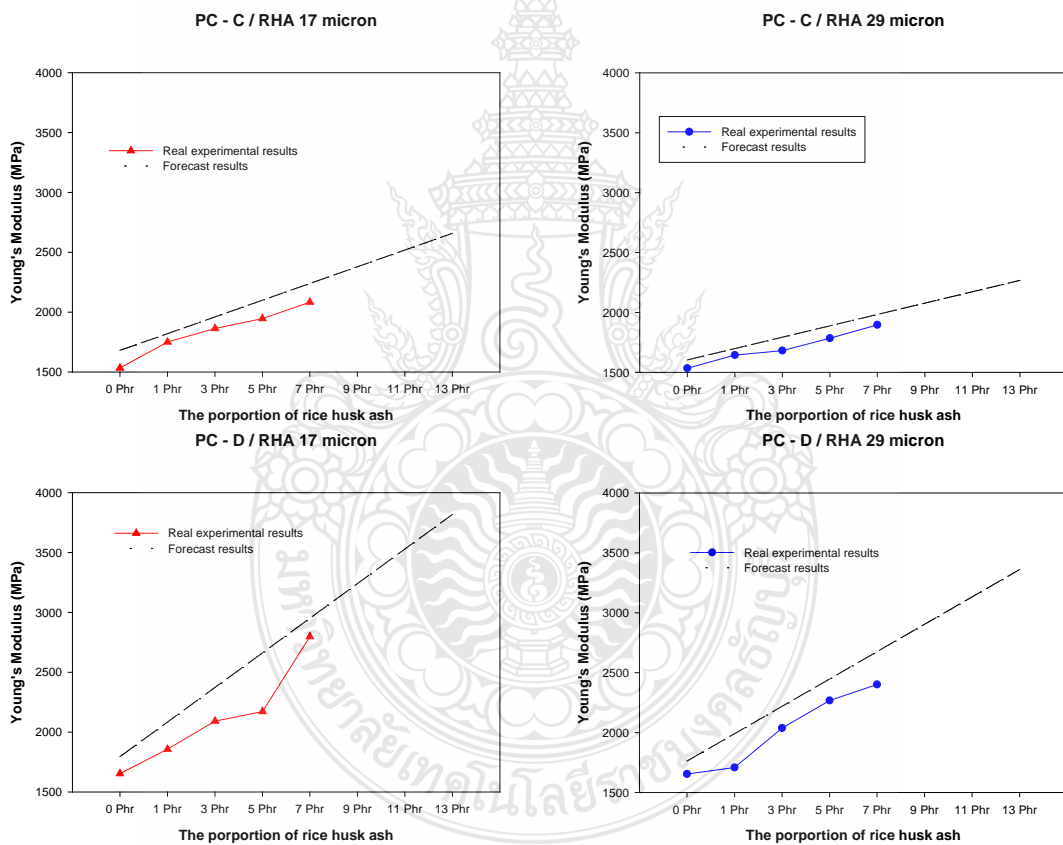
Type – PC	Impact	Hardness	Young's Modulus	Tensile Strength	Elongation at break
PC – A / PC - B	↓	↑	-	↓	↓
PC – C / PC - D	↓	↑	↑	↓	-

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่าสารตัวเติมผงแก้วกลมและปริมาณการเติมของผงแก้วกลมจะมีผลต่อ PC – C และ PC – D อย่างเห็นได้ชัดที่ค่าความแข็ง และ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น เป็นเหตุให้นำข้อมูลจากการทดลองดังกล่าวไปศึกษาในการพยากรณ์สารตัวเติมที่มีขนาดแตกต่างกันและสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

4.6 การพยากรณ์

จากการทดลองพบว่าการเติมผงแก้วกลมนั้นช่วยเพิ่มความสามารถความแกร่งของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ดี ทั้งนี้จึงนำพอลิเมอร์คอมโพสิต PC – C และ PC - D โดยที่ขนาดและปริมาณการเติมของผงแก้วกลมมีผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแข็งอย่างเห็นได้ชัด โดยการพยากรณ์

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อปริมาณการเติมในสัดส่วนที่แตกต่างกัน อีกทั้งการเติมของผงเถ้า
 แกลบยังช่วยเป็นการนำขยะที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยผล
 การทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการเติมของผงเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัส
 ความยืดหยุ่นและค่าความแข็งนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในอนาคต
 ต่อไป ในทางตรงกันข้าม NITHIKARNJANATHARN Jittiwat [54] ได้ทำการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ได้
 จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณซึ่งการวิเคราะห์ผลดังกล่าวมีขั้นตอนที่ยุ่งยากในการพยากรณ์
 การเติมของปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มมากขึ้นในพอลิคาร์บอนเนตที่ปริมาณการเติมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถ
 นำโปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์และพยากรณ์ได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งกว่า อีกทั้งยังมีความ
 น่าเชื่อถือของข้อมูลได้ดีอีกด้วย

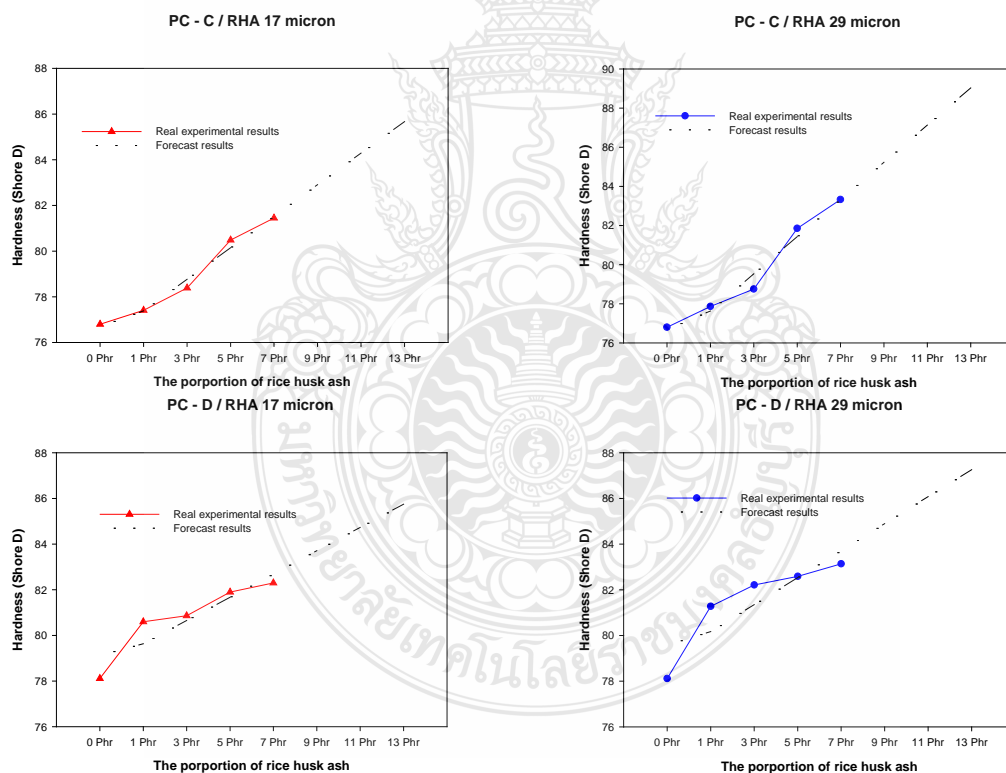


รูปที่ 4.11 การพยากรณ์ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

จากผลการพยากรณ์ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ PC - C พบว่าขนาดของผงเถ้าแกลบที่
 แตกต่างกันส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสความยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกัน ในทางเดียวกันปริมาณการเติม

ของผงเถ้าแกลบที่มีขนาดเล็กจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นได้ดีกว่าผงเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่ ตรงกันข้ามกับ PC - D พอลิคาร์บอเนตชนิดนี้เมื่อผสมกับผงเถ้าแกลบจะมีผลอย่างเห็นได้ชัดถึงการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองและการพยากรณ์ของพอลิเมอร์ดังกล่าวยังมีค่าที่คลาดเคลื่อน กล่าวคือค่าที่ได้จากการทดสอบไม่เข้าใกล้ค่าพยากรณ์

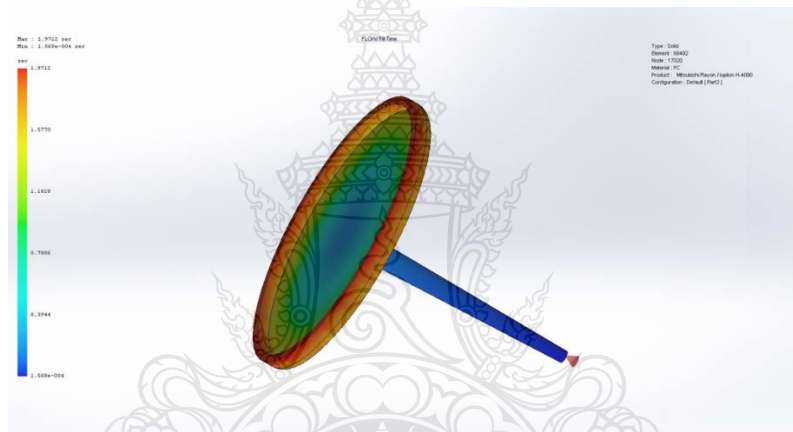
ในทางเดียวกันนั้นกรเติมสารตัวเติมในพอลิคาร์บอเนตยังช่วยเพิ่มค่าความแข็งของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เพิ่มขึ้นจากการพยากรณ์พบว่า PC - C ค่าความแข็งที่เพิ่มมากขึ้นจะแปรผันตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มสูงขึ้นในพอลิเมอร์เมทริกซ์ขนาดของสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่จะมีความแข็งมากกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ผลการทดลองค่าความแข็งของพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ในทางตรงกันข้ามกับ PC - C ผลการทดสอบความแข็งของ PC - C จะมีค่าที่แตกต่างจากค่าพยากรณ์เล็กน้อยแต่อย่างไรก็ตามขนาดและการเติมของผงเถ้าแกลบนั้นจะส่งผลให้ความแข็งพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.12 การพยากรณ์ค่าความแข็ง

4.7 การวิเคราะห์กระบวนการฉีดพลาสติก

การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมโพสิต ซึ่งกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหล โดยอ้างอิงตามมาตรฐานผู้ผลิตของชนิดของวัสดุที่ใช้โดยผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาในกระบวนการฉีดนั้น ทั้งนี้พอลิคาร์บอเนตในปัจจุบันได้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นอย่างมากอีกทั้งรถยนต์ซูเปอร์คาร์ [55] ได้นำพอลิคาร์บอเนตผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีน้ำหนักเบาและแข็งแรง ทั้งนี้งานรองแก้วเนื่องจากชิ้นงานนั้นมีลักษณะรูปทรงที่สามารถนำไปต่อยอดในการวิเคราะห์กระบวนการฉีดในรูปแบบอื่นๆ ได้ หลังจากนั้นจะนำผลการจำลองการฉีดที่ได้จากโปรแกรมมาวิเคราะห์ผลลัพธ์ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในการปรับตั้งเครื่องฉีด ค่ามวลปริมาตรของชิ้นงานและน้ำหนักของชิ้นงานออกมา เพื่อนำมาตัดสินใจหรือแก้ไขปัญหาเมื่อต้องปฏิบัติงานฉีดจริง



รูปที่ 4.13 การจำลองการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์

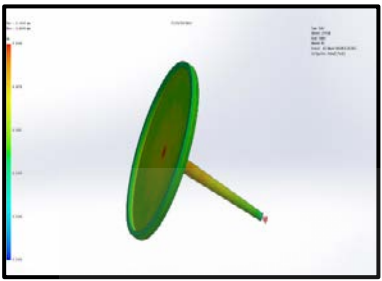

ตารางที่ 4.9 ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์

Name	PC - C / RHA(Size) 29 micron – 1 Phr
Melt Temperature	290 องศาเซลเซียส
Max Melt Temperature	294 องศาเซลเซียส
Min Melt Temperature	134.55 องศาเซลเซียส
Mold Temperature	105 องศาเซลเซียส
Ejection Temperature	150 องศาเซลเซียส
Type	Solid
Element	68492
Node	17020
Volume	9.75 Cm ³
Mass	11.21 G
Size	70 x 70 x 64 mm

4.11.2 กระบวนการฉีดพลาสติกและการเปรียบเทียบผลการทดลอง

ในปัจจุบันพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นได้มีบทบาทมากขึ้น Partanen A. [56] ได้ศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยการเติมเส้นใยไม้จากธรรมชาติขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะต่างๆ ทั้งนี้ทำให้สังเกตเห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายประเภท อีกทั้งยังเพิ่มความแปลกใหม่สวยงามให้กับสินค้าและผลิตภัณฑ์อีกด้วย เมื่อทำการทดลองจำลองการฉีดพลาสติกพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิตจึงนำพารามิเตอร์ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการฉีดพลาสติกปรับตั้งเครื่องฉีดในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาชิ้นงานถาดรองแก้วจากผลการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ในการจำลองสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาชิ้นงานถาดรองแก้วได้สมบูรณ์แต่อย่างไรก็ตามการยุบตัวของชิ้นงานและน้ำหนักของชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบพบว่าการยุบตัวจากผลการจำลองเท่ากับ 0.0756 มิลลิเมตรและการฉีดจริงมีค่าเท่ากับ 0.0615 มิลลิเมตร มีผลต่างกันเท่ากับ 0.0141 มิลลิเมตร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.05% และผลต่างของน้ำหนักของผลการจำลอง และการฉีดจริงมีผลต่างเท่ากับ 4.84 กรัม ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 28.47% จากการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม และนำมาฉีดขึ้นงานจริง แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบการจำลองการฉีด และชิ้นงานฉีดจริง

ผลการจำลอง		ชิ้นงานฉีดจริง	
			
การยุบตัว (มิลลิเมตร)	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)	การยุบตัว (มิลลิเมตร)	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)
0.0756	12.24	0.0615	17.07
คลาดเคลื่อนของผลจำลองและชิ้นงานจริง		การยุบตัว (มิลลิเมตร)	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)
		1.05%	28.47%

4.8 การคำนวณต้นทุนการผลิต

หากพิจารณาต้นทุนการผลิต จะเห็นว่าพอลิคาร์บอเนตมีต้นทุนการผลิตต่อ 1 กิโลกรัมเท่ากับ 260 บาท และราคาผงไฟเบอร์คาร์บอนในสัดส่วน 1 phr ราคา 200 รวมต้นทุนในการเตรียมวัสดุในกระบวนการผลิต 460 บาท แต่ในทางตรงกันข้ามผงเถ้าแกลบในสัดส่วน 1 phr ราคา 0.25 บาท พอลิคาร์บอเนต 1 กิโลกรัม ราคา 260 บาท รวมต้นทุนในการผลิต 260.25 บาท เมื่อปริมาณการเติมของสารเสริมแรงทั้งสองชนิดในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นต้นทุนในการผลิตของกระบวนการก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จะเห็นได้ว่าต้นทุนในการผลิตของผงเถ้าแกลบต่ำกว่าต้นทุนการผลิตของผงไฟเบอร์คาร์บอน อีกทั้งจากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การเติมผงเถ้าแกลบส่งผลให้พอลิคาร์บอเนตแข็งและแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบต้นทุนของสารเสริมแรง

วัสดุ	ราคา (บาท)
พอลิคาร์บอเนต 25 กิโลกรัม	6500
ผงไฟเบอร์คาร์บอน 1 กิโลกรัม	20000
ผงเถ้าแกลบ 1 กิโลกรัม	25

4.9 การอภิปรายผลการทดลอง

4.9.1 การอภิปรายผลการทดลองสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบจะส่งผลให้ค่าความเค้นและความเครียดของ PC – A และ PC – B โดยการเติมผงเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะแปรผันระยะการยืดตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง แต่ในทางเดียวกันการเติมของผงเถ้าแกลบจะแสดงให้เห็นได้ชัดกับ PC – C โดยความสามารถการยืดตัวที่ลดลงบ่งบอกถึงการจับตัวกันของเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มีความแข็งและแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม PC – D การเติมผงเถ้าแกลบของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่ส่งผลต่อการยืดตัวของพอลิเมอร์ เนื่องด้วยวัสดุมีสมบัติแข็งเปราะ ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงไปของความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียดจะเกิดขึ้นจากสารตัวเติมที่กระทำต่อเมทริกซ์พอลิเมอร์ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเมทริกซ์มีความเหนียวแน่นกันมากขึ้น [57] พฤติกรรมดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะส่งผลกับค่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลการทดลองพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบในสัดส่วนการผสมที่แตกต่างกัน พบว่าส่งผลต่อค่าความสัมพันธ์ความเหนียว โดยเมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น PC – A และ PC – B ค่าความสัมพันธ์ความเหนียวต่ออัตราเหนียวเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบ เนื่องด้วยผงเถ้าแกลบส่งผลให้การไหลตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์ ในทางเดียวกัน PC – C ปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบส่งผลต่อค่าความสัมพันธ์ความเหนียวต่ออัตราเหนียวที่ลดลง โดยผงเถ้าแกลบที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้เมทริกซ์พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้โดยที่ผงเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนการผสมเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสัมพันธ์ความเหนียวต่ออัตราเหนียวมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามการเติมของผงเถ้าแกลบและสัดส่วนการผสมไม่ส่งผลกับ PC – D เนื่องจากการไหลตัวของพอลิคาร์บอเนตดังกล่าวไหลตัวได้ดี เล็กน้อย ทั้งนี้พฤติกรรมการไหลตัวของพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด ที่เปลี่ยนแปลงเกิดจากผงเถ้าแกลบในพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิตขัดขวางการไหลตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์หรือเสริมการไหลตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์ ให้เกิดพฤติกรรมการไหลตัวที่ต่างกันไป [58]

จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความสัมพันธ์ความเค้น - ความเครียด และพฤติกรรมการไหลตัวของพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบ พบว่าลักษณะการแตกหักของพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกัน โดยพบว่า PC – A และ PC – B เมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบลักษณะพื้นผิวของการแตกหักแสดงให้เห็นถึงการแตกร้าวและจะเห็นได้ชัด เมื่อปริมาณการเติมผงเถ้าแกลบที่ 7 Phr ในทางเดียวการเติมของผงเถ้าแกลบในพอลิคาร์บอเนต PC – C และ PC – D รอย

แตกตัวของพอลิคาร์บอนเนตผสมผงถั่วแกลบจะแสดงให้เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณการเติมที่ 5 Phr ทั้งนี้เนื้อพอลิเมอร์ที่เกิดจากการแตกหักจะมีลักษณะดิ่งยึดจากแรงที่มากระทำ เมื่อเติมผงถั่วแกลบลักษณะของพื้นผิวจะเปลี่ยนแปลงโดยเกิดรอยร้าวจากการแตกหัก อย่างไรก็ตามรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามปริมาณการเติมของผงถั่วแกลบที่เพิ่มสูงขึ้นในเมทริกซ์พอลิเมอร์ เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของผงถั่วแกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากผงถั่วแกลบที่กระจายตัวในเมทริกซ์พอลิเมอร์ กล่าวคือผงถั่วแกลบเปลี่ยนสภาพทางกายภาพของพอลิเมอร์ โดยสารตัวเติมกระจายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ทำให้เกิดการยึดเกาะของเมทริกซ์เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลทำให้คุณสมบัติทางกลนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

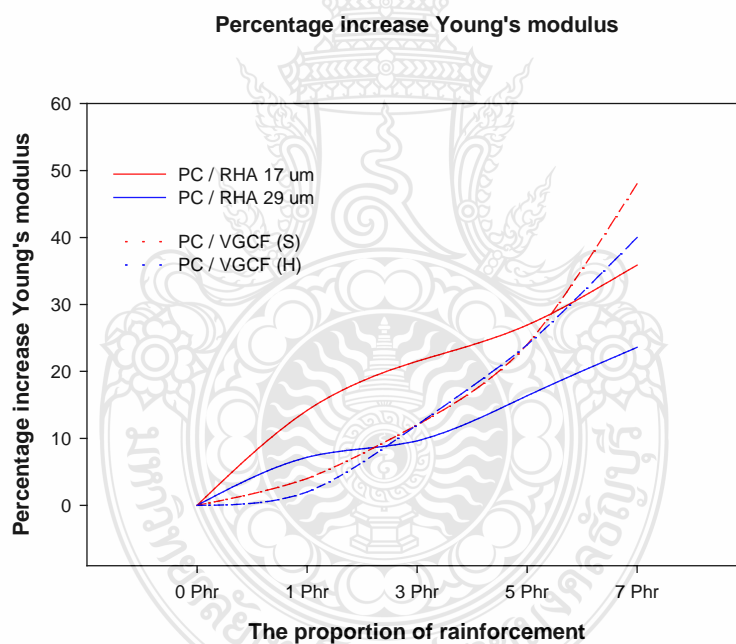
ผลของการเติมของปริมาณผงถั่วแกลบส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกนั้นลดลงเนื่องจากปริมาณการเติมของผงถั่วแกลบเกิดการกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์มีผลต่อค่าความเหนียวลดลงจากเดิม ซึ่งขนาดที่แตกต่างกันของผงถั่วแกลบจะส่งผลให้เห็นได้ชัดกับค่าความแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยขนาดของผงถั่วแกลบที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลต่อค่าความแข็งสูงกว่าผงถั่วแกลบที่มีขนาดเล็ก อีกทั้งปริมาณการเติมที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งนั้นเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความหนาแน่นของเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เพิ่มมากขึ้นจากการเติมผงถั่วแกลบที่มีคุณสมบัติเป็นของแข็งในพอลิเมอร์คอมโพสิต ในทางเดียวกันการเติมผงถั่วแกลบมีผลต่อการยึดตัวที่ลดต่ำลง เนื่องด้วยคุณสมบัติของผงถั่วแกลบที่มีความสามารถในการยึดตัวต่ำและกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงมีผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดนั้นลดลงตามไปด้วยเนื่องจากกระชดขวางการไหลตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์ของสารตัวเติม อีกทั้งคุณสมบัติสารตัวเติมที่เป็นของแข็งจึงเป็นผลต่อการรับแรงในแนวตั้งลดลงแต่อย่างไรก็ตามลักษณะของสารตัวเติมดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณการเติมที่เพิ่มมากขึ้นของผงถั่วแกลบ เนื่องด้วยการยึดเกาะกันของเนื้อเมทริกซ์และสารตัวเติมพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น [59]

4.9.2 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

จากผลการทดลองและการพยากรณ์ของพอลิคาร์บอนเนตและผงถั่วแกลบพบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณการเติมผงถั่วแกลบที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรง หรือ ความแกร่ง อย่างไรก็ตามเมื่อนำพอลิคาร์บอนเนตผสมผงไฟเบอร์คาร์บอน [54] เปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอนเนตผสมผงถั่วแกลบพบว่าปริมาณการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นได้ว่าจากการเติมสารเสริมแรงวัสดุสังเคราะห์และวัสดุจากธรรมชาติแสดงให้เห็นว่าสารเสริมแรงที่มีขนาดเล็กจะมีความเข้ากันได้กับพอลิคาร์บอนเนตได้

ดีกว่าสารเสริมที่มีขนาดใหญ่ โดยพอลิคาร์บอเนตผสมผงไฟเบอร์คาร์บอนที่สัดส่วนการผสม 7 Phr พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 48 แต่ในทางเดียวกันพอลิคาร์บอเนตผสมผงแก้วกลบที่สัดส่วนการผสม 7 Phr พบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 35.88 จะเห็นได้ว่าการเติมของสารเสริมแรงจากวัสดุสังเคราะห์จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่มากกว่าสารเสริมแรงจากธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามสารเสริมแรงสังเคราะห์ยังคงมีต้นทุนสูงต่างจากสารเสริมแรงจากธรรมชาติสามารถหาได้ง่ายในสิ่งแวดล้อมและเป็นของเสียที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง แสดงดังรูปที่ 4.14

ทั้งนี้พอลิคาร์บอเนตผสมผงไฟเบอร์คาร์บอนและผงแก้วกลบ ที่อนุภาคขนาดเล็กของสารเสริมแรงจะเกิดปฏิกิริยาการยึดเกาะกันระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Mechanical lock) ส่งผลให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิตเพิ่มขึ้นและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นแตกต่างกันเพียงร้อยละ 12.11



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของ VGCF / RHA

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานการศึกษาสมบัติทางกล การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและการวิเคราะห์ผลการทดลองของพอลิคาร์บอเนต 4 ชนิด ผสมผงเถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 17 และ 29 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนการผสม 0, 1, 3, 5 และ 7 Phr เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผสมกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์พอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 พอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบ ปริมาณการเติมของผงเถ้าที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะการยืดตัวของพอลิเมอร์ลดลง และจะแสดงผลให้เห็นได้ชัดกับ PC – C ซึ่งสมบัติพอลิคาร์บอเนตจะมีความแข็งและแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามผงเถ้าแกลบจะไม่ส่งผลต่อ PC – D เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตชนิดดังกล่าวมีความสามารถในการยืดตัวต่ำและเปราะ

5.1.2 ผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลของพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบของ PC – A และ PC – B เถ้าแกลบขนาด 17 และ 29 ไมโครเมตร ส่งผลให้ค่าความสัมพันธ์ความหนืดเฉือนต่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นและสัดส่วนการผสมของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดเฉือนแปรผันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้าม PC – C ปริมาณการเติมผงเถ้าแกลบที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ ค่าความหนืดเฉือนลดลง อีกทั้งยังพบว่าผงเถ้าแกลบขนาด 17 ไมโครเมตร จะส่งผลให้พฤติกรรมการไหลตัวได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามตาม PC – D การเติมผงเถ้าแกลบในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อค่าความสัมพันธ์ความหนืดเฉือนต่ออัตราเฉือน ทั้งนี้การไหลตัวเมทริกซ์พอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารเสริมแรง

5.1.3 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต PC – A, PC – B และ PC – C ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเติมจะมีลักษณะการดึงยึดของเนื้อพอลิเมอร์ ตรงกันข้ามกับ PC – D การแตกหักของพอลิเมอร์ ชนิดนี้แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชิ้นงานได้เป็นอย่างดีสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นและความเครียดข้างต้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเติมผงเถ้าแกลบลักษณะของพื้นผิวของพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบนั้นมากขึ้น การเติมผงเถ้าแกลบจะส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าว เนื่องจากสารเสริมแรงที่มีคุณสมบัติเป็นของแข็งยึดเกาะเมทริกซ์พอลิเมอร์เหนียวแน่นทำให้อรอยฉีกขาดดังกล่าวมีรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของพอลิ

เมอร์จะเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบ แต่อย่างไรก็ตามผงเถ้าแกลบจะกระจายตัวได้ดีใน PC – C และ PC – D ซึ่งพื้นผิวของพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิดจะมีความขรุขระเมื่อเติมสารตัวเติม

5.1.4 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเติมผงเถ้าแกลบ พบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะลดต่ำลงเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ขนาดของผงเถ้าแกลบจะมีผลต่อค่าความแข็งอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความแข็งที่เพิ่มมากขึ้นจะแปรผันตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามระยะการยืดตัวและค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผงเถ้าแกลบที่กระจายตัวในเมทริกซ์พอลิเมอร์เกิดการจับตัวกันอย่างเหนียวแน่น ทำให้คุณสมบัติทางกลของพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อีกทั้งผลการวิเคราะห์การพยากรณ์ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นพบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิคาร์บอนเนตมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองสมบัติทางกลเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมของผงเถ้าแกลบที่เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

5.1.5 ผลการจำลองการขึ้นรูปพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป พบว่าสามารถขึ้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงานผลิตภัณฑ์การศึกษาได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบชิ้นงานขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดพลาสติกและการจำลองการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าผลต่างของน้ำหนักแตกต่างกันเพียงร้อยละ 29.05 อีกทั้งยังพบว่าผลต่างของความคลาดเคลื่อนการยุบตัวชิ้นงานร้อยละ 2.59 ทั้งนี้ชิ้นงานพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบสามารถฉีดขึ้นรูปพลาสติกได้อย่างสมบูรณ์

5.1.6 ผลการเปรียบเทียบสารตัวเติมระหว่างผงเถ้าแกลบและผงไฟเบอร์คาร์บอนพบว่าการสารตัวเติมทั้งสองชนิดส่งผลให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ลช โดยพอลิคาร์บอนเนตผสมผงไฟเบอร์คาร์บอนพบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 48 แต่ในทางเดียวกันพอลิคาร์บอนเนตผสมผงเถ้าแกลบพบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 35.88 เมื่อนำผงเถ้าแกลบเปรียบเทียบการผงไฟเบอร์คาร์บอนพบว่าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมในพอลิคาร์บอนเนตแตกต่างกันร้อยละ 12.11

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาขนาดของผงเถ้าแกลบขนาดนาโนคอมโพสิตเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบขนาดที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

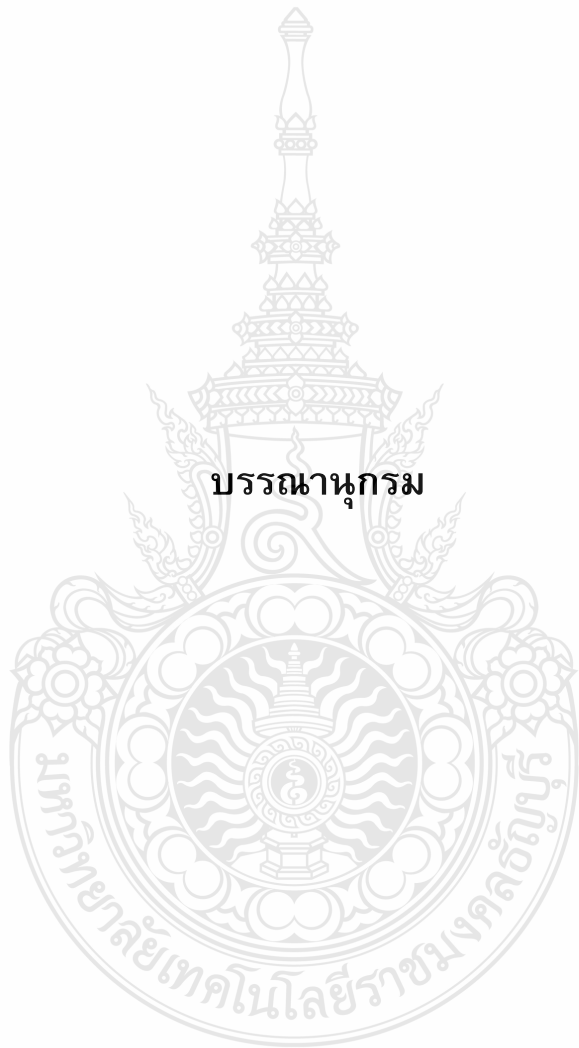
5.2.2 ควรศึกษาพอลิเมอร์ในกลุ่มพลาสติกวิศวกรรม ผสมกับผงเถ้าแกลบเพื่อศึกษาคุณสมบัติและเปรียบเทียบความแตกต่างของพอลิเมอร์

5.2.3 ควรศึกษาสารเสริมสภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตตอบสนองต่อความต้องการการใช้งาน และประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2.4 ควรศึกษาวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์และสามารถประยุกต์ใช้งานในงานวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] Nokapat Sipoma พอลิเมอร์ (Polymer) (Online) Avaline : [https:// www.vcharkarn.com](https://www.vcharkarn.com) (16 ตุลาคม 2560)
- [2] Uniontoy Co. พลาสติก (Plastic) (Online) Avaline : [https:// http://www.uniontoy.com](https://http://www.uniontoy.com) (11 ตุลาคม 2560)
- [3] Pongsak dektong พลาสติก (Plastic) (Online). Avaline : [https:// http://sv mold.com](https://http://sv mold.com) (11 ตุลาคม 2560)
- [4] Ruengrat plastic พลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting) (Online). Avaline : [https:// www.ruengrat.com](https://www.ruengrat.com) (17 ตุลาคม 2560)
- [5] บริษัท Bio – Plast จำกัด พลาสติกกลุ่มเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) (Online). Avaline : <http://library.dip.go.th> (17 ตุลาคม 2560)
- [6] Wikipedia พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonates : PC) [Online]. Avaline : <https://en.wikipedia.org> (29 กันยายน 2560)
- [7] หลุทกัถ กัรตเสว , ฉัทรชัย วัระนัตถกุล และ อภัรตน์ เลาห้บุตรึ ภาพรวมของวัสดุเซงประกอบ (An Overview of Composite Materials) ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 พศจกัายน2552 - มกราคม 2553
- [8] Carbon Fanpage คาร์บอน (Carbon) (Online). Avaline : https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=179506502387162&id=115951159502220 (18 กันยายน 2560)
- [9] ใ้้าแกลบ (rice husk ash) (Online). Avaline : <http://raungrut.tunjai.com> (18 กันยายน 2560)
- [10] มนัส ศรีสวัสดิ์ การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เหลื่อใ้จากกระบวนการหล่อฉัต ปริญญานัพนธ์วศวรรษศาสตรบัณชัต สาขาวิชาวศวรรษการผลัต ภาควชัวศวรรษมอูตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2553.
- [11] อีรพงษ์ แสงสัทธิ์ โครงสร้างของพอลิเมอร์ (Online) Available : [http://nakhamwit .ac.th](http://nakhamwit.ac.th) (2 มิถุนายน 2558)
- [12] วรทัตย์ นันตะนะ สมบัตถทางกลและความต้านทานต่อการสักรอของพอลิเมอร์ผสมพอ-อีเทอร์คัโตน/พอลิเตตระฟลูออโรเอทลีน วชัยานัพนธ์วศวรรษศาสตรบัณชัต สาขาวิชาเทคโนโลยี-วัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2556

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] จักราวุธ วงศ์ศักดิ์ การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2557
- [14] อธิธิพล แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพมหานคร, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [15] สุรศักดิ์ มะธิตปะนะนำ การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2556
- [16] วรวัฒน์ สุธรรมน้อย สมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิโอเลฟินส์และถ่านไม้ไฟ วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2550
- [17] M. M. Schwartz . Composite Materials. Vol 1. New Jersey : Prentice Hall PTR. 1996.
- [18] ประทุมมา สุโสะ สมบัติเชิงกลของพลาสติกผสม 3 ชนิดระหว่าง HDPE LDPE และ PP คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธัญบุรี 2554
- [19] จักริน พรหมจรัสสุข การออกแบบวัตถุดิบและการผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมซีลียไมล์และ พีวีซีในกระบวนการอัดรีด คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 2546
- [20] กระบวนการ Injection Moulding (Online) Avaline : <http://www.hbec-thailand.com> (สืบค้นเมื่อ 19 ธันวาคม 2560)
- [21] พิชัย จริยธรรมนุกูล แนวทางการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดยใช้เทคโนโลยี CAD/CAE/CAM.การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม หน้า 374-379 2551
- [22] รศ.วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม งานฉีดพลาสติก จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน) 2553
- [23] ปราโมทย์ เตชะอำไพ ไฟไฟนด์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2555

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [24] นิลุบล เพื่อกบัวขาว สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2550
- [25] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (มจร.) มปป. “Polymer Characterization and Analysis.” คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (Online) Available : <http://archive.lib.cmu.ac.th> > full (25 พฤศจิกายน 2558)
- [26] อรรถพล ตะระะ คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ (Properties and Testing of Materials) สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง 2551
- [27] ดนัย กิจชัยนุกูล. 2555. เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ScanningElectron Microscope, SEM (Online) Available : <http://www.rmutp-hysics.com> (25 พฤศจิกายน 2558)
- [28] Minitab การวิเคราะห์ทางสถิติ “Minitab 17” แสดงลักษณะหน้าต่างโปรแกรม Minitab [Online]. Available : <http://www.thailandindustry.com> (25 พฤศจิกายน 2558)
- [29] จักรวราช วงศ์ศักดิ์ การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2557
- [30] อาสลิล ทิพย์ไกรสร และ วิภู ศรีสืบสาย การทดลองศึกษาอัตราการไหลของพลาสติก พอลิคาร์บอเนต / Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 51 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2556
- [31] วิฑูร วิมลทรง การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงซีเลื่อยไม้กับพอลิคาร์บอเนต วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร 2554
- [32] เฉลิมชัย ไชยธงรัตน์ และคณะ การศึกษาผลกระทบของความร้อนและเวลาต่อคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น 2555
- [33] นพวรรณ ไม้ทอง การศึกษาผลของการผสมและกระบวนการขึ้นรูปต่อความเหนียวของพอลิคาร์บอเนตผสมสารผลึกเหลวโมเลกุลต่ำ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [34] สุกัลลักษณ์ คุณประเสริฐ การศึกษาผลการผสมผลึกเหลวพอลิคาร์บอเนตโดยใช้เครื่องมือชนิดต่างๆ ในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545
- [35] อรุมา เจริญสุข การประเมินผลเทคนิคการผสมสำหรับพอลิคาร์บอเนตเสริมแรงด้วยเส้นใย วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2548
- [36] S. Tanoue et.al. Effect of Screw Rotation Speed on the Properties of Polycarbonate / Vapor – Groen Carbon Fiber Composites Prepared by Melt Compounding International Polymer Processing, February 20, 2016
- [37] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการนำความร้อนการหลอมรวมของพอลิคาร์บอเนตและผงไฟเบอร์คาร์บอน Graduate School of Engineering, University of Fukui 2555
- [38] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร และคณะ กระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 2554
- [39] เจษฎา มังกะโรทัย และ ชีรพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์ ศึกษาผลกระทบของการเติมผงถ่านจากซังข้าวโพดในเส้นใยพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกล การประชุมวิชาการช่างงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. 2554. 20-21 ตุลาคม 2554
- [40] Yingjie Xu, Huan Lu, Tenglong Gao and Weihong Zhang Predicting the low-velocity impact behavior of polycarbonate: Influence of thermal history during injection molding International Journal of Impact Engineering Volume 86, Pages 265-273, December 2015
- [41] Zvi Rosenberg and Roman Kositsk Deep indentation and terminal ballistics of polycarbonate International Journal of Impact Engineering Volume 103, Pages 225-230, May 2017

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [42] Young-Kuk Choi, Koh-ichi Sugimoto, Sung-Moo Song and Morinobu Endo Production and characterization of polycarbonate composite sheets reinforced with vapor grown carbon fiber Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Volume 37, Issue 11, Pages 1944-1951, November 2006
- [43] J.P. Torres and P.M. Frontini Mechanics of polycarbonate in biaxial impact loading International Journal of Solids and Structures Volumes 85–86, Pages 125-133, 15 May 2016
- [44] Juan De Vicente Rheology Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia 2012
- [45] สุรัตน์ วรรณศรี และคณะ ลักษณะของการทดสอบความแข็ง สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ-วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2557
- [46] Bernard E. Obi PHD “Characterization of Polymeric Solids” Polymeric Foams Structure – Property – Performance, Pages 41 – 82, 2018
- [47] จิตติพร เครือเนตร กลศาสตร์ของไหลชนิดนอนนิวโทเนียน Polymer Science (MTEC, มกราคม - มีนาคม 2546)
- [48] Shubhalakshmi Sengupta et. al. “Furfuryl palmitate coated fly ash used as filler in recycled polypropylene matrix composite” Composites Part B, 2011
- [49] G. Davies et. al. Impact, post-impact strength and post-impact fatigue behavior of polymer composite Polymer Composite in the Aerospace Industry, Pages 231-259, 2015
- [50] G. Riesgo et. al. Influence of the remnant magnetization, size distribution and content of soft magnetic reinforcement in micro-mechanical behavior of polymer matrix composites Polymer Testing, Volume 79, 106020, October 2019
- [51] S.Th. Georgopoulos et al. Thermoplastic polymer reinforced with fibrous agricultural residues Polymer Degradation and Stability 90, 303 – 312, 2005
- [52] Sirui Fu et al. Mechanical properties of polypropylene composite reinforced by hydrolyzed and micro fibrillated Kevlar fiber Composites Science and Technology 163, 141 – 150, 2018

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [53] Prashant Jindal et al. Mechanical characterization of multiwalled carbon nanotubes-polycarbonate composites Materials and Design 54, 864 – 868, 2015
- [54] Nithikarnjanatharn jitiwat et. al. Properties of Poly (Carbonate) / Vapor – Grown Carbon Fiber Composite Prepared by Melt compounding Jurnal of Textile Engineering, Vol.57, No.4,97 – 106, 2011
- [55] Tony Markovich Bare Carbon Fiber Supercars (Online). Avaline : <https://www.motor1.com/news/75831/10-eye-popping-bare-carbon-fiber-supercars>
3 กันยายน 2561
- [56] Asta Partanen and Michael Carus Wood and natural fiber composites current trend in consumer goods and automotive parts Reinforced plastics, Volume 00, Number 00, February 2016
- [57] T.S. Chow Prediction of stress – strain relationships in polymer composite Polymer Volume 32, Issue 1, Pages 29-33, 1991
- [58] Irek I. Mukhamatdinov et. al. A new approach for measuring rheology of polymer solutions in reservoir conditions Journal of petroleum Science and Engineering 181, 106160, 2019
- [59] Ali Behnood et. al. “Morphology, Rheology and Physical Properties of Polymer-Modified Asphalt Binders”

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต

Makrolon® 2605

General purpose grades / Medium viscosity

MVR (300 °C/1.2 kg) 12 cm³/10 min; general purpose; medium viscosity; easy release; injection molding - melt temperature 280 - 320 °C; available in transparent, translucent and opaque colors

ISO Shortname

ISO 7391-PC,MR,(...)-18-9

Property	Test Condition	Unit	Standard	typical Value
Rheological properties				
C Melt volume-flow rate	300 °C; 1.2 kg	cm ³ /10 min	ISO 1133	12
C Molding shrinkage, parallel	60x60x2 mm; 500 bar	%	ISO 294-4	0.7
C Molding shrinkage, normal	60x60x2 mm; 500 bar	%	ISO 294-4	0.75
Molding shrinkage, parallel/normal	Value range based on general practical experience	%	b.o. ISO 2577	0.6 - 0.8
C Melt mass-flow rate	300 °C; 1.2 kg	g/10 min	ISO 1133	13
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2400
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	66
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	6.1
C Nominal strain at break	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	> 50
Stress at break	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	70
Strain at break	50 mm/min	%	b.o. ISO 527-1,-2	120
C Tensile creep modulus	1 h	MPa	ISO 899-1	2200
C Tensile creep modulus	1000 h	MPa	ISO 899-1	1900
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2400
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	97
Flexural strain at flexural strength	2 mm/min	%	ISO 178	7.1
Flexural stress at 3.5 % strain	2 mm/min	MPa	ISO 178	73
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
Charpy impact strength	-60 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
Charpy notched impact strength	23 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA	70P
Charpy notched impact strength	-30 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA	16C
Izod notched impact strength	23 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 180-A	70P
Izod notched impact strength	-30 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 180-A	15C
C Puncture maximum force	23 °C	N	ISO 6603-2	5400
C Puncture maximum force	-30 °C	N	ISO 6603-2	6300
C Puncture energy	23 °C	J	ISO 6603-2	60
C Puncture energy	-30 °C	J	ISO 6603-2	65
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	115

Makrolon® 2405

General purpose grades / Low viscosity

MVR (300 °C/1.2 kg) 19 cm³/10 min; general purpose; low viscosity; easy release; injection molding - melt temperature 280 - 320 °C; available in transparent, translucent and opaque colors

ISO Shortname

ISO 7391-PC,MR,(,)-18-9

Property	Test Condition	Unit	Standard	typical Value
Rheological properties				
C Melt volume-flow rate	300 °C; 1.2 kg	cm ³ /10 min	ISO 1133	19
C Molding shrinkage, parallel	60x60x2 mm; 500 bar	%	ISO 294-4	0.65
C Molding shrinkage, normal	60x60x2 mm; 500 bar	%	ISO 294-4	0.7
Molding shrinkage, parallel/normal	Value range based on general practical experience	%	b.o. ISO 2577	0.5 - 0.7
C Melt mass-flow rate	300 °C; 1.2 kg	g/10 min	ISO 1133	20
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2400
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	65
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	6.0
C Nominal strain at break	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	> 50
Stress at break	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	65
Strain at break	50 mm/min	%	b.o. ISO 527-1,-2	125
C Tensile creep modulus	1 h	MPa	ISO 899-1	2200
C Tensile creep modulus	1000 h	MPa	ISO 899-1	1900
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2350
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	97
Flexural strain at flexural strength	2 mm/min	%	ISO 178	7.1
Flexural stress at 3.5 % strain	2 mm/min	MPa	ISO 178	73
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
Charpy impact strength	-60 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
Charpy notched impact strength	23 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA	65P
Charpy notched impact strength	-30 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA	14C
Izod notched impact strength	23 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 180-A	65P
Izod notched impact strength	-30 °C; 3 mm	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 180-A	15C
C Puncture maximum force	23 °C	N	ISO 6603-2	5100
C Puncture maximum force	-30 °C	N	ISO 6603-2	6000
C Puncture energy	23 °C	J	ISO 6603-2	55
C Puncture energy	-30 °C	J	ISO 6603-2	65
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	115

Grade				H-4000	H-3000	H-2000
Properties	Test Method	Terms	Units	Optical Disk	High Flowability	High Flowability
Physical properties						
Density	ISO 1183	-	g/cm ³	1.20	1.20	1.20
Water absorption	-	23degC, 50%RH	%	-	-	-
		23degC, Underwater		0.24	0.24	0.24
Rheological properties						
Melt Mass-flow Rate Melt Volume-flow Rate	ISO 1133	-	g/10min	63	30	22
		-	cm ³ /10min	60	28	20
		Temperature	degC	300	300	300
		Load	kgf	1.20	1.20	1.20
Moulding shrinkage (3.2mm)	-	MD	%	0.4 - 0.6	0.5 - 0.7	0.5 - 0.7
		TD		0.4 - 0.6	0.5 - 0.7	0.5 - 0.7
Mechanical properties						
Tensile modulus	ISO 527-1 ,527-2	-	MPa	2400	2400	2400
Yield stress			63	62	62	
Yield strain			%	6.5	6.6	6.6
Nominal strain at break			76	118	118	
Stress at 50% strain			MPa	-	-	-
Strain at break			%	-	-	-
Flexural strength	ISO 178	-	MPa	94	93	93
Flexural modulus			2300	2300	2300	
Charpy impact strength	ISO 179-1 , 179-2	23 degC	kJ/m ²	NB	NB	NB
Charpy notched impact strength		23 degC		7	50	60
Thermal properties						
Temperature of deflection under load	ISO 75-1 ,75-2	1.80MPa	degC	123	123	124
		0.45MPa		136	136	138
Coefficient of Linear thermal expansion	ISO 11359-2	MD	1/degC	6.5E-05	6.5E-05	6.5E-05
		TD		6.6E-05	6.6E-05	6.6E-05
Flammability	UL94	-	-	-	-	-
Electrical properties						
Relative permittivity	IEC 60250	100Hz	-	3.1	3.1	3.1
		1MHz		3.1	3.1	3.1
Dissipation factor	IEC 60250	100Hz	-	0.0006	0.0006	0.0006
		1MHz		0.0090	0.0090	0.0090
Volume resistivity	IEC60093	-	ohm.m	3E+14	3E+14	3E+14
Surface resistivity	IEC60093	-	ohm	6E+15	6E+15	6E+15
Electric strength	IEC 60243-1	1mm	MV/m	31	31	31
		2mm		-	-	-
		3mm		18	18	18
Comparative tracking index (CTI)	UL746A	-	-	2	2	2
					H-3000V(R) (V-2) H-3000R (Mold Release) H-3000U(R) (UV Stabilized)	H-2000V(R) (V-2) H-2000R (Mold Release) H-2000U(R) (UV Stabilized)

ภาคผนวก ข

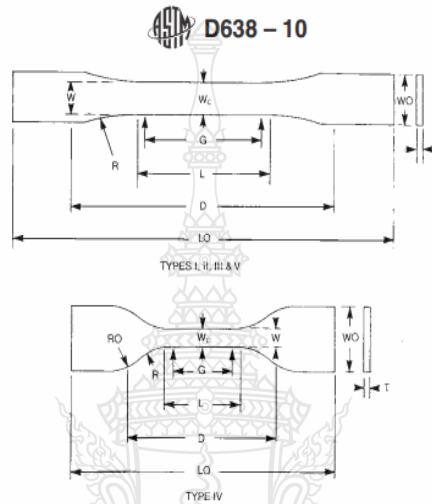
พิกัดความถี่ชิ้นงานตามมาตรฐานชั้นทดสอบ





Designation: D638 – 10

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
W_O —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
W_O —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
L_O —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
R_O —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

^A Thickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 in.) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T , may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm (0.55 ± 0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.

^B For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D412.

^C The Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

- $W = 3.18 \pm 0.03$ mm (0.125 ± 0.001 in.),
- $L = 9.53 \pm 0.08$ mm (0.375 ± 0.003 in.),
- $G = 7.62 \pm 0.02$ mm (0.300 ± 0.001 in.), and
- $R = 12.7 \pm 0.08$ mm (0.500 ± 0.003 in.).

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
		500 (20) ± 10 %	10
Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

^A Select the lowest speed that produces rupture in ½ to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^B See Terminology D883 for definitions.

^C The initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

TABLE 2 Modulus, 10⁶ psi, for Eight Laboratories, Five Materials

	Mean	S _r	S _R	I _r	I _R
Polypropylene	0.210	0.0089	0.071	0.025	0.201
Cellulose acetate butyrate	0.246	0.0179	0.035	0.051	0.144
Acrylic	0.481	0.0179	0.063	0.051	0.144
Glass-reinforced nylon	1.17	0.0537	0.217	0.152	0.614
Glass-reinforced polyester	1.39	0.0894	0.266	0.253	0.753

TABLE 3 Tensile Strength at Break, 10³ psi, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Polypropylene	2.97	1.54	1.65	4.37	4.66
Cellulose acetate butyrate	4.82	0.058	0.180	0.164	0.509
Acrylic	9.09	0.452	0.751	1.27	2.13
Glass-reinforced polyester	20.8	0.233	0.437	0.659	1.24
Glass-reinforced nylon	23.6	0.277	0.698	0.784	1.98

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 4 Elongation at Break, %, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Glass-reinforced polyester	3.68	0.20	2.33	0.570	6.59
Glass-reinforced nylon	3.87	0.10	2.13	0.283	6.03
Acrylic	13.2	2.05	3.65	5.80	10.3
Cellulose acetate butyrate	14.1	1.87	6.62	5.29	18.7
Polypropylene	293.0	50.9	119.0	144.0	337.0

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical



Designation: D1238 – 10

**Standard Test Method for
Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion
Plastometer¹**

TABLE 1 Maximum Allowable Variation in Temperature with Distance and Time Throughout the Test

Test temperature set point T °C	Temperature tolerance, °C	
	At 75 ± 1 mm above the die surface (°C) ^A	At 10 ± 1 mm above the die surface (°C) ^A
125 ≤ T < 250	±2.0	±0.2
250 ≤ T < 300	±2.5	±0.5
300 ≤ T	±3.0	±1.0

^AWhen using the "half" die, the temperature indicating device shall be calibrated as stated in this table except temperatures are measured at nominal 79 ± 1 mm and 14 mm ± 1mm above the upper surface of the die.



Material	Temperatures	Weights
Acetals (copolymer and homopolymer)	190	1.05 / 2.16
Acrylics	230	1.2 / 3.8
Acrylonitrile-butadienestyrene	200	5.0
	220	10
	230	3.8
Acrylonitrile/butadiene/styrene/polycarbonate blends	230	3.8
	250	1.2
	265	3.8 / 5.0
Cellulose esters	190	0.325 / 2.16 / 21.6
	210	2.16
Ethylenechlorotrifluoroethylene copolymer	271.5	2.16 / 5.0
Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer	297	5.0
Nylon	235	1.0 / 2.16 / 5.0
	275	0.325 / 5.0
Perfluoro(ethylenepropylene) copolymer	372	2.16
Perfluoroalkoxyalkane	372	5.0
Polycaprolactone	80	2.16
	125	2.16
Polychlorotrifluoroethylene	265	12.5
Polyetheretherketone (PEEK)	360	10
	380	2.16
	400	2.16
Polyether sulfone (PES)	343	2.16
Polyethylene	125	0.325 / 2.16
	190	0.325 / 2.16 / 5 / 10 / 21.6
	250	1.2
	310	12.5
Polycarbonate	300	1.2
Polymonochlorotrifluoroethylene	265	21.6 / 31.6
Polypropylene	230	2.16
Polyphenyl sulfone (PPSU)	365	5.0
	380	2.16
Polystyrene	190	5.0
	200	5.0
	230	1.2 / 3.8
Polysulfone (PSU)	343	2.16
	360	10
Polyterephthalate	210	2.16
	250	2.16
	265	2.16
Poly(vinyl acetal)	190	21.6
Polyvinyl chloride (PVC), rigid compound	190	21.6
Poly(vinylidene fluoride)	230	5.0 / 21.6
Poly(phenylene sulfide)	315	5.0
Styrene acrylonitrile	220	10
	230	3.8 / 10
Styrenic Thermoplastic Elastomer	190	2.16
	200	5.0
Thermoplastic Elastomer-Ether-Ester	190	2.16
	220	2.16
	230	2.16
	240	2.16
	250	2.16
Thermoplastic elastomers (TEO)	230	2.16
Vinylidene fluoride copolymers	120*	5.0 / 21.6*
*For Tm = 100°C	230	2.16 / 5.0

TABLE 3 Standard Test Conditions, Sample Mass,^A and Testing Time^B

Flow Range, g/10 min	Suggested Mass of Sample in Cylinder, g	Time Interval, min	Factor for Obtaining Flow Rate in g/10 min
0.15 to 1.0	2.5 to 3.0	6.00	1.67
>1.0 to 3.5	3.0 to 5.0	3.00	3.33
>3.5 to 10	4.0 to 8.0	1.00	10.00
>10 to 25	4.0 to 8.0	0.50	20.00
>25	4.0 to 8.0	0.25	40.00

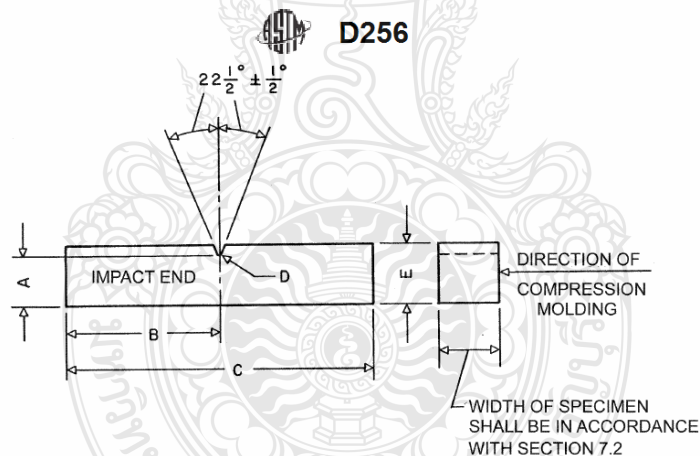
TABLE 4 Factors for Calculation of Flow Rate

Material (Unpigmented)	Temperature, °C	Piston Travel, L, cm (in.)	Factor for Calculation of Flow Rate, F ^A
Polyethylene	190	2.54 (1)	826
Polyethylene	190	0.635 (0.25)	207
Polypropylene	230	2.54 (1)	799
Polypropylene	230	0.635 (0.25)	200



Designation: D256 – 10

Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics¹



Dimensions	Tolerances
A	10.16 ± 0.05 mm.
B	31.8 ± 1.0 mm.
C	63.5 ± 2.0 mm.
D	0.25R ± 0.05 mm.
E	12.70 ± 0.20 mm.

7.2 Molded specimens shall have a width between 3.0 and 12.7 mm (0.118 and 0.500 in.). Use the specimen width as specified in the material specification or as agreed upon

between the supplier and the customer. All specimens having one dimension less than 12.7 mm (0.500 in.) shall have the notch cut on the shorter side. Otherwise, all compression-molded specimens shall be notched on the side parallel to the direction of application of molding pressure. (See Fig. 6.)

 D256 – 10

TABLE 1 Precision Data, Test Method A—Notched Izod

NOTE 1—Values in ft-lbf/in. of width (J/m of width).

NOTE 2—See Footnote 10.

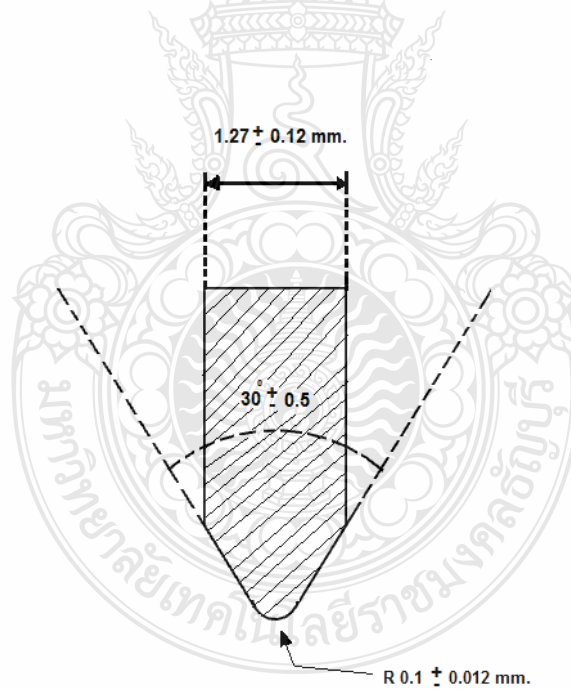
Material	Average	S_r^A	S_R^B	I_r^C	I_R^D	Number of Laboratories
Phenolic	0.57 (30.4)	0.024 (1.3)	0.076 (4.1)	0.06 (3.2)	0.21 (11.2)	19
Acetal	1.45 (77.4)	0.075 (4.0)	0.604 (32.3)	0.21 (11.2)	1.70 (90.8)	9
Reinforced nylon	1.98 (105.7)	0.083 (4.4)	0.245 (13.1)	0.23 (12.3)	0.69 (36.8)	15
Polypropylene	2.66 (142.0)	0.154 (8.2)	0.573 (30.6)	0.43 (23.0)	1.62 (86.5)	24
ABS	10.80 (576.7)	0.136 (7.3)	0.585 (31.2)	0.38 (20.3)	1.65 (88.1)	25
Polycarbonate	16.40 (875.8)	0.295 (15.8)	1.056 (56.4)	0.83 (44.3)	2.98 (159.1)	25

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.

^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.

^C I_r = 2.83 S_r

^D I_R = 2.83 S_R



มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรง Shore durometer ประเภท Shore D



ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบสมรรถนะทางกล

ตารางภาคผนวกที่ ค.1 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิคาร์บอเนต 4 ชนิดผสมผงเถ้า
 แกลบขนาดเฉลี่ย 17 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	59.66 ± 0.25	59.39 ± 0.44	59.65 ± 0.64	54.34 ± 7.48	58.02 ± 1.32
PC – B	60.92 ± 0.12	59.49 ± 0.20	58.74 ± 0.23	53.58 ± 0.25	36.27 ± 0.28
PC – C	58.648 ± 0.31	41.88 ± 12.38	34.65 ± 12.14	34.59 ± 7.47	22.96 ± 2.75
PC – D	16.29 ± 2.63	24.35 ± 2.84	14.43 ± 5.29	12.97 ± 2.77	9.53 ± 3.80

ตารางภาคผนวกที่ ค.2 ผลการทดลองค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิคาร์บอเนตเกรด 4 ชนิดผสมผง
 เถ้าแกลบขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	59.66 ± 0.25	59.176 ± 0.35	59.16 ± 0.76	58.02 ± 0.82	37.62 ± 9.92
PC – B	60.92 ± 0.12	59.56 ± 0.42	59.23 ± 0.54	57.25 ± 1.35	51.72 ± 4.97
PC – C	58.648 ± 0.31	57.86 ± 0.83	56.10 ± 0.96	38.04 ± 6.10	22.22 ± 1.56
PC – D	16.29 ± 2.63	29.61 ± 2.96	24.38 ± 8.31	17.93 ± 3.14	16.02 ± 2.41

ตารางภาคผนวกที่ ค.3 ผลการทดลองค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้าแกลบขนาด
 เฉลี่ย 17 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	1491.2 ± 27.53	1571.1 ± 52.86	1661.31 ± 28.48	1719.23 ± 19.08	1617.62 ± 74.08
PC – B	1530.95 ± 21.44	1557.65 ± 85	1606.87 ± 60.02	1755.95 ± 70.16	1787.20 ± 44.39
PC – C	1533.7 ± 50.7	1751.15 ± 219.58	1863.99 ± 243.23	1946.79 ± 122.21	2084.13 ± 214.03
PC – D	1654.05 ± 703.05	1857.87 ± 142.2	2092.43 ± 416.7	2172.79 ± 236.01	2798.11 ± 407.05

ตารางภาคผนวกที่ ค.4 ผลการทดลองค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้ากลบขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้ากลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	1491.2 ± 27.53	1490.28 ± 53.64	1622.58 ± 52.72	1717.61 ± 42.84	2057 ± 276.04
PC – B	1530.95 ± 21.44	1587.06 ± 46.11	1622.54 ± 33.06	1649.89 ± 64.39	1718.32 ± 49.55
PC – C	1533.7 ± 50.7	1643.8 ± 16.97	1681.38 ± 33.07	1784.64 ± 102.79	1895.84 ± 98.35
PC – D	1654.05 ± 703.05	1708.44 ± 110.89	2037.3 ± 407.55	2267.38 ± 451.68	2400.78 ± 428.46

ตารางภาคผนวกที่ ค.5 ผลการทดลองค่าระยะการยืดตัวพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้ากลบขนาดเฉลี่ย 17 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้ากลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	96.85 ± 7.41	78.16 ± 6.62	75.28 ± 8.39	26.13 ± 18.57	24.09 ± 3.67
PC – B	53.82 ± 18.6	80.08 ± 16.96	31.12 ± 21.15	11.36 ± 4.98	2.04 ± 0.46
PC – C	49.16 ± 22.91	22.68 ± 9.88	4.76 ± 6.11	2.15 ± 0.9	1.2 ± 0.15
PC – D	1.93 ± 1.91	1.4 ± 0.25	0.77 ± 0.3	0.68 ± 0.17	0.62 ± 0.03

ตารางภาคผนวกที่ ค.6 ผลการทดลองค่าระยะการยืดตัวพอลิคาร์บอเนตผสมผงเถ้ากลบขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้ากลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	96.85 ± 7.41	76.27 ± 24.74	49.07 ± 15.68	25.58 ± 8.35	2.37 ± 1.17
PC – B	53.82 ± 18.6	80.99 ± 6.22	20.36 ± 3.43	10.32 ± 3.15	5.17 ± 2.67
PC – C	49.16 ± 22.91	44.35 ± 23.69	13.73 ± 3.85	2.34 ± 0.64	1.15 ± 0.07
PC – D	1.93 ± 1.91	1.53 ± 0.48	1.34 ± 0.45	1.08 ± 0.42	0.94 ± 0.12

ตารางภาคผนวกที่ ค.7 ค่าความแข็งของวัสดุคอมสิตพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแลบขนาดเฉลี่ย 17 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้าแลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	75.65 ± 0.37	77.11 ± 0.1	78.47 ± 0.19	78.68 ± 0.09	79.8 ± 0.29
PC – B	75.47 ± 0.34	76.63 ± 0.14	77.48 ± 0.22	78.51 ± 0.29	79.88 ± 0.22
PC – C	76.8 ± 0.15	77.41 ± 0.03	78.38 ± 0.1	80.48 ± 0.19	81.45 ± 0.18
PC – D	78.11 ± 0.14	80.6 ± 0.3	80.86 ± 0.18	81.9 ± 0.12	82.3 ± 0.13

ตารางภาคผนวกที่ ค.8 ค่าความแข็งของวัสดุคอมสิตพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแลบขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้าแลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	75.65 ± 0.37	77.68 ± 0.18	79.08 ± 0.24	79.47 ± 0.18	80.3 ± 0.24
PC – B	75.47 ± 0.34	77.62 ± 0.03	78.42 ± 0.16	79.16 ± 0.12	79.83 ± 0.15
PC – C	76.8 ± 0.15	77.86 ± 0.07	78.75 ± 0.1	81.85 ± 0.08	83.32 ± 0.28
PC – D	78.11 ± 0.14	81.27 ± 0.22	82.21 ± 0.06	82.58 ± 0.06	83.13 ± 0.07

ตารางภาคผนวกที่ ค.9 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมสิตพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแลบขนาดเฉลี่ย 17 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้าแลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	70.56 ± 1.05	52.4 ± 1.39	17.94 ± 1.09	13.91 ± 1.53	11.48 ± 0.41
PC – B	70.77 ± 0.87	52.09 ± 1.15	18.05 ± 0.54	14.43 ± 1.08	11.82 ± 1.64
PC – C	70.8 ± 0.31	50.68 ± 0.52	13.1 ± 0.57	13.04 ± 0.72	13.03 ± 0.88
PC – D	68.72 ± 0.38	29.68 ± 1.34	10.54 ± 0.72	5.27 ± 0.78	5.06 ± 0.54

ตารางภาคผนวกที่ ค.10 ค่าความต้านทานแรงกระทำของวัสดุคอมสิตพอลิคาร์บอเนตและผงเถ้าแกลบ
ขนาดเฉลี่ย 29 ไมโครเมตร

PC-Type	ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ (Phr)				
	0	1	3	5	7
	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD	Avg ± SD
PC – A	70.56 ± 1.05	52.6 ± 11.07	20.5 ± 0.41	15.83 ± 1.04	11.3 ± 0.58
PC – B	70.77 ± 0.87	52.84 ± 2.59	18.61 ± 1.96	13.6 ± 0.34	11 ± 1.22
PC – C	70.8 ± 0.31	49.28 ± 0.54	12.75 ± 0.37	12.54 ± 0.27	12.24 ± 0.35
PC – D	68.72 ± 0.38	26.06 ± 1.32	10.87 ± 0.33	6.88 ± 1.66	5.28 ± 0.91





ภาคผนวก ง

ตารางการวิเคราะห์ปัจจัยทางสถิติ

ตารางภาคผนวก ง.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของพอลิคาร์บอเนต PC – A

Full factorial design (PC - A)	
Tensile Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000
Young's Modulus	P-Value
● RHA (Size)	0.045
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000
Elongation at break	P-Value
● RHA (Size)	0.013
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.090
Impact Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.005
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000
Hardness	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.038

ตารางภาคผนวก ง.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนของพอลิคาร์บอเนตเกรด PC – B

Full factorial design (PC – B)	
Tensile Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000
Young's Modulus	P-Value
● RHA (Size)	0.011
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000
Elongation at break	P-Value
● RHA (Size)	0.693
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.822
Impact Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.901
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.635
Hardness	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000

ตารางภาคผนวก ง.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของพอลิคาร์บอเนตเกรด PC – C

Full factorial design (PC – C)	
Tensile Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.002
Young's Modulus	P-Value
● RHA (Size)	0.006
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.643
Elongation at break	P-Value
● RHA (Size)	0.153
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.416
Impact Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.001
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.113
Hardness	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000

ตารางภาคผนวก ง.4 วิเคราะห์ความแปรปรวนของพอลิคาร์บอเนตเกรด PC - D

Full factorial design (PC- D)	
Tensile Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.208
Young's Modulus	P-Value
● RHA (Size)	0.474
● RHA (Mix)	0.001
● RHA (Size) * RHA Mix	0.083
Elongation at break	P-Value
● RHA (Size)	0.323
● RHA (Mix)	0.087
● RHA (Size) * RHA Mix	0.973
Impact Strength	P-Value
● RHA (Size)	0.324
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000
Hardness	P-Value
● RHA (Size)	0.000
● RHA (Mix)	0.000
● RHA (Size) * RHA Mix	0.000

ประวัติผู้จัดทำวิทยานิพนธ์



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายจักรายุทธ มากทอง
วัน เดือนปี เกิด	3 เมษายน 2537
ที่อยู่	886 ถ.สุนทรารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ประสบการณ์การทำงาน	ครูประจำแผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา พ.ศ.2562 - ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	0810665765
อีเมล	Chakkrayut_m@mail.rmutt.ac.th

