

การศึกษาพอลิพรอพิลีนสำหรับงานบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟ
ขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิง



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 55558
วัน,เดือน,ปี..... 19 พ.ค. 2548

b.....
i.....

Study of Polypropylene Compound for Microwavable Packaging using
Thermoforming Techniques



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2003

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพอลิพรอพิลีนสำหรับบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟขึ้นรูปด้วย
เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

นักศึกษา นางสาว วีรวรรณ วงศ์สุภเลิศ รหัส 43050118
นางสาว อรุณี เสนะสกุล รหัส 43050138

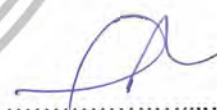
ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อธิธิพล แจ่มชัด

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ดร.ภัทธวาท มนต์วิเศษ	
กรรมการ	ดร.ปณณมา ศิริพันธ์ โนน	
กรรมการ	คุณสุลธิดา วัชรพลากร	



(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาพอลิพรอพิลีนสำหรับบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง		
นักศึกษา	นางสาววีรวรรณ วงศ์ศุภเลิศ	รหัส	43050118
	นางสาวอรุณี เสนะสกุล	รหัส	43050138
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อธิพิพล แจ่มชัด		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2546		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสูตรผสมพอลิพรอพิลีนที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming) เพื่อให้ได้บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในงานไมโครเวฟได้ (Microwavable) แผ่นพลาสติกพอลิพรอพิลีน ประกอบด้วย พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) 10 % โดยน้ำหนัก และทัลคัม (talcum) โดยศึกษาปริมาณที่ใช้ คือ 20 25 และ 30 % โดยน้ำหนัก ทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนอนคู่ (Twin-screw extruder) แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก เตรียมชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine) เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และพื้นฐานวิทยาของวัสดุผสม พบว่า การเติมทัลคัม ทำให้ค่ามอดูลัส มอดูลัสโค้งงอ ความแข็งกด ความแข็งแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิในการบิดตัว (HDT) และจุดอ่อนตัวไวแคท (Vicat softening point) เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง เบอริเซนซ์การยึด ฉ. จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้องลดลง โดยปริมาณของทัลคัม 25 % โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด เมื่อนำสูตรที่เหมาะสมนี้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นพลาสติกและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เมื่อนำไปทดสอบการใช้งานในไมโครเวฟ พบว่า ผลิตภัณฑ์สามารถทนความร้อนได้ดีที่สภาวะการใช้งานในไมโครเวฟ 800 และ 1380 วัตต์ โดยไม่เกิดการเสียรูปของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Study of Polypropylene Compound for Microwavable Packaging
Using Thermoforming Technique

Name Miss Viravan Vongsoopalert ID 43050118
Miss Arunee Senasakul ID 43050138

Special Project Advisor Asst.Prof.Dr.Ittipol Jangchud

Department Chemistry

Academic Year 2003

ABSTRACT

This research focused on formulation and property characterization of polypropylene (PP)/talcum compound as materials for microwavable packaging for thermoforming process. Polypropylene sheet consisted of polypropylene (PP), high density polyethylene (HDPE) (10 %wt) and talcum (20, 25, and 30 %wt). All compounds were mixed using a twin-screw extruder and ground by a grinding machine. An injection molding machine was used to prepare testing specimens for examination of mechanical, physical, thermal and morphological properties. It was found that an addition of talcum increased modulus, flexural modulus, hardness, impact strength at low temperature, heat distortion temperature (HDT) and Vicat softening point. However, it decreased tensile strength, % elongation at break and impact strength at room temperature of the samples. The use of talcum 25%wt showed better mechanical properties. Processibility of the PP sheets with a thermoforming machine was also studied. It was found that the PP sheets can be thermoformed into microwavable packaging with good microwave- and heat-resistance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษสำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำ จากบุคคลขององค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด และ คุณสุศุติลา วัชรพลการ (จาก บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด) เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา เอาใจใส่ ดูแล และให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ ดร.ภัทราวุธ บนควิเศษ และ ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์ โนน อาจารย์คณะกรรมการ ตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยตรวจทาน แก้ไข โครงการนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ PP, HDPE และทลคัม ที่ใช้ในงานนี้

ขอขอบคุณ คุณทักษิณ ทรงศรีกิติกุล จาก บริษัท พลาสติก ซีท จัฟฟลาย จำกัด ที่ช่วยเหลือการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณประชา ดำรงพิริยะกิจ คุณบรรเจิด รักษาศิลป์ และ คุณธนภัทร ดวงคำ จาก บริษัท PWK เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชัน จำกัด ที่ช่วยเหลือการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิงในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประคิษฐ์ และ คุณสุจิต ใสอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบและคอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องที่คอยห่วงใย ให้กำลังใจ ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจตลอดการทำโครงการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิพรอพิลีน	4
2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	7
2.3 ทัลค์	10
2.4 เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิง	14
2.5 เคาบไมโครเวฟ	33
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 การทดลอง	
3.1 สารเคมี	38
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	41
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง	42
3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	49
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	57
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา	61
4.4 ผลการทดสอบสำหรับการใช้งานไมโครเวฟ	63

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

67

5.2 ข้อเสนอแนะ

68

เอกสารอ้างอิง

69

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

71

ภาคผนวก ข.

73

ภาคผนวก ค.

76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของซินดิโอแทคติกพอลิพรอพิลีน	5
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน	5
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีน	7
รูปที่ 2.6 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของทาลคัม	10
รูปที่ 2.7 การผลิตแผ่นพลาสติกโดยกระบวนการอัดรีด	18
รูปที่ 2.8 การขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสูญญากาศ โดยตรงบนแม่พิมพ์ตัวเมีย ที่ใช้ตัวจับแบบเฟรมเดี่ยว	20
รูปที่ 2.9 การทำเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยแม่พิมพ์ตัวผู้บนตัวยึดจับแบบเฟรมเดี่ยวและเฟรมคู่	20
รูปที่ 2.10 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ดันแผ่นพลาสติกก่อน	22
รูปที่ 2.11 การขึ้นรูปโดยใช้หัวอัดช่วยก่อนใช้แรงดันสูญญากาศ	23
รูปที่ 2.12 การขึ้นรูปโดยสร้างถุงอากาศก่อนใช้แรงดันสูญญากาศ	24
รูปที่ 2.13 การแปรรูปโดยการสร้างถุงอากาศและหัวอัดร่วมกัน	25
รูปที่ 2.14 การขึ้นรูปแบบคายประกบ	26
รูปที่ 2.15 การขึ้นรูปแบบอิสระ	27
รูปที่ 2.16 การขึ้นรูปแบบบิลโลว์	28
รูปที่ 2.17 การขึ้นรูปแบบสแน็ปเบ็ค	29
รูปที่ 2.18 การขึ้นรูปโดยอาศัยความดัน	29
รูปที่ 2.19 การขึ้นรูปแบบแผ่นซีทคู่	31
รูปที่ 3.1 ลักษณะของเครื่องอัดรีด บริเวณ Hopper และ Barrel	43
รูปที่ 3.2 ลักษณะของเครื่องอัดรีด บริเวณหัวคายและลูกกลิ้งหล่อเย็น	43
รูปที่ 3.3 ลักษณะของเครื่องอัดรีด บริเวณลูกกลิ้งม้วนเก็บแผ่นพลาสติก	44
รูปที่ 3.4 ลักษณะของเครื่องขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	44
รูปที่ 3.5 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป	45
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	50
รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	51

รูปที่ 4.3	ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	51
รูปที่ 4.4	ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	52
รูปที่ 4.5	ค่ามอดุลัสโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	53
รูปที่ 4.6	ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	54
รูปที่ 4.7	ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ 25°C ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	55
รูปที่ 4.8	ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ -23°C ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	56
รูปที่ 4.9	ตัวอย่างกราฟ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของ Talcum 0%	57
รูปที่ 4.10	ตัวอย่างกราฟ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของ Talcum 25%	57
รูปที่ 4.11	ผลการวิเคราะห์ HDT ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	59
รูปที่ 4.12	ผลการวิเคราะห์หา Vicat ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	59
รูปที่ 4.13	ภาพ SEM แสดงพื้นผิวตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิค่า กำลังขยาย 1000 เท่า	61
รูปที่ 4.14	ภาพ SEM แสดงพื้นผิวตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิค่า กำลังขยาย 3000 เท่า	62
รูปที่ 4.15	ลักษณะของแผ่นพลาสติกที่ได้จากการอัดรีด	63
รูปที่ 4.16	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูป	64
รูปที่ 4.17	กราฟผลการทดสอบโดยบรรจุน้ำลงในบรรจุภัณฑ์ ใช้ไมโครเวฟที่มี กำลัง 800 วัตต์ และ 1380 วัตต์	64
รูปที่ 4.18	ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุน้ำ หลังจากการทดสอบในไมโครเวฟเป็นเวลา 30 นาที	65
รูปที่ 4.19	กราฟผลการทดสอบโดยบรรจุน้ำมันพืชลงในบรรจุภัณฑ์ ใช้ไมโครเวฟที่มี กำลัง 800 วัตต์ และ 1380 วัตต์	65
รูปที่ 4.20	ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุน้ำมันพืช หลังจากการทดสอบในไมโครเวฟเป็นเวลา 6 นาที	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามโครงสร้างของสายโซ่	7
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	8
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของทลคัม	11
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีน	38
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	39
ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของผงทลคัม	40
ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Bench mark	40
ตารางที่ 3.5 อัตร่าส่วนผสมของพอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและทลคัม	42
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม	50
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบโมดูลัส โค้งงอของพอลิเมอร์ผสม	53
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม	54
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม	55
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC	58
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิในการบิดตัวและจุดอ่อนตัวไวแคทของพอลิเมอร์ผสม	58
ตารางที่ 4.7 ขนาดของผลึกภัพนซ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาใช้งานอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน เนื่องจากสามารถนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย ตัวอย่างเช่น ภาชนะห่ออาหาร ถุงพลาสติก พลาสติกห่ออาหาร พลาสติกหุ้ม กระสอบพลาสติก เป็นต้น ทำให้พลาสติกเป็นที่ต้องการในตลาดเพิ่มสูงขึ้น โดยวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์มีหลายประเภท เช่น พอลิโอสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีน (PE) พอลิพรอพิลีน (PP) เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็จะมีสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน

ความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมทำให้เกิดการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ (Packaging) จากบรรจุภัณฑ์ที่ทำหน้าที่ห่อหุ้มอาหารเพียงอย่างเดียว กลายเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถใช้ในเตาอบไมโครเวฟได้ (Microwavable packaging) โดยสมบัติของบรรจุภัณฑ์จะต้องสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ดี เพื่อไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อบรรจุภัณฑ์ และเพื่อไม่ให้อาหารที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์เกิดการปนเปื้อนกับสารเคมีที่ละลายตัวได้ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

ในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์เหล่านี้ จะมีกระบวนการแตกต่างออกไปตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดและเกรดของเม็ดพลาสติกที่นำมาขึ้นรูป โดยในปัจจุบันเทคนิคหนึ่งที่มีนิยมใช้ในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ คือ กระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิง (Thermoforming) ซึ่งมีข้อดีด้วยกันหลายประการ คือ

1. ค่าใช้จ่ายในการทำแม่พิมพ์ต่ำ สามารถใช้วัสดุได้ตั้งแต่อะลูมิเนียมถึงอีพอกซี
2. สภาพการขึ้นรูปทั้งอุณหภูมิและความดันไม่สูงมาก ทำให้ประหยัดพลังงาน ต้นทุนการผลิต และผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดหลังการผลิต เช่น การหดตัวต่ำ
3. สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่
4. ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปสั้น อัตราการผลิตสูง
5. ต้นทุนการผลิตต่ำ

พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพลาสติกประเภทหนึ่งที่มีนิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากไม่มีสารเคมีที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค มีสมบัติเชิงกลที่ดี ทนความร้อนได้ดี เนื่องด้วยการเกิดปฏิกิริยาเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

ในการนำพอลิเมอร์มาขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง จะต้องทำชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นแผ่น (Sheet) ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตแผ่นพอลิพรอพิลีนในงานบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง การผลิตบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟยังคงต้องนำเข้าแผ่นพอลิพรอพิลีนจากต่างประเทศ ส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตที่สูง และเสียดุลทางการค้า

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาสูตรผสมพอลิพรอพิลีนที่เหมาะสมที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) และทัลคัม (Talcum) ในการทำบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งสามารถใช้ในงานไมโครเวฟ (Microwavable PP packaging)

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิพรอพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และทัลคัม ในการผลิตแผ่นพอลิพรอพิลีนสำหรับขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งเพื่อใช้งาน เช่น ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถใช้ในงานไมโครเวฟได้ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆของแผ่นพอลิพรอพิลีนที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้พอลิพรอพิลีน (PP) ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับใช้ในงานไมโครเวฟได้ โดยขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ สักส่วนของที่ล้นที่เติมลงในแผ่นซีท สมบัติต่างๆ ของสารผสมเมื่อเทียบกับสารที่ใช้จริงในทางการค้า และสมบัติของบรรจุภัณฑ์ที่ได้เมื่อนำไปใช้งานจริงในไมโครเวฟ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสูตรผสมพอลิพรอพิลีนที่เหมาะสม สำหรับผลิตแผ่นพอลิพรอพิลีน (PP) เพื่อการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง
2. สามารถผลิตบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟจากแผ่นพอลิพรอพิลีน (PP) ผสมสูตรที่ผลิตภายในประเทศ



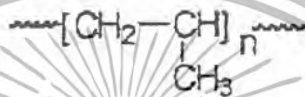
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)

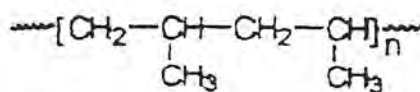
2.1.1 บทนำ [1]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน

ในปี ค.ศ.1954 เนพตาได้นำตัวเร่งที่ซีเกลอร์ค้นพบมาใช้ในการเตรียมพอลิพรอพิลีน โดยปรับปรุงรูปแบบของตัวเร่ง และได้พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป ซึ่งมีผลทำให้สมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีนที่มีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีน แต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่า และแข็งแรงกว่า โครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ของพอลิพรอพิลีนจะมีหมู่เมทิล (Methyl group) เกาะบนโซ่หลักของโมเลกุล (Main chain) พอลิพรอพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่หลัก ได้แก่

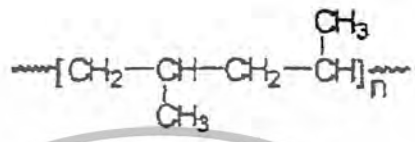
1) ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (isotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันบนโซ่โมเลกุลหลัก ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูง ส่งผลทำให้การตกผลึกที่สูงสุดซึ่งเตรียมได้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Heterogeneous ของ Titanium(III) chloride กับตัวเร่งร่วมกับสารประกอบ Organoaluminium เช่น Diethylaluminium chloride



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน

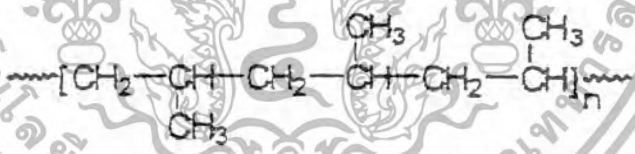
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ซินดิโอแทคติกพอลิพรอพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิล สลับกันบนโซ่โพลีเมอร์หลักอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลงมีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของซินดิโอแทคติกพอลิพรอพิลีน

3) อะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุดตั้งคราะห์จากกรดลิทิวอิธ และสารประกอบ Organometallic เกิดเป็นโครงสร้างของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน

2.1.2 สมบัติของพอลิพรอพิลีน [1]

1. ความหนาแน่นประมาณ 0.9 กรัม/ลบ.ซม
2. มีน้ำหนักเบา
3. จุดหลอมเหลวปานกลาง 130-170 องศาเซลเซียส
4. ไม่ละลายในตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง
5. มีความทนต่อกรด และเบส
6. เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี
7. มีความเป็นผลึกสูงทำให้คุณสมบัติเชิงกลดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 เกร็ดของพอลิพรอพิลีนที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมี 4 เกร็ด คือ [1]

1. โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer)

เป็นเกร็ดมาตรฐานทั่วไป มีองค์ประกอบต่างๆ คือ มอนอเมอร์ของพอลิพรอพิลีนมาต่อกัน โดยหมู่เมทิลที่อยู่บน โครงสร้างหลักอยู่ข้างเดียวกันของระนาบมีสมบัติต่างๆ โฮโมพอลิพรอพิลีน มักขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ใช้ทำฝาขวด เข็มฉีดยา อุปกรณ์ทางการแพทย์ของเด็กเล่น บรรจุกัมพูชาภายในบ้าน รถยนต์ขนาดเล็ก พลาสติก เส้นใย และคาน้ำย ผลิตภัณฑ์จากพอลิพรอพิลีนเสื่อมสภาพ ได้เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์เป็นเวลานาน จึงต้องเติมสารเติมแต่งเพื่อป้องกันการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ พอลิพรอพิลีนมีลักษณะขุ่น แต่สามารถปรับปรุงให้มีลักษณะใส และมีสมบัติดีขึ้น โดยเติมตัวเหนียวมาให้เกิดผลึกทำให้ปริมาณการตกผลึกดีขึ้น แต่ขนาดของสเฟียรูไลต์ลดลง

2. พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random Copolymer)

พอลิเมอร์ชนิดนี้มีเอทิลีนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยเติมลงในสายโซ่ของพอลิพรอพิลีน สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม การตั้งเครื่องจักรพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มสามารถทำได้ง่ายคล้ายแบบโฮโมพอลิเมอร์ โดยนำมาผลิตเป็นฟิล์มบรรจุอาหาร และห่ออาหาร ได้ตามมาตรฐาน เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ ตัวเชื่อมความร้อน และสามารถรับและดูดซับแรงได้ดี จึงใช้เป็นผลิตภัณฑ์กันชนรถยนต์

3. พอลิเมอร์ร่วมชนิดรับแรงกระแทก (High Impact Copolymer)

จะเติมมอนอเมอร์อื่นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมักจะเป็นเอทิลีน หรือยาง ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบ ในการตั้งเครื่องจักร ต้องดูแลควบคุมสถานะการทดลองให้เหมาะสม และคงที่เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ร่วมที่มีน้ำหนักโมเลกุล และองค์ประกอบตามต้องการ พบว่าพอลิเมอร์ร่วมที่ได้จะมีความทนทานต่อแรงกระแทกดีแม้จะทดลองที่อุณหภูมิค่า ส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นกระเป๋าเดินทาง ที่นั่งในรถ อุปกรณ์หล่อเย็น และเครื่องใช้ภายในบ้าน

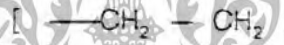
4. อะแทกติกพอลิพรอพิลีน (Atactic Polypropylene)

มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความสามารถในการยืดเกาะ ไม่นำไฟฟ้า นิยมใช้นำมาเป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล

2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

2.2.1 บทนำ [2]

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทโพลิฟิน มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์โดยกระบวนการที่แตกต่างกัน ทำให้ได้พอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ กัน จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิจึงพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นพอลิเอทิลีนสามารถขวมตัวและละลายในพาราไซลีน (p-Xylene) ไตรคลอโรเบนซีน (Trichlorobenzene) เดกเคน (Decane) และเดกคาลิน (Decalin) ทนทานต่อการกัดกรัด และสารออกซิไดซ์ แต่ไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิสูงและรังสี เมื่อขีดข่วนสามารถเกิดรอยได้ พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจึงไม่นำไฟฟ้า เราสามารถแบ่งพอลิเอทิลีนเป็น 3 ชนิดตาม โครงสร้าง ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีน

2.2.2 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีน

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตาม โครงสร้างของสายโซ่ [2]

พอลิเมอร์	โครงสร้างของสายโซ่	ความเป็นผลึก	กระบวนการผลิต	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซ.ม.)
LDPE	เชิงเส้น-มีโซ่กิ่งมาก	~ 50%	ใช้ความดันสูง	0.912-0.94
LLDPE	เชิงเส้น-มีโซ่กิ่งน้อย	~ 50%	ใช้ความดันต่ำ	0.92-0.94
HDPE	เชิงเส้น	< 90%	ใช้ความดันต่ำ	>0.958

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene; LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน

แบบอนุกรมอิสระโดยใช้ความดันสูง อุณหภูมิ 150-200 °C บางครั้งเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูง พอลิเมอร์ที่ได้มีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมาก ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกน้อย ความหนาแน่นต่ำ จุดหลอมเหลวต่ำ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000-40,000 g/mol ในเชิงพาณิชย์ นิยมระบุน้ำหนักโมเลกุลด้วยค่า Melt flow index (ASTM 1238) ซึ่งหมายถึงน้ำหนักเป็นกรัมของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากหลอดครุเด็กมาตรฐานที่อุณหภูมิ 190 °C ในเวลา 10 นาที และมีช่วงกว้าง 80-100 °C มีความอ่อนนุ่มโค้งงอมาก แสดงสมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [2]

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.91-0.93
เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)	50-70
จุดหลอมเหลว (Melt temperature, °C)	98-120
ความแข็งแรงดึง (Tensile modulus, MPa)	4.1-16
มอดูลัสดึง (Tensile modulus, GPa)	0.10-0.26
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	90-800
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength, notched Izod, Jm ⁻¹)	-
อุณหภูมิอ่อนตัว (Heat-deflection temperature, °C)	38-49

2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนแบบซีเกลอร์-เนททา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลิปป์ (Phillips) โดยใช้ความดันต่ำ ในกระบวนการผลิตมีการใส่โคมอนอเมอร์จำพวกอัลคีน (1-Alkene) เช่น 1-Butene 1-Hexene และ 1-Octene ลงไปประมาณร้อยละ 10 ทำให้มีสายโซ่คาร์บอนสั้นเกิดขึ้นที่พอลิเมอร์หลัก นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ความสม่ำเสมอของโมเลกุล และความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น สมบัติโดยทั่วไปคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแต่มีความแข็งแรงมากกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม

3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบซี-เกลอร์-เนททา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลลิปป์ (Phillips) โดยใช้ความดันต่ำ บางครั้งเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันต่ำ มีโครงสร้างแบบเส้นที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างสม่ำเสมอ มีโซ่กิ่งน้อยและสั้น จึงมีความเป็นผลึกสูง อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) สูงประมาณ 120-135 °C มีความแข็งแรงมาก นิยมใช้ในกระบวนการเป่าขวด และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ทำฟิล์ม ท่อ และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด

นอกจากนี้ยังมีพอลิเอทิลีนอีก 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (VLDPE) 0.880-0.912 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMWPE) และสูงมาก (UHMWPE) น้ำหนักโมเลกุล 200,000- 500,000 สำหรับ HMWPE และ 3,000,000 สำหรับ UHMWPE

2.2.3 สมบัติทั่วไป [2]

สมบัติของพอลิเอทิลีน ขึ้นกับองศาความเป็นกิ่งของสายโซ่ที่สั้นและยาว น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายตัวของพอลิเมอร์

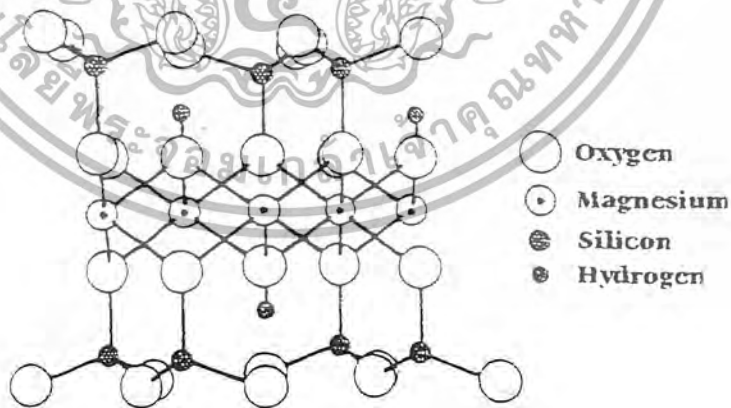
ลักษณะสำคัญในการหาสมบัติและพฤติกรรมของพอลิเอทิลีนในเกรดต่างกัน คือ ความเป็นกิ่ง จำนวน และความยาวของกิ่งจะควบคุม โดยชนิดและตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โซ่กิ่งจะขัดขวางสายโซ่ของพอลิเมอร์จากการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นจะพิจารณาจากองศาความเป็นกิ่งของพอลิเมอร์ โดยความหนาแน่นต่ำจะมีองศาความเป็นกิ่งที่สูง นอกจากนี้โซ่กิ่งยังไปรบกวนความสามารถในการตกผลึกของพอลิเมอร์ องศาความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะอยู่ที่ 55-70% เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งจะอยู่ที่ 75-90 % ส่วนอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเอทิลีนจะอยู่ระหว่าง 108-136 °C โดยจะขึ้นกับองศาความเป็นผลึก

ผลของการมีกิ่งจะขึ้นกับขนาดของสายโซ่กิ่ง (Side chain branches) ซึ่งสายโซ่ที่สั้นจะมีผลต่อองศาความเป็นผลึก และความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ส่วนโซ่กิ่งที่ยาวจะมีผลเด่นชัดในเรื่องการกระจายตัวของพอลิเมอร์ บางครั้งโซ่กิ่งของพอลิเมอร์จะยาวเท่ากับสายโซ่หลักและทำให้การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) มีช่วงกว้าง

อัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) ค่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) คือ ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1.9 ถึง 100 แต่สำหรับพอลิเอทิลีนส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 20-50 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จะมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) 4-15 ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่สูงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นผลมาจากโซ่กิ่งที่ยาว นอกจากนี้สายโซ่ที่ยาวจะมีอิทธิพลต่อสมบัติการไหลอีกด้วย กล่าวคือ โมเลกุลของโซ่กิ่งที่ยาวจะอัดตัวกันแน่นมากและมีแนวโน้มที่จะเกิดการเกี่ยวพันกับ โมเลกุลอื่นน้อย ส่งผลให้ความหนืดขณะหลอมเหลว (Melt viscosity) น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีโซ่กิ่ง

2.3 ทัลคัม (Talcum) [3]

ทัลคัมหรือที่รู้จักในนามแป้งทัลคัม (Talcum) มีโครงสร้างเคมีคือ ไฮเดรตแมกนีเซียมซิลิเกต (Hydrate magnesium silicate) สูตรโครงสร้าง $Mg_3[Si_2O_5(OH)_2]$ ผลิตได้จากการเอาแร่ทัลคัมที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาผ่านกระบวนการบดละเอียด ทัลคัมที่ได้จึงมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีครีมขึ้นกับองค์ประกอบที่ปนเปื้อนที่มาจากแหล่งทางธรรมชาติ เช่น ถ้ามีการปนเปื้อนของเหล็กสูงก็จะทำให้ทัลคัมมีสีไม่ขาว



รูปที่ 2.6 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของทัลคัม [4]

ทัลคัมเป็นสารตัวเติมเฉื่อยในพลาสติก โดยเฉพาะพอลิพรอพิลีน (PP) เป็นตัวแรกที่ไม่แข็ง เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ คล้ายหินงา และมีแรงยึดระหว่างชั้นต่ำ จึงเกิดการหลุดออกของชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Delamination) ใ้ได้ง่าย เมื่อได้รับแรงทำให้มีสมบัติหลุดตื้นและไม่แข็ง อนุภาคมีความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูง ประมาณ 5-20 มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง (ประมาณ 2.8 กรัม/ลูกบาศก์เมตร) มีขนาดอนุภาค ประมาณ 5-8 ไมครอน และพื้นที่ผิว (Bet N₂) ประมาณ 6-10 ตารางเมตร / กรัม

เมื่อเทียบกับสารตัวเติมอนินทรีย์ชนิดอื่น ทดคัมมีพื้นผิวที่มีความไม่ชอบน้ำ หรือสมบัติ Hydrophobic สูงสุด เนื่องจากความสมดุลของโครงสร้างที่มีขั้ว และความเป็นกลางของประจุในชั้นโครงสร้าง ซึ่งสมบัตินี้เป็นข้อดีเมื่อใช้เป็นสารตัวเติม สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วต่างๆ เมื่อผสมในยางจะช่วยลดต้นทุนการผลิต เพิ่มสมบัติความเป็นฉนวน ลดสมบัติการซึมผ่านของอากาศและของเหลว เพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของทดคัม [4]

สมบัติ	หน่วย	ค่าที่วัดได้
Aspect ratio		5-20
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	microns	5-8
ความถ่วงจำเพาะ	g/cm ³	2.8
พื้นที่ผิว (Bet N ₂)	M ² /g	6-10
Oil absorption, ASTM D-281	-	20-50
Mohs hardness	-	1-2
ค่าการนำความร้อน ($\times 10^{-3}$)	cal/g.s °C	5.0
ค่าความร้อนจำเพาะ	cal/g °C	0.208
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	°C $\times 10^{-6}$	8

2.3.1 ผลของทดคัมที่มีต่อสมบัติของพอลิพรอพิลีน [5] มีดังนี้

1. ผลต่อการเสริมแรง

อนุภาคของทดคัมจะมีลักษณะเป็นแผ่นอยู่ในเทอร์โมพลาสติก มีแนวโน้มที่จะจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งแรงเหนียว (Stiffness) และอุณหภูมิในการบิดตัว (Heat distortion temperature : HDT) ของสารประกอบพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ จะไม่ค่อยมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่าไรนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลของปริมาณทลคัมที่เดิม

แต่เดิมมีการใช้ทลคัม ในพอลิพรอพิลีนและ โคพอลิเมอร์ของพอลิพรอพิลีน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเหนียว (Stiffness) แก่สารประกอบ ซึ่งปริมาณของทลคัมที่ใช้จะมีผลโดยตรงกับค่าความแข็งแรงเหนียวที่เกิดขึ้น คือ เมื่อเดิมปริมาณทลคัมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงเหนียวก็เพิ่มขึ้นด้วย

3. ผลที่มีต่ออุณหภูมิในการบิคตัว (Heat distortion temperature)

อุณหภูมิในการบิคตัวจะมีค่าสัมพันธ์กับความแข็งแรงเหนียว (Stiffness) การเพิ่มปริมาณทลคัมในพอลิพรอพิลีน จะทำให้อุณหภูมิในการบิคตัวเพิ่มขึ้น หมายความว่า ผลิตภัณฑ์สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการอ่อนตัว

4. ผลที่มีต่อสมบัติอื่นๆ

4.1 การหดตัว (Mold shrinkage)

พอลิพรอพิลีนที่มีการเติมทลคัมลงไปจะทำให้มีการหดตัวของชิ้นงานลดลง การทำให้อัตราการหดตัวของชิ้นงานลดลง เพื่อให้รูปร่างของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายใน โมเลกุลของพอลิเมอร์เอง

4.2 การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion)

การเพิ่มปริมาณทลคัมในพอลิพรอพิลีน จะลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนลงได้ประมาณ 50% เมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 50-150 °C ซึ่งค่าจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นกับความละเอียดของอนุภาคของทลคัม

4.3 อัตราการหลอมเหลว (Melt flow rate)

การเพิ่มทลคัมในพอลิพรอพิลีน จะไม่มีผลมากต่ออัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากทลคัมมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง (ทลคัมมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.78 เมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีนที่ไม่เติมทลคัมมีค่าเท่ากับ 0.91-0.94) ทลคัมจึงทำให้อัตราการไหลของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่นของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลวมีค่ามากขึ้น

4.4 ความเสถียรต่ออายุการใช้งาน (Long-term oven aging)

ทลคัมที่ใช้ในพอลิพรอพิลีน จะมีผลต่อเสถียรภาพของอายุการใช้งานของผสมเป็นอย่างมาก มีการทดสอบหลายรูปแบบเพื่อพิจารณาว่าทลคัมมีส่วนเกี่ยวข้องกับสิ่งที่กล่าวถึงนี้ โดยปรากฏว่าพื้นผิวของทลคัมทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างทลคัมกับพอลิพรอพิลีนและทลคัมกับสารเพิ่มความเสถียร ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีและโคพอลิเมอร์ไรเซชันภายใต้สภาวะที่ได้รับความร้อนนาน (150-160 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การนำทลคัมไปใช้ในเชิงพาณิชย์

เนื่องจากทลคัมมีค่าความด่างจำเพาะเท่ากับ 2.78 เมื่อเติมทลคัมลงในพอลิพรอพิลีนจะทำให้ของผสมมีค่าความด่างจำเพาะสูงขึ้น นอกจากนี้ทลคัมยังมีราคาถูก จากจุดนี้เอง ความสมดุลระหว่างราคากับประสิทธิภาพจึงเป็นตัวกำหนดทลคัมเพื่อนำมาใช้งาน สำหรับทลคัมจะใช้ทดแทนสารเพิ่มความเสถียรได้ไม่มากนัก เนื่องจากยังต้องการให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานได้นานๆ ในขณะที่ราคาของของผสมโดยรวมควรถูกลง ค่าขนส่งก็เป็นส่วนหนึ่งที่ต้องพิจารณา รวมถึงราคาของทลคัมทั้งหมดที่นำมาใช้ในโรงงาน โดยเฉพาะเรื่องของราคาที่ถูกและไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสี

เนื่องจากทลคัมเป็นวัสดุที่มีความอ่อนนุ่มกว่าดินแร่อื่นๆ จึงมีความสามารถในการถูกขจัดคติน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแร่ชนิดอื่นๆ อย่างแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา จากการทดสอบโดยใช้ Einlehner test วัดการกักความร้อนบนทองเหลือง พบว่าทลคัมจะมีค่าการกักความร้อนน้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตถึง 4 เท่า

6. ผลของของผสมในการเครื่องอัดรีด (Extrusion)

ทลคัมจะต้องผสมกับพอลิเมอร์ก่อนทำการขึ้นรูปเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี ถ้าการกระจายตัวของทลคัมไม่ดีจะทำให้เกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) และทำให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลง บางกรณีการใช้ทลคัมที่มีความละเอียดป้อนเข้าไปในหน่วยผสม จะเกิดปัญหาทำให้ค่า Loose bulk density ลดลง ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยให้อัตราการป้อนเข้าและการไหลออกช้าๆ วางตำแหน่งที่ป้อนสารทางค้ำข้างและผสมกับน้ำมันก่อน (ทำการผสม) เพื่อเพิ่มความหนาแน่น เมื่อผสมทลคัมกับน้ำมันแล้วต้องกำจัดน้ำมันออกด้วยระบบสูญญากาศก่อนนำไปทำเป็นเม็ด

สมบัติที่ดีของทลคัมคือมีความอ่อนนุ่ม เป็นมัน ความชื้นต่ำ สามารถดูดซับน้ำมันได้ดี ทนทานต่อการกรดและค่าาง และจุดหลอมละลายสูง [6] ทลคัมจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น

อุตสาหกรรมสี ใช้ทลคัมเป็นตัวเติมหรือรงควัตถุ (Extender pigment) โดยเฉพาะสีทาภายนอกหรือสีที่ใช้ทาบริเวณที่มีการถูกขจัดคติน้อยๆ จะใช้ทลคัมเป็นส่วนผสมเพื่อช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขจัดคติและยังช่วยลดการเกิดรอยแตกของฟิล์มสีได้

อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้ทลคัมผสมเพื่อช่วยให้กระดาษมีคุณสมบัติที่บดแสง ผิวหน้ากระดาษเรียบลื่นและเป็นเงานอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มน้ำหนักให้กระดาษ

อุตสาหกรรมยาง ใช้ตัลคัมเป็นผงโรยแม่พิมพ์ทำหน้าที่หล่อลื่น ใช้เป็นสารป้องกันการติด (Anti-tack agent) ของก้อนยาง ไม่ให้ติดกับวัสดุอื่นหรือติดกันเองในระหว่างกระบวนการผลิต และใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ยางบางชนิด

อุตสาหกรรมเซรามิกส์ เนื่องจากตัลคัมมีสมบัติที่ทนทานความร้อนได้สูง จึงใช้ตัลคัมเป็นส่วนประกอบในการทำกระเบื้องปูพื้น กระเบื้องฝาผนัง ภาชนะกระเบื้องเคลือบ อุปกรณ์ไฟฟ้า

อุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง ใช้ตัลคัมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แป้งฝุ่นผัดหน้า แป้งทาตัว ใช้เป็นส่วนประกอบของสบู่เพื่อทำให้สบู่มีลักษณะแข็งตัว เป็นต้น ตัลคัมที่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงและละเอียดมาก

เนื่องจากตัลคัมมีลักษณะเป็นผงละเอียดที่สามารถหึ่งกระจายเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ง่าย ทำให้มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ และอาจทำให้เป็นโรคมะเร็งได้ แร่ตัลคัมที่ผลิตตัลคัมซึ่งอยู่ตามธรรมชาติอาจมีการปนเปื้อนของแอสเบสตอส (Asbestos) ที่เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็งที่ปอด และโรคปอดแข็ง ที่เรียกว่า "แอสเบสโตซิส" ฉะนั้นจึงมีการควบคุมและตรวจสอบแอสเบสตอสในตัลคัมก่อนที่จะนำไปใช้งาน

2.4 เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming Process) [7]

เทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การขึ้นรูปแผ่นพลาสติก (Sheet forming) หมายถึง การขึ้นรูปพลาสติกในขณะที่พลาสติกอ่อนตัวเนื่องจากความร้อน โดยการให้พลาสติกยืดตัวออก (Stretching) ภายใต้อากาศ (Air pressure) แรงดันสุญญากาศ (Vacuum) หรือ การดึงเชิงกล (Mechanical drawing) ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ ดังนั้นการแปรรูปพลาสติกโดยเทคนิคนี้ มีการใช้แรงดันลม แรงดันสุญญากาศ และแรงดึงเชิงกล หรือใช้แรงดึงทั้งสามชนิดนี้ร่วมกัน เพื่อเปลี่ยนแปลงพลาสติกให้มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ วัสดุที่นิยมใช้ คือ แผ่นพลาสติก (Plastic sheet) หรือบางกรณีอาจใช้ พลาสติกฟิล์ม (Plastic film)

การแปรรูปโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เริ่มจากการให้ความร้อนแผ่นพลาสติก จนถึงอุณหภูมิที่ทำให้แผ่นพลาสติกเกิดการอ่อนตัว ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) กับอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เริ่มไหล (Flow temperature, T_f) เรียกพอลิเมอร์ที่มีสถานะอยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมินี้ว่า เทอร์โมอีลาสติก (Thermoelastic) ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้ สามารถทำให้แผ่นพลาสติกสามารถเกิดการยืดตัวได้ถึง 5 เท่าตัว ดังนั้น จึงเหมาะที่จะทำการแปรรูปโดยใช้เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ข้อดีของเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง มีดังนี้คือ [8]

- ค่าใช้จ่ายในการทำแม่พิมพ์ต่ำ สามารถใช้วัสดุได้ตั้งแต่อะลูมิเนียมถึงอีพอกซี
- สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดใหญ่ โดยอาศัยความดันต่ำ
- สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดเล็ก โดยมีอัตราการผลิตสูง
- ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปสั้น
- ใช้ทำเป็นต้นแบบ (Prototype)
- ช่วยประหยัดเนื่องจากใช้เวลาอันสั้น

2.4.2 ข้อเสียของเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง มีดังนี้คือ

- ความสม่ำเสมอของผนังบนชิ้นงานที่ขึ้นรูปทำได้ยากมาก
- มักจะมีเศษพลาสติกหลงเหลืออยู่ จึงต้องนำกลับมาใช้ใหม่ นั่นหมายถึง ค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียเพิ่มขึ้น
- รายละเอียดของงานมีอยู่เพียงด้านเดียว
- เกิดความเค้น (Stress) ในชิ้นงานสูง
- บริเวณขอบและมุมมีลักษณะบางเกินไป
- รอยลาก (Drag line) มักเกิดขึ้นเมื่อมีอุปกรณ์ช่วย
- มีขีดจำกัดในเรื่องวัสดุ โดยวัสดุที่ใช้จะต้องมีความแข็งแรงขณะหลอมเหลว (Melt strength) หรือมีความต้านทานต่อการหย่อน (Sag resistance) คือ
- วัสดุที่มีลักษณะเปราะแตกง่าย เวลาตกแต่งทำได้ยากมาก
- ขีดจำกัดในเรื่องการออกแบบชิ้นงาน

2.4.3 องค์ประกอบของความต้องการ ในเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ประกอบด้วย

- 1) แหล่งให้ความร้อน
- 2) สถานีขึ้นรูป ประกอบด้วยแผ่นโลหะด้านบนและล่าง ช่วยพยุงแม่พิมพ์ของพลาสต์
- 3) ระบบสูญญากาศ หรือความดันอากาศ
- 4) การดึงยึดแผ่นพลาสติก และระบบการดำเลี้ยง (ช่วยพยุงและเคลื่อนแผ่นพลาสติก)
- 5) ระบบการควบคุม
- 6) อุปกรณ์ช่วย ได้แก่ ระบบจัดการเว็บ, แนวทางการคดแต่ง, การขึ้นรูปคอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกอุปกรณ์ ขึ้นอยู่กับ

- ขนาดของชิ้นงาน
- วัสดุที่จะนำมาขึ้นรูป
- เทคนิคการขึ้นรูป
- อัตราการผลิต
- จำนวนชิ้นงานที่ต้องการ
- ค่าใช้จ่ายที่จำเป็น
- การออกแบบชิ้นงาน

2.4.4 เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง แบ่งออกเป็น

1. แบบขึ้นตอนเดียว
2. แบบสองขั้นตอน แบบวิ่งไปกลับ (Shuttle)
3. แบบสามขั้นตอน แบบหมุนรอบ (Rotary) ที่มี 3 ถึง 4 สถานี ซึ่งจัดเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด
4. แบบต่อเนื่อง แบ่งออกเป็นแบบป้อนเป็นม้วนด้วยลูกกลิ้ง (Roll fed) และแบบเครื่องอัดรีด ผสมกับเครื่องขึ้นรูป (Extruder/Thermoforming)
5. การขึ้นรูปแบบแผ่นรีดคู่ (Twin sheet forming)

เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งไม่ว่าจะเป็นแบบใด จะมีลำดับขั้นตอนการขึ้นรูป ดังต่อไปนี้

1. การใส่แผ่นพลาสติกลงในกรอบยึด (Clamping frame)
2. การให้ความร้อน (Heating)
3. การขึ้นรูป (Forming or Shaping)
4. การหล่อเย็น (Cooling)
5. การนำชิ้นงานออก (Part removal)
6. การตกแต่งโดยอาศัยอุปกรณ์ช่วย (Trimming removal)

2.4.5 เครื่องมือที่ใช้ (Tooling) สำหรับกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

เครื่องมือที่นำมาใช้ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ทำจากวัสดุต่อไปนี้

1. ยิปซัม (ปูนปลาสเตอร์)
2. ไม้เนื้อแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไม้อัด
4. ฟีนอลิกหล่อ (Resols)
5. พอลิเอสเทอร์ชนิดเคมแผ่นอะลูมิเนียมและ ไม้เคมแผ่นอะลูมิเนียม
6. อีพอกซี
7. อะลูมิเนียมทั้งชนิดหล่อและกลึงด้วยเครื่องจักร
8. อะลูมิเนียม/บรอนซ์
9. เหล็กกล้า

วัสดุที่นิยมนำมาทำเครื่องมือมากที่สุด คือ อีพอกซี และอะลูมิเนียม เพราะค่าการนำความร้อนต่ำ ถ้าต้องการทำที่อุณหภูมิสูง อะลูมิเนียม/บรอนซ์ใช้ได้ดีกว่า และถ้าต้องการความคงทน เหล็กกล้าเป็นวัสดุที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ทางกลที่ช่วยในการผลิตหรือบังคับให้แผ่นพลาสติกลงไปแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น อุปกรณ์นี้เรียกว่า พลาสติก (Plugs) โดยวัสดุที่ใช้อาจเป็นไม้ ในกรณีที่ทำเป็นต้นแบบ อาจใช้สักหลาดหรือผ้า (Felt or Fabric) และอีพอกซี ก็ได้

2.4.6 การให้ความร้อน

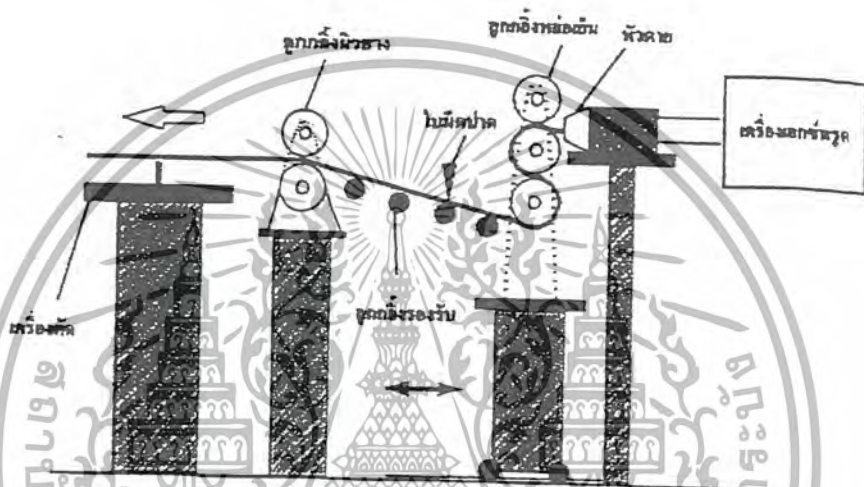
กระบวนการให้ความร้อนมี 3 วิธี คือ การนำความร้อน วิธีนี้เหมาะกับชิ้นงานที่มีลักษณะบาง โดยนำพลาสติกไปไว้ที่แผ่นให้ความร้อน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ พลาสติกจะติดอยู่ที่แผ่นให้ความร้อนนั้น จึงทำให้เกิดข้อบกพร่องในเรื่องพื้นผิว อีกวิธีหนึ่ง คือ การพาความร้อน วิธีนี้ประหยัดไฟฟ้าแฉ่งจรการทำงานยาว จึงมีปัญหาในเรื่องการเสียดสภาพของวัสดุ เหมาะกับชิ้นงานที่มีลักษณะหนา ส่วนวิธีที่นิยมใช้กันมากในทางอุตสาหกรรม คือ การแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น ท่อโลหะ ลวดนิโครม เป็นต้น

2.4.7 การอัดรีดแผ่นพลาสติกและฟิล์มพลาสติก (Sheet and Film Extrusion)

เนื่องจากพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกเท่านั้นที่สามารถเกิดการอ่อนตัวจนถึงสถานะที่เป็นเทอร์โมออสติกได้ ดังนั้น เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งจึงใช้กับการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกเท่านั้น พลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งต้องอยู่ในรูปของฟิล์มพลาสติกหรือแผ่นพลาสติก ข้อแตกต่างระหว่างแผ่นพลาสติกและฟิล์มพลาสติก คือ ความหนา และลักษณะการม้วนพับ กล่าวคือ ฟิล์มพลาสติก คือ พลาสติกที่มีหน้ากว้างและมีลักษณะผิวเรียบ มีความหนาน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร นอกจากนี้สามารถม้วนได้โดยไม่มีารผิดรูป (Deformation) อย่างถาวร แต่แผ่นพลาสติกจะมีความหนามากกว่า 0.25 มิลลิเมตร และการม้วนพับจะทำให้เกิดการผิดรูปอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตแผ่นพลาสติกโดยกระบวนการอัดรีด ใช้สายที่มีหน้ากว้างที่เรียกว่า Sheeting die หรือ Slit die เป็นสายที่มีพื้นที่หน้าตัดของทางออก (Die exit) เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีหน้ากว้างใกล้เคียงกับความกว้างของแผ่นพลาสติกที่จะผลิต และมีความสูงใกล้เคียงกับความหนาของแผ่นพลาสติก โดยทั่วไปเทคนิคการอัดรีดสามารถผลิตแผ่นพลาสติกได้หนาถึง 15 มิลลิเมตร และมีหน้ากว้างได้ถึง 4 เมตร



รูปที่ 2.7 การผลิตแผ่นพลาสติกโดยกระบวนการอัดรีด [7]

รายละเอียดของการผลิตแผ่นพลาสติกโดยการอัดรีด แสดงในรูปที่ 2.7 เริ่มต้นจากการดันให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านหัวฉาย ได้แผ่นพลาสติกร้อนและนิ่ม แล้วให้ผ่านช่องว่างของลูกกลิ้ง (Nip) ซึ่งเป็นลูกกลิ้งชนิดผิวมันจากการเคลือบหรือชุบด้วยโครเมียม ลูกกลิ้งชุดนี้มีหน้าที่ในการหล่อเย็นและควบคุมความหนาของแผ่นพลาสติก ชุดของลูกกลิ้งประกอบด้วย ลูกกลิ้งจำนวน 3 ลูก ลูกแรกอยู่บนสุดเป็นลูกกลิ้งที่มีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน เรียกว่าเป็นลูกกลิ้งหล่อเย็น (Cooling roll) ลูกกลิ้งตัวตรงกลางทำหน้าที่ในการบีบอัดแผ่นพลาสติก โดยการมีลูกกลิ้งตัวล่างและตัวบนช่วยในการบีบอัด เพื่อให้ได้แผ่นพลาสติกที่มีความหนาที่เหมาะสมและมีผิวเรียบ ลูกกลิ้งตัวนี้จะสัมผัสกับแผ่นพลาสติกมากที่สุด หลังจากผ่านลูกกลิ้งตัวกลางแล้วแผ่นพลาสติกจะถูกส่งต่อไปยังลูกกลิ้งตัวที่สามซึ่งเป็นการสิ้นสุดการหล่อเย็น หลังจากนั้นจะส่งแผ่นพลาสติกแข็งผ่านไม้มัด ซึ่งจะทำหน้าที่ปากัดให้แผ่นพลาสติกมีผิวเรียบอีกรอบหนึ่ง พลาสติกจะถูกดึงโดยลูกกลิ้งที่เคลือบผิวด้วยยางตัวบนและผิวโลหะตัวล่าง หลังจากนั้นส่งแผ่นพลาสติกไปตัดขนาดตามต้องการ

สายของเครื่องอัดรีดที่นิยมใช้ในการผลิตแผ่นพลาสติก คือ สาย ไม้แขวนเสื้อ (Coathanger

sheet extrusion die) และสายรูปตัวที (Center-fed die) เนื่องจากสายทั้งสองชนิดนี้มีตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้พลาสติกหลอมเกิดการกระจายตัว (Distribution zone) กล่าวคือ ทำให้พลาสติกหลอมเกิดการกระจายเป็นแผ่นบางตามลักษณะของแผ่นพลาสติกที่ทำการผลิต นอกจากนี้ การมีส่วนที่ทำให้เกิดการกระจายตัว ทำให้ความเร็วของการไหลของพลาสติกหลอมเหลวที่ปากทางออกคาย (Exit velocities) คงที่ตลอดหน้ากว้างของคาย ในปัจจุบัน คายไม้แขวนเสื้อได้รับความนิยมในการผลิตแผ่นพลาสติกมากที่สุด

เนื่องจากเป็นที่ทราบกันว่า พลาสติกหลอมเหลวไหลออกจากบาร์เรล (Barrel) ของเครื่องอัดรีดมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก แต่ในการผลิตแผ่นพลาสติกมีความจำเป็นที่จะต้องให้เกิดการแผ่กระจายของท่อทรงกระบอกออกเป็นแผ่นบางเต็มช่วงกว้างของคาย ดังนั้นในการออกแบบคายจึงจำเป็นต้องมีร่อง (Manifolds) เป็นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละร่องต้องมีความยาว (Land length) และรูปทรงทางเรขาคณิตที่เหมาะสม ลักษณะร่องอาจเป็นร่องครึ่งวงกลมหรือร่องรูปทรงสี่เหลี่ยมต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้มีการต่อต้านการไหลของพลาสติกหลอมเหลวที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคาย ให้ใกล้เคียงกันตลอดทุกตำแหน่ง ซึ่งถ้าการต่อต้านการไหลของคายในทุกตำแหน่งใกล้เคียงกัน ทำให้ความเร็วของการไหล (Flow velocities) ความดันในขณะไหลออก (Exit pressure) อุณหภูมิของพลาสติกหลอม และการเรียงตัวของโมเลกุล (Molecular orientation) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าใกล้เคียงกันทั่วแผ่นพลาสติก จะทำให้ได้แผ่นพลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลดี และมีสมบัติคล้ายกันตลอดทั่วทั้งแผ่น

2.4.8 เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

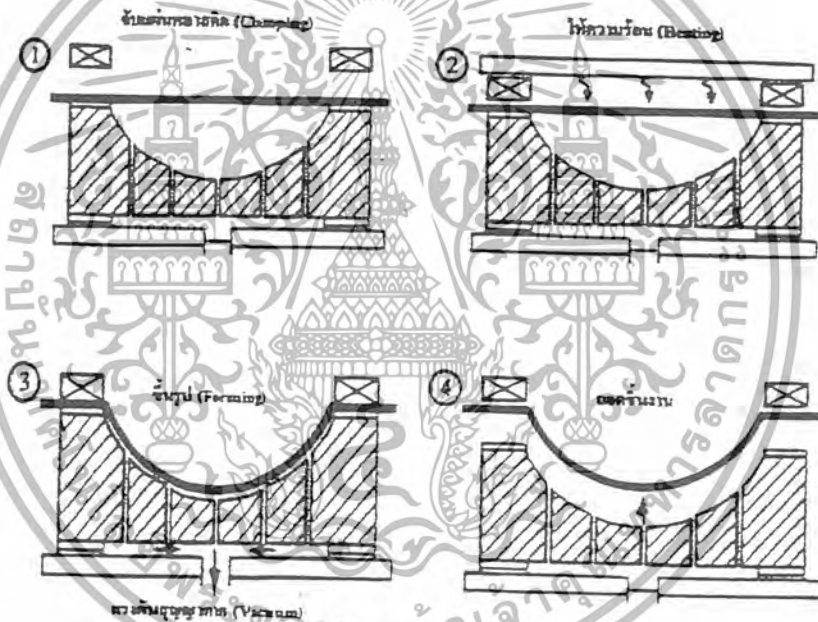
ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีองค์ประกอบต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้ คือ

1. ความลึกของการดึง - บอกรูปร่าง
2. อัตราส่วนพื้นที่ - ใช้ในการพิจารณาความหนาของชิ้นงาน
3. วัสดุ - เป็นตัวบ่งบอกความแข็งแรงของการหลอมเหลว
4. คุณภาพของชิ้นงาน - ความสมบูรณ์ของชิ้นงาน
5. รายละเอียดของผิว - จำนวนพื้นที่ที่ดีที่ต้องการ ซึ่งโดยปกติในเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งจะให้รายละเอียดของผิวเพียงด้านเดียว

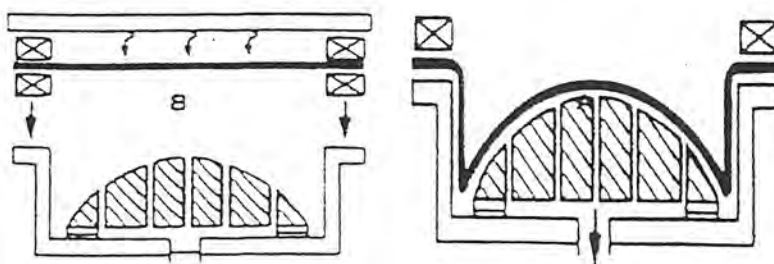
เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งชนิดต่างๆ ที่ใช้กันโดยทั่วไป สรุปได้ดังนี้

1. เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรง (Straight Vacuum Forming)

เป็นเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ง่ายที่สุด ใช้ในการแปรรูปที่ใช้แม่พิมพ์ทั้งเป็นแม่พิมพ์ตัวผู้ (Male mold) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Female mold) การจับยึดพลาสติกใช้ได้ทั้งตัวจับแบบเฟรมเดี่ยว (Clamping frame) และตัวจับแบบเฟรมคู่ (Double clamping frame) วิธีการแปรรูปโดยเทคนิคการขึ้นรูปนี้ใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรงบนแม่พิมพ์ตัวเมียที่ใช้ตัวจับแบบเฟรมเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.8 ส่วนตัวอย่างการทำเทอร์โมฟอร์มมิ่งโดยเทคนิคนี้บนแม่พิมพ์ตัวผู้บนตัวยึดจับแบบเฟรมเดี่ยวและเฟรมคู่ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศ โดยตรงบนแม่พิมพ์ตัวเมียที่ใช้ตัวจับแบบเฟรมเดี่ยว [7]



รูปที่ 2.9 การทำเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยแม่พิมพ์ตัวผู้บนตัวยึดจับแบบเฟรมเดี่ยวและเฟรมคู่ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปขั้นตอนของการขึ้นรูปโดยการใช่แรงดันสุญญากาศโดยตรงได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จับยึดแผ่นพลาสติก โดยใช้เฟรมจับ (Clamping frame)

ขั้นตอนที่ 2 ให้ความร้อน (Heating) และวางตำแหน่ง (Positioning) ทำโดยการให้ความร้อนจนแผ่นพลาสติกอ่อนตัว ซึ่งในเครื่องเทอร์โมฟอร์มบางชนิดทำการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกซึ่งวางอยู่ด้านบนของแม่พิมพ์ จึงจำเป็นต้องเลื่อนตัวอย่างพลาสติกที่อ่อนตัวดีแล้ว มาวางตำแหน่งเพื่อให้ตรงกับแม่พิมพ์ เรียกว่า การวางตำแหน่ง (Positioning)

ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูป (Forming) ทำโดยการ ใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum) ดึงให้แผ่นพลาสติกที่อ่อนตัว ยึดตัวประกบแม่พิมพ์

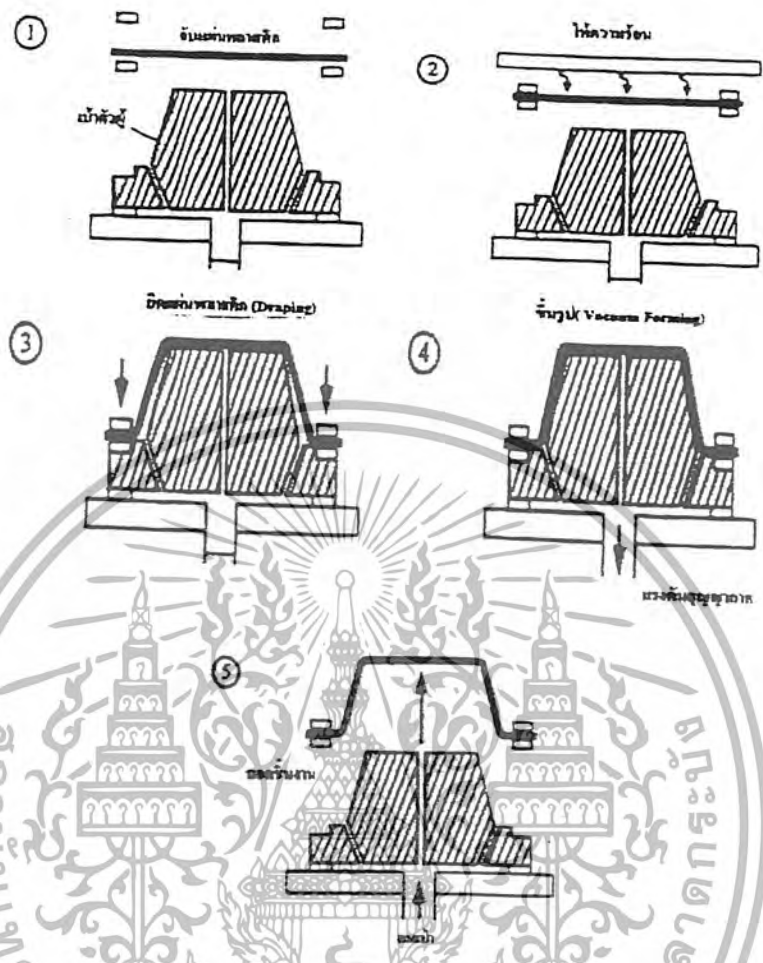
ขั้นตอนที่ 4 ถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

การใช้เทคนิคแบบนี้จะทำให้บริเวณด้านบนของชิ้นงานมีผิวที่คี่ แต่มิใช่ข้อเสีย คือ ชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ คือ บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานจะหนา และบริเวณส่วนมุมของชิ้นงานจะบาง ใช้ในการแปรรูปพลาสติกที่มีความแข็งแรงสูง เหมาะกับชิ้นงานคี่

2. เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์คี่แผ่นพลาสติกก่อน (Vacuum Drape Forming)

เนื่องจากการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะรูปทรงที่มีความลึก ไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรง (Straight vacuum forming) เนื่องจากจะต้องมีการดึงแผ่นพลาสติกให้มีการยึดตัวสูง (Deep draw) ก่อนที่จะทำการขึ้นรูป ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคใหม่ โดยใช้แม่พิมพ์คี่พลาสติกแผ่นให้เกิดการยึดตัวก่อน (Pre-stretching) แล้วจึงใช้แรงดันสุญญากาศ ในการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย กระบวนการแปรรูปเริ่มจากการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก แล้วเคลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นเพื่อให้แม่พิมพ์คี่แผ่นพลาสติกให้ยึดตัวออกก่อน โดยการยึดตัวของแผ่นพลาสติกส่วนใหญ่เกิดจากการใช้แม่พิมพ์คี่ หลังจากนั้นจึงให้แรงดันสุญญากาศ เพื่อคูดแผ่นพลาสติกให้ประกบแนบสนิทกับแม่พิมพ์ แล้วถอดตัวอย่างออกโดยใช้ลมเป่าสวนทาง เพื่อให้ชิ้นงานหลุดออกจากแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.10 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้เป็นเส้นโค้งแสดงรายละเอียดของผิวภายนอก (Convex) ซึ่งต่างจากการขึ้นรูปแบบใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรงที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแสดงรายละเอียดของผิวภายใน (Concave) การขึ้นรูปโดยเทคนิคนี้เป็นการคี่ที่ยึดที่สม่ำเสมอ ให้ความหนาของชิ้นงานตรงบริเวณขอบนอก แต่ส่วนของมุมจะมีลักษณะบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ต้นแผ่นพลาสติกก่อน [7]

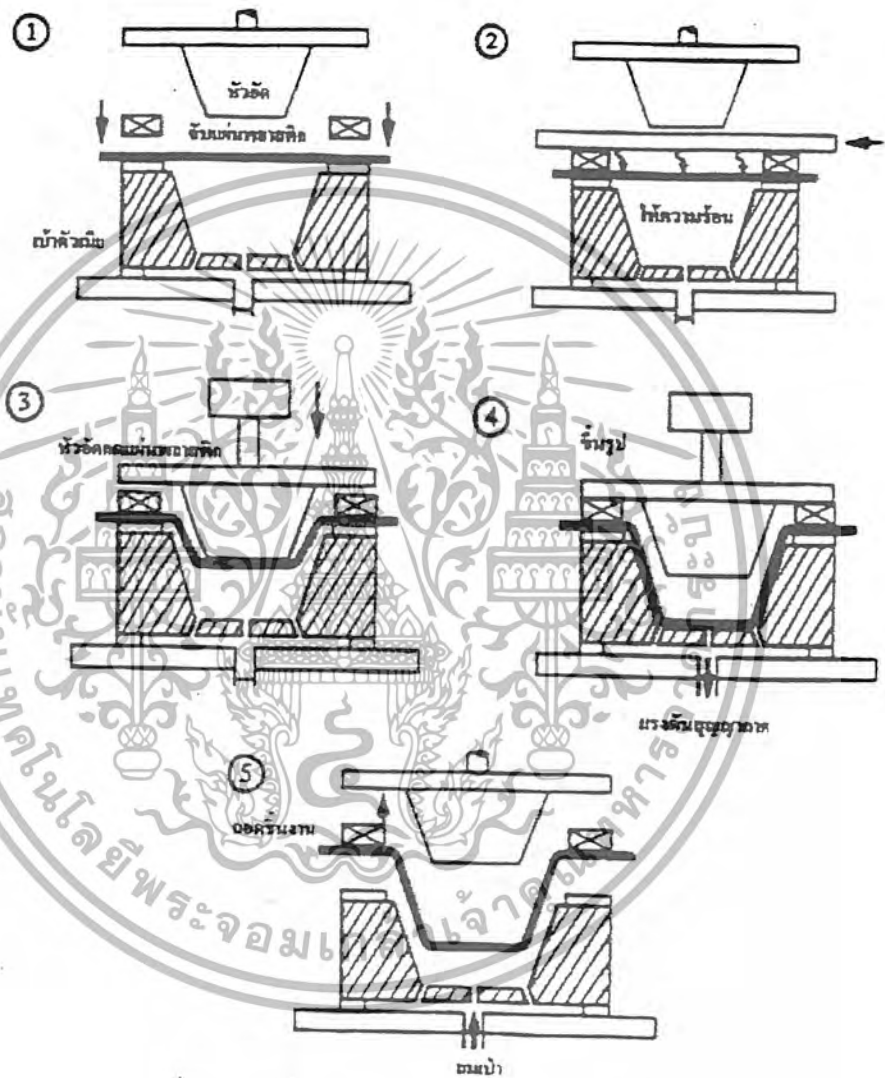
3. เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้หัวอัดช่วยก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ (Plug-Assist Vacuum Forming)

เทคนิคการทำเทอร์โมฟอร์มชนิดนี้เป็นเทคนิคที่ผสมผสาน ข้อดีของเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสุญญากาศโดยตรง (Straight vacuum forming) และเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ต้นแผ่นพลาสติกก่อนแล้วใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum drape forming) ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความลึก มีความหนาใกล้เคียงกันตลอดทั้งชิ้นงานและถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.11 การขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้มีขั้นตอน ดังนี้ -

- 1) ให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก
- 2) วางแผ่นพลาสติกที่ร้อนให้อยู่เหนือแม่พิมพ์
- 3) ใช้หัวอัดต้นแผ่นพลาสติกให้ยืดตัวลงไปในแม่พิมพ์ (Pre-stretching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ระบบสุญญากาศเกิดขึ้น คุคให้แผ่นพลาสติกประกบแม่พิมพ์
- 5) ทำให้เย็นโดยใช้ลมเป่า
- 6) ปลดชิ้นงาน



รูปที่ 2.11 การขึ้นรูปโดยใช้หัวอัดช่วยก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ [7]

หัวอัดที่ใช้ในเทคนิคนี้ทำจากโลหะหรือ โฟมพลาสติก เพื่อให้การทำงานของหัวอัดมีประสิทธิภาพสูง ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของหัวอัดให้เหมาะสม ถ้าหัวอัดมีอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้แผ่นพลาสติกขาดและเหนียวติดที่หัวอัด หรืออาจทำให้ส่วนล่าง

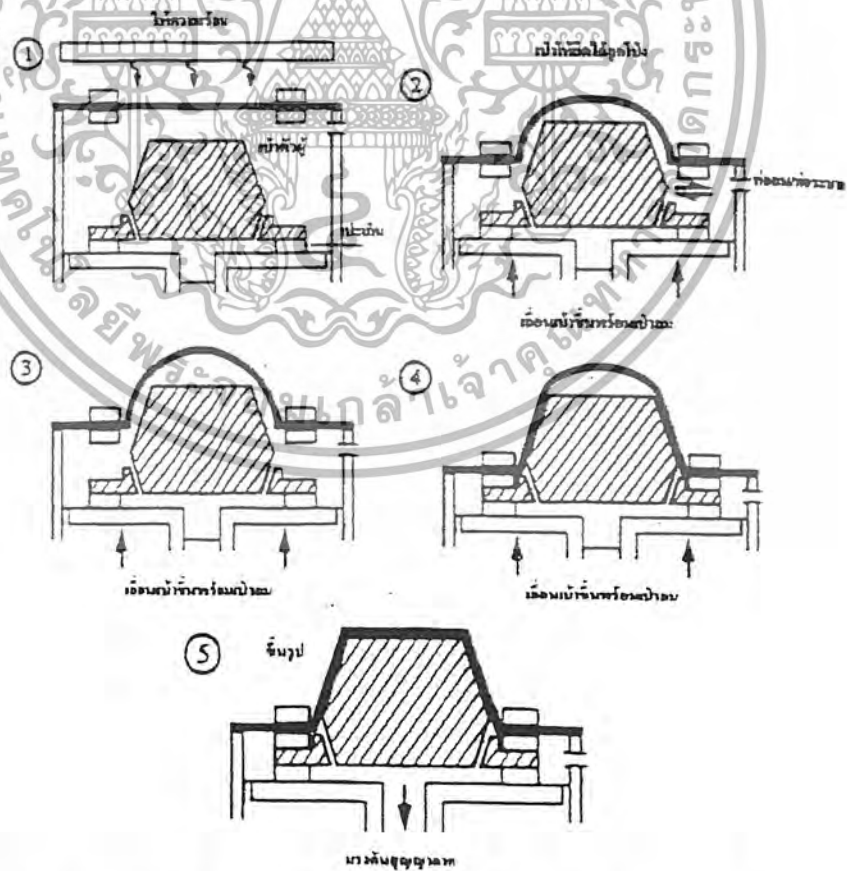
(Bottom) ของชิ้นงานบางจนเกินไป นอกจากนี้ถ้าหัวอัดมีอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ได้ชิ้นงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนล่างหนา ส่วนความเร็วของหัวอัด ถ้าให้หัวอัดเคลื่อนที่เร็วจะทำให้การผลิตสูง แต่จะต้องคำนึงถึงการไล่อากาศระหว่างผิวของแม่พิมพ์กับแผ่นพลาสติกออกอย่างมีประสิทธิภาพด้วย

4. เทคนิคการขึ้นรูปโดยสร้างถุงอากาศก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum Air-Slip Forming)

เทคนิคนี้มีลักษณะคล้ายกับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ดันแผ่นพลาสติกก่อนแล้วใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum drape forming) แต่มีข้อแตกต่าง คือ ในขณะที่เคลื่อนที่แม่พิมพ์ตัวผู้เข้าหาแผ่นพลาสติก ให้ใช้ลมเป่าระหว่างแผ่นพลาสติกกับผิวหน้าของแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดถุงอากาศขึ้น (Air slip) โดยอากาศภายในถุงจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา ทำให้แผ่นพลาสติกพองตัวออกเป็นลูกโป่ง การมีอากาศคั่นในลักษณะนี้ ทำให้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากการสัมผัสกันของแผ่นพลาสติกกับแม่พิมพ์ เช่น การที่ส่วนล่างของชิ้นงานหนาเกินไป และมีส่วนมุม (Corners) บางเกินไป แสดงดังรูปที่ 2.12

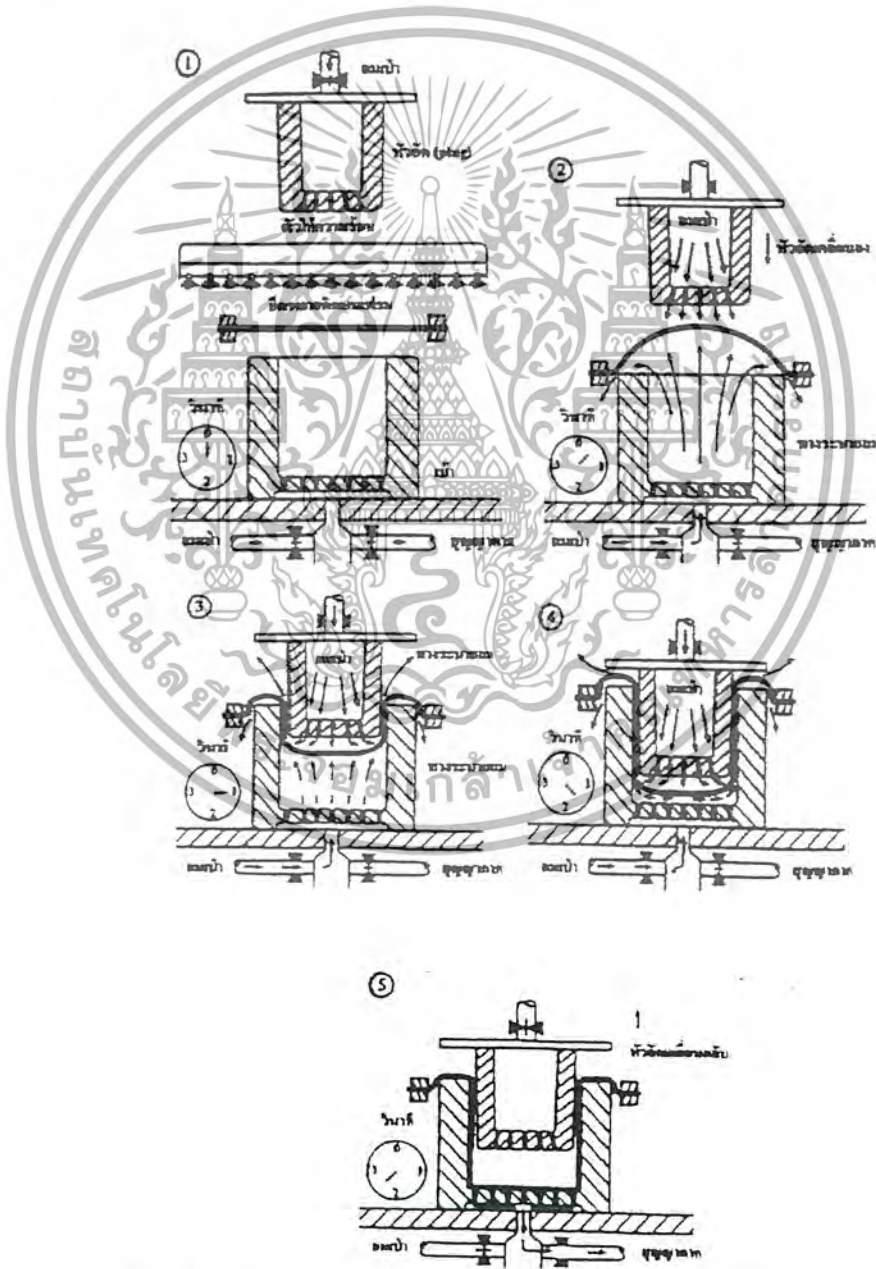


รูปที่ 2.12 การขึ้นรูปโดยสร้างถุงอากาศก่อนใช้แรงดันสุญญากาศ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกแล้ว ทำการเป่าลมเพื่อให้เกิดการยืดตัวก่อนเป็นลูกโป่ง พร้อมกับค่อยๆ เคลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นช้าๆ จนสุด หยุดเป่าลม แล้วดูดลูกโป่งกลับด้วยแรงดันสุญญากาศ ทำให้แผ่นพลาสติกประกบแม่พิมพ์

5. เทคนิคการแปรรูปโดยการสร้างถุงอากาศและหัวอึดร่วมกัน (Air-Cushioning Vacuum Forming)



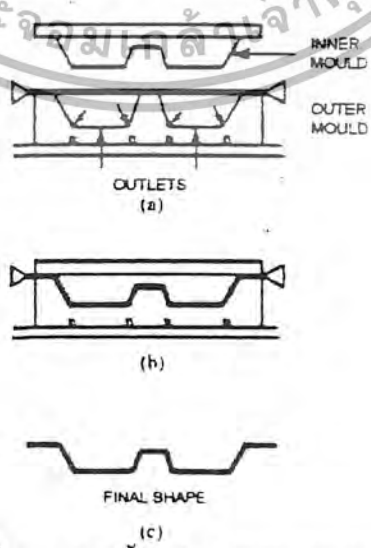
รูปที่ 2.13 การแปรรูปโดยการสร้างถุงอากาศและหัวอึดร่วมกัน [7] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อน มีรายละเอียดและมีความลึกสูง จำเป็นต้องให้แผ่นพลาสติกมีการยึดตัวดีและมีความหนาสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องอาศัยการนำข้อดีของเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งมาผสมกันระหว่างเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบการใช้หัวอัด (Plug-assist forming) และเทคนิคแบบการใช้ถุงอากาศ (Air-slip forming) แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

การแปรรูปโดยเทคนิคนี้เริ่มจากการยึดแผ่นพลาสติกให้แน่นกับตัวจับ ให้ความร้อนแล้วเป่าลมเข้าด้านล่าง เพื่อให้แผ่นพลาสติกเกิดการพองตัวเป็นลูกโป่ง หลังจากนั้นค่อยๆ เลื่อนหัวอัด (Plug) ลงมากลยอัดลูกโป่ง เพื่อให้เกิดการยึดตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเป่าครั้งแรก หัวอัดที่ใช้ในเทคนิคนี้ออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อให้สามารถเป่าลมได้ในขณะที่กำลังกดลูกโป่ง ทำให้เกิดถุงของอากาศไหลระหว่างผิวของหัวอัดกับผิวด้านนอกของลูกโป่ง ทำให้ลูกโป่งไม่สัมผัสกับผิวของหัวอัด ในขณะที่เลื่อนหัวอัดลงจะมีการเป่าลมจากด้านล่างสวนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดถุงอากาศ (Air slip หรือ Cushion) ระหว่างผิวด้านในของลูกโป่งกับผิวของแม่พิมพ์ ทำให้พลาสติกเกิดการยึดตัวได้สูงมาก หลังจากเลื่อนหัวอัดจนใกล้ผิวแม่พิมพ์ หยุดเป่าลม แล้วทำการขึ้นรูปโดยทันทีด้วยการใช้แรงดันสูญญากาศ

6. เทคนิคการขึ้นรูปแบบค้ายประกบ (Matched Die Forming)

การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ แผ่นพลาสติกที่ได้รับความร้อน สามารถถูกยึดอยู่เหนือค้ายคั้วเมียหรือสามารถคเรพ (Drape forming) ได้ โดยตรงส่วนของแม่พิมพ์จะมีส่วนระบายอากาศเพื่อให้อากาศที่หลงเหลืออยู่ออกไปได้ วิธีนี้ให้รายละเอียดของผิวทั้งสองด้านดี การหดตัวต่ำสุดจึงมีขีดจำกัดในเรื่องของขนาดคั้วที่สุด แต่ข้อเสียคือมีราคาแพง

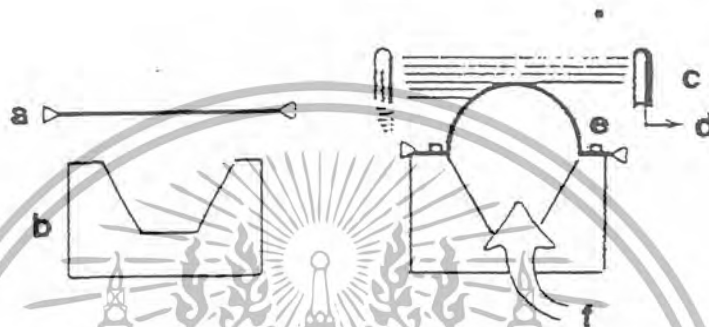


รูปที่ 2.14 การขึ้นรูปแบบค้ายประกบ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เทคนิคการขึ้นรูปแบบอิสระ (Free Forming)

แผ่นพลาสติกที่ได้รับความร้อนถูกยึดติดอยู่กับที่ ในขณะที่ปริมาณอากาศที่ช่วยให้แผ่นพลาสติกยืดออกถูกควบคุมด้วยเซลล์แสง (Photocell) ซึ่งจะเป็นตัวตรวจจับความสูงที่ขยายขึ้นของฟองอากาศ และเนื่องจากอากาศที่เย็นกว่าแผ่นพลาสติกจึงช่วยทำให้แผ่นพลาสติกเย็นลง เกิดการขึ้นรูปแบบอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การขึ้นรูปแบบอิสระ [8]

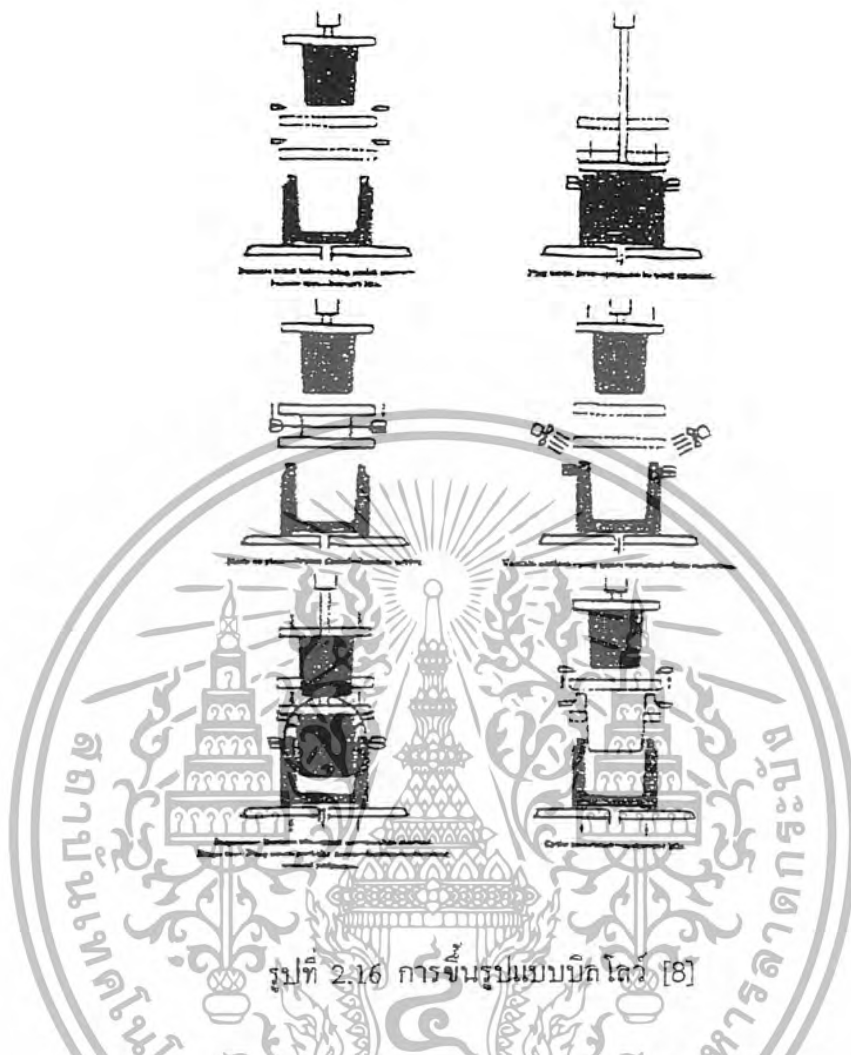
การขึ้นรูปแบบนี้ ไม่ต้องการแม่พิมพ์ เนื่องจากแผ่นพลาสติกไม่ได้สัมผัสกับผิวของวัสดุ ในระหว่างที่มีการขึ้นรูปยกเว้นตรงบริเวณที่ยึดติดอยู่ จึงทำให้ความหนาแน่นของฟองอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอ การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการสมบัติทางแสง เช่น หน้าต่างบนเครื่องบิน (Skylight) และฝาครอบเครื่องบินรบ (Fighters aircraft canopies) เป็นต้น

8. เทคนิคการขึ้นรูปแบบการดึงกลับ (Reverse Draw Techniques)

เทคนิคนี้จะมีการดึงยึดของแผ่นพลาสติกก่อนที่จะขึ้นรูป ซึ่งจะขอกกล่าวเพียงสองแบบคือแบบบิลโลว์ (Billow forming) และแบบสแน็ปแบ็ค (Snap-back forming)

8.1 แบบบิลโลว์

การขึ้นรูปแบบนี้คล้ายคลึงกับแบบสูญญากาศที่อาศัยอุปกรณ์พลังค์ช่วย โดยแผ่นพลาสติกที่ได้รับความร้อนจะถูกดึงยึดโดยการเป่าอากาศร้อนผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ "พลังค์" จะดันแผ่นพลาสติกที่ดึงยึดเข้าไปในแม่พิมพ์จากนั้นระบบสูญญากาศที่อยู่ในแผ่นพลาสติกจะทำงาน ทำให้เกิดเป็นชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทำให้ความหนาของผนังสม่ำเสมอ เหมาะกับชิ้นงานเล็ก เช่น ถ้วยใส่คุกกี้



รูปที่ 2.16 การขึ้นรูปแบบบิลด์ [8]

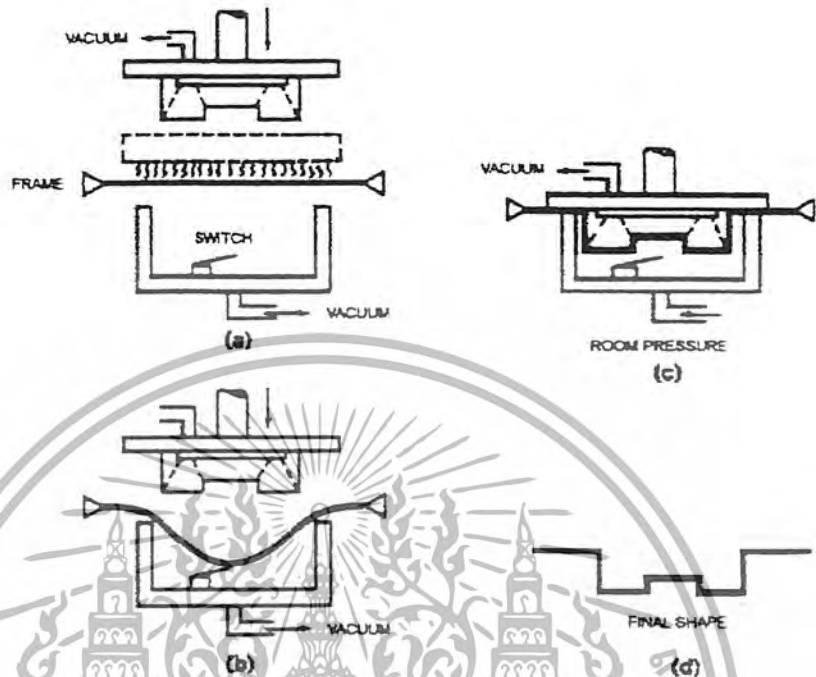
ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในกรณีที่ใช้งานที่มีผลความหนา เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการหย่อนของแผ่นพลาสติกที่หลอมเหลว จึงต้องอาศัยเทคนิคต่อไปนี้ในการแก้ไข คือ

- (1) ให้อากาศร้อนคอยพองแผ่นพลาสติกในระหว่างที่มีการให้ความร้อน
- (2) เปลี่ยนวัสดุใหม่ให้มีความหนืดสูง ๆ
- (3) ปรับเปลี่ยนแบบแผนการ ให้ความร้อน (Pattern heating)
- (4) แบ่งบริเวณ ให้ความร้อนของหน่วยรังสีอินฟราเรด

8.2 แบบตแม่ปั๊มแข็ง

การขึ้นรูปแบบนี้จะใช้แม่พิมพ์ตัวผู้อยู่ทางตอนล่างของแผ่น โลหะยึดและมีระบบหรือกล่องสุญญากาศ (Vacuum box) อยู่ทางตอนบนโดยแผ่นพลาสติกที่ได้รับความร้อนจะถูกดึงยึดโดยระบบสุญญากาศ จากนั้นแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่เข้าไปยังแผ่นพลาสติกที่ถูกดึงยึด ทำให้แผ่นพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



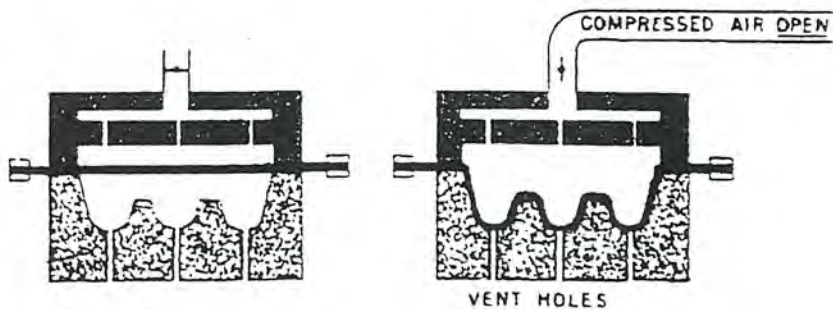
รูปที่ 2.17 การขึ้นรูปแบบตื้นแบบแคบ (7)

การขึ้นรูปลักษณะนี้ ไม่จำเป็นต้องกังวลในเรื่องการทำให้เครื่องจักรเย็น เหมาะสำหรับการผลิตกระป๋องเค็มขางและชิ้นตัวรถยนต์ เป็นต้น

9. เทคนิคการขึ้นรูปโดยอาศัยความดัน (Pressure Forming)

การขึ้นรูปแบบนี้แบ่งได้เป็น การขึ้นรูปโดยใช้วัสดุภาคของแข็ง (Solid phase forming)

การขึ้นรูปโดยความเย็น (Cold forming) และการประทับตรา (Stamping) เป็นต้น



รูปที่ 2.18 การขึ้นรูปโดยอาศัยความดัน (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ที่ได้จากการขึ้นรูปโดยอาศัยความดัน คือ

- (1) ช่วยลดเวลาของวงจรการทำงาน
- (2) เหมาะกับชิ้นงานที่มีผนังหนามากกว่า 1 นิ้ว (2.54 เซนติเมตร)
- (3) เหมาะกับวัสดุที่มีความหนืดสูงๆ เช่น พอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงสุด
- (4) ช่วยลดอุปกรณ์การใช้ขึ้นรูป
- (5) ไม่มีเศษพลาสติกหลงเหลือ
- (6) ไม่ต้องผ่านกระบวนการตกแต่ง
- (7) การหดตัวต่ำ

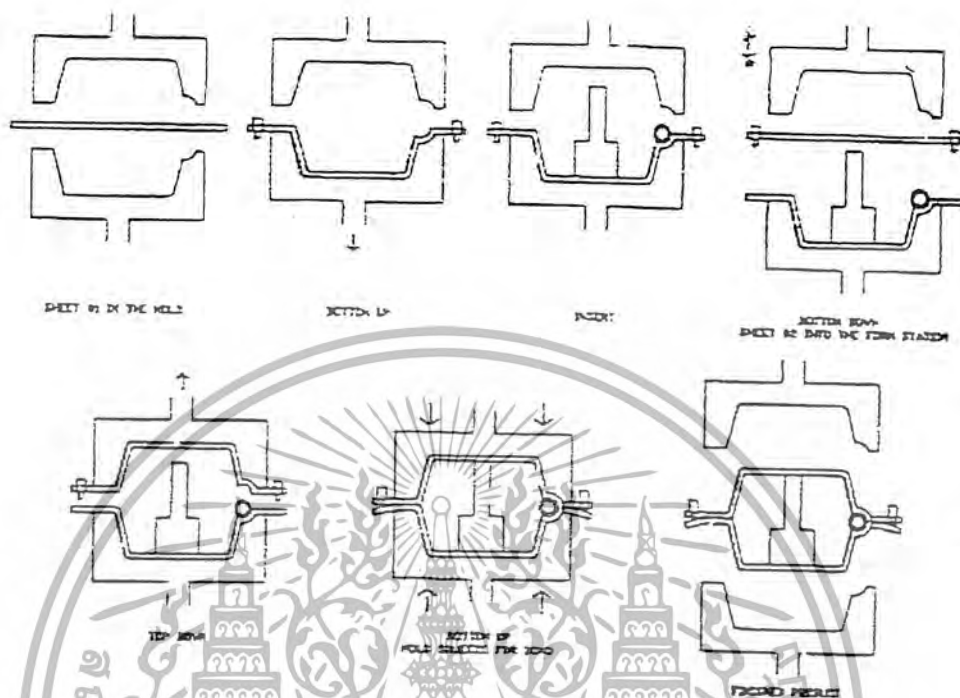
ข้อเสียที่ได้จากการขึ้นรูปโดยอาศัยความดัน คือ

- (1) มีขีดจำกัดในเรื่องความซับซ้อนของชิ้นงาน
- (2) มีขีดจำกัดในเรื่องของวัสดุที่ใช้ (เปราะ)
- (3) การคืนกลับในเรื่องของขนาด (Dimensional recovery)
- (4) ราคาเครื่องแพงมาก โดยเฉพาะเครื่องอัดรีดแบบกระแทกสำหรับพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (HDPE)

วัสดุที่นิยมใช้กับการขึ้นรูปโดยอาศัยความดันได้แก่ พอลิพรอพิลีน (PP) พบว่าจะมีความใส ความแข็ง ความบางและเร็วกว่าวิธีอื่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) จะต้องอาศัยความดันสูง และต้องทำให้เย็นภายหลังการใช้อุณหภูมิสูง พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ไม่มีความแข็งแรงของการหลอมเหลว เปราะ แต่สามารถปรับให้มีความแข็งแรงการหลอมเหลวได้ โดยการทำเป็นพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) เป็นต้น

10. เทคนิคการขึ้นรูปแบบแผ่นรีดคู่ (Twin Sheet Forming)

แผ่นพลาสติกสองแผ่นถูกเก็บแยกไว้ ในขณะที่ให้ความร้อน จากนั้นจึงนำมาพบกัน ในบริเวณแม่พิมพ์ตัวเมียชนิดคู่ที่จัดไว้ (Double female mold arrangement) โดยมีท่อเป่า (Blow pipe) อยู่ระหว่างแผ่นพลาสติก เมื่อแผ่นพลาสติกถูกยึดเข้าด้วยกันความดันอากาศจะทำให้แผ่นพลาสติกพองออกไปตามแม่พิมพ์ที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 การขึ้นรูปนี้สามารถทำชิ้นงานให้มีขนาดใหญ่แตกต่างกันไป ตกชั้นตอนการบิดผัน และสามารถใช้วัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดในการทำชิ้นงาน



รูปที่ 2.19 การขึ้นรูปแบบแผ่นรีทอว์ [8]

2.4.9 ชนิดพลาสติกที่ใช้ในการทำเทอร์โมฟอร์มมิ่ง [7]

เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง นิยมใช้เทอร์โมพลาสติกในกลุ่มอสัณฐาน (Amorphous thermoplastics) มากกว่าเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastics) เนื่องจากพลาสติกในกลุ่มแรกมีช่วงอุณหภูมิของการแปรรูปกว้าง (ช่วงที่เป็นเทอร์โมอีลาสติก) จึงทำให้มีความสะดวกในการแปรรูป แต่พลาสติกกลุ่มหลังก็มีการผลิตผลิตภัณฑ์จากการทำเทอร์โมฟอร์มมิ่งเช่นกัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีกว่า จึงนิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีราคาแพงกว่า และใช้งานทนทานกว่า ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการแปรรูปโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง มีดังนี้

- พอลิสไตรีน (PS) ที่อยู่ในรูปของพอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทก (High Impact Polystyrene, HIPS) โสโมพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน (PS) กรณี HIPS นิยมใช้ในการเทอร์โมฟอร์มมิ่งมาก เนื่องจากมีราคาไม่แพง ความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้ได้ชิ้นงานที่เบา ชิ้นงานมีความแข็งแรงปานกลาง ใช้ทำผลิตภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่มีความคงตัว (Dimensionally stable packaging) บรรจุภัณฑ์ของมอร์คคอมพิวเตอรื และใช้บรรจุสินค้าที่ต้องการโชว์ให้เห็นตัวสินค้าภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (Point-of-purchase displays) เป็นต้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทอร์โมพอลิเมอร์ของอะครีโลไนไตรล์ บิวตะไดอีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS) เป็นโคพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนชนิดหนึ่ง ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง เช่น ตกแต่งภายในตู้เย็น และเครื่องทำน้ำแข็ง ทำส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์และอุปกรณ์ตกแต่งภายในบ้าน เป็นต้น
- พลาสติกอะคริลิก เช่น PMMA (Polymethyl methacrylate) เป็นต้น นิยมทำผลิตภัณฑ์ที่มีความใส
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ถาด และถาดใส่ของ (Material handling trays) เป็นต้น ข้อดีของ HDPE ในการทำการแปรรูปด้วยเทอร์โมฟอร์มมิ่ง คือ ราคาถูก ความหนาแน่นดี น้ำหนักเบา ทนต่อแรงกระแทกดีมาก และทนการกัดกร่อนของสารเคมี
- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMWHDPE) ผลิตภัณฑ์มีสมบัติคล้ายกับกรณี HDPE แต่มีความแข็ง (Stiffness) และทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้องดีกว่า นิยมใช้ทำถาดที่ใช้ในทางการแพทย์ ถาดใส่ของ เป็นต้น
- พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิเอไมด์ (PA) เป็นพลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึก จึงต้องควบคุมอุณหภูมิในการแปรรูปอย่างละเอียด เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิของการอ่อนตัวแคบ PP ที่นิยมใช้ในการแปรรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งมากที่สุด คือ PP ที่ผสมด้วยทัลคัม (Talc) เนื่องจากเป็นวัสดุที่ให้ความแข็งและทนแรงกระแทกดี นอกจากนี้สามารถทำผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายดี และมีอุณหภูมิในการบิดตัว (Heat distortion temperature) สูงมาก นิยมใช้วัสดุชนิดนี้ในการผลิตชิ้นงานที่ใช้ในอุณหภูมิสูง
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly vinylchloride, PVC) ผลิตภัณฑ์เทอร์โมฟอร์มมิ่งจากวัสดุชนิดนี้มีสมบัติเด่น คือ ทนแรงกระแทกสูง แข็ง มีความเป็นมันวาวสูง ทนต่อสารเคมี ทนไฟ และทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก เป็นต้น จึงเหมาะแก่การผลิต ประตูห้องน้ำ ถึงใส่สารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในบ้าน ถาดบรรจุคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.10 ผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปด้วยเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งสามารถผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกใน 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

1. ภาชนะชนิดบาง (Thin-Wall Container)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้ เช่น ถ้วยกาแฟ ถ้วยบรรจุโยเกิร์ต ถ้วยบรรจุอาหารชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ในร้านฟาส์ฟู้ด เป็นต้น ภาชนะในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งเป็นการผลิตในปริมาณที่มาก ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งอยู่ในสายการผลิตเดียวกับเครื่องอัดรีดที่ใช้ในการผลิตแผ่นพลาสติก เรียกเทคนิคการผลิตแบบนี้ว่า เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบอินไลน์ (In-line thermoformer)

2. ชิ้นงานขนาดใหญ่

การผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ มักจะใช้แม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนและพลาสติกที่มีความยากในการแปรรูปมากขึ้น เช่น การใช้พลาสติกคอมโพสิต (Composites) หรืออาจใช้ผลิตแผ่นที่มีพอลิเมอร์หลายชั้น (Multi-layer plastics sheet) ผลิตการทำารอัดรีดร่วม (Co-extrusion) ตัวอย่างสำหรับการผลิตเรือ การผลิตพลาสติกสำหรับเคลือบภายในตู้เย็น และการผลิตอ่างน้ำ เป็นต้น

3. กลุ่มที่ใช้ในการห่อสินค้าเพื่อจุดประสงค์ในการโชว์สินค้า

ผลิตภัณฑ์พลาสติกในกลุ่มนี้มีปริมาณการผลิตสูง เช่นเดียวกับประเภทที่ 1 เนื่องจากมีความต้องการในการโฆษณาสินค้าต่างๆ การห่อสินค้าทำได้โดยการวางสินค้าบนแท่นกระดาษแข็ง ห่อด้วยพลาสติกที่ได้ขึ้นรูปแล้วจากการทำเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ตัวอย่างสินค้าที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์พลาสติกพวกนี้ เช่น สินค้าประเภทเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือช่าง เครื่องเขียน เครื่องสำอาง และเสื้อผ้า เป็นต้น

2.5 เตาอบไมโครเวฟ [9]

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่มากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาที มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่ต่ำกว่า หัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟ คือ ตัวแมกนีตรอน ที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์เพราะคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นความถี่สูงมีโซ่รังสี จึงไม่กระจายและสะสมในร่างกายมนุษย์

ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่อาหารจากทุกทิศทาง โคจรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่อาหาร เมื่อคลื่นไปกระทบอาหาร จะทำให้

โมเลกุลของอาหารเกิดการเต้นและเสียดสีกัน ก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ลักษณะเกี่ยวกับการที่เราใช้มืออุ่นไปมาเร็วๆ จะรู้ตัวร้อนขึ้นมาทันที จากคุณสมบัติเช่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคลื่น ไมโครเวฟที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว
ครบถ้วน

จึงเป็นการรักษาคุณค่าของอาหาร ไว้อย่าง

2.5.1 คลื่นไมโครเวฟ

มีลักษณะเด่น 3 ประการ

1. การสะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะ หรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ จะสะท้อนกลับ หก ดังนั้นอาหารที่ใส่ในภาชนะที่เป็น โลหะก็จะไม่สุก
2. การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจก ไม้ เซรามิกและพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าว ไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเป็น ภาชนะที่ใช้ได้ดีในเตาไมโครเวฟ
3. การดูดซึม (Absorption) ปกติอาหาร โดยทั่วไปจะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำใน อาหารซึ่งจะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ ทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่งเมื่อ โมเลกุลของ น้ำดูดซึมคลื่น ไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวในทันทีไม่สะสมในอาหาร

2.5.2 การเลือกใช้ระดับความร้อนในการประกอบอาหาร

ระดับความร้อนของเตาไมโครเวฟที่ผลิตขึ้นใช้งานส่วนมากจะมี 5 ระดับของการทำงาน คือ High , Medium high, Medium, Medium low และ Low

- High (Full power ~ 100%) หมายถึงแรงกำลังสูงสุด ถ้าใช้ระบบนี้ในการปรุงอาหารก็ จะช่วยให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปใช้ในการปรุงอาหารประเภท ปลา เบคอน ผักต่างๆ อุ่นอาหารให้ร้อน เครื่องดื่มร้อน ละลายเนยและเนื้อ (ประเภทไม่เหนียว)

- Medium high (Roast ~ 70%) ระบบนี้เหมาะสำหรับอบอาหาร ปิ้งอาหารและอาหารที่ สุกแล้ว โดยทั่วไปจะใช้ระบบนี้กับประเภทอาหาร ดังนี้ การอุ่นอาหารที่ต้องการให้ร้อน อุ่นขนม- ปัง ไก่ย่าง หมูย่าง และอาหารประเภทที่มีส่วนผสมของเนยแข็ง

- Medium (Simmer ~ 50%) ระบบนี้เหมาะสำหรับอาหารประเภทซूप สเต็ก ข้าว อาหารที่แช่แข็ง ทำแฮมเบอเกอร์ ละลายน้ำแข็งและต้มไข่

- Medium low (Defrost ~ 30%) ระบบนี้ใช้ละลายอาหารที่แช่แข็ง เต็มหรืออุ่นอาหาร บางประเภทเท่านั้น อาหารสดส่วนใหญ่จะต้องรักษาไว้ในห้องเย็น เมื่อต้องการจะใช้ต้องเสียเวลา

ในการรอคอยให้น้ำแข็งละลายหรือคลายความเย็น แต่ระบบนี้ช่วยให้ประหยัดเวลาในการละลาย อาหารแช่แข็ง โดยอาหารยังคงสภาพสดไว้เช่นเดิมและไม่เสียคุณค่าทางอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Low (~ 20%) ระบบนี้ใช้สำหรับอุ่นอาหารที่ไม่ต้องการให้อาหารร้อนจัดเกินไป จะทำให้อุณหภูมิและสีส้มของอาหารสดกว่าการอุ่นอาหารจากเตาโดยทั่วไป เพราะสามารถปรับระดับความร้อนที่เหมาะสมกับชนิดของอาหารได้ตามที่ต้องการ

2.5.3 ภาชนะและวัสดุที่ใช้ในการประกอบอาหาร

เนื่องจากหลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟก่อให้เกิดความร้อน ดังนั้น ภาชนะที่ใช้ในปรุงอาหารจะต้องมีลักษณะพิเศษและมีข้อจำกัดบางประการ ซึ่งจะต้องไม่กระทบต่อระบบการทำงาน ประสิทธิภาพและคลื่นไมโครเวฟ ดังนี้

- ภาชนะกระเบื้อง เช่น จาน ชาม ถ้วย หรือภาชนะก้นลึกต่างๆ ที่ใช้รับประทานอาหารนั้น ต้องสามารถใช้ได้ดีกับไมโครเวฟ
- ภาชนะแก้วทนไฟ ภาชนะแก้วที่ใช้สำหรับเคาะรวมดาเป็นภาชนะที่เหมาะสมสำหรับเตาไมโครเวฟด้วย ภาชนะแก้วที่ทนความร้อน เช่น ไพเร็กซ์ คอร์นนิ่งแวร์ เครื่องเคลือบเซรามิก และเครื่องปั้นดินเผา
- ภาชนะกระดาษ ใช้สำหรับอาหารที่ใช้ความร้อนไม่มาก เช่น การอุ่นอาหารหรืออาหารที่ใช้เวลาทำให้สุกสั้นมาก และสำหรับอาหารที่ไม่มันมาก
- ภาชนะพลาสติก ประเภทพลาสติกที่ทนร้อน สามารถใช้กับเตาไมโครเวฟได้ดี และ ภาชนะพลาสติกที่ออกแบบมาโดยเฉพาะกับการใช้งาน และต้องระบุด้วยว่าใช้กับเตาไมโครเวฟได้
- ภาชนะที่ควรหลีกเลี่ยง เช่น ภาชนะโลหะ ภาชนะที่เคลือบโลหะหรือมีขอบเป็นโลหะ เงิน ทอง อะลูมิเนียมฟอยล์ และ ภาชนะประเภทไม้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.E.Richeson (1988) [10] ศึกษาองค์ประกอบของพอลิเอสเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีผนังบางด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง Polyethylene naphthalate กับ Polyester elastomer พบว่าองค์ประกอบที่ดีที่สุดคือ การผสม Polyethylene naphthalate 94-99% โดยน้ำหนัก และ Polyester elastomer 1-6 % โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุที่ผลิตได้ มีความต้านทานการคืบ (Creep) มีความแข็งแรงกระแทก

(Impact strength) ค่อนข้างสูง มีความเสถียรของรูปร่างดี ซึ่งเหมาะที่จะนำไปทำเป็นถาดอาหารที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานไมโครเวฟได้ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเป็นผลึกประมาณ 10-40 % ซึ่งให้ข้อเสนอแนะว่า ควรทำการทดลองหาผลกระทบเกี่ยวกับเสถียรภาพทางความร้อนของผลิตภัณฑ์

J.Z.Liang และ J.N.Ness (1996) [11] ศึกษาเรื่องสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวผสมระหว่างพอลิเอทิลีน (PE) และพอลิพรอพิลีน (PP) โดยในการทดลองใช้พอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป และใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดฉีดขึ้นรูป พบว่า การไหลแบบเฉือนของพอลิเมอร์หลอมเหลวผสมจะขึ้นกับความหนืดเฉือนตามสมการอาร์เรเนียส สมบัติการไหลของพอลิพรอพิลีนจะดีขึ้นเมื่อทำการผสมพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง หรือพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 10 % การเพิ่มปริมาณพอลิพรอพิลีน (% โดยน้ำหนัก) จะทำให้ความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เมื่อเขียนกราฟระหว่างความหนืดเฉือนกับปริมาณพอลิพรอพิลีนที่ความเค้นเฉือนคงที่ พบว่า การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะไม่ได้ เมื่อมีปริมาณพอลิพรอพิลีนต่ำกว่า 20 % ใน PP/HDPE และเมื่อมีปริมาณพอลิพรอพิลีนสูงกว่า 50 % ใน PP/LDPE

F.G.Torres และ S.F.Bush (1999) [12] ศึกษากระบวนการอัดรีดเป็นแผ่น และการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งของเส้นใยแก้วยาว (Long glass fiber: LGF) เพื่อเป็นส่วนเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน ในการใช้เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งของคอมโพสิตเส้นใยแก้วจะใช้เทคโนโลยี Self Assembling Fiber Reinforcement (SAFIRE) พบว่าระหว่างกระบวนการอัดรีดเส้นใยแก้วจะรวมกันเป็นเส้นใยต่อเนื่องอยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งสามารถทนต่อกระบวนการเสียสภาพ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง พอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา คือ พอลิพรอพิลีนชนิดไฮโมพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ ทั้งที่มีและไม่มีส่วนเส้นใยแก้วเสริมแรง การเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจะให้งานที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนดีขึ้น

Y. Nagaoka, A.Egashira และคณะ (2001) [13] ศึกษากระบวนการผลิตและการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งของแผ่นพรอพิลีนเรซิน ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ฝาปิดหรือฝาครอบบรรจุภัณฑ์ สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถทนต่อความร้อนในเตาอบไมโครเวฟได้ พบว่าบรรจุภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะที่โปร่งแสง ทนต่อแรงกระแทก และทนต่อความร้อนที่ได้รับ ในการเตรียมแผ่นพรอพิลีนเรซินจะมีส่วนประกอบ

ของ Polyglycerol fatty acid ester หรือ Sucrose fatty acid ester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M.Drewniak, X.Zhao และ S.Srinivasan (2002) [14] ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตและการนำไปใช้งานของคอมโพสิตพอลิโอสเตอรีนผสม ปรับปรุงให้มีความแข็งแรงหลอมเหลวสูง โดยเป็นการผสมระหว่างพอลิโอสเตอรีนผสมกับนาโนคอมโพสิตของดินขาว (Clay nanocomposites) การปรับปรุงพอลิโอสเตอรีนผสมด้วยนาโนคอมโพสิตของดินขาว จะช่วยแก้ปัญหาเมื่อนำพอลิเมอร์ไปใช้ในกระบวนการที่มีการดึงยึด เช่น เทอร์โมฟอร์มมิ่ง การขึ้นเส้นใยแบบหลอมเหลว กระบวนการเป่าขึ้นรูป และการผลิตโฟม พบว่าการเติมนาโนคอมโพสิตของดินขาวลงในพอลิโอสเตอรีนผสมจะช่วยลดการห้อยย้อย และการขยายตัวที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ

E.Minghetti (2003) [15] ศึกษาวิธีที่ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีการกระจายตัวของเม็ดสีและตัวเติมสม่ำเสมอ ทั้งก่อนและหลังขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยในการทดลองจะทำการผลิตแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) โดยตัวเติมที่ใช้คือ สารที่ช่วยในการถ่ายโอนสายโซ่ (Chain transfer agent) สารตัวเติม (Filler) และเม็ดสี (Pigment) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีการกระจายตัวที่ไม่ดี พบว่าการผสมเมทิลเมทาคริเลต ในของเหลวหนืดระหว่างการให้ความร้อนและการเสียรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง การกระจายตัวที่ดีจะทำให้แผ่นวัสดุที่ได้รับแรงกระแทกได้ดีและมีความเสถียรของรูปร่าง

A.Pelliconi, A.Lonardo และ G.Mei (2003) [16] ศึกษาการผลิตแผ่นพอลิโอสเตอรีนสำหรับขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ประกอบด้วยพอลิพรอพิลีนอย่างน้อย 0.8 % โดยน้ำหนักของเอทิลีนที่มีอัลฟาโอสเตอรีน หรือพอลิพรอพิลีนอย่างน้อย 0.8 % โดยน้ำหนักของเอทิลีน โคมอนอเมอร์ที่มีอัลฟาโอสเตอรีน พอลิพรอพิลีนที่ได้จะมีอุณหภูมิหลอมเหลว 155 °C หรือสูงกว่า และปริมาณของส่วนที่ละลายได้ใน โซลีนที่อุณหภูมิห้องต้องไม่ต่ำกว่า 4 % โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่เก็บ ในอุณหภูมิ 25-95 °C จะพบสัดส่วนของโซลีนมากกว่า 8 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 ตารางเคมี

3.1.1 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด ชื่อทางการค้า EL-Pro[®] เกรด P401S สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีน แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีน EL-Pro[®]

สมบัติทางกายภาพ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	P401S
อัตราการไหล	กรัม / 10 นาที	ASTM D1238	2.4
ความหนาแน่น	กรัม / ลบ.ซม.	ASTM D1505	0.910
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก	กก. / ตร.ซม.	ASTM D 638	380
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด	กก. / ตร.ซม.	ASTM D 638	350
ความแข็งแรงกระแทก ที่อุณหภูมิ 23 °C	กก.-ซม./ ซม.	ASTM D 256	4
ความแข็งแรงกระแทก ที่อุณหภูมิ 0 °C	กก.-ซม./ ซม.	ASTM D 256	2.5
ความแข็ง (Rockwell hardness)	สเกล R	ASTM D 785	100
การยืดที่จุดขาด	%	ASTM D 638	500
มอดุลัสโค้งงอ	กก. / ตร.ซม.	ASTM D 790	16,500
จุดอ่อนค้ำไวแคท	องศาเซลเซียส	ASTM D 1525	155
อุณหภูมิการเสียสภาพทางความร้อน ที่ 4.6 กก./ ตร.ซม.	องศาเซลเซียส	ASTM D 648	110
อุณหภูมิการเสียสภาพทางความร้อน ที่ 18.5 กก./ ตร.ซม.	องศาเซลเซียส	ASTM D 648	60

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด ชื่อทางการค้า EL-Lene[®] เกรด H6140B สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แสดง ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง EL-Lene[®]

สมบัติทางกายภาพ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	H6140B
อัตราการไหล	กรัม / 10 นาที	ASTM D1238	0.30
ความหนาแน่น	กรัม / ซม.คบ.	ASTM D1505	0.962
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก	กก. / ตร.ซม.	ASTM D 638	280
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด	กก. / ตร.ซม.	ASTM D 638	350
ความแข็ง, Shore D	-	ASTM D 240	64
ความแข็งแรงกระแทก	กก. - ซม. / ซม.	ASTM D 256	12
ความต้านทานแรงดึงจาก สิ่งแวดล้อม	F ₅₀ - ซม.	ASTM D1693	45
การยืดที่จุดขาด	%	ASTM D 638	> 500
มอดุลัสโค้งงอ	กก. / ตร.ซม.	ASTM D 790	14,500
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	ASTM D 746	< -60
จุดอ่อนตัวไวแคท	องศาเซลเซียส	ASTM D 1525	128
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D 2117	132

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ผงทัลคัม (Talcum) จากบริษัท ยูเนียน ลิงค์ จำกัด ชื่อทางการค้า Talcum 37[®] (HC-37) สมบัติบางประการของผงทัลคัม แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของผงทัลคัม Talcum 37[®]

วิธีการทดสอบ	หน่วย	มาตรฐาน	ผลที่ได้
ลักษณะ	-	ผงแป้ง	ผงแป้ง
ความขาว ขณะแห้ง	-	ไม่น้อยกว่า 88.0	89.26
ส่วนค้ำตะแกรง 325 เมช	%	ไม่เกิน 1.0	0.20
ความหนาแน่นรวม	กรัม / ซีซี	0.50 ±0.05	0.50
ปริมาณความชื้น	%	ไม่เกิน 0.20	0.06
การดูดซับ	ซีซี / 100 กรัม	35±5	37.1

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท ยูเนียน ลิงค์ จำกัด

3.1.4 วัสดุมาตรฐานอ้างอิง (Bench mark) จากบริษัท Dow chemical company จำกัด เกรดทางการค้า D 114.00 สมบัติบางประการของ Bench mark แสดงได้ดังตาราง 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Bench mark

สมบัติทางกายภาพ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	D 114.00
อัตราการไหล (230 °C, 2.16 kg)	g /10 min	ASTM D 1238	0.5
ความหนาแน่น	g / cc	ASTM D 792	0.9
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก	psi (MPa)	ASTM D 638	4350 (30)
ความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด	ft.lbf / in (J/m)	ASTM D 256A	ไม่แตกหัก
การดึงยืด ณ จุดคราก	%	ASTM D 638	12
มอดุลัสโค้งงอ	psi (MPa)	ASTM D 790A	215000 (1480)
จุดหลอมเหลว	°F (°C)	ASTM D 3417	327 (164)
อุณหภูมิการบิดตัว	°F (°C)	ASTM D 648	210 (99)

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท Dow chemical company จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องจักรชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder, รุ่น PL-200; Intro Engineering)
2. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine , Cosmo รุ่น TTi 220/80 HITEC Welltec Industrial Equipment)
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, Bosco รุ่น A600; Bosco Engineering)
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, LLOYD รุ่น LR 30k ; LLOYD Instrument)
5. เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด-ที่อุณหภูมิห้อง (Izod Impact tester, Yasuda รุ่น 7697; Yasuda Seiki Seisakusho)
6. เครื่องทดสอบแรงกระแทกอเนกประสงค์ (Universal impact tester, Yasuda Co.,Ltd)
7. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester, Shore D, Yasuda รุ่น 7689; Intro Enterprise Co.,Ltd)
8. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (รุ่น Pyris Daimond DSC ; บริษัท Perkin elmer instrument)
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, รุ่น LEO 1455 VP; LEO Co.,Ltd)
10. เครื่อง Heat distortion tester (รุ่น HD-TC Yasuda Co.,Ltd.)
11. เครื่องอัดรีดแผ่นพลาสติกชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Plastic Sheets Supply Co.,Ltd)
12. เครื่องขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสูญญากาศ (PWK Engineering & Construction Co.,Ltd)
13. เตาอบไมโครเวฟ (Microwave oven)
 - HITACHI (รุ่น MRG-838, กำลังไมโครเวฟ 1380 วัตต์)
 - TURBORA (รุ่น TRX-2459, กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)
14. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

3.3.1 การศึกษาอัตราส่วนระหว่าง PP, HDPE และทัลคัมที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมของพอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และทัลคัม

สาร	สูตร (% โดยนน.)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
พอลิพรอพิลีน	60	65	70
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	10	10	10
ทัลคัม	30	25	20

1. ทำการชั่งส่วนประกอบต่างๆตามตารางที่ 3.5
2. นำส่วนประกอบแต่ละชนิดมาทำการผสมด้วยเครื่องอัลทริคเกิลียวหนอนคู่ โดยตั้งอุณหภูมิเรียงตามลำดับจากส่วนน้อย ไปยังห่วยดยดังนี้ 170°C 190°C 210°C 210°C ความเร็ว 7 รอบต่อนาที
3. นำสารผสมที่ได้ ไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก
4. นำสารผสมที่ผ่านการบดมาทำการผสมอีกครั้ง ด้วยเครื่องอัลทริคเกิลียวหนอนคู่ ทำซ้ำ เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 และ 3
5. นำสารผสมที่ผ่านการบดแล้ว 2 ครั้ง มาทำการฉีดเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก ชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปคิมเบลด และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยบากตรงกลางชิ้นงาน เพื่อใช้ทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง สภาวะที่ใช้แสดงดังภาคผนวก ก.
6. นำพลาสติกผสมสูตรทางการค้าที่จะใช้เป็นตัวอย่างสำหรับเป็นคัมขนิมาตรฐาน (Bench mark) ได้แก่ มาทำการฉีดเป็นชิ้นงานด้วย เครื่องฉีดพลาสติกและทดสอบสมบัติต่างๆ เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นสารเปรียบเทียบสมบัติกับสารตัวอย่างในการพิจารณาเลือกสูตรที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

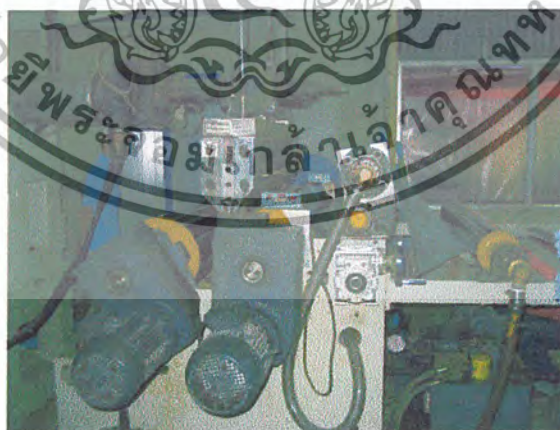
3.3.2 การขึ้นรูปแผ่น และผลิตภัณฑ์เทอร์โมฟอร์มมิ่ง

1. นำสูตรผสมที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.3.1 มาทดลองขึ้นรูปเป็นแผ่นที่มีความหนา 0.55 มิลลิเมตร โดยมีหน้ากว้าง 24 นิ้ว โดยใช้เครื่องอัดรีดแผ่นพลาสติกตามสภาวะดังนี้

- อุณหภูมิที่บาร์เรล 196 / 200 / 205 / 210 / 215 / 230 °C ตามลำดับ
- อุณหภูมิที่หัวคาย 210 / 225 / 230 °C ตามลำดับ
- ความเร็ว 250 รอบต่อนาที
- ความเร็วลูกกลิ้ง 150 รอบต่อนาที

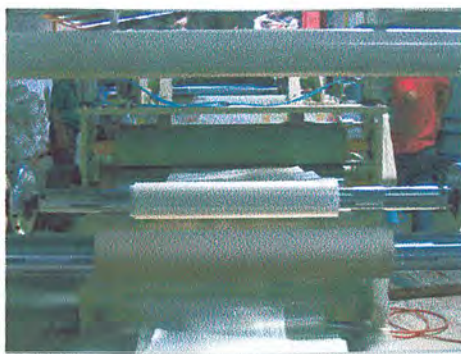


รูปที่ 3.1 ลักษณะของเครื่องอัดรีด บริเวณ Hopper และ Barrel



รูปที่ 3.2 ลักษณะของเครื่องอัดรีด บริเวณหัวคายและลูกกลิ้งหล่อเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะของเครื่องอัดรีด บริเวณลูกกลิ้งม้วนเก็บแผ่นพลาสติก

2. นำแผ่นพอลิพรอพิลีนที่ได้ มาขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้แรงดันสุญญากาศ (Vacuum forming) เครื่องที่ใช้ขึ้นรูปมี Heater 2000 วัตต์ และ Vacuum power 800 วัตต์ ตามสภาวะดังนี้

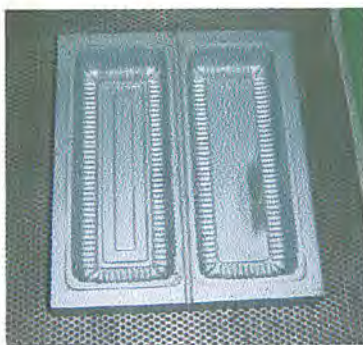
- อุณหภูมิส่วนให้ความร้อน (Heater) 300°C
- เวลาให้ความร้อน 45 วินาที
- เวลาให้แรงดันสุญญากาศ 6 วินาที
- เวลาเย็นตัว 14 วินาที
- อัตราการให้แรงกด 10 ลิตรต่อนาที

3. นำชิ้นงานที่ได้ ไปทดสอบการใช้งานในเตาอบไมโครเวฟ



รูปที่ 3.4 ลักษณะของเครื่องขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป

3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. สมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกที่เตรียมเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) มาทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal tester) ที่ความเร็วในการดึง 150 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 70 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D638 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ค่ามอดุลัส (Tensile modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

2. สมบัติมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกที่เตรียมเป็นรูปคัมเบลล์ มาทดสอบความแข็งแรงโค้งงอด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ระบบการใช้แรง 3 จุด (Three-point loading system) ใช้อัตราเร็วในการกดชิ้นงาน 10 mm/min ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 790 เพื่อหาค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)

3. สมบัติความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)

- ที่อุณหภูมิห้อง

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกที่เตรียมเป็นแท่งที่มีรอยบากอยู่ตรงกลางชิ้นงาน มาทดสอบความแข็งแรงกระแทกด้วยเครื่องวัดแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งค่าความแข็งแรงกระแทกแบบ Izod ที่ได้มีหน่วยเป็น kg.cm/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อุณหภูมิ -23°C

เตรียมชิ้นงานดังเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานเข้าแช่ในตู้ chamber 1 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ เพื่อให้อุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของ chamber ต่อจากนั้นจึงนำชิ้นงานตัวอย่างสอดเข้าระหว่าง clamp จับยึดชิ้นงาน แล้วทดสอบความแข็งแรง กระแทกด้วยเครื่องวัดแรงกระแทกเอกเนกประสงค์ (Universal impact tester) ที่อุณหภูมิ -23°C ตามมาตรฐาน ASTM D 256 บันทึกค่าที่ได้ในหน่วย kg.cm/cm

4. สมบัติความแข็ง (Hardness)

นำตัวอย่างที่เป็นรูปคัมเบสล์มาทดสอบความแข็งกด (Hardness) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead Load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240

3.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

1. การวิเคราะห์โดยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ทำการชั่งสารตัวอย่างที่ตัดจากชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกมาประมาณ 5-10 mg นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-50; Shimadzu) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ 200°C และทำการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 5°C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น

นำข้อมูลที่ได้จากกราฟมาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึก (T_m) อุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c) ความร้อนของการหลอมผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ดังนี้

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟหลอมเหลวผลึก (mJ)}}{\text{นน.สารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f^0 คือ ความร้อนในการหลอมผลึกพอลิเมอร์บริสุทธิ์

เมื่อพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นผลึก 100 % มีค่า 293 J/g

และพอลิพรอพิลีนที่มีความเป็นผลึก 100 % มีค่า 163 J/g [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวิเคราะห์หาอุณหภูมิในการบิดตัว (Heat distortion temperature , HDT) [18]

ทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างคัมเบลล์ที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติก มาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 127 มม. วัดความหนาและความกว้างของชิ้นงาน ป้อนอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40°C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 120°C/ชม. จากนั้นวางลูกค้อนน้ำหนักที่จะกดชิ้นงาน และใส่ชิ้นงานที่ช่องวางชิ้นงาน กดหัวกด (ซึ่งมีลักษณะภาคตัดขวางเป็นวงกลม) ให้สัมผัสกับชิ้นงาน นำเครื่องทดสอบวางลงในอ่างน้ำมัน เพื่อควบคุมและให้ความร้อน เมื่อจุดกึ่งกลางของชิ้นงานเกิดการบิดตัว 0.25 มม. เครื่องจะบันทึกอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เกิดการบิดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D 648 ต้องทำการทดสอบชิ้นงานอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง

3. การวิเคราะห์หาจุดอ่อนตัวไวแคท (Vicat softening point) [18]

ทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ 12 มม. และหนา 3 มม. ป้อนอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40°C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 120°C/ชม. จากนั้นวางลูกค้อนน้ำหนักที่จะกดชิ้นงาน 1 กก. และใส่ชิ้นงานที่ช่องวางชิ้นงาน กดหัวกด (ซึ่งมีลักษณะเป็นหัวเข็ม) ให้สัมผัสกับชิ้นงาน นำเครื่องทดสอบวางลงในอ่างน้ำมัน เพื่อควบคุมและให้ความร้อน เมื่อหัวกดเจาะลงไปชิ้นงาน 1 มม. เครื่องจะบันทึกอุณหภูมิที่พอลิเมอร์อ่อนตัว ตามมาตรฐาน ASTM D 1525

3.4.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นรูปคัมเบลล์มาแช่ในไมโครเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการหักขณะที่ยังเย็นอยู่ แล้วนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า

3.4.4 การทดสอบความสามารถในการใช้งานไมโครเวฟ

นำบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง มาทดสอบการใช้งานในไมโครเวฟที่กำลังคลื่นไมโครเวฟ 800 วัตต์ และ 1380 วัตต์

- การใช้งานกับน้ำ

ใส่น้ำลงในบรรจุภัณฑ์ 200 มิลลิลิตร นำเข้าไปในเตาอบไมโครเวฟเปิดกำลังสูงสุด (100%) แล้วจึงวัดอุณหภูมิของน้ำโดยเทอร์โมมิเตอร์ ทุกๆ 2 นาที จนถึงนาทีที่ 30 จากนั้นทำการทดสอบความทนทานของตัวอย่างในการใช้งานในไมโครเวฟโดยใส่น้ำลงในบรรจุภัณฑ์ เปิดไมโครเวฟที่กำลังสูงสุด ทดสอบเป็นเวลา 30 นาที สังเกตลักษณะของตัวอย่างตลอดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การใช้งานกับน้ำมัน

ใส่น้ำมันพืชลงไปในบรรจุภัณฑ์ 200 มิลลิลิตร นำเข้าไปในเตาอบไมโครเวฟเปิดกำลังสูงสุด (100%) แล้วจึงวัดอุณหภูมิของน้ำมันโดยเทอร์โมมิเตอร์ ทุกๆ 1 นาที จนวัสดุเปลี่ยนสภาพ สังเกตลักษณะของตัวอย่างตลอดการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการดำเนิน โครงการวิจัยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง และทัลคัม เพื่อนำไปผลิตบรรจุภัณฑ์ที่สามารถใช้งานในไมโครเวฟด้วย เทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ได้มีการค้นคว้างานวิจัยของ J.Z.Liang, J.N.Ness [11] ซึ่งสรุปไว้ว่า “สมบัติการไหลของพอลิพรอพิลีนหลอมเหลวสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยทำการผสมกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 10 %” เนื่องจากความต้องการที่จะให้พอลิเมอร์มีสมบัติการไหลที่ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ปริมาณของ HDPE 10% โดยน้ำหนักคงที่ทุกสูตรผสม และทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของปริมาณทัลคัม เท่านั้น คือ 20-25 และ 30% โดยน้ำหนัก โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา ดังผลการวิจัยต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

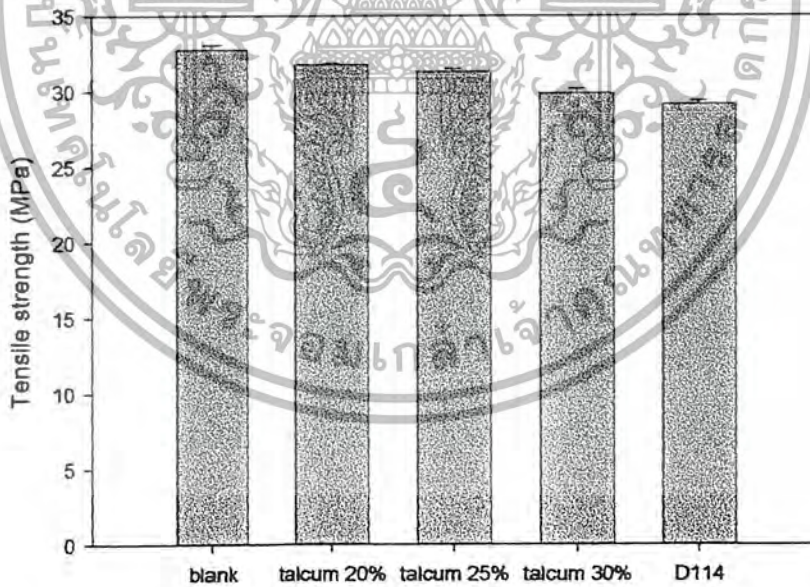
เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างและชิ้นงานทดสอบ โดยใช้วิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ที่มีผลต่อสมบัติการรับแรงดึง ความแข็งแรง โค้งงอ ความแข็งแรงกระแทก และความแข็งของพื้นผิว เพื่อวิเคราะห์ว่าชิ้นงานมีความแข็งแรง และสามารถทนทานต่อแรงที่มากระทำได้มากน้อยแค่ไหนเมื่อนำไปใช้งานจริง

4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile stress at yield) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Modulus) แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1- 4.4

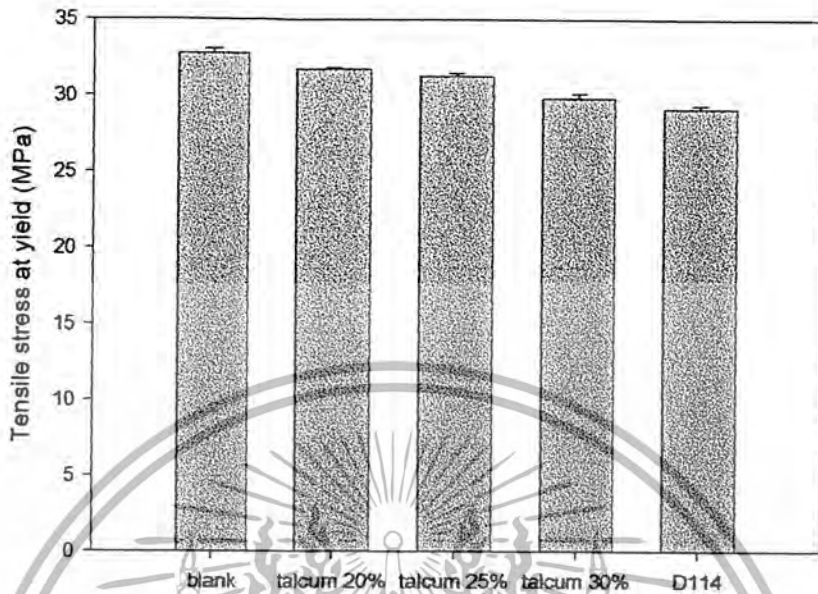
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

การทดสอบ	สูตรผสม				
	Talc 0%	Talc 20%	Talc 25%	Talc 30%	Bench mark
Tensile strength (MPa) kg/cm ²	(32.80) 334.47	(31.81) 324.37	(31.35) 319.68	(29.89) 304.79	(29.17) 297.45
Tensile stress at yield (MPa) kg/cm ²	(32.79) 334.36	(31.78) 324.06	(31.32) 319.42	(29.87) 304.59	(29.17) 297.45
Elongation at break (%)	14.05	9.84	9.14	8.11	13.25
Modulus (MPa) kg/cm ²	(494.05) 5037.91	(584.50) 5960.24	(592.70) 6043.86	(600.08) 6119.15	(435.88) 4444.74

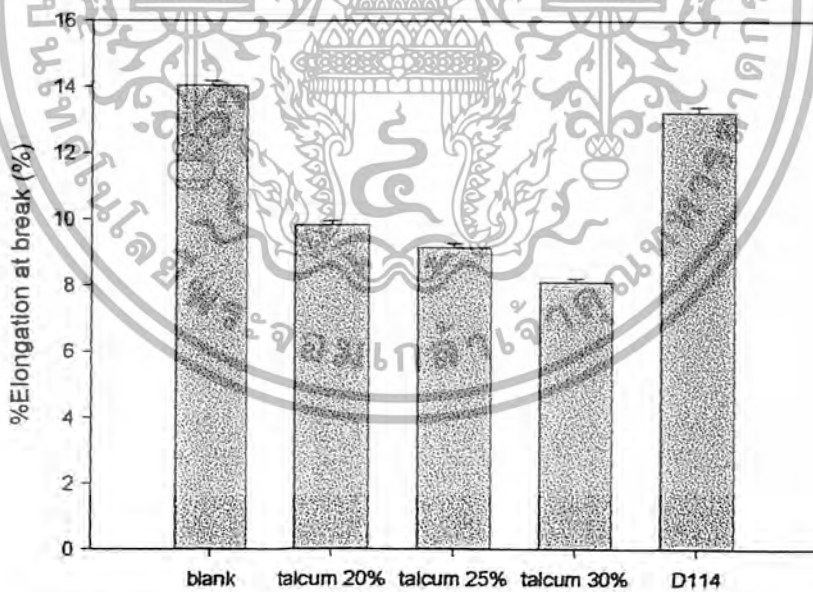


รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

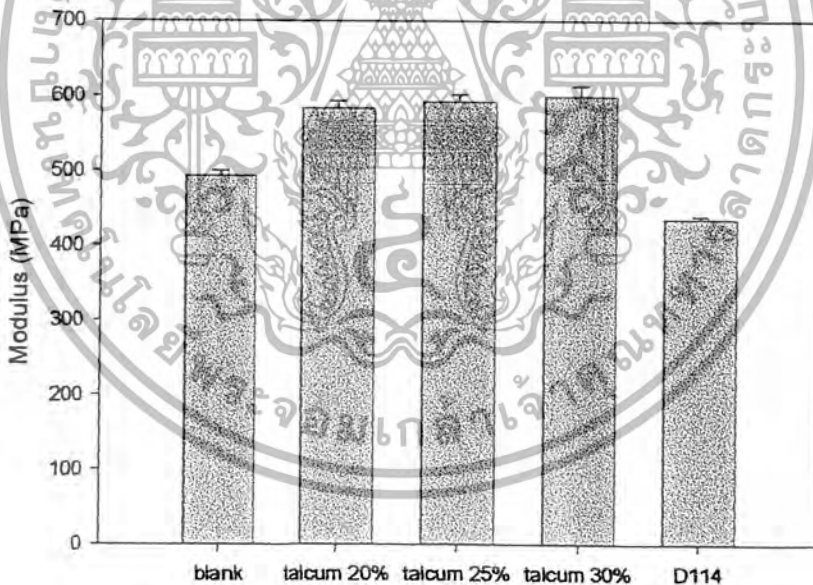
จากรูปที่ 4.1 – 4.3 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณที่ล้นมากขึ้น เนื่องจากที่ล้นเป็น

สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) ดังนั้นจึงทำหน้าที่ลดต้นทุนโดยการเพิ่มเนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ แต่กลับทำให้ความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอนุภาคที่เติมมากขึ้นจะทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคหรืออินเทอร์เฟซ (Interfaces) ระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (PP และ HDPE) และอนุภาคที่เติม จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าความแข็งแรงของแต่ละวัฏภาค การใช้สารตัวเติมปริมาณมากยิ่งมีความยากในการผสม และอาจเกิดรอยตำหนิหรือช่องว่าง (Voids) โดยเฉพาะที่อินเทอร์เฟซเป็นผลให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลง เมื่อมีปริมาณที่เติมเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลความแข็งแรงดึงของวัสดุ นอกจากนี้ที่ล้นซึ่งเป็นส่วนอินทรีย์ที่มีขี้ ส่วน PP และ HDPE เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีขี้ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างที่ล้นและ PP ที่อินเทอร์เฟซไม่แข็งแรง เมื่อออกแรงดึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อเกิดจุดบกพร่องของชิ้นงาน ทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดลดลง



รูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

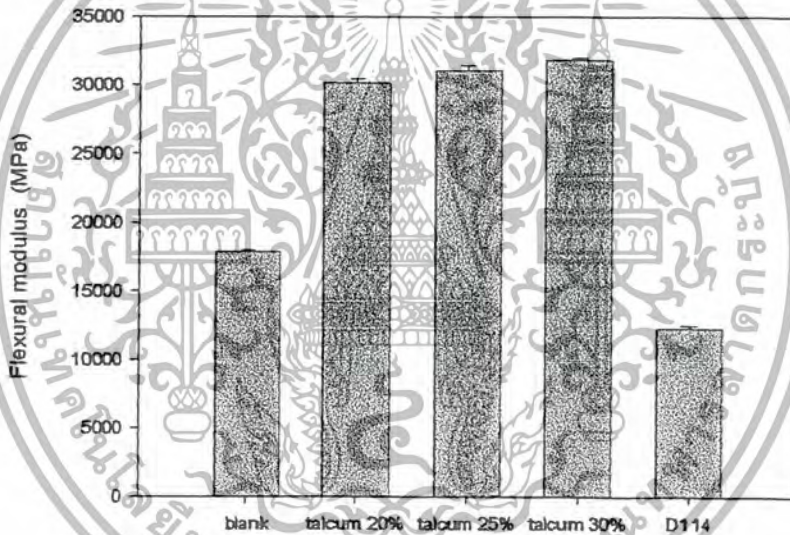
จากรูปที่ 4.4 ค่ามอดุลัสของวัสดุจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของที่ล้น เนื่องจากที่ล้นเป็นส่วนอินทรีย์ ซึ่งมีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนมาก ดังนั้นเมื่อผสมที่ล้นลงไปในพอลิเมอร์จะทำให้วัสดุผสมมีค่ามอดุลัสหรือความแข็งแรงที่สูงขึ้นตามกฎของผสม (Rule of mixture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบมอดุลัสโค้งงอของพอลิเมอร์ผสม

การทดสอบ	สูตรผสม				
	Talc 0%	Talc 20%	Talc 25%	Talc 30%	Bench mark
Flexural modulus (MPa) kg/cm ²	(1754.24) 17888	(2961.66) 30200	(3047.96) 31080	(3125.43) 31870	(1209.28) 12331



รูปที่ 4.5 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่ามอดุลัสโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมที่เติมทัลคัม จะมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมทัลคัมอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทัลคัมมีค่ามอดุลัสที่สูงกว่าพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนมากจึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์คั้งที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นเมื่อเกิดการโค้งงอจะทำให้มอดุลัสโค้งงอมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณทัลคัมที่เติมลงไป

4.1.3 ผลการทดสอบความแข็งกด

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม

การทดสอบ	สูตรผสม				
	Talc 0%	Talc 20%	Talc 25%	Talc 30%	Bench mark
Hardness (Shore D)	65.65	62.10	66.15	68.10	66.75

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อมีการเติมทัลคัมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีค่าความแข็งกดที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่ามอดุลัส (Modulus) ซึ่งเหตุผลจะเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกัน เนื่องจากการเติมทัลคัมจะทำให้วัสดุผสมมีความแข็งสูงขึ้น ก็จะส่งผลให้วัสดุผสมมีความสามารถในการรับแรงกดได้มากขึ้น ค่าความแข็งกดจึงมากขึ้นเช่นเดียวกัน

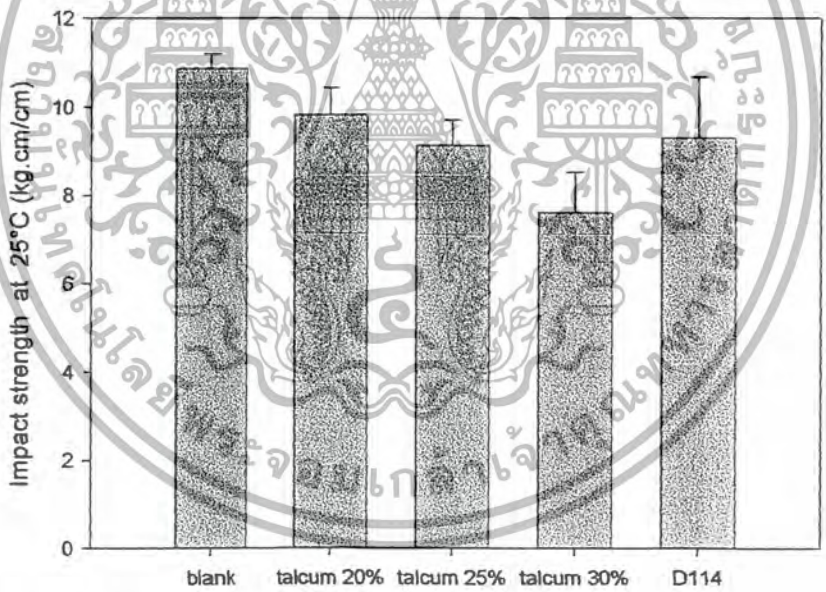


รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งกด (Shore D) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

4.1.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทก

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

การทดสอบ	สูตรผสม				
	Talc 0%	Talc 20%	Talc 25%	Talc 30%	Bench mark
Impact strength (25°C) Kg.cm/cm	10.87	9.47	8.65	7.62	9.31
Impact strength (-23°C) Kg.cm/cm	1.9	4.2	4.6	4.7	12

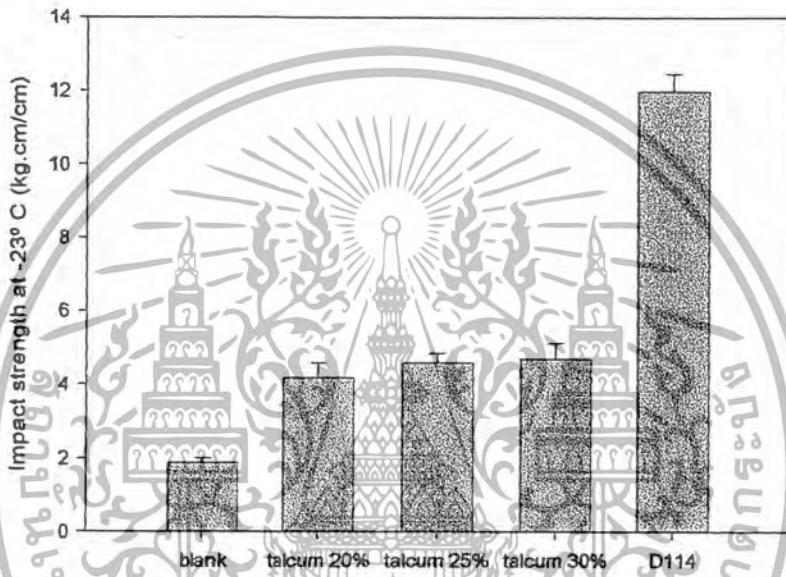


รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงกระแทก ที่ 25°C ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 จะพบว่า ที่อุณหภูมิห้องความแข็งแรงกระแทกของวัสดุผสมจะลดลง เมื่อวัสดุผสมมีปริมาณทัลคัมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ในกรณีเดียวกับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด เนื่องจากความแข็งแรงกระแทกสัมพันธ์กับปริมาณและความยาวของรอยตำหนิในตัวอย่าง การเพิ่มปริมาณทัลคัมทำให้บริเวณที่ไม่แข็งแรง หรือรอยตำหนิบริเวณอินเทอร์เฟสมากขึ้น เป็นผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุลดลง ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกมากกระทำอย่างรวดเร็ว จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

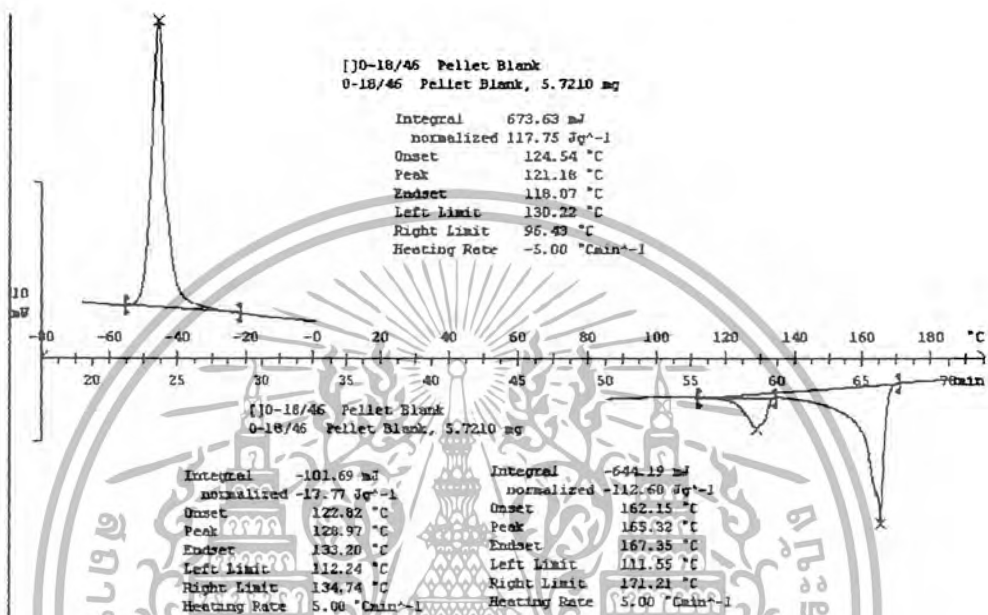
ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่าย แต่ในรูปที่ 4.8 พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำ (-23°C) เมื่อเติมทัลคัมลงไป ในพอลิเมอร์จะส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น เพราะว่าพอลิพรอพิลีนมี อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ 0°C นั่นคือ พอลิพรอพิลีนจะมีความเปราะมากขึ้นที่ -23°C ในขณะที่ทัลคัมเมื่อได้รับแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดการแตกหักในลักษณะที่ถูกดึงให้เป็นเส้น (ductile) จึงส่งผลให้รับแรงกระแทกได้ดีกว่าในกรณีที่พอลิเมอร์ผสมไม่มีการเติมทัลคัม



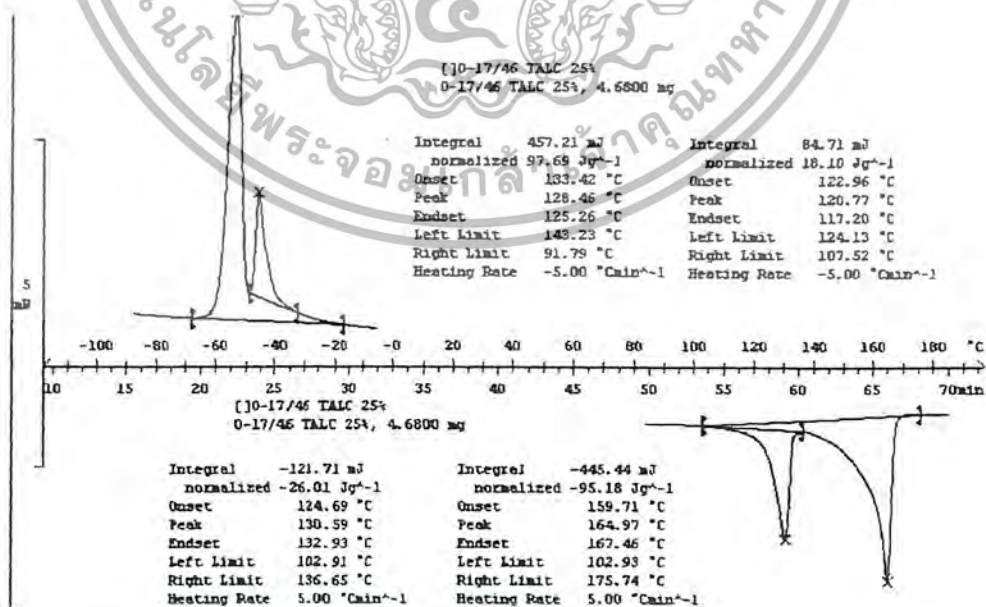
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ -23°C ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

4.2.1 การวิเคราะห์โดยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างกราฟ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของ Talcum 0%



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของ Talcum 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC

สารตัวอย่าง	T_m (°C)		ΔH_f (J/g)		% Crystallinity		T_c (°C)	
	HDPE	PP	HDPE	PP	HDPE	PP	HDPE	PP
Blank	129	165	17.77	112.60	6.06	69.07	121	-
เติม Tal 20%	130	165	23.76	97.55	8.11	59.85	120	127
เติม Tal 25%	131	165	26.01	95.18	8.88	58.39	121	128
เติม Tal 30%	131	165	28.89	91.06	9.86	55.87	121	129
D 114	-	166	-	85.70	-	52.58	-	129

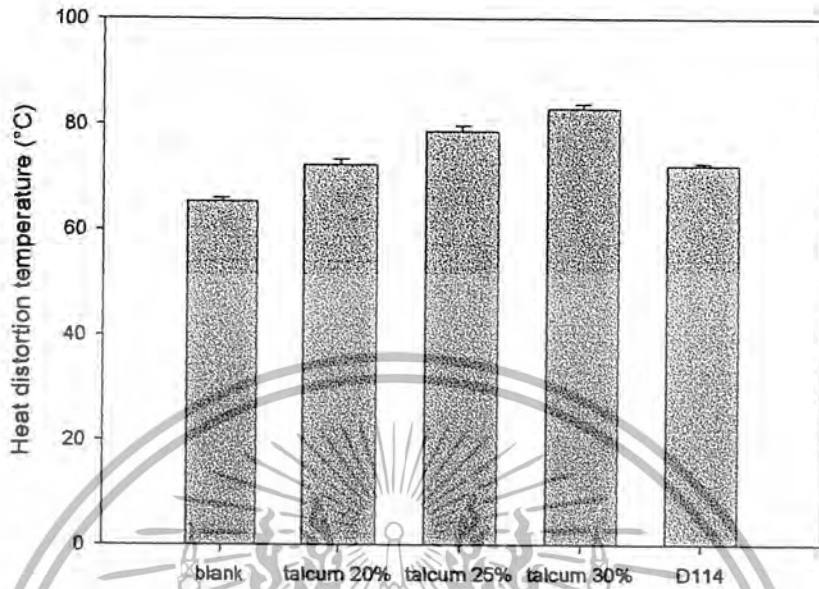
จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อมีการผสมทัลคัมลงในพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิการหลอมเหลว ผลึก (T_m) ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีที่ไม่มีการเติมทัลคัม แสดงว่าขนาดผลึกของ PP และ HDPE ทั้งที่เติมและไม่เติมทัลคัมมีขนาดใกล้เคียงกัน ส่วน %Crystallinity ของ PP ลดลง เนื่องจากทัลคัมอาจไปขัดขวางการเกิดผลึกของ PP ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มอนุภาคทัลคัมที่เป็นของแข็ง ทำให้เกิดผลึกยากขึ้น แต่ % Crystallinity ของ HDPE เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4.2.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิในการบิดตัว (Heat distortion temperature, HDT) และ การวิเคราะห์หาจุดอ่อนตัวไวแคท (Vicat softening point)

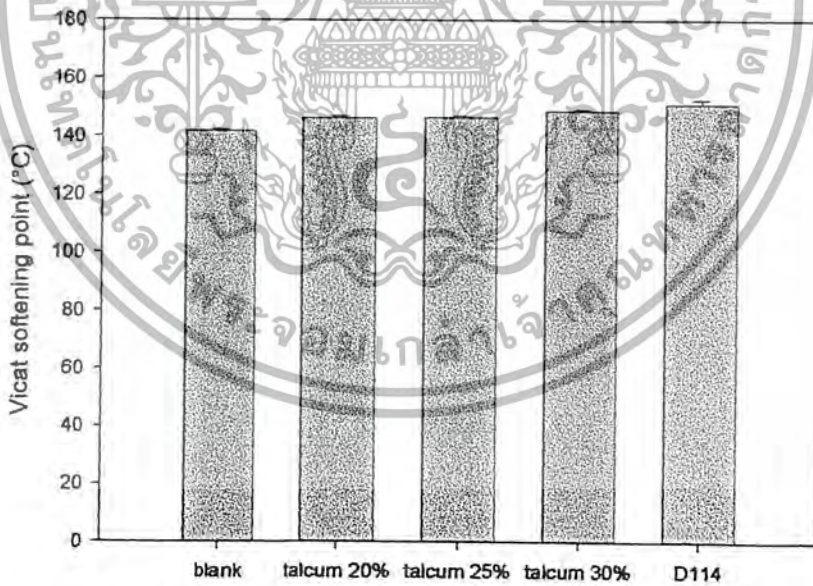
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิในการบิดตัวและจุดอ่อนตัวไวแคทของพอลิเมอร์ผสม

การทดสอบ	สูตรผสม				
	Talc 0%	Talc 20%	Talc 25%	Talc 30%	Bench mark
HDT (°C)	65.35	72.4	78.67	83	72.2
Vicat (°C)	141.9	144.7	146.1	148.8	154.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ HDT ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์หา Vicat ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัม จะส่งผลให้อุณหภูมิในการบีดตัวและจุดอ่อนตัวไวกาตสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (สูตรทัลคัม 30% อุณหภูมิ HDT เพิ่มขึ้น 18°C

Vicat เพิ่มขึ้น 7°C) ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิในการบีดตัว มีความสัมพันธ์กับความแข็งในทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกัน นั่นคือ เมื่อพอลิเมอร์มีปริมาณทลคัมเพิ่มขึ้น ความแข็งเหนียวของพอลิเมอร์ก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการบิดตัวสูงขึ้น แสดงว่า ผลิตภัณฑ์สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ โดยไม่เกิดการอ่อนตัวนั่นเอง นอกจากนี้ ทลคัมซึ่งเป็นสารอนินทรีย์จะมีเสถียรภาพทางความร้อนหรือทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั้ง PP และ HDPE ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณทลคัมจึงทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุโดยรวมดีขึ้น

จากการทดสอบสมบัติความแข็งแรงเชิงกลและสมบัติทางความร้อน พบว่าการเพิ่มปริมาณทลคัมจะทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไป คือ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด จะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของอินเทอร์เฟสระหว่างวัฏภาคของ PP และ HDPE กับอนุภาคของทลคัมที่มากขึ้น มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์น้อยลง ทำให้ความแข็งแรงน้อยลง นอกจากนี้ การผสมสารตัวเติมเข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นอาจทำให้เกิดรอยค้ำหนิหรือช่องว่างได้ เนื่องจากบริเวณรอยค้ำหนิที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณอินเทอร์เฟสเมื่อมีอินเทอร์เฟสมาก โอกาสที่จะเกิดรอยค้ำหนิก็มากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลง ค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุก็จะลดลง เมื่อพิจารณาจากค่าที่ได้ สูตรผสมที่มีปริมาณทลคัม 30% จึงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกระแทกที่ 25°C จะพบว่ามีค่าน้อยกว่า ค่าที่ได้จาก Bench mark ส่วนสูตรผสมที่มีปริมาณทลคัม 25% จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดน้อยกว่าค่าที่ได้จาก Bench mark เช่นเดียวกับ สูตรผสมที่มีปริมาณทลคัม 30% และจะมีค่าความแข็งแรงกระแทกใกล้เคียงกับค่าของ Bench mark มากกว่าสูตรผสมที่มีปริมาณทลคัม 30%

ผลจากการเพิ่มปริมาณทลคัมจะทำให้ค่ามอดุลัส ค่ามอดุลัสโค้งงอ และค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากทลคัมเป็นสารอนินทรีย์ที่มีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิเมอร์อย่าง PP และ HDPE ส่งผลให้ค่ามอดุลัสและค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าสูงขึ้น เมื่อค่ามอดุลัสหรือค่าความแข็งสูงขึ้นแล้ว วัสดุผสมก็จะสามารถรับแรงกดได้มากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งกดสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมทลคัมเทียบกับ ค่าที่ได้จาก Bench mark พบว่า ค่ามอดุลัสและค่ามอดุลัสโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมทลคัมทุกสูตรจะมีค่ามากกว่าค่าของ Bench mark ซึ่งค่ามอดุลัสโค้งงอจะแสดงถึงความสามารถในการซ้อนทับ (Stackability) โดยความสามารถในการซ้อนทับ (Stackability) จะแสดงถึงความทนทานในการวางซ้อนทับกันของบรรจุภัณฑ์ขณะขนส่ง ดังนั้น เมื่อค่ามอดุลัสโค้งงอสูงก็จะทำให้บรรจุภัณฑ์ทนต่อแรงกดทับได้ดี ส่วนค่าความแข็งกด พบว่าสูตรผสมที่มีปริมาณทลคัม 25% จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Bench mark และสูตรผสมที่มีปริมาณทลคัม 30% จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จาก Bench mark

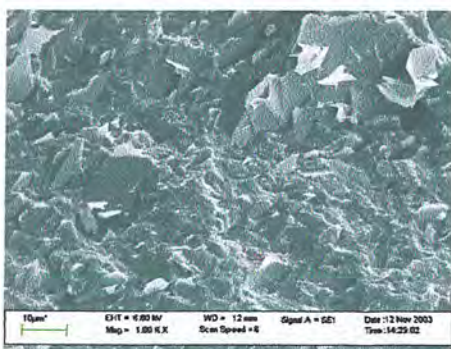
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ผลของการเติมทัลคัมอีกประการหนึ่ง ก็คือ ทัลคัมทำให้วัสดุผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น โดยเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิในการบิดตัวและจุดอ่อนตัวไวเคทที่สูงขึ้น เมื่อมีปริมาณทัลคัมมากขึ้น เนื่องจากทัลคัมเป็นสารอนินทรีย์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่า PP และ HDPE ทำให้วัสดุผสมมีอุณหภูมิบิดตัวสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่า ผลิตภัณฑ์สามารถนำไปใช้ในงานที่อุณหภูมิสูงได้ และเมื่อพิจารณาเทียบกับค่าของ Bench mark พบว่า อุณหภูมิในการบิดตัวของวัสดุผสมที่มีปริมาณทัลคัม 25% และทัลคัม 30 % จะมีค่าสูงกว่า

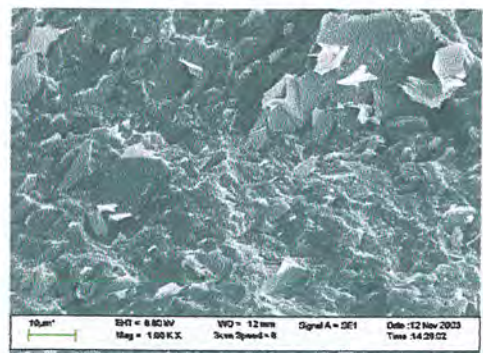
สรุปจากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด เมื่อนำค่าที่ได้จากพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมาพิจารณาเทียบกับค่าที่ได้จาก Bench mark พบว่า สูตรที่เหมาะสมที่จะนำมาผลิต เพื่อทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับใช้งานในไมโครเวฟด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง คือ สูตรที่มี PP/Talcum/HDPE เท่ากับ 65/25/10 เนื่องจากค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Bench mark คือ สามารถรับแรงกระแทก และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมากกว่าสูตรที่มีปริมาณทัลคัม 30% และมีอุณหภูมิในการบิดตัวสูงกว่าสูตรที่มีปริมาณทัลคัม 20%

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกลฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะเห็นว่าอนุภาคของทัลคัมจะมีลักษณะเป็นแผ่นกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม มีลักษณะการกระจายตัวที่ดี เมื่อเพิ่มปริมาณของทัลคัมให้มากขึ้น ดังแสดงในรูป 4.13 (c) และรูปที่ 4.14 (d) พบว่าทัลคัมจะมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็งแรงดึงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทก ลดลง

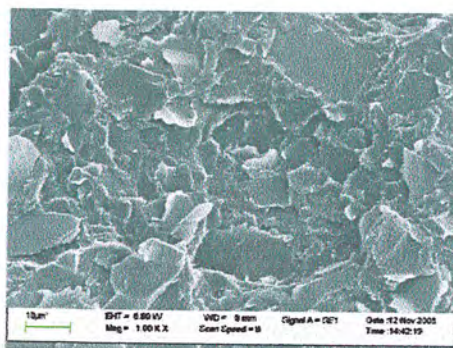


(a) เติม Talcum-20 %



(b) เติม Talcum-25 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



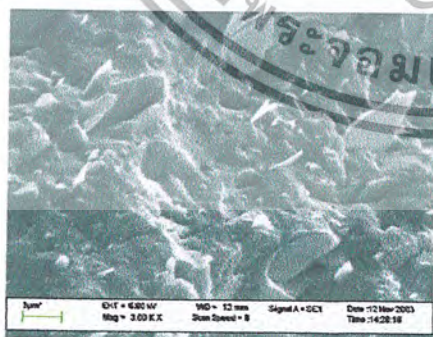
(c) เต็ม Talcum 30 %

รูปที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ กำลังขยาย 1000 เท่า

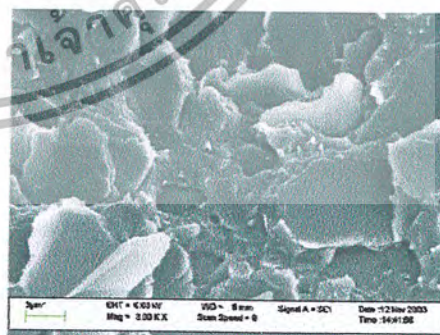


(a) Talcum

(b) เต็ม Talcum 20 %



(c) เต็ม Talcum 25 %



(d) เต็ม Talcum 30 %

รูปที่ 4.14 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ กำลังขยาย 3000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบสำหรับการใช้งานในไมโครเวฟ

เมื่อสามารถสรุปหาสูตรผสมที่เหมาะสมของพอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และทัลคัม เพื่อนำมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่งแล้ว จะต้องทำการทดสอบการใช้งานในเตาอบไมโครเวฟ โดยดูว่าบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตได้สามารถทนทานต่อความร้อนของคลื่นไมโครเวฟได้นานมากน้อยเพียงใด โดยไม่เกิดการเสียหายหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่าง นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ได้ว่าบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตได้เหมาะสมที่จะใช้งานในเตาอบไมโครเวฟได้หรือไม่

4.4.1 ลักษณะแผ่นพลาสติกที่ได้จากการอัดรีด มีความหนาประมาณ 0.55 มม. โดยแผ่นพลาสติกที่ได้มีลักษณะขาวขุ่น มีการกระจายตัวของทัลคัมสม่ำเสมอ



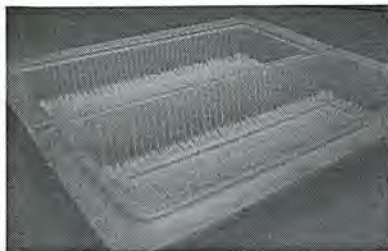
รูปที่ 4.15 ลักษณะของแผ่นพลาสติกที่ได้จากการอัดรีด

4.4.2 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง มีขนาดดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

บริเวณที่วัด	ความหนา (มม.)
ผนังของฝาครอบ	0.450 ± 0.002
ผนังของฐาน	0.440 ± 0.003
ผนังด้านข้าง	0.423 ± 0.001
ด้านกว้างของชิ้นงาน	400
ด้านยาวของชิ้นงาน	370

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

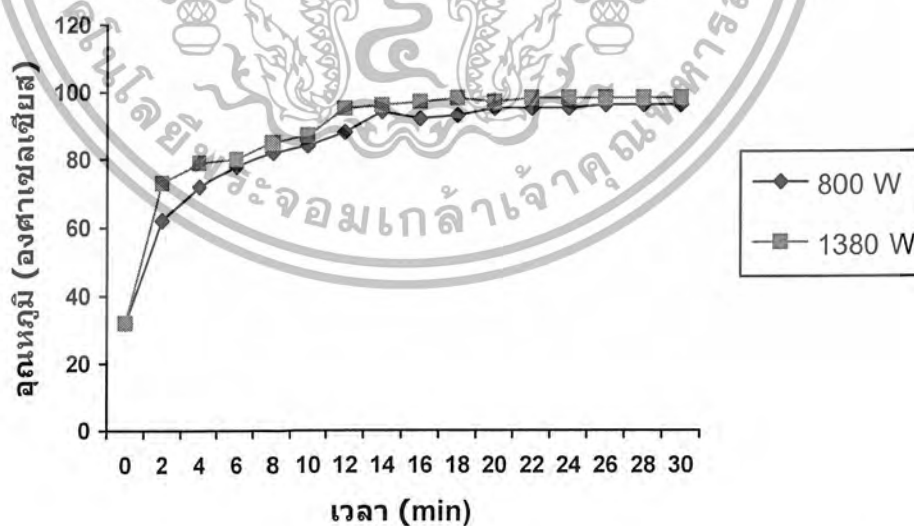


รูปที่ 4.16 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูป

4.4.3 ผลการทดสอบเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานในไมโครเวฟ

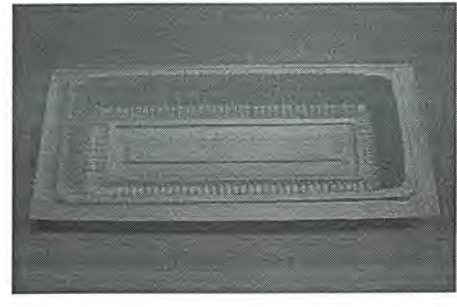
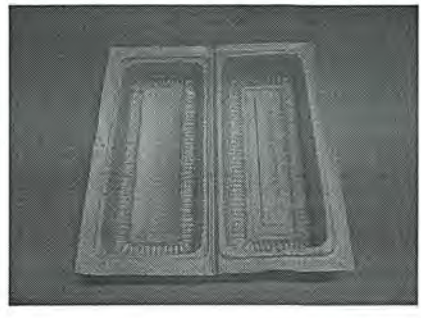
1. การใช้งานกับน้ำ

นำบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุน้ำ เข้าเตาอบไมโครเวฟ แล้ววัดอุณหภูมิทุกๆ 2 นาที ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟผลการทดสอบโดยบรรจุน้ำลงในบรรจุภัณฑ์ ใช้ไมโครเวฟที่มีกำลัง 800 วัตต์ และ 1380 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ที่ 800 วัตต์

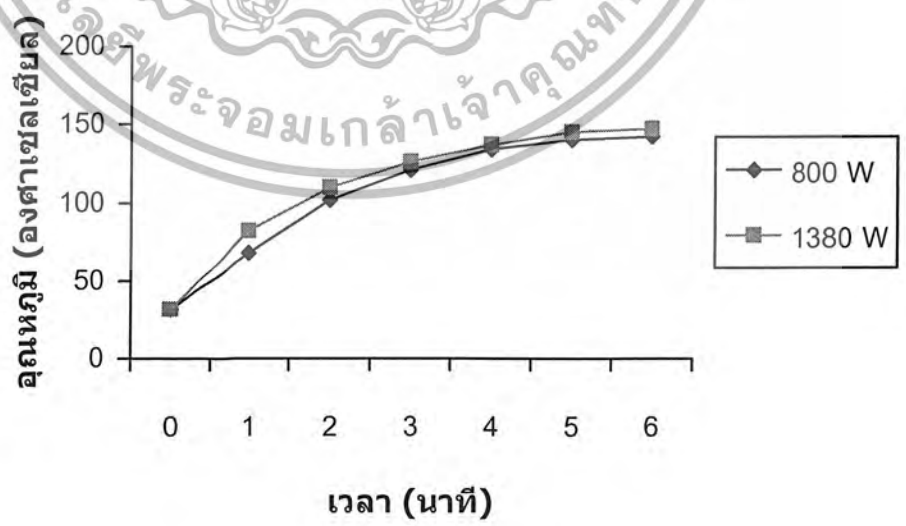
(b) ที่ 1380 วัตต์

รูปที่ 4.18 ผลิตกัณฑ์ที่บรรจุน้ำ หลังจากการทดสอบในไมโครเวฟเป็นเวลา 30 นาที

จากการทดสอบพบว่าผลิตกัณฑ์ที่ได้มีลักษณะที่เหมือนกันทั้งก่อนและหลังเข้าไมโครเวฟเป็นเวลา 30 นาที แสดงให้เห็นว่าผลิตกัณฑ์สามารถทนความร้อนได้ดีที่สภาวะการใช้งานในไมโครเวฟ (ต้มน้ำ อุณหภูมิประมาณ 100 °C) โดยไม่เกิดการเสียรูปของผลิตกัณฑ์เป็นเวลานานกว่า 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาสูงสุดที่คาดว่ามีการใช้งานไมโครเวฟ

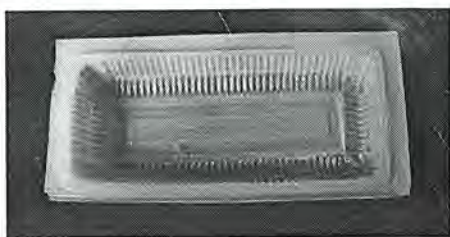
2. การใช้งานกับน้ำมัน

นำบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุน้ำมันพืช เข้าเตาอบไมโครเวฟ แล้ววัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19

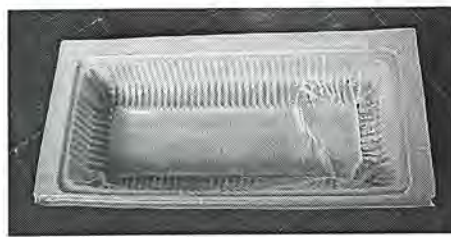


รูปที่ 4.19 กราฟผลการทดสอบโดยบรรจุน้ำมันพืชลงในบรรจุภัณฑ์ ใช้ไมโครเวฟที่มีกำลัง 800 วัตต์ และ 1380 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ที่ 800 วัตต์



(b) ที่ 1380 วัตต์

รูปที่ 4.20 ผลึกภัณฑ์ที่บรรจุน้ำมันพืช หลังจากการทดสอบในไมโครเวฟเป็นเวลา 6 นาที

จากการทดสอบพบว่า เมื่อบรรจุน้ำมันพืชลงในผลึกภัณฑ์ ผลึกภัณฑ์จะเกิดการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 140°C ภายในเวลา 5 นาที หลังจากนั้นผลึกภัณฑ์จะเกิดการเสียหาย ซึ่งผลการทดสอบเตาอบไมโครเวฟที่ใช้กำลัง 800 วัตต์ และ 1380 วัตต์ ให้ผลการทดสอบคล้ายกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันสามารถถูกทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟได้ง่ายกว่าและมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำ ผลึกภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบมีจุดอ่อนตัวไวกะเท 146.1 $^{\circ}\text{C}$ (จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.2.2) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 140°C จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบรรจุภัณฑ์

จากผลการทดสอบการใช้งานผลึกภัณฑ์จริงกับการใช้งานที่มีน้ำและน้ำมัน พบว่าผลึกภัณฑ์สามารถใช้งานกับน้ำได้เป็นเวลานานโดยไม่เสียหาย (ผู้ทำการทดลองไม่ได้ขยายเวลานานกว่า 30 นาทีจนผลึกภัณฑ์เสียรูปร่าง เนื่องจากเกรงว่าจะเป็นอันตรายต่อเตาไมโครเวฟที่ทดสอบ แต่คาดว่าผลึกภัณฑ์ที่เตรียมได้สามารถทนทานต่อสภาวะการใช้งานจริงได้นานกว่านั้น) อย่างไรก็ตาม การใช้งานผลึกภัณฑ์กับน้ำมันมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้งานได้นานมากกว่า 6 นาที เนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิอ่อนตัวของพอลิเมอร์ ทำให้วัสดุเสียหายได้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาสูตรผสมที่เหมาะสมของพอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และทัลคัม เพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟ โดยขึ้นรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง พบว่าการเติมทัลคัมจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้องลดลง เป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างขั้วที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง PP และทัลคัมไม่แข็งแรง และการมีปริมาณทัลคัมเพิ่มมากขึ้นทำให้มีบริเวณอินเทอร์เฟซมากขึ้น ซึ่งบริเวณนี้เองทำให้เกิดรอยต่อหรือช่องว่าง (Void) ของชิ้นงาน ถือเป็นจุดบดพร่องของชิ้นงาน ส่วนค่ามอดูลัสค่าความแข็งกด และค่ามอดูลัสโค้งงอ มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากทัลคัมมีค่ามอดูลัสและความแข็งแรงเหนียวที่สูงกว่า PP และ HDPE จึงทำให้วัสดุผสมมีค่ามอดูลัสหรือค่าความแข็งสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของของผสม (Rule of mixture)

ข้อดีของการเติมทัลคัม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการทำบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟก็คือ ทัลคัมช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการบิดตัว และจุดอ่อนตัวไวแคทให้สูงขึ้น เพราะทัลคัมเป็นสารอนินทรีย์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่าพอลิเมอร์อย่าง PP และ HDPE จึงทำให้บรรจุภัณฑ์สามารถทนความร้อนและมีเสถียรภาพต่อความร้อนดีขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิต่ำ การใช้ทัลคัมเป็นส่วนผสมจะช่วยให้รับแรงกระแทกได้ดีขึ้น เนื่องจากในขณะที่ PP มีลักษณะแข็งเปราะ แต่ทัลคัมสามารถรับแรงในลักษณะค้ำยันได้ เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัว สูตรที่มีทัลคัม 30 % จะเกิดลักษณะที่เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่กว่า ซึ่งอาจจะทำให้รับแรงกระแทกได้ไม่ดีเท่าไรนัก

จากการศึกษาทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า สูตรที่เหมาะสมในการผลิต เพื่อทำบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟนั้นคือ สูตรที่มี PP/Talcum/HDPE เท่ากับ 65/25/10 ตามลำดับ เนื่องจากว่าสมบัติความแข็งแรงกระแทก และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดไม่ต่ำเกินไป มีการกระจายตัวที่คิดว่าสูตรที่มีทัลคัม 30 % มีจุดอ่อนตัวไวแคทและอุณหภูมิในการบิดตัวสูงกว่าสูตรที่มีทัลคัม 20 % ซึ่งสูตรผสมนี้มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานที่ใช้ในทางการค้ามากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ชนิดของพอลิพรอพิลีนที่ใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ประกอบด้วย โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random Copolymer) พอลิเมอร์ร่วมชนิดรับแรงกระแทก (High Impact Copolymer) ในกรณีที่เหมาะสมพอลิเมอร์ควรมีค่า MFR เท่ากับ 2.5 g /10 min การเลือกใช้ชนิดของพอลิเมอร์ขึ้นกับความต้องการการใช้งาน เช่น ถ้าต้องการเพิ่มความแข็งแรงเหนียว (Stiffness) ให้ใช้โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ถ้าต้องการความใสและความแข็งแรงเหนียวด้วยอาจเพิ่ม Clarified homopolymer เข้าไป แต่พอลิเมอร์ชนิดนี้จะมีราคาแพงมาก หรือถ้าต้องการให้มีความใสมากๆ ให้ใช้ Clarified random copolymer

2. การใช้ทัลคัมเป็นสารตัวเติมในพอลิพรอพิลีนจะทำให้สมบัติบางประการดีขึ้น เช่น ค่ามอดูลัส (Modulus) มอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) มีการหดตัวต่ำ อุณหภูมิในการบิดตัวสูง (Heat distortion temperature) และความต้านทานการเกิดรอยขีดข่วน แต่อย่างไรก็ตาม สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีนที่มีการเติมสารอนินทรีย์จะมีข้อจำกัดบางอย่าง ในระบบที่มีการเติมในปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่ดีในระหว่างการผสม ดังนั้นในปัจจุบันนี้ ผู้ผลิตมักจะทำการปรับปรุงพื้นผิวของทัลคัมเพื่อเพิ่มการยึดติดกันระหว่างทัลคัมกับพอลิพรอพิลีนให้ดีขึ้น ในทางการค้าสามารถใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ร่วมด้วย เช่น Acrylic acid grafted polypropylene เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ผสมกับทัลคัม

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ. ปรีชา พหลเทพ, " โพลีเมอร์ "พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2530, 310-320
- [2] Feldman. D. and Barbalata A. *Synthetic Polymers : Technology, properties, application*, Chapman & Hall, London, 1996
- [3] ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์. " เทคโนโลยีการยาง ", เอกสารประกอบการเรียนเทคโนโลยีการยาง,ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] Sekutowski. D. Talc, *Inorganic Additives*, 531-538
- [5] W.P.Steen. Talc in Polypropylene, *Handbook of PP and PP composites*, 237-262
- [6] International Talc Co. Talc ; functional pigments for every industrial use. New York : Metal Bulletin limited., 1979.
- [7] ผศ.ดร.เจริญ นาคะสรศรี. " กระบวนการแปรรูปพลาสติก " พิมพ์ครั้งที่ 3, ไทยวัฒนาพานิช, 2536, 223-267
- [8] ผศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. "เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1 " พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] ชวน คล้ายปาน. "เดาอบไมโครเวฟ", *โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม* , 2545, 31-37
- [10] Richeson. and Edward. D. Polyester composition which is particularly suitable for use in thermoforming thin walled articles. European Patent, EP 0,282,436, 1998.
- [11] Liang. J.Z. and Ness. J.N. " *Investigation on the Melt Flow Properties of Polyethylene and Polypropylene Blend* ", *Pol. Tes.*, 1996, 16, 379-389.
- [12] Torres. F.G. and Bush. S.F. " Sheet extrusion and thermoforming of discrete long glass fibre reinforce polypropylene ", *Com.*, 1999, 31, 1289-1294.
- [13] Nagaoka. Y. and Egashira. A. Propylene resin sheet for thermoforming and process for preparing it. United States Patent, US 6,251,510,2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Drewniak. M., Zhao. X. and Srinivasan. S. High melt-strength polyolefin composites and methods for making and using same. United States Patent, US 2002/0156171,2002.
- [15] Minghetti. E. Method of making a thermoformable article having uniform distribution of coloring and mineral filler before and after thermoforming. United States Patent, US 6,562,927,2003.
- [16] Pelliconi. A. , Lonardo. A. and Mei G. Polyolefin sheets for thermoforming. United States Patent, US 2003/0162907,2003.
- [17] Encyclopaedia of Polymer Science and Engineering, 4, 487, John Wiley & Sons. Inc., New York, 1996.
- [18] Ellis. J.W. "Plastic testing", Petroleum and petrochemical College Chulalongkorn University, 1995.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

สถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding machine

TIME PROGRAMMING

DIE CLS/OPN TIME	: 30	MELTING TIME	: 100
STD COR ACT TIME	: 20	DECOMPRS TIME	: 2
1 ST STG INJ TIME	: 20	COOLING TIME	: 100
2 ND STG INJ TIME	: 30	EJECTOR COUNT	: 2
3 RD STG INJ TIME	: 40	SCW FWD TIME	: 0
EJE FWD DLY	: 0	SCW BWD TIME1	: 0
MELTING DLY	: 0	SCW BWD TIME2	: 0
EJE BKD DLY	: 0	ALARM TIME	: 350

PRESSURE PROGRAMMING

DIE CLS PRESR	: 40	DECOMP PRESR	: 40
CLS LOW PRESR	: 20	PLUNGER PRESR	: 25
CLS HI PRESR	: 20	EJECTOR PRESR	: 20
DIE OPN PRESR	: 40	SCW - IN PERSR	: 0
1 ST INJ PRESR	: 60	DIE ADJ PRESR	: 60
2 ND INJ PRESR	: 50		
3 ND INJ PRESR	: 40		
MELTING PRESR	: 50		

PROGRAMMING FLOW SPEED

RAPID CLS SPD	: 40	1 ST STG INJ SPD	: 40
HIGH CLS SPD	: 25	2 ND STG INJ SPD	: 30
CLAMPING SPD	: 25	3 RD STG INJ SPD	: 20
DIE OPN SLW 1	: 13	MELTING SPD	: 50
RAPID OPN SPD	: 30	DECOMP SPD	: 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIE OPN SWL 2	: 20	EJECTOR SPD	: 15
PLUNGER SPD	: 50	SCREW – IN	: 0
DIE ADJ SPD	: 40	DIE CHANGE SPD	: 10

PROGRAMMING TEMPERATURE

PROGRAMED TEMP	CURRENT TEMP
NOZZLE	220
ZONE 1	210
ZONE 2	190
ZONE 3	0
ZONE 4	0
ZONE 5	0
ZONE 6	0

PROGRAMMING OPTION			
DIE CLS SPD : 1	1 = HI SPD	2 = FAST SPD	
PLUNGER SPD : 2	1 = USE	2 = NO USE	
ROBOT : 2	1 = USE	2 = NO USE	
SCRW : 2	1 = USE	2 = NO USE	3 = SID-COR
EJECTOR : 1	1 = STAL	2 = MULTI	3 = FIXD NB
SID-COR : 2	1 = TIME	2 = TRAVEL	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของสารตัวอย่าง

1.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	Avg
Talcum 0%	33.88	32.65	33.53	32.48	32.39	31.84	32.80
Talcum 20%	32.21	31.68	31.67	31.96	31.68	31.64	31.81
Talcum 25%	31.46	31.95	31.68	31.57	31.38	30.65	31.35
Talcum 30%	30.21	30.41	30.25	30.61	28.98	28.89	29.89
Bench mark	29.82	28.96	28.82	28.44	29.05	29.91	29.17

1.2 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile at yield)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	Avg
Talcum 0%	33.88	32.65	33.53	32.47	32.39	31.84	32.79
Talcum 20%	32.14	31.65	31.67	31.92	31.67	31.64	31.78
Talcum 25%	31.45	31.95	31.68	31.52	31.35	30.62	31.32
Talcum 30%	30.15	30.38	30.25	30.60	28.98	28.87	29.87
Bench mark	29.82	28.96	28.82	28.44	29.04	29.91	29.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)

สารตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)						
	1	2	3	4	5	6	Avg
Talcum 0%	14.49	13.50	13.91	13.81	14.22	14.34	14.05
Talcum 20%	9.740	9.979	10.23	10.07	9.758	9.247	9.837
Talcum 25%	9.378	9.707	8.805	9.048	9.618	8.859	9.1416
Talcum 30%	8.216	7.742	8.004	8.381	7.927	8.404	8.112
Bench mark	12.88	13.51	12.58	13.22	13.12	13.93	13.25

1.4 ค่ามอดุลัส (Modulus)

สารตัวอย่าง	ค่ามอดุลัส (MPa)						Avg
	1	2	3	4	5	6	
Talcum 0%	508.95	499.85	510.55	490.45	489.90	464.60	494.05
Talcum 20%	615.50	592	591	597	554	557.50	584.50
Talcum 25%	554	655	583	605.50	623	598	592.70
Talcum 30%	565	622	609.50	657	560	587	600.08
Bench mark	444.84	430.75	427.43	424.86	436.87	450.55	435.88

1.5 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงกระแทก (kg.cm/cm)								Avg
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Talcum 0%	10.91	0.44	9.83	10.03	11.14	10.81	10.68	12.71	10.87
Talcum 20%	7.60	9.74	12.56	8.48	7.47	10.82	11.06	10.99	9.84
Talcum 25%	9.47	7.36	6.20	9.65	9.22	8.80	11.56	10.86	9.14
Talcum 30%	8.92	11.86	6.01	4.62	5.09	6.60	7.24	10.62	7.62
Bench mark	5.64	8.27	6.98	13.80	13.99	7.20	8.60	10.0	9.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่ภายนอกได้
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ค่าความแข็ง (Hardness)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็ง										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg
Talcum 0%	65.0	64.0	67.0	64.5	66.5	67.0	64.5	64.0	67.0	66.0	65.65
Talcum 20%	65.0	63.0	63.0	59.0	64.0	57.0	59.0	65.0	63.0	63.0	62.1
Talcum 25%	67.0	65.0	67.0	66.0	67.0	67.0	65.0	65.5	65.0	67.0	66.15
Talcum 30%	67.0	68.0	70.0	68.5	68.5	67.0	67.0	68.0	68.0	69.0	68.1
Bench mark	65.5	67.5	67.0	68.0	69.0	70.0	63.0	67.5	64.0	66.0	66.75

1.7 ค่าอุณหภูมิในการบิดตัว (Heat distortion temperature)

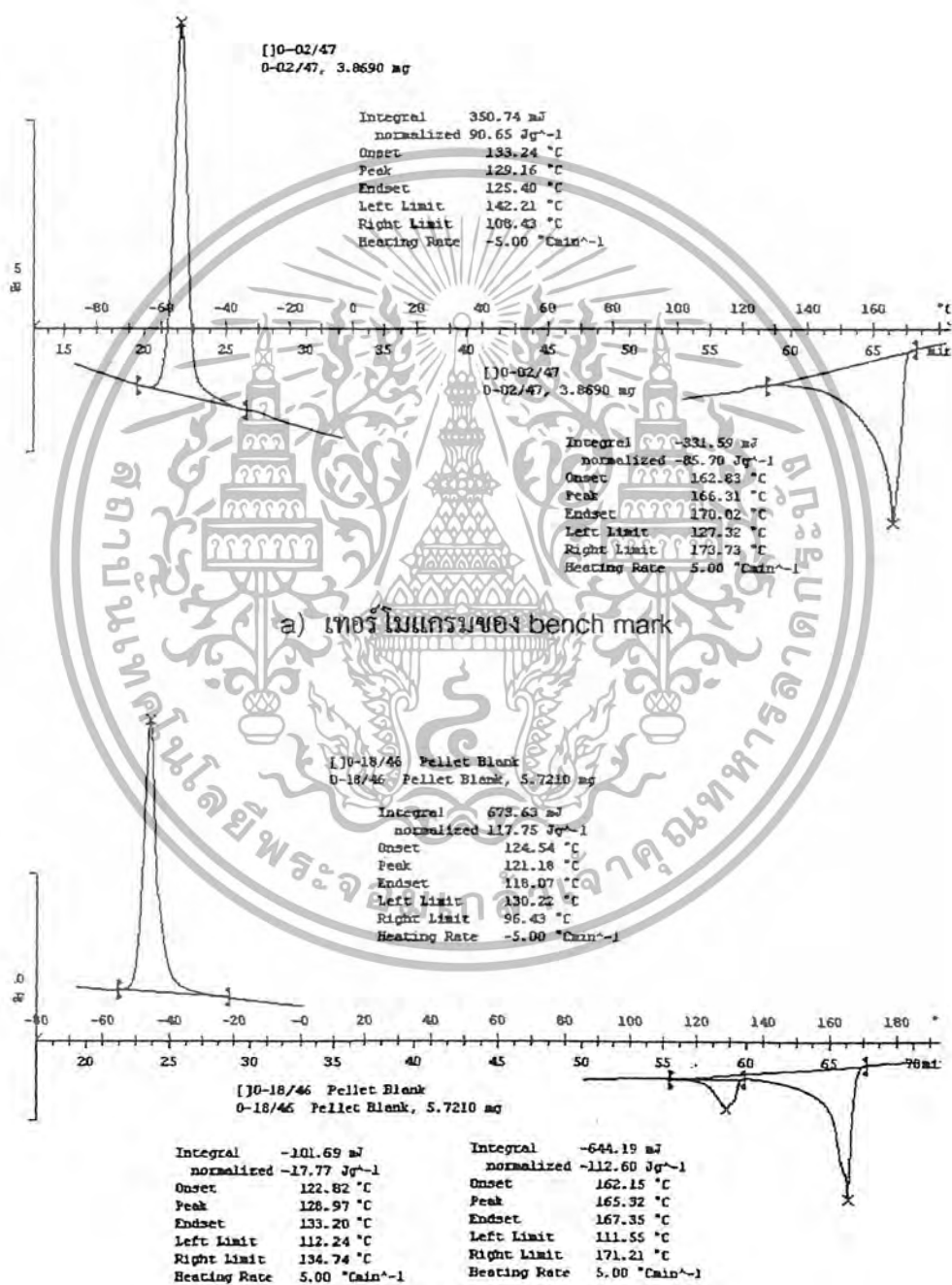
สารตัวอย่าง	ค่าอุณหภูมิในการบิดตัว (°C)		
	1	2	Avg
Talcum 0%	66.2	64.5	65.35
Talcum 20%	71.0	73.8	72.4
Talcum 25%	77.2	80.14	78.67
Talcum 30%	81.9	84.1	83
Bench mark	72.7	71.7	72.2

1.8 ค่าจุดอ่อนตัวไวเคต (Vicat softening point)

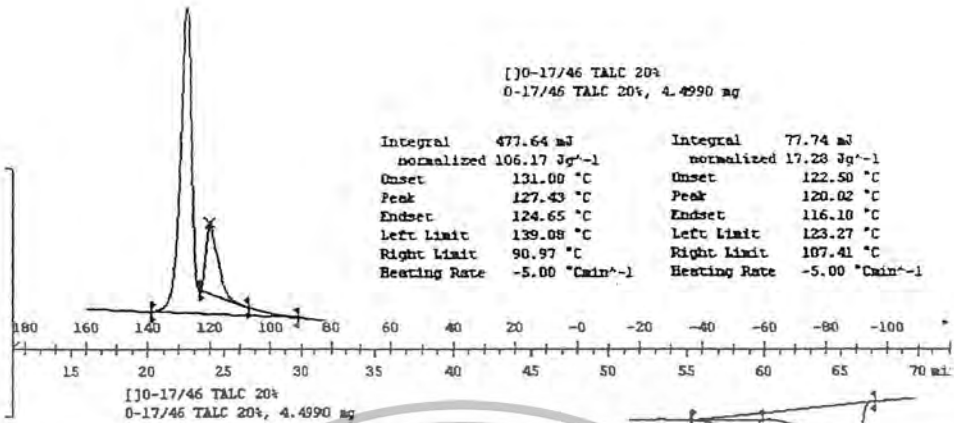
สารตัวอย่าง	ค่าจุดอ่อนตัวไวเคต			
	1	2	3	Avg
Talcum 0%	141.2	142.1	142.4	141.9
Talcum 20%	143.7	144.0	146.4	144.7
Talcum 25%	145.3	146.4	146.6	146.1
Talcum 30%	149.9	148.2	148.3	148.8
Bench mark	154.9	156.8	151.3	154.33

ภาคผนวก ค.

เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC

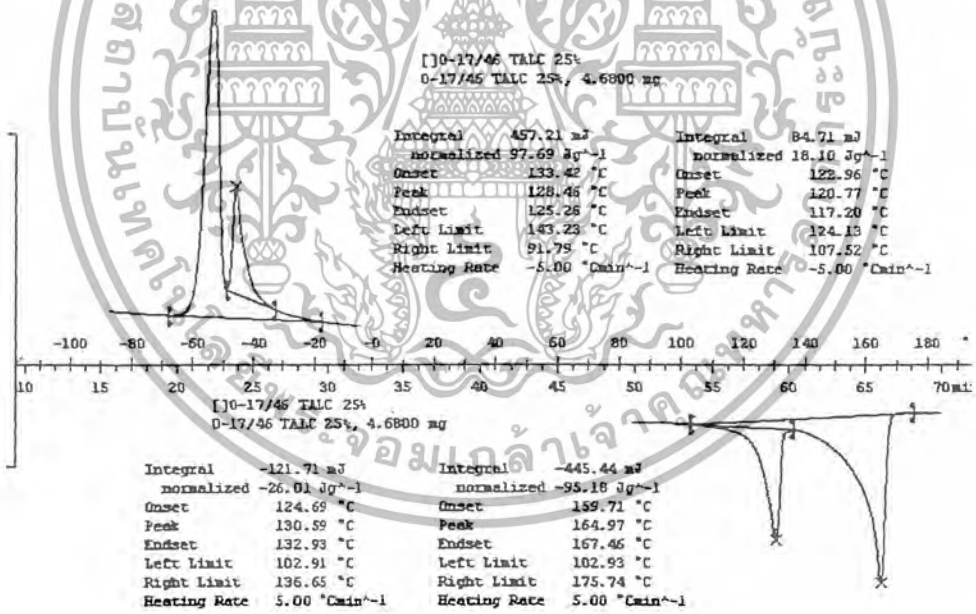


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Integral	-106.91 mJ	Integral	-438.87 mJ
normalized	-23.76 Jg ⁻¹	normalized	-97.55 Jg ⁻¹
Onset	123.71 °C	Onset	160.22 °C
Peak	130.28 °C	Peak	164.73 °C
Endset	132.92 °C	Endset	167.14 °C
Left Limit	111.52 °C	Left Limit	111.52 °C
Right Limit	134.37 °C	Right Limit	171.26 °C
Heating Rate	5.00 °Cmin ⁻¹	Heating Rate	5.00 °Cmin ⁻¹

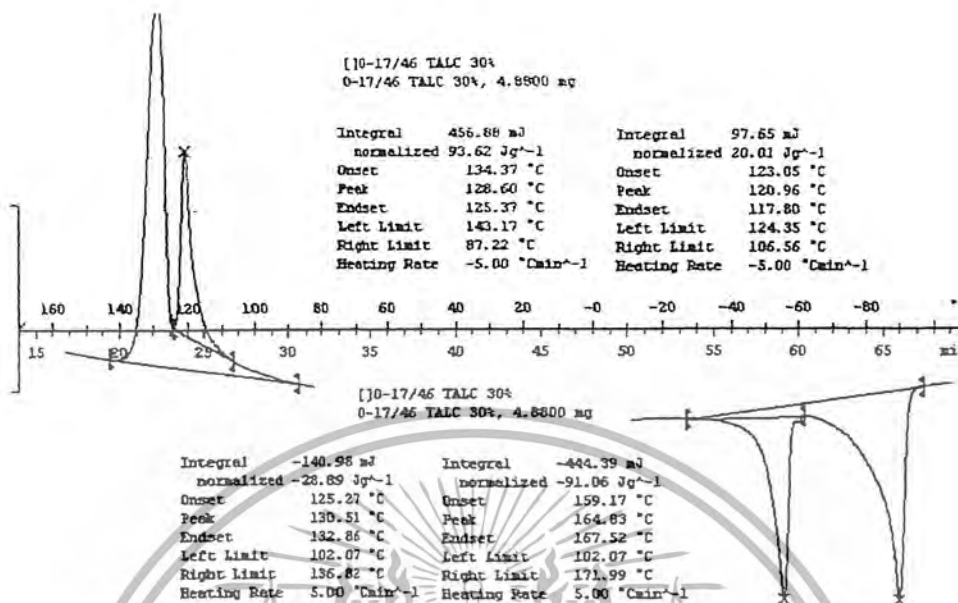
c) เทอร์โมแกรมของ Talcum 20%



Integral	-121.71 mJ	Integral	-445.44 mJ
normalized	-26.01 Jg ⁻¹	normalized	-95.18 Jg ⁻¹
Onset	124.69 °C	Onset	159.71 °C
Peak	130.59 °C	Peak	164.97 °C
Endset	132.93 °C	Endset	167.46 °C
Left Limit	102.91 °C	Left Limit	102.93 °C
Right Limit	136.65 °C	Right Limit	175.74 °C
Heating Rate	5.00 °Cmin ⁻¹	Heating Rate	5.00 °Cmin ⁻¹

d) เทอร์โมแกรมของ Talcum 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



e) เเทอร์โมแกรมของ Talcum 30%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้