

การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

**FEASIBILITY STUDY OF POLYCARBONATE IN
ROTATIONAL MOLDING**

จักรารุช วงศ์ศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

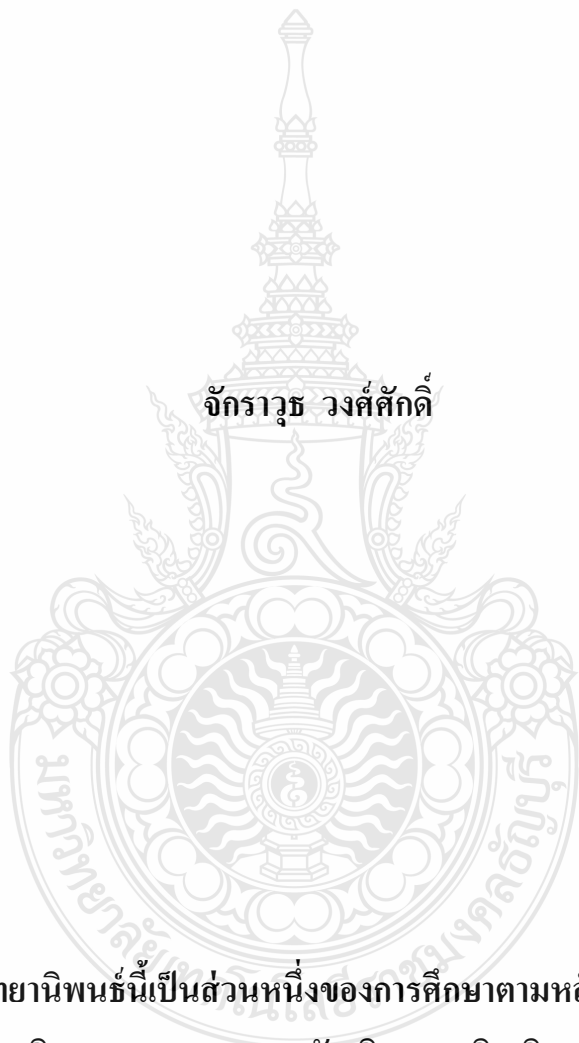
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนต
ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน



จักราวุธ วงศ์ศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

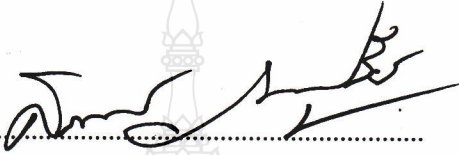

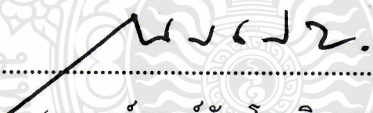
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูป
แบบหมุน
Feasibility Study of Polycarbonate in Rotational Molding
ชื่อ - นามสกุล นายจักรวาล วงศ์ศักดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีช, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พิชรพันธ์, Ph.D.)
อัมพมาช ติขมพณ
..... กรรมการ
(อาจารย์สุนนมาลย์ เนียมกลาง, Ph.D.)

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

วันที่ 12 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน
ชื่อ – นามสกุล	นายจักรวาล วงศ์ศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมพลาสติกนิยมใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กวางขนาดใหญ่ เช่น ถังเก็บน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย ถังน้ำแข็ง เป็นต้น ซึ่งนิยมใช้พอลิเอทิลีนในรูปแบบผงละเอียดเป็นวัตถุดิบหลักส่วนใหญ่ ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อทดลองหาวัสดุใหม่ๆ มาทดลองขึ้นรูปเพื่อเป็นทางเลือกอื่นๆ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติในด้านอื่นๆ เช่น ความใส สมบัติทางกลบางประการที่ดีขึ้น เป็นต้น

จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าวัสดุที่นำมาทดลองใช้นี้สามารถขึ้นรูปแบบหมุนได้ในบางกรณี พอลิคาร์บอเนตชนิดที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ามีแนวโน้มที่ขึ้นรูปได้ง่ายกว่า ในขณะที่การใช้ผงพอลิคาร์บอเนตในขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า $250 \mu\text{m}$ สามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่าพอลิคาร์บอเนตในขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า $250 \mu\text{m}$ แตกต่างจากที่พบในการขึ้นรูปด้วยพอลิเอทิลีน ในขณะที่การกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้พบว่า พอลิเอทิลีนมีการกระจายความหนาของชิ้นงานที่ดีกว่าพอลิคาร์บอเนตในทุกกรณี การใช้พอลิคาร์บอเนตทำให้ผนังชิ้นงานในแต่ละด้านมีความหนาต่างกันมากถึง 2 เท่า สมบัติทางกลบางประการของพอลิคาร์บอเนตเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนพบว่าความแข็งที่ผิวของพอลิคาร์บอเนตนั้นมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีน แต่การทนต่อการเจาะทะลุของชิ้นงานที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า

ซึ่งจากการศึกษานี้ทำให้พบว่า ขนาดและรูปร่างของอนุภาควัสดุที่ใช้ขึ้นรูป น้ำหนักโมเลกุลส่งผลต่อค่าความหนืดล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการขึ้นรูป รอบการหมุนของเครื่องขึ้นรูป ส่งผลต่อการกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้ อีกทั้งระยะเวลาในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่ค่อนข้างนานกว่ากระบวนการขึ้นรูปชนิดอื่นส่งผลให้สมบัติเชิงกลบางประการเปลี่ยนแปลงไปด้วย

คำสำคัญ: การขึ้นรูปแบบหมุน พอลิคาร์บอเนต น้ำหนักโมเลกุล รูปร่างและขนาดของอนุภาค

Thesis Title	Feasibility Study of Polycarbonate in Rotational Molding
Name – Surname	Mr. Jakrawut Wongsak
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Mr. Narongchai O-Charoen, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

In the plastic industry, the rotational molding has been widely used for making the large hollow products such as water tanks, septic tanks, and ice boxes, etc., which used polyethylene powder as raw material in the form a majority. The aims of this research were to examine the alternative materials for the formation of product which requires different specific properties such as higher clarity and better result in some mechanical properties.

The preliminary study found that the materials used in this work can be rotational molded in some cases. Polycarbonate with the higher molecular weight tended to molding more difficult. While the using polycarbonate powder particles size smaller than 250 μm could be molded more difficult than polycarbonates in particle size larger than 250 μm in contrast to that observed in specimens molded from polyethylene. The thickness distribution of polyethylene was better than polycarbonate in all case. Polycarbonate made a difference on the wall thickness distribution more than 2 times on each side when compared with polyethylene. Some mechanical properties of polycarbonate specimens found that the surface hardness of polycarbonates was higher than polyethylene but the resistance to penetration was lower.

It was found that the size and shape of the particles on material formation and molecular weight affect the viscosity. All of these factors were significant within the formation process. Rotation speed affected the wall thickness distribution. The process duration of the rotational molding was longer than the other process as a result in some mechanical changes.

Keywords: rotational molding, polycarbonate, molecular weight, shape and size of particles

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ ประธานกรรมการสอบ ดร. สุนนมาลย์ เนียมกลาง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์ กรรมการสอบที่ช่วยแนะนำแนวทาง พร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆของงานวิจัย อีกทั้งยังสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณบุคลากรและภาควิชาวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยเหลือในกระบวนการขึ้นรูป ขั้นตอนการทดสอบ และแก้ปัญหาทางเทคนิคต่างๆ ขอขอบพระคุณบริษัท Mitsubishi Engineering-Plastics Corp Iupilon ที่สนับสนุนวัสดุดิบในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่น้อง และเพื่อนๆทุกคนรวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และช่วยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้ผ่านพ้นไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและต้องการศึกษาต่อไม่ทางใดก็ทางหนึ่งหากงานวิจัยในครั้งนี้มีข้อบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ทางผู้วิจัยขอกราบขออภัยไว้ในโอกาสนี้ด้วย

จักรารุช วงศ์ศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(14)
บทที่ 1 บทนำ.....	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	15
1.2 วัตถุประสงค์.....	16
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	
2.1 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC).....	18
2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE).....	23
2.3 การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow).....	25
2.4 ความหนาแน่น (Density).....	27
2.5 การหลอมละลายของเม็ดพอลิเมอร์ (Sintering).....	29
2.6 สมบัติการไหล และ น้ำหนักโมเลกุล (Flow Properties and Molecular Weight).....	30
2.7 การขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding).....	36
2.8 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล (Measurement of Molecular Weight).....	53
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	55

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	62
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	63
3.3 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	64
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	65
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	
4.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	79
4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล.....	80
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์.....	81
4.4 การทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index).....	82
4.5 ทดสอบสมบัติการไหลของ พอลิคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับสมบัติการไหล ของ พอลิเอทิลีน (Capillary Rheometer)	83
4.6 ผลจากการแยกขนาด.....	84
4.7 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density).....	85
4.8 การทดสอบการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow).....	86
4.9 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน.....	87
4.10 ผลการทดสอบสมบัติทางกล.....	96
4.11 การทดสอบความแข็งที่ผิวแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test).....	97
4.12 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture Test).....	98
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	
บรรณานุกรม.....	100
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์.....	102
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	133

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งเกรดของพอลิเอทิลีนโดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์.....	23
ตารางที่ 2.2 ตารางตัวอย่างค่า M_c ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	31
ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์ หลอมเหลวและค่าคงที่.....	31
ตารางที่ 2.4 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของพอลิโอลิฟิน.....	36
ตารางที่ 2.5 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ที่ได้จากเทคนิคต่างๆ.....	54
ตารางที่ 2.6 แสดงวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	59
ตารางที่ 2.7 แสดงถึงสมบัติบางประการของ LLDPE แต่ละชนิด.....	61
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ.....	62
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	65
ตารางที่ 3.3 แสดง Rockwell Hardness Scale.....	75
ตารางที่ 3.4 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test).....	77
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์พอลิคาร์บอนเนตและ พอลิเอทิลีน.....	82
ตารางที่ 4.2 แสดงการแยกขนาดอนุภาคของพอลิคาร์บอนเนต.....	84
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของพอลิเมอร์.....	85
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์.....	86
ตารางที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน.....	88
ตารางที่ 4.6 ตารางการกระจายความหนา LLDPE , PCH2000 และ PCH4000.....	94
ตารางที่ 4.7 ตารางการกระจายความหนา LLDPE และ PC H4000.....	95
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความแข็งที่ผิว.....	97

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต.....	19
รูปที่ 2.2	ลักษณะ โครงสร้างทางเคมีในการสังเคราะห์พอลิคาร์บอเนต.....	19
รูปที่ 2.3	แสดงลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน.....	24
รูปที่ 2.4	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของพอลิเมอร์.....	25
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะการหลอมละลายของพอลิเมอร์.....	26
รูปที่ 2.6	แสดงเครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์แบบแห้ง.....	26
รูปที่ 2.7	การเปรียบเทียบความหนาแน่นรวม กับความหนาแน่นเนื้อ.....	27
รูปที่ 2.8	การหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density).....	28
รูปที่ 2.9	ลักษณะของพอลิเมอร์ในชั้นความหนาต่างๆกัน.....	29
รูปที่ 2.10	ความสัมพันธ์ ระหว่าง \log (ความหนืด ณ อัตราครีดยืดเฉือนต่างๆ) และ \log (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก).....	32
รูปที่ 2.11	การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์.....	33
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ของพอลิเมอร์ A และ B กับค่าความหนืด.....	33
รูปที่ 2.13	ความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์, สายโซ่เส้นตรงมีไม่มี กิ่งก้าน, กิ่งก้านสั้น, กิ่งก้านยาวและไม่เป็นระเบียบและกิ่งก้านแบบแห...	35
รูปที่ 2.14	ค่าความหนืดกับอัตราครีดยืดเฉือนของพอลิเอทิลีน LDPE HDPE และ LLDPE.....	35
รูปที่ 2.15	ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน (a) เดิมพลาสติกผลงในแม่พิมพ์, (b) ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์, (c) หล่อเย็น, (d) ถอดชิ้นงาน.....	38
รูปที่ 2.16	แสดงการเผาแม่พิมพ์โดยตรง.....	40
รูปที่ 2.17	แสดงการใช้อากาศร้อนในเตาอบ.....	40
รูปที่ 2.18	การใช้น้ำมันร้อนกับผนังแม่พิมพ์ 2 ชั้น.....	41
รูปที่ 2.19	แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด ร็อก แอนด์ โรล (Rock and Roll Machines).....	43

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.20	แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด ร็อก แอนด์ โรล (Rock and Roll Machines) ที่ทำการจัดสร้างขึ้น	43
รูปที่ 2.21	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด เตอบแบบกล่องขนาดเล็ก.....	44
รูปที่ 2.22	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแบบ กระสวยเดี่ยว.....	45
รูปที่ 2.23	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแบบ 2 กระสวย.....	45
รูปที่ 2.24	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด ฝ้ายเดี่ยว.....	46
รูปที่ 2.25	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด ฝ้ายคู่.....	46
รูปที่ 2.26	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด แขนตรง.....	47
รูปที่ 2.27	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด แขนอิสระ.....	48
รูปที่ 2.28	แสดงการวัดอุณหภูมิในตู้อบและแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน.....	49
รูปที่ 2.29	แสดงอุณหภูมิโปรไฟล์ของอากาศขณะให้ความร้อน.....	49
รูปที่ 2.30	แสดงอุณหภูมิอากาศภายในและอุณหภูมิแม่พิมพ์ขณะให้ ความร้อน.....	51
รูปที่ 2.31	แสดงผลของวัสดุทำแม่พิมพ์ต่อเวลาการให้ความร้อน.....	51
รูปที่ 3.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาของการเกิดปฏิกิริยา พอลิเมอร์ ไรเซชันกับสมบัติเชิงกลและความเหนียวของพอลิเมอร์.....	53
รูปที่ 3.32	แสดงถึงรูปแบบในกระบวนการขึ้นรูป.....	55
รูปที่ 2.34	แสดงถึงลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป.....	56
รูปที่ 2.35	แสดงลักษณะของเครื่องที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน.....	56
รูปที่ 2.36	แสดงลักษณะของเม็ดพลาสติก HDPE/PC	57
รูปที่ 2.37	แสดงชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนของ HDPE/PC.....	57
รูปที่ 2.38	แสดงลักษณะของเครื่องที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน.....	58
รูปที่ 2.39	แสดงลักษณะของแม่พิมพ์และชิ้นงานที่ได้.....	58
รูปที่ 2.40	แสดงถึงการเตรียมชิ้นงานเพื่อวัดค่าการกระจายความหนา.....	58
รูปที่ 2.41	แสดงถึงค่าการกระจายความหนาของชิ้นงานเมื่อใช้อัตราการหมุนที่ เปลี่ยนไป.....	59

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.42	แสดงถึง (a) ค่าความหนืดของพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 190 C° และ(b) อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์.....	60
รูปที่ 2.43	แสดงชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน.....	60
รูปที่ 2.44	แสดงชิ้นงานและผิวชิ้นงานที่มีลักษณะไม่เรียบ เกิดฟองอากาศ.....	61
รูปที่ 3.1	แสดงแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	63
รูปที่ 3.2	แสดงพอลิเอททีลีน โดยรูป LLDPE (เม็ดพลาสติก) และ LLDPE (Powder) พลาสติกพอลิเอททีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) เกรด M3204RUP จากบริษัท Thai Polyethylene Co, Ltd.....	64
รูปที่ 3.3	แสดง (a) พอลิคาร์บอเนต โดยรูป PCH2000, (b) PCH4000.....	64
รูปที่ 3.4	แสดง (a) เครื่อง (Scanning Electron Microscope:SEM) และ (b) Auto Fine Coaters JFC-1600.....	66
รูปที่ 3.5	เครื่องทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC)	67
รูปที่ 3.6	แสดงเครื่อง เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker).....	68
รูปที่ 3.7	แสดงเครื่อง Gel permeation Chromatography (GPC).....	69
รูปที่ 3.8	แสดงเครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์แบบแห้ง.....	70
รูปที่ 3.9	เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index).....	71
รูปที่ 3.10	เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary Rheometer).....	73
รูปที่ 3.11	แสดงรูปแบบของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน.....	74
รูปที่ 3.12	แสดง (a) เครื่อง Thickness Measurement Apparatus และ (b) พื้นที่ในการวัดการกระจายความหนาของฝากล่องด้านบนและด้านล่าง.....	74
รูปที่ 3.13	เครื่องทดสอบความแข็งความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness - Test).....	76

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.14	เครื่องทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test).....	77
รูปที่ 4.1	แสดงสัณฐานวิทยาของ พอลิคาร์บอเนตและพอลิเอทิลีนที่กำลังขยาย 40 เท่า โดยแบ่งเป็น (a) LLDPE ขนาดเล็กกว่า 250 μm , (b) PCH2000 ขนาดใหญ่กว่า 250 μm , (c) PCH4000 ขนาดใหญ่กว่า 250 μm และ (d) PCH4000 ขนาดเล็กกว่า 250 μm	79
รูปที่ 4.2	แสดง (a) เส้นกราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลของ PCH2000 และ (b) เส้นกราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุล ของ PCH4000.....	80
รูปที่ 4.3	แสดงผลทางความร้อนของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์(Differential Scanning Calorimeter, DSC).....	81
รูปที่ 4.4	กราฟความสัมพันธ์ Shear Viscosity กับ Shear Rate ของพอลิเอทิลีน (LLDPE) ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง และ พอลิคาร์บอเนต.....	83
รูปที่ 4.5	ลักษณะของเม็ดพอลิคาร์บอเนตหลังจากทำการแยกขนาด 2 อนุภาค คือ (a) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 250 μm และ (b) อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 250 μm	84
รูปที่ 4.6	เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัย.....	87
รูปที่ 4.7	แสดงด้านแต่ละด้านของแม่พิมพ์.....	88
รูปที่ 4.7	แสดงเส้นกราฟระหว่าง อุณหภูมิภายในและภายนอกแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิเตาที่ 240 °C.....	89
รูปที่ 4.9	แสดงเส้นกราฟระหว่าง อุณหภูมิภายในและภายนอกแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิเตาที่ 280 °C.....	90
รูปที่ 4.10	ผลจากการขึ้นรูป LLDPE ที่อุณหภูมิ 240 °C ที่เวลา 10 นาที.....	91
รูปที่ 4.11	ผลจากการ (a) ขึ้นรูป PCH2000 และ (b) PCH4000 ที่อุณหภูมิ 280 °C ที่เวลา 10 นาที.....	91
รูปที่ 4.12	แสดงถึงการขึ้นรูป (a) PCH4000 ที่อุณหภูมิ 260 °C และ (b) PCH4000 ที่อุณหภูมิ 280 °C	92

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13	แสดงถึง (a) ผิวด้านในชิ้นงานที่ใช้เวลาในการขึ้นรูป 10 นาที และ (b) ภาพแสดงถึงชิ้นงานที่ใช้เวลาในการขึ้นรูป 20 นาที..... 92
รูปที่ 4.14	แสดง (a) ชิ้นงานขึ้นรูประหว่าง PCH4000 > 250 μm และ (b) PCH4000 < 250 μm 93
รูปที่ 4.15	แสดง (a) ชิ้นงานทดสอบ LLDPE, (b) ชิ้นงานทดสอบ PCH4000, (c) ชิ้นงานทดสอบ PCH4000 อนุภาคใหญ่กว่า 250 μm ฝาด้านบน และ (d) ชิ้นงานทดสอบ PCH4000 อนุภาคใหญ่กว่า 250 μm ฝาด้านล่าง..... 97
รูปที่ 4.16	แสดงผลการทดสอบการเจาะทะลุกับ PCH4000 เทียบกับ LLDPE..... 98
รูปที่ 4.17	แสดง (a) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ LLDPE, (b) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ PCH4000, (c) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ PCH4000 อนุภาค > 250 μm ฝาด้านบนและ (d) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ PCH4000อนุภาค > 250 μm ฝาด้านล่าง..... 99

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ρ	ความหนาแน่น (g/cm ³)
σ	ความเค้น (MPa)
ε	ความเครียด
ASTM	มาตรฐานการทดสอบจากประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society of Testing and Materials)
MFI	ค่าดัชนีการไหล (g/10min)
LLDPE	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นเชิงเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene)
PC	พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)
m	น้ำหนักของสาร
v	ปริมาตรของสาร
inch	นิ้ว
μm	ไมโครเมตร
mm	มิลลิเมตร
cm	เซนติเมตร
cm ³	ลูกบาศก์เซนติเมตร
g	กรัม
kg	กิโลกรัม
°C	องศาเซลเซียส

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในกระบวนการขึ้นรูป เช่นเดียวกัน สามารถใช้กระบวนการขึ้นรูปมากมายหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งานและความต้องการของลูกค้า กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนหรือกระบวนการขึ้นรูปแบบเบ้าหมุน (Rotational molding, Rotomolding or Rotoforming) เป็นกระบวนการขึ้นรูปชนิดหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะ กลวง ขนาดใหญ่ และมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งยากต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่น โดยลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ถังขนาดใหญ่ ถังที่ใช้ในอุตสาหกรรม เรือใบ เป็นต้น โดยในปัจจุบันเทคนิคการขึ้นรูปแบบหมุนใช้ขึ้นรูป พลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกซึ่งส่วนมากก็คือพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) [1] ลักษณะพิเศษของกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้คือในกระบวนการผลิต จะไม่มีการใช้ความดันที่สูง (High Pressure) และอัตราเฉือนที่สูง (High Shear Rate) แตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นเช่นกระบวนการอัดรีดพลาสติก (Extrusion molding) และกระบวนการฉีด พลาสติก (Injection molding) ทำให้แม่พิมพ์ที่ใช้มีราคาค่อนข้างถูก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบอื่นๆอีกทั้งเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตไม่ซับซ้อนสามารถจัดทำขึ้นได้ภายในประเทศ จึงมีแนวโน้มในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้มากขึ้นทุกปี แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ วัสดุที่ใช้มีจำกัดคือกว่าร้อยละ 85 จะใช้พอลิเอทิลีน อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ต้องเป็นผงเท่านั้น

พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate; PC) เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตเป็นพลาสติกที่มีลักษณะใส มีความแข็งแรง ทนความร้อนสูง และต้านทานแรงเสียดสีได้ดี [2] จึงเป็นที่นิยมนอย่างมากในการนำมาใช้งานในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพอลิคาร์บอเนตได้แก่ กระจกนิรภัย เลนส์แว่นตาชนิดน้ำหนักเบา แผ่นซีดี ดีวีดี โล่ปราบจลาจล อุปกรณ์ไฟฟ้า หมวกกันน็อก แผ่นหลังคา ขวดนมเด็ก ขวดน้ำ ภาชนะบรรจุอาหารที่สามารถเก็บในตู้เย็นและนำเข้าไมโครเวฟได้ด้วย แต่เนื่องจาก พอลิคาร์บอเนต มีค่าความหนืดที่ค่อนข้างสูงจึงนิยมขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด และกระบวนการอัดรีดเป็นส่วนใหญ่

ในโครงการวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการนำพอลิคาร์บอเนต มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพอลิคาร์บอเนต ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการขึ้นรูป รวมทั้งหาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการขึ้นรูปแบบหมุน และยังสามารถใช้ พอลิคาร์บอเนต เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยศึกษารูปร่างและขนาดพอลิคาร์บอเนต

ศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น จุดหลอมเหลว น้ำหนักโมเลกุล ศึกษาสมบัติการไหลของพอลิคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับ พอลิเอทิลีน ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปแบบหมุน ตรวจสอบการกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้เมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้อยู่แล้วและศึกษาสมบัติทางกลบางประการของชิ้นงานที่ได้จากพอลิคาร์บอเนตเพื่อเป็นแนวทางในการหาวัสดุใหม่มาเลือกใช้ ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปแบบหมุนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพอลิคาร์บอเนต ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติการไหลของ พอลิคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับ พอลิเอทิลีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

1.2.3 เพื่อศึกษาหาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการขึ้นรูปแบบหมุน โดยมีพอลิคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ดังต่อไปนี้ สำหรับพอลิคาร์บอเนต แบ่งเป็น PCH2000 และ PCH4000 ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 260°C และ 280°C ใช้เวลาในการให้ความร้อน 2 ช่วง คือ 10 นาที และ 20 นาที สำหรับพอลิเอทิลีน ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่ 240°C ใช้เวลาในการให้ความร้อน 10 นาที และ โดยใช้เวลาในการหล่อเย็น ประมาณ 20-30 นาที

1.3.2 ทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ ได้แก่ ศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบแคปิลลารี (Capillary Rheometer รุ่น RH2000 ของบริษัท Malvern Instrument) ศึกษารูปร่างและขนาดของพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM : JSM-6510, JEOL, Japan) เป็นต้น

1.3.3 นำชิ้นงานทดสอบที่ได้มาทำการวัดการกระจายความหนา และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูป

- ค่าความแข็งที่ผิวแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Testing) ASTM D-785
- ความต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture Test) ASTM D-3787

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เรียนรู้เกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ และวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ
- 1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการหาวัตถุดิบใหม่มาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน
- 1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

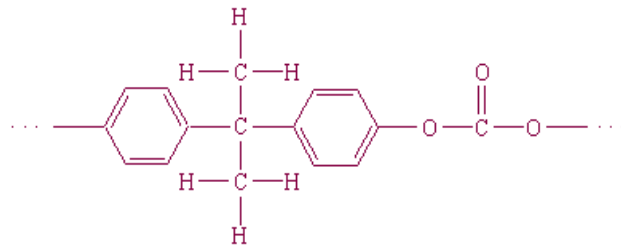
ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการนำพอลิคาร์บอเนต มาเป็นวัสดุหลักในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการของพอลิคาร์บอเนต เช่น รูปร่าง ขนาด น้ำหนักโมเลกุล อีกทั้งมีการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิคาร์บอเนตเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิโอทิลีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปแบบหมุนในปัจจุบัน และสมบัติเชิงกลบางประการของชิ้นงานพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ดังนั้นในบทนี้จึงขอกล่าวถึง ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับ พอลิโอทิลีนและพอลิคาร์บอเนต กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน แนะนำเครื่องทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)

พอลิคาร์บอเนตเป็นพลาสติกที่ได้มีการผลิตครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1953 โดยบริษัท Bayer และบริษัท General Electric [3] โดยได้ริเริ่มการใช้ในเชิงพาณิชย์ในปลายปี ค.ศ. 1953 จัดอยู่ในพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ประเภทพื้นฐานที่มีความโปร่งใสสูง [4] และจุดเด่นอีกข้อหนึ่งของพอลิคาร์บอเนต คือ สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อความร้อนสูง และสามารถนำกลับมาทำการขึ้นรูปใหม่ได้อีกจึงเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมต่างๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับพอลิคาร์บอเนต อันได้แก่ สูตรโครงสร้าง คุณสมบัติเบื้องต้น รวมถึงการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.1.1 โครงสร้างของพอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ Aliphatic Polycarbonates และ Aromatic Polycarbonates โดยในส่วนของ Aliphatic Polycarbonates มักจะไม่พบในทางการค้า ทั้งสองชนิดมีโครงสร้างภายในแบบ Amorphous ในส่วนของ Aromatic Polycarbonates จะมีสมบัติที่ค่อนข้างมีความเหนียวและแข็งแรงเป็นพอลิเมอร์วิศวกรรมที่มีประโยชน์มากที่สุด [5] โครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.1

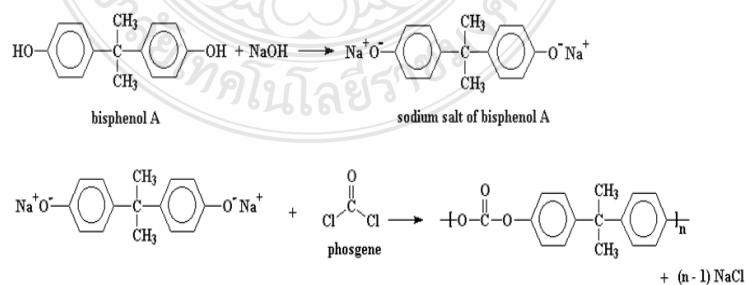


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของพอลิคาร์บอเนต [3]

พอลิคาร์บอเนตเป็นเทอร์โมพลาสติกเชิงวิศวกรรมผลิตจากการรวมตัวของเกลือโซเดียมของบิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) และฟอสจีน กรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่บริสุทธิ์มาก จะได้พอลิเมอร์ใสเหมือนน้ำ แต่ถ้าใช้สารตั้งต้นบริสุทธิ์น้อยลง จะได้พอลิเมอร์สีออกเหลืองๆ พอลิคาร์บอเนตไม่ค่อยละลายในตัวทำละลายทั่วไป แม้จะมีโครงสร้างใกล้เคียงกันก็ตาม ก็ละลายได้เฉพาะ อีเธอร์ที่มันจึงสามารถแยกส่วนที่เป็นผลึกออกมาได้ แต่อย่างไรก็ดี สามารถละลายได้ใน คลอโรฟอร์ม (CHLOROFORM) และ ส่วนพวก อะซีโตน , เบนซีน , คาร์บอเททราคลอไรด์ จะทำให้พอลิคาร์บอเนตพองตัว แต่ไม่ถึงกับละลาย

2.1.2 การสังเคราะห์

Interfacial Process [3] เป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิด 2 เฟสแยกออกจากกันของเหลวเมื่อเกิดปฏิกิริยา วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมากถึง 95% ในทางการค้าการผลิต Bisphenol A พอลิคาร์บอเนตเตรียมจากสารละลาย Bisphenol A และ Sodium Hydroxide จะได้เกลือโซเดียมของ Bisphenol A แล้วจึงนำมาทำปฏิกิริยากับก๊าซ Phosgene ดังปฏิกิริยาที่ได้แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างทางเคมีในการสังเคราะห์พอลิคาร์บอเนต [3]

2.1.3 สมบัติทั่วไปของพอลิคาร์บอเนต

พอลิคาร์บอเนตเป็นพลาสติกที่มีหมู่คาร์บอเนต (-O-CO-O-) ในสายโซ่หลักจึงทำให้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ประมาณ $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3] อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) ประมาณ $267\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความใสสูงใช้งานที่อุณหภูมิกว้าง ตั้งแต่ -100 ถึง $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการหดตัวต่ำ ทนแรงกระแทกสูงมาก สมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าดีมาก ทนสารเคมีและรอยขีดข่วนต่ำ ถ้าใช้งานกลางแจ้งโดยไม่มีสารป้องกันแสงอัลตราไวโอเลตนาน ๆ จะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เพราะ โมเลกุลของพอลิคาร์บอเนต มีความยืดหยุ่นพอสมควรเนื่องจากมี (-O-) อยู่ในสายโซ่หลัก ทำให้สามารถรับและกระจายแรงกระแทกกระทึกได้สูงกว่าพลาสติกอื่น ทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิง กรดเจือจาง และแอลกอฮอล์ แต่ไม่ทนต่อกรดแก่ ต่าง และ สารละลายเบนซีน ดินไฟฟ้า เมื่อดึงออกจากเปลวไฟสามารถดับเองได้ ขณะอยู่ในเปลวไฟให้เขม่าและกลิ่นฟีนอล ความหนืดสูง มีค่า MFI ประมาณ 1 : 10 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ น้ำหนักกด 11.8 กก. จัดเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีความสำคัญ มีความทนแรงกระแทกดีเยี่ยม มีความโปร่งใส ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ มีเสถียรภาพของรูปร่างสูง สมบัติทางไฟฟ้าดีเยี่ยม [3]

2.1.3.1 ความทนต่อความร้อน (Thermal Stability) ความทนต่อความร้อนจะเป็นตัวบ่งชี้บ่งบอกที่สำคัญของ พอลิคาร์บอเนตสามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทนความเย็นถึง $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับพอลิเมอร์แห้ง (Dry Polymer) สามารถทำให้ละลายได้ที่อุณหภูมิ $235\text{ }^{\circ}\text{C}$ พอลิคาร์บอเนตสามารถป้องกันการติดไฟได้โดยธรรมชาติ แต่อาจจะทำให้เพิ่มมากขึ้นได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additive)

2.1.3.2 คุณสมบัติเชิงกล พอลิคาร์บอเนตทนต่อแรงดึง และ แรงกระแทก แต่ข้อเสียของพอลิคาร์บอเนต คือ ชิ้นงานที่มีความหนามาก ความแข็งแรงจะต่ำกว่าชิ้นงานบางๆ เนื่องจากปัญหาเกิดความเครียดตกค้างภายในชิ้น คุณสมบัติต่างๆ เช่น การทนต่อแรงดึงยึด การทนต่อแรงกระแทก การโค้งงอ และการยึดตัวนี้ จะเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มมากกว่า 22,000 หลังจากนั้นจะเพิ่มเพียงเล็กน้อย ส่วนความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นต่อไปอีก

2.1.3.3 สมบัติทางแสง พอลิคาร์บอเนต จะมีดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) อยู่ที่ประมาณ 1.584 เพราะมีสมบัติเป็นอะโรมาติกมาก พอลิคาร์บอเนตเกรดที่ใสไม่มีสีจะมีการซึมผ่านของแสงประมาณ 89% ในช่วงที่มองเห็นด้วยตาได้ (Visible Range) และสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้จึงเป็นสาเหตุ ทำให้เกิดสีเหลืองขึ้น แต่ปรากฏการณ์นี้สามารถป้องกันได้โดยการเติมสารต้านทานต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต

2.1.3.4 ความเป็นผลึกและโครงสร้าง สมบัติทางแสงของพอลิคาร์บอเนต โดยปกติพอลิคาร์บอเนตจะมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่เป็น ออสันฐาน แต่พอลิเมอร์อาจจะกลายเป็นแบบผลึกได้บ้างอุณหภูมิ โดยการให้ความร้อนนานขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นและถ้าจะให้เกิดเร็วขึ้น จะใช้ตัวทำละลายหรือระบบของตัวทำละลาย เช่น อะซิโตนหรือการทำให้เป็นฟิล์มยืด หรือทำให้เป็นเส้นใยที่ 186 °C พอลิคาร์บอเนตจะมีความเป็นผลึกสูงหลอมละลายที่ 260 °C มีการซึมผ่านของแก๊สต่ำและมีความต้านทานสารละลายสูง

2.1.3.5 พฤติกรรมการหลอมเหลว Bisphenol A Polycarbonate ที่เป็นอสันฐานจะเกิดการเสียรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิปกติที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปประมาณ 270 °C ถึง 315 °C และช่วงเวลาที่เกิดความเค้น (Shear Rate) อุณหภูมิจะประมาณ 280 °C ขึ้นไป ความหนืดของการหลอมเหลว (Melt Viscosity) สามารถทำให้ลดลงและปรับปรุงพฤติกรรมการไหลได้โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิการผลิต

2.1.3.6 พฤติกรรมการดูดความชื้น พอลิคาร์บอเนต เป็นพลาสติกในกลุ่มที่สามารถดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ดี ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตจึงต้องอบไล่ความชื้นในเม็ดพลาสติกก่อนให้เหลือความชื้นน้อยกว่า 0.02% โดยในการอบควรใช้อุณหภูมิลมหมุนเวียนประมาณ 120 °C เป็นเวลา 6 ถึง 8 ชั่วโมง และในตัวเครื่องจักรที่ใช้ควรมีช่องระบายอากาศเพื่อระบายความชื้นอีกทางหนึ่ง

2.1.4 การใช้งานพอลิคาร์บอเนตในปัจจุบัน

พอลิคาร์บอเนตนั้นเป็นพลาสติกที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปได้ค่อนข้างหลากหลาย ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนต ได้แก่ กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) กระบวนการอัดรีด (Extrusion) แต่บางกระบวนการอาจทำการขึ้นรูปได้ค่อนข้างยาก เช่น กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding) กระบวนการหล่อ (Casting) การใช้งานพอลิคาร์บอเนตจึงมีขีดจำกัดบางประการอยู่ แต่ยังคงมีความสำคัญกับอุตสาหกรรมต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1.4.1 ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ พอลิคาร์บอเนตส่วนใหญ่จะใช้สำหรับการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติด้านความปลอดภัยของส่วนรวม เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและมีคุณสมบัติทนความร้อนและทนไฟก็ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์ดแวร์ไฟฟ้าและการสื่อสารโทรคมนาคม นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนในตัวเก็บประจุสูง

2.1.4.2 วัสดุก่อสร้าง ผู้บริโภคที่ใหญ่ได้มีการใช้งานพอลิคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมก่อสร้างเช่น สำหรับ โคมโปริงใส กระจกแบนหรือโคง

2.1.4.3 ในงานจัดเก็บข้อมูล รูปแบบที่สำคัญของพอลิคาร์บอเนตคือการผลิตของแผ่นดิสก์ซีดีและแผ่นดิสก์ แผ่นเหล่านี้จะถูกผลิตขึ้นด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยพอลิคาร์บอเนตจะถูกทำการฉีดเข้าไปในโพรงแม่พิมพ์ที่มีด้านหนึ่งประทับตราโลหะที่มีภาพลบบของข้อมูลแผ่นดิสก์ ในขณะที่ด้านแม่พิมพ์อื่น ๆ ที่เป็นพื้นผิวเงา ผลิตภัณฑ์ทั่วไปของแผ่นภาพยนตร์รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการโฆษณา (สัญญาณแสดงการป้องกันโปสเตอร์)

2.1.4.4 ในส่วนของยานยนต์ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ พอลิคาร์บอเนตจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป สามารถผลิตพื้นผิวเรียบมาก ชิ้นงานที่ได้เหมาะสำหรับการตกแต่งและในส่วนการสะท้อนแสง ซึ่งเป็นสมบัติโดยทั่วไปของพอลิคาร์บอเนตเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและทนต่อแรงกระแทกสูง พอลิคาร์บอเนตเป็นวัสดุที่โดดเด่นสำหรับการทำเลนส์ไฟหน้ายานยนต์ แต่ไฟหน้ายานยนต์ต้องมีการเคลือบพื้นผิวด้านนอกเนื่องจากทนรอยขีดข่วนและความไวในการย่อยสลายสีม่วงเป็นพิเศษ

2.1.4.5 ในทางการแพทย์ พอลิคาร์บอเนตหลายเกรดที่ใช้ในงานทางการแพทย์ ถูกทำการตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO 10993-1 และ USP ชั้นมาตรฐาน VI (บางครั้งเรียกว่า PC-ISO) Class VI โดยมาตรฐานเหล่านี้เป็นที่เข้มงวดมากที่สุดในหกของการจัดอันดับ USP เกรดเหล่านี้จะต้องสามารถฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 °C มีความทนทานต่อรังสีแกมมา อย่างไรก็ตามการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ชี้ให้เห็นปัญหาในทางชีวภาพ จึงเป็นข้อจำกัดของ พลาสติกทุกชนิดที่เกี่ยวกับการใช้งานทางการแพทย์

2.2 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานในปัจจุบันประมาณร้อยละ 32 ของพลาสติกทั้งหมดเตรียมได้จากการพอลิเมอไรซ์แก๊สเอทิลีนจนกลายเป็นพอลิเมอไรท์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีรูปแบบโครงสร้างโมเลกุล 2 รูปแบบได้แก่ โครงสร้างแบบเชิงเส้น (Linear) และโครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) การมีกิ่งก้านสาขาจะลดความสามารถในการเกิดผลึก ซึ่งมีผลไปถึงความหนาแน่นและสมบัติอื่นๆ ดังนั้นพอลิเอทิลีนที่ได้จึงมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยพอลิเมอไรท์ที่มีกิ่งก้านมากจะมีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว ความแข็งที่ผิว ต่ำกว่า แต่ยอมให้แก๊สหรือไอน้ำซึมผ่านได้มากกว่า ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ การมีกิ่งก้านสาขาของโมเลกุล แต่สมบัติทางกายภาพอื่นๆ ยังต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย [3] ซึ่งการแบ่งเกรดของพอลิเอทิลีน โดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์สามารถแบ่งออกได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งเกรดของพอลิเอทิลีน โดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์ [3]

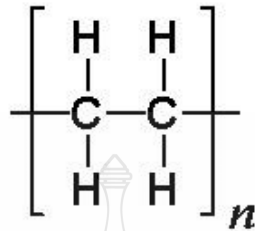
Polyethylene	Density , g/cm ³	Type
HDPE (High Density Polyethylene)	0.941-0.965	Hopolymer
MDPE (Medium Density Polyethylene)	0.926-09.40	Hopolymer
LDPE (Low Density Polyethylene)	0.910-0.925	Hopolymer
LLDPE (Linear Low Density Polyethylene)	0.925-0.940	Copolymer
VLDPE (Very Low Density Polyethylene)	<0.910	Copolymer

ซึ่งหลายปีที่ผ่านมาพอลิเอทิลีนจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่ที่เหมาะสมเป็นอย่างมากกับการนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งเกรดที่นิยมใช้แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดความหนาแน่น คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

2.2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีน

โครงสร้างของโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่างๆ นั้นจะมีโครงสร้างที่เหมือนกันแต่แตกต่างกันตรงที่ความเป็นกิ่งก้านสาขาของแต่ละชนิด เช่น เกรดที่มีความหนาแน่นสูงสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นตรงมีกิ่งก้านสาขาน้อย ดังนั้นสายโซ่ที่จับกันแน่นหนา ความหนาแน่นก็จะสูงขึ้นด้วย ส่วนชนิดที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีกิ่งก้านสาขามากมาย โมเลกุลเกาะติดกันแบบหลวมๆ

ไม่แน่นอนหนาเนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลไม่แข็งแรง ส่งผลให้สมบัติอื่นๆ เช่น ความแข็งแรง และความแข็งแรง แต่จะมีความเหนียวที่ค่อนข้างสูง ซึ่งโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [6]

2.2.2 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกกึ่งผลึก โดยความหนาแน่น ความเป็นผลึก และจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อกิ่งก้านสาขาลดลง โมเลกุลของ HDPE เป็นระเบียบสูงกว่า LDPE เมื่อความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นช่วยทำให้ ค่าความแข็งดึง ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อความร้อนและสารเคมี ความชุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะลดแรงกระแทกและความใส สภาพยืดหยุ่นของพันธะ C-C ทำให้พอลิเอทิลีนมีค่า T_g ค่อนข้างต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณของผลึกโดยมีค่า T_g ตั้งแต่ $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้องดังนั้นพอลิเอทิลีนจึงมีทั้งสภาพยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติ

พอลิเอทิลีนเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี เพราะเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้วสมบัติต่างๆ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) และเพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power-Factor) ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ในทางเคมีอาจจัดพอลิเอทิลีนว่าเป็นพาราฟิน (Parafin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเหนียว เพราะไม่มีแรงดึงดูดพิเศษ เช่น พันธะไฮโดรเจนกับตัวทำละลาย และเนื่องจากพอลิเมอร์มีความเป็นผลึก จึงทำให้พอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ พอลิเอทิลีนเริ่มบวมพองและละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน หรือฮาโลเจนไฮโดรคาร์บอน เช่น โทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีน และไดคลอโรเอทิลีน เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายพอลิเอทิลีนสูงขึ้นเมื่อความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง $60\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของเหลวบางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ เอสเตอร์ และคีโตนอาจทำให้พอลิเอทิลีนเกิดความเค้นขณะที่แช่อยู่ในของเหลวนั้น ทำให้เกิดการแตกหักได้ พอลิเอทิลีนมีความทนทานต่อกรดและด่างค่อนข้างดี จึงถูกนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุกรดและด่าง หรือสารออกซิไดซ์แรงๆ ผิวของพอลิเอทิลีนจะมีความมันเงาคล้ายกับเทียนไขจึงเป็นอุปสรรคต่อการพิมพ์และตกแต่ง [3]

2.2.3 การนำไปใช้งานของ พอลิเอทิลีน

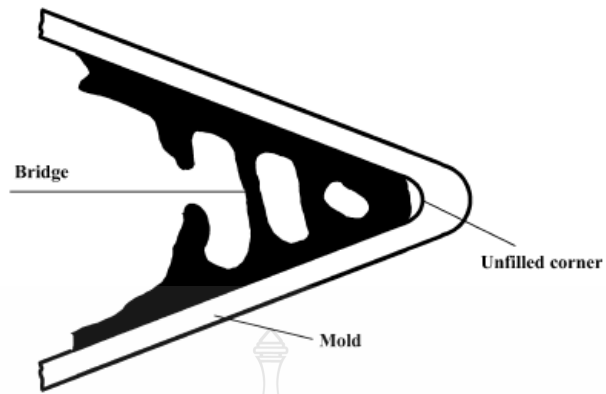
พอลิเอทิลีนสามารถทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายหลายชนิด มีความยืดหยุ่น ต่อแรงกระทบกระแทก ไม่แตกร้าวง่าย สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ โดยเฉพาะภาชนะที่เตรียมจากการเป่า (Blow Molding) กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding) เนื่องจากมีการหดตัวในแม่พิมพ์ค่อนข้างดี จึงทำให้ไม่ติดแม่พิมพ์ การถอดออกจากแม่พิมพ์จึงค่อนข้างง่าย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตด้วย พอลิเอทิลีนมีมากมาย อาทิเช่น ขวดน้ำ ถังขยะ เรือบด เพอร์นิเจอร์ โต๊ะ ท่อประปา ถุงพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ พอลิเอทิลีนยังใช้ในการบุพื้นบ่อฝังกลบขยะเพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารเคมีลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ

2.3 การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow)

การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน หากเราสามารถเรียนรู้พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวเข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างค่อนข้างซับซ้อนได้ ปัจจัยสำคัญในการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ คือ ขนาดและรูปร่างของพอลิเมอร์นั้นๆ ในส่วนของขนาด พอลิเมอร์ที่มีขนาดประมาณ 35 Mesh เป็นต้น ไปพบว่า ความสามารถในการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์นั้น ไม่ค่อยส่งผลเท่าที่ควร แต่รูปร่างของพอลิเมอร์ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ อนุภาคที่มีลักษณะคล้ายกับมีหางดังแสดงในรูปที่ 2.4 เกิดผลทำให้เกิดการก่อดัวเป็นชั้นๆ ในส่วนโค้งเว้าของแม่พิมพ์ อันเนื่องมาจากการหลอมละลายที่แตกต่างกัน กล่าวคือส่วนที่มีลักษณะคล้ายหางจะหลอมละลายก่อน ซึ่งมีผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของผิวชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กอีกทั้งยังส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานอีกด้วย [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของพอลิเมอร์ [1]



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการหลอมละลายของพอลิเมอร์ [1]

วิธีการมาตรฐานในการวัดการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์โดยมีหลักการ ดังต่อไปนี้ ทำการจับเวลาของพอลิเมอร์ในปริมาณที่เท่ากันไหลผ่านกรวยมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยเวลาที่พอลิเมอร์ไหลผ่านกรวยได้เร็วกว่า หมายถึง การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ที่ดีกว่า



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์แบบแห้ง

2.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณของมวลสารต่อหน่วยปริมาตร เป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของวัสดุ ประเภทของความหนาแน่นแบ่งออกได้เป็น ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density)

2.4.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) เป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของวัสดุ หมายถึง ความหนาแน่น (Density) ของวัสดุปริมาณมวล (Bulk Material) เช่น แป้ง (Flour) สตาร์ (Starch) เมล็ดธัญพืช (Cereal Grain) กาแฟผง นมผง อาหารสัตว์ ขนมอบเคี้ยว และ ลูกกวาด เป็นต้น ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่รวมที่วางระหว่างชั้นวัสดุด้วย

การหาค่า Bulk Density ในงานวิจัยนี้ทำได้ตามมาตรฐาน ASTM D1895 ทำได้โดยการบรรจุวัสดุลงไปภาชนะที่ทราบปริมาตรเพื่อลดความผิดพลาด ควรใช้ภาชนะขนาดใหญ่พอสมควร เช่น ขนาด 1 ลิตร แล้วนำไปชั่ง ปาดหรือเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการหา Bulk Density ได้แก่ ความชื้น (Moisture Content) ของวัสดุ ความสูงของระดับที่เทวัสดุลงในภาชนะ การอัดแน่นซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุประเภท การนำไปใช้งาน ควรบอกวิธีการ และสภาวะที่วัดค่ากำกับด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การหาคความหนาแน่นรวม (Bulk Density) [7]

โดยความหนาแน่นเนื้อ สามารถคำนวณได้จาก มวล (Mass) ของวัสดุหารด้วยปริมาตร (Volume) ของวัสดุ ซึ่งรวมช่องว่าง (Pore) ระหว่างวัสดุด้วย

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นรวม

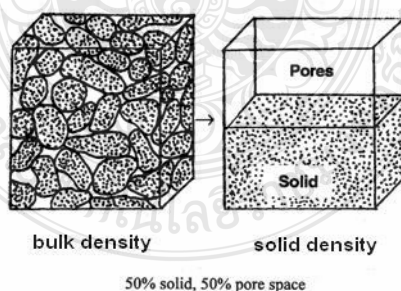
ความชื้น (Moisture Content) ความชื้นมีผลต่อความหนาแน่นรวมของวัสดุทางการเกษตร เช่น เมล็ดธัญพืช ถั่วเมล็ดแห้ง เนื่องจากเมื่อวัสดุดูดความชื้น ขยายตัว ส่งผลต่อขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป

2.4.3 การใช้ประโยชน์ของค่าความหนาแน่นรวม

ค่าความหนาแน่นรวม และความหนาแน่นเนื้อ นำไปใช้เพื่อคำนวณหาค่าความพรุน (Porosity) ซึ่งแสดงปริมาตรของที่ว่างภายในกองวัสดุ ค่าความหนาแน่นรวมยังใช้เพื่อการออกแบบขนาดของบรรจุภัณฑ์ ซิโล (Silo) สำหรับเก็บอาหาร เป็นต้น

2.4.4 ความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density)

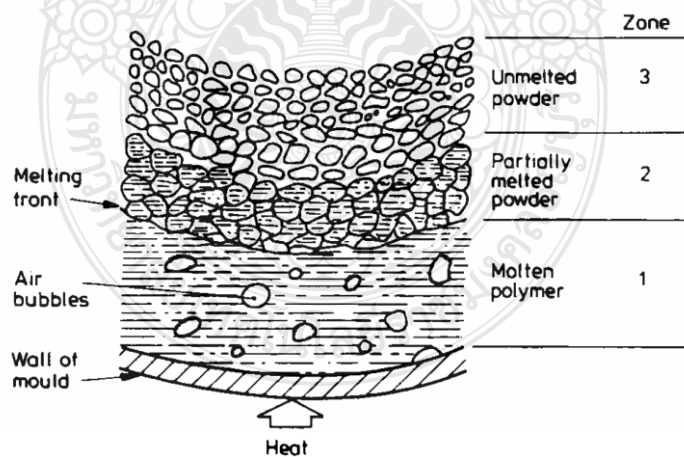
ความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density) ซึ่งเป็นความหนาแน่นของชิ้นวัสดุแต่ละชิ้นและจะไม่รวมที่ว่างระหว่างชิ้นวัสดุ อาจเรียกว่า True Density หรือ Absolute Density หมายถึงความหนาแน่น (Density) ของเนื้อวัสดุไม่รวมช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ โดยวัสดุชนิดเดียวกันอาจพิจารณาความหนาแน่นเป็นความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density) และความหนาแน่นรวม (Bulk Density) เช่น การวัดความหนาแน่นของมันฝรั่งแต่ละหัว ได้ค่าเป็น Solid Density แต่หากวัดความหนาแน่นของมันฝรั่งขณะกองอยู่ หรืออยู่ในถังเก็บ จะได้ค่าเป็น Bulk Density เป็นต้น ดังนั้นความหนาแน่นรวมจะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นเนื้อเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบความหนาแน่นรวม กับความหนาแน่นเนื้อ [7]

2.5 การหลอมละลายของเม็ดพอลิเมอร์ (Sintering)

เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นฉนวนความร้อน ดังนั้นการนำความร้อนจากผิวด้านนอกสู่แกนกลางของอนุภาคจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อผงพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมพลาสติกได้รับความร้อน การหลอมตัวจะเกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาคก่อน อนุภาคแต่ละอนุภาคที่อยู่ติดกันจึงมีผิวเชื่อมติดกัน บางส่วนเกิดเป็นลักษณะคอคอด (Neck) กระบวนการให้ความร้อนนี้บางครั้งเราเรียกว่า ซินเทอริง (Sintering) ส่วนอากาศซึ่งแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคที่มีการเชื่อมกันนั้น เมื่อเราให้ความร้อนต่อไปเป็นเวลานานขึ้นอนุภาคพอลิเมอร์จะกลายเป็นของเหลวหนืดทั้งหมด อากาศที่แทรกอยู่ภายในช่องว่างเคลื่อนตัวออกจากเนื้อพอลิเมอร์ นอกจากนี้เรายังพบเนื้อของชั้นพอลิเมอร์ซึ่งสัมผัสกับผนังด้านในของแม่แบบจะเกิดการหลอมตัวก่อน ชั้นอนุภาคที่ความหนาถัดมา (มีการหลอมตัวบางส่วน) และชั้นอนุภาคพอลิเมอร์ด้านในสุดจะยังคงเป็นของแข็งอยู่ในสภาพผงและไม่มีการหลอมเหลว ความร้อนจะถ่ายเทจากพอลิเมอร์ชั้นนอกสู่พอลิเมอร์ชั้นในอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 การให้ความร้อนกับแม่แบบเพื่อให้พอลิเมอร์ทั้งหมดหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันจะกินเวลาค่อนข้างนาน บางครั้งอาจให้เวลาถึง 30 ถึง 60 นาที ต่อการขึ้นรูปหนึ่งวัฏจักร เมื่อชั้นพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์แล้ว จะมีการให้ความเย็นกับแม่แบบ ซึ่งทำได้โดยการเป่าให้อากาศและสเปรย์น้ำลงบนแม่แบบ เมื่อพอลิเมอร์หลอมเย็นตัวลงจะกลายเป็นชั้นพอลิเมอร์แข็งห่อหุ้มผิวของแม่แบบหรือซัปสเตอร์ทไว้



รูปที่ 2.9 ลักษณะของพอลิเมอร์ในชั้นความหนาต่างๆกัน [4]

2.6 สมบัติการไหล และ น้ำหนักโมเลกุล (Flow Properties and Molecular Weight)

ในการบ่งบอกค่าเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีอยู่ด้วยกันหลายอย่าง แต่ที่นิยมมากที่สุดคือค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weight Average Molecules, M_w) พอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นวัสดุของไหลที่มีค่าความหนืดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ยาว (Long-Chain Molecules) และมีความเกี่ยวพันกันอยู่ (Molecular Entanglements) นอกจากนี้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีพฤติกรรมทางการไหลเป็นนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic non-Newtonian) ซึ่งค่าความหนืดจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) ดังนั้น หากต้องการเปรียบเทียบค่าความหนืดระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ ในแง่ที่สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลจะต้องเปรียบเทียบกันที่อัตราเฉือนเดียวกัน โดยปกติจะเปรียบเทียบกัน ณ สภาวะที่อัตราเฉือนต่ำๆ (Very Low Shear Rate) โดยความหนืดในช่วงอัตราเฉือนต่ำๆ นี้เรียกว่า Zero Shear Viscosity

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.2 และรูปที่ 2.10 เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ (M_w) ที่มีต่อค่าความหนืดที่อัตราความเฉือนต่ำมากๆ หรือ Zero Shear Viscosity (η_0) จากรูปพบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลวเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรก ค่าความหนืดจะสูงขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนเดียวกัน จากนั้นค่าความหนืดของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่สูงกว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ (มีค่าความชันของเส้นกราฟที่สูงขึ้น) หากเราลากเส้นจากจุดต่อของเส้นความชันมายังแกน X เราสามารถหาค่าวิกฤตของน้ำหนักโมเลกุล (Critical Molecular Weight, M_c) ของพอลิเมอร์ชนิดนั้นได้ซึ่งเป็นจุดที่โมเลกุลมีขนาดใหญ่ และยาวเพียงพอที่จะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลได้โดยปกติค่า M_c ของพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่อยู่ระหว่างค่า 10,000 ถึง 40,000 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยปกติเป็นที่ทราบกันดีว่า ค่า M_c ของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลเพื่อการเคลื่อนไหว (Molecular Flexibility) กล่าวคือหากโมเลกุลมีความยืดหยุ่นมากมีค่า M_c น้อย ยกตัวอย่างเช่น Polyethylene มีค่า M_c ต่ำกว่า Polystyrene เพราะ Polystyrene มีความยืดหยุ่นสูงกว่า สำหรับค่าคงที่ a เป็นค่าคงที่เชิงกำลัง (Power Constant) ซึ่งสามารถหาได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 2.10 โดยค่าของ a และเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์แสดงในตารางที่ 2.3

$$\eta_o = KM_w^a$$

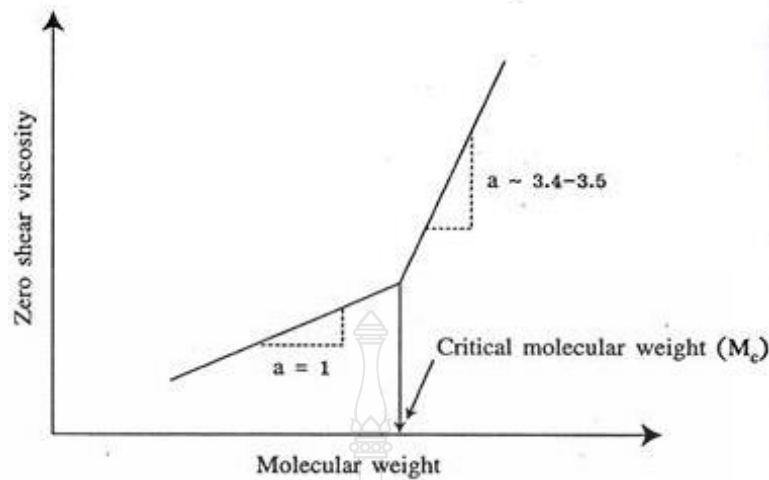
สมการที่ 2.1 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการไหลกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.2 ตารางตัวอย่างค่า M_c ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [8]

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

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและความหนืดของพอลิเมอร์
หลอมเหลวและค่าคงที่ [8]

กรณี	เงื่อนไข	ค่าคงที่ a
$M_w < M_c$	ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลว	1
$M_w > M_c$	ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลว และการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเกี่ยวกันของโมเลกุล	3.4 หรือ 3.5

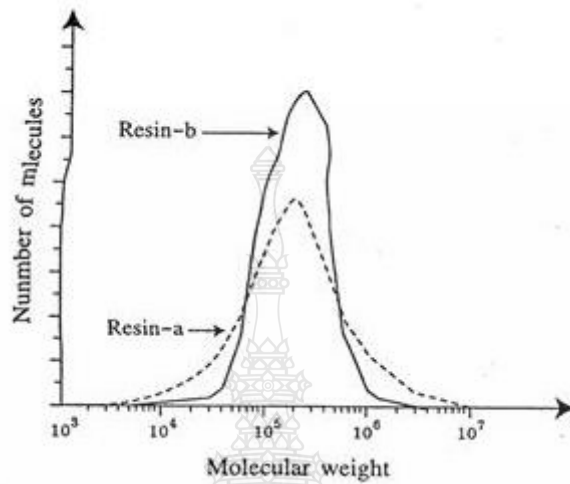


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ ระหว่าง \log (ความหนืด ณ อัตราเฉือนต่ำๆ) และ \log (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก) [8]

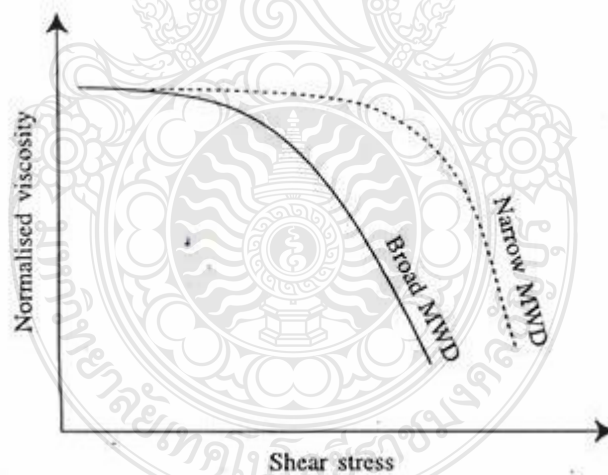
2.6.1 การกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution)

รูปที่ 2.11 แสดงถึงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Molecular Weight Distributions, MWD) ที่แตกต่างกัน แต่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน และรูปที่ 2.12 แสดงผลของค่า MWD ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว A และ B โดยจะเห็นว่าทั้งพอลิเมอร์ A และ B จะมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเป็นอย่างไร ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงเมื่อมีการเพิ่มค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็น Pseudoplastic non-Newtonian และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความหนืดของพอลิเมอร์ A ที่มีค่า MWD ที่กว้างกว่าจะลดลงในอัตราที่สูงกว่า (เร็วกว่า) ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ B ที่มีค่า MWD ที่แคบกว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือน การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของพอลิเมอร์ที่มีค่า MWD ที่แตกต่างกันในรูปที่ 2.7 สามารถอธิบายได้ในแง่ของการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล โดยในสภาวะที่ไม่มีการไหลพอลิเมอร์ A ที่มีค่า MWD กว้างกว่า อาจมีปริมาณการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่มากกว่าพอลิเมอร์กลุ่ม B ที่มีค่า MWD น้อยกว่า ดังนั้นเมื่อเกิดการไหล ปริมาณการเกี่ยวพันนั้นย่อมต้องลดน้อยลงนั้นหมายความว่า ยิ่งปริมาณการเกี่ยวพันมากขึ้นเท่าไร อัตราในการลดลงของความหนืดย่อมมากขึ้น (อันเนื่องมาจากอัตราของการคลายตัวแยกจากกัน) ประกอบกับเหตุผลของการที่สายโซ่โมเลกุลเล็กๆ ในพอลิเมอร์ A ที่มีค่า MWD ที่กว้าง ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น

(Lubricants) ให้สายโซ่โมเลกุลใหญ่สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ที่มีค่า MWD ที่กว้างลดลงในอัตราที่รวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ B ที่มีค่า MWD ที่แคบ



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ a และ b [9]



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ของพอลิเมอร์ A และ B กับค่าความหนืด [9]

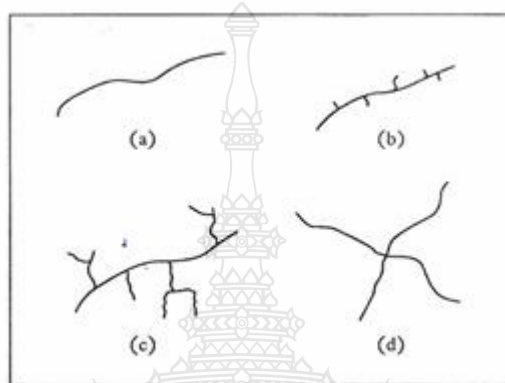
2.6.2 ความเป็นกิ่งก้านของโมเลกุล (Chain Branching)

ความเป็นกิ่งก้านของสายโซ่โมเลกุลถูกจำกัดความโดยการเปรียบเทียบความยาวของกิ่งก้านกับความยาวของสายโซ่โมเลกุลหลัก กิ่งก้านสาขาบนสายโซ่โมเลกุลอาจเกิดขึ้นเองขณะที่มีการผลิตพอลิเมอร์ เช่น การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งแบบ Ziegler-Natta ในปัจจุบันได้มีผลงานวิจัยที่ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้ตัวเร่ง Metallocene ที่สามารถให้สายโซ่โมเลกุลที่ยาวและปราศจากกิ่งก้านสาขา ในหลายกรณีความเป็นกิ่งก้านถูกทำให้เกิดขึ้นด้วยความตั้งใจของผู้สังเคราะห์ เช่น ในกรณีที่มีการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ที่มีการใช้ชนิดของมอนอเมอร์ (Multifunctional Monomers) ที่หลากหลายประเภทของความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ สามารถแสดงให้เห็นทางกายภาพได้ในรูปที่ 2.13 โดยเปรียบเทียบกับความเป็นเส้นตรงของสายโซ่โมเลกุลในรูปที่ 2.13 (a) โดยปกติของกระบวนการผลิต ในการควบคุมคุณภาพหรือสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์นักวิทยาศาสตร์มีความจำเป็นต้องควบคุมปริมาณและลักษณะของความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างที่จะต้องเข้าใจถึงผลของความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ หลอมเหลว ในการวิเคราะห์เบื้องต้น เราควรพิจารณาถึงตัวแปรย่อย 3 ประการที่เกี่ยวข้องกับความเป็นกิ่งก้าน นั่นคือ

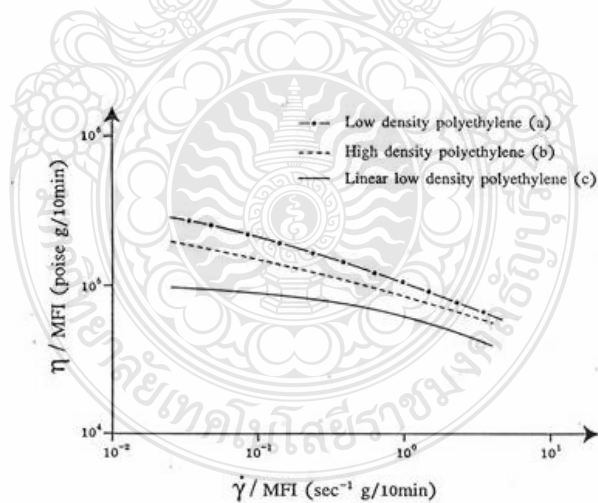
ปริมาณของกิ่งก้าน หากเปรียบเทียบพอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งก้านกับที่มีกิ่งก้าน พบว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งก้านมีค่าความหนืดสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้าน เนื่องจากความสามารถในการอัดตัวของพอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งก้านมีค่ามากกว่า ซึ่งหลักการนี้สามารถใช้อธิบายการเปรียบเทียบพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีกิ่งก้านแต่มีปริมาณกิ่งก้านไม่เท่ากันได้ด้วย แต่ต้องเปรียบเทียบกันในกรณีที่ประเภทและความยาวโดยเฉลี่ยของกิ่งก้านใกล้เคียงกัน เป็นต้น

ความยาวหรือน้ำหนักโมเลกุลของกิ่งก้าน โดยปกติพอลิเมอร์กิ่งก้านที่สั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว เมื่อเกิดการไหลที่น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านยาว ค่าความหนืดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ น้ำหนักโมเลกุล (รวมถึง MWD) และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ในพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านยาว ความเป็นกิ่งก้านนี้อาจทำให้เกิดการเกี่ยวพันกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดนั่นเอง ผลงานวิจัยของ Saini และ Shenoy [10] พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของกิ่งก้านมีความสำคัญมากกว่าปริมาณของกิ่งก้าน โดยพบว่า พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) มีค่าความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Zero Shear Viscosity) สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นเส้นตรง (Linear Low-Density Polyethylene, LLDPE) แต่มีค่าต่ำกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene, LDPE) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ลักษณะของกิ่งก้าน (ตัวอย่างในรูปที่ 2.13) ลักษณะของกิ่งก้านที่มีผลต่อความหนืดของพอลิเมอร์เป็นตัวแปรที่ยากแก่การเปรียบเทียบซึ่งจะสามารถทำได้ก็ต่อเมื่อเราสามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลและความยาวของกิ่งก้านที่เกิดขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ซึ่งถือเป็นสิ่งที่ยากมาก แต่หลักการของการเปรียบเทียบคือ โครงสร้างของกิ่งก้านที่มีผลทำให้เกิดการเกี่ยวพันได้ง่ายและมาก ก็จะทำให้ค่าความหนืด (Zero Shear Viscosity) มีค่าสูงขึ้นได้



รูปที่ 2.13 ความเป็นกิ่งก้านบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (a) สายโซ่เส้นตรงไม่มีกิ่งก้าน, (b) กิ่งก้านสั้น, (c) กิ่งก้านยาวและไม่เป็นระเบียบ (d) กิ่งก้านแบบแห [8]



รูปที่ 2.14 ค่าความหนืดกับอัตราครีดยืดหยุ่นของพอลิเอทิลีน (a) LDPE, (b) HDPE และ (c) LLDPE [10]

หากพิจารณาในแง่ผลของความเป็นกึ่งก้านของสายโซ่โมเลกุลร่วมกับผลของอุณหภูมิ พบว่า ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ที่มีความเป็นกึ่งก้านมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวเส้นตรง ดังแสดงได้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของพอลิโอฟีน [11]

Poly olefins	<i>viscosity</i> 190°c
	<i>viscosity</i> 230°c
Linear low- density polyethylene	2.1
Branched polyethylene	2.9
polyethylene	2.1

นอกจากนี้ เราสามารถวิเคราะห์ผลของความเป็นกึ่งก้านโมเลกุลที่มีผลต่อสมบัติการไหลของ พอลิเมอร์หลอมเหลวในแง่ของวิธีการเสียรูปได้อีกด้วย กล่าวคือ ในแง่ของการไหลแบบยืดดึง (Elongational Flow) ยังมีความยาวของกึ่งก้านสาขามากขึ้นเท่าไรยิ่งทำให้ความหนืดแบบยืดดึง (Elongational Viscosity) มีค่าสูงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากกึ่งก้านที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลทำหน้าที่เสมือน ตะขอ เพื่อด้านทานการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้จะเกิดขึ้นในการไหลแบบยืดดึง ก่อนข้างเด่นชัดกว่าในวิธีการไหลแบบเฉือน (Shear Flow)

2.7 การขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)

กระบวนการขึ้นรูปโดยการหมุนในแม่แบบเป็นกระบวนการซึ่งใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่ ภายในหรือตรงกลางมีลักษณะกลวง โดยปราศจากการเชื่อมหรือรอยตะเข็บ ซึ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว สามารถขึ้นรูปคล้ายการขึ้นรูปด้วยการเป่าในแม่แบบ ในการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบหมุน มีปัจจัย 3 ประการคือ เวลา, อุณหภูมิ, การหมุนของแม่พิมพ์ แต่จะกล่าวถึงกระบวนการหมุนซึ่งกระบวนการหมุนจะต้องหมุนทั้ง 2 แกน ได้แก่ แกนตั้งฉากและแกนแนวราบ ลักษณะการหมุนที่ใช้ในเครื่องแบบหมุน นั้นเรียกว่า การหมุนแบบ 2 แนวแกน (Biaxial Rotation)

กระบวนการขึ้นรูปโดยการหมุนแม่แบบนี้ใช้สำหรับการขึ้นรูปพอลิเมอร์ มีรากฐานมาจากกระบวนการหล่อขึ้นงานโลหะซึ่งกลวง พอลิเมอร์ผงถูกซึ่งนำหนักก่อนบรรจุเข้าไปในแม่แบบสองซีก ซึ่งแม่แบบทำจากโลหะ ทำการปิดแม่แบบเข้าด้วยกัน จากนั้นนำแม่แบบซึ่งมีผงพอลิเมอร์อยู่ภายในไป

อบให้ความร้อนในเตาอบ ในระหว่างที่มีการให้ความร้อนกับแม่แบบ แม่แบบมีการหมุนตัวโดยรอบ ทั้งสองแกนซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน หลังจากเวลาผ่านไปพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวและก่อตัวขึ้นเป็นชั้นผิวด้านในของแม่แบบ หลังจากนั้นทำการให้ความเย็นกับแม่แบบเพื่อให้ชั้นพอลิเมอร์หลอมเย็นตัวลงและกลายเป็นของแข็ง ในระหว่างที่ให้ความเย็นกับแม่แบบนี้ แม่แบบยังคงหมุนไปมาตลอดเวลา ชั้นตอนสุดท้ายเป็นการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่แบบ กระบวนการนี้ได้รับการพัฒนาจากจุดกำเนิดตั้งแต่ ศตวรรษที่ 1940 ซึ่งใช้สำหรับไวนิลพลาสติกโซลซึ่งอยู่ในรูปของของเหลว จนกระทั่งต้น ศตวรรษที่ 1960 จึงได้นำมาประยุกต์ใช้กับผงพอลิเอทิลีน

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมด้วยเหตุผลคือ เป็นกระบวนการที่ใช้ความดันต่ำ ดังนั้นแม่แบบที่นำมาใช้จึงเป็นแม่แบบซึ่งไม่มีความซับซ้อนและราคาถูก นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาสม่ำเสมอสามารถเติมสารเสริมแรงลงไปในกระบวนการได้ โดยทั่วไปผิวปราศจากความเครียดและเราสามารถออกแบบผิวของผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะลวดลายต่างๆ ได้ การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้มีการผลิตซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ในจำนวนคงที่ เพราะว่าเวลาในหนึ่งรอบวัฏจักรค่อนข้างนาน เมื่อเทียบกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปหรือการเป่าในแม่แบบ กระบวนการนี้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ มีผนังหนา ซึ่งเราไม่สามารถผลิตด้วยการขึ้นรูปวิธีอื่นๆ เช่น สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความหนาของผนังสูงถึง 10 มิลลิเมตรได้โดยไม่มีปัญหาใดๆ

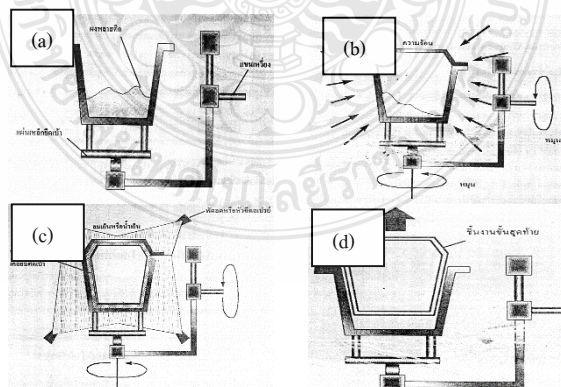
การดำเนินงานในหนึ่งรอบวัฏจักรซึ่งสามารถกระทำได้หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่นในบางกรณีสามารถทำได้โดยทุกกระบวนการทั้งหมดอยู่ในเตาอบหนึ่งเตาอบหนึ่งเตา (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่มากๆ) อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปจะมีการทำงานดังรูปที่ 2.4 แม่แบบมีปลายแขนข้างหนึ่งยึดติดอยู่กับแม่แบบเย็นซึ่งบรรจุผงพลาสติกอยู่ภายในเตรียมพร้อมสำหรับขั้นตอนการให้ความร้อน ในระหว่างที่มีการให้ความร้อนอยู่นั้นแม่แบบจะมีการหมุนรอบแกนหลัก (หมุนรอบแขนจับ) และหมุนตัวรอบแกนรอง (หมุนรอบตัวเอง) ดังรูปที่ 2.5 หลังจากหมุนตัวในเตาอบจนได้เวลาที่กำหนดแล้ว แขนจับนำแม่แบบออกจากเตาอบเพื่อเข้าสู่ ห้องให้ความเย็น (Cooling Chamber) อัตราในการให้ความเย็นมีความสำคัญมาก การให้ความเย็นอย่างรวดเร็วทำให้มีความคุ้มทุนมากกว่า แต่อาจก่อให้เกิดปัญหาของการห่อหรือม้วนตัวของผลิตภัณฑ์ตามมา ดังนั้นโดยทั่วไป มักมีการให้ความเย็นกับแม่แบบด้วยการเป่าอากาศด้วยพัดลม (Blower) ก่อน จากนั้นจึงตามด้วยการสเปรย์น้ำเพื่อให้แม่แบบเย็นลงอีก อัตราในการให้ความเย็นนี้ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ บางครั้งในการเป่าอากาศอาจใช้หัวฉีดอากาศ (Air Jet) แทนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเย็นตัวลง กระบวนการขึ้นรูปโดยการหมุนแม่แบบซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 ประกอบด้วยแขนสามแขนซึ่งยึดจับอยู่กับแม่แบบ ดังนั้นในระหว่างที่แม่แบบตัวที่หนึ่งถูกให้ความร้อน แม่แบบอีกแม่แบบหนึ่งจะอยู่

ในขั้นตอนของการให้ความเย็น และการดำเนินงานจะกระทำอย่างต่อเนื่องกันไป สิ่งสำคัญซึ่งควรระลึกไว้เสมอว่ากระบวนการหมุนในแม่แบบนี้ไม่ใช่การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Casting) ความเร็วที่ใช้ในกระบวนการหมุนในแม่แบบนี้มีความเร็วค่อนข้างช้าคือมีค่าน้อยกว่า 20 รอบต่อนาที และมีอัตราส่วนระหว่างความเร็วในการหมุนรอบแกนหลักต่อความเร็วในการหมุนรอบแกนรองอยู่ที่ 6:1 นอกจากนี้เนื่องจากผิวของแม่แบบทั้งหมดมีระยะทางห่างจากจุดศูนย์กลางของการหมุน (Centre of Rotation) ไม่เท่ากันแรงซึ่งเกิดจากการหมุนเหวี่ยงจะมีแนวโน้มในการทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาของผนังผลิตภัณฑ์ ในความเป็นจริงนั้นเราต้องทำการออกแบบให้จุดตัดของแกนหมุนหลักและแกนหมุนรองไม่ซ้อนทับกับจุดศูนย์กลางของแม่แบบ เพื่อให้ความหนาของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน

การให้ความร้อนกับแม่แบบในกระบวนการนี้เป็นการพาความร้อนซึ่งแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ในรูปของแสงอินฟราเรด ของเหลวร้อน เปลวไฟ และอากาศร้อน โดยการให้ความร้อนด้วยอากาศร้อนจะได้รับความนิยมมากที่สุด อุณหภูมิของเตาโดยปกติจะอยู่ในช่วง 250-450 °C โดยปกติเมื่อเข้าสู่เตาอบแม่แบบมักมีอุณหภูมิไม่สูงนักเนื่องจากแม่แบบถูกสเปรย์ด้วยน้ำหรือเป่าด้วยลมเพื่อดึงชิ้นผลิตภัณฑ์ออกจากแม่แบบก่อนการบรรจุผงพอลิเมอร์ในวัฏจักรการขึ้นรูปใหม่ ดังนั้นจึงต้องอาศัยเวลาค่อนข้างนานในการทำให้แม่แบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการที่ต้องการเพื่อใช้ในการหลอมพลาสติก

2.7.1 หลักการทำงานของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)

ขั้นตอนของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์หมุน (a) เติมน้ำพลาสติกลงในแม่พิมพ์, (b) ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์, (c) หมุนแม่พิมพ์, (d) ปล่อยให้เย็นและถอดชิ้นงาน [13]

2.7.1.1 เดิมวัตถุดิบลงในแม่พิมพ์

ทำโดยเดิมวัตถุดิบที่เราเตรียมไว้ ซึ่งได้คำนวณปริมาณไว้ก่อนหน้านี้แล้วลงในแม่พิมพ์ หลังจากนั้นปิดฝาแม่พิมพ์ แล้วนำเข้าไปวางไว้บนตัวจับ เพื่อล็อกแม่พิมพ์ให้แน่น แล้วเคลื่อนแม่พิมพ์เข้าในห้องของเตาอบเพื่อให้ความร้อน

2.7.1.2 การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์

ให้ความร้อนแก่ด้านนอกของแม่พิมพ์ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 220°C ถึง 400 °C ในขณะเดียวกันทำการหมุนเหวี่ยงแบบสองแกน เมื่อพลาสติกหลอมเหลวมีความสามารถในการเหนียวติด (Tackiness) ซึ่งทำให้พลาสติกบางส่วนถูกเคลือบติดผิวด้านในของแม่พิมพ์ชั้นบางๆ พลาสติกส่วนอื่นๆ ถูกเหวี่ยงหลุดออกไปเนื่องจากอิทธิพลจากการหมุนเหวี่ยงแบบกลิ้งไปกลิ้งมา เมื่อให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ ความร้อนถูกส่งผ่านไปยังพลาสติกชั้นแรกที่เคลือบติดแม่พิมพ์ ทำให้มีความร้อนมากพอที่จะทำให้เกิดการเคลือบชั้นพลาสติกชั้นถัดไปลงบนพลาสติกชั้นแรก อิทธิพลจากการหมุนเหวี่ยงและการส่งผ่านความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเคลือบของพลาสติกเป็นชั้นๆจนหมดพลาสติกหลอมแต่เนื่องจากการนำความร้อน (Heat Conductivity) ของเทอร์โมพลาสติกมีค่าต่ำมาก จึงทำให้การเพิ่มความหนาของชั้นงานที่ละชั้น เป็นไปอย่างช้าๆ จึงส่งผลให้เวลาในการขึ้นรูป (Cycle Time) ของเทคนิคนี้ค่อนข้างนาน

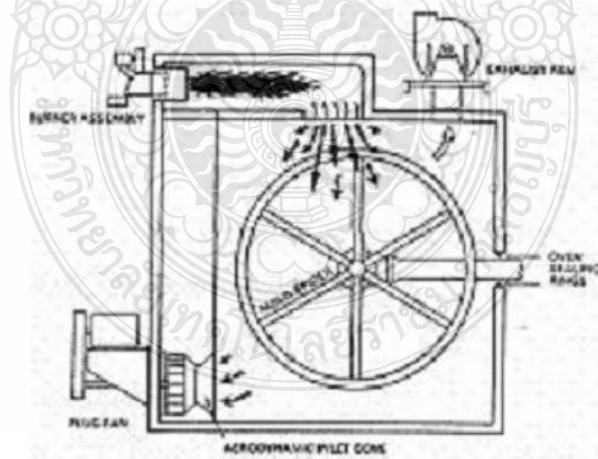
สรุปได้ว่าการหมุนเหวี่ยงแบบกลิ้งไปกลิ้งมา (Tumbling) มีส่วนช่วยให้พลาสติกหลอมเข้าไปสัมผัสกับแม่พิมพ์หรือชั้นของพลาสติกที่จับติดกับผิวของแม่พิมพ์อยู่ก่อนหน้านี้แล้ว หลังจากพลาสติกหลอมเหลวทั้งหมดจับติดตามรูปร่างของแม่พิมพ์แล้ว ให้ความร้อนต่ออีกระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้พลาสติกเชื่อมตัวติดกันในแต่ละชั้นหลอมรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกัน และทำให้ผิวเรียบมากขึ้น การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ในกระบวนการผลิตที่นิยมใช้มีอยู่ 3 วิธี

การเผาแม่พิมพ์โดยตรง (An Open Flame Method) พบมากในการใช้ระบบให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ในเครื่องขึ้นรูป แบบรีดอก แอนด์ โรล เป็นวิธีที่สะดวกในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ขนาดใหญ่ เป็นวิธีที่ประหยัดเพราะจำเป็นต้องสร้างตู้อบและยังสามารถให้กับแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กที่ไม่ต้องใช้ตู้อบอีกด้วย เป็นการใช้เปลวไฟเผาแม่พิมพ์โดยตรง ความร้อนจะแพร่ผ่านแม่พิมพ์จนถึงพลาสติกในแม่พิมพ์ การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ประหยัดในด้านราคาของการจัดสร้างเครื่องจักร แต่จะมีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมส่วนหนึ่งบริเวณรอบๆเครื่องจักร ทำให้ต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งโดยไม่จำเป็น ทั้งยังสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.16



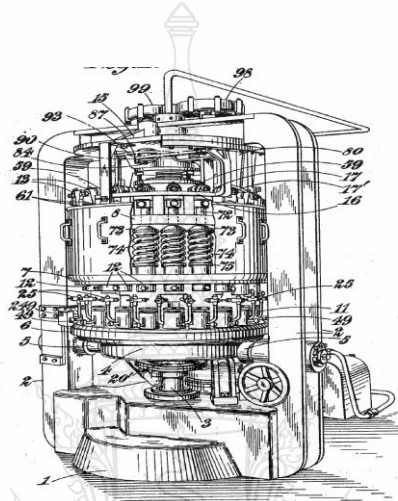
รูปที่ 2.16 แสดงการเผาแม่พิมพ์โดยตรง [13]

การใช้อากาศร้อนในเตาอบ (A Hot Air Recirculating Oven Method) เป็นการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ภายในตู้อบ ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ และ มีการกระจายความร้อนในตู้อบอย่างทั่วถึง ดังรูปที่ 2.17 นอกจากนี้ยังสามารถเลือกวิธีการให้ความร้อนได้หลายวิธี เช่น ใช้เปลวไฟจากแก๊ส, น้ำมันหรือแผงความร้อนจากไฟฟ้าก็ได้ สิ่งที่สำคัญมากก็คือ เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน (Oven Residence Time) ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อความหนาของชิ้นงาน, ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และการนำความร้อนของโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์



รูปที่ 2.17 แสดงการใช้อากาศร้อนในเตาอบ [12]

การใช้น้ำมันร้อนกับผนังแม่พิมพ์ 2 ชั้น (A Hot Oil Jacketed Mould Method) เป็นวิธีการให้ความร้อนที่ดีที่สุด เป็นการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โดยตรง ดีกว่าวิธีที่ 2 คือไม่มีการสูญเสียความร้อนแก่อากาศในตู้อบ รวมทั้งการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการเปิด – ปิดตู้อบ เนื่องจากไม่ใช่ตู้อบ แต่ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากน้ำมันสัมผัสโดยตรงกับผนังแม่พิมพ์ ทำให้การส่งผ่านความร้อนเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว แต่ก็เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าวิธีอื่นๆ ในด้านราคาของการจัดสร้างแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การใช้น้ำมันร้อนกับผนังแม่พิมพ์ 2 ชั้น [12]

2.7.1.3 การหล่อเย็น

ทำการหมุนเหวี่ยงต่อจากขั้นตอนที่แล้ว แต่เลื่อนออกมาจากเตาให้ความร้อน แล้วนำเข้าสู่ตู้หล่อเย็น เพื่อทำการหล่อเย็นโดยใช้ลมเย็นเป่าที่ด้านนอกแม่พิมพ์ แต่บางเทคนิคใช้การฉีดน้ำเย็นหลังจากที่พลาสติกภายในแม่พิมพ์เป็นของแข็งแล้ว เลื่อนแม่พิมพ์ออกจากตู้หล่อเย็น

2.7.1.4 ขั้นตอนการถอดชิ้นงาน

ถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วเริ่มวัฏจักรใหม่ของการผลิต ขั้นตอนการแปรรูปพลาสติกด้วยเทคนิคแม่พิมพ์หมุนซึ่งมีทั้งหมด 4 ขั้นตอนจากขั้นตอนการผลิตจะเห็นได้ว่าการผลิตชิ้นงานโดยเทคนิคนี้ จะไม่ได้ใช้ความดันและแรงใดๆมากระทำ จึงทำให้ชิ้นงานพลาสติกที่ได้ ไม่มีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) จึงทำให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดี สำหรับเวลาในการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก ความหนาของผนังชิ้นงานตามความต้องการการผลิต และ ความหนาของผนังแม่พิมพ์ ซึ่งเวลาในการขึ้นรูป มักอยู่ในช่วง 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง 30 นาที

2.7.2 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน

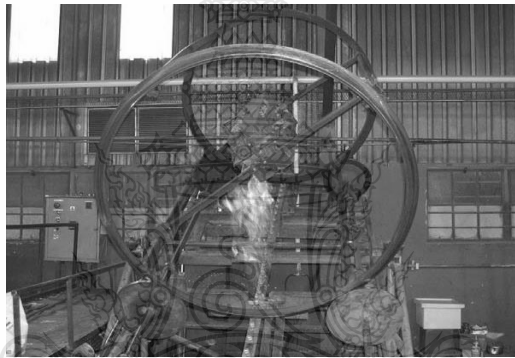
2.7.2.1 ข้อดีของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน แม่พิมพ์มีลักษณะเรียบง่ายและราคาไม่แพง เหตุผลก็เพราะการขึ้นรูปแบบหมุนเป็นกระบวนการผลิตที่เกิดแรงดันน้อย และแม่พิมพ์ที่ใช้ไม่มีความจำเป็นต้องมีความแข็งแรงสูง แม่พิมพ์ที่มีขนาดและรูปร่างที่ใช้แตกต่างกันไป และสามารถนำมาขึ้นรูปพร้อมกันในกระบวนการผลิตได้ มีความเหมาะสมในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่โดยเฉพาะและมีลักษณะพิเศษ คือ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มี 2 ชั้นได้ ชิ้นงานที่ได้มีความหนาของชิ้นงานสม่ำเสมอตลอดชิ้นงานเช่นเดียวกับการขึ้นรูปด้วยการเป่า (Blow Molding) หรือ การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) ชิ้นงานที่ได้ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นภายใน (Free Stress) มีความแข็งแรง ไม่มีแนวรอยเชื่อมหรือไม่เกิดรอยเนื่องจากการฉีด (Sprur Mark) จากกระบวนการผลิต ลักษณะพิเศษของการขึ้นรูปแบบหมุน สามารถผลิตชิ้นงานให้มีขนาดและรูปร่างหลายแบบ ตั้งแต่ถึงขนาดเล็กลงถึงตัวถังที่มีขนาด 100,000 ลิตร แท้จริงแล้ว การขึ้นรูปแบบหมุน เหมาะในเชิงเศรษฐกิจเนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงนัก ขั้นตอนในกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนและยังมีแนวโน้มในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้นทุกปี

2.7.2.2 ข้อเสียของ การขึ้นรูปแบบหมุน ราคาวัตถุดิบสูง เพราะพลาสติกที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเม็ด ต้องลงทุนมาดเม็ดให้เป็นผง โดยอาจจะซื้อมาใช้เอง ดังนั้น จึงทำให้วัตถุดิบมีราคาสูงไม่เหมาะสมที่จะผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ที่มีชิ้นส่วนเล็ก ๆ หลายชิ้นมาประกอบกันเพราะพลาสติกและแม่พิมพ์ต้องใช้ความร้อนเตาอบจนได้อุณหภูมิสูง จากนั้นต้องอยู่ในสภาวะปกติซึ่งจะมีผลใช้เวลาในการทำงานนาน วัตถุดิบหลายชนิดที่ใช้ใน การขึ้นรูปแบบหมุน ยังมีข้อจำกัดอยู่ แม้ปัจจุบันจะมีการใช้ปริมาณ PE สูงกว่า 90% ของวัตถุดิบที่ใช้ทั้งหมด ช่วงในการเติมวัตถุดิบลงในแม่พิมพ์ และขณะเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ยังต้องอาศัยแรงงานอยู่ การออกแบบต้องคิดคำนวณทางเรขาคณิต เพื่อนำมาใช้เพิ่มความแข็งแรงประให้สูงขึ้น เนื่องจากการเสริมแรงด้วยเทคนิคอื่นๆทำได้ยาก

2.7.3 ชนิดของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน

2.7.3.1 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงชนิด ร็อก แอนด์ โรล (Rock and Roll - Machine)

เป็นเครื่องที่ราคาในการผลิตไม่สูงมากนักเหมาะกับการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ เช่น ถังทรงกระบอก โดยจะหมุนขนานกับพื้น และ เครื่องจะทำการกระดกทางซ้ายและขวาสลับกัน โดยทำมุมประมาณ 45 องศา โดยการหมุนรอบตัวเองจะเร็วกว่าการกระดกดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ส่วนเครื่องขึ้นรูปแบบ Rock and Roll อีกแบบเรียกว่า Rocking Oven Machine โดยยังคงหลักการทำงานที่คล้ายกัน ต่างกันที่แม่พิมพ์จะหมุนอยู่ในตู้อบทำให้ลดการสูญเสียพลังงานความร้อนลงไป เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีความยาวเร็ว เช่น เสาไฟฟ้า เป็นต้น



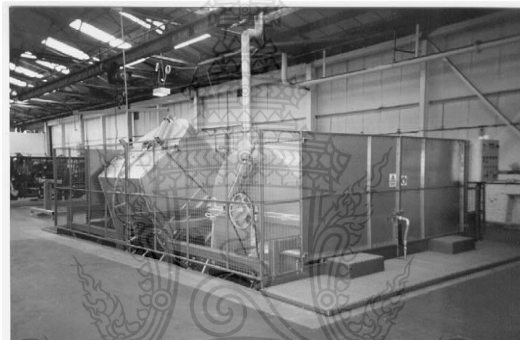
รูปที่ 2.19 แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด ร็อก แอนด์ โรล (Rock and Roll Machines) [13]



รูปที่ 2.20 แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด ร็อก แอนด์ โรล (Rock and Roll Machines) ที่ทำการจัดสร้างขึ้น

2.7.3.2 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด เตอบแบบกล่องขนาดเล็ก (Box Oven - Machines)

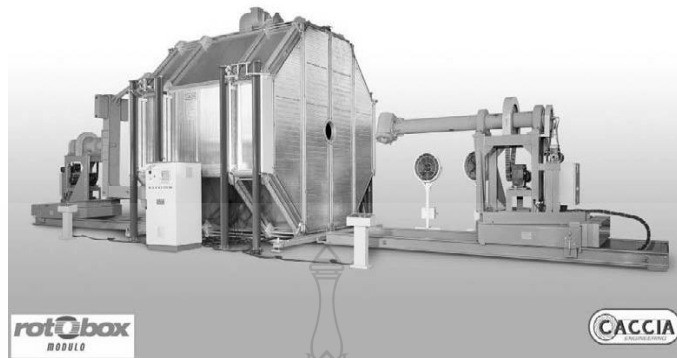
ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตลูกบอล, ตุ๊กตาเด็กเล่นและชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องแบบนี้จะใช้การหมุนทั้ง 2 แกนในตู้อบใช้แก๊สหรือน้ำมันในการให้ความร้อนมีระบบหล่อเย็นอย่างง่าย ๆ โดยชิ้นงานจะเคลื่อนตัวออกจากตู้อบแล้วถูกลดอุณหภูมิโดยน้ำหรืออากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 จากนั้นถูกยกตัววางลงบนลูกกลิ้งและเลื่อนออกมาจนถึงบริเวณเดิมวัสดุ (Loading) นำชิ้นงานออก (Unloading) โดยเปิดแม่พิมพ์เอาชิ้นงานออกแล้วเดิมวัสดุดับลงไปใหม่ เนื่องจากยังต้องอาศัยแรงงานคนในหลายขั้นตอนตั้งแต่การเปิด-ปิดแม่พิมพ์ การนำแม่พิมพ์ออกจากตู้อบ การหล่อเย็น ทำให้เครื่องแบบนี้ล้าสมัยและถูกแทนที่ด้วยเครื่องแบบอื่นๆ



รูปที่ 2.21 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด เตอบแบบกล่องขนาดเล็ก [13]

2.7.3.3 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด กระสวย (Shuttle Style Machines)

เป็นเครื่องที่ใช้งานได้ง่าย ราคาเครื่องไม่สูงมากนัก มักใช้ในการผลิตชิ้นงานจำพวกถังหรือภาชนะบรรจุขนาดใหญ่ ลักษณะการทำงานของเครื่อง Shuttle A จะเคลื่อนที่เข้าสู่เตอบเมื่อปิดตู้อบแม่พิมพ์จะหมุนพร้อมกับให้ความร้อนจนถึงเวลาที่ตั้งไว้ แล้วจึงเคลื่อนที่ออกจากเตอบเข้าสู่ระบบหล่อเย็น ในขณะที่เดียวกัน Shuttle B ที่ได้รับการบรรจุวัตถุดิบแล้วจะเคลื่อนสู่ตู้อบต่อไป เราสามารถออกแบบได้โดยใช้เพียง 1 Mould Shuttle และ 1 ตู้อบก็ได้หรืออาจจะใช้ 2 Mould Shuttle กับ 1 ตู้อบ เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตให้มากขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแบบ กระจกสวยเดี่ยว [13]



รูปที่ 2.23 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแบบ 2 กระจกสวย [13]

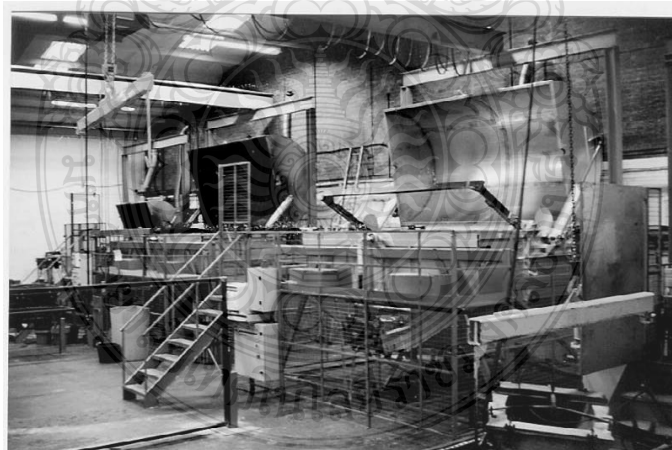
2.7.3.4 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด ฝาหอย (Clamshell Rotational Molding Machines)

เป็นเครื่องที่ถูกพัฒนามาในปี 1980 ด้วยความต้องการที่มีราคาต่ำพื้นที่ติดตั้งน้อย ต้องการแรงงานมนุษย์น้อยและได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง ลักษณะการทำงานของเครื่องคือ แม่พิมพ์จะถูกให้ความร้อนในตู้อบจนได้เวลาที่ถูกระบุไว้แล้วทำการหล่อเย็นโดยใช้พัดลมเป่าให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำลงหรืออาจจะใช้น้ำเป็นระบบหล่อเย็นก็ได้ โดยที่แม่พิมพ์ยังคงอยู่ในตู้อบ และสามารถใช้ลักษณะแขนได้ทั้ง 2 แบบจึงทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ทั้งขนาดใหญ่และเล็กขึ้นอยู่กับขนาดของตู้อบ ข้อดีคือส่วนให้ความร้อนและส่วนการหล่อเย็นจะใช้ตู้เดียวกัน จึงทำให้เครื่องชนิดนี้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย ส่วนข้อเสียคือเครื่องชนิดนี้ค่อนข้างจะใช้พลังงานมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากการเพิ่ม

อุณหภูมิในตู้อบให้สูงพอจากนั้นจะลดลงต่ำเมื่อทำการหล่อเย็นแล้วยังต้องเพิ่มอุณหภูมิอีกเมื่อต้องการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานใหม่ในตู้อบเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.24 ในแบบ 6 แขน จะมีการทำงานเป็น 3 จังหวะ ดังรูปที่ 2.25 เนื่องจากมีตู้อบถึง 3 ห้องและแต่ละห้องก็ใช้เวลาไม่เท่ากัน ตามที่กล่าวมาในข้างต้นขีดจำกัดของเครื่องลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับโมลสวิง คือ จำกัดไว้แค่ 900 mm – 1200 mm เครื่องทั้ง 2 แบบคือ ทั้งแบบ 3 แขน และ 6 แขน ต่างก็จะหมุนแม่พิมพ์ทั้ง 2 แขนเหมือนกันและให้ความร้อนด้วยระบบการเผาแก๊ส ให้ความร้อนให้ตู้อบ ส่วนระบบหล่อเย็นใช้ได้ทั้งลมและน้ำ



รูปที่ 2.24 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด ฝาหอยเดี่ยว [13]



รูปที่ 2.25 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด ฝาหอยคู่ [13]

2.7.3.5 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด แขนตรึง(Fixed – Arm Turret Machines)

เป็นเครื่องที่ได้รับการคิดค้นพัฒนา ในช่วงปลายของทศวรรษที่ 50 จนถึงต้นยุคทศวรรษที่ 60 มีขนาดของเครื่องเล็กที่สุด คือ เส้นผ่าศูนย์กลางโมลสวิง 40 นิ้ว ใหญ่ที่สุดถึง 150 นิ้ว เป็นเครื่องที่ได้รับความนิยมมากแบบหนึ่งในปัจจุบัน ให้ผลตอบแทนคุ้มค่า ผลิตได้จำนวนมากและซ่อมบำรุงรักษาสะดวก มีแบบต่างๆ หลายแบบ เช่น แบบ 3 และ 4 แขน เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจแตกต่างกันตามการวางส่วนต่างๆของจำนวนห้อง ดังรูปที่ 2.26 ในแบบ 3 แขน แต่ละแขนจะติดแน่นอยู่กับ Turret ตรงกลางแต่ละแขนทำมุม 120 องศา แขนจะเคลื่อนที่พร้อมๆกัน จึงอาจมีปัญหา เช่น ต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนและการหล่อเย็นที่ไม่เท่ากัน เป็นต้น ซึ่งสามารถแก้ไข ได้โดยใช้เครื่องแบบ 4 แขน ซึ่งสามารถเพิ่มห้องได้อีก 1 ห้อง โดยอาจจะเป็นส่วนตัวให้ความร้อนหรือส่วนหล่อเย็นก็ได้ตามความเหมาะสม โดยแต่ละแขนจะทำมุม 90 องศา

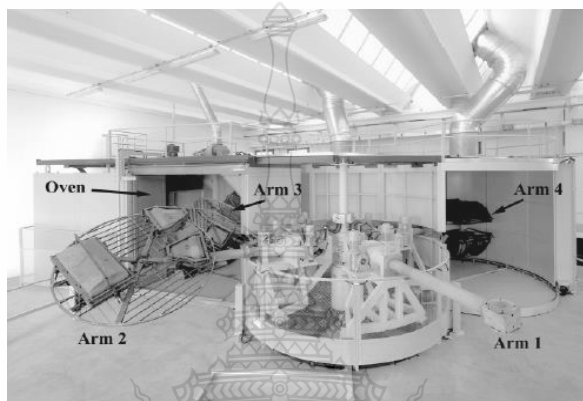


รูปที่ 2.26 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน ชนิด แขนตรึง [13]

2.7.3.6 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด แขนอิสระ(The Independent Arm - Machines)

เป็นเครื่องที่ได้รับความนิยมมากในปี 1980 เป็นต้นมา และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด แขนอิสระ เป็นการนำข้อดีของเครื่องแบบกระสวย และ แบบ แขนตรึง มารวมกันแต่ความเป็นระบบอัตโนมัติมากกว่าและมีความสะดวกในการใช้งานในกระบวนการผลิต จากรูปที่ 2.27 เป็นเครื่องแบบ 5 สถานี 4 แขน โดยชนิดของสถานีนั้นสามารถจัดได้หลายแบบ เช่น อาจให้ 2 ตู้อบ 2 การหล่อเย็น และ 1 ส่วนเติมวัสดุ และ ส่วนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เป็นต้น โดยดูจากความเหมาะสมในกระบวนการผลิต ส่วนประกอบของเครื่องจะมีส่วนขับเคลื่อนอยู่ตรงกลางแต่ละแขนจะวางขนานกับพื้นยื่นออกจากส่วนขับเคลื่อน สามารถใช้

แม่พิมพ์ที่ต่างจากตัวอื่นหรือใช้วัสดุต่างกันได้ การเคลื่อนที่ของแต่ละแขนจะเป็นอิสระต่อกัน คือไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกัน แต่ละแขนจะเคลื่อนที่ไปตามสถานีต่างๆตามเวลาที่ได้อั่งไว้หรือวางโปรแกรมไว้ ซึ่งต่างจากเครื่องแบบ แขนตรึงเพราะว่ามีเสาต้รับน้ำหนักเฉพาะแขนใครแขนมัน ส่วนที่เหมือนกับเครื่องแบบ กระจาย ก็คือ มีการใช้ตู้อบและการหล่อเย็นรวมกัน โดยให้ผลผลิตต่อเวลาที่ี่สุด



รูปที่ 2.27 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง ชนิด แขนอิสระ [13]

2.7.4 หลักการควบคุมการผลิต

ถ้าหากเราตั้งอุณหภูมิไว้หลายๆตำแหน่งในแม่พิมพ์ เช่น เครื่อง Rotational Molding แบบคารูเซล (Carousel) ได้กราฟดังรูปที่ 2.28 ในกรณีนี้ตั้งอุณหภูมิเตาไว้ที่ 300°C กราฟเส้นบนแสดงเส้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของอากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์

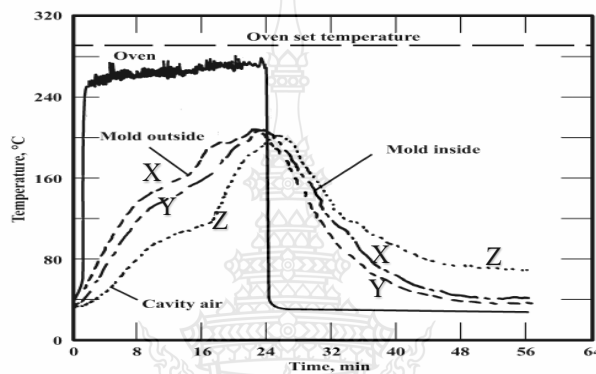
เมื่อแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าไปในเตาและปิดประตู เส้นกราฟอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น และขึ้นอุณหภูมิของเตาที่บอกทางหน้าจอเครื่อง สมรรถภาพทางความร้อนละเวลาที่ใช้เตาอบ

เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน สมัยใหม่ใช้อุณหภูมิอากาศภายในตัวควบคุมผลกลับมา (Feedback) อย่งไรก็ตามรูปที่ 2.28 เส้นอุณหภูมิเส้นนี้ แสดงความสัมพันธ์ กับอุณหภูมิของแม่พิมพ์หรืออาจแสดงให้เห็นโดยเส้น X,Y และ Z

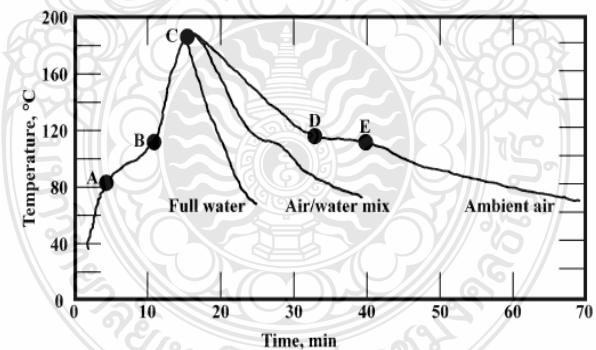
อุณหภูมิตัวสุดท้ายไม่ขึ้นกับอุณหภูมิภายในเตาหรืออุณหภูมิที่ตั้งไว้ แต่ขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ และประเภทที่ใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของแม่พิมพ์วัสดุ และความหนา ด้วยเหตุผลนี้ผลที่ได้จึงไม่เป็นจริงตามที่คาดไว้ เพื่อให้ได้พื้นฐานตามกระบวนการผลิตที่แน่นอน

เส้น X ในรูปที่ 2.28 แสดงการเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกแม่พิมพ์ และเส้น Y แสดงการเพิ่มอุณหภูมิของผิวด้านใน เส้นกราฟนี้ขึ้นกับความหนาของผนัง และส่วนอื่นๆ เส้น Z แสดงอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอื่นๆ แต่เส้นนี้มีความสัมพันธ์กับการไหลของผงพลาสติกขณะหลอมเหลว

เมื่อพิจารณาเส้น Z อาจเขียนออกมาให้อยู่ในรูปที่ 2.29 จากรูปแสดงขั้นตอนต่างๆ เกี่ยวกับการหลอมเหลวของผงพลาสติกที่ปกคลุมชั้นในแม่พิมพ์



รูปที่ 2.28 แสดงการวัดอุณหภูมิในตู้อบและแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน [12]



รูปที่ 2.29 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิอากาศขณะให้ความร้อน [12]

ขั้นที่ 1 เริ่มต้นของกระบวนการผลิต แม่พิมพ์และพอลิเมอร์ที่ยังไม่ถูกหลอม การไหลของผงพลาสติกเป็นไปอย่างอิสระในแม่พิมพ์ที่จุด A อุณหภูมิอากาศภายในเพิ่มขึ้นคงที่ ขณะที่อุณหภูมิเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยผงพลาสติก และอากาศ เมื่อเกิดความร้อนเพียงพอพลาสติกก็เริ่มหลอมและเกาะที่ผนังแม่พิมพ์

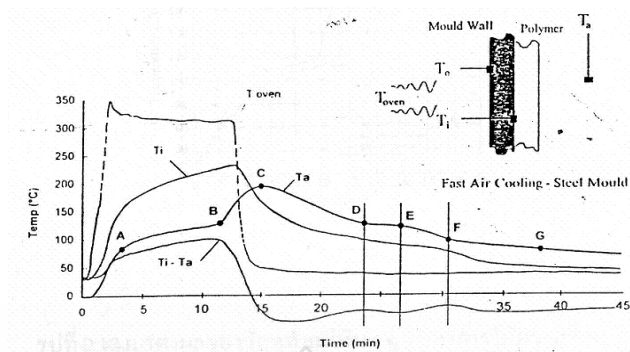
ขั้นที่ 2 ที่จุด A พลาสติกจะหลอมตัวเกาะติดผิวชั้นในแม่พิมพ์เป็นชั้นแรก อัตราการเพิ่มอุณหภูมิช้าลง จากนั้นผงพลาสติกก็จะก่อตัวเป็นชั้นที่ 2 และชั้นต่อ ๆ ไป เส้นอุณหภูมิของอากาศภายในลดลง เนื่องจากผงพลาสติกดึงความร้อนเพื่อใช้หลอมละลายตัวมันเอง ทำให้อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ลดลง ซึ่งการที่ความร้อนเคลื่อนที่ไปได้ช้าเพราะพลาสติกมีคุณสมบัตินำความร้อนต่ำ

ขั้นที่ 3 ที่จุด B ผงพลาสติกทั้งหมดถูกหลอมละลาย และเกาะติดผิวชั้นในของแม่พิมพ์เป็นชั้น ๆ อุณหภูมิอากาศภายในเพิ่มสูงขึ้น เส้นกราฟอุณหภูมิมิมีความชันมากขึ้นซึ่งพลังงานความร้อนที่ส่งผลเข้าไปในแม่พิมพ์ลดลงเมื่อผ่านจุด B ไปแล้ว เส้นอุณหภูมิยังเพิ่มขึ้นต่อไป พลาสติกที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัว และฟองอากาศที่อยู่ระหว่างผงพลาสติกด้วยกันเองลดลง ชั้นในเริ่มเรียบและมีความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้น และที่จุด C นี้ อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์มีค่ามากที่สุด โดยขึ้นกับอุณหภูมิเตา และเวลาที่ใช้ไปที่จุดสูงสุด (Peak) ของเส้นอุณหภูมิ สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการกระทบ (Impact Test)

ขั้นที่ 4 เมื่อแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าไปในห้องหล่อเย็น ก่อนจะถึงจุด C อุณหภูมิภายในยังคงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนของอากาศและพอลิเมอร์ยังมีเหลืออยู่ อุณหภูมิภายในห้องหล่อเย็นที่ให้พอเหมาะ ทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิอากาศที่ล้อมรอบแม่พิมพ์เริ่มเย็นลงส่งผลต่อเวลาในการหล่อเย็นที่เร็วขึ้น และถ้าอัตราการหล่อเย็นเร็วเกินไป ทำให้พลาสติกเกิดการบิดตัว (Wrapage Problems) และถ้าอัตราการหล่อเย็นช้าด้วยแล้วส่งผลในแง่ทางเศรษฐศาสตร์ในขั้นนี้พลาสติกอยู่ในรูปพลาสติกหลอมเหลวเป็นชั้นๆ ที่ผิวชั้นในแม่พิมพ์ แต่ยังไม่เป็นของแข็ง

ขั้นที่ 5 วัสดุคิบบางชนิด เช่น พอลิเอทิลีน มีจุดหักมุม (Kink) เป็นจุดที่ทำให้เกิดผลึกตรงกับจุด D ความร้อนที่ถูกดูดกลืนถ่ายเทออก และอุณหภูมิภายในอยู่ในระดับคงที่ ความยาวของเส้นกราฟแนวที่ราบสูงมีความสัมพันธ์กับปริมาณที่ใช้วัสดุคิบไป PE แสดงจุดหักมุมที่เกิดขึ้น ตำแหน่งของเส้นกราฟสัมพันธ์กับการหลอมเหลวระหว่างจุด A-B เกาะตัวกันลดลง เนื่องจากผลึกเกิดได้ต้องใช้อุณหภูมิต่ำ

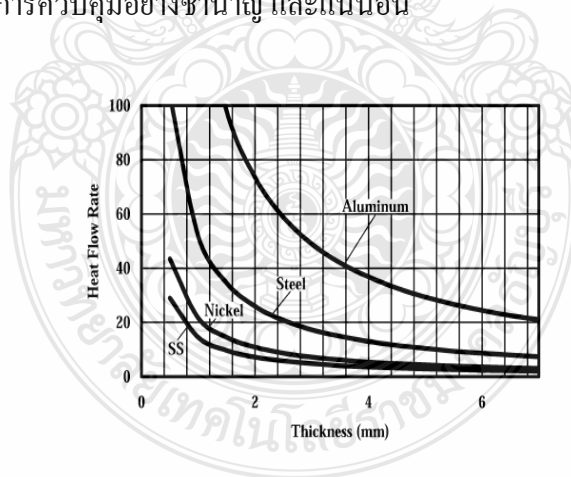
ขั้นที่ 6 ที่จุด E เส้นกราฟมีการแปรผัน พลาสติกเกาะตัวกันสร้างพันธะ และเป็นของแข็งโดยความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์ออกเป็นพลาสติกเริ่มเย็นตัว และความชันของเส้นกราฟเปลี่ยนไป ณ ที่จุด F พันธะระหว่างพลาสติกจะจับกันเอง แต่ไม่เกาะติดกับผนังแม่พิมพ์ เป็นผลทำให้หล่อเย็นแม่พิมพ์ จุด D, E และ F จะมีลักษณะคล้ายกัน ถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศภายใน และที่ผิวชั้นในของพลาสติก ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงอุณหภูมิอากาศภายในและอุณหภูมิแม่พิมพ์ขณะให้ความร้อน [12]

การหล่อเย็นแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะหมุนพร้อมไปด้วยอัตราการหล่อเย็นมากหรือน้อย บ่งบอกถึงคุณภาพของชิ้นงานในขั้นตอนสุดท้ายนี้ แต่ถ้าส่วนต่างๆ ภายในแม่พิมพ์เกิดการแยก การหล่อเย็นก็จะทำได้ยากที่จุด G ตามรูปที่ 2.30 เป็นจุดที่นำชิ้นงานออก (Demoulding Point)

ขนาดของอุณหภูมิอากาศภายในโปรไฟล์ ไม่เปลี่ยนแปลง ขณะผ่านสภาวะต่างๆ หลายแบบ ประกอบด้วยวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์, ขนาดแม่พิมพ์, ความหนาของแม่พิมพ์, ความหนาส่วนอื่นๆ, วัสดุอื่นๆ และอุณหภูมิเตาอบ ลักษณะเด่นคล้ายคลึงกันก็คือตำแหน่งต่างๆ ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะ ซึ่งต้องใช้ในการควบคุมอย่างชำนาญ และแน่นอน



รูปที่ 2.31 แสดงผลของวัสดุทำแม่พิมพ์ต่อเวลาการให้ความร้อน [12]

ผลกระทบต่อวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ รูปที่ 2.31 แสดงผลกระทบต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ความแตกต่างคุณสมบัติทางความร้อน และความหนาของผนังจริงมีผลต่อการใช้เวลาทั้งหมดในการขึ้นรูปหนึ่งชิ้นงาน (Cycle Times)

โดยปกติทั่วไปวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์มี 2 ชนิด ได้แก่ เหล็ก และอะลูมิเนียม แม่พิมพ์ที่ทำจากอะลูมิเนียมต้องทำให้มีความหนามากขึ้น เพื่อทดแทนความแข็งแรงที่ต่ำ อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมยังมีความสมบัติการถ่ายเทความร้อน ได้ดีกว่าเหล็ก ดังนั้น การสูญเสียความร้อนน้อยกว่าเหล็ก ในขณะที่ทำการผลิตอุณหภูมิเคลื่อนที่ผ่านผนังแม่พิมพ์ที่ทำจากอะลูมิเนียม เคลื่อนผ่านเร็วกว่าผนังแม่พิมพ์ที่ทำมาจากเหล็ก อุณหภูมิต่ำเป็นเหตุให้เกิดปัญหาได้ เมื่อใช้วัตถุดิบ เช่น พอลิคาร์บอเนต ต้องการความร้อนผ่านเร็ว และอัตราการป้อนวัตถุดิบสูง เราสามารถวัดความแตกต่างของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง โดยเฉพาะแม่พิมพ์หรือวัสดุที่ใช้ทำเป็นแม่พิมพ์ อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ในกระบวนการผลิตแบบหมุน (Rotational Moulding) เมื่อแม่พิมพ์อยู่ภายใต้สภาวะพลังงานความร้อนป้อนเข้า ต่อ หน่วยเวลา จะเท่ากับ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของวัสดุทำแม่พิมพ์

$$\text{จะได้ : } hA(T_0 - T) = \rho C_p V (dT/dT) \dots\dots\dots(1)$$

$$hAdT = \rho C_p V (dT/(T_0 - T))$$

อินทิเกรตสมการ

$$hA \int_0^t dt = \rho C_p V \int_{T_i}^T \left(\frac{dT}{T_0 - T} \right)$$

$$hAt = -\rho C_p V \log_e((T_0 - T)/(T_0 - T_i))$$

$$\text{จะได้ : } ((T_0 - T)/(T_0 - T_i)) = e^{-hAt/\rho C_p} \dots\dots\dots(2)$$

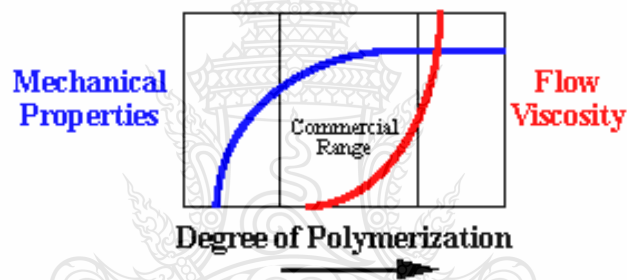
สมการที่ 2.3 แสดงการคำนวณ ค่าของอุณหภูมิ และเวลา ขณะที่มีการให้ความร้อนในกระบวนการ

- h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (w/m².k)
- A คือ พื้นที่ผิวแม่พิมพ์ (m²)
- T₀ คือ อุณหภูมิภายในตู้อบ (°C)
- T คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (°C)
- ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุทำแม่พิมพ์ (Kg/m³)
- C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (J/Kg.°K)
- V คือ ปริมาตรของผนังแม่พิมพ์ (m³)
- t คือ เวลา (s)
- T_i คือ อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ (°C)
- β คือ อัตราส่วนระหว่าง พื้นที่ผิวต่อปริมาตร (A/V) (1/m)

จากสมการที่ 2.3 เป็นสูตรที่ใช้ในการคำนวณ ค่าของอุณหภูมิ และเวลา ขณะที่มีการให้ความร้อนในกระบวนการ โดยอุณหภูมิที่คำนวณได้เป็นค่าอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์และอุณหภูมิภายในคูลตามทฤษฎี โดยค่าตัวแปรต่างๆจะมีค่าต่างกันออกไปตามแต่ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

2.8 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล (Measurement of Molecular Weight)

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุดังกล่าว ทั้งในด้านของความหนืดและสมบัติด้านการไหล (ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูป) และสมบัติเชิงกล (เช่น ค่าการทนแรงดึง การยืดตัว) ดังแนวโน้มทั่วไปที่แสดงในรูปที่ 3.32 ดังนั้นการทราบค่าเฉลี่ยน้ำหนัก โมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญและเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อประโยชน์ในการเลือกนำพอลิเมอร์ไปใช้งานได้อย่าง



รูปที่ 3.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันกับสมบัติเชิงกลและความหนืดของพอลิเมอร์ [14]

เทคนิคสำหรับหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลแต่ละแบบจะได้อมาจากการทดลองร่วมกับการทำการคำนวณด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

- End group analysis (absolute method)
- Osmometry (absolute method)
- Viscometry
- Gel permeation Chromatography
- Light scattering (absolute method)

โดยแต่ละเทคนิคจะให้ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันและมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย น้ำหนักโมเลกุลในช่วงที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5

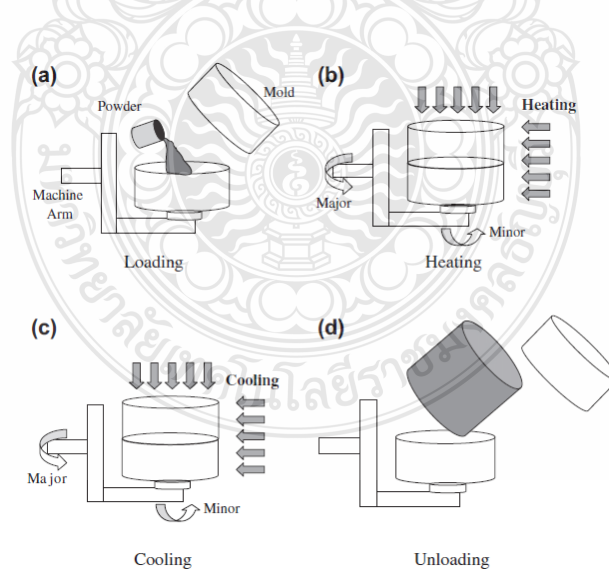
ตารางที่ 2.5 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ที่ได้จากเทคนิคต่างๆ [14]

Method	Type	Molar mass range (g/mol)	Average value
Membrane osmometry	A	$10^4 - 10^5$	M_n
End group analysis	E	$< 10^4$	M_n
Light scattering	A	$10^3 - 10^7$	M_w
Viscometry	R	$10^2 - 10^7$	M_v
Size exclusion chromatography (SEC) or GPC	R	$10^2 - 10^7$	M_n, M_v, M_w, PDI

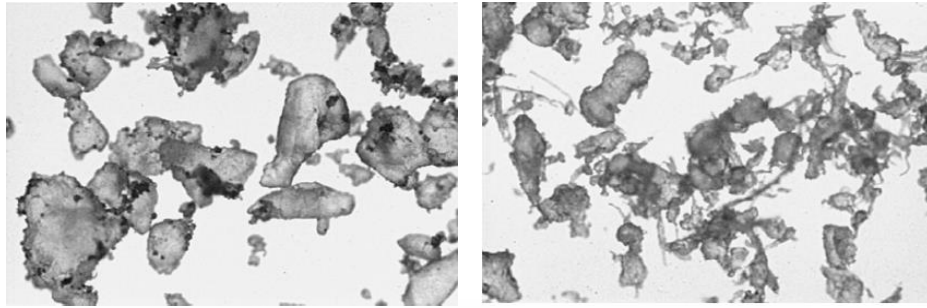
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้การทดสอบ Gel Permeation Chromatography (GPC) มาใช้ในการทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุล เนื่องจากได้ค่าที่หลากหลาย และค่าน้ำหนักโมเลกุลที่หาได้อยู่ในช่วงที่กว้าง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 P.J. Nugent และคณะ [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน หรือ กระบวนการขึ้นรูปแบบเข้าหมุน โดยกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ค่อนข้างเล็กของอุตสาหกรรมพลาสติกทั่วโลกและประมาณ 0.7% ของปริมาณรวมของการผลิตทั่วโลกของพลาสติก เริ่มต้นตั้งแต่ปลายปี 1950 ด้วยการนำ Polyvinylchloride (PVC) มาใช้ในการขึ้นรูปจนกระทั่งกลายมาเป็นพอลิเอทิลีนเป็นส่วนใหญ่ ความก้าวหน้าทางด้านพลาสติกที่เล็กน้อย แต่เป็นที่น่าสนใจในตลาดพลาสติกโลกมันมีความเป็นไปได้มากที่จะออกแบบและขนาดผลิตภัณฑ์จาก โดยทั่วไปจากถังตัวอย่าง ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลาย เช่น เป็นกลุ่มยานยนต์ที่มีความซับซ้อน และการใช้งานเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ในอวกาศ การถูกใช้งานในงานที่มีรูปแบบที่ซับซ้อนมากขึ้นทำให้กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวงนี้มีการเจริญเติบโตด้วยรูปแบบที่ไม่เหมือนกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนด้วยความเรียบง่ายของกระบวนการ และผลิตภัณฑ์ในรูปของถังทำให้เทคโนโลยีนี้มักถูกมองข้าม แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มในปัจจุบันและวิสัยทัศน์ของผลิตภัณฑ์พลาสติกทำให้มีการพัฒนาทั้งในด้านของวัสดุดิบและกระบวนการก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้มีการพัฒนาตลอดเวลา ในงานวิจัยนี้จึงกล่าวถึงพื้นฐานของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.33 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.34 การออกแบบแม่พิมพ์อย่างง่าย เพื่อช่วยในการแนะนำและเป็นแนวทางในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

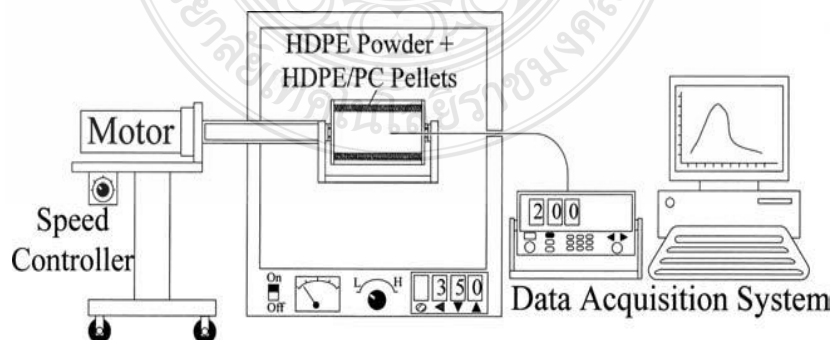


รูปที่ 2.33 แสดงถึงรูปแบบในกระบวนการขึ้นรูป [1]

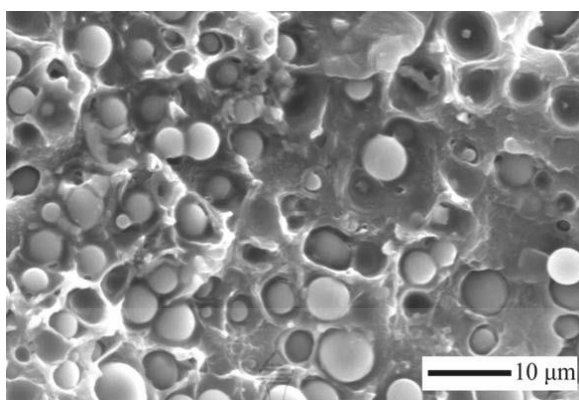


รูปที่ 2.34 แสดงถึงลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป [1]

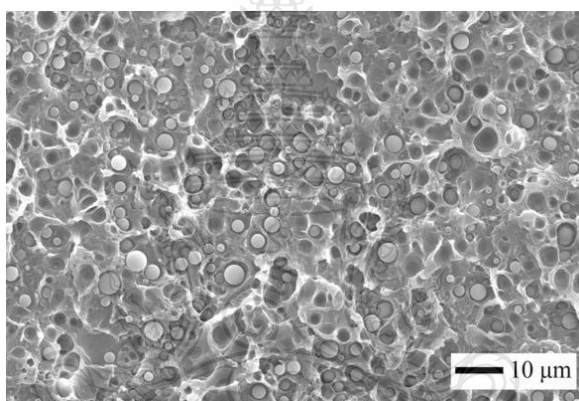
2.9.2 Shih-Jung Liu, Kang-Ming Peng [19] ได้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ซึ่งได้กลายเป็นหนึ่งกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกที่มีลักษณะกลวงที่สำคัญ ในบทความนี้มีเป้าหมายเพื่อจะทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่ใช้พอลิคาร์บอเนต (PC) เป็นตัวช่วยเสริมแรงใน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ในการดำเนินการได้ใช้เครื่องที่มีลักษณะเป็นเตาสามารถควบคุมอุณหภูมิและวัตถุดิบภายในได้ โดยเป็นการหมุนแบบแกนเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.35 ก่อนทำการขึ้นรูป พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ได้ถูกผสมด้วยเครื่อง Twin-Screw Extruder จากนั้นทำการตัดให้อยู่ในรูปของเม็ดพลาสติก จากนั้นนำผง พอลิเอทิลีนผสมกับเม็ด PC/เอทิลีน มาผสมแห้งและทำการขึ้นรูปแบบหมุน โดยใช้แม่พิมพ์รูปกล่องดังแสดงในรูปที่ 2.36 และรูปที่ 2.37 จากการทดลองพบว่า การทนต่อแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ พอลิคาร์บอเนต (PC) ในขณะที่การทนต้อแรงดึงนั้นมีค่าลดลง การเพิ่มอัตราการหล่อเย็นพบว่า การทนต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นแต่การทนต้อแรงดึงมีค่าลดลง การที่มีอุณหภูมิของอากาศภายในที่เหมาะสมจะทำให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะของเครื่องที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [19]

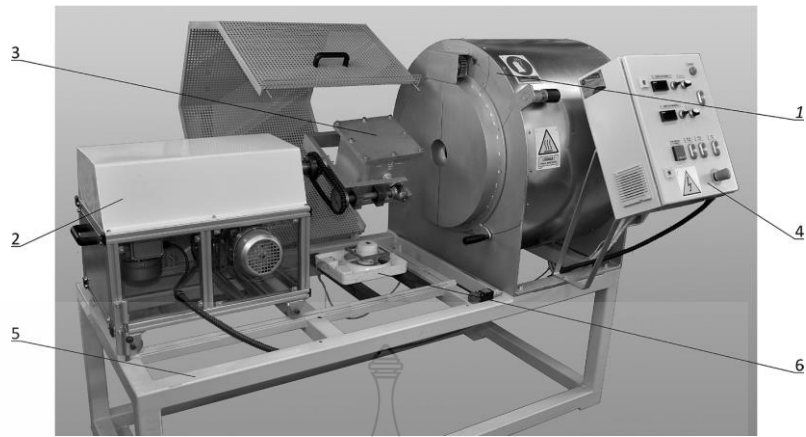


รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะของเม็ดพลาสติก HDPE/PC [19]

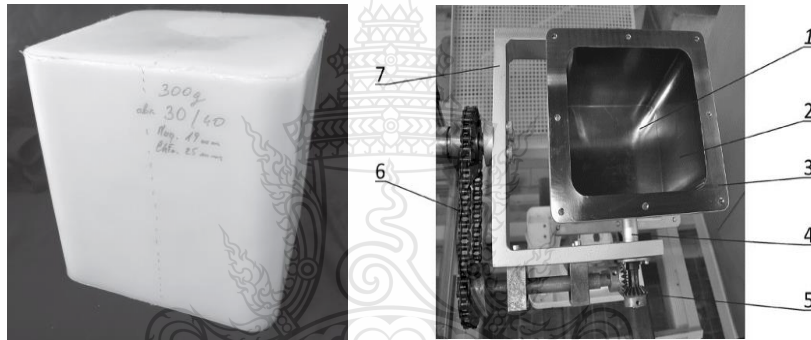


รูปที่ 2.37 แสดงชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนของ HDPE/PC [19]

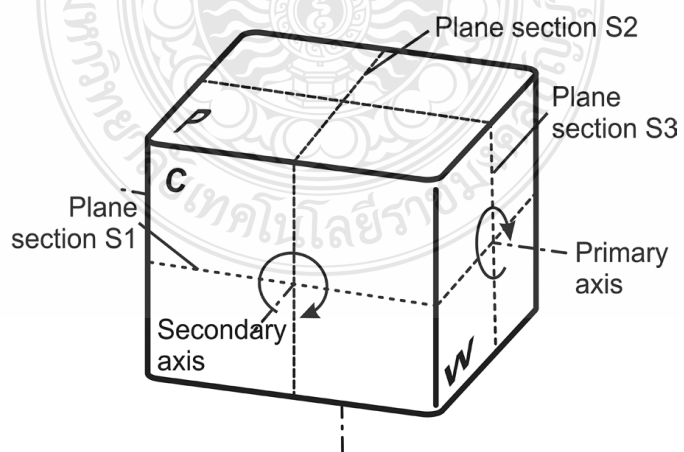
2.9.3 Tomasz Jachowicz , Janusz W. Sikora [20] ในบทความนี้เป็นการนำเสนอกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยจะอธิบายถึงหลักการทั่วไปของกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกชนิดนี้ อีกทั้งข้อดีและข้อเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยทำการทดลองในห้องทดสอบ เพื่อศึกษาอิทธิพลหรือปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปโดยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแสดงดังรูปที่ 2.38 ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนี้ ได้พิจารณาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเรขาคณิตของพอลิเมอร์ ความเร็วรอบในการหมุนแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงไปและวัดค่าการกระจายความหนาของผนังชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.39 และรูปที่ 2.40 โดยในการทดลองยังคงทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ นอกจากนี้มีการใช้โปรแกรมเพื่อใช้วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.41



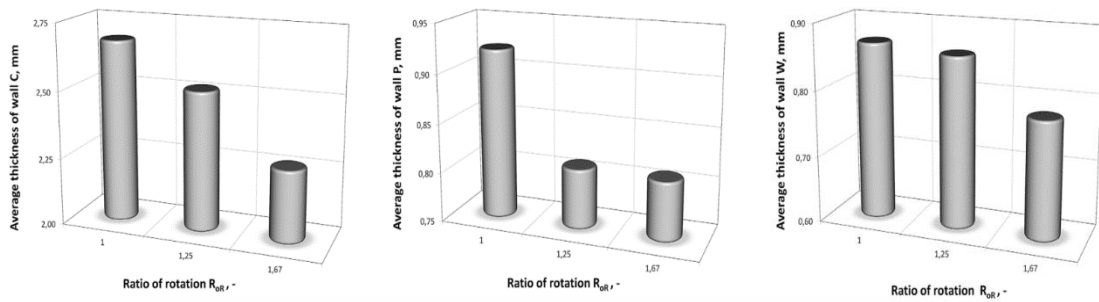
รูปที่ 2.38 แสดงลักษณะของเครื่องที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [20]



รูปที่ 2.39 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์และชิ้นงานที่ได้ [20]



รูปที่ 2.40 แสดงถึงการเตรียมชิ้นงานเพื่อวัดค่าการกระจายความหนา [20]

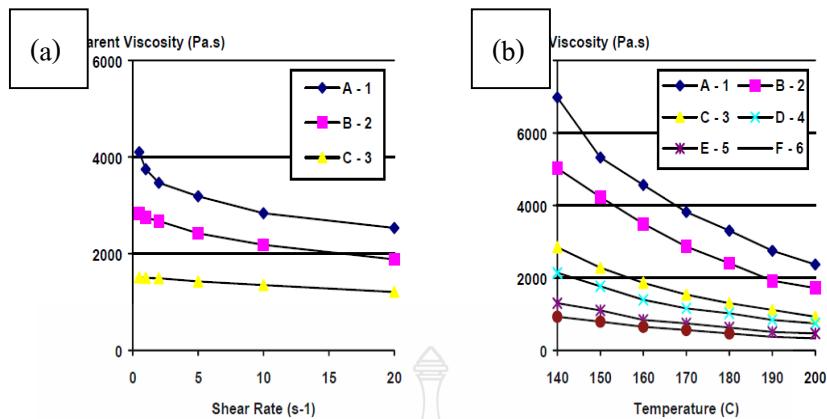


รูปที่ 2.41 แสดงถึงค่าการกระจายความหนาของชิ้นงานเมื่อใช้อัตราการหมุนที่เปลี่ยนไป [20]

2.9.4 Alvin Spence [21] ได้ศึกษาปัจจัยมากมายที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน หนึ่งในตัวแปรหลักนั้นก็คือองค์ประกอบของพอลิเมอร์และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.6 โดยต้องทำความเข้าใจเพื่อให้ทราบถึงลักษณะการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์เพื่อให้แน่ใจว่าในเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปเป็นช่วงเวลาที่ดีที่สุด เพราะชิ้นงานที่มีฟองอากาศภายใน อิทธิพลหลักเกิดจากขั้นตอนการหลอมละลายของพอลิเมอร์และค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์นั่นเองดังแสดงในรูปที่ 2.42

ตารางที่ 2.6 แสดงวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ [21]

Reference Code	Color	Melt Index (g/10 mins)	Density (kg/m ³)	Molecular Weight
A-1	Nature	3.2	934	100,300
B-2	Nature	5	924	89,550
C-3	Nature	8	935	80,400
D-4	Nature	12	937	70,000
E-5	Nature	18	937	64,000
F-6	Nature	25	937	59,000
G-7	Nature	3.2	934	99,750
H-8	Nature	5	924	92,100
I-9	Nature	8	937	77,750



รูปที่ 2.42 แสดงถึง (a) ค่าความหนืดของพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับอัตราเฉือน ที่อุณหภูมิ 190 C° และ (b) อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์ [21]

2.9.5 Peter BÚTORA [22] และคณะได้มีความสนใจที่จะศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.43 และสารเพิ่มเนื้อในพอลิเมอร์ โดยใช้ผงพอลิเอททีลีนชนิด ความหนาแน่นเชิงต่ำ (LLDPE) สองชนิด คือ ผง LLDPE ที่เติมสารเพิ่มเนื้อให้กับผง LLDPE ที่ไม่ทำการใส่สารเพิ่มเนื้อมาใช้ในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2.7 โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้การทดสอบสมบัติบางประการเช่น ค่าความแข็งแรง ค่าการทนต่อแรงดึง สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ ค่าความแข็งที่ผิว และอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัว เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.44



รูปภาพที่ 2.43 แสดงชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [22]

ในงานวิจัยนี้มีการใช้ LLDPE ที่ทำการผสมรวมกับวัสดุชนิดต่างๆตั้งด้านบน เพื่อหาวัสดุที่
ที่เหมาะสมในการเลือกใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ ดังต่อไปนี้

Sample No. 1 Content 100% LLDPE ICORENE 4-3545

Sample No. 2 Content 100% LLDPE RESIN RX103 NATURAL

Sample No. 3 Content 90% LLDPE ICORENE 4-3545 + 10% Talc

Sample No. 4 Content 90% LLDPE ICORENE RESIN RX103 + 10% Talc

ตารางที่ 2.7 แสดงถึงสมบัติบางประการของ LLDPE แต่ละชนิด [22]

Sample No.	Yield Stress (MPA)	Elongation (%)	Melt Index (g/10min)	Density (g/cm ³)	Shore hardness (°sh)	Vicat Softening Temperature (°C)
1	18.86	172	3.4	0.932	53	114
2	20	132	3.8	0.939	59	123
3	10.7	0	3.2	0.972	50	114
4	15.6	10	3.7	0.993	57	121

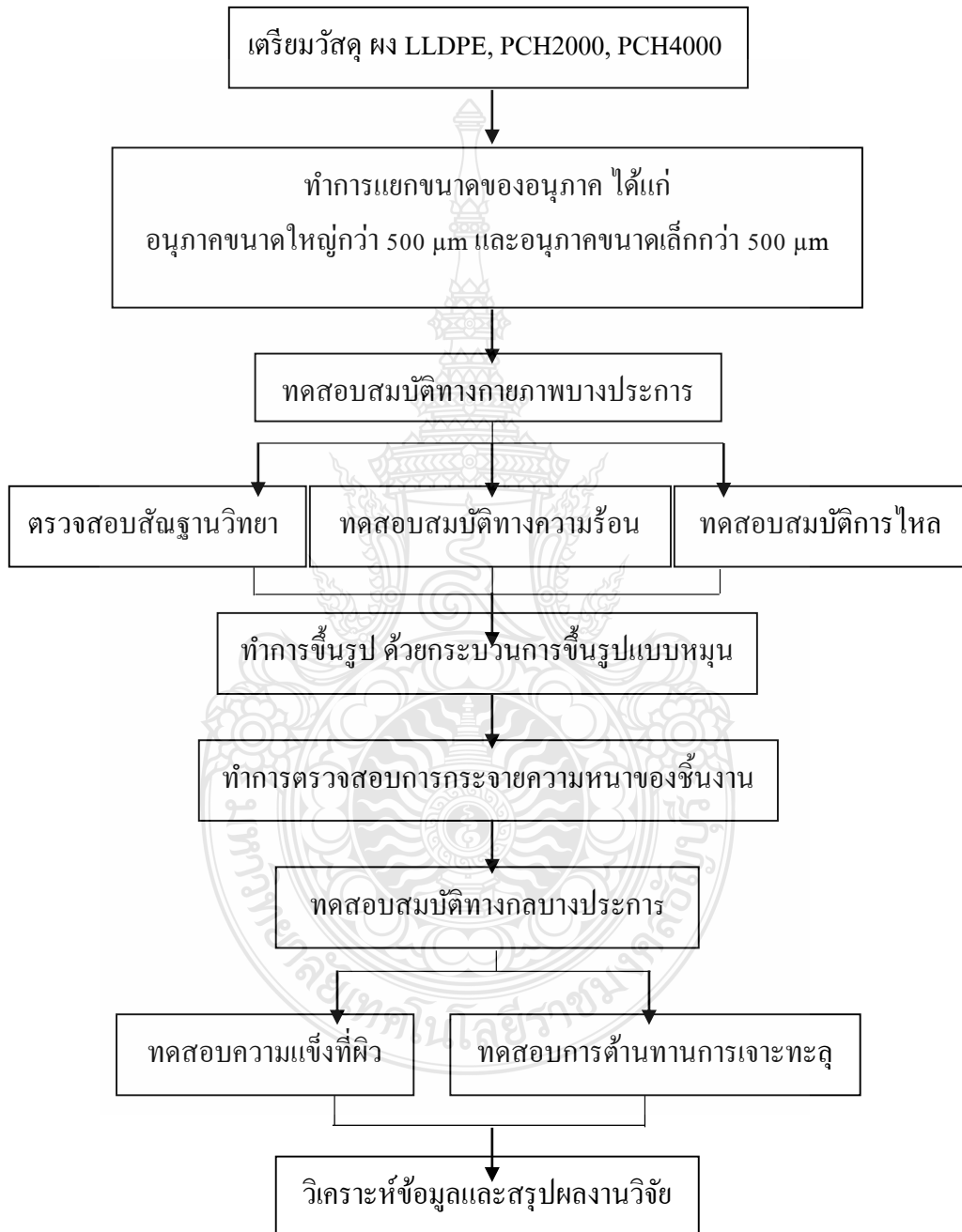


รูปที่ 2.44 แสดงชิ้นงานและผิวชิ้นงานที่มีลักษณะไม่เรียบ เกิดฟองอากาศ [22]



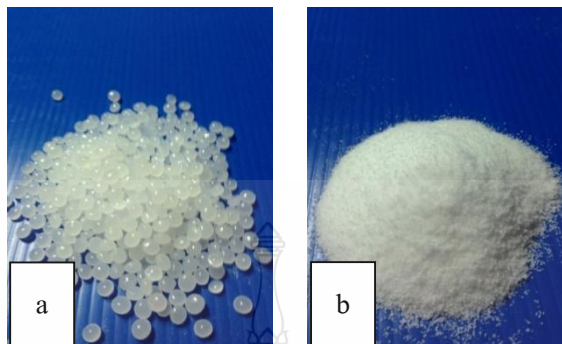
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1

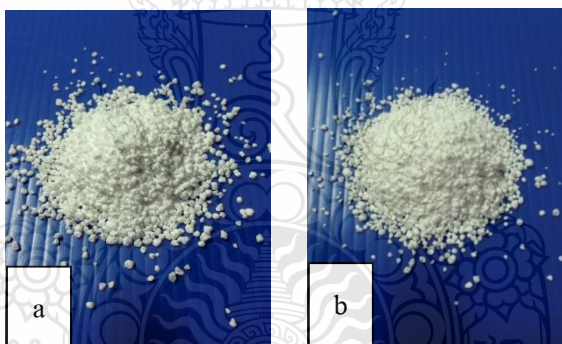


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 แสดง (a) พอลิเอททิลีนโดยรูป LLDPE (เม็ดพลาสติก) และ (b) LLDPE (ผงพลาสติก) พลาสติกพอลิเอททิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) เกรด M3204RUP จากบริษัท Thai Polyethylene Co, Ltd. ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แสดงพอลิคาร์บอเนตโดยรูป (a) PCH2000, (b) PCH4000

พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate; PC) จากบริษัท Mitsubishi Engineering-Plastics Corp Iupilon ซึ่งเป็นพอลิคาร์บอเนตที่เหลือจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ PCH2000 และ PCH4000 ดังแสดงในรูปที่ 3.3

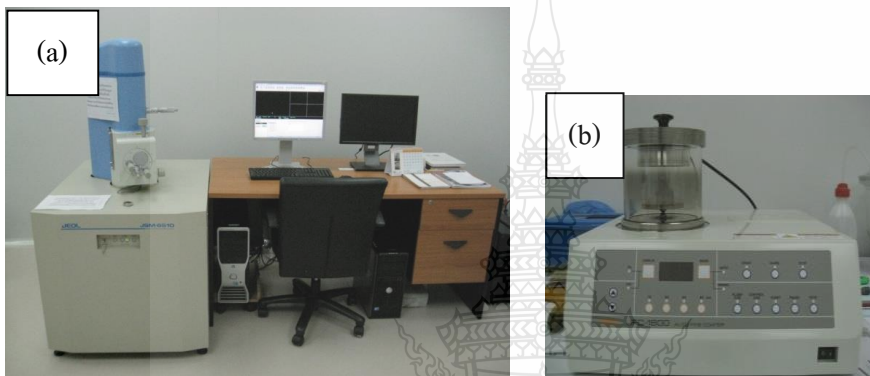
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือ	บริษัท/รุ่น
เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)	สาขาวิศวกรรมพลาสติก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	รุ่น JSM-6510 จากบริษัท JEOL ผลิตจาก ประเทศ Japan
การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Gel Permeation Chromatography (GPC))	รุ่น Water 2414 จากบริษัท Water ผลิตจาก ประเทศ USA
เครื่องทดสอบการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วย เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry)	รุ่น DSC 200 F3 จากบริษัท Netzsch
เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI)	รุ่น XRL-400A ผลิตจากประเทศ China
เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary Rheometer)	รุ่น RH2000 จากบริษัท Malvern Instrument
เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker)	รุ่น FRITSCH ผลิตจากประเทศ Germany
เครื่องวัดความหนา (Thickness Measurement Apparatus)	รุ่น SIS-6 จากบริษัท Peacock
เครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว (Rockwell Hardness Tester)	รุ่น DXT 1 จากบริษัท Matsuzawa
เครื่องทดสอบแบบกดทะลุ (Puncture Tester)	รุ่น LR10K จากบริษัท LLOYD

3.4.1 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของวัสดุก่อนการขึ้นรูป

การขึ้นรูปกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงนั้น ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปคือรูปร่างและขนาดของวัสดุ ในงานวิจัยนี้จึงทำการตรวจสอบจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM: JSM-6510, JEOL, JAPAN) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อศึกษาขนาดและรูปร่างของเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดก่อนทำการขึ้นรูป และหลังการขึ้นรูปเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการ



รูปที่ 3.4 แสดง (a) เครื่อง (Scanning Electron Microscope: SEM) และ (b) Auto Fine Coaters JFC-1600

3.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeters, DSC)

เครื่อง Differential Scanning Calorimeters (DSC) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของ Heat Flow ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เทียบกับตัวอย่างอ้างอิง โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมีของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (Endothermic or Exothermic Processes) หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat Capacity Changes) จึงนำเอาเทคนิคนี้มาใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่าง เช่น พอลิเมอร์ อาหาร หรือตัวอย่างในกลุ่มสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์อื่นๆ ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุด้วยเครื่อง DSC ใช้ในการศึกษา กลาสทรานซิชัน (Glass Transition, T_g) การหลอมเหลว (Melting) กระบวนการตกผลึก (Crystallization Process) และความจุความร้อน (Heat Capacity) เป็นต้น เทคนิค DSC เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของ Heat Flow ที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ เมื่อให้ความร้อนเข้าไปในระบบ เทียบกับตัวอย่างอ้างอิง ซึ่งในการ

ทดสอบจะใช้ Pan หรือ Crucible เปล่าๆ ที่ไม่ได้ใส่ตัวอย่างในการอ้างอิง โดยเมื่อทำการทดสอบ เครื่อง DSC ก็จะทำการวัดค่าความแตกต่างของ Heat Flow ออกมาให้

วิธีการทดสอบ

1. ทดสอบพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้แก่ PCH200 และ PCH400
2. ทำการเตรียมตัวอย่าง อย่างละ 5-10 มิลลิกรัม
3. อัตราการเพิ่มความร้อน 10 °C/min จากอุณหภูมิ 30 °C จนถึง 300 °C โดยการรักษาอุณหภูมิที่ 300 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัด Thermal History แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter)

3.4.3 การคัดแยกขนาดของพอลิเมอร์

เนื่องจากอนุภาคของ พอลิคาร์บอนเนตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน จึงต้องทำการแยกขนาดโดยใช้เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ลักษณะของเครื่องจะแบ่งเป็นชั้นๆ ในแต่ละชั้นจะมีตะแกรงขนาดแตกต่างกันออกไป ระบบจะทำการสั่นเพื่อให้เม็ดพอลิเมอร์หล่นลงในชั้นต่างๆ

วิธีการทดสอบ

1. ชั่งพอลิเมอร์ประมาณ 100 กรัม
2. ทำการใส่พอลิเมอร์ลงในชั้นบนสุดของเครื่อง
3. เปิดเครื่องคัดแยกขนาดและจับเวลา ประมาณ 10-15 นาที
4. นำพอลิเมอร์ที่ได้แต่ละชั้นไปทำการชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่อง เครื่องคัดแยกขนาด (Vibratory Sieve Shaker)

3.4.4 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล (Measurement of Molecular Weight)

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาถึงผลกระทบน้ำหนักโมเลกุลที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป จึงได้มีการศึกษาหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) ดังแสดงในรูปที่ 3.7

วิธีการทดสอบ

1. เฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) ที่ใช้คือ เตตระไฮโดรฟูแรน (THF) โดยที่ก่อนนำไปใช้ จะต้องกรองด้วยชุดกรอง (Solvent Filtration Kit) ที่มีแผ่นกรองเป็น Nylon Membrane ที่มีรูพรุนขนาด 0.45 ไมโครเมตร

2. ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐาน พอลิสไตรีน (PS) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล $1.2 \cdot 10^3$ - $3.73 \cdot 10^6$ กรัมต่อโมลและสารละลายตัวอย่างพอลิคาร์บอเนต โดยในการเตรียมสารละลายควรเตรียมทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมงแต่ไม่เกิน 24 ชั่วโมง โดยใช้ตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรนให้มีความเข้มข้นดังต่อไปนี้

น้ำหนักโมเลกุลในช่วง $1 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^4$ ใช้ความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์

น้ำหนักโมเลกุลในช่วง $1 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^4$ ใช้ความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์

น้ำหนักโมเลกุลในช่วง $1 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^4$ ใช้ความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์

นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยแผ่นกรองที่เป็น Nylon Membrane ที่มีรูพรุนขนาด 0.45 ไมโครเมตรเพื่อกรองให้สารที่ไม่ละลายและสิ่งเจือปนออก

3. นำสารละลายมาตรฐาน พอลิสไตรีน (PS) ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ไปฉีดเพื่อนำไปสร้าง Calibration Curve เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐานเปรียบเทียบกับสารละลายพอลิคาร์บอนเนต
4. ทำการฉีดสารละลายตัวอย่าง ประมาณ 20 – 80 มิลลิลิตร
5. จากนั้นนำค่า Retention Time ไปประมวลผลเพื่อหาค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยแบบต่างๆ และค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง Gel permeation Chromatography (GPC)

3.4.5 การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow)

การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow) มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน การเรียนรู้พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ภายในแม่พิมพ์ จะช่วยให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวเข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างค่อนข้างซับซ้อนได้ ปัจจัยสำคัญในการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ คือ ขนาดและรูปร่างของพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

วิธีการทดลอง

1. ทำการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดต่างประมาณ 400 กรัม
2. ไล่ลงไปในกรวยมาตรฐาน
3. เปิดลิ้นด้านล่างของกรวยมาตรฐานออกและทำการจับเวลา
4. เมื่อพอลิเมอร์ภายในกรวยมาตรฐานหมดทำการบันทึกผล

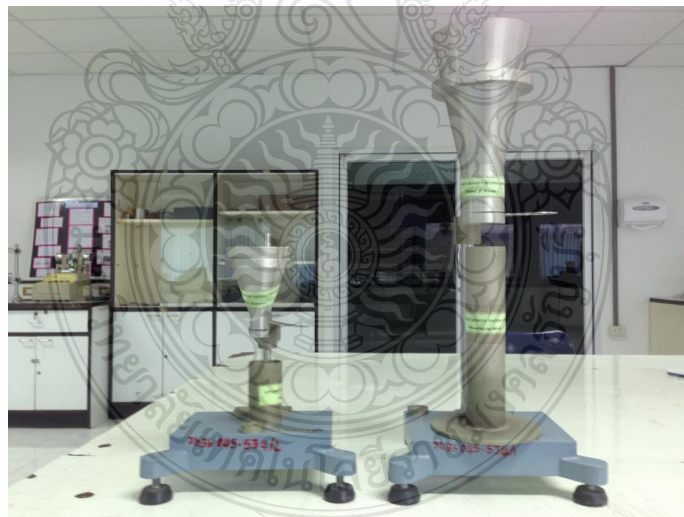
จากเครื่องทดสอบการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow) สามารถใช้ในการทดสอบหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของพอลิเมอร์

3.4.6 การทดสอบหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) เป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของวัสดุ หมายถึง ความหนาแน่น (Density) ของวัสดุปริมาณมวล (Bulk Material) เช่น แป้ง (Flour) สตาร์ช (Starch) เมล็ดธัญพืช (Cereal Grain) กาแฟผง นมผง อาหารสัตว์ ขนมอบเลี้ยว และ ลูกกวาด เป็นต้น ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่รวมที่ว่างระหว่างชั้นวัสดุด้วย โดยมีมาตรฐานการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นรวมของพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน ASTM-D1895

วิธีการทดลอง

1. ทำการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ
2. กำหนดปริมาตรฐานด้านล่างของกรวยในที่นี่ คือ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. นำพอลิเมอร์ใส่ด้านบนของกรวยมาตรฐาน จากนั้นเปิดลิ้นด้านล่างออก
4. นำพอลิเมอร์ที่อยู่ในฐานด้านล่างของกรวยมาตรฐานไปทำการชั่งน้ำหนัก
5. ทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวมและบันทึกผล



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์แบบแห้ง

3.4.7 การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Rate)

Melt Flow Rate (MFR) คือ ปริมาณของพลาสติกหลอมเหลวที่ไหลผ่านหัว Die ภายใต้ Specific Weight และอุณหภูมิที่กำหนดภายในเวลา 10 นาที ค่า Melt Flow Rate เป็นค่าซึ่งทำให้ทราบถึง ชนิดของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ และใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพ และในบางครั้งจะนำไปทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกชนิดเดียวกันที่กระบวนการแตกต่างกัน ค่าดัชนีการไหลนี้ไม่ใช่สมบัติที่แท้จริงของพอลิเมอร์ แต่เป็นตัวที่บ่งบอกว่ากระบวนการผลิตจะมีพลาสติกเหลวออกมาเท่าไร [15] โดยมีกระบอกบาร์เรลเพื่อบรรจุพลาสติก แล้วทำการให้ความร้อนจาก Heater จากนั้น Piston จะดันพลาสติกเหลวผ่าน Die ออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.33 ค่าดัชนีการไหลจะแตกต่างกันตามเกรดของพอลิเมอร์ เช่น LDPE, HDPE, PS หรือ PP ดังในกรณีของ LDPE จะมีค่า MFR ประมาณ 20 กรัม/10นาที ซึ่งในการทดสอบโดยทั่วไปจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1238 ลักษณะของเครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Rate) แสดงในรูปที่ 3.9

วิธีการทดสอบ

1. นำเม็ดพอลิเมอร์แต่ละชนิด มาทำการทดสอบการไหล เพื่อหาค่า Melt Flow Index โดยเตรียมตัวอย่างครั้งละประมาณ 8 กรัม
2. ทำการตั้งอุณหภูมิและใช้น้ำหนักกดตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ 190 °C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ใช้สำหรับทดสอบ พอลิเอทิลีน และอุณหภูมิ 300 °C น้ำหนักกด 1.20 กิโลกรัม ใช้สำหรับทดสอบพอลิคาร์บอเนต
3. ค่า Melt Flow Index ที่ได้ต้องทำการระบุเป็นน้ำหนักของพอลิเมอร์หน่วยเป็นกรัมต่อเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index)

3.4.8 การทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแคปิลลารี (Capillary - Rheometer)

ทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแคปิลลารี (Capillary Rheometer) รุ่น RH2000 ของบริษัท Malvern Instrument ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูป เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแคปิลลารีสำหรับพลาสติก มีลักษณะเครื่องเป็นแบบลูกสูบที่ออกแบบให้วัดค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอก สามารถใช้ทดสอบพอลิเมอร์ ส่วนผสมของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณอนุภาคหรือเส้นใยเสริมแรงต่ำ วัสดุคืบป้อนสำหรับการฉีดเข้าแบบของโลหะ และวัสดุอื่นที่มีสมบัติคล้ายคลึงกัน [17], [18]

หลักการพื้นฐานของการทำงานได้แก่การทำให้ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก (รูปทรงเริ่มต้นที่เป็นเม็ด, ผง หรือ ชิ้นย่อย) เปลี่ยนสภาวะในรูปแบบของเหลวโดยใช้ความร้อน จากนั้นใช้แรงทำให้ของเหลวดังกล่าวไหลออกจากกระบอกผ่านออกไปยังหัวคายแคปิลลารี ค่าที่ได้จากเครื่องแสดงเส้นกราฟของการไหลเป็นผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งเป็นผลจากการประเมินค่าในช่วงของจุดข้อมูลทดสอบหลายจุด ความหนืดจะแทนค่าด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก “อีตา” และมีหน่วยวัดค่า (หน่วยเอสไอ) เป็นปาสกัล.วินาที (Pa·s) หรือ นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร ($N \cdot s/m^2$)

โดยในการทดลองนี้ใช้สภาวะการทดลองที่มีอัตราเฉือนต่ำ Shear Rate (s^{-1}) ที่สภาวะ $10-50 s^{-1}$ เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีอัตราเฉือนต่ำ และใช้หัวคายขนาดความยาวคาย 180 มม.และรูคายนีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม.

วิธีการทดสอบ

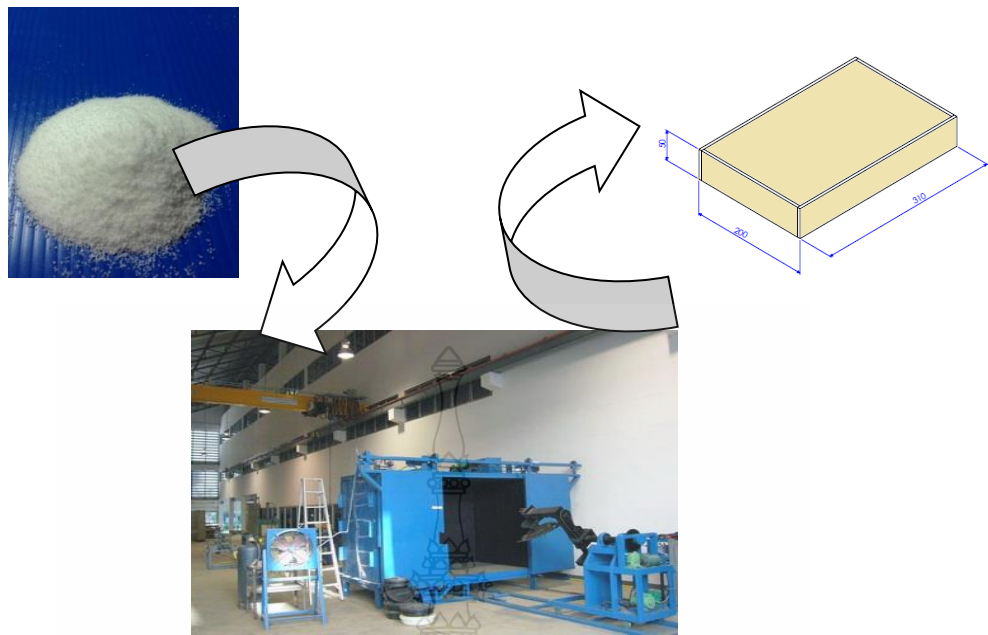
1. นำเม็ดพอลิเมอร์มาใช้ในการทดสอบครั้งละประมาณ 10-20 กรัม
2. ทำการตั้งอุณหภูมิและอัตราเฉือน โดยแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ $240^{\circ}C$ ใช้สำหรับทดสอบพอลิเอทิลีน และอุณหภูมิ $260^{\circ}C$ และ $280^{\circ}C$ ใช้สำหรับทดสอบพอลิคาร์บอเนตทั้งสองชนิด โดยกำหนดค่าอัตราเฉือน Shear Rate (s^{-1}) ที่สภาวะ $10-50 s^{-1}$
3. เก็บค่าทั้งหมด 10 ค่า เพื่อใช้ในการเขียนกราฟสมบัติการไหล



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary Rheometer)

3.4.9 กระบวนการขึ้นรูป

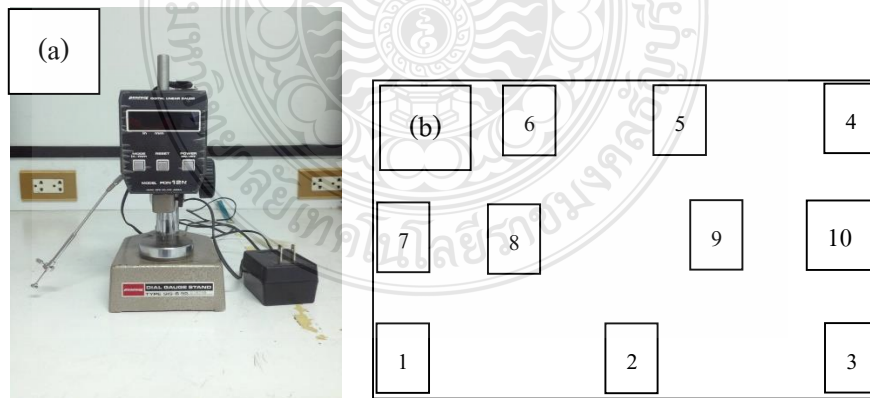
ในกระบวนการขึ้นรูปได้ใช้เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding) ชนิด Shuttle-Style-Machine ที่ออกแบบและจัดสร้าง ขึ้นใช้งานในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการคณะ วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [13] ที่นำมาใช้ขึ้นรูปตัวอย่างในงานวิจัยนี้ โดยใช้ แก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas; LPG) เป็น เชื้อเพลิงและแม่พิมพ์ที่ใช้จะเป็น แม่พิมพ์กล่อง สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 31*20*5 เซนติเมตร โดยน้ำหนักรวมของวัสดุในแม่พิมพ์หาได้จากปริมาตรของ แม่พิมพ์*ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ ในกระบวนการขึ้นรูปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้น รูปแบบหมุนโดยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ดังต่อไปนี้ สำหรับพอลิคาร์บอเนต แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ PCH2000 และ PCH4000 โดยมีอนุภาคแบ่งออกได้เป็นอนุภาคขนาดมากกว่า 250 μm และอนุภาค ขนาดน้อยกว่า 250 μm ทำการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ 2 ช่วงอุณหภูมิที่ 260 °C และ 280 °C ใช้เวลา ในการให้ความร้อน 2 ช่วงเวลาที่ 10 นาทีและ 20 นาที และ พอลิเอทิลีน ชนิด LLDPE ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้ ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปแบบหมุนปัจจุบัน โดยให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 240 °C ใช้เวลาในการ ให้ความร้อน 10 นาที และ โดยทั้ง 3 ชนิดใช้เวลาในการหล่อเย็นประมาณ 20-30 นาที จนอุณหภูมิของ แม่พิมพ์ลดลงประมาณ 50-60 °C จากนั้นทำการปลดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงรูปแบบของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

3.4.10 การศึกษาการกระจายความหนาของชิ้นงาน

จากตัวอย่างชิ้นงานกล่องที่ทำการขึ้นรูป ทำการตัดชิ้นงานเพื่อวัดความหนาของฝากล่องด้านบนและด้านล่างด้วยเครื่อง Thickness Measurement Apparatus ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (a) โดยทำการวัดชิ้นงานแบบสุ่ม 10 จุด เพื่อหาความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (b)



รูปที่ 3.12 แสดง (a) เครื่อง Thickness Measurement Apparatus และ (b) พื้นที่ในการวัดการกระจายความหนาของฝากล่องด้านบนและด้านล่าง

3.4.11 การทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test)

หาค่าความแข็งที่ผิวด้วยเครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว ตามมาตรฐาน ASTM D785 เครื่องทดสอบ Matsuzawa DXT Model DXT-1 Ser.No DX1405 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่นำมาทดสอบควรมีผิวเรียบทั้งทั้งพื้นผิว และวางแนบสนิทกับฐานรอง (Anvil) ชิ้นงานทดสอบต้องมีความหนา ไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร ถ้าชิ้นงานมีความหนาน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร สามารถหาวัสดุอื่น ๆ ที่มีความหนามากกว่าวัสดุทดสอบ หรือชิ้นงานทดสอบมารองด้านล่าง โดยที่วัสดุที่นำมารอง จะต้องมีความเรียบ

วิธีการทดสอบ

1. เลือกขนาดของหัวกดและน้ำหนักกดทับหลัก (Major Load)
2. ข้อกำหนดในการเลือกสเกลคือ ถ้าสเกลที่อ่านได้มีค่ามากกว่า 115 หมายความว่าชิ้นงานนั้นมีพื้นที่ผิวแข็งแรงกว่าที่อ่านค่าได้ ซึ่งความผิดพลาดสำหรับค่าที่เกินช่วงนี้มีอยู่สูง เพราะฉะนั้นควรเลือกหัวกดให้มีขนาดเล็กลงหรือเลือกน้ำหนักกดทับให้มีค่ามากขึ้นดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดง Rockwell Hardness Scale

Rockwell Hardness Scale (Red Dial Number)	Minor Load (Kg)	Major Load (Kg)	Indenter Deimeter (in)
R	10	60	0.1250+/-0.001
L	10	60	0.1250+/-0.001
M	10	100	0.1250+/-0.001
E	10	100	0.1250+/-0.001
K	10	150	0.1250+/-0.001

3. กำหนดค่า DLT เป็นเวลา 15 วินาที และกดปุ่ม PLT ซึ่งเครื่องกำหนดโดยอัตโนมัติเป็นเวลา 15 วินาที สำหรับพลาสติก

4. กดปุ่ม โหลด Load ซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้หน้าปัดแสดงค่าสเกลช่วงที่อ่าน เช่น HRE หรือ HRC พร้อมทั้ง Set ศูนย์ไปโดยอัตโนมัติ

5. จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาวางบนแท่งรอง

6. หมุนก้านส่งน้ำหนักร โดยสังเกตจากไฟสีแดงจะขึ้นจากตำแหน่งต่ำสุดจนถึงตำแหน่ง Set แล้วจึงหยุดหมุน
7. ตำแหน่ง Set จะเลื่อนไปตำแหน่ง Start แล้วเครื่องจะทำการอ่านค่าความแข็ง
8. โดยขณะที่ไฟ Start เครื่องทดสอบก็จะวางน้ำหนัก
9. รอจนไฟตำแหน่ง Start ดับ จึงอ่านค่าที่ได้บนหน้าปัดและรอเวลาในการให้น้ำหนักตามที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test)

3.4.12 การทดสอบสมบัติความต้านทานเจาะทะลุ (Puncture Test)

เป็นการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความเหนียวมากจนทำให้บางครั้งไม่สามารถรายงานผลทดสอบการทนต่อแรงกระแทกด้วยวิธีอื่น ในการดำเนินงานครั้งนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบและจัดสร้างระบบหัวจับชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแบบ Universal Testing Machine ยี่ห้อ Hounsfield Model TG18 ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3787 ชุดทดสอบ Puncture Test ประกอบไปด้วย ฐานจับยึดชิ้น เป็น การทดสอบแรงที่กดทดสอบ (Ring Clamp) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางชุดจับชิ้นงานทดสอบ 120 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่นจับชิ้นงาน 44.45 มิลลิเมตร และหัวเจาะชิ้นทดสอบแบบกลมทำจากโลหะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ในการเจาะทะลุมาที่ผิวพลาสติกเพื่อวัดความแข็งของผิวพลาสติก หรือ ฟิล์ม โดยชิ้นงานทดสอบนี้จะเป็น แผ่นสีเหลือง ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร หรือ ทรงกลม ตามมาตรฐาน ASTM D3787 สมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ เช่น ความแข็งแรง

ความทนทาน ความเหนียว และการดูดซับพลังงาน ความเร็วในการกระแทกจะถูกต้องดังตารางที่ 3.4
 ช่วงเวลาสำหรับการบันทึกข้อมูลถูกตั้งค่าที่ 30 มิลลิวินาที

วิธีการทดสอบ

1. ตัดชิ้นงานขนาด 10 * 10 เซนติเมตร
2. ประกอบชุดหัวจับชิ้นงาน ร่วมกับเครื่องทดสอบแบบ Universal Testing Machine
3. กำหนดค่าการทดสอบ
4. ใส่ชิ้นงานที่ทดสอบในชุดหัวจับ
5. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 3.14 เครื่องการทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test)

ตารางที่ 3.4 แสดงสถานะที่ใช้ในการทดสอบการกดทะลุ (Puncture Test)

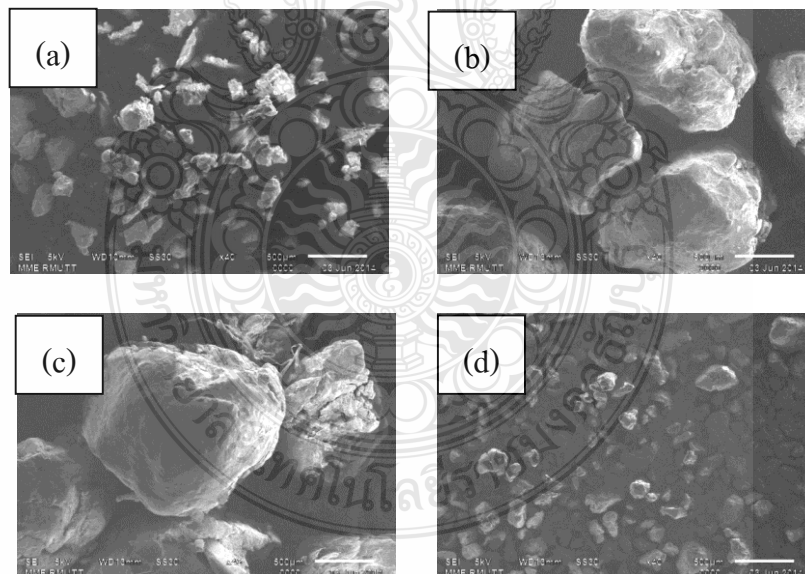
Load Range	3000 (นิวตัน)
Extention Range	30 (มิลลิเมตร)
Test Speed	300 (มิลลิเมตรต่อนาที)
Test End Point	28 (มิลลิเมตร)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา

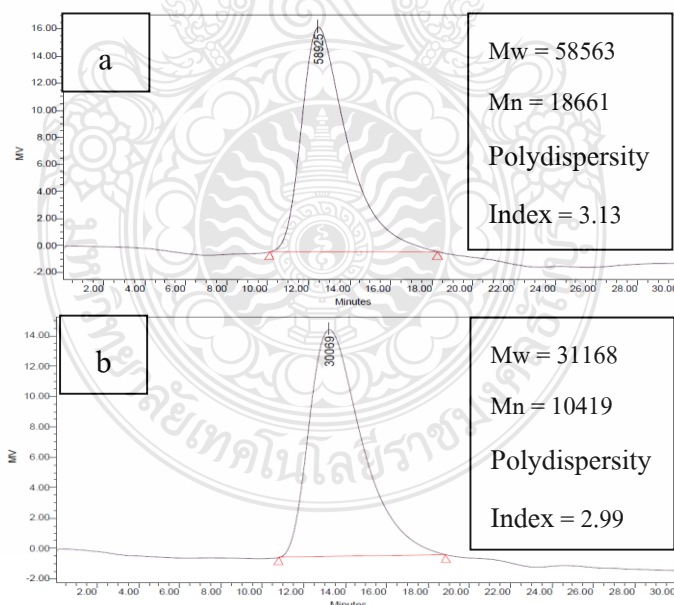
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจาก รูปที่ 4.1 ที่กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของ LLDPE นั้นมีขนาดเล็กกว่า 250 μm แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ PCH2000 และ PCH4000 ที่กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าโดยส่วนมากขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 250 μm และมีขนาดอนุภาคขนาดเล็กกว่า 500 μm ผสมในอัตราส่วนที่น้อย ส่วนลักษณะของเม็ดพลาสติกพบว่า ในส่วนของพอลิคาร์บอเนตที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ สัณฐานค่อนข้างกลมเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตที่มีขนาดเล็ก และ LLDPE จากงานวิจัยของ P. J Nugent [1] ได้กล่าวไว้ว่า สำหรับพอลิเอทิลีนที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถขึ้นรูปได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และสัณฐานที่ค่อนข้างกลมช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปได้ ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในอนุภาคของ พอลิคาร์บอเนตที่แตกต่างกันส่งผลอย่างไรในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน



รูปที่ 4.1 แสดงสัณฐานวิทยาของ พอลิคาร์บอเนตและพอลิเอทิลีนที่กำลังขยาย 40 เท่า โดยแบ่งเป็น (a) LLDPE ขนาดเล็กกว่า 250 μm , (b) PCH2000 ขนาดใหญ่กว่า 250 μm , (c) PCH4000 ขนาดใหญ่กว่า 250 μm และ (d) PCH4000 ขนาดเล็กกว่า 250 μm

4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล

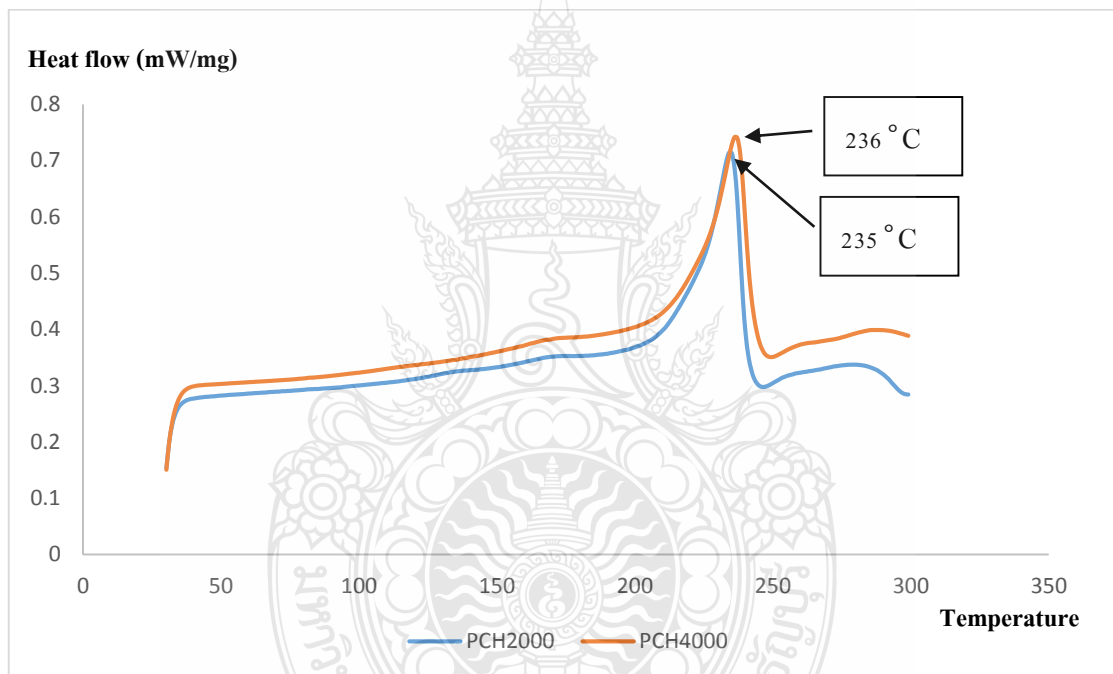
ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาปัจจัยของน้ำหนักโมเลกุลที่ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปจากรูปที่ 4.2 แสดงถึงกราฟน้ำหนักโมเลกุลของ PCH2000 และ PCH4000 ด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) โดยน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ PCH2000 มีค่ามากกว่า PCH4000 และค่าที่บ่งชี้การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเราเรียกว่า ค่า Polydispersity index : PDI ซึ่งหาได้จาก $PDI = M_w/M_n$ ในกรณีของสารโมเลกุลเล็ก ค่า PDI เท่ากับ 1 เนื่องจากทุกโมเลกุลมีขนาดเท่ากัน ในกรณีของพอลิเมอร์ M_w จะมากกว่า M_n ค่า PDI จึงมีค่ามากกว่า 1 เสมอ ถ้าค่า PDI ของพอลิเมอร์มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นๆ มีขนาดใกล้เคียงกัน มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลในช่วงแคบ ส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งในกรณีนี้พอลิเมอร์ชนิดทั้ง 2 ชนิดมีค่า PDI มากกว่า 1 โดย PCH2000 มีค่ามากกว่า PCH4000 การขึ้นรูป PCH4000 สามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่า PCH2000 เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า และการกระจายตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ดีกว่า ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความหนืดและการหลอมละลายของพอลิเมอร์ [14] กล่าวคือที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปเท่ากัน ความหนืดของ PCH2000 มีค่ามากกว่า PCH4000 และการหลอมละลาย PCH2000 มีการหลอมละลายของอนุภาคไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ PCH4000



รูปที่ 4.2 แสดง (a) เส้นกราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลของ PCH2000 และ (b) เส้นกราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลของ PCH4000

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน การเลือกใช้อุณหภูมิให้เหมาะสมส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป เนื่องจากสมบัติการไหลในช่วงอุณหภูมิต่างๆไม่เท่ากัน จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงสมบัติการนำความร้อนของพอลิคาร์บอเนตทั้งสองชนิด คือ PCH2000 และ PCH4000 เส้นกราฟที่ได้บ่งบอกถึงอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุ (Glass Transition Temperature) ของพอลิคาร์บอเนตทั้งสองชนิดโดยมีค่าดังต่อไปนี้ PCH2000 มีอุณหภูมิอยู่ที่ 236 °C และ PCH4000 มีอุณหภูมิอยู่ที่ 235 °C จากผลการทดลองพบว่า พอลิเมอร์ชนิดเดียวกันในที่นี้คือ พอลิคาร์บอเนต จุดหลอมเหลวที่ที่ค่อนข้างสูง แต่มีอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันที่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 4.3 แสดงผลทางความร้อนของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

4.4 การทดสอบสมบัติการไหล ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Rate)

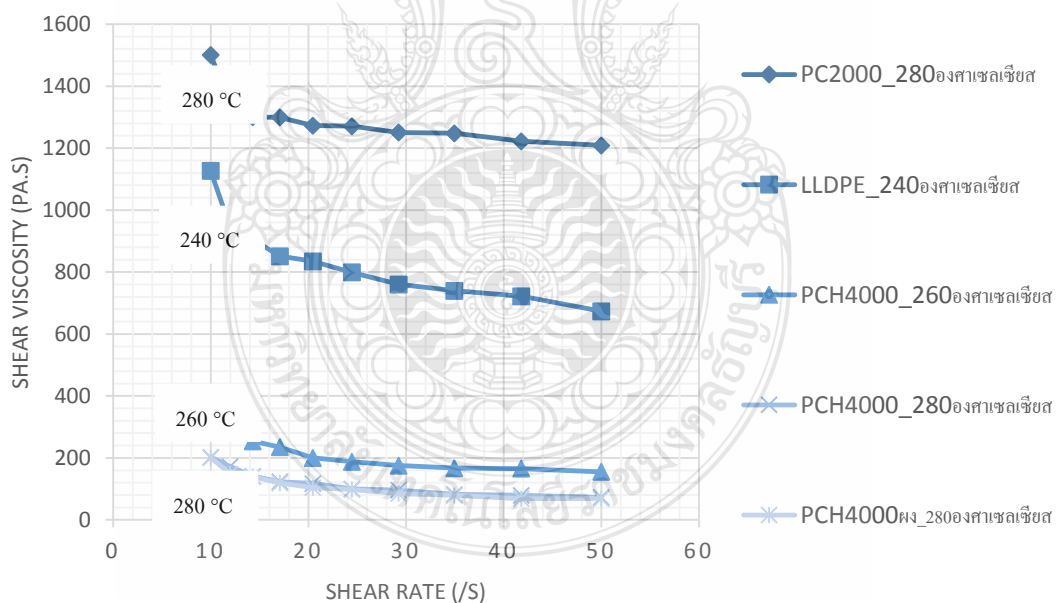
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลทดสอบดัชนีการไหล หรือ Melt Flow Rate ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ โดยใช้อุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปเป็นสถานะในการทดสอบ และใช้น้ำหนักกดเท่ากันเพื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดย LLDPE เลือกใช้ที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 220 °C และ 240 °C สำหรับ PCH2000 และ PCH4000 เลือกใช้ที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 260 °C และ 280 °C น้ำหนักกดที่ใช้ คือ 2.16 กิโลกรัม ในทุกกรณี ซึ่งค่าความหนืดนี้ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนืดที่สูงทำให้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่มีแรงใดๆมากระทำเป็นไปได้อย่างยากกว่า พอลิเมอร์ที่มีค่าความหนืดที่ต่ำ [22] และจากการทดลอง พบว่า LLDPE นั้นมีค่า MFR ที่ 5.5 กรัม/10นาที่ ที่อุณหภูมิ 220 °C และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ในส่วนของพอลิคาร์บอนเนตนั้น พบว่า PCH2000 ทั้งสองช่วงอุณหภูมิ มีค่า MFR ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE จึงกล่าวได้ว่าที่สถานะการขึ้นรูป ค่า MFR ของ PCH2000 มีค่าต่ำกว่า LLDPE แสดงถึงความหนืดที่มากกว่า และในส่วนของ PCH4000 ทั้งสองช่วงอุณหภูมิ พบว่ามีค่า MFR มากกว่า LLDPE และ PCH2000 แสดงถึงค่าความหนืดที่น้อยกว่า จากการทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ โดยใช้ขนาดที่แตกต่างกันในที่นี่คือ พอลิคาร์บอนเนต PCH4000 พบว่า ขนาดของพอลิคาร์บอนเนตไม่ส่งผลต่อค่า MFR แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์พอลิคาร์บอนเนตและพอลิเอทิลีน

ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (กรัม/10นาที่)				
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	LLDPE (ผง)	PCH2000	PCH4000	PCH4000 (ผง)
220 °C	5.5	-	-	-
240 °C	5.7	-	-	-
260 °C	-	2.9	33	34
280 °C	-	3.3	58	58

4.5 ทดสอบสมบัติการไหลของ พอลิคาร์บอเนต ด้วยเครื่อง (Capillary Rheometer)

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบหาสภาวะที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง (Capillary Rheometer) เพื่อจำลองสภาวะการทดสอบที่คล้ายคลึงกับสภาวะจริงในกระบวนการผลิต โดยในการทดลองนี้ใช้สภาวะการทดลองที่มีอัตราเฉือนต่ำ Shear Rate (s^{-1}) ที่สภาวะ 10-50 s^{-1} เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงมีอัตราเฉือนที่ต่ำ [13] และใช้หัวคายขนาดความยาวคาย 180 มม. และรูคายนีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด (Shear Viscosity) และ ค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) โดยเส้นกราฟแสดงถึงค่าความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด จากกราฟ PCH2000 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ เส้นกราฟของ LLDPE และ PCH4000 แต่เส้นกราฟของ PCH4000 มีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ เส้นกราฟของ LLDPE หมายความว่า ที่อุณหภูมิ 280 °C PCH2000 มีค่าความหนืดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE ที่เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ ตรงกันข้ามกับ PCH4000 ทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมิคือ 260 °C และ 280 °C แสดงถึงค่าความหนืดที่ได้มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE การลดอุณหภูมิหรือเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหล [10]



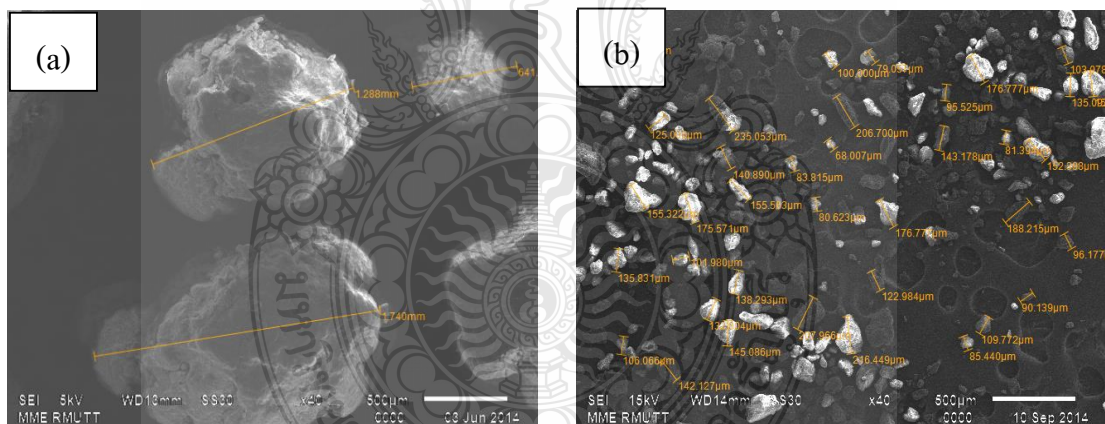
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ Shear Viscosity กับ Shear Rate ของ พอลิเอทิลีน(LLDPE) ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง และ พอลิคาร์บอเนต

4.6 ผลจากการแยกขนาด

เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนรูปร่างและขนาดเป็นปัจจัยสำคัญต่อการขึ้นรูปในงานวิจัยนี้จึงทำการคัดแยกขนาด จากการคัดแยกขนาด พบว่า เมื่อใช้พอลิคาร์บอนเนตชนิด PCH4000 (จากการทดสอบขึ้นรูปเบื้องต้นพบว่าในส่วนของ PCH2000 ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากความหนืดที่สูง จึงทำการแยกขนาดเฉพาะในส่วนของ PCH4000 เท่านั้น) ในปริมาณ 100 g สามารถแยกขนาดได้เป็น 2 ขนาด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 คือ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 250 μm และอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 250 μm ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอนุภาคทั้งสองขนาดมาใช้ในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.5

ตาราง 4.2 แสดงการแยกขนาดอนุภาคของพอลิคาร์บอนเนต

พอลิคาร์บอนเนต 100 กรัม	
อนุภาคใหญ่กว่า 250 μm	อนุภาคเล็กกว่า 250 μm
74 กรัม	25 กรัม



รูปที่ 4.5 ลักษณะของเม็ดพอลิคาร์บอนเนตหลังจากทำการแยกขนาด 2 อนุภาค คือ (a) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 250 μm และ (b) อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 250 μm

4.7 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมของ LLDPE ที่มีขนาดของใหญ่พื้นฐานค่อนข้างกลมส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นรวมมากกว่า LLDPE ที่มีขนาดเล็ก หมายความว่าพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่สามารถจัดเรียงตัวได้ดีกว่าขนาดเล็ก ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ P.J. Nugent [1] ที่กล่าวไว้ว่าพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กลักษณะพื้นฐานไม่กลมและเป็นหาง ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นรวมลดลงเพราะลักษณะที่ไม่กลมและมีหางทำให้เกิดช่องว่างอากาศได้ง่ายกว่า ในส่วนของพอลิคาร์บอนเนตแต่ละชนิด พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมของ PCH2000 และ PCH4000 มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย และ เมื่อทำการแยกขนาด โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มคืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 250 μm และมีขนาดเล็กกว่า 250 μm อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 500 μm มีค่าความหนาแน่นรวมที่ต่ำกว่าอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 250 μm ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของพอลิเมอร์

ลำดับที่ ชนิด	ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)					
	LLDPE(เม็ด)	LLDPE(ผง)	PCH2000	PCH4000	PCH4000 >250 μm	PCH4000 <250 μm
1	0.567	0.375	0.530	0.570	0.584	0.614
2	0.582	0.377	0.530	0.562	0.590	0.624
3	0.575	0.376	0.532	0.561	0.589	0.625
4	0.585	0.375	0.526	0.565	0.581	0.619
5	0.572	0.372	0.528	0.563	0.583	0.624
ค่าเฉลี่ย	0.576	0.375	0.529	0.564	0.585	0.621

4.8 การทดสอบการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow)

การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์แบบแห้ง (Dry Flow) ดังตารางที่ 4.4 การเคลื่อนที่ของ LLDPE ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เปรียบเทียบกับ LLDPE ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก พบว่าอนุภาคขนาดใหญ่ใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็ก เพราะรูปร่างอนุภาคที่กลมของอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้การเคลื่อนที่เป็นไปได้ง่ายกว่าและอนุภาคที่มีขนาดเล็กมักเกิดการรวมกันได้ง่าย ในส่วนของพอลิคาร์บอเนต พบว่าในการเคลื่อนที่ของ PCH2000 และ PCH4000 ที่ไม่ได้ทำการแยกขนาดผลของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการแยกขนาดออกเป็น 2 กลุ่มคือ อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 μm และมีขนาดน้อยกว่า 250 μm พบว่า อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 μm ใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยที่สุดซึ่งตรงกันข้ามกับอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 250 μm เนื่องจากใช้เวลาในการเคลื่อนที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของพอลิเมอร์แต่ละชนิด [1]

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์

ลำดับที่ ชนิด	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ (วินาที)					
	LLDPE(เม็ด)	LLDPE(ผง)	PCH2000	PCH4000	PCH4000 >250 μm	PCH4000 <250 μm
1	1.86	5.71	1.91	1.96	1.88	2.91
2	1.83	6.16	2.09	1.91	1.78	2.84
3	1.74	6.23	2.05	1.96	1.73	2.83
4	1.88	6.41	2.01	1.90	1.74	2.86
5	1.81	6.11	1.95	2.01	1.70	2.78
ค่าเฉลี่ย	1.82	6.12	2.00	1.94	1.76	2.84

4.9 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดกระสวยที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นใช้งานในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [12] เพื่อใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.6 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ แก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas; LPG) และแม่พิมพ์ที่ใช้จะเป็น แม่พิมพ์กล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 31*20*5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยน้ำหนักรวมของวัสดุในแม่พิมพ์ประมาณ 632 กรัม สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างหนา 3 มิลลิเมตร ในกระบวนการขึ้นรูปมีการศึกษาการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือที่ 260°C และ 280°C ใช้ศึกษาเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน 2 ช่วงเวลา คือที่ 10 นาที และ 20 นาที และใช้เวลาในการหล่อเย็นประมาณ 20-30 นาที จนอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลดลงเหลือ 50-60 °C จากนั้นทำการปลดชิ้นงาน โดยประสิทธิภาพของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.5

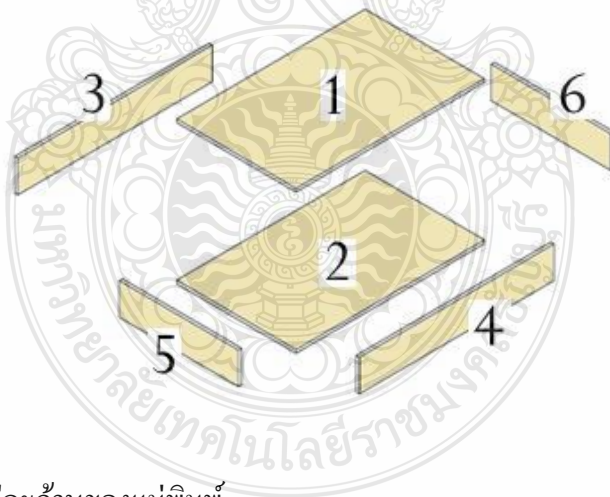


รูปที่ 4.6 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุน

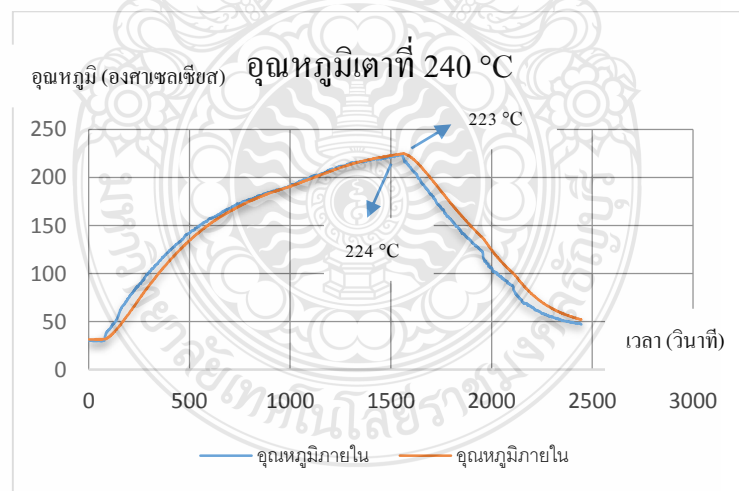
Technical Parameter	Value
ขนาดของแม่พิมพ์	31*20*5 (เซนติเมตร)
ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ที่ความหนา 3mm (Polyethylene)	485 กรัม
ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ที่ความหนา 5mm (Polyethylene)	800 กรัม
ความร้อนสูงสุด	280 องศาเซลเซียส
อัตราความเร็วรอบแกนหลัก:แกนรอง	6:1 รอบ : นาที
เวลาในการขึ้นรูป	0-60 นาที

หลักการคำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้โดยให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแต่ละด้าน 3 mm ยาว 31 cm กว้าง 20 cm สูง 5 cm โดยปริมาณของวัสดุที่ใช้ = ความหนาแน่น*ปริมาตร จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงแต่ละด้านของชิ้นงานทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้จะนำชิ้นงานหมายเลข 1 และหมายเลข 2 เพื่อใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดที่มากที่สุด และการกระจายความหนาค่อนข้างใกล้เคียงกันมากที่สุด

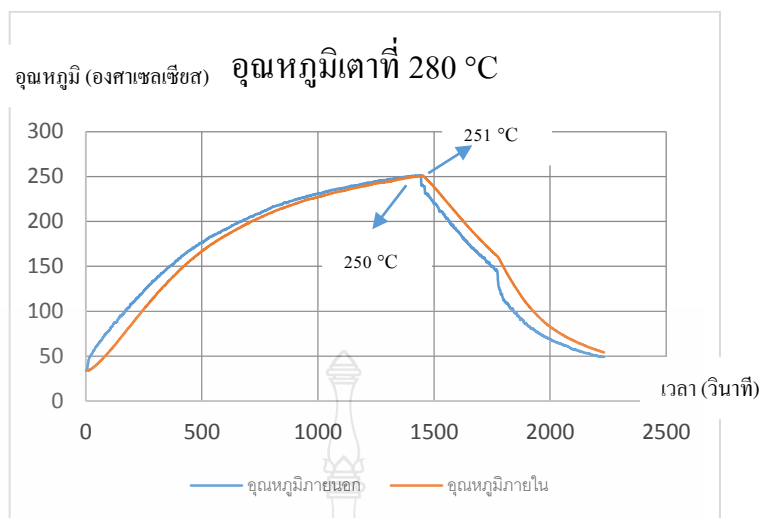


รูปที่ 4.7 แสดงด้านแต่ละด้านของแม่พิมพ์

เนื่องจากการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์เป็นหลักการให้ความร้อนด้วยวิธีการใช้อากาศร้อนในการเผาไหม้แม่พิมพ์ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน อีกทั้งเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัยไม่สามารถวัดอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ได้ จึงได้ศึกษาวิธีการวัดอุณหภูมิด้วยวิธีการเผาแม่พิมพ์ตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด จากนั้นใช้ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) Type K รุ่น PK-1000 ช่วงระยะการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ -58°C ถึง 1000°C และใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ รุ่น TM-947SD ในการบันทึกอุณหภูมิในการทดสอบที่ใช้แบ่งออกเป็นสองช่วงอุณหภูมิ คือ อุณหภูมิเตาที่ 240°C และ 280°C พบว่า ที่อุณหภูมิเตา 240°C อุณหภูมิภายนอกแม่พิมพ์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์เนื่องจากเป็นการได้รับความร้อนโดยตรงจากเตา หลังจากได้รับอุณหภูมิไปในช่วงเวลาหนึ่ง อุณหภูมิภายในและภายนอกแม่พิมพ์จะขยับเข้าใกล้กันมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่ออุณหภูมิเตามีค่า 240°C ทำการให้ความร้อนเป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิภายในและภายนอกของแม่พิมพ์มีค่าใกล้เคียงกันคือ 223°C และ 224°C แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเตาเนื่องจากการสูญเสียความร้อน จากนั้นทำการหยุดให้ความร้อน พบว่า อุณหภูมิภายนอกแม่พิมพ์แม่พิมพ์มีอัตราการลดลงเร็วกว่าอุณหภูมิภายในเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ง่ายกว่า ที่อุณหภูมิเตา 280°C เวลาในการให้ความร้อน 10 นาที พบว่า ผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกับอุณหภูมิเตา 240°C อุณหภูมิภายในและภายนอกของแม่พิมพ์มีค่าใกล้เคียงกันคือ 251°C และ 250°C แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเตา ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 แสดงเส้นกราฟระหว่าง อุณหภูมิภายในและภายนอกแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิเตาที่ 240°C



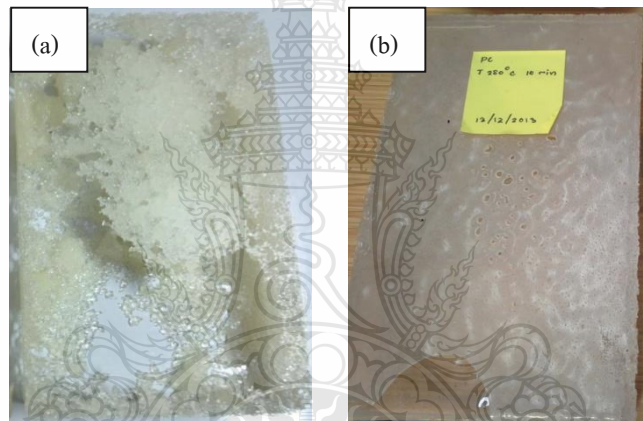
รูปที่ 4.9 แสดงเส้นกราฟระหว่าง อุณหภูมิภายในและภายนอกแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิเตาที่ 280 °C

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนนี้มีปัจจัยมากมายที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป เวลาที่ใช้ รูปร่างและขนาดของวัสดุที่ใช้ เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป ดังต่อไปนี้

ปัจจัยแรกที่กล่าวถึง คือ วัสดุที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ในที่นี้ได้แก่ พอลิคาร์บอเนตและพอลิเอทิลีน พบว่า พอลิเอทิลีนสามารถขึ้นรูปเป็นกล่องได้สมบูรณ์กล่าวคือสามารถขึ้นรูปโดยได้ชิ้นงานกล่องที่มีความหนาเฉลี่ยแต่ละด้านใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ผิวด้านในชิ้นงานเรียบ ในการขึ้นรูปด้วยพอลิคาร์บอเนตทั้ง 2 ชนิด คือ PCH2000 และ PCH4000 พบว่า PCH2000 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นกล่องชิ้นงานที่สมบูรณ์ได้ ชิ้นงานที่ได้แสดงถึงการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ พอลิเมอร์เกาะตัวกันเป็นก้อน ซึ่งแตกต่างกับ PCH4000 ที่สามารถขึ้นรูปเป็นกล่องชิ้นงานที่สมบูรณ์มากกว่า แต่ยังมีข้อแตกต่างกับชิ้นงานพอลิเอทิลีนเนื่องจากผิวด้านในชิ้นงานไม่เรียบและการกระจายความหนาที่ไม่สม่ำเสมอในแต่ละด้านของชิ้นงาน ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นคือ น้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันส่งผลให้ค่าความหนืดที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติการไหลที่ต่างกันทำให้การนำพอลิคาร์บอเนตมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนแตกต่างกับพอลิเอทิลีน[13] ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (a) และรูปที่ 4.11 (b)

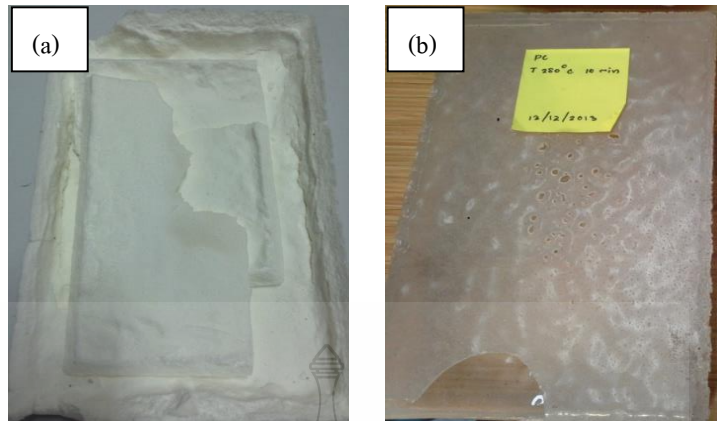


รูปที่ 4.10 ผลจากการขึ้นรูป LLDPE ที่อุณหภูมิ 240 °C ที่เวลา 10 นาที



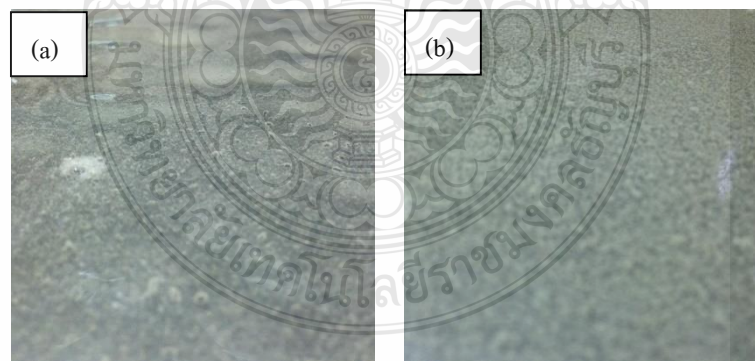
รูปที่ 4.11 ผลจากการ (a) ขึ้นรูป PCH2000 และ (b) PCH4000 ที่อุณหภูมิ 280 °C ที่เวลา 10 นาที

ปัจจัยที่สองที่กล่าวถึง คือ อุณหภูมิ ซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่อพอลิเมอร์หลายด้าน เช่น ความหนืด การหลอมละลายของพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตที่ยังไม่ทำการแยกขนาดชนิด PCH4000 2 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ 260 °C และ 280 °C ผลการทดลองที่ได้คือ ในการขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 260 °C พบว่า เกิดการหลอมละลายไม่สม่ำเสมอพอลิเมอร์มีการหลอมละลายในส่วนที่ติดกับผนังแม่พิมพ์ อีกทั้งยังไม่สามารถขึ้นรูปเป็นก้อนงานที่สมบูรณ์ได้อันเนื่องมาจากอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a) และเมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 280 °C พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานก้อนได้สมบูรณ์มากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b)



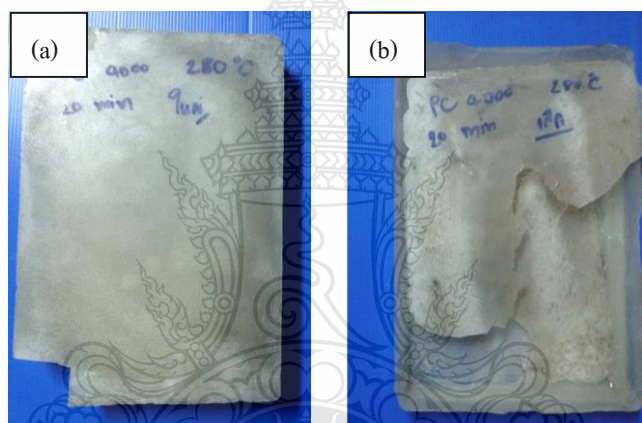
รูปที่ 4.12 แสดงถึงการขึ้นรูป (a) PCH4000 ที่อุณหภูมิ 260 °C และ (b) PCH4000 ที่อุณหภูมิ 280 °C

ปัจจัยที่สามที่กล่าวถึง คือ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยในงานวิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป 2 ช่วง คือ 10 นาทีและ 20 นาที โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับพอลิคาร์บอเนตที่ยังไม่ทำการแยกขนาด ชนิด PCH4000 พบว่า ที่เวลาในการขึ้นรูป 10 นาที ผิวด้านในชิ้นงานไม่เรียบและชิ้นงานที่ได้มีการกระจายความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการขึ้นรูปเป็น 20 นาทีพบว่า ผิวด้านในชิ้นงานมีความเรียบมากกว่า และการกระจายความหนามีความสม่ำเสมอมากกว่า เนื่องจากเวลาที่นานขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลวมีมากขึ้นจึงมีการกระจายตัวที่ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (a) และรูปที่ 4.13 (b)



รูปที่ 4.13 แสดงถึง (a) ผิวด้านในชิ้นงานที่ใช้เวลาในการขึ้นรูป 10 นาที และ (b) ภาพแสดงถึงชิ้นงานที่ใช้เวลาในการขึ้นรูป 20 นาที

ปัจจัยสุดท้ายที่กล่าวถึงคือ รูปร่างและขนาด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปแบบหมุน จากการขึ้นรูป PCH4000 พบว่าผิวชิ้นงานด้านในยังไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร อันเกิดจากขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์นั้น เป็นการผสมกันระหว่างอนุภาคขนาดเล็กและอนุภาคขนาดใหญ่ จึงได้มีการแยกขนาดของอนุภาคโดยได้ขนาดที่แตกต่างกัน 2 กลุ่ม คือ อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 μm และอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 250 μm ทำการขึ้นรูปแบบหมุนที่สภาวะเดียวกัน พบว่าพอลิคาร์บอเนตที่มีอนุภาคใหญ่กว่า 250 μm สามารถขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน โดยมีการกระจายความหนาที่ใกล้เคียงกันทุกด้าน ผิวด้านในชิ้นงานเรียบซึ่งแตกต่างจากพอลิคาร์บอเนตที่มีอนุภาคน้อยกว่า 250 μm ที่มีการกระจายความหนาไม่สม่ำเสมอ ผิวด้านในชิ้นงานไม่เรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (a) และรูปที่ 4.14 (b)



รูปที่ 4.14 แสดง (a) ชิ้นงานขึ้นรูประหว่าง PCH4000 > 250 μm และ (b) PCH4000 < 250 μm

เมื่อทำการขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตที่สภาวะต่างๆ จากนั้นทำการตัดชิ้นงานเพื่อวัดความหนาของชิ้นงานที่ได้เพื่อดูการกระจายตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

จากชิ้นงานกล่องสี่เหลี่ยมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ทำการตัดชิ้นงานเพื่อวัดความหนาของกล่องชิ้นงาน โดยค่าที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า พอลิเอทิลีนมีการกระจายความหนาที่ใกล้เคียงกับตัวเลขที่คำนวณไว้คือ 3 mm แสดงถึงลักษณะของการกระจายตัวที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิคาร์บอเนตทั้ง 2 ชนิด คือ PCH2000 และ PCH4000 จะเห็นได้ว่าในส่วนของ PCH2000 ไม่สามารถวัดความหนาได้เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปเป็นกล่องชิ้นงานที่สมบูรณ์ได้ แต่ในส่วนของ PCH4000 สามารถวัดความหนาของชิ้นงานได้ แต่การกระจายตัวยังไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากความหนาของชิ้นงานฝาด้านบนและฝาด้านล่างมีค่าแตกต่างกันมาก อีกทั้งผิวด้านในชิ้นงานไม่เรียบเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีน

ตารางที่ 4.6 ตารางการกระจายความหนา LLDPE , PCH2000 และ PCH4000

ลำดับที่	การกระจายความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)					
	LLDPE	PCH2000	PCH4000	LLDPE	PCH2000	PCH4000
ชนิด	ฝากล่องด้านบน			ฝากล่องด้านล่าง		
1	3.37	ไม่สามารถวัดการกระจายความหนาได้	1.9	3.29	ไม่สามารถวัดการกระจายความหนาได้	3.87
2	3.05		2.74	3.68		4.39
3	3.15		2.68	3.53		3.78
4	3.68		2.48	3.57		3.65
5	3.51		2.71	3.86		4.33
6	3.19		2.21	3.67		4.69
7	3.30		2.48	3.82		3.63
8	3.15		2.65	4.10		3.79
9	3.13		2.32	3.38		3.99
10	3.15		2.35	3.42		4.14

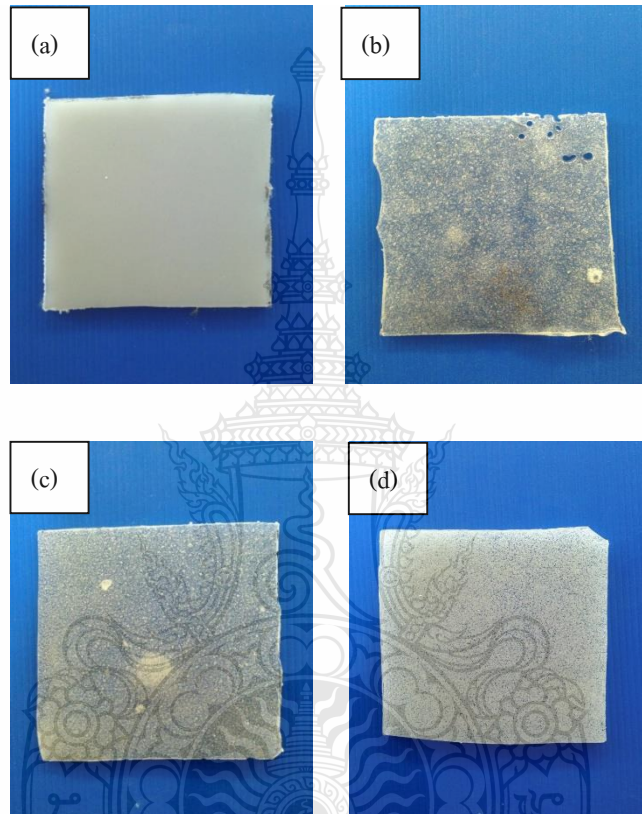
หลังจากทำการแยกขนาดของ พอลิคาร์บอเนตชนิด PCH4000 และทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนและทำการตัดชิ้นงานเพื่อวัดการกระจายความหนา จากตารางที่ 4.7 แสดงถึงความหนาของชิ้นงานเมื่อขึ้นรูปด้วยพอลิคาร์บอเนตชนิด PCH4000 ที่ทำการแยกขนาดแล้วพบว่า PCH4000 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 μm สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์ได้ แต่การกระจายความหนาไม่ดีเท่าที่ควร ผิวด้านในชิ้นงานไม่เรียบและเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ PCH4000 ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 250 μm สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับ พอลิเอทิลีนได้มากกว่า ผิวด้านในชิ้นงานค่อนข้างเรียบ

ตารางที่ 4.7 ตารางการกระจายความหนา LLDPE และ PCH4000

ลำดับที่	การกระจายความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)					
	LLDPE	PCH4000 <250 μm	PCH4000 >250 μm	LLDPE	PCH4000 <250 μm	PCH4000 >250 μm
ชนิด	ฝากล่องด้านบน			ฝากล่องด้านล่าง		
1	3.37	2.17	3.28	3.29	4.65	4.21
2	3.05	2.67	2.53	3.68	1.52	4.12
3	3.15	2.40	2.36	3.53	3.93	4.16
4	3.68	4.91	2.82	3.57	5.10	4.25
5	3.51	3.16	2.54	3.86	3.26	4.19
6	3.19	1.92	2.48	3.67	1.38	3.92
7	3.30	6.85	2.64	3.82	5.28	4.18
8	3.15	5.15	2.22	4.10	5.85	4.28
9	3.13	2.88	2.56	3.38	1.59	4.21
10	3.15	3.47	2.8	3.42	5.71	4.16

4.10 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยทำการตัดชิ้นงานจากกล่องทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป ฝาด้านบน ตัดให้เป็นขนาดกว้าง 10 เซนติเมตรยาว 10 เซนติเมตร เพื่อเตรียมทำการทดสอบ ความแข็ง และ ทดสอบการเจาะทะลุ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดง (a) ชิ้นงานทดสอบ LLDPE, (b) ชิ้นงานทดสอบ PCH4000, (c) ชิ้นงานทดสอบ PCH4000 อนุภาคใหญ่กว่า 250 μm ฝาด้านบน และ (d) ชิ้นงานทดสอบ PCH4000 อนุภาคใหญ่กว่า 250 μm ฝาด้านล่าง

หมายเหตุ : ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็ง (Hardness Test) และ การเจาะทะลุ (Puncture Test) ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานจาก PCH2000 ได้เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปในงานขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding) ได้จึงไม่มีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ และในส่วนของ PCH4000 เนื่องจากชิ้นงานที่ได้มีความเปราะ จึงยากที่จะเตรียมชิ้นงานในการทดสอบอื่นๆ

4.11 การทดสอบความแข็งที่ผิวแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test)

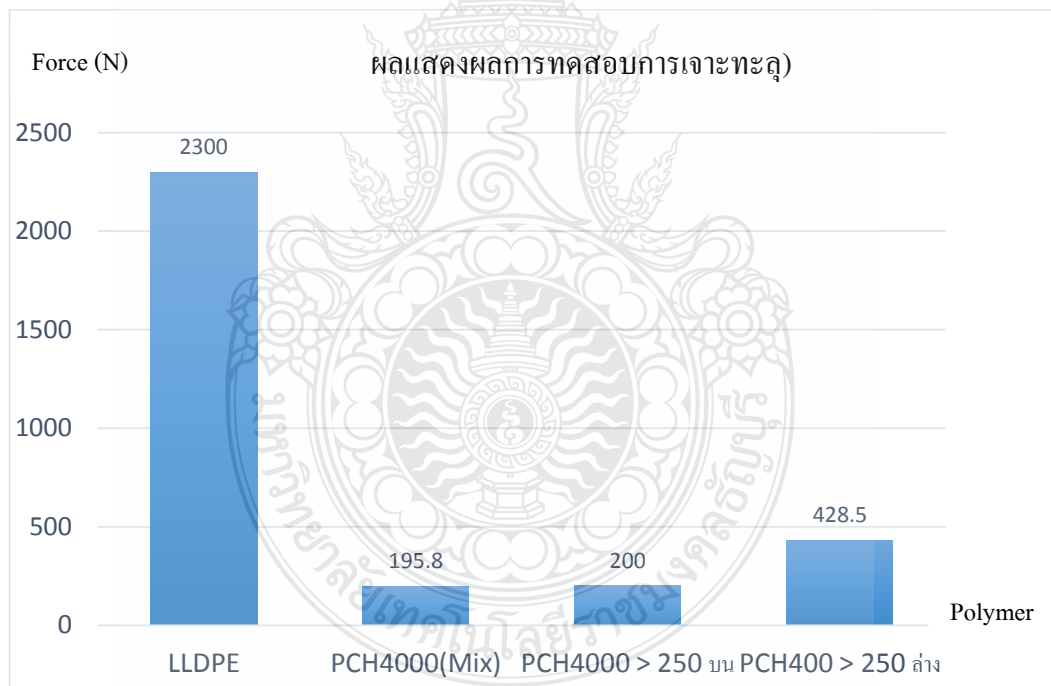
จากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจาก LLDPE มีค่าความแข็งที่ผิวประมาณ 26.78 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจาก PCH4000 ที่ไม่ได้ทำการแยกขนาด พบว่า ค่าความแข็งที่ผิวของ PCH4000 มีค่าความแข็งมากกว่าของ LLDPE คือที่ 116.68 และจากการแยกขนาดของ PCH4000 พบว่า ค่าความแข็งของ PCH4000 ที่ทำการแยกขนาด 2 กลุ่ม คือ ขนาดอนุภาคที่มากกว่า 250 μm และขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 250 μm มีค่าความแข็งที่ผิวที่ใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าชิ้นงานของ PCH4000 มีความแข็งที่มากกว่า ชิ้นงาน LLDPE เพราะพอลิคาร์บอเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง เป็นพลาสติกเชิงวิศวกรรม ส่งผลให้ค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนที่มีโมเลกุลเกาะติดกันแบบหลวมๆ ไม่แน่นหนา [3] สำหรับชิ้นงานที่ทำการแยกขนาด พบว่า การแยกขนาดของ PCH4000 ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวของตัวผลิตภัณฑ์ เนื่องจากได้ค่าความแข็งที่ผิวใกล้เคียงกับ PC4000 ที่ยังไม่ทำการแยกขนาด ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความแข็งที่ผิว (Rockwell Hardness Test)

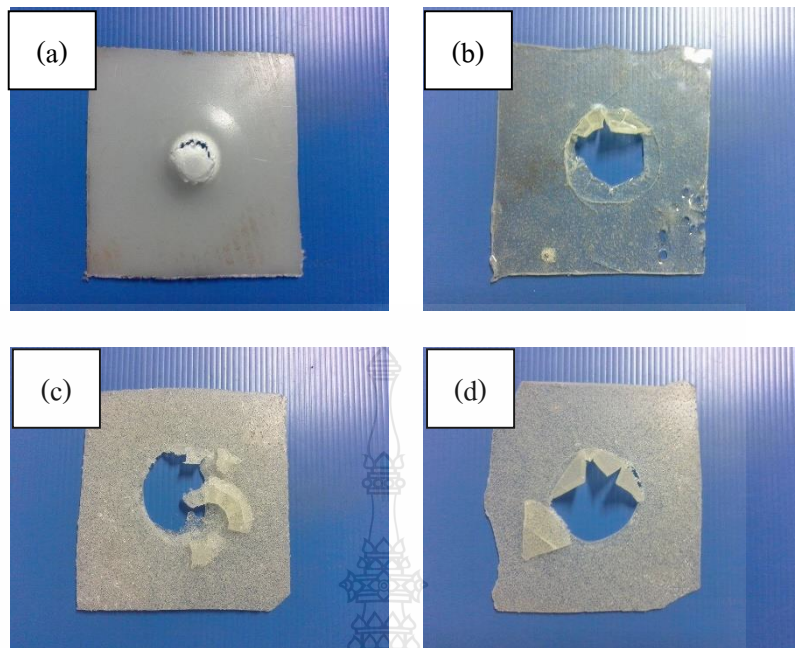
ลำดับที่ ชนิด	ความแข็งที่ผิวของชิ้นงานทดสอบ			
	LLDPE	PCH4000 Mix	PCH4000 > 250 μm	PCH4000 <250 μm
1	27.1	120.1	116	113.2
2	25.4	120.1	119.3	116.5
3	27.6	118.5	115.6	119.3
4	27.2	107	112.3	116.8
5	26.6	117.7	119	116.5
เฉลี่ย	26.78	116.68	116.44	116.46

4.12 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Puncture Test)

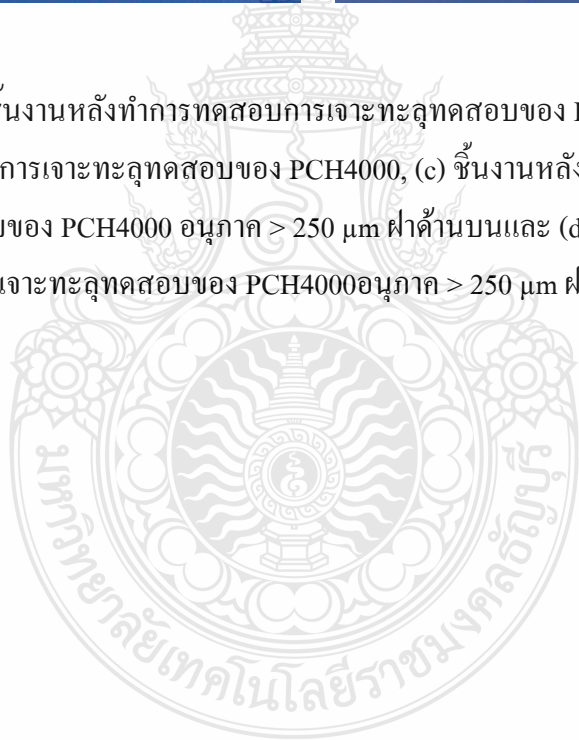
จากผลการทดสอบ พบว่า ชี้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วย LLDPE มีความต้านทานแรงเจาะทะลุมากกว่า ที่ทำการขึ้นรูปด้วย PCH4000 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เพราะชี้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยพอลิเอทิลีนเป็นชี้นงานที่มีความเหนียวค่อนข้างสูงส่งผลให้รับแรงการเจาะทะลุค่อนข้างดีและชี้นงานมีความสมบูรณ์ มีการกระจายความหนาที่ดี ไม่เกิดฟองอากาศภายในชี้นงาน ซึ่งแตกต่างกับชี้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิคาร์บอเนต ลักษณะชี้นงานมีการกระจายความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ ด้านล่างของกล่องชี้นงานมีความหนาที่มากกว่าด้านบนและฟองอากาศเกิดขึ้นตลอดชี้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.17 การให้ความร้อนแก่พอลิคาร์บอเนตในช่วงเวลานาน ส่งผลต่อโครงสร้างภายในของพอลิคาร์บอเนตจากวัสดุที่เหนียวเป็นแข็งเปราะ และเนื่องจากข้อด้อยของกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่ไม่แรงใดๆ มากระทำและเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปค่อนข้างนานจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่ง ที่ส่งผลต่อการนำพอลิคาร์บอเนตมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน



รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ PCH4000 เทียบกับ LLDPE



รูปที่ 4.17 แสดง (a) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ LLDPE, (b) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ PCH4000, (c) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ PCH4000 อนุภาค > 250 μm ฝาด้านบนและ (d) ชิ้นงานหลังทำการทดสอบการเจาะทะลุทดสอบของ PCH4000อนุภาค > 250 μm ฝาด้านล่าง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปผลงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง ความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิคาร์บอเนตได้ดังต่อไปนี้

รูปร่างสัณฐานวิทยา

ผลจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า พอลิคาร์บอเนตที่ใช้ในงานวิจัยมีรูปร่างค่อนข้างกลม เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีน ในส่วนขนาดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดได้แก่ พอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่า $250\ \mu\text{m}$ และพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า $250\ \mu\text{m}$

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

ผลจากการหาน้ำหนักโมเลกุลเพื่อทำการเปรียบเทียบ พบว่า PCH2000 มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่า PCH4000 และยังมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า PCH4000 ซึ่งส่งผลให้สมบัติการไหลและกระบวนการการขึ้นรูป กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะให้ค่าความหนืดที่สูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลส่งผลต่อขั้นตอนการเผาไหม้ทำให้การเผาไหม้ของพอลิเมอร์แต่ละอนุภาคไม่พร้อมกันส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูป

สมบัติการไหลของพอลิเมอร์

ผลการตรวจสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ พบว่า PCH2000 มีค่าความหนืดที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนและ PCH4000 ซึ่งความหนืดนี้ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนมีแรงภายนอกกระทำค่อนข้างน้อย แรงที่ใช้เกิดจากครกหมุนเหวี่ยงเพียงอย่างเดียว ฉะนั้นพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนืดค่อนข้างสูงจึงขึ้นรูปด้วยกระบวนการชนิดนี้ค่อนข้างยาก และจากการศึกษาสมบัติการไหล พบว่าขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดของพอลิเมอร์

สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์

ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ พบว่า พอลิคาร์บอเนตทั้ง 2 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตมีโครงสร้างเป็น Amorphous ทำให้มีจุดหลอมเหลวที่ไม่แน่นอน แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีน ในกระบวนการขึ้นรูปจึงใช้อุณหภูมิที่สูงกว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยพอลิเอทิลีน

ความหนาแน่นรวมและการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์

ผลจากการตรวจสอบหาความหนาแน่นรวม พบว่า พอลิเอทิลีนที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีความหนาแน่นรวมที่ต่ำกว่าอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากรูปร่างที่ไม่สมมาตร ทำให้เกิดช่องว่างของอากาศได้ง่ายกว่า ในส่วนของพอลิคาร์บอเนต อนุภาคที่ค่อนข้างกลมกว่าพอลิเอทิลีน ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมีค่าความหนาแน่นรวมที่สูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ผลจากการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ พบว่าอนุภาคขนาดใหญ่สามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็กในทุกกรณี เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กเกิดการเทกองได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อีกทั้งรูปร่างที่กลมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ได้

อิทธิพลของสภาวะการขึ้นรูป

ผลจากการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการบวกรูปร่าง พบว่า PCH2000 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ อันเนื่องมาจากค่าความหนืดที่สูง อีกทั้งอุณหภูมิสูงสุดที่เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ค่อนข้างจำกัด ในส่วนของ PCH4000 โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน พบว่า อนุภาคที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้อยู่ในช่วง 150 μm ถึง 300 μm ซึ่งอนุภาคของพอลิคาร์บอเนตขนาดเล็กมีขนาดเล็กกว่า 150 μm ทำให้การเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์เป็นไปได้ยากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ การเลือกใช้เวลาในกระบวนการขึ้นรูป พบว่า เวลาที่นานขึ้นส่งผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงาน

การทดสอบความแข็งที่ผิว

ผลจากการทดสอบความแข็งที่ผิว พบว่า พอลิคาร์บอเนตมีค่าความแข็งที่ผิวมากกว่าพอลิเอทิลีน เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ดี

ผลการทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

ผลจากการทดสอบ พบว่า การต้านทานการเจาะทะลุของชิ้นงานพอลิเอทิลีนมีค่ามากกว่าชิ้นงานพอลิคาร์บอเนต อันเนื่องมาจากในกระบวนการขึ้นรูป พอลิเอทิลีนมีค่าการทนต่อความร้อนค่อนข้างดีกว่าพอลิคาร์บอเนตชิ้นงานที่ได้จึงมีสมบัติที่ดีกว่า อีกทั้งรอบการหมุนของเครื่องขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับพอลิเอทิลีนมากกว่า ทำให้ในกระบวนการขึ้นรูปพอลิคาร์บอเนตไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาต่อในเรื่องของรอบการหมุนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป PC เพราะเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนที่เราใช้ไม่สามารถปรับรอบการหมุนได้จึงทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปเพราะรอบการหมุนแกนหลักต่อแกนรอง 6:1 เหมาะสำหรับการขึ้นรูปพอลิเอทิลีน แต่ไม่เหมาะกับ พอลิคาร์บอเนต และการปรับปรุงเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนแบบกระสวยเดี่ยวของภาควิชาให้สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 280 °C ซึ่งทำให้การขึ้นรูปมีแนวโน้มความเป็นไปได้ มากขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Nugent, P.J. and Crawford, R.J. (1992). **Rotational Molding of Plastics**, Crawford, R J. ed., John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- [2] Chiu, FC, and Ting, MH. (2007). **Thermal Properties and Phase Morphology of Melt-Mixed Poly (Trimethyleneter Tephthalate)/Polycarbonate Blends- Mixing Time Effect**. Polymer Testing 26 (pp338-350).
- [3] เอกสารประกอบการสอน “สารสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติก” ม.ป.ป. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [4] Biron, Michel. (2007). **Thermoplastics and Thermoplastic Composites**. (1st ed). Burlington: Elsevier Ltd.
- [5] Legrand, Donald G., and Bendler, John T. (2000). **Handbook of Polycarbonate Science And Technology**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [6] [Online] Available: <http://pslc.ws/mactest/pe.htm>
- [7] Banu Koç, Ismail Eren, Figen Kaymak Ertekin. **Modelling Bulk Density, Porosity and Shrinkage of Quince During Drying: The Effect of Drying Method**. Original Research Article. Journal of Food Engineering, Volume 85, Issue 3, April 2008, Pages 340-349
- [8] Gupta, R.K. (2000). **Polymer and Composite Rheology**. Marcel Dekker Inc, New York.
- [9] Dealy J. M. & Saucier P. (2000). **Rheology in Plastic Quality Control** Hanser Publishers, Munich
- [10] Saini D. R. & Shenoy A. V. (1983). **Viscoelastic Properties of Linear Low Density Polyethylene Melt**, Eur Polym. (J.19 pp. 811-816).
- [11] Cogswell F. N. (1981). **Polymer Melt Rhology**. George Godwin Ltd, London
- [12] ณรงค์ชัย โอเจริญ, อติเทพ สหธรรมปกรณ์, วิวัฒน์ ไชยนาพงษ์, และ จิรวุฑ์ เกตุวโรภาส. (2539). **การสร้างเครื่อง Rotational Molding**. โครงร่างปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.
- [13] R.J. Crawford and M.P. Kearns. (2003). **Practical Guide to Rotational Moulding**. Queen’s University, Belfast

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, เอกสารประกอบการสอน “**Polymer Characterization and Analysis**” คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ (มจร.)
- [15] Shah, Vishu. (1998). **Handbook of Plastics Testing Technology**. (2nd ed). Jon Wiley and Son, Inc.
- [16] เอกสารประกอบการสอน “**ปฏิบัติการทดสอบพลาสติกและการวิเคราะห์**” ม.ป.ป. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [17] Dealy, J.M. and Wissbrun K.F. (1990). **Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing**. Van Nostrand Reinhold, New York, USA
- [18] Malkin A.Y. (2006). **Rheology – Concepts, Methods, & Applications**, ChemTec Publishing. Toronto, Canada.
- [19] Shih-Jung Liu, Kang-Ming Peng. (2010). **Rotational Molding of Polycarbonate Reinforced Polyethylene Composites: Processing Parameters and Properties**. POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE
- [20] Tomasz Jachowicz, Janusz W. Sikora. (2013). **Investigation of the Influence of Mold RotaionalL Speed on The Cast Wall Thickness in The Rotational Molding Process**. Advances in Science and Technology Research Journal Volume No. (pp. 79–87)
- [21] Alvin Spence, **Investigation of the Rheological Properties of Rotomolding Resins**. Centro Incorporated
- [22] Peter BŪTORA, Antonín NÁPLAVA, Martin RIDZON, Jozef BĪLIK, Viktor TITTEL. (2011). **Particle Filled Polyethylene Composites Used in The Technology of Rotational Moulding**. Slovak University of Technology in Bratislava

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์



Industrial Engineering Department
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

IE NETWORK CONFERENCE 2014

30-31 October 2014
Novotel Suvarnabhumi Airport Hotel
www.ienet-th.org

Diversifying Industrial Engineering
for Future Generation

Proceedings



การไฟฟ้านครหลวง
Metropolitan Electricity Authority



ตารางการนำเสนอผลงาน

วันที่ 30 ตุลาคม 2557

	Room1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5	Room 6	Room 7
09.00-09.25	MM 149	MM 189	OM 133	OM 123	LG 166	GE 153	QE 150
09.25-09.50	MM 162	MM 243	OM 134	OM 128	LG 182	GE 238	QE 156
09.50-10.15	MM 220	MM 267	OM 139	OM 131	LG 208	GE 334	QE 204
10.15-10.40	MM 292	MM 338	OM 183	OM 160	LG 211	GE 360	QE 205
10.40-11.05	MM 325	MM 353	OM 374	OM 172	LG 214	GE 381	QE 225
11.05-11.20	พักรับประทานอาหารว่าง						
11.20-12.00	การบรรยายพิเศษ						
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน						
13.00-13.25	MM 159	MM 135	OM 175	OM 129	LG 223		Meeting
13.25-13.50	MM 200	MM 168	OM 354	OM 142	LG 259		Meeting
13.50-14.15	MM 215	MM 179	OM 247	OM 152	LG 305		Meeting
14.15-14.40	MM 229	MM 203	OM 291	OM 154	LG 377		Meeting
14.40-14.55	Break						Meeting
14.55-15.20	MM 301	MM 230	OM 326	OM 126			Meeting
15.20-15.45	MM 355	MM 327	OM 350	OM 193			Meeting
15.45-16.10	MM 366	MM 356	OM 352	OM 351			Meeting
16.10-16.35	MM 132	MM 373	OM 190	OM 318			Meeting
16.35-17.00	MM 345						
17.05-18.00	พิธีเปิดการประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ปี 2557						
18.00-22.00	รับประทานอาหารเย็น						

ตารางการนำเสนอผลงาน

วันที่ 31 ตุลาคม 2557

	Room1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5	Room 6	Room 7
09.00-09.25	MM 253	MM 167	OM 209	OM 138	QE 244	PL 127	WE 146
09.25-09.50	MM 361	MM 206	OM 221	OM 155	QE 245	PL 140	WE 233
09.50-10.15	MM 358	MM 347	OM 252	OM 254	QE 271	PL 186	WE 235
10.15-10.40	MM 331	MM 357	OM 328	OM 224	QE 282	PL 201	WE 250
10.40-11.05	MM 276	MM 367	OM 339	OM 263		PL 323	WE 251
11.05-11.20	พักรับประทานอาหารว่าง						
11.20-12.00	การบรรยายพิเศษ						
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน						
13.00-13.25	MM 274	MM 176	OM 187	OM 312	QE 283	OR 147	WE 368
13.25-13.50	MM 165	MM 188	OM 255	OM 321	QE 306	OR 158	WE 272
13.50-14.15	MM 303	MM 202	OM 256	OM 322	QE 320	OR 212	WE 359
14.15-14.40	MM 198	MM 210	OM 284	OM 372	QE 324	OR 290	WE 365
14.40-14.55	พักรับประทานอาหารว่าง						
14.55-15.20	MM 194	MM 273		OM 378	QE 329	OR 298	WE 370
15.20-15.45	MM 195	MM 375		LG 260	QE 349	OR 299	WE 371
15.45-16.10	MM 151	MM 304					WE 184
16.10-16.35	MM 170						

MM	Material and Manufacturing Processes	Room 1	Suvarnabhumi C
QE	Quality Engineering and Management	Room 2	Chiang Rath
OM	Operation Management	Room 3	Chiang Ruth
OR	Operation Research	Room 4	Chiang Tung
PL	Plant Design	Room 5	Nan Chao
LG	Logistics and Supply Chain Management	Room 6	Lad Chang
GE	Green and Sustainable Technology Management	Room 7 Meeting	ประชุมสามัญหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ณ ห้อง Crew Lounge
WE	Work Study, Ergonomics and Design Engineering		

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการ

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ประธาน กรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๖. ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๗. ดร.ไพโรจน์ ฤดาวิจิตรกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย กานตานันทะ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
๙. ดร.ชนะ รัชศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรงค์ กลั่นคำสอน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๒. ดร.เพ็ญสุตา พันธุ์ธิดา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๓. ดร.จิตติกร พัฒนพิบูล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๔. ดร.นัฏฐวิภา จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๕. ดร.ศิริรัตน์ หมั่นวนิชกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๖. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๗. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญรงค์ สายแก้ว	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา ราชฤทธิ์ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน พิธีพัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐรัฐสมบุรณ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขอังคณา แกล่งกันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ

๒๔. รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๕. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมนพูนท เกษมเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๐. ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๑. ดร.วสวัชร นาคเขียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๒. ดร.อนิรุท ไชยจารุภูมิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๓. รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๔. รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๕. รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย ไชมพัตรภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์นทนา อุดมศักดิ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุนทราวาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พจมาน เตียวัฒนรัฐติกาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๑. ดร.ไพบุลย์ ช่างทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๒. ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๓. ดร.พิเนชฐ์ ศรีโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ

๔๔. ดร.วิบูลย์ ตังวโรตมณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๕. ดร.อุษณีย์ คำพูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๖. อาจารย์สมพร เพียรสุขมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๗. อาจารย์สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
๔๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
๕๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๑. อาจารย์ธนภุต ไซติภาวริศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๒. อาจารย์ธนิดา สุนาร์ักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๓. อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงทัตถวัฒนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๔. อาจารย์วรินทร์ เกียรติคุณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทร์มณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๗. ดร.ฤทธิชัย เภาเนียม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐา คุปต์ขุญเฐียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๕๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ ตรียวนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ

๖๒. ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๓. ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ อินตะวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อาวิพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๖. ดร.แมน ด้อยแพร่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๗. ดร.บรรเจิด แสงจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๘. ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๙. ดร.อลงกต ลิ้มเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๗๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยงยุทธ ดุยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๒. อาจารย์รอมฎอน บุระพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทโชติ อุดมศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรินทร์ น่วมทิม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ

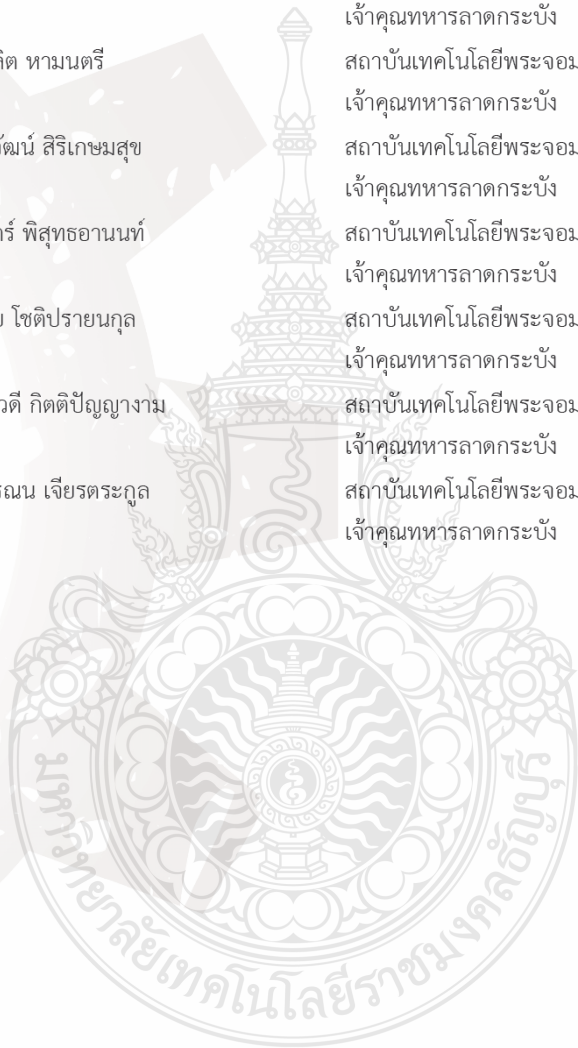
๗๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ร่ำพิง เจริญยศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๖. ดร.สมพงษ์ พิริยานต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๗๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมเกียรติ ศรีศิลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๗๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรเดช สุวิทยารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทัศน์ ยอดเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพจน์ วัชโรภากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๒. รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๕. ดร.จกกล ศรีธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๖. ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร หอมรสสุนธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
๘๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
๘๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๑. ดร.สัมพันธ์ รัฐวิบูลย์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๒. ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๓. ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๔. อาจารย์อรดี พฤติศรีณนันท	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิษญา สิมารักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ

๙๙. ดร.ขวัญนิธิ คำเมือง	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๑๐๐. ดร.ภาณุ บูรณจารุกร	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๑๐๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ	มหาวิทยาลัยปทุมธานี	กรรมการ
๑๐๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรทอง ทองจัด	มหาวิทยาลัยพะเยา	กรรมการ
๑๐๓. รองศาสตราจารย์สุคนธ์ อาจฤทธิ	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กรรมการ
๑๐๔. อาจารย์ณภัทร อินทนนท์	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กรรมการ
๑๐๕. รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรนาถ ไธภู	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๗. ดร.จิรพรธม เลียงโรคาพาธ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๘. ดร.รณชัย ศิโรเวฐนุกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๙. ดร.ศุภชัย ราษฎร์ศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๐. อาจารย์กัญจน์ คณาธารทิพย์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๑. อาจารย์ดวงยศ สุภักดิ์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๒. อาจารย์ธนา สัตรา	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๓. อาจารย์พิมพ์วัลลย์ สุตะโคตร	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๖. ดร.พิชญ มนัสปิติ	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๗. อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๘. อาจารย์พรรคพงษ์ แก่นณรงค์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๙. อาจารย์ศิลป์ชัย วิฒนเสย	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๐. อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๑. อาจารย์สมพร พรหมดวง	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๒. ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
๑๒๓. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๕. ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๖. ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๗. ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ

๑๒๘. ดร.สิริเดช ซาตินิยม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒน์พงศ์ อริยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๒. ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๓. อาจารย์จักรพันธ์ กัณหา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๔. อาจารย์ธนิศ ศรีวะระมย์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย สีกากวีวงศ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๘. ดร.กัญญา ทองสนิท	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๙. ดร.คณิศ พลอยคณัย	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๐. ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๑. อาจารย์วิชัย จันทร์รักษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๒. รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๓. รองศาสตราจารย์วันดา รัตน์มณี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลางเดือน โปชนา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตน์วิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุจน์ สังข์พงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ เจริญจิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สงวน ตั้งโพธิธรรม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๙. ดร.วันัฐมพงษ์ คงแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๕๐. รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วินิช ทวี	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐวุฒิ ฐัฒนคุณ	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๔. อาจารย์ณัฐพล พุฒยางกูร	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๕. อาจารย์ปยุตยา คินดี	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๖. อาจารย์ชานิดา พิทยานนท์	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๗. อาจารย์จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ

๑๕๘. อาจารย์จิตตดา หมายมั่น	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
๑๕๙. อาจารย์วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
๑๖๐. อาจารย์อรอุมา กอสนาน	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
๑๖๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตะวันฉาย โพธิ์หอม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพ็ชรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๕. ดร.จรรยาพร แสนทวีสุข	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๖. ดร.ธารชуда พันธนิกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๗. ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๘. ดร.สัมพันธ์ โอฬาริยกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๙. อาจารย์ฐิตินันท์ ศรีสุวรรณดี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๗๐. พันโทหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญพัชร คง วัฒนานันท์	โรงเรียนนายร้อยพระ จุลจอมเกล้า	กรรมการ
๑๗๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศุทธิ พงษ์ชัยฤกษ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๕. ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๖. ดร.กรกฎ เหมสถาปัตยกรรม	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๗. ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๗๙. รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๐. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๑. รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๒. รองศาสตราจารย์ ดร.ภรณ์ชัย กัลยาศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ

๑๘๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรดินันท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๖. ดร.เชาวลิต หามนตรี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๗. ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๘. ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๙. ดร.พลชัย โชติปราชญกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๙๐. ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๙๑. อาจารย์ธณน เจียรตระกูล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ และ เลขานุการ



การขึ้นรูปพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน Forming Biodegradable Plastic with Rotational Molding

จักรารัฐ วงศ์ศักดิ์¹ เอกตินัย จันทร์ศรี² ณรงค์ชัย โอเจริญ³

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี
E-mail: Jakrawutwongsak@gmail.com*

Jakrawut Wongsak¹ Ektinai Junsri² Narongchai O-Charoen³

^{1,2,3}Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani
E-mail: Jakrawutwongsak@gmail.com*

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมพลาสติกนิยมใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทวงขนาดใหญ่ เช่น ถังเก็บน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย ถังน้ำแข็ง เป็นต้น ซึ่งนิยมใช้พอลิเอทิลีนในรูปแบบผงละเอียด (Powder) เป็นวัตถุดิบเป็นหลัก ในงานวิจัยนี้มุ่งที่จะทดลองหาวัสดุใหม่ๆ มาทดลองขึ้นรูปเพื่อเป็นทางเลือกอื่น ๆ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติในด้านอื่นๆ เช่น ความใส เป็นต้น จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าวัสดุที่นำมาทดลองใช้ขึ้นรูปแบบหมุนได้ในบางกรณีเช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) ชนิดที่มีขนาดอนุภาค Micro-pellet และมีพื้นฐานค่อนข้างกลม สามารถทำการขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับ LLDPE ในขณะที่การกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้พบว่าพอลิเอทิลีนมีการกระจายความหนาได้ใกล้เคียงกันทั้งชิ้น ตรงกันข้ามกับที่พบในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิแลกติกแอซิด (PLA) พบว่าผนังชิ้นงานในแต่ละด้านมีความหนาต่างกันมาก ซึ่งจากการศึกษานี้ทำให้พบได้ว่า ขนาดและรูปร่างของอนุภาควัสดุที่ใช้ขึ้นรูป และรอบการหมุนของเครื่องขึ้นรูปล้วนแต่มีผลต่อการกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้

คำหลัก กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน พอลิแลกติกแอซิด รูปร่างและขนาดอนุภาคของผงพลาสติก

การขึ้นรูปพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน Forming Biodegradable Plastic with Rotational Molding

จักรวราช วงศ์ศักดิ์¹ เอกดิษฐ์ จันทร์ศรี² ณรงค์ชัย โอเจริญ³

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี
E-mail: Jakrawutwongsak@gamil.com*

Jakrawut Wongsak¹ Ektinai Junsri² Narongchai O-Charoen³

^{1,2,3}Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani
E-mail: Jakrawutwongsak@gamil.com*

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมพลาสติกนิยมใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กึ่งวงขนาดใหญ่ เช่น ถังเก็บน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย ถังน้ำแข็ง เป็นต้น ซึ่งนิยมใช้พอลิเอทิลีนในรูปแบบผงละเอียด (Powder) เป็นวัตถุดิบเป็นหลัก ในงานวิจัยนี้มุ่งที่จะทดลองหาวัสดุใหม่ๆ มาทดลองขึ้นรูปเพื่อเป็นทางเลือกอื่น ๆ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติในด้านอื่นๆ เช่น ความใส เป็นต้น จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าวัสดุที่นำมาทดลองใช้สามารถขึ้นรูปแบบหมุนได้ในบางกรณีเช่น พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ชนิดที่มีขนาดอนุภาค Micro-pellet และมีสีน้ำตาลค่อนข้างกลม สามารถทำการขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับ LLDPE ในขณะที่การกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้พบว่าพอลิเอทิลีนมีการกระจายความหนาได้ใกล้เคียงกันทั้งชิ้น ตรงกันข้ามกับที่พบในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พบว่าผนังชิ้นงานในแต่ละด้านมีความหนาต่างกันมาก ซึ่งจากการศึกษาทำให้พบได้ว่า ขนาดและรูปร่างของอนุภาควัสดุที่ใช้ขึ้นรูป และรอบการหมุนของเครื่องขึ้นรูปล้วนแต่มีผลต่อการกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้

คำหลัก : กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน พอลิแลคติกแอซิด รูปร่างและขนาดอนุภาคของผงพลาสติก

Abstract

In the plastics industry widely used the rotational molding to make the large hollow products such water tanks, septic tanks, ice boxes, etc., which use polyethylene in a fine powder form as a raw material mainly. This research aims to use the new materials were tested up to the other alternatives for the desired product properties in other areas, such as clarity. The results of the preliminary trial found that polycarbonate can be molded with the rotational molding process in some cases Such as poly-lactic acid (PLA) with a particle size of Micro-pellet and still have quite a rounded morphology. Can be formed similar to LLDPE. The polyethylene specimen were found that the thickness distribution were similar in all pieces. In contrast to that found in specimens molded with polycarbonate, the wall pieces on each side with different thickness. This study found that the size and shape of the plastics particles and the rotation speed of the molding machine are all affecting the thickness distribution of the specimen.

Keywords : Rotational Molding, Polylactic Acid, Shape and Size of Plastic Powder

1. บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน หรือกระบวนการขึ้นรูปแบบเบ้าหมุน (Rotational molding, Rotomolding or Rotoforming) เป็นกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะ กลวง ขนาดใหญ่ และมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งยากต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่น โดยลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ถังขนาดใหญ่ ถังที่ใช้ในอุตสาหกรรม เรือใบ เป็นต้น โดยในปัจจุบันเทคนิคการขึ้นรูปแบบหมุนใช้แปรรูปพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ซึ่งส่วนมากก็คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) [1,2] ลักษณะพิเศษของกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้คือ ในกระบวนการผลิต จะไม่มีการใช้ความดันที่สูง (High Pressure) และ อัตราเฉือนที่สูง (High Shear Rate) แตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่น เช่น กระบวนการอัดรีดพลาสติก (Extrusion molding) และกระบวนการฉีด พลาสติก (Injection molding) ทำให้แม่พิมพ์ที่ใช้มีราคาค่อนข้างถูก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบอื่นๆ อีกทั้งเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตไม่ซับซ้อนสามารถจัดทำขึ้นได้ภายในประเทศ จึงมีแนวโน้มในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้มากขึ้นทุกปี

พอลิแลคติกแอซิด [Poly(lactic acid), PLA] [3,4] เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยเป็น เอสเทอร์ชนิดอะลิฟาติกสายโซ่ตรง (linear aliphatic polyester) ที่ได้จากการดแลคติก (lactic acid) จากการหมักแป้ง กรดแลคติก สามารถอยู่ในสอง enantiomeric form คือ D(+) configuration และ L(-) configuration ทำให้ได้ PLA ที่เป็น enantiomeric polymer โดยทั่วไป PLA ที่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นโคพอลิเมอร์ของ L-lactide และ D-lactide PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านบรรจุภัณฑ์และทางการแพทย์ ทั้ง PLA มีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถขึ้นรูปได้ง่าย สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเตรียมจากแป้งซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ทดแทนได้ (renewable resources)

ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการนำ PLA มาทำการขึ้นรูปแบบหมุน วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ PLA มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการขึ้นรูปแบบหมุน รวมทั้งหาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการขึ้นรูปแบบหมุน และยังสามารถใช้ PLA เป็นทางเลือกอีก

ทางหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน [5] โดยศึกษาสมบัติการไหลของ พอลิแลคติกแอซิด เปรียบเทียบกับ พอลิเอทิลีน ที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน และดูการกระจายความหนาของชิ้นงานที่ได้ เมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้อยู่แล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการหาวัสดุใหม่มาเลือกใช้ใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปแบบหมุนต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการดำเนินการนี้ได้ใช้พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid), PLA ของบริษัท PTT ที่มีลักษณะแบบ Micro-pellet ที่มีขนาดเล็กกว่าเม็ดพลาสติกปกติทั่วไป ความหนาแน่นที่ 1.24 g/m^3 T_m ที่ประมาณ $153 \text{ }^\circ\text{C}$ และ ผงพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) เกรด M3204RUP จากบริษัท Thai Polyethylene Co., Ltd. และตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ LLDPE กับ PLA

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ LLDPE กับ PLA

	Tensile(kpsi)	%Elongation	Hardness
LLDPE	250	1000	55
PLA	21	160	83

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

2.2.1 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุน (Rotational Molding)

ชนิด Shuttle-Style-Machine ที่ออกแบบและจัดสร้าง ขึ้นใช้งานในภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีตั้งในรูปภาพที่ 1 [6] ที่นำมาใช้ขึ้นรูปตัวอย่างในงานวิจัยนี้โดยใช้แก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas; LPG) เป็นเชื้อเพลิง แม่พิมพ์ที่ใช้จะเป็น แม่พิมพ์กล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 31x20x5 เซนติเมตรดังแสดงในรูปภาพที่ 2 โดยน้ำหนักรวมของวัสดุแม่พิมพ์ประมาณ 651 กรัม สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างที่ความหนา 3 มิลลิเมตร ในกระบวนการขึ้นรูปให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่ $200 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $240 \text{ }^\circ\text{C}$ ใช้เวลาในการให้ความร้อน 10 นาที และใช้เวลาในการหล่อเย็นประมาณ 20-30 นาที จน

อุณหภูมิของแม่พิมพ์ลดลงเหลือ 50-60 °C จากนั้นทำการปลดชิ้นงาน

เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม.ความยาวตาย 180 มม.และรูตายมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม.



รูปภาพที่ 1 แสดงเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน ชนิด Shuttle-Style ที่ใช้ในรูปชิ้นงานทดสอบ



รูปภาพที่ 2 แสดงแม่พิมพ์รูปทรงกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

2.2.2 เครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบแคปิลลารี (Capillary Rheometer) รุ่น RH2000 ของบริษัท Malvern Instrument ดังแสดงในรูปภาพที่ 3 หลักการพื้นฐานของการทำงาน [7,8] ได้แก่การทำให้อ้อย่างเทอร์โมพลาสติก (รูปทรงเริ่มต้นที่เป็นเม็ด, ผง หรือ ชี้น้อย) ให้เปลี่ยนเป็นของเหลวโดยใช้ความร้อน จากนั้นใช้แรงดันทำให้ของเหลวไหลออกจากกระบอกผ่านออกไปยังหัวตายแคปิลลารี ค่าที่วัดได้แก่ความดันที่เกิดขึ้นในสภาวะการไหลด้วยอัตราคงที่ เส้นกราฟของการไหลมักจะเป็นผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งเป็นผลจากการประเมินค่าในช่วงของจุดข้อมูลทดสอบหลายจุด ความหนืดมีหน่วยวัดค่า (หน่วยเอสไอ) เป็นปาสกาล.วินาที (Pa·s) หรือนิวตันวินาทีต่อตารางเมตร (N·s/m²) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแคปิลลารีจะสามารถจำลองสภาวะการทดสอบที่คล้ายคลึงกับสภาวะจริงในกระบวนการผลิต โดยในการทดลองนี้ใช้สภาวะการทดลองที่มีอัตราเฉือนต่ำ Shear rate (s⁻¹) ที่สภาวะ 10-50 s⁻¹ เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนหรือรีโอมิเตอร์ที่ต่ำ และใช้หัวตายขนาด

2.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: JSM-6510, JEOL, JAPAN) เป็นเครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐาน โดยมีกำลังขยายค่อนข้างสูง ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป หลักการพื้นฐานของการทำงานคือนำวัสดุที่จะทำการส่องไปเคลือบด้วยอนุภาคโลหะเพื่อให้มีสภาวะนำไฟฟ้า จากนั้นทำการส่องโดยเครื่องจะปล่อยกระแสอิเล็กตรอนลงมากระทบกับชิ้นงานจากนั้นแปลงเป็นสัญญาณภาพ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปภาพที่ 3 แสดงเครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary Rheometer)

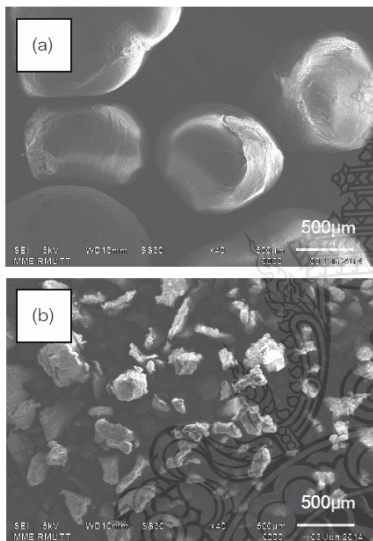
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 สัณฐานของวัสดุก่อนการขึ้นรูป

การขึ้นรูปกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนหรือรีโอมิเตอร์นั้น ปัจจัยสำคัญที่มีผลคือรูปร่างและขนาดของวัสดุจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ที่กำลังขยาย 40 เท่าแสดงถึงขนาดของเม็ดพลาสติก PLA ดังแสดงในรูปภาพที่ 4 (a) ที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับผง LLDPE ดังแสดงในรูปภาพที่ 4 (b) อีกทั้งเม็ดพลาสติก PLA มีลักษณะค่อนข้างกลม ทำให้เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป แต่ด้วยขนาดที่ค่อนข้างใหญ่และมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่างกัน ทำให้สมบัติการไหลของ PLA ยังไม่คล้ายคลึงกันเท่าที่ควรเป็นผล การลดขนาดเม็ดพลาสติก PLA ลงจะช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ LLDPE ได้

3.2 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์

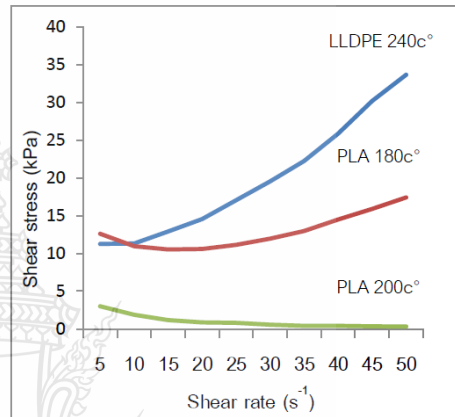
จากการทดสอบพบว่า ในสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 240 °C ช่วง Shear rate (s⁻¹) ที่ 10- 50 s⁻¹ ทั้งหมด 10 ค่า พบว่า LLDPE สามารถทำการทดสอบ และสามารถนำค่ามาทำการวิเคราะห์ได้ แต่ในส่วนของ PLA ไม่สามารถทำการทดสอบได้ที่อุณหภูมิเดียวกันนั้น เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวที่แตกต่างกันจึงเลือกใช้ อุณหภูมิที่ 200 °C และ 180 °C เพื่อทดสอบหาสมบัติการไหลที่ใกล้เคียงกับ LLDPE



รูปภาพที่ 4 แสดงภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดพลาสติก PLA (a) และ ผงพลาสติก LLDPE (b)

จากรูปภาพที่ 5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน Shear stress (kPa) และ ค่าอัตราเฉือน Shear rate (s⁻¹) โดยได้เส้นกราฟแสดงถึงค่าความหนืดของพอลิเมอร์ จะเห็นได้ว่าจากกราฟ LLDPE ที่อุณหภูมิ 240 °C มีเส้นกราฟมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ที่ 200 °C และ 180 °C แสดงให้เห็นว่า ที่ 240 °C ค่าความหนืดของ LLDPE มีค่าความหนืดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ทั้งสองช่วงอุณหภูมิ และ PLA ที่ 200 °C เส้นกราฟค่อนข้างคงที่และมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่า PLA ที่ 200 °C

มีค่าความหนืดต่ำ แต่เมื่อทำการลดอุณหภูมิลง จะได้เส้นกราฟที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นถึงความหนืดที่มีค่าเพิ่มขึ้นและใกล้เคียงกับเส้นกราฟของ LLDPE ที่ 240 °C และการเพิ่มอัตราเฉือน Shear rate (s⁻¹) ของ PLA ในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงจะช่วยทำให้สมบัติการไหลของ PLA มีความใกล้เคียงกับ LLDPE มากขึ้นอีกด้วย



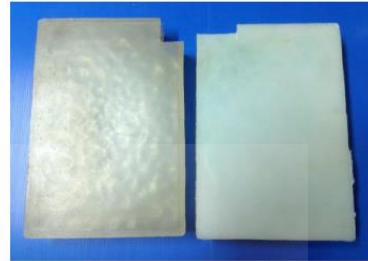
รูปภาพที่ 5 แสดงสมบัติการไหลของ LLDPE และ PLA

3.3 ผลการทดสอบการกระจายตัวของชิ้นงาน

จากตัวอย่างกล่องที่ขึ้นรูปได้ ทำการตัดชิ้นงานเพื่อวัดความหนาของฝากล่องด้านบนและด้านล่างด้วยเครื่อง Thickness measurement apparatus โดยทำการวัดชิ้นงานแบบสุ่ม 10 จุด เพื่อหาความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางพบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ทำขึ้นรูปด้วย PLA มีการกระจายความหนาที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE ที่ทำการขึ้นรูป แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขึ้นรูปของ PLA สอดคล้องกับรูปภาพที่ 5 นั่นคือสมบัติการไหลที่แตกต่างกับ LLDPE มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปทำให้เกิดความแตกต่างกันของความหนาในตัวอย่าง ชิ้นงาน จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงที่สภาวะ 200 °C ระยะเวลาในการให้ความร้อน 10 นาทีดังแสดงในรูปภาพที่ 6 พบว่า ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้เนื่องจากพอลิเมอร์นั้นไม่หลอมเหลว แต่ที่

สภาวะ 240 °C ระยะเวลาในการให้ความร้อน 10 นาที ดังแสดงในรูปภาพที่ 7 พบว่า ที่สภาวะเดียวกัน PLA สามารถขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับ LLDPE แต่ผิวด้านในทั้งสองฝั่งไม่เรียบและเกิดฟองอากาศ อันเป็นผลมาจากสมบัติการไหลที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปด้วย LLDPE [6] รอบการหมุนของเครื่องที่ใช้ขึ้นรูปมีสภาวะเหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วย LLDPE มากกว่า การปรับรอบการหมุนของเครื่องขึ้นรูปให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน Shear rate (s^{-1}) และลดขนาดของเม็ดพลาสติก PLA จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปให้มีความใกล้เคียงกับ LLDPE ได้มากยิ่งขึ้น



รูปภาพที่ 7 แสดงการขึ้นรูปชิ้นงาน PLA (ซ้าย)เปรียบเทียบกับ LLDPE (ขวา)

ตารางที่ 2 แสดงความหนาชิ้นงานด้านบนและด้านล่าง

ตำแหน่งที่	ด้านบน		ด้านล่าง	
	LLDPE	PLA	LLDPE	PLA
1	3.37	2.20	3.29	3.43
2	3.05	2.23	3.68	3.38
3	3.15	2.35	3.53	3.33
4	3.68	2.44	3.57	3.02
5	3.51	2.34	3.86	3.49
6	3.19	2.22	3.67	3.26
7	3.30	2.15	3.82	3.30
8	3.15	2.13	4.10	3.36
9	3.13	2.50	3.38	3.44
10	3.15	2.30	3.42	3.14



รูปภาพที่ 6 แสดงการขึ้นรูปชิ้นงาน PLA ที่ 200 °C

5. สรุป

ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงโดยใช้ PLA เป็นวัตถุดิบหลัก มีแนวโน้มที่จะสามารถขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับ LLDPE โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่า แต่การกระจายความหนาที่ได้ยังไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควรและชิ้นงานเกิดฟองอากาศกระจายทั่วผิว การลดขนาดของเม็ดพลาสติกและการรอบไล่ความชื้นสามารถช่วยลดฟองอากาศภายในชิ้นงานได้ จากการวัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ PLA การเพิ่มอัตราเฉือน Shear rate (s^{-1}) ด้วยการเพิ่มรอบการหมุนหรือลดอุณหภูมิลงจะช่วยเพิ่มความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปด้วย PLA และช่วยให้การกระจายความหนามีความสม่ำเสมอมากขึ้น

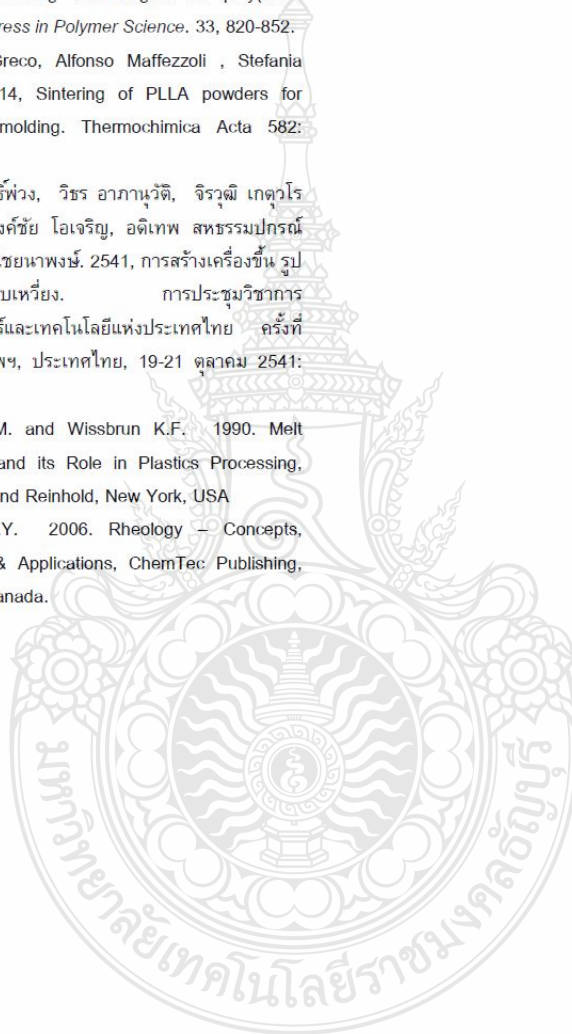
กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการทุกท่านที่ช่วยสนับสนุนทางเทคนิคและคำแนะนำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Torres, F.G. and Aragon, C.L. 2006. Final product testing of rotational moulded natural fibre-reinforced polyethylene. Polymer Testing, 25: 568-577.
- [2] Nugent, P.J. and Crawford, R.J. 1992. Rotational Molding of Plastics, Crawford, R. J. ed., John Wiley and Sons Inc., New York, USA.

- [3] Kolstad, J. J. 1996. Crystallization Kinetics of Poly(L-lactide-co-meso-lactide), *J. Appl. Polym. Sci.* 62, 1079-1091.
- [4] Loong-Tak Lim, Rafael Auras, and Maria Rubino, 2008, Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science.* 33, 820-852.
- [5] Antonio Greco, Alfonso Maffezzoli , Stefania Forleo. 2014, Sintering of PLLA powders for rotational molding. *Thermochimica Acta* 582: 59-67
- [6] สุภัทรา โพธิ์พ่วง, วิชร อภาณูวัตติ, จิรวุฒิ เกตุวโรภาส, ณรงค์ชัย โอเจริญ, อติเทพ สหธรรมปกรณ์ และวิวัฒน์ ไชยนาพงษ์. 2541, การสร้างเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบเหวี่ยง. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 19-21 ตุลาคม 2541: 940-941
- [7] Dealy, J.M. and Wissbrun K.F. 1990. Melt Rheology and its Role in Plastics Processing, Van Nostrand Reinhold, New York, USA
- [8] Malkin A.Y. 2006. Rheology – Concepts, Methods, & Applications, ChemTec Publishing, Toronto, Canada.





การประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

IE Network Conference 2014

ขอขอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

**จักราวุธ วงศ์ศักดิ์ เอกทินัย จันทร์ศรี
ณรงค์ชัย ไชเจริญ**

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิชาการในหัวข้อ

การขึ้นรูปพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยการบวมการขึ้นรูปแบบหมุน

ระหว่างวันที่ 30 – 31 ตุลาคม 2557

ณ โรงแรม โนโวเทล สุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑู ศรีสืบสาย)

ประธานช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ขอมอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

ณรังค์ชัย โอเจริญ จักราวุธ วงศ์ศักดิ์ และ เอกตินัย จันทศรีศรี

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิชาการภาคบรรยาย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย
เรื่อง ความสามารถของพอลิคาร์บอเนตในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน

ในการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ ๖

ระหว่างวันที่ 23 - 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2557

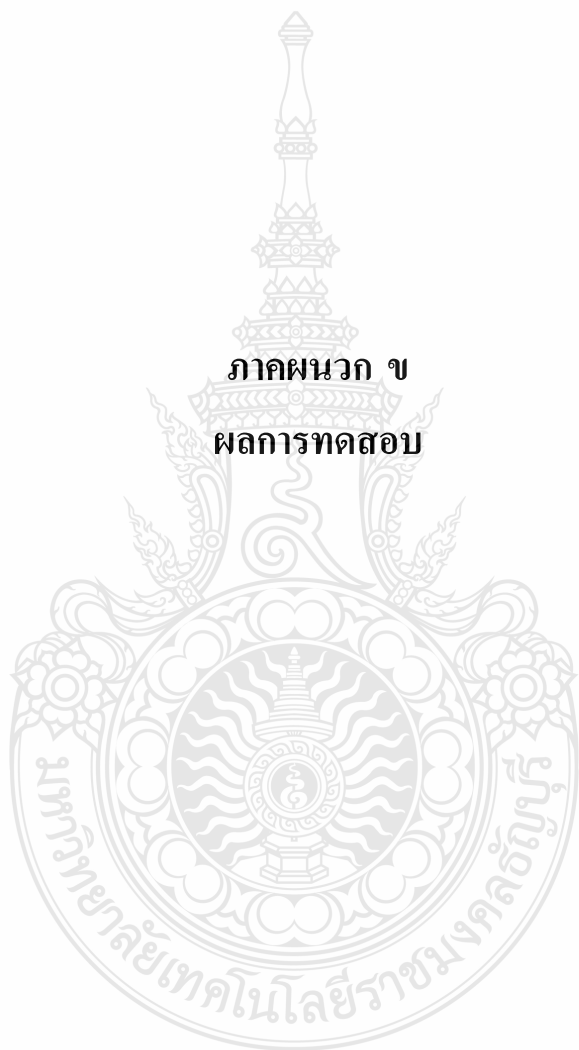
ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพศาล บุรินทร์วัฒนา)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบ

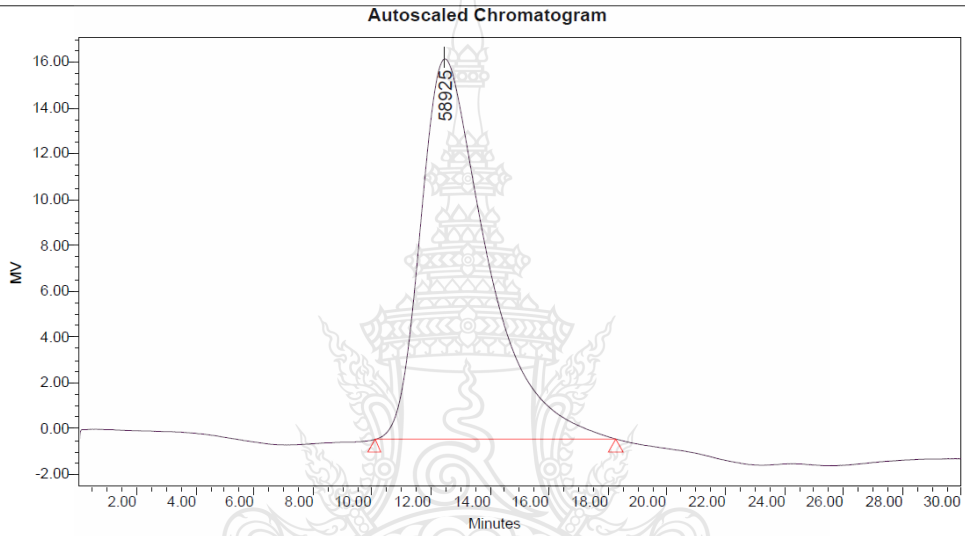


Customer

Project Name: Defaults_1
 Reported by User: System



SAMPLE INFORMATION			
Sample Name:	PCH 2000	Acquired By:	System
Sample Type:	Broad Unknown	Date Acquired:	11/27/2014 5:30:57 AM
Vial:	4	Acq. Method:	East Tawat
Injection #:	1	Date Processed:	11/27/2014 7:17:52 AM
Injection Volume:	20.00 ul	Channel Name:	410
Run Time:	30.00 Minutes	Sample Set Name:	4



GPC Results

Dist Name	Elution Volume (ml)	Retention Time (min)	Adjusted RT (min)	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw
1	12.439	12.439	12.439	18661	58563	58925	115638	190871	1.974587

GPC Results

Mz+1/Mw	Area (V*sec)	% Area	Height (V)	% Height	Integration Type	Peak Codes	Points Across Peak	Start Time (min)
3.259247	2597868	100.00	16615	100.00	bb		491	10.067

GPC Results

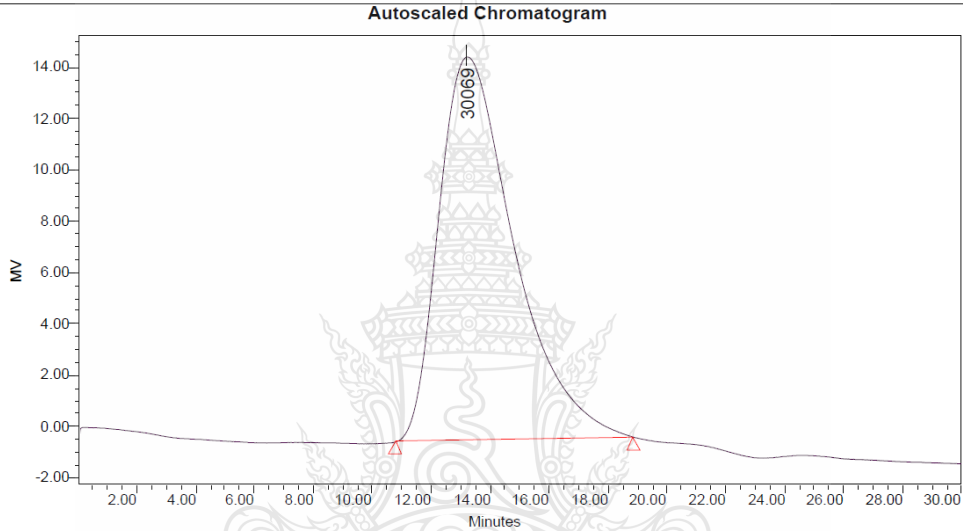
End Time (min)	Baseline Start (min)	Baseline End (min)	Slope (V/sec)	Offset (V)
18.267	10.067	18.267	1.141671e-003	-4.468120e-001

Customer

Project Name: Defaults_1
 Reported by User: System



SAMPLE INFORMATION			
Sample Name:	PCH 4000	Acquired By:	System
Sample Type:	Broad Unknown	Date Acquired:	11/27/2014 6:04:08 AM
Vial:	5	Acq. Method:	East Tawat
Injection #:	1	Date Processed:	11/27/2014 7:17:39 AM
Injection Volume:	20.00 ul	Channel Name:	410
Run Time:	30.00 Minutes	Sample Set Name:	5



GPC Results

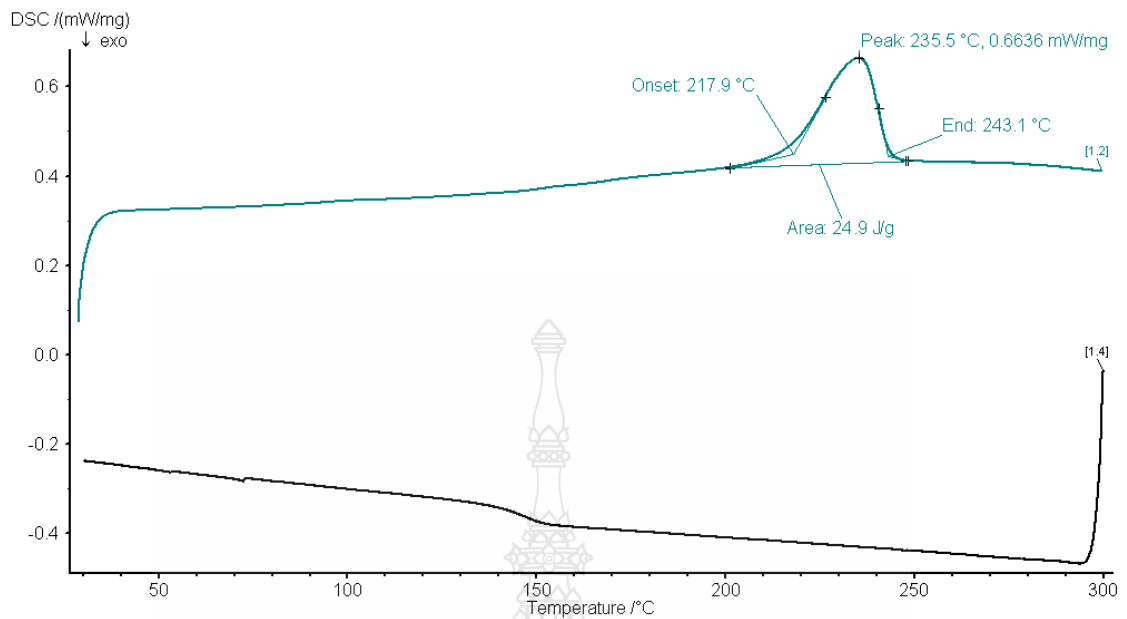
Dist Name	Elution Volume (ml)	Retention Time (min)	Adjusted RT (min)	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Mz/Mw
1	13.203	13.203	13.203	10419	31168	30069	60413	93796	1.938265

GPC Results

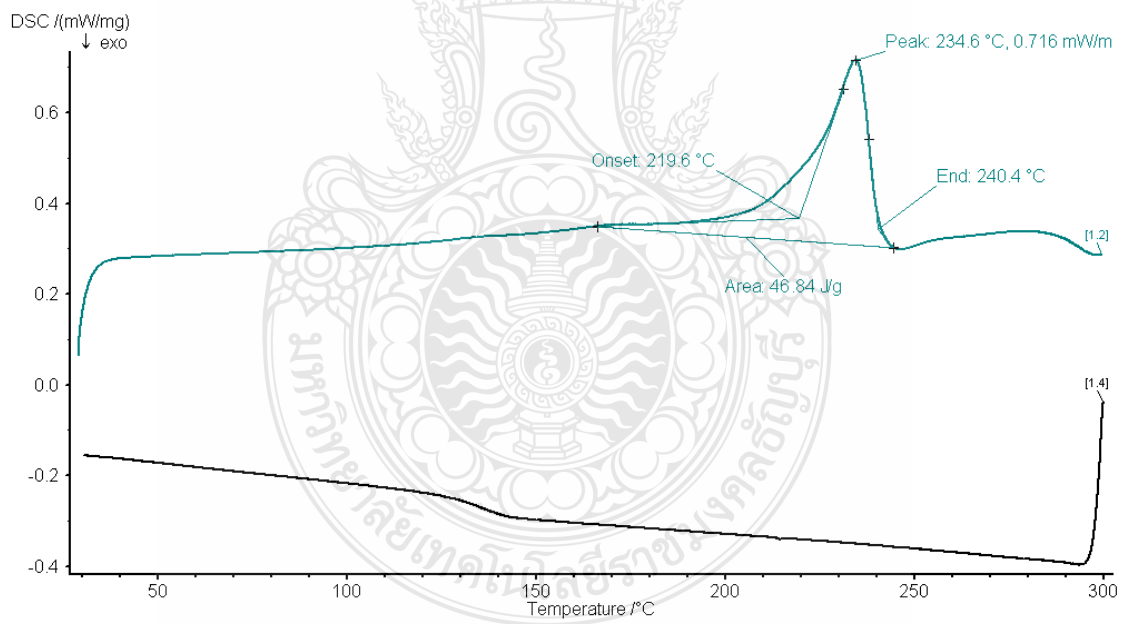
Mz+1/Mw	Area (V*sec)	% Area	Height (V)	% Height	Integration Type	Peak Codes	Points Across Peak	Start Time (min)
3.009341	2651842	100.00	14943	100.00	bb		484	10.767

GPC Results

End Time (min)	Baseline Start (min)	Baseline End (min)	Slope (V/sec)	Offset (V)
1 18.850	10.767	18.850	2.258390e-002	-8.095363e-001

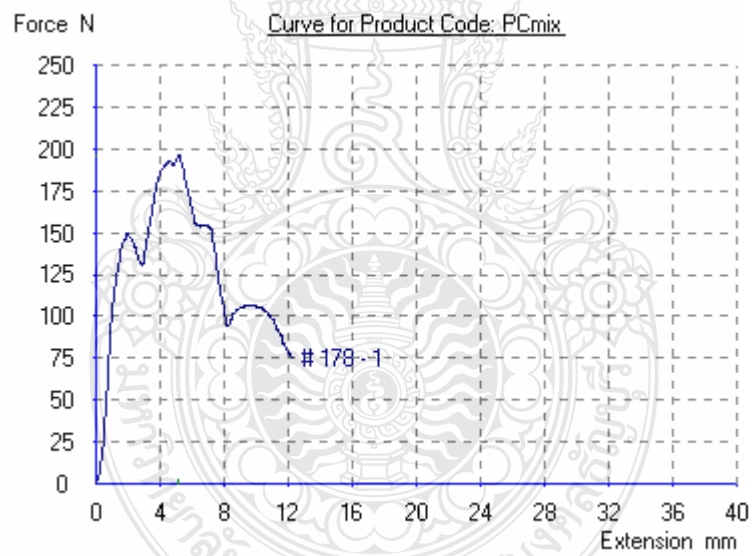
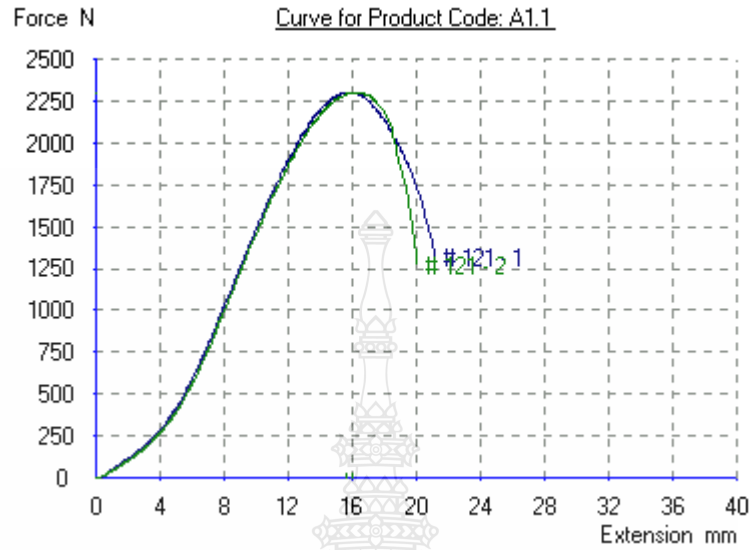


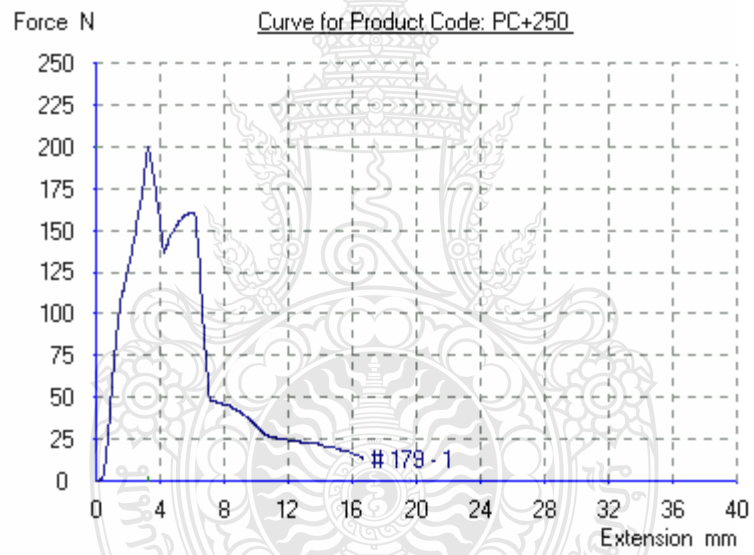
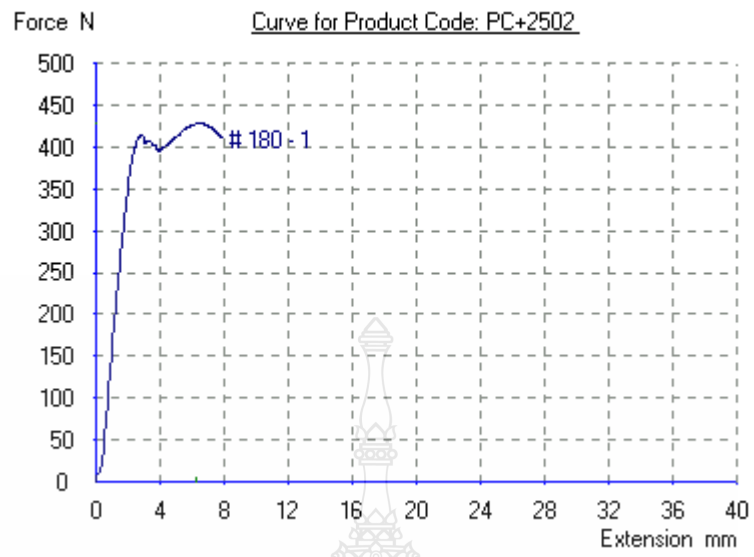
ผล DSC ของ PCH2000



ผล DSC ของ PCH4000

ผลการทดสอบการเจาะทะลุ (Puncture Test)





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายจักรวาท วงศ์ศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	31 กรกฎาคม 2528
ที่อยู่	26/13 ถนนคลองคล้าพัฒนา ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเคมี-สิ่งทอ สาขาการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	08-8273-0380
อีเมล	Jakrawutwongsak@gmail.com

