

ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง  
และแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มหดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

นายสรารุท แซ่โค้ว

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF MEDIUM DENSITY POLYETHYLENE, HIGH DENSITY POLYETHYLENE  
AND CALCIUM CARBONATE ON PHYSICAL PROPERTIES OF LOW DENSITY  
POLYETHYLENE SHRINK FILM

Mr. Sarawut Saekow

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master Program in Applied Polymer Science And Textile Technology  
Department of Materials Science  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic year 2010  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
โดย	นายสรารัฐ แซ่โค้ว
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(นายอาทร วิจิตรอมรเลิศ)



## 5072664023 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY  
 KEYWORDS : DOWNGAUGING FILM / HIGH DENSITY POLYETHYLENE / LOW DENSITY  
 POLYETHYLENE / MEDIUM DENSITY POLYETHYLENE / CALCIUM CARBONATE

SARAWUT SAEKOW : EFFECTS OF MEDIUM DENSITY POLYETHYLENE,  
 HIGH DENSITY POLYETHYLENE AND CALCIUM CARBONATE ON  
 PHYSICAL PROPERTIES OF LOW DENSITY POLYETHYLENE SHRINK FILM.  
 THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SIRIWAN KITTINAOVARAT, THESIS  
 CO-ADVISOR [KANOKTHIP BOONKERD, Ph.D.], [124] pp.

The aim of this research was to study the mechanical properties of downgauging film blends between low density polyethylene (LDPE) with high density polyethylene (HDPE), medium density polyethylene (MDPE), and calcium carbonate prepared by monolayer blown film extrusion. The compositions of LDPE/HDPE and LDPE/MDPE blends were varied from 90/10, 80/20, 70/30 and 60/40 w/w., and for LDPE/CaCO<sub>3</sub> varied from 97.5/2.5, 95/5, 90/10 and 85/15 w/w. Film thickness of all blends was performed to very thin film at 50 micron compared to virgin LDPE film at 30, 50, 70, 90, and 110 micron. Thermal behavior, degree of crystallinity of these films and film properties of tensile strength, seal strength, shrink ability and haze were also investigated. From the results, higher content of HDPE tended to enhance the degree of crystallinity of blends due to their high linearity molecular structure and high density. On the other hand, the crystalline fraction value of LDPE/MDPE blends showed lower than that of virgin LDPE film for all compositions. However, tensile properties tended to increase when increasing all HDPE and MDPE contents but shrink ability tended to decrease. The results were also found that higher content of CaCO<sub>3</sub> influenced to enhance tensile and shrink ability but seal strength weren't change. These could be concluded that downgauging film of LDPE/HDPE, LDPE/MDPE blends at 70/30 w/w, and LDPE/CaCO<sub>3</sub> at 90/10 w/w, in the thickness of 50 micron had the mechanical properties both of tensile and seal strength closed to those of virgin LDPE film having the thickness of 90 micron and 70 micron respectively. Finally, it had a possibility to reduce the amount of LDPE shrink film by downgauging method while remaining the mechanical properties of film in the range of shrink film applications.

Department : Materials Science Student's Signature .....

Field of Study : Applied Polymer Science Advisor's Signature .....

and Textile Technology

Academic Year : 2010 Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูง แต่ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะ และให้ความช่วยเหลือ ในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้คำแนะนำและปรึกษาปัญหา ที่เกิดขึ้น จากงานวิจัยให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณภาควิชา วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้เอื้อ อำนวยอุปกรณ์ เครื่องมือ และ เครื่องวัดสมบัติต่างๆ ขอขอบพระคุณบริษัทพอลิเมอริท เอเซีย จำกัด ที่ได้เอื้อ อำนวยสารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองนี้ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่านที่กรุณาใช้เวลา อันมีค่า เพื่อช่วยให้คำแนะนำ และชี้ ให้มุ่งเน้นถึงจุดสำคัญของงานวิจัย เพื่อให้ได้ผลงานที่ดี มี คุณภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณครอบครัวและ เพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจให้โดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฅ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วัสดุที่นำมาใช้เป็นฟิล์มหัด.....	3
2.1.1 ฟิล์มหัด .....	3
2.1.1.1 ฟิล์มหัดพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) .....	3
2.1.1.2 ฟิล์มหัดชนิดพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) .....	6
2.1.1.3 ฟิล์มหัดชนิดพอลิเอทิลีน (Polyethylene) .....	7
2.1.2 สารเติมแต่ง (Additive) ที่ใช้ในพลาสติก .....	11
2.1.2.1 สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) .....	12
2.1.2.2 สารช่วยเพิ่มความเสถียร (Stabilizer).....	13
2.1.2.3 สารช่วยเพิ่มการหล่อลื่น (Lubricant).....	14
2.1.2.4 สารให้สี (Colorant) .....	14
2.1.2.5 สารต้านไฟฟ้าสถิต (Antistatic) .....	15
2.1.2.6 สารทำให้เกิดโฟม (Foaming agent).....	16
2.1.2.7 สารต้านการติดไฟ (Flame resistant).....	16

บทที่	หน้า
2.1.3 สารตัวเติมและสารเสริมแรง (Filler and reinforcement) ที่ใช้ในพลาสติก .....	17
2.1.3.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) .....	17
2.1.3.2 โดโลไมต์ (Dolomite).....	18
2.1.3.3 แอสเบสตอส (Asbestos).....	18
2.1.3.4 แป้ง (Talc).....	19
2.1.3.5 ดินขาว (Kaolin).....	20
2.1.3.6 ไมกา (Mica).....	20
2.1.4 กระบวนการผลิตฟิล์มหดพอลิเอทิลีน .....	20
2.1.4.1 ระบบขับเคลื่อน (Drive system) .....	21
2.1.4.2 ระบบสกรูและกระบอกลอมเหลว (Screw and barrel system) .....	22
2.1.4.3 ส่วนปลายและหัวเป่า (Head/Die system) .....	24
2.1.4.4 ระบบหล่อเย็นและตัวประกอบโป่ง (Bubble cooling and stabilization).....	26
2.1.4.5 หอบีบและหน่วยดึง (Collapsing flame and Haul-off) .....	27
2.1.4.6 หน่วยม้วนเก็บ (winder) .....	28
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	34
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง .....	34
3.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) .....	34
3.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) .....	34
3.1.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) .....	34
3.1.4 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) .....	34
3.2 กระบวนการเตรียมฟิล์มหด .....	35
3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม .....	37
3.3.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property) .....	37
3.3.2 การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) .....	38
3.3.3 การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength) .....	38
3.3.4 การทดสอบสมบัติด้านความขุ่น (Haze) .....	39



บทที่	หน้า
3.3.4 การทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (shrink ability) .....	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	41
4.1 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่าง	41
4.1.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property) .....	41
4.1.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) .....	43
4.1.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength) .....	45
4.1.4 สมบัติด้านความขุ่น(Haze) .....	46
4.1.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability) .....	46
4.2 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิด	47
ความหนาแน่นสูง .....	47
4.2.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property) .....	48
4.2.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) .....	49
4.2.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength) .....	51
4.2.4 สมบัติด้านความขุ่น(Haze) .....	52
4.2.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability) .....	53
4.3 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิด	55
ความหนาแน่นปานกลาง .....	55
4.3.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property) .....	55
4.3.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) .....	57
4.3.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength) .....	59
4.3.4 สมบัติด้านความขุ่น(Haze) .....	60
4.3.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability) .....	61
4.4 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติม	62
แคลเซียมคาร์บอเนต.....	62
4.4.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property) .....	63

บทที่	หน้า
4.4.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) .....	64
4.4.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal Strength) .....	66
4.4.4 สมบัติด้านความขุ่น(Haze) .....	67
4.4.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability) .....	68
4.5 การคำนวณ และเปรียบเทียบต้นทุนฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนผสมชนิดต่างๆ.....	70
 บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	 72
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	72
 รายการอ้างอิง .....	 73
ภาคผนวก .....	75
ภาคผนวก ก .....	76
ภาคผนวก ข .....	113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	124

## สารบัญญัตินำ

ตาราง		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอยของไวนิลคลอไรด์	5
2.2	ตัวอย่างสารต้านไฟฟ้าสถิตและปริมาณที่ใช้ในการผสมกับพอลิเมอริกชนิดต่าง ๆ ..	15
3.1	ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบต้นทุนต่อไป .....	35
3.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มหดชนิดต่าง ๆ .....	35
3.3	สูตรการผลิตฟิล์มหดที่ได้จากพอลิเอทิลีนบริสุทธิ .....	36
3.4	สูตรการผลิตฟิล์มหดที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง .....	36
3.5	สูตรการผลิตฟิล์มหดที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง .....	36
3.6	สูตรการผลิตฟิล์มหดที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต .....	37
4.1	สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นต่าง	42
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นต่าง ...	44
4.3	สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	49
4.4	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	50
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	51
4.6	ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	52



ตาราง	หน้า
4.17	66
ค่ายังสัมมูล์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับ สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	
4.18	67
ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ใ ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....	
4.19	68
ค่าความขุ่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	
4.20	69
ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความ หนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	
4.21	70
ราคาต้นทุนวัตถุดิบของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	
4.22	71
ต้นทุนที่แตกต่างของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมชนิดต่างๆที่อัตราส่วนที่ดีที่สุด.....	

## สารบัญรูปภาพ

รูป		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิไวนิลคลอไรด์.....	4
2.2	การใช้งานฟิล์มหดรพอลิไวนิลคลอไรด์ .....	4
2.3	การใช้งานฟิล์มหดรพอลิโอะเลฟิน.....	6
2.4	โครงสร้างเคมีของพอลิเอทิลีน.....	7
2.5	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	8
2.6	การใช้งานฟิล์มหดรพอลิเอทิลีน.....	8
2.7	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	9
2.8	ลักษณะลูกโป่งของฟิล์มพอลิเอทิลีนขณะทำการเป่าขึ้นรูป.....	10
2.9	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง.....	10
2.10	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	11
2.11	การแทรกตัวของสารเสริมสภาพพลาสติกตัวเพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่ โมเลกุลลดลง.....	12
2.12	ส่วนต่างๆของสกรู.....	23
2.13	การหล่อเย็นภายนอก และการหล่อเย็นร่วมแบบภายนอกและภายใน.....	26
2.14	รูปแบบชุดม้วนเก็บแบบเซอร์เฟสวายเดอร์ และเก็บวายเดอร์.....	28
2.15	ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอัดรีดแบบเป่า.....	29
3.1	การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	37
3.2	การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	38
3.3	การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของการฉีก.....	39
3.4	การทดสอบสมบัติด้านความขุ่น.....	40
3.5	การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการหดตัว.....	40
4.1	ฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นต่าง.....	41
4.2	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาร์ลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นต่างๆ.....	43

รูป	หน้า	
4.3	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ บริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆในด้านแนตามและแนวขวางเครื่องจักร .....	44
4.4	ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ บริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร.....	45
4.5	ค่าความขุ่นของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความ หนาต่างๆ.....	46
4.6	เปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร.....	47
4.7	ฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	48
4.8	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาร์ลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนผสม ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	49
4.9	ฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	55
4.10	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาร์ลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนผสม ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น ปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ.....	56
4.11	ฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับ สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	63
4.12	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาร์ลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีน ผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียม คาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ .....	64

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจัดเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานสำหรับหดรัดและห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมทางการแพทย์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มหดรพอลิเอทิลีน มีสมบัติที่ดีในด้านความใส น้ำหนักเบา ราคาถูก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีสมบัติสำคัญในด้านความสามารถในการหดรัดและความสามารถในการผนึกติดที่ดีเยี่ยม เมื่อเทียบกับพลาสติกฟิล์มชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม การนำฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไปใช้งานมีปัจจัยสำคัญหลายประการที่ต้องคำนึงถึง ประกอบด้วย ชนิดและการออกแบบของผลิตภัณฑ์ ความสามารถในการรับน้ำหนักอัตราส่วนในการหดรัดตัวทั้งในแนตั้ง และแนวนอน อุณหภูมิ และชนิดของเครื่องจักรในการนำฟิล์มหดรไปใช้งาน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความกว้างและความหนาของฟิล์มหดร โดยทั่วไปฟิล์มหดรที่มีความหนาเพิ่มขึ้น มักมีความแข็งแรง และมีสมบัติเชิงกลที่ดีมากขึ้น น้อย อย่างไรก็ตามฟิล์มที่บางกว่า สามารถช่วยประหยัดต้นทุนในการผลิตและช่วยลดปริมาณการใช้งานพลาสติกใหม่ได้มากกว่า เนื่องจากมีความยาวที่เพิ่มมากขึ้น สามารถใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ได้ในจำนวนมากขึ้น และยังช่วยประหยัดทรัพยากรธรรมชาติเนื่องจากลดปริมาณการใช้งานของวัตถุดิบลงได้ แต่มีข้อเสียคือฟิล์มที่มีความหนาลดลง จะมีสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ลดลงตามไปด้วย และอาจไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน โดยเฉพาะกรณีที่ต้องรับน้ำหนักสูงมากขึ้น ในปัจจุบันการนำฟิล์มหดรไปใช้งานมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นสิ่งที่เป็นผลตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือการมีขยะพลาสติกตกค้างในสิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก มี่งานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้พยายามศึกษาและหาแนวทางในการกำจัดและลดปริมาณขยะพลาสติกที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม เช่น การวิจัยพัฒนาโดยการนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาผ่านกระบวนการทางความร้อนใหม่อีกครั้ง หรือการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม มักพบว่าฟิล์มหดรที่ผ่านกระบวนการหลอมเหลวขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง จะมีสมบัติด้านความใสและสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพลาสติกบริสุทธิ์



อีกทั้งการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ตามสิ่งแวดล้อมมักมีข้อจำกัดในด้านความไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมฟิล์มหัด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาโดยการนำขยะพลาสติกไปผ่านกระบวนการเผาไหม้เพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า หรือการนำขยะพลาสติกไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนสภาพกลับไปอยู่ในรูปของสารตั้งต้นอีกครั้งซึ่งวิธีการนี้มีข้อจำกัดในด้านต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิตและต้นทุนของเครื่องจักรที่สูงมาก อีกทั้งปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณน้อย ทำให้ไม่คุ้มค่ากับการผลิตเพื่อนำไปใช้งานเชิงพาณิชย์ ส่งผลให้ปัจจุบันวิธีการดังกล่าวยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก

ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่จะนำเสนออีกทางเลือกหนึ่งที่น่าจะสามารถช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิตและลดปริมาณการใช้งานผลิตภัณฑ์ฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้ โดยทำการศึกษาและปรับปรุงสมบัติของฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีความหนาแน่นต่ำลง ให้มีสมบัติด้านความแข็งแรงมากขึ้น หรือเทียบเท่าฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นเดิม โดยการผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตโดยผ่านกระบวนการอัดรีดแบบเป่าชนิดสกรูเดียว โดยนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่นปกติฟิล์มหัดที่เตรียมได้จากการทดลองนี้จะนำไปวิเคราะห์ และทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ที่จำเป็นต่อการนำฟิล์มหัดไปใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ (DSC) สมบัติด้านความขุ่น ตามมาตรฐาน ASTM D1003 สมบัติด้านการทนแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D882 สมบัติด้านการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM F88 และสมบัติด้านการหดตัว ตามมาตรฐาน JIS.Z 1709

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ผลิตฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีความหนาแน่นต่ำลงแต่ยังคงมีสมบัติทางกายภาพที่ดีเปรียบเทียบกับฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีความหนาแน่นมากกว่า โดยการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนต่างๆ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุที่นำมาใช้เป็นฟิล์มหัด

##### 2.1.1 ฟิล์มหัด

พลาสติกฟิล์มโดยทั่วไปสามารถผลิตได้จากเทอร์โมพลาสติกเรซินหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานเป็นหลัก เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอไมด์ พอลิเอสเตอร์ ไอโอโนเมอร์ พอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันพบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีการผลิตเพื่อใช้งานเป็นฟิล์มหัดสูงสุด เนื่องจากมีสมบัติที่ดีและมีความเหมาะสมหลายอย่างดังที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ โดยทั่วไปพลาสติกฟิล์มที่ผลิตจากเรซินต่างชนิดกันจะมีสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของเรซินแต่ละชนิดซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างเคมี กิ่งก้านสาขาของสายโซ่โมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น

##### 2.1.1.1 ฟิล์มหัดพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

ฟิล์มหัดพอลิไวนิลคลอไรด์ ผลิตจากพอลิไวนิลคลอไรด์เรซินดังแสดงใน รูป 2.1 มักใช้สำหรับหัดห่อหุ้มสินค้าแบบซี นีเดียว เช่นฟิล์มหัดรัดฝาขวดหรือหัดรัดรอบขวดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังแสดงใน รูป 2.2 ฟิล์มหัดชนิดนี้ มีสมบัติเด่นคือมีความใสและเงามาก ทำให้สามารถมองเห็นสินค้าที่บรรจุอยู่ภายในได้ชัดเจน เพิ่มความสวยงามและดึงดูดให้กับสินค้าได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังมีความแข็งแรงและสามารถควบคุมให้มีการหดตัวได้ดีทั้งในทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงข้ามกับเครื่องจักร อย่างไรก็ตามพอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน จะปลดปล่อยสารกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ออกมาในรูปของก๊าซซึ่งมีฤทธิ์ เป็นกรดในกระบวนการเป่าขึ้น รูปฟิล์ม(Extrusion blown film) เนื่องจากมีความไวต่อความร้อนสูงมาก เกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ง่าย ทำให้ยากลำบากในขั้นตอนกระบวนการผลิตซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพ เพราะเป็นสารที่สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ ดังนั้นหลายประเทศในทวีปยุโรปจึงมีการห้ามนำเข้าหรือใช้งานฟิล์มหัดชนิดนี้

อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงอุณหภูมิในการจัดเก็บและการนำไปใช้งานด้วย ซึ่งหากอุณหภูมิสูงเกินไป จะส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะกรอบและยุ่น สมบัติเชิงกลลดลงและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ จึงไม่เป็นที่นิยมมากนักในการนำฟิล์มชนิดนี้ ไปใช้งาน[1]

พอลิไวนิลคลอไรด์ เตรียมได้จากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัวดังสมการ



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิไวนิลคลอไรด์



รูปที่ 2.2 การใช้งานฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ [2]

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันพอลิไวนิลคลอไรด์ สามารถผลิตได้ทั้งแบบบัลก์ แบบอิมัลชัน และแบบแขวนลอย ตัวอย่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชันพอลิไวนิลคลอไรด์ แบบบัลก์ เริ่มจากการใช้สารริเริ่มปฏิกิริยา AIBN (Azobisisobutyronitrile) 0.016 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยากับไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บรรยากาศภายในที่ นตอสนี้ มอนอเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพอลิเมอร์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เรียกขั้นตอนนี้ว่าพอลิเมอไรเซชัน จากนั้นสารตั้งต้นทั้งหมดนี้จะถูกส่งไปยังเตาปฏิกรณ์ (Autoclave) และทำปฏิกิริยาต่ออีกประมาณ 10-12 ชั่วโมงจนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพอลิเมอร์ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย

(Suspension polymerization) การผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยวิธีนี้ เป็นที่นิยมมากกว่ากรณีแรก โดยปฏิกิริยาเริ่มต้นจากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จากนั้น จะถูกส่งไปทำปฏิกิริยาต่อไปในเตาปฏิกรณ์ ที่มีความดันประมาณ 15 บรรยากาศ มอนอเมอร์จะเปลี่ยนเป็นหยดเล็กๆ ในน้ำ ที่มีขนาด 30 -130  $\mu\text{m}$  ในกระบวนการนี้ จะมีการกวนขณะทำปฏิกิริยาและมีการใช้สารคอลลอยด์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมอนอเมอร์เกิดการรวมตัวกัน ตัวอย่างของคอลลอยด์ป้องกัน (Protective colloids) ที่นิยมใช้คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อนุพันธ์เซลลูโลส เช่น เมทิลเซลลูโลส โซเดียมคาร์บอกซีเอทิลเซลลูโลส ฯลฯ ซึ่งอัตราส่วนของน้ำ ต่อมอนอเมอร์อาจเป็น 1.5 ถึง 1.75 เท่า และในกระบวนการพอลิเมอไรซ์จะเกิดการหดไฮโดรคลอริค เกิดขึ้นบางส่วน ดังนั้นจึงมีความจำเป็น ต้องมีการเติมเกลืออินทรีย์เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์สำหรับช่วยควบคุมค่าความเป็นกรดและต่างของส่วนผสม พอลิไวนิลคลอไรด์ ที่ได้จะมีลักษณะแข็งเปราะ ดังนั้นเมื่อนำพอลิไวนิลคลอไรด์ ไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปจึงต้องมีการเติมสารตัวเติมประเภทสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) ลงไปผสม เพื่อให้สามารถโค้งหรือดัดงอได้ง่าย มีความเหนียวมากขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น สารตัวเติมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ไดออกทิลฟทาเลต (Diocetyl phthalate, DOP) โดยทั่วไป พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็งจะมี DOP เป็นส่วนผสมไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดอ่อนจะมี DOP มากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับการนำไปใช้งานนั้น มักใช้สำหรับผลิตท่อพลาสติกสายยางพลาสติกปูพื้น เสื้อกันน้ำมัน เมาะรถยนต์ เสื้อกันฝน รองเท้าแตะ กระเป๋าละ ฉนวนหุ้มสายไฟ เป็นต้น[1]

**ตาราง 2.1** ส่วนประกอบของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอยของไวนิลคลอไรด์ (สำหรับปฏิกรณ์ขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร) [1]

ส่วนผสม	น้ำหนัก(กก.)
น้ำ	5000
ไวนิลคลอไรด์	3500
ตัวเริ่มปฏิกิริยา	1.5
คอลลอยด์ป้องกัน	3.5
บัฟเฟอร์	0.7

### 2.1.1.2 พลาสติกชนิดพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins)

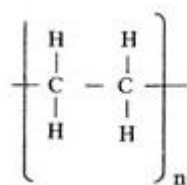
พลาสติกชนิดพอลิโอเลฟินส์หรือที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในชื่อPOF (Polyolefin) พลาสติกชนิดนี้ ได้มีการพัฒนาและผลิตขึ้น จากกระบวนการเป่าฟิล์มแบบอัดรีดร่วม ระหว่างพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน โดยสมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนจะมีความสามารถในการหดตัวดีเมื่อได้รับความร้อน สามารถขึ้นรูปได้ง่ายแต่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงมีการนำพอลิโพรพิลีนมาผสมเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทนความร้อนให้สูงขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน กระบวนการผลิตฟิล์มหด POF โดยทั่วไปจะผลิตเป็นฟิล์ม 3 ชั้น โดยชั้นนอกเป็นพอลิโพรพิลีนเพื่อความสามารถในการทนความร้อน ส่วนชั้นกลางนั้นเป็นพอลิเอทิลีนเพื่อสมบัติด้านการหดตัวที่ดี ในปัจจุบันฟิล์มชนิดนี้ เป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง มีความใสมากกว่าฟิล์มชนิดพอลิเอทิลีน แต่มีข้อจำกัดในด้านกระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยเทคนิคที่เฉพาะเจาะจงและต้องใช้เครื่องจักรที่มีเทคโนโลยีทันสมัยและมีราคาแพงในการผลิต ส่งผลให้ฟิล์มชนิดนี้ มีราคาแพงตามไปด้วย เมื่อเทียบกับฟิล์มชนิดอื่น ตัวอย่างการใช้งานของฟิล์มชนิดพอลิโอเลฟินส์ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การใช้งานฟิล์มหดพอลิโอเลฟินส์ [2]

### 2.1.1.3 พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน เป็นพลาสติกที่มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากมีข้อดีหลายอย่างเช่น มีน้ำหนักเบา ราคาถูกยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว ทนทานต่อสารเคมี และมีสมบัติเด่นคือง่ายต่อการขึ้นรูป เป็นต้น โครงสร้างเคมีของพอลิเอทิลีนแสดงดัง รูปที่ 2.4 พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนจะผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งสามารถสังเคราะห์โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization) ที่ความดันสูงถึง 120-300 MPa และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน โดยพอลิเมอไรเซชันนี้มีการผลิตเพื่อใช้ทางการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ 1930 [3]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเคมีของพอลิเอทิลีน

สายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะมีปริมาณกิ่งก้านสาขาจำนวนมาก ประกอบด้วยกิ่งขนาดสั้น (Short chain branching) ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนอะตอมน้อยกว่า 6 อะตอม และกิ่งขนาดยาว (Long chain branching) ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนอะตอมมากกว่า 6 อะตอมขึ้นไป ดังแสดงในรูป 2.5 อย่างไรก็ตามการมีกิ่งก้านสาขาในสายโซ่โมเลกุลจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการเกิดโครงสร้างผลึก ทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำ โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 0.91-0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ ) แต่มีข้อดีคือสามารถทำการผลิตเพื่อขึ้นรูปได้ง่ายกว่าพอลิเอทิลีนชนิดอื่น และมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า โดยมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 115 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใช้สำหรับเป่าขึ้นรูปฟิล์มจะมีความหนืดในระดับปานกลาง มีช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตกว้างนอกจากนี้ การที่สายโซ่โมเลกุลมีกิ่งก้านสาขาจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่จำนวนมากด้วย ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติด้านความเหนียวและความยืดหยุ่นสูง อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt strength) ขณะไหลออกจากหัวได้ ทำให้ลูกโป่งมีความเสถียรมากขึ้น ขณะทำการเป่าฟิล์ม ตัวอย่างการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไปใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.6 [4]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 2.6 การใช้งานฟิล์มหดรพอลิเอทิลีน [2]

นอกจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แล้วพอลิเอทิลีนยังประกอบไปด้วยพอลิเอทิลีนชนิดอื่นอีกมากมาย แต่ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ซึ่งสามารถนำพอลิเอทิลีนเหล่านี้ มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพให้ดีขึ้นและเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ รายละเอียดของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ สามารถกล่าวสรุปรวมได้ดังนี้ [5]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่งที่สังเคราะห์โดยใช้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีเกลอ-นัตตา กับตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาชนิดฟิลลิปส์ โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีระดับความกิ่งก้านสาขาอยู่ที่ 0.5-3.0 เมื่อเปรียบเทียบกับ 15-30 หมู่เมทิลต่อมอโนเมอร์ 500 หน่วยตามลำดับ ดังนี้ ในบางครั้ง มีการเรียกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ว่าพอลิเอทิลีนชนิดกิ่งก้าน และเรียกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ว่าพอลิเอทิลีนชนิดเส้นตรง โดยทั่วไป

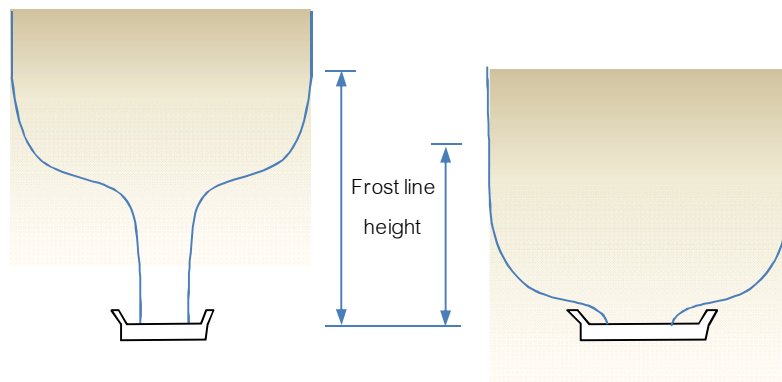
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จะมีปริมาณผลึกอยู่ที่ 70-90 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.94-0.96 กรัมต่อมิลลิเมตร คุณสมบัติในการหลอมเหลวที่ 133-138 องศาเซลเซียส และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวนอยู่ในช่วง 50,000-250,000 สมบัติทั่วไปของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จะมีความแข็งแรงต่อแรงดึงได้ดีมาก (Tensile strength) มีความแข็ง (Stiffness) มีความทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistant) และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่ข้อด้อยของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงคือ มีความต้านทานต่อการตกกระแทกต่ำ ซึ่งในรูปแบบได้ยาก ต้องใช้กำลังการขับเคลื่อนสูงในขณะทำการผลิต จึงส่งผลให้มีต้นทุนสูงตามไปด้วย และเมื่อนำมาผลิตเป็นฟิล์มจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการยับได้ง่าย เป็นต้น ตัวอย่างการนำฟิล์มชนิดนี้ไปใช้งานเช่น ใช้ผลิตเป็นก้นถุงสำหรับงานของตั้งชนิดต่างๆหรือใช้สำหรับทำถุงที่ต้องการสมบัติด้านการป้องกันการแพร่ผ่านของน้ำหรือความชื้นมากๆได้ เป็นต้น[3]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

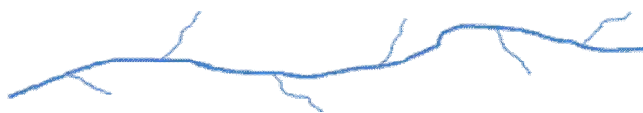
สำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จะทำได้ยากกว่ากรณีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขณะยังไม่เซตตัวต่ำกว่า ดังนั้นในการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจึงต้องใช้ระยะ Frost line height สูงขณะทำการเป่าฟิล์มเพื่อให้เกิดโครงสร้างผลึกก่อนบางส่วนหลังจากเย็นตัวลงซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ฟิล์มมากขึ้นได้ จากนั้นจึงทำการเบ่งขยายลูกโป่งฟิล์มให้ใหญ่ขึ้นตามขนาดที่ต้องการ ลักษณะลูกโป่งฟิล์มขณะทำการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแสดงดังรูปที่ 2.8 [3-4]





รูปที่ 2.8 ลักษณะลูกโป่งของฟิล์มพอลิเอทิลีนขณะทำการเป่าขึ้น รูป

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) เป็นพอลิเอทิลีนอีกชนิดหนึ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบเส้นตรง มีความเป็นกิ่งก้านสาขาน้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่มากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ดังแสดงใน รูปที่ 2.9 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.920-0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีเกลอ-นิตตาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดนี้ จะอยู่ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คือมีความสามารถในการรับแรงได้ดี มีความต้านทานต่อการตกกระแทกสูง มีความต้านทานต่อการเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงเค้น (Stress cracking) มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่น มีความแข็งแรงของการผนึกที่ดีและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย(Process ability) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จากสมบัติดังกล่าวจึงมีการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทฟิล์ม ถุง ท่อส่งก๊าซ หรือใช้ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆ ได้ด้วย [6]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่งที่ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอไรซ์ร่วมของเอทิลีนมอนอเมอร์กับแอลฟา-เอทิลีน เช่น 1-บิวทีน 1-เฮกซีน 1-ออกทีน ประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่ต่ำ

กว่าการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซีเกลอร์-นัตตา ในทางการค้าสามารถผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้สองกระบวนการคือการสังเคราะห์ด้วยเตาปฏิกรณ์แบบแก๊สซึ่งจะนิยมใช้สำหรับผลิตพอลิเมอร์ร่วมของเอทิลีนมอนอเมอร์กับ 1-บิวทีน และ 1-เฮกซีน ส่วนอีกกระบวนการหนึ่งคือการสังเคราะห์ด้วยเตาปฏิกรณ์แบบสารละลาย เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับผลิตพอลิเมอร์ร่วมของเอทิลีนมอนอเมอร์กับ 1-ออกทีน ทำให้ได้พอลิเอทิลีนที่มีความเป็นเส้นตรงมากขึ้น โดยมีกิ่งก้านขนาดสั้นลง (Short chain branching) เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจะมีความหนาแน่นในช่วงระหว่าง 0.918-0.933 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีความคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบกว่า ส่งผลให้มีความแข็งแรงต่อการฉีกขาด ความต้านทานการกระแทก ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งที่มากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [4]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

### 2.1.2 สารเติมแต่ง (Additives) ที่ใช้ในพลาสติก

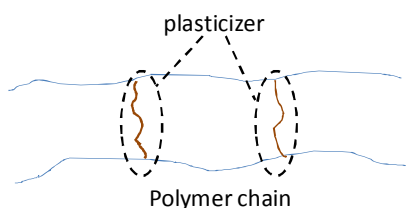
โดยทั่วไปพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์ส่วนใหญ่ยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้ทันที จำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งเข้าไปผสม เพื่อช่วยปรับปรุงให้มีสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน การเติมสารเติมแต่งในพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธีเช่น เติมขณะที่ทำการผลิตหรือสังเคราะห์ เป็นเม็ดพลาสติก หรือทำการผสมกับเม็ดพลาสติกที่สังเคราะห์ได้เพื่อทำเป็นคอมพาวนด์ เพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป และอีกวิธีหนึ่งคือการเติมขณะทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

สารเติมแต่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของสารที่ประกอบด้วยสารชนิดนี้ เพียงอย่างเดียว หรือในรูปของสารที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณสารเติมแต่งสูงกระจายตัวอยู่ในตัวพา (Carrier) เรียกรูปแบบนี้ ว่ามาสเตอร์แบตช์ (Masterbatch) ดังนั้นการเลือกชนิดสารเติมแต่งให้เหมาะกับการใช้งานจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ประโยชน์ของการเติมสารเติมแต่งมีด้วยกันหลายอย่างเช่น ช่วยให้พอลิเมอร์สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้มีลักษณะแข็งหรืออ่อนนุ่มได้ หรือช่วย

ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น เป็นต้น สารเติมแต่งที่ใช้ในพลาสติกมีหลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน รายละเอียดและชนิดของสารเติมแต่งสามารถสรุปได้ดังนี้

### 2.1.2.1 สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer)

สารในกลุ่มนี้ เป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดเดือดสูงโดยหน้าที่หลักของสารกลุ่มนี้คือ ทำให้พอลิเมอร์หรือพลาสติกแปรสภาพจากแข็งมาเป็นนุ่มและยืดหยุ่น ตัวอย่างเช่น พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกมากที่สุด เพื่อให้เหมาะแก่การนำไปใช้งาน ทั้งนี้ การเติมสารเสริมสภาพพลาสติกทำให้เพิ่มพื้นที่อิสระและทำให้สารโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนไหวระหว่างกันได้ง่ายขึ้น เมื่อได้รับความเค้นสารเสริมสภาพพลาสติกแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ กลุ่มความหนืดต่ำ (Low viscosity) และ กลุ่มความหนืดสูง (High viscosity) ในกลุ่มแรกจะมีสมบัติที่ช่วยทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวเป็นหลัก แต่กลุ่มที่สองใช้ในกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่นทนทานต่อน้ำมันเบนซินและไขมัน หรือมีการเคลื่อนที่ของสารเสริมสภาพพลาสติกได้น้อย สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดความหนืดต่ำที่รู้จักกันแพร่หลายได้แก่ ไดออกทิลฟทาเลท (Diocetylphthalate, DOP) ซึ่งเป็นสารที่สามารถแยกออกจากเนื้อพลาสติกได้ด้วยตัวทำละลาย สำหรับสารเสริมสภาพพลาสติกชนิดความหนืดสูงนั้นได้จากการรวมตัวของโมเลกุลมอนอเมอร์ หลายๆ ตัวโดยมีพอลิเอสเทอร์เป็นตัวหลัก อย่างไรก็ตามการเกาะตัวกันจะมีขนาดเล็กกว่าพอลิเมอร์ และเนื่องจากเป็นสารโมเลกุลใหญ่จึงทำให้มีคุณสมบัติด้านอื่นๆ อาทิเช่นความต้านการกระแทก ความสามารถในการรับแรงดึงดีขึ้น[7]



รูปที่ 2.11 การแทรกตัวของสารเสริมสภาพพลาสติกตัวเพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่โมเลกุลลดลง

### 2.1.2.2 สารช่วยเพิ่มความเสถียร (Stabilizer)

สารช่วยเพิ่มความเสถียรของพอลิเมอร์ (Stabilizer) เป็นสารที่ช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวหรือเสื่อมสภาพซึ่งจะส่งผลให้สมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สี และสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ลดลง สารช่วยเพิ่มความเสถียรที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้ 2 ชนิดคือ สารเสถียรความร้อน (Heat stabilizer) เป็นสารที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์เพื่อป้องกันหรือยับยั้งการเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน กลไกการทำงานของสารประเภทนี้ คือจะทำการถ่ายเทอนุมูลอิสระจากโครงสร้างพอลิเมอร์ที่เริ่มเกิดการสลายตัวมาสู่โครงสร้างของตัวมันเองเพื่อยับยั้งไม่ให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวต่อไปหรือเป็นสารที่ว่องไวต่อความร้อน เมื่อได้รับความร้อน โครงสร้างจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว ตัวอย่างของสารดังกล่าวที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น บิสฟีนอลเอ (Bisphenol-A) บิวทิลไฮดรอกซีโทลูอีน (Butylatehydroxy toluene) เป็นต้น และสารเสถียรอีกชนิดหนึ่งคือ สารเสถียรต่อรังสียูวี (UV stabilizer) เป็นสารที่มีหน้าที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต กลไกการทำงานของสารประเภทนี้ จะคล้ายกับสารเสถียรความร้อน ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่จำเป็นต้องใช้สารเพิ่มความเสถียรได้แก่พอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากมีความสามารถในการทนทานต่อความร้อนต่ำมาก ถ้าไม่มีการเติมสารเพิ่มความเสถียรจะไม่สามารถขึ้นรูปได้เมื่อพอลิไวนิลคลอไรด์ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างโมเลกุลจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนและเกิดเป็นกรดไฮโดรคลอริกซ์ uly โดยปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนนี้จะทำให้โครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์เกิดการเปลี่ยนแปลงจากพันธะเดี่ยว (Single bond) เป็นพันธะคู่ (Double bond) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำตาลเข้ม และพันธะคู่ดังกล่าวจะมีความว่องไวและสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับออกซิเจน และทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้ อย่างไรก็ตามสารเพิ่มความเสถียรมีการใช้แพร่หลายกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เพื่อป้องกันการสลายตัวทางความร้อนขณะทำการขึ้นรูปและป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดด เป็นต้น ตัวอย่างกลุ่มสารช่วยเพิ่มความเสถียรที่สำคัญได้แก่ สารประกอบของตะกั่วสบู่โลหะ (Metal soap) สารประกอบอินทรีย์ของดีบุก สารประกอบอินทรีย์ของไนโตรเจน สารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟต (Organophosphate) สารประกอบอีพอกซี (Epoxy) [7,8]

### 2.1.2.3 สารช่วยเพิ่มการหล่อลื่น (Lubricant)

สารช่วยเพิ่มการหล่อลื่น แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ ใช้สำหรับช่วยในการหล่อลื่นภายในและภายนอก สารหล่อลื่นภายในจะทำหน้าที่โดยช่วยลดการเสียดสีระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ให้น้อยลง ซึ่งช่วยให้พอลิเมอร์มีความเหนียวลดลง สารในกลุ่มนี้ อาทิเช่นสารประกอบกลีเซอรอลเอสเทอร์ชนิดมีขั้ว (Low molecular glycerinester) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆหรือสารประกอบประเภทสบู่โลหะ (Metal soap) สำหรับสารช่วยหล่อลื่นภายนอกนั้นจะไม่รวมตัวกับพอลิเมอร์โดยจะแยกตัวออกเป็นชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงและเกิดชั้นเนริเวณระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับผนังของเครื่องจักรที่สัมผัสกัน โดยสารหล่อลื่นภายนอกส่วนใหญ่จะผลิตจากขี้ผึ้ง (Wax) หรือกรดไขมัน (Fatty acid) ดังนั้นสารในกลุ่มนี้จึงเป็นสารที่ใช้เพื่อช่วยให้สามารถขึ้นรูปพลาสติกได้ง่ายขึ้น [4,7]

### 2.1.2.4 สารให้สี (Colorant)

สารสี เป็นสารเติมแต่งได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก และเป็นสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มสีสันและความสวยงามให้กับพอลิเมอร์โดยทั่วไปแล้วสารสีที่ใช้กับพอลิเมอร์จะเป็นสารสีอนินทรีย์ (Inorganic pigment) ซึ่งมีความเข้มของสีต่ำแต่จะทนทานต่อความร้อนได้ดี สารสีอนินทรีย์จะผลิตจากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันตัวอย่างเช่น สีขาวผลิตจากไททาเนียมหรือสังกะสี (Titanium, Zinc) สีเหลืองผลิตจากโครเมียมหรือนิกเกิลผสมไททาเนียม (Nickel-titanium) สีน้ำเงินผลิตจากโคบอลต์หรือแมงกานีส (Cobalt blue, manganese violet) สีแดงผลิตจากเหล็กแดง (Iron red) สีน้ำตาลผลิตจากเหล็กออกไซด์ (Iron oxide brown) สีดำผลิตจากผงคาร์บอนสีดำ (Carbon black) เป็นต้น สำหรับสารสีอินทรีย์จะมีความเข้มของสีสูงมากกว่าแต่มีความคงทนต่ำ ดังนั้นเพื่อประโยชน์ในการใช้งาน จึงมีการผสมระหว่างสีทั้งสองชนิดในปริมาณต่างๆ ตามที่ต้องการ เพื่อเพิ่มความเข้มของสี ในขณะที่เดียวกันเพื่อเพิ่มความทนทานต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงด้วย โดยทั่วไปในการใช้งานจะใช้สารสีไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในการผสมกับพอลิเมอร์เพราะสารสีมีความเข้มข้นสูงมากอยู่แล้ว การใส่สารสีเข้าไปยังพอลิเมอร์มีหลายวิธี แต่ที่มีการใช้อย่างกว้างขวางสามารถจำแนกได้ 4 วิธีคือใส่ในรูปของคอมพาวนด์ของสี (Precolored compounds) สีที่มีความเข้มข้นสูง (Color concentrates) สีที่เป็นผง (Dry color) และสีที่เป็นน้ำ (Liquid color) แต่รูปแบบคอมพาวนด์ของสีเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากใช้งานได้ง่าย สะดวก และสามารถควบคุมคุณภาพของสีได้ง่ายกว่ารูปแบบอื่น แต่มีข้อเสียบางประการคือมีราคาแพงกว่า

### 2.1.2.5 สารต้านไฟฟ้าสถิต (Antistatic)

เป็นสารเติมแต่งที่ผสมในผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์เพื่อช่วยลดความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าสถิตบนผิวของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปพอลิเมอร์มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี แต่เมื่อผิวของพอลิเมอร์เสียดสีหรือถูกับวัสดุอื่นจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตขึ้น ประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น นจตั้งดูดฝุ่น หรืออนุภาคอื่นๆเข้าหาตัวมัน หรือเมื่อเราสัมผัสประจุส่วนเกินที่เกิดขึ้น นจะเกิดความรู้สึกเหมือนไฟฟ้าดูด สารต้านไฟฟ้าสถิตเป็นสารประกอบทางเคมีที่สามารถแยกตัวออกจากนี้ ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ไปอยู่ที่ผิวเพื่อดูดซับความชื้น นจากอากาศและลดการเสียดสีของผิวผลิตภัณฑ์กับวัสดุอื่น ซึ่งเป็นตัวป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต ตัวอย่างสารต้านไฟฟ้าสถิตที่ใช้กับพลาสติกชนิดต่างๆ รวมทั้งความเข้มข้นที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 [4,7]

ตาราง 2.2 ตัวอย่างสารต้านไฟฟ้าสถิตและปริมาณที่ใช้ในการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [7]

พอลิเมอร์	สารต้านไฟฟ้าสถิต	ปริมาณที่ใช้ในการผสม (%)
PE-LD/LLD	Ethoxylated alkylamines	0.05 – 0.15
	Fatty acid ester	1.00 – 2.00
PE-HD, PP	Ethoxylated alkylamines	0.10 – 0.20
	Fatty acid ester	1.00 – 2.00
Rigid PVC	Alkylsulfonates	0.50 – 2.00
Plasticized PVC	Fatty acid esters	0.50 – 2.00
	Alkylsulfonates	0.50 – 1.50
PS	Ethoxylated alkylamines	0.50 – 1.00
	Alkylsulfonates	1.50 – 2.00
	Fatty acid esters	1.00 – 2.00
ABS	Ethoxylated alkylamines	0.50 – 1.00
	Alkylsulfonates	1.00 – 2.00

### 2.1.2.6 สารทำให้เกิดโฟม (Foaming agent)

สารทำให้เกิดโฟม เป็นสารที่เมื่อเติมลงในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดฟองก๊าซขณะที่พอลิเมอร์ ถูกหลอมเหลวในระหว่างทำการขึ้น รูป และหลังจากพอลิเมอร์เกิดการเย็นตัวฟองก๊าซที่เกิดขึ้น จะถูกกักไว้ภายในของพอลิเมอร์ และได้โครงสร้างแบบโฟม สารทำให้เกิดโฟมสามารถแบ่งตาม กลไกการเกิดฟองก๊าซได้เป็นสองแบบคือ การเกิดโฟมทางฟิสิกส์ เป็นสารที่สามารถระเหย กลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก ตัวอย่างสารที่ทำให้เกิดโฟมทางฟิสิกส์ อาทิเช่น เพนเทน (Pentane) มีอุณหภูมิกลายเป็นไอที่ 30-38 องศาเซลเซียส เฮกเซน (Hexane) มีอุณหภูมิกลายเป็น ไอที่ 60-70 องศาเซลเซียส และสารไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrochlorofluorocarbon) มีอุณหภูมิกลายเป็นไอที่ 23-47 องศาเซลเซียส และการเกิดโฟมทางเคมี สำหรับสารทำให้เกิดโฟม ทางเคมีเป็นสารที่เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิกึ่งที่อุณหภูมิต่ำ และจะทำให้เกิดก๊าซบางชนิดขึ้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซไนโตรเจน เป็นต้น สารที่ทำให้เกิดโฟมทางเคมีที่นิยม นำมาใช้ได้แก่อะโซไดคาร์บอนเอไมด์ (azodicarbonamide) [7]

### 2.1.2.7 สารต้านการติดไฟ (Flame resistant)

พอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการติดไฟที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและ ลักษณะการนำไปใช้งาน ตัวอย่างเช่นวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง ใช้สำหรับผลิตชิ้น ส่วน อุปกรณ์ในรถยนต์ เครื่องบิน และยานอวกาศ จำเป็นต้องมีข้อกำหนดเพื่อความปลอดภัยในการ ใช้งานโดยต้องเป็นพลาสติกชนิดป้องกันการติดไฟและการลามไฟ ซึ่งหลักการทำงานของสารต้าน การติดไฟที่ใช้ในการผสมกับพอลิเมอร์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ เกิดสารปกคลุมที่ผิว ของวัสดุพอลิเมอร์เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศสามารถผ่านเข้าไปในบริเวณส่วนที่เกิดการ ติดไฟได้ และมีผลโดยตรงต่อการยับยั้ง ากลไกการเผาไหม้ โดยทั่วไปสารต้านการติดไฟมักเป็น สารประกอบแฮโลเจนของคลอรีน และโบรมีน ซึ่งสารประกอบโบรมีนจะให้ผลในการต้านการติด ไฟได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังมีการใช้สารประกอบแฮโลเจนแอนโทโมเนียมไฮดรอกไซด์ (halogenantimony hydroxide) ซึ่งมีฟอสฟอรัสและอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในการช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพในการต้านการติดไฟอีกด้วย [7-8]

### 2.1.3 สารตัวเติมและสารเสริมแรง (Filler and reinforcement) ที่ใช้ในพลาสติก

สารตัวเติมหมายถึงสารที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากพอลิเมอร์ทั่วไป โดยสารตัวเติมจะช่วยเพิ่มปริมาณของเนื้อวัสดุผสมและช่วยลดต้นทุนได้ปกติจะเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีทั้งที่ไม่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ (Inert filler) และชนิดที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกว่าสารเสริมแรง (Active filler or reinforcement) โดยสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล หรือสมบัติทางกายภาพให้ดีขึ้นได้ เช่นเพิ่มความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) แรงตกกระแทก (Impact strength) และแรงดัดโค้งงอ (Flexural strength) อย่างไรก็ตามข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้สารตัวเติมและสารเสริมแรงประกอบด้วย ความสามารถในการกระจายตัวในเนื้อวัสดุพอลิเมอร์ ความสามารถในการพิมพ์สีหรือการติดกาวชนิดต่างๆ การยึดเกาะหรือเกิดพันธะกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ การเสียดสีของสารกับเครื่องจักร สมบัติของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนไปหลังการผสม ปัญหาด้านความปลอดภัย ความเป็นพิษและการกระจายตัวของฝุ่นละอองรวมทั้งต้นทุนด้านราคาเป็นต้น ในปัจจุบันการใช้สารตัวเติมและสารเสริมแรงผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มีความสำคัญและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมด้านยานอวกาศ พอลิเมอร์ที่นิยมใช้สารเสริมแรง และสารตัวเติมในการผสมมากที่สุดเรียงตามลำดับดังนี้ พอลิเอไมด์ (Polyamide) พอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) พอลิสไตรีน (Polystyrene) พอลิอโคเลต (Polyacrylates) พอลิอะซีทัล (Polyacetal) เป็นต้น ตัวอย่างของสารตัวเติมและสารเสริมแรงที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังต่อไปนี้ [7]

#### 2.1.3.1 แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )

แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งซึ่งจะพบได้ตามหินต่างๆ หรือได้จากเปลือกหอย เกิดจากการตกตะกอนของหินในทะเล เปลือกหอย และโครงกระดูกของสัตว์น้ำ แคลเซียมคาร์บอเนต มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีขนาดอนุภาคหลากหลาย แล้วแต่การนำไปใช้งาน อุตสาหกรรมหลักที่นำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิต ได้แก่ อุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์เขียน อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยาง และอุตสาหกรรมยา เป็นต้น สำหรับอุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติก มีการนำแคลเซียมคาร์บอเนตไปใช้เป็นสารตัวเติมหรือสารเสริมแรงอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังใช้เพื่อช่วยลดต้นทุนจากวัตถุดิบได้ด้วย การพิจารณาเลือกใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์นั้น ต้องพิจารณาถึงแหล่งที่มา ความบริสุทธิ์



ทางเคมี ปริมาณของสิ่งปนเปื้อน ขนาดและรูปร่างของอนุภาค รวมทั้ง ivityสัมผัสของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย โดยปกติจะต้องมีการปรับสภาพผิว หรือการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและเพื่อให้เหมาะแก่การนำไปใช้งาน โดยแคลเซียมคาร์บอเนตที่ดีต้องมีสมบัติดังนี้ [5]

- มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีโลหะหนักเจือปนซึ่งจะเป็นตัวเร่งให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพ
- มีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน
- มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ไม่ดูดซึ่มสารตัวเติมอื่นๆ
- ทนความร้อนได้ถึงประมาณ 600 องศาเซลเซียส
- มีสีขาวทึบ สามารถใช้แทนเม็ดสีขาวซึ่งมีราคาแพงได้
- สามารถใช้ร่วมกับสารสีอื่นได้ แม้จะใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณสูง
- ไม่เกิดการขัดสี หรือกัดกร่อนทำให้เครื่องจักรเสียหาย
- มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของซีเมนต์น้อย
- เพิ่มความสามารถในการทนแรงต่อแรงดึงหรือแรงตกกระแทก
- มีความเสถียรและไม่เสื่อมสภาพได้ง่าย
- ช่วยปรับปรุงผิวของซีเมนต์
- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น

### 2.1.3.2 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์ (Dolomite) เป็นสารที่อยู่ในรูปของแคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{Ca.Mg}(\text{CaCO}_3)_2$ ) มีความบริสุทธิ์สูงถึง 98-99.5 เปอร์เซ็นต์ การใช้โดโลไมต์ในการผสมกับพอลิเมอร์นั้น จะใช้ในลักษณะผงซึ่งคล้ายกับการใช้งานแคลเซียมคาร์บอเนต โดโลไมต์จะมีการกระจายตัวในเนื้อพลาสติกได้ดี และมีความขาวสูงมาก อย่างไรก็ตามเกลือแมกนีเซียมจะดูดซับน้ำได้มากกว่าเกลือแคลเซียม จึงทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้น้อยกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ โดโลไมต์ยังมีความแข็งมาก ส่งผลให้เกิดการเสียดสีได้มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเครื่องจักรได้มากกว่า [7]

### 2.1.3.3 แอสเบสทอส (Asbestos)

แอสเบสทอส เป็นกลุ่มวัสดุซิลิเกตที่เป็นเส้นใย เช่นไฮเดรตแมกนีเซียม (Hydrate Mg) และโซเดียมซิลิเกต (Na silicate) ซึ่งจะไม่กำหนดว่าเป็นวัสดุใดโดยเฉพาะ คำว่าแอสเบสทอสเป็นชื่อ

ทางการค้าซึ่งประกอบด้วยเส้นใยของสินแร่ชนิดต่างๆ มีความแข็งแรงสูง ยืดหยุ่น และมีความยาวแตกต่างกัน มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีแต่ละชนิดแตกต่างกัน เส้นใยแอสเบสตอสชนิดไม่ติดไฟจะเป็นแบบผลึกเดี่ยว และเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ภายใต้ความดันและอุณหภูมิเฉพาะค่าหนึ่ง แอสเบสตอสชนิดเส้นใยยาวจะใช้งานในลักษณะเป็นเส้นใย หรือเชือก แต่ถ้าเป็นแบบเส้นใยสั้น จะใช้ในลักษณะการเป็นสารตัวเติมหรือใช้เป็นตัวปรับความเหนียว การใช้แอสเบสตอสเป็นเส้นใยเสริมแรง มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสูง มีความเสถียรและคงรูปภายใต้อุณหภูมิสูงได้ดี มีความต้านทานต่อการยึดตัวเมื่อได้รับแรง ทนต่อสารเคมีและมีความแข็งแรงสูงและช่วยประหยัดต้นทุน แต่มีข้อเสียคือ มีผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์สูงขึ้น พอลิเมอร์ผสมจะมีสมบัติด้านความต้านทานต่อไฟฟ้าต่ำลง มีการเสียดสีสูง และทนต่อแรงดึงได้น้อย มีสีของแอสเบสตอสให้เห็นและสามารถผสมให้เข้ากับพอลิเมอร์ได้ยาก [7]

#### 2.1.3.4 แป้ง (Talc)

แป้ง (Talc) เป็นสารประเภทไฮเดรตแมกนีเซียมซิลิเกต (hydrate magnesium silicate,  $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) เกิดขึ้นในธรรมชาติซึ่งมีรูปทรงของผงอยู่ 4 ลักษณะคือ เป็นเส้นใย เป็นแผ่น เป็นทรงเข็มและเป็นแบบ modular ซึ่งรูปแบบที่มีการนำมาใช้ทางการค้ามีรูปแบบเดียวคือแบบแผ่น (lamellar) ในปัจจุบันการใช้แป้งผสมกับพอลิเมอร์จะเลือกใช้เฉพาะงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง (stiffness) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณที่เติมและความละเอียดของผงรวมทั้งส่วนผสมทางเคมีของแป้งด้วยการผสมแป้งลงในพอลิเมอร์จะส่งผลให้สมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป เช่น เพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว และความยืดหยุ่นได้ ลดการยึดตัวของวัสดุผสมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น มีความคงรูปมากขึ้น ลดการหดตัวและบิดงอ ทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความชื้นลดลง เป็นตัวนำความร้อนที่ดีและเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวของชิ้นงาน แต่ก็มีข้อเสียคือ ความต้านทานต่อการตกกระแทกลดลง มีความเปราะมากขึ้น ลดอัตราการไหลของพอลิเมอร์ผสม ลดความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน ทำให้เขตสีเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสีของแป้ง ไม่เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ต้องสัมผัสกับอาหาร เนื่องจากมีโลหะหนักผสมอยู่ซึ่งหากต้องการทำให้เป็นวัสดุบริสุทธิ์จะมีค่าใช้จ่ายสูงเป็นต้น [7]

### 2.1.3.5 ดินขาว (Kaolin)

ดินขาวพบมีอยู่ในธรรมชาติจำนวนมากในทุกพื้นที่ของโลก แต่หาที่มีความบริสุทธิ์ได้ยาก บางครั้งเราจะเรียกว่าดินเคลือบ (Porcelain earth) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทไฮเดรตอลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrate aluminium silicate,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) โดยปกติแล้วสารประเภทนี้ จะมีความขาวสูง ไม่นำไฟฟ้า ทนต่อสารเคมีที่เป็นกรดแก่ได้ดีในพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้เป็นสารตัวเติม เช่นพลาสติกหุ้มสายไฟเนื่องจากมีสมบัติด้านการเป็นฉนวนที่ดี เพิ่มความสามารถในการทนทานต่อสารเคมี ลดการดูดซับน้ำ ช่วยลดการแตกร้าวของวัสดุ ทำให้สามารถรับแรงตกกระแทกได้ดี ยิ่งขึ้นทำให้ผิวของชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่เนื่องจากดินขาวมีการกระจายตัวในเนื้อพลาสติกที่ไม่ดีนัก การนำไปใช้งานจึงต้องมีการเคลือบผิวด้วยซิลเลน (Silane) ก่อนเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวให้ดียิ่งขึ้น [7]

### 2.1.3.6 ไมกา (Mica)

ไมกาเป็นสินแร่ที่มีองค์ประกอบคือ muscovite- $\text{K}_2 \text{Al}_4 (\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{20}) (\text{OH})_4$  หรือ phlogopite- $\text{K}_2 (\text{MgFe(II)})_6 (\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{20}) (\text{OH}, \text{F})_4$  มีความหนาแน่น 2.8 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถดูดซับน้ำมันได้ดีส่วนใหญ่จะใช้เป็นสารตัวเติม และสารเสริมแรง ซึ่งจะช่วยให้สมบัติของพอลิเมอร์เช่น ความแข็ง (Stiffness) ความคงรูปและความเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ขึ้น การใช้งานไมกาในพอลิเมอร์จะต้องทำการเคลือบผิวด้วยซิลเลน (Silane) เพราะจะช่วยให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในอุตสาหกรรมมักใช้ไมกาผสมกับใยแก้วสำหรับผลิตชิ้นส่วนที่ทำด้วยพอลิโพรพิลีน [7]

### 2.1.4 กระบวนการผลิตฟิล์มหดพอลิเอทิลีน

ฟิล์มหดพอลิเอทิลีน สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่า (Extrusion Blown Film) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตฟิล์มพลาสติกรูปแบบต่างๆ นอกเหนือจากฟิล์มหดแล้ว กระบวนการอัดรีดแบบเป่ายังสามารถใช้ผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ฟิล์มยืด ฟิล์มหุ้มพาเลท และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อีกด้วย กระบวนการอัดรีดแบบเป่าสามารถผลิตฟิล์มของพอลิเมอร์ได้หลายชนิด เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอไมด์ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นต้น จัดว่าเป็น

กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกที่มีความหลากหลายเป็นอย่างมาก จึงได้มีการค้นคว้าวิจัย ปรับปรุง และพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้มีความทันสมัยมากยิ่งขึ้น อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถตอบสนอง ความต้องการในการผลิตฟิล์มที่มีความหลากหลายในเรื่องคุณภาพวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต สมบัติ ของฟิล์มทั้งทางกายภาพและทางเคมี เพื่อให้ได้ฟิล์มพลาสติกที่ตรงตามความต้องการของการ นำไปใช้งาน เครื่องอัดรีดฟิล์มแบบเป่า นั้น มีองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้ คือ

#### 2.1.4.1 ระบบขับเคลื่อน (Drive system)

ระบบขับเคลื่อนนี้ จะทำหน้าที่ในการให้พลังงานกลด้วยการหมุนสกรูโดยจะประกอบด้วย ส่วนของมอเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้สำหรับขับให้สกรูเกิดการหมุนโดยใช้พลังงานไฟฟ้า แรงกลที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการไหลของเม็ดพอลิ เมอร์ในกระบอก มอเตอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้จะเป็นแบบมอเตอร์ไฟฟ้ามากกว่ามอเตอร์ระบบไฮดรอลิก ซึ่งมักใช้กับเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์เพื่อลดปัญหาเรื่องการไหลที่ไม่สม่ำเสมอของเนื้อ พลาสติกในแต่ละครั้งของการฉีดมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้จะมีทั้งแบบที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง(DC) และใช้ ไฟฟ้ากระแสสลับ(AC) ในปัจจุบันนี้ ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ให้ มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด โดยใช้หลักการควบคุมความถี่ของกระแสไฟที่เข้า (Frequency control) และแปลงค่าเป็นพลังงานอีกครั้งซึ่งเรียกระบบนี้ว่า ระบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter control system) อย่างไรก็ตามการหมุนของมอเตอร์เป็นการหมุนที่มีความเร็วรอบสูง (สามารถหมุนได้ สูงสุดถึง 2000 รอบ/นาที) จึงไม่สามารถส่งผ่านรอบการหมุนนั้นให้กับสกรูได้โดยตรงเพราะการ หมุนสกรูที่ความเร็วสูงๆจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนในปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการ หลอมเหลวและเกิดการเสื่อมสภาพได้ จึงต้องมีการต่อฟุ้งชุดของมอเตอร์เข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวลดความเร็วหรือชุดเกียร์ โดยตัวลดความเร็วจะทำหน้าที่แปลงความเร็วรอบของการหมุนของ มอเตอร์ให้เหมาะแก่การหมุนของสกรูอีกครั้ง ตัวลดความเร็วโดยทั่วไปจะมีอัตราการลดอยู่ที่ 10:1 จนถึง 20:1 นอกจากนี้ ปลายสกรูของชุดอัดรีดยังต้องมีการต่อเชื่อมกับชุดเกียร์ที่เรียกว่าลูกปืน เชื่อมต่อ (Thrust bearing) ซึ่งทำหน้าที่รับแรงที่กระทำกลับมาเนื่องจากความดันย้อนกลับที่เกิดจาก พอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบอกฉีด สามารถช่วยให้สกรูหมุนได้อย่างอิสระ และช่วยลดแรงเสียดทาน ตรงบริเวณรอยต่อที่เกิดจากความดันที่ปลายของสกรู หากไม่มีอุปกรณ์ตัวนี้เชื่อมอยู่จะไม่สามารถ ขับให้สกรูเกิดการหมุนได้เนื่องจากความดันย้อนกลับที่เกิดจากหมุนมีสูงมากนั่นเอง [4]

#### 2.1.4.2 ระบบสกรูและกระบอกลอมเหลว (Screw and barrel system)

ระบบสกรูและกระบอกลอมเหลวถือได้ว่าเป็นหัวใจของกระบวนการอัดรีดฟิล์มด้วยการเป่า เพราะทำหน้าที่ในการหลอมเหลวพลาสติกที่เป็นของแข็งให้เป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวและป้อนส่งต่อไปยังหัวไดค์ หลังจากรับวัตถุดิบมาจากส่วนของระบบลำเลียงที่เรียกว่า Hopper ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับกักเก็บวัตถุดิบที่เป็นของแข็งก่อนลำเลียงสู่กระบอกลอม ระบบสกรูและกระบอกลอมเหลวนี้อาจทำหน้าที่ในการทำให้ส่วนผสมมีความเป็นเอกภาพ (Homogeneous) และทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีอุณหภูมิและความดันที่เท่ากันตลอดทุกช่วงในขณะทำการผลิต ทั้งนี้ เนื่องจากความเบี่ยงเบนหรือความแปรปรวนของอุณหภูมิและความดันจะมีผลอย่างมากต่อสมบัติของฟิล์มที่ได้ ในส่วนของสกรูจะเป็นท่อนเหล็กยาวที่มีการทำเกลียวโดยรอบด้านนอก เรียกเกลียวนี้ว่าฟันสกรู โดยทั่วไปสกรูจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนของส่วนพา (Feeding zone) ซึ่งทำหน้าที่ในการลำเลียงเม็ดพลาสติกเข้าสู่ส่วนถัดไป โดยพอลิเมอร์จะต้องไม่เกิดการหลอมเหลวในส่วนนี้เพื่อให้สามารถลำเลียงไปได้ในปริมาณมาก ส่วนที่สองคือส่วนบีบอัด (Transition zone หรือ Compression zone) ในส่วนนี้ เป็นส่วนที่ทำการหลอมเหลวเม็ดพลาสติกจากที่เป็นก้อนแข็งให้เป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยอาศัยความร้อนที่ได้รับจากตัวให้ความร้อน (Heater) ร่วมกับความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับผนังของกระบอกลอม และความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างพอลิเมอร์ด้วยกันเองส่วนสุดท้ายคือส่วนการผสม (Metering zone) ซึ่งทำหน้าที่ผสมพลาสติกหรือสารเติมแต่งที่เป็นองค์ประกอบทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจากการทำหน้าที่ๆ แตกต่างกัน ดังนั้น ในการออกแบบสกรูจึงต้องมีความลึกของช่องฟันสกรู (Channel depth) ไม่เท่ากัน โดยในส่วนพา (Feeding zone) จะมีขนาดความลึกของช่องฟันสกรูมากที่สุดเพื่อเพิ่มความสามารถในการลำเลียงวัตถุดิบและในส่วนบีบอัด (Compression zone) จะมีช่องฟันสกรูที่ค่อยๆ เล็กลงเพื่อเพิ่มแรงเฉือนให้สูงขึ้นและทำให้เกิดการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ สำหรับส่วนผสม (Metering zone) ฟันสกรูจะมีความลึกน้อยสุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการหลอมเหลวเกิดการไหม้เป็นต้น ปริมาณการบีบอัดของสกรูสามารถหาได้ในรูปของอัตราส่วนการบีบอัด (Compression ratio) ดังแสดงในสมการดังนี้

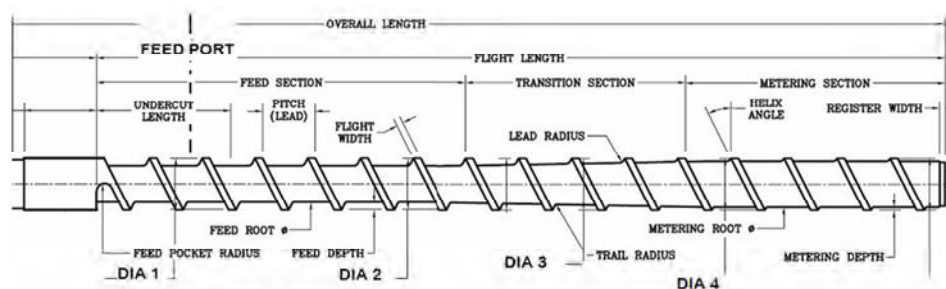
$$\text{อัตราส่วนการบีบอัด (compression ratio)} = \text{ความลึกของช่อง feed} / \text{ความลึกของช่อง metering}$$

ค่าอัตราการบีบอัด (Compression ratio) จะอยู่ในช่วง 2:1 ถึง 4:1 ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาแน่นมวลรวม (Bulk density) ของพลาสติกที่ใช้ และในสวนประสิทธิภาพหรือความสามารถของสกรูสามารถวัดได้ด้วยค่าอัตราส่วน  $L/D$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่แสดงข้างล่างนี้

อัตราส่วน  $L/D =$  ความยาวของสกรู (screw flight length) / เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (screw diameter)

สกรูโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอัตราส่วน  $L/D$  อยู่ในช่วง 18:1 ถึง 32:1 และสกรูที่ดีจะต้องมีระยะ หรือช่องว่างระหว่างสกรูกับกระบอกสูบน้อยปัจจุบันการออกแบบสกรูให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีจะใช้ช่องอยู่ที่ 0.1% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู เช่นสกรูขนาด 4 นิ้ว จะมีช่องว่างระหว่างระหว่างสกรูและกระบอกหลอดมเหลวที่ 0.004 นิ้ว เป็นต้นถ้าหากทำให้ช่องว่างมีขนาดเล็กกว่านี้ จะส่งผลให้เกิดการเสียดสีมากบริเวณปลายของสกรู จะทำให้สกรูและกระบอกหลอดมเหลวสึกกร่อนเร็ว และเป็นอันตรายต่อเครื่องจักร และถ้าหากช่องว่างระหว่างกระบอกกับสกรูมีขนาดที่กว้างมากขึ้นก็จะส่งผลให้กำลังการขับ และประสิทธิภาพในการหลอมเหลวของสกรูลดลง แต่สำหรับอัตราส่วน  $L/D$  ที่ใช้สำหรับการอัดรีดพอลิเอทิลีน 25:1 ถึง 30:1 [8]

สกรูโดยทั่วไปจะทำจากเหล็กเบอร์ 4140 เป็นโลหะผสมที่มีความแข็ง สามารถทนการกัดกร่อนได้ดี ทนอุณหภูมิสูงได้ และจะต้องมีการเคลือบสกรูและฟันของสกรู ด้วยโลหะแข็ง เพื่อเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานของสกรู สกรูที่ดีจะต้องทำหน้าที่เป็นส่วนกลางที่สำคัญในการส่งผ่านความร้อนที่ผิวของสกรู ทั้งนี้ เพราะว่ 50% ของพื้นที่ผิวสัมผัสของเม็ดพลาสติกจะเกิดที่สกรูซึ่งความร้อนที่ให้แก่เม็ดพลาสติกจะเกิดบริเวณด้านนอกของกระบอกสูบ ในส่วนที่ลึกลงไปเข้าใกล้บริเวณผิวของสกรูจึงต้องอาศัยสกรูเพื่อเป็นตัวช่วยในการส่งผ่านความร้อน ทำให้การหลอมเหลวพลาสติกเกิดได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบต่างๆ ของสกรู [3]

กระบอกลูกสูบ (Barrel) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกลูกสูบที่มีความยาวเท่ากับระยะระหว่าง Feed throat ถึง ปลายสุดของสกรู ในส่วนสุดท้ายของกระบอกลูกสูบจะเรียกว่าเป็นส่วนหัว โดยด้านในของกระบอกลูกสูบจะมีการเคลือบด้วยโลหะที่มีความแข็งแรงมาก เช่นโลหะผสมทังสเตน-คาร์ไบด์อัลลอยด์ (Tungsten-carbide alloy) ซึ่งการเคลือบผิวนี้ จะเป็นการช่วยลดการเกิดการเสียดสี ทำให้อายุการใช้งานของกระบอกลูกสูบยาวนานขึ้น และเพื่อต้องการลดการเสียดสีของกระบอกลูกสูบกับสกรูในการต่อกระบอกลูกสูบเข้ากับชุดเกียร์ที่ขับสกรูจะต้องมีการวัดระบบให้มีความเป็นระนาบเดียวกันมากที่สุด ดังนั้นในการติดตั้งจึงมีการใช้เลเซอร์เป็นอุปกรณ์ช่วยในการวัดระบบ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการติดตั้ง ด้านนอกของกระบอกลูกสูบจะมีการติดตั้งตัวให้ความร้อนตลอดความยาวของกระบอกลูกสูบ ซึ่งจำนวนของตัวให้ความร้อนก็จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความยาวของกระบอกลูกสูบ โดยทั่วไปแล้วตัวให้ความร้อน 1 ชุดสามารถควบคุมได้ระยะประมาณ 4-5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง เช่น สกรูขนาด 4 นิ้ว ตัวให้ความร้อน 1 ชุดสามารถควบคุมได้ระยะทาง 16-20 นิ้ว เป็นต้นตัวให้ความร้อนมีหลากหลายชนิด อาทิเช่น ชนิดอะลูมิเนียม ชนิดเซรามิก และชนิดอินฟราเรด เป็นต้น ในส่วนปลายของกระบอกลูกสูบมีการเจาะเป็นรูเอาไว้ และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่เรียกว่ารัปเจอร์ดิส (Rupture disk) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่สำคัญมาก เมื่อเกิดความดันที่ปลายกระบอกลูกสูบมากเกินไปจะยอมรับได้ อุปกรณ์ตัวนี้ ก็จะหลุดออกและพลาสติกหลอมเหลวก็จะไหลออกทางรูที่เจาะไว้ เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายเนื่องจากความดันที่สูงเกินไป อุปกรณ์ตัวนี้ จะติดอยู่ด้านใต้ของกระบอกลูกสูบที่ตำแหน่งหกนาฬิกา กระบอกลูกสูบทั่วไปจะใช้งานที่ความดันมากกว่า 5000 ปอนด์/ตารางนิ้ว แต่กระบอกลูกสูบถูกออกแบบมาให้สามารถทนความดันได้สูงสุดที่ 10,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว ดังนั้นอุปกรณ์ Rupture disk จึงถูกออกแบบให้สามารถทนความดันได้ในช่วง 7,000-9,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกัน [4]

### 2.1.4.3 ส่วนปลายและหัวเป่า (Head/Die system)

เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับกระบอกลูกสูบเพื่อรับพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้ามาและส่งต่อไปยังหัวเป่า จนได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมา ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

ส่วนเชื่อมต่อ (Adapter) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างกระบอกลูกสูบกับหัวเป่า ทำหน้าที่ในการลำเลียงพอลิเมอร์หลอมเหลวจากกระบอกลูกสูบให้ผ่านเข้าหัวเป่าในปริมาณและความเร็วที่เหมาะสม โดยส่วนปลายของส่วนเชื่อมต่อ (Adapter) จะต่ออยู่กับหัวฉีด (Nozzle)

ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับช่องหัวเป่า และสามารถต่อเข้ากับส่วนเชื่อมต่อได้อย่างพอดี โดยทั่วไปแล้ว เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ดีที่สุดควรมีชุดควบคุมอุณหภูมิแยกออกเป็นสองส่วน (ส่วนของส่วนเชื่อมต่อ และส่วนของหัวฉีด) แต่ถ้าหากระยะของหัวฉีดไม่ยาวมากเราสามารถใส่ชุดควบคุมอุณหภูมิเพียงชุดเดียวได้

เบรกเกอร์เพลท (Breaker plate) เป็นแผ่นเหล็กที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยเจาะรูตลอดทั้งแผ่นเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลผ่านไปได้ โดยทั่วไปแล้วจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูเล็กน้อย และจะติดอยู่ตรงปลายสุดของกระบอกลอมเหลว โดยเบรกเกอร์เพลท จะมีหน้าที่หลักอยู่ 3 ประการคือ เป็นตัวซีลบริเวณปลายของกระบอกลอมเหลว เป็นตัวที่ใช้ยึดสกรีนแพ็ค (Screen pack) และเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยปรับให้กระแสพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเป็นแบบเส้นตรงและมีทิศทางในการไหลไปทางเดียวกัน เพื่อให้ไหลเข้าสู่หัวเป่าได้อย่างต่อเนื่อง

ตัวกรอง (Melt filter) การกรองเป็นสิ่งที่จะต้องเป็นอย่างมากเพราะเป็นการป้องกันและตัดแยกไม่ให้สิ่งปนเปื้อน หรือเจลหลุดเข้าไปสู่ส่วนของหัวเป่า สิ่งปนเปื้อนสามารถปนเปื้อนเข้าไปในพอลิเมอร์หลอมเหลวได้หลายช่องทาง เช่น อาจมีฝุ่นผงปนเปื้อนขณะทำการลำเลียงเม็ดพลาสติกเข้าสู่กระบอกลอมเหลวเป็นต้น ส่วนเจล หรืออาจเรียกได้อีกอย่างว่าตาปลา (Fish eye) มีลักษณะเป็นฟองอากาศเล็กๆ หรือเป็นจุดใหญ่ที่เห็นชัดเจนก็ได้ ซึ่งสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่นเจลที่เกิดจากส่วนของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นเจลที่เกิดจากหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ จุดไหม้ (Hot spot) เป็นเจลที่เกิดจากการได้รับความร้อนมากเกินไปจากกระบอกลอมเหลว หรือเจลที่เกิดจากการจับความชื้นของพอลิเมอร์เป็นต้น ตัวกรองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ สกรีนแพ็ค (Screen pack) สกรีนเซนเจอร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous screen changer) และสกรีนเซนเจอร์แบบต่อเนื่อง (Continuous screen changer) แบบที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย คือแบบสกรีนแพ็ค โดยปกติแล้วสกรีนแพ็คจะประกอบด้วยแผ่นตะแกรงขนาดต่างกันจำนวน 3-5 แผ่นเรียงซ้อนกัน และสอดไว้ในช่องว่างด้านหน้าเบรกเกอร์เพลท ขนาดของตะแกรงที่ใช้จะมีหน่วยเป็นเมช (Mesh) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ทำการขึ้น รูป

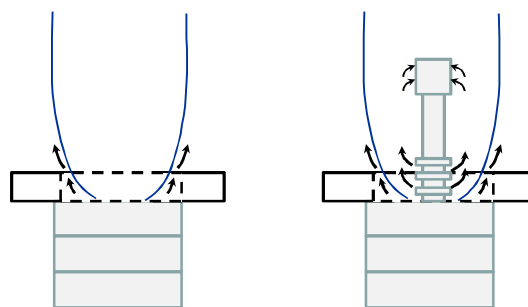
หัวเป่า (Die) จัดเป็นส่วนที่ถือว่าเป็นหัวใจของการผลิต เนื่องจากรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้น อยู่กับการฟอร์มตัวขณะหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ภายในหัวเป่าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิดเพื่อความหลากหลายในการผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีรูปทรง และประสิทธิภาพในการผลิตตามที่ต้องการ แต่อย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงเป็นพื้นฐานของหัวเป่าทุกประเภทคือ การออกแบบให้มีการไหลภายในหัวเป่า และการไหลเข้าออกของพอลิเมอร์หลอมเหลว



ที่เหมาะสม บริเวณผิวและช่องการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นบริเวณที่สำคัญมากไม่ควรให้เกิดรอยขีดข่วน หรือร่อง เพราะจะก่อให้เกิดการตกค้างของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในหัวเป่าอันส่งผลให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ได้ และพอลิเมอร์ที่สลายตัวอาจหลุดติดมาที่ผิวของชิ้นงานได้ ดังนั้นในการผลิตทำความสะอาดหัวเป่าจึงควรต้องทำอย่างระมัดระวัง และใช้วัสดุที่มีความอ่อนกว่า เช่น ทองเหลือง หรือทองแดงทำความสะอาดหัวเป่าเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยขีดข่วนที่ผิวได้[4]

#### 2.1.4.4 ระบบหล่อเย็นและตัวประกอบโป่ง (Bubble cooling and stabilization)

ระบบหล่อเย็น (Bubble cooling) กระบวนการอัดรีดแบบเป่าจะมีระบบหล่อเย็นโดยการใช้ลมแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผิวของฟิล์มพลาสติกที่ผ่านออกมาจากหัวเป่า อาจเป็นการหล่อเย็นเฉพาะด้านนอกของฟิล์มพลาสติกอย่างเดียว หรืออาจมีการหล่อเย็นร่วมกันทั้งภายนอกและภายในฟิล์มพลาสติกโดยใช้อุปกรณ์หล่อเย็นภายในที่เรียกว่า ไอบิซี (IBC : Internal Bubble Cooling) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยทั่วไปแล้วฟิล์มพลาสติกที่ได้จะเริ่มมีการเย็นตัวลงเมื่อได้รับการแลกเปลี่ยนความร้อนจากจานลม และจะค่อยๆ เย็นตัวอย่างช้าๆ หลังจากผ่านจานลมไปแล้ว ดังนั้นประสิทธิภาพในการหล่อเย็นจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของลมที่ใช้



รูปที่ 2.13 การหล่อเย็นภายนอก และการหล่อเย็นร่วมแบบภายนอกและภายใน

พอลิเอทิลีน มีค่าความร้อนจำเพาะอยู่ที่ 1.8-2.5 กิโลจูลต่อองศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีค่าความร้อนจำเพาะอยู่ในช่วง 0.9-1.5 กิโลจูลต่อองศาเซลเซียส ทำให้มีแนวโน้มที่จะกักเก็บความร้อนได้มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ดังนั้นในกระบวนการอัดรีดแบบเป่าพอลิเอทิลีนจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดรีดที่มีความสูงของเครื่องมากขึ้น เพื่อให้สามารถเกิดการถ่ายเทความร้อนได้เพียงพอก่อนผ่านลูกกลิ้ง ดึง (Nip roll) และไม่ก่อให้เกิดการติดกันของฟิล์มทั้งสองแผ่น อัตราการหล่อเย็นฟิล์มพลาสติก ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่จะใช้บอกถึงความสามารถในการ

ซึ่ง นรูปร่าง(Capacity) ของเครื่องอัดรีดแบบเป่า ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ความเร็ว และความถี่ ของลมที่ใช้ การออกแบบและชนิดของจานลมที่ใช้ ดังนั้น ในการเลือกใช้เครื่องอัดรีดแบบเป่าในเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวด้วย[4]

ตัวประกอบโป่ง (Bubble stabilization) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการประกอบฟิล์มพลาสติกที่ผ่านการหล่อเย็นมาแล้วไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ (Dancing) อันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมภายนอก เพราะถ้าฟิล์มพลาสติกเกิดการเคลื่อนที่จะทำให้ความหนาของฟิล์มที่ได้ไม่สม่ำเสมอ แต่การใช้ตัวประกอบโป่งต้องเลือกให้เหมาะสม และไม่ก่อให้เกิดรอยขีดข่วนบนผิวฟิล์มปัจจุบันตัวประกอบโป่งที่นิยมใช้ส่วนมากทำจากพลาสติกเคลือบด้วยเทฟลอน

#### 2.1.4.5 หอบีบและหน่วยดึง (Collapsing flame and Haul-off)

หอบีบ (Collapsing flame) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่บีบฟิล์มพลาสติกที่เคลื่อนที่ขึ้นมาจากด้านล่างให้มีลักษณะเกือบเรียบเป็นแผ่น (Preflattened) ก่อนที่จะเข้าสู่ลูกกลิ้งหนีบ(Nip roll) ชนิดของหอบีบฟิล์มมีหลายชนิด เช่น แฉงไม้ (Wooden slats) ลูกกลิ้งโลหะ(Metal roller) ลูกกลิ้งเคลือบเทฟลอน (Teflon-coated roller) หอบีบฟิล์มต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อลดปัญหาการเกิดรอยยับบริเวณขอบฟิล์ม

หน่วยดึง (Haul-off) เป็นส่วนที่อยู่ด้านบนบนสุดของเครื่องอัดรีดแบบเป่าทำหน้าที่ดึงฟิล์มพลาสติกที่ออกจากหัวเป่าให้เคลื่อนที่ผ่านส่วนต่างๆของเครื่องไปยังชุดม้วนเก็บ และเป็นส่วนที่หนีบเพื่อกักลมให้อยู่ภายในฟิล์มพลาสติก ซึ่งจะทำให้ได้ฟิล์มพลาสติกที่มีขนาดและความหนาสม่ำเสมอตลอดการผลิต และหน้าที่ที่สำคัญประการหนึ่งคือ เป็นส่วนที่ควบคุมความหนา-บางและความสูงของการเกิดผลึก (Frost-line height) โดยการควบคุมอัตราเร็วในการดึง(Nip speed)

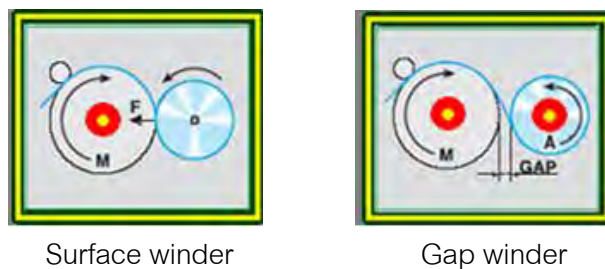
ในส่วนนี้ จะประกอบด้วยลูกกลิ้ง สองลูก(Nip roll) โดยลูกกลิ้ง ลูกที่หนึ่งเป็นลูกกลิ้งเหล็กที่ถูกยึดให้อยู่กับที่และมีมอเตอร์ขับให้หมุน สามารถปรับความเร็วในการหมุนได้ ส่วนลูกกลิ้ง ลูกที่สองเป็นลูกกลิ้ง ที่เคลือบด้วยยาง สามารถเคลื่อนที่ออกห่าง และเข้าใกล้ลูกกลิ้ง ลูกที่หนึ่งได้โดยการใช้ลม เพื่อป้องกันไม่ให้ก้อนพลาสติกแข็งขนาดใหญ่ที่เกิดตอนเริ่มเดินเครื่องชนหรือกระแทก ลูกกลิ้ง ลูกที่หนึ่งและอาจทำให้เป็นรอยได้ [4]

#### 2.1.4.6 หน่วยม้วนเก็บ (Winder)

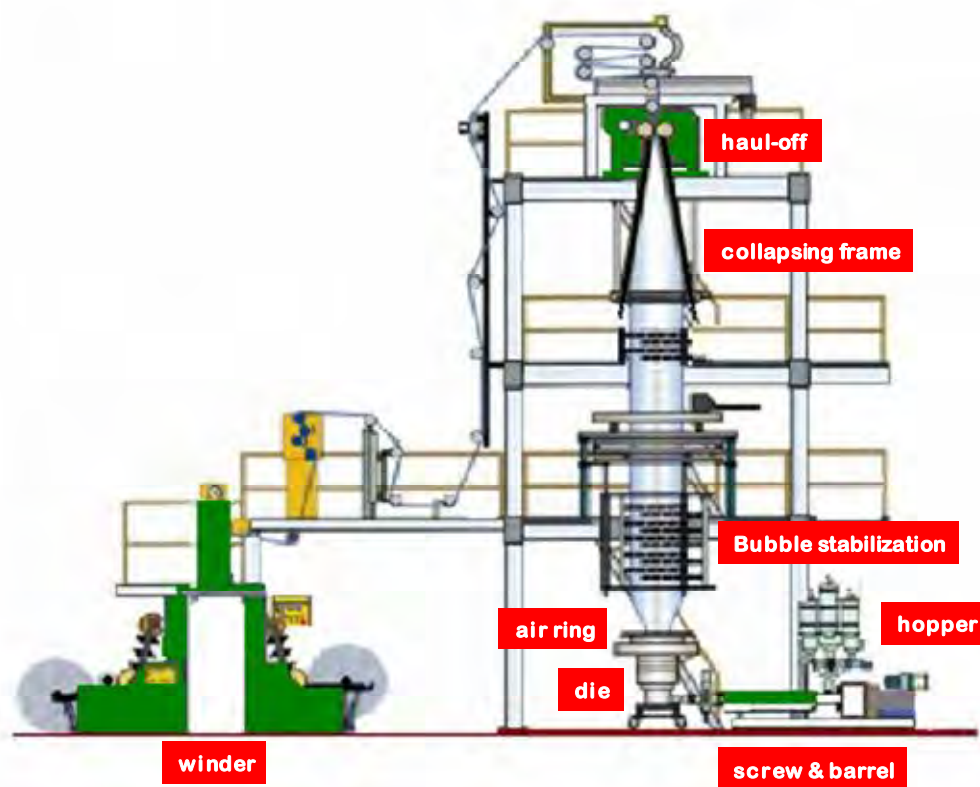
เป็นส่วนสุดท้ายของเครื่องอัดรีดแบบเป่า ที่ทำหน้าที่ม้วนเก็บฟิล์มพลาสติกที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยให้ความตึง (Tension) ที่สม่ำเสมอตลอดม้วน โดยม้วนเก็บที่อัตราเร็วคงที่ หน่วยม้วนเก็บสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ เซอร์เฟสวายเดอร์ (Surface winder) และแก๊บวายเดอร์ (Gap winder)

เซอร์เฟสวายเดอร์ เป็นชุดม้วนเก็บที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยมีมอเตอร์ขับให้ลูกกลิ้งสัมผัส (contact roller) หมุนด้วยความเร็วตามที่ต้องการ ม้วนฟิล์มผลิตภัณฑ์จะสัมผัสและหมุนด้วยการพาของลูกกลิ้งสัมผัสเมื่อขนาดของม้วนฟิล์มพลาสติกมีขนาดใหญ่ขึ้น แกนที่ใช้ยึดม้วนพลาสติกก็จะเคลื่อนที่ออกห่างจากลูกกลิ้งสัมผัสเพื่อทำให้แรงกดบริเวณม้วนฟิล์มคงที่ตลอดเวลา ชุดม้วนเก็บแบบนี้ เหมาะสำหรับงานม้วนฟิล์มที่ต้องการความตึงปานกลางถึงมาก (medium-high tension)

แก๊บวายเดอร์ เป็นชุดม้วนเก็บที่เหมาะสมสำหรับงานม้วนฟิล์มที่ต้องการความตึงน้อย โดยชุดม้วนเก็บแบบนี้ จะมีข้อแตกต่างจากเซอร์เฟสวายเดอร์ตรงที่ แกนที่ยึดม้วนผลิตภัณฑ์จะหมุนด้วยมอเตอร์อย่างอิสระ และมีช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งสัมผัสกับม้วนผลิตภัณฑ์ เพื่อให้มีแรงตึงในม้วนฟิล์มที่น้อย รูปแบบการทำงานของชุดม้วนเก็บทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบชุดม้วนเก็บแบบเซอร์เฟสวายเดอร์ และแก๊บวายเดอร์



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอัดรีดแบบเป่า

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติที่ดีมากขึ้น และเพื่อลดสมบัติส่วนที่ด้อยลงโดยการทำพอลิเมอร์ผสม การเติมสารบางชนิดลงไป การทำพอลิเมอร์ร่วม และการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของสารเหล่านั้น เป็นต้น และในงานวิจัยก็มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เป็นประโยชน์ สามารถนำมาศึกษาเป็นแนวทางในการทำการวิจัยได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ Zhu และคณะ [10] ได้ศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างโมเลกุล และสมบัติทางการไหลที่มีต่อสมบัติทางแสงของฟิล์ม LDPE โดยเลือกใช้ LDPE 3 ชนิด คือ LD1 (Density  $0.925 \text{ g/cm}^3$  และ MI  $2.08 \text{ g/10 min}$ ) LD2 (Density  $0.923 \text{ g/cm}^3$  และ MI  $1.99 \text{ g/10 min}$ ) LD3 (Density  $0.919 \text{ g/cm}^3$  และ MI  $1.55 \text{ g/10 min}$ ) จากผลการทดลองด้วยเทคนิค DSC พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของ LD1 มากที่สุด และ LD3 มีความเป็นผลึกน้อยที่สุดจากผลสามารถบอกได้ว่าความขุ่นของฟิล์มจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวลดลง จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์แบบมุมกว้าง (Wide Angle X-ray Diffractometry:

WAXD) พบว่าขนาดของผลึกที่ระนาบ 110 LD1 มีขนาดผลึกที่ใหญ่ที่สุด ส่วน LD3 มีขนาดผลึกเล็กที่สุด แต่ในระนาบ 200 ขนาดผลึกไม่แตกต่างกันมากนัก

Torres และคณะ [11] ศึกษาผลของการเติม HDPE และ LLDPE ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มหัด LDPE โดยเติม HDPE 10% โดยน้ำหนัก และ LLDPE จนถึง 30% โดยน้ำหนัก โดยจะใช้ LLDPE 2 ชนิด คือ C4-LLDPE และ C6-LLDPE จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใส่ HDPE 10% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าสอดคล้อง (Modulus) ทั้งด้านแนวตั้ง (MD) และด้านแนวนอน (TD) ของเครื่องจักร เพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้ค่าค่าความยืดสุดท้าย (Ultimate elongation) ความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ความใส (Clarity) ของฟิล์มหัดที่ได้ลดลง และเมื่อเติม LLDPE ทั้ง 2 ชนิด คือ C4-LLDPE และ C6-LLDPE ที่ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความยืดสุดท้าย และความเหนียว (Toughness) ของฟิล์มหัดเพิ่มมากขึ้น แต่ในส่วนของความต้านทานต่อการกราะทุ้ง (Puncture resistance) และค่าการหดตัวลดลงเล็กน้อย

Munaro และ Akcelrud [12] ศึกษาผลของการทำพอลิเมอริซึมระหว่าง HDPE กับ LDPE และ LLDPE โดยที่อัตราส่วน HDPE/ LDPE ที่ 90/10 70/30 50/50 30/70 10/90 และ HDPE/ LLDPE ที่ 90/10 70/30 50/50 30/70 10/90 ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสม MH 100 และขึ้นรูปโดยการอัด (Compress) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC และ X-ray diffractometry (XRD) เพื่อศึกษาปริมาณผลึก พบว่า เมื่อปริมาณ LDPE และ LLDPE ที่ผสมใน HDPE เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกรวมลดลงและขนาดของผลึกจะมีขนาดเล็กลงและในส่วนของคุณค่า ultimate tensile strength ให้ผลที่แตกต่างกัน คือ ในส่วนของ LLDPE เมื่อปริมาณ HDPE เพิ่มมากขึ้น ค่า ultimate tensile strength เพิ่มมากขึ้น แต่ในส่วนของ LDPE ให้ผลที่แตกต่างออกไปเนื่องจากการเกิด co-crystallization

Gonzalez และคณะ [13] ได้ศึกษาผลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตสองขนาดคือขนาดอนุภาค 3.0 ไมครอน และขนาด 1.8 ไมครอน และปรับปรุงสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย coupling agent สองชนิด ที่อัตราส่วน 0.3 0.5 0.7 และ 1.0% โดยจะผสมลงใน PP/HDPE ผสม (PP/HDPE: 80/20) โดยการผสมที่อัตราส่วน PP/HDPE:CaCO<sub>3</sub> ที่ 70:30 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการผสม CaCO<sub>3</sub> ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงลงใน PP/HDPE พบว่า CaCO<sub>3</sub> ที่มีขนาด 1.8 ไมครอน จะให้ค่ายังสัมผัสดูแล การยึด ผน จุดขาด และความต้านทานการกระแทกที่ดีกว่า CaCO<sub>3</sub> ที่มีขนาด 3.0 ไมครอน ทั้งนี้ เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีดังแสดงด้วย SEM micrograph และทำการปรับปรุง CaCO<sub>3</sub> ด้วย Coupling agent สองชนิดพบว่าให้ผลในทำนองเดียวกัน คือช่วยให้การรวมตัวของ CaCO<sub>3</sub> เป็นอนุภาคใหญ่ลดลง ซึ่งในส่วนของคุณ

$\text{CaCO}_3$  ที่มีขนาด 1.8 ไมครอน ให้ผลดีกว่า  $\text{CaCO}_3$  ที่มีขนาด 3.0 ไมครอน จากผลการทดลองพบว่า Coupling agent ชนิด Lica 01 ที่อัตราส่วน 0.7% ให้ค่ายังสัมผัสดูล์สูงที่สุด และที่อัตราส่วน 0.3 0.7% จะให้ค่าการยืด ณ จุดขาดที่ดีที่สุด

R. Strapasson และคณะ [14] ศึกษาการผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิโพรพิลีน ด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) ผลการทดลองพบว่าในแต่ละสัดส่วนของการผสมกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของพอลิเมอรัผสมจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการผสม และอุณหภูมิในการผลิต ความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจะแสดงให้เห็นที่สัดส่วนของพอลิโพรพิลีน 50% ซึ่งจะให้ค่าการยืดตัว (elongation at break) ที่ต่ำที่สุด อุณหภูมิในการผลิตสำหรับพอลิเมอรัผสมที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 170-180 องศาเซลเซียส และการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่อัตราส่วน 10% น่าจะเป็นอัตราส่วนที่ยอมรับได้เนื่องจากไม่ส่งผลให้เกิดการลดลงของสมบัติเชิงกลอย่างเห็นได้ชัด

M. Faker และคณะ [15] ศึกษาการไหล โครงสร้างพื้นฐาน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอรัผสมของพอลิเอทิลีนและพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอรัผสมที่มีพอลิเอทิลีนเป็นองค์ประกอบหลักจะมีความเข้ากันได้มากกว่าเมื่อมีพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตตเป็นองค์ประกอบหลัก จากผล DSC พบว่าการทำพอลิเมอรัผสมของพอลิเอทิลีน และพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตต ส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนมีค่าต่ำลง แต่พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตตจะมีค่าสูงขึ้น ส่วนของพฤติกรรมการไหลและสมบัติสภาพยืดหยุ่น (Viscoelastic properties) จะมีความไวต่อผลของการเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

Pedrosom และคณะ [16] ศึกษาการรีไซเคิลพอลิเมอรัผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งข้าวโพด (LDPE: Corn starch blends) ที่อัตราส่วนของแป้งข้าวโพดที่ 30 40 และ 50% โดยน้ำหนักและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด และศึกษาวัดค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) สมบัติเชิงกล และศึกษาโครงสร้างพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมแป้งข้าวโพดลงในพอลิเอทิลีนจะส่งผลให้ดัชนีการไหล ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความสามารถในการดึงยืดจะมีค่าลดลง แต่ค่าสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น การลดลงของสมบัติต่างๆ มีผลมาจากแรงที่กระทำกันระหว่างผิวหน้าของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอ่อนมาก ซึ่งสังเกตได้จากผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเติมแป้งข้าวโพดที่อัตราส่วน 40 และ 50% โดยน้ำหนัก

Gui-Fang Shan และคณะ [17] ศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิโพรพิลีน โดยใช้พอลิโพรพิลีนสองชนิดคือพอลิโพรพิลีนแบบเดี่ยว (Homogeneous PP) และพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของพอลิโพรพิลีน (PP block-copolymer) โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Twin screw extruder) และหลังจากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีด (injection) จากผลการทดลองพบว่าความทนแรงดึง มอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ความต้านแรงดัดโค้ง (flexural strength) และมอดุลัสดัดโค้ง (Flexural modulus) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณพอลิโพรพิลีนเพิ่มมากขึ้น และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิโพรพิลีนแบบเดี่ยวจะมีสมบัติที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของพอลิโพรพิลีน

G. Levita และคณะ [18] ศึกษาการแตกหักแบบมาเชสติ ของวัสดุคอมโพสิตของแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดอนุภาคเล็กกับพอลิโพรพิลีน โดยทำการศึกษาผลของการเติมแคลเซียมขนาดอนุภาคเล็กลงในพอลิโพรพิลีนที่ 0-40% โดยปริมาตร โดยแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นแบบที่มีการดัดแปรผิวด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) และแบบที่ไม่ทำการดัดแปร จากผลการทดลองพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ได้ทำการดัดแปรผิวจะทำให้ค่าความเหนียว (Toughness) ของพอลิโพรพิลีนลดลง แต่ในส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการดัดแปรผิวสามารถใส่ได้มากถึง 10% โดยปริมาตร

L. Alicia และคณะ [19] ศึกษาสมบัติทางแสงของพอลิเมอร์ร่วมของเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตตที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในอัตราส่วนต่างๆ จนถึง 10% โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ของสมบัติทางแสงกับความหนาของฟิล์มจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง กล่าวคือ เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น จะทำให้สมบัติทางแสงมีค่าลดลงด้วยในทุกอัตราส่วนผสมและค่าการส่องผ่านของแสงจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มนี้ จะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

Kartalis และ Papaspyrides [20] ศึกษาการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยเทคนิคการหลอมเหลวใหม่พร้อมที่เติมสารเพิ่มความเสถียร การทำการขึ้นรูปซ้ำหลายรอบที่อุณหภูมิในการผลิตแตกต่างกันเป็นวิธีการที่ใช้ทดสอบความสามารถของสารเพิ่มความเสถียร จากผลการทดลองแสดงผลที่น่าประทับใจที่ว่ากระบวนการนี้ สามารถช่วยลดการเกิดการสลายตัวของพลาสติกอันเนื่องมาจากการนำพลาสติกมาขึ้นรูปใหม่และเป็นวิธีที่ดีในการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

Abdel-Bary และคณะ [21] ทำการศึกษาการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการเกษตรด้วยกระบวนการอัดรีดร่วมชนิดสองสกรู โดยขึ้นบนประกอบด้วยทอร์โมพลาสติกบริสุทธิ์ และสารเพิ่มความเสถียรชนิดต่างๆ ในส่วนนี้ นล่างประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วผสมกับพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์

ในอัตราส่วนต่างๆ พิล์มสองชั้นที่ผลิตได้จะถูกทดสอบการใช้งานภายนอกอาคารโดยมีรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวเร่งโดยทำการทดสอบเป็นเวลา 1 ปี จากผลการทดลองพบว่ามีการทดลองประสบความสำเร็จในการนำมาใช้เป็นฟิล์มเพื่อการเกษตร

Dintcheva และ Manti [22] ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปใหม่และกระบวนการ restabilization ของขยะพลาสติกจากการเกษตรโดยคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ และเป็นการลดการตกค้างของขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant) และสารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) ช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการเกิดการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ได้



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใช้ในการทดลองนี้ เกรด D2024 ผลิตโดยบริษัททีพีไอ โพลีน (TPI Polene) จากประเทศไทย มีดัชนีการไหล 0.7 กรัม/10 นาที และความหนาแน่น 0.922 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

##### 3.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำปานกลางที่ใช้ในการทดลองนี้ เกรด FB2230 ผลิตโดยบริษัทโบรอกซ์ (Borough) จากประเทศสิงคโปร์ มีดัชนีการไหล 0.2 กรัม/10 นาที และความหนาแน่น 0.923 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามข้อมูลที่แนบไว้ในภาคผนวก ข (หมายเหตุเกรดพลาสติกชนิดนี้ในประเทศไทยสมบัติจัดอยู่ในเกรดพลาสติกประเภท LDPE)

##### 3.1.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้ในการทดลองนี้ เกรด HTA108 ผลิตโดยบริษัทเอ็กซอนโมบิล (Exxon mobile) จากประเทศสิงคโปร์ มีดัชนีการไหล 0.7 กรัม/10 นาที และความหนาแน่น 0.961 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

##### 3.1.4 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>)

แคลเซียมคาร์บอเนต ที่ใช้ในการทดลองนี้ เกรด FECC5345 ผลิตโดย บริษัทพอลิเมอร์ไทย เอเชีย จากประเทศไทย มีขนาดอนุภาค 1 ไมครอน ซึ่งมีการปรับปรุงผิวโดยใช้สเตียริกแอซิด (Stearic acid)

ตารางที่ 3.1 ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบต้นทุนต่อไป (หมายเหตุอ้างอิงราคาวัตถุดิบในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2552)

ลำดับที่	ชนิด	ชื่อทางการค้า	ราคา (บาท/กก)
1	LDPE	D2024	50
2	HDPE	HTA108	49
3	MDPE	FB2230	52
4	CaCO <sub>3</sub>	FECC5345	34

### 3.2 กระบวนการเตรียมฟิล์มหด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปฟิล์มหดทั้งหมดโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเป่าชนิดสกรูเดี่ยว (Blown film extrusion) ซึ่งเครื่องที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเป่า 70 มม. ฟิล์มหดทั้งหมดทำการผลิตที่หน้ากว้างฟิล์ม 180 มม. ความหนาของฟิล์มที่ผลิตมีการเปลี่ยนแปลงตามสูตรที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.3-3.6 โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มหดชนิดต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน	ความหนา (ไมครอน)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)				รอบสกรู (rpm)	รอบลูกกลิ้งดึง (rpm)
				โซน 1	โซน 2	โซน 3	หัวไดย์		
1	LDPE	100	30	160	160	165	165	40.5	24.5
2	LDPE	100	50	160	160	165	165	40.5	18.6
3	LDPE	100	70	160	160	165	165	40.5	16.9
4	LDPE	100	90	160	160	165	165	40.5	11.5
5	LDPE	100	110	160	160	165	165	40.5	10.0
6	LDPE/MDPE	ทั้งหมด	50	160	160	165	165	40.5	18.6
7	LDPE/HDPE	ทั้งหมด	50	160	165	168	168	40.5	18.6
8	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	ทั้งหมด	50	160	160	165	165	40.5	18.6

ตารางที่ 3.3 สูตรการผลิตฟิล์มหนที่ได้จากพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน	ความหนา (ไมครอน)
1	LDPE	100	30
2	LDPE	100	50
3	LDPE	100	70
4	LDPE	100	90
5	LDPE	100	110

ตารางที่ 3.4 สูตรการผลิตฟิล์มหนที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน	ความหนา (ไมครอน)
1	LDPE/MDPE	90/10	50
2	LDPE/MDPE	80/20	50
3	LDPE/MDPE	70/30	50
4	LDPE/MDPE	60/40	50

ตารางที่ 3.5 สูตรการผลิตฟิล์มหนที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน	ความหนา (ไมครอน)
1	LDPE/HDPE	90/10	50
2	LDPE/HDPE	80/20	50
3	LDPE/HDPE	70/30	50
4	LDPE/HDPE	60/40	50

ตารางที่ 3.6 สูตรการผลิตฟิล์มหัดที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน	ความหนา (ไมครอน)
1	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	97.5/2.5	50
2	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	95/5	50
3	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	90/10	50
4	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	85/15	50

### 3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

#### 3.3.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property)

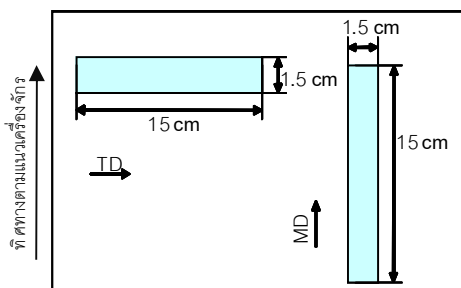
ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มหัดทำโดยใช้เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter : DSC) รุ่น Perkin Elmer Diamond โดยทดสอบที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เทคนิคนี้ใช้เพื่อทดสอบหาค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวและความสามารถในการเกิดผลึกของฟิล์มหัดที่ผลิตได้ โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ 50-200 องศาเซลเซียส และอัตราในการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที น้ำหนักของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ 3-5 กรัม และนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน



รูปที่ 3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

### 3.3.2 การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ฟิล์มหดทั้งหมดที่เตรียมได้จากกระบวนการผลิต จะนำมาทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) โดยใช้เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine ของบริษัทชันซีพลาสติก พี เอส จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D882 ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีความกว้าง 1.5 ซม. และยาว 15 ซม. โดยใช้ตุ้มน้ำหนัก (Load cell) ขนาด 500 N และใช้อัตราการดึงยึดที่ 500 มม.ต่อนาที ที่ระยะในการจับยึดชิ้นงาน (Gauge length) อยู่ที่ 50 มม. ในการทดลองนี้ ได้ทำการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงในสองทิศทางของการจัดเรียงตัวของฟิล์ม คือทิศทางในแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร (Machine direction: MD และ Transverse machine direction: TD)

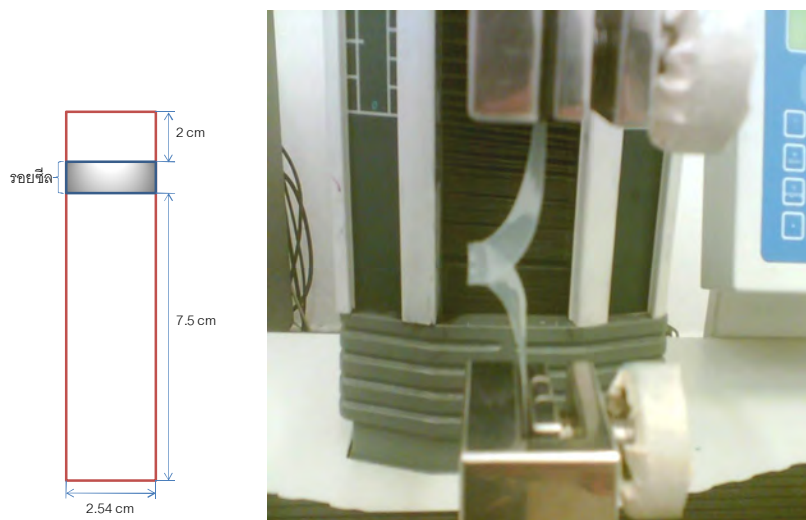


รูปที่ 3.2 การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง

### 3.3.3 การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength)

ฟิล์มหดทั้งหมดที่เตรียมได้จากกระบวนการผลิต จะนำมาทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength) โดยใช้เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine ของบริษัทชันซีพลาสติก พี เอส จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM F88 โดยชิ้นงานถูกผนึกติดกันด้วยเครื่องผนึกติด (Sealing machine) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 PSI และใช้เวลาในการผนึก 2 วินาที นำฟิล์มที่ทำการผนึกติดแล้ว มาตัดเป็นชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบ

โดยมีขนาดความกว้าง 2.54 ซม. และยาว 10 ซม. และในการทดลองนี้ ได้ทำการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของการฉีก ในสองทิศทางของการจัดเรียงตัวของฟิล์ม คือทิศทางในแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร และมีการตั้งค่าสภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกันกับกรณีการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง



รูปที่ 3.3 การทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของการฉีก

### 3.3.4 การทดสอบสมบัติด้านความขุ่น (Haze)

ฟิล์มหดทั้งหมดที่เตรียมได้จากกระบวนการผลิตจะถูกทดสอบสมบัติด้านการมองเห็น ซึ่งประกอบด้วยสมบัติด้านความขุ่น โดยสมบัติด้านความขุ่น จะทดสอบโดยใช้เครื่องBYK Haze-Gard Plus รุ่น E0606 ของบริษัทชไนร์พลาสติก พี เอส จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D1003 ดังแสดงในรูป 3.4 ในการทดสอบนี้ ก่อนทำการวัดค่าความขุ่นจะตัดฟิล์มเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด 210 มม. x 297 มม. และใส่ที่จับยึดเพื่อให้ฟิล์มมีความตึงก่อนทำการวัด ส่วนการวัดค่าความขุ่นนั้น ต้องวางฟิล์มลงบนพื้นราบที่มีความเรียบสม่ำเสมอก่อนทำการวัด



รูปที่ 3.4 การทดสอบสมบัติด้านความขุ่น (Haze)

### 3.3.5 การทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability)

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบความสามารถในการหดตัวของฟิล์มหดที่ผลิตได้ตามมาตรฐาน JIS Z 1709 โดยใช้เครื่องทดสอบ ของบริษัทซันซีพลาสติก พี เอส จำกัด ซึ่งในการเตรียมชิ้นงานฟิล์มหดจะถูกตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาดความกว้าง 10 ซม. และยาว 10 ซม. โดยระบุนทิศทางการจัดเรียงตัวของฟิล์มในด้าวนแนวตามและ แนวขวางเครื่องจักรไว้บนฟิล์ม จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้จุ่มลงในอ่างน้ำ าม้ร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วินาที และนำฟิล์มที่ได้ไปวัดขนาดหลังเกิดการหดตัว โดยนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มต่อไป



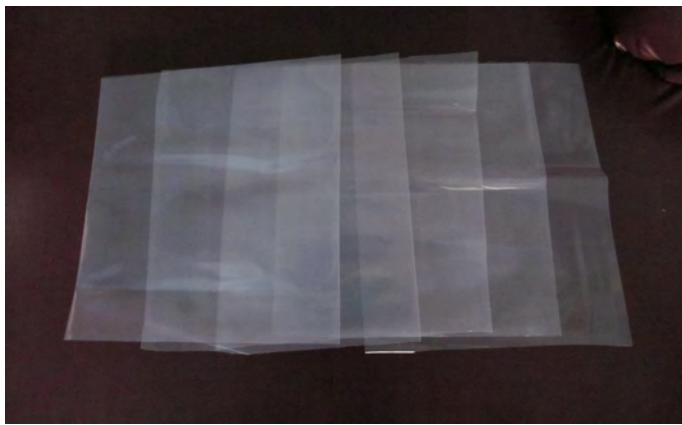
รูปที่ 3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการหดตัว

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ

ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 30 50 70 90 และ 110 ไมครอน ที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยฟิล์มทั้งหมดที่ผลิตได้จะถูกนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 4.1 ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ

##### 4.1.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property)

ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ (LDPE) ที่ความหนา 30 50 70 90 และ 110 ไมครอน ที่ผลิตได้ถูกนำมาทดสอบสมบัติทางความร้อน ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melting temperature) และปริมาณความเป็นผลึกด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยปริมาณความเป็นผลึกสามารถหาได้สมการดังนี้

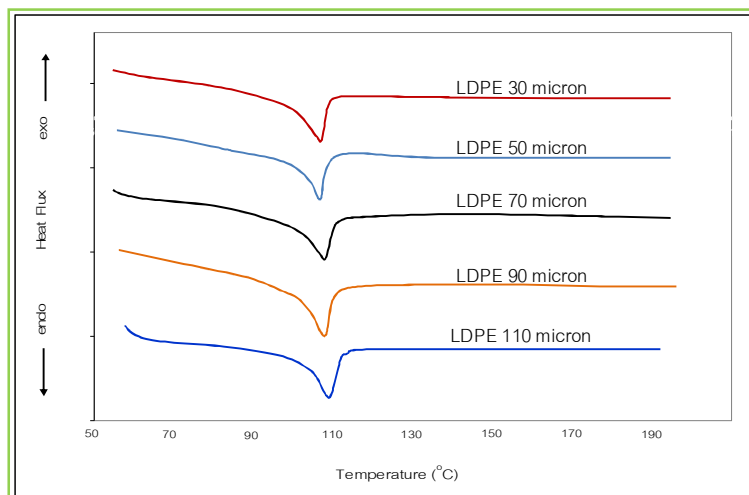
$$\text{ปริมาณความเป็นผลึก} = \frac{\text{เอนทาลปีของการหลอมเหลวที่ได้} (\Delta H_f)}{\text{เอนทาลปีของการหลอมเหลวของ 100\%ผลึก} (\Delta H_f^\circ)} \times 100$$



ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ มีความหนาเพิ่มมากขึ้น จาก 30 ไมครอน เป็น 110 ไมครอน ค่าปริมาณความเป็นผลึกจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จาก 12.86% เป็น 17.54% ทั้งนี้ เนื่องจากความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรของฟิล์มมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้น น้อยลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากด้านในสู่ด้านนอกของฟิล์มพลาสติกเกิดได้น้อยลง ดังนั้น สายโซ่โพลิเมอร์จึงมีเวลาและพลังงานเพียงพอที่จะเกิดเป็นผลึกได้มากขึ้น นอกจากนี้ จากผลเทอร์โมแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาเพิ่มมากขึ้น ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 110-111 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ

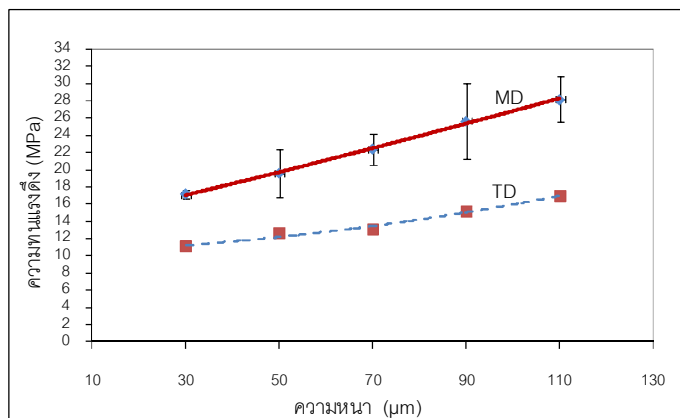
ลำดับที่	สูตรการผลิต	ความหนา (ไมครอน)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	เอนทาลปี (จูล/กรัม)	ปริมาณความ เป็นผลึก (%)
1	LDPE	30	111	37.05	12.86
2	LDPE	50	110	43.71	15.18
3	LDPE	70	110	45.94	15.95
4	LDPE	90	111	48.06	16.69
5	LDPE	110	110	50.51	17.54



รูปที่ 4.2 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ

#### 4.1.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ ทั้งด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร (Machine direction: MD และ Transverse machine direction: TD) แสดงดังรูปที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ เพิ่มขึ้น จาก 30 ไมครอนเป็น 110 ไมครอน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น จาก 17.15 เมกะปาสคาล เป็น 28.19 เมกะปาสคาล ในด้านแนวตามเครื่องจักร และมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 11.11 เมกะปาสคาล เป็น 16.98 เมกะปาสคาล ในด้านแนวขวางเครื่องจักร ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้น ของความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็นผลโดยตรงจากความหนาของฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของฟิล์มมีค่าเพิ่มมากขึ้น ด้วย



รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร

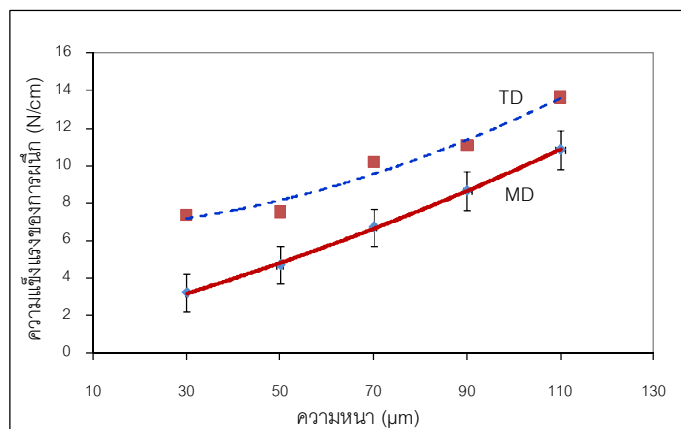
จากผลการทดลองเมื่อศึกษาผลของค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus) ที่เป็นผลจากความหนาที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ พบว่าค่ายังส์มอดุลัสในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความหนาที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มสามารถรับแรงได้มากขึ้น นอกจากนี้ ผลการทดลองที่ได้ยังพบว่า ค่ายังส์มอดุลัสในด้านแนวขวางเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในด้านแนวตามเครื่องจักร ทั้งนี้ เนื่องจากความมีกิ่งก้านสาขาที่ยาวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวในด้านแนวขวางของเครื่องจักรที่ดี จึงมีค่ายังส์มอดุลัสที่สูงกว่า โดยค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	ความหนา (ไมครอน)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	
			MD	TD
1	LDPE	30	153.92	150.23
2	LDPE	50	154.34	160.71
3	LDPE	70	158.09	164.30
4	LDPE	90	163.44	175.23
5	LDPE	110	175.75	182.96

#### 4.1.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength)

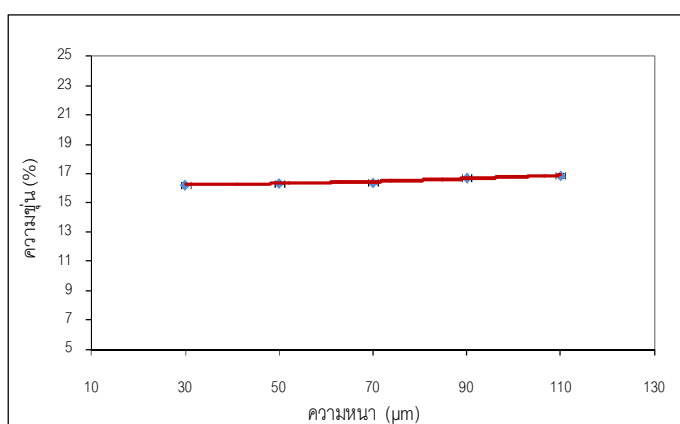
ความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength) ของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่มีความหนาต่างๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร แสดงดังรูปที่ 4.4 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ เพิ่มขึ้น จาก 30 ไมครอนเป็น 110 ไมครอน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของการผนึกของฟิล์มมีค่าเพิ่มมากขึ้น จาก 3.22 นิวตันต่อเซนติเมตร เป็น 10.85 นิวตันต่อเซนติเมตรในด้านแนวตามเครื่องจักร ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการรับแรงของฟิล์มก่อนที่จะส่งผ่านแรงไปยังส่วนของรอยผนึกจึงเพิ่มขึ้น และให้ค่าความแข็งแรงของการผนึกที่สูงขึ้นด้วย ในทำนองเดียวกัน ค่าความแข็งแรงของการผนึกในด้านแนวขวางเครื่องจักรมีค่าเพิ่มมากขึ้น จาก 7.38 นิวตันต่อเซนติเมตร เป็น 13.63 นิวตันต่อเซนติเมตร เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น จาก 30 ไมครอน เป็น 110 ไมครอน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงของการผนึกติดในด้านแนวขวางมีค่ามากกว่าในด้านแนวตามเครื่องจักร ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากในการให้แรงเพื่อแยกฟิล์มที่ผนึกติดกันนั้น ในด้านแนวตามเครื่องจักรเป็นการให้แรงเพื่อทำลายแรงทุติยภูมิที่อยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล แต่ในด้านแนวขวางเครื่องจักรแรงที่ให้เป็นแรงเพื่อทำลายแรงปฐมภูมิของสายโซ่ที่มีความแข็งแรงมากกว่า จึงจำเป็นต้องใช้แรงมากกว่า



รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงของการผนึกของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่มีความหนาต่างๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร

#### 4.1.4 สมบัติด้านความขุ่น (Haze)

จากผลการทดสอบสมบัติด้านความขุ่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.5 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มมากขึ้น จาก 30 ไมครอนเป็น 110 ไมครอนพบว่าความขุ่นของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น น้อยกว่า 16.23% เป็น 16.86% ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น



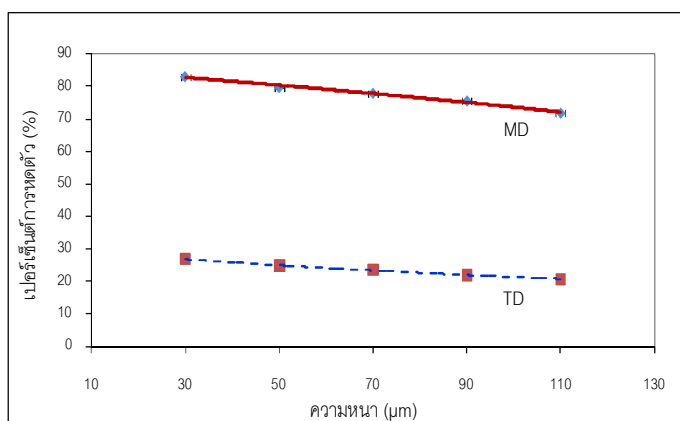
รูปที่ 4.5 ค่าความขุ่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ

#### 4.1.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability)

ความสามารถในการหดตัวเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างมากของฟิล์มหด เนื่องจากความต้องการนำไปใช้เพื่อหดรัดหรือห่อหุ้มผลิตภัณฑ์หลายๆ ชิ้นให้เป็นแพ็คเดียวกัน และยังช่วยป้องกันไม่ให้ผู้บริโภคสามารถเปิดใช้สินค้าก่อนการซีล ขยายได้ ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการหดตัวของฟิล์มที่ได้ด้วย ตามมาตรฐาน JIS Z 1709 โดยค่าความสามารถในการหดตัวของฟิล์มจะหาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage percent) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage percent)} = (\text{ความยาวที่เปลี่ยนแปลง/ความยาวเดิม}) \times 100$$

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มหดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่าง ๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรแสดงดังรูปที่ 4.6 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น จาก 30 ไมครอน เป็น 110 ไมครอน เปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มหดที่ได้ มีค่าลดลงจาก 83.07% เป็น 71.86% ในด้านแนวตามเครื่องจักร และมีค่าลดลงจาก 26.86% เป็น 20.79% ในด้านแนวขวางเครื่องจักร ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณความเป็นผลึกที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ดังนั้น ความสามารถในการหดตัวจึงลดลง



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มหดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่าง ๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร

#### 4.2 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

ฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน 90/10 80/20 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนักที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยในการทดลองนี้ ทำการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมที่ความหนา 50 ไมครอน และนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้



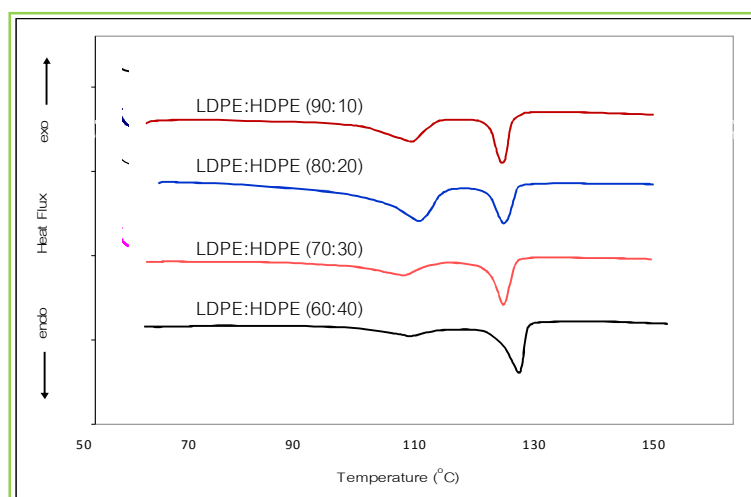
รูปที่ 4.7 फिल्मพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

#### 4.2.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property)

ฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ถูกนำมาศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยผลที่ได้สรุปดังตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่าเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมปรากฏเป็น 2 พีค โดยพีคแรกปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 108 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงถึงอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่วนพีคที่สองปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 127 °C ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงถึงอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากการคำนวณหาค่าปริมาณความเป็นผลึก พบว่าที่อัตราส่วนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 90/10 โดยน้ำหนักมีค่าปริมาณความเป็นผลึกที่ 18.94% แต่เมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น เป็น 60/40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกโดยรวมเพิ่มมากขึ้น เป็น 28.07% ทั้งนี้ เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง มีความเป็นเส้นตรงมีปริมาณกิ่งก้านสาขาน้อย ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถจัดเรียงตัวกันได้อย่างใกล้ชิด ดังนั้นค่าปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	ส่วนที่หนึ่ง		ส่วนที่สอง		ปริมาณผลึก (%)
		อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	เอนทาลปี (จูล/กรัม)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	เอนทาลปี (จูล/กรัม)	
1	LDPE/HDPE (90/10)	108	36.47	126	18.08	18.94
2	LDPE/HDPE (80/20)	108	30.81	127	27.02	20.08
3	LDPE/HDPE (70/30)	108	22.83	127	55.58	27.22
4	LDPE/HDPE (60/40)	107	21.95	128	58.90	28.07



รูปที่ 4.8 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.2.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเพิ่มขึ้น จาก 10% เป็น 40% โดยน้ำหนักส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 22.71 เมกะปาสคาล เป็น 30.19 เมกะปาสคาล ในด้านแนวตามเครื่องจักร และมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 12.11 เมกะปาสคาล เป็น 18.35



เมกะปาสคาลในด้านแนวขวางเครื่องจักร ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากปริมาณความเป็นผลึกที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณอัตราส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมมีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	17.15	11.11
2	LDPE	100	50	19.58	12.61
3	LDPE	100	70	22.41	13.06
4	LDPE	100	90	25.65	15.15
5	LDPE	100	110	28.19	16.98
6	LDPE/HDPE	90/10	50	22.71	12.11
7	LDPE/HDPE	80/20	50	23.86	14.77
8	LDPE/HDPE	70/30	50	25.32	17.54
9	LDPE/HDPE	60/40	50	30.19	18.35

จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สามารถเพิ่มความสามารถในการทนแรงดึงของฟิล์มผสมได้ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ พบว่าการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน 10% ให้ผลการทนแรงดึงดีเทียบเท่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 70 ไมครอน และที่อัตราส่วนผสม 20%-40% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทนแรงดึงได้ดีเทียบเท่ากับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 90 ไมครอน ซึ่งเป็นผลในแนวตามเครื่องจักร และในด้านแนวขวางเครื่องจักรที่อัตราส่วน 20% ให้ผลการทนแรงดึงดีเทียบเท่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 90 ไมครอน ที่อัตราส่วนผสม 30%-40% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทนแรงดึงได้ดีเทียบเท่ากับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 110 ไมครอน

เมื่อพิจารณาผลของค่ายังส์มอดุลล์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสม พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่ายังส์มอดุลล์ของฟิล์มผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร ทั้งนี้เป็นผลของโครงสร้างที่มีปริมาณกิ่งก้านที่น้อยทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถจัดเรียงตัวได้ชิดกันมากขึ้น และเกิดเป็นผลึกได้มากขึ้น เมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพิ่มมากขึ้น โดยค่ายังส์มอดุลล์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่ายังส์มอดุลล์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	ยังส์มอดุลล์ (MPa)	
		MD	TD
1	LDPE/HDPE(90/10)	219.36	217.05
2	LDPE/HDPE (80/20)	250.29	275.31
3	LDPE/HDPE (70/30)	261.09	291.74
4	LDPE/HDPE (60/40)	337.26	358.63

#### 4.2.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength)

ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อความแข็งแรงของการผนึกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรแสดงดังตารางที่ 4.6 จากผลการทดลองพบว่าในด้านแนวตามเครื่องจักรเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเพิ่มมากขึ้น จาก 10% เป็น 40% ส่งผลให้ความสามารถของการผนึกของฟิล์มผสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จาก 6.24 นิวตันต่อเซนติเมตร เป็น 8.32 นิวตันต่อเซนติเมตร ส่วนในด้านแนวขวางเครื่องจักรให้ผลในทำนองเดียวกันกับด้านแนวตามเครื่องจักรคือเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเพิ่มมากขึ้น จาก 10% เป็น 40% โดยนี้ นักส่งผลให้ความสามารถของการผนึกของฟิล์มผสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จาก 10.26 นิวตันต่อเซนติเมตร เป็น 12.13 นิวตันต่อเซนติเมตร โดยการเพิ่มขึ้นของการผนึกติดของฟิล์มผสมเป็นผลจากโครงสร้างที่มีความเป็นเส้นตรงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	3.22	7.38
2	LDPE	100	50	4.69	7.54
3	LDPE	100	70	6.71	10.20
4	LDPE	100	90	8.66	11.11
5	LDPE	100	110	10.85	13.63
6	LDPE/HDPE	90/10	50	6.24	10.26
7	LDPE/HDPE	80/20	50	6.82	11.24
8	LDPE/HDPE	70/30	50	7.13	11.67
9	LDPE/HDPE	60/40	50	8.32	12.13

เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ กับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ พบว่าเมื่อมีการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน 30-40% โดยนี้ นักพบว่าให้ความแข็งแรงของการฉีกดีเทียบเท่ากับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 70 ไมครอนในด้านแนวตามเครื่องจักร แต่ในด้านแนวขวางเครื่องจักรพบว่ามีค่าดีเทียบเท่ากับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 90 ไมครอน

#### 4.2.4 สมบัติด้านความขุ่น (Haze)

จากผลการทดสอบวัดความขุ่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเมื่อมีปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นองค์ประกอบมากขึ้น จาก 10% เป็น 40% โดยนี้ นักพบว่าจะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความขุ่นมากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มจาก 18.20% เป็น 24.60% อันเป็นผลเนื่องจากความเป็นผลึกที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.7 ค่าความชื้นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความชื้น (%)
1	LDPE	100	30	16.23
2	LDPE	100	50	16.34
3	LDPE	100	70	16.38
4	LDPE	100	90	16.72
5	LDPE	100	110	16.86
6	LDPE/HDPE	90/10	50	18.20
7	LDPE/HDPE	80/20	50	20.70
8	LDPE/HDPE	70/30	50	24.00
9	LDPE/HDPE	60/40	50	24.60

#### 4.2.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability)

ตารางที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน 90/10 80/20 70/30 60/40 โดยน้ำหนัก ทั้งในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเพิ่มมากขึ้น จาก 10% เป็น 40% เปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มผสมจะมีค่าลดลงจาก 79.00% เป็น 66.36% และ 24.21% เป็น 15.00% ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจากเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในฟิล์มผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้โครงสร้างที่มีความเป็นกึ่งก้านสาขาลดลงทำให้ความสามารถในการหดตัวของฟิล์มผสมมีค่าที่ลดลง

ตารางที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	เปอร์เซ็นต์การหดตัว (%)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	83.07	26.86
2	LDPE	100	50	79.64	24.86
3	LDPE	100	70	77.93	23.50
4	LDPE	100	90	75.64	22.00
5	LDPE	100	110	71.86	20.79
6	LDPE/HDPE	90/10	50	79.00	24.21
7	LDPE/HDPE	80/20	50	72.57	22.43
8	LDPE/HDPE	70/30	50	68.43	18.64
9	LDPE/HDPE	60/40	50	66.36	15.00

จากผลการทดลองศึกษาสมบัติด้านต่างๆ ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีน กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมและให้สมบัติที่ดีที่สุดคือ 70/30 โดยน้ำหนัก โดยให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงความแข็งแรงของการฉีกดีใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 90 ไมครอน และมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่ จ้านแนวตามและแนวขวางอยู่ในช่วงการใช้งานของฟิล์มหดรโดยทั่วไป (ฟิล์มหดร โดยทั่วไปมีช่วงการใช้งานของการหดตัวในด้านแนวตามเครื่องจักรที่ 70-80% แลแนวขวาง เครื่องจักรที่ 20-30%) แต่มีความขุ่นเพิ่มมากขึ้น จากสูตรการผลิตนี้ สามารถคำนวณหาค่า ต้นทุนค่าวัตถุดิบได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\text{ราคาต้นทุนวัตถุดิบ} = (f_a \times P_a) + (f_b \times P_b)$$

โดยที่  $f_a$  และ  $f_b$  คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสาร A และ B ตามลำดับ

$P_a$  และ  $P_b$  คือ ราคาต่อกิโลกรัมของสาร A และ B ตามลำดับ

โดยสูตรการผลิตที่อัตราส่วนผสม 70/30 โดยน้ำหนักนี้ จะมีราคาต้นทุนวัตถุดิบในการผลิต ที่ 49.70 บาท/กิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ซึ่งมีราคาต้นทุน วัตถุดิบในการผลิตที่ 50.00 บาท/กิโลกรัม (อ้างอิงราคาตามตารางที่ 3.1)

### 4.3 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง

ฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วน 90/10 80/20 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนักที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยในการทดลองนี้ ทำการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมที่ความหนา 50 ไมครอน และนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 4.9 ฟิล์มหัดพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

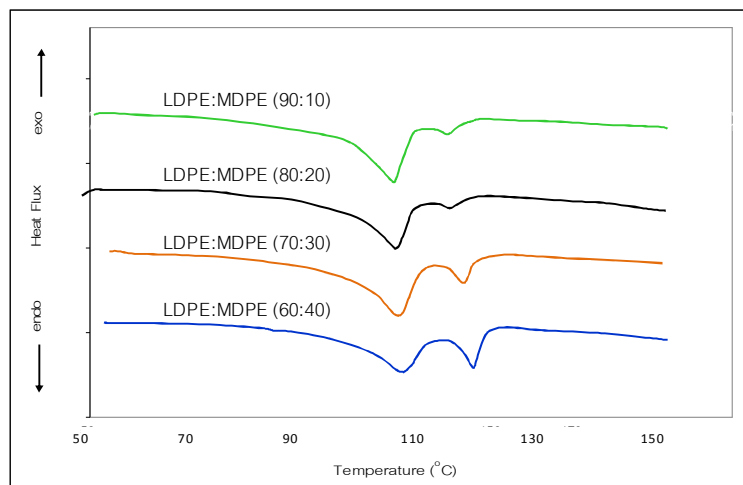
#### 4.3.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property)

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.10 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางเป็นพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่งที่มีขนาดกิ่งก้านที่สั้น และมีปริมาณกิ่งก้านน้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [3] จากผลการทดลองพบว่าเทอร์โมแกรมที่ได้จะปรากฏเป็น 2 พีค คือพีคที่หนึ่งที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 108-109 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่แสดงถึงช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพีคที่สองที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 119-121 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นพีคที่แสดงช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง และเมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางในฟิล์ม

พอลิเอทิลีนผสมเพิ่มมากขึ้น จาก 10% เป็น 40% โดยน้ำหนักทำให้ปริมาณความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 13.51% เป็น 15.29% แต่เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ความหนาเดียวกันพบว่า เมื่อผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วจะทำให้มีปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	ส่วนที่หนึ่ง		ส่วนที่สอง		ปริมาณผลึก (%)
		อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	เอนทาลปี (จูล/กรัม)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	เอนทาลปี (จูล/กรัม)	
1	LDPE/MDPE (90/10)	109	36.10	119	2.82	13.51
2	LDPE/MDPE (80/20)	109	36.05	119	3.14	13.61
3	LDPE/MDPE (70/30)	109	34.27	120	7.37	14.46
4	LDPE/MDPE (60/40)	108	32.01	121	12.02	15.29



รูปที่ 4.10 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.3.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

สมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น หาก 21.40 เมกะปาสคาลเป็น 28.80 เมกะปาสคาลในด้านแนวตามเครื่องจักร และเพิ่มจาก 17.69 เมกะปาสคาลเป็น 23.12 เมกะปาสคาลในด้านแนวขวางเครื่องจักร เมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 40% โดยนี้ น้ำหนักจากผลการทดลองยังพบอีกว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเป็น 20% และ 30% โดยนี้ น้ำหนักให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 90 ไมครอนในด้านแนวตามเครื่องจักร แต่ในด้านแนวขวางเครื่องจักรพบว่าเมื่อมีการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่ทุกอัตราส่วนให้ความสามารถในการทนแรงดึงที่สูงกว่าฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 110 ไมครอน ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางมีกิ่งก้านสาขาที่สั้น จำนวนของกิ่งก้านสาขาที่น้อยกว่า และน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่าของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถจัดเรียงตัวได้ชิดกันมากขึ้น และสามารถรับแรงที่เกิดจากการดึงยึดได้มากขึ้น



ตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	17.15	11.11
2	LDPE	100	50	19.58	12.61
3	LDPE	100	70	22.41	13.06
4	LDPE	100	90	25.65	15.15
5	LDPE	100	110	28.19	16.98
6	LDPE/MDPE	90/10	50	21.40	17.69
7	LDPE/MDPE	80/20	50	23.90	21.06
8	LDPE/MDPE	70/30	50	24.87	22.39
9	LDPE/MDPE	60/40	50	28.80	23.12

เมื่อพิจารณาผลของค่ายังสัมมูล์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมพบว่า ค่ายังสัมมูล์ที่ตั้งในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาของฟิล์มที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลของปริมาณสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดกึ่งก้านสั้นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ชิดกันมากขึ้น ทำให้สามารถรับแรงที่มากกระทำได้มากขึ้น โดยค่ายังสัมมูล์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	ยังส์มอดุลัส (MPa)	
		MD	TD
1	LDPE/MDPE (90/10)	165.98	163.25
2	LDPE/MDPE (80/20)	167.63	171.65
3	LDPE/MDPE (70/30)	175.21	187.43
4	LDPE/MDPE (60/40)	196.22	211.50

#### 4.3.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength)

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงของการผนึกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ ฉ้านแนวตาม และแนวขวางเครื่องจักร จากผลที่ได้พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเพิ่มมากขึ้น จาก 10% เป็น 40% โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงในการผนึกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จาก 5.20 นิวตันต่อเซนติเมตร เป็น 6.99 นิวตันต่อเซนติเมตร และในด้านแนวขวางเครื่องจักรได้ผลในทำนองเดียวกัน โดยมีค่าเพิ่มจาก 9.43 เป็น 12.37 นิวตันต่อเซนติเมตร และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของการผนึกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นต่างๆ พบว่าเมื่อผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางในอัตราส่วน 30% และ 40% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงของการผนึกใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่น 70 ไมครอนในด้านแนวตามเครื่องจักร และในด้านแนวขวางเครื่องจักรให้ค่าความแข็งแรงของการผนึกเทียบเท่ากับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาแน่น 90 ไมครอน

ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	3.22	7.38
2	LDPE	100	50	4.69	7.54
3	LDPE	100	70	6.71	10.20
4	LDPE	100	90	8.66	11.11
5	LDPE	100	110	10.85	13.63
6	LDPE/MDPE	90/10	50	5.20	9.43
7	LDPE/MDPE	80/20	50	5.43	10.35
8	LDPE/MDPE	70/30	50	5.84	11.83
9	LDPE/MDPE	60/40	50	6.99	12.37

#### 4.3.4 สมบัติด้านความขุ่น (Haze)

จากผลการทดสอบวัดความขุ่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.13 จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเมื่อมีปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางเป็นองค์ประกอบมากขึ้นจาก 10% เป็น 40% โดยนี้ นักพบว่า จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความขุ่นมากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มจาก 18.92 % เป็น 23.82%

ตารางที่ 4.13 ค่าความชื้นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความชื้น (%)
1	LDPE	100	30	16.23
2	LDPE	100	50	16.34
3	LDPE	100	70	16.38
4	LDPE	100	90	16.72
5	LDPE	100	110	16.86
6	LDPE/MDPE	90/10	50	18.92
7	LDPE/MDPE	80/20	50	21.52
8	LDPE/MDPE	70/30	50	22.22
9	LDPE/MDPE	60/40	50	23.82

#### 4.3.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability)

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามและด้านแนวขวาง เครื่องจักร สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.14 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางในฟิล์มเพิ่มมากขึ้นจาก 10% เป็น 40% โดยน้ำหนัก ทำให้อัตราการหดตัวของฟิล์มผสมลดลงจาก 79.29% เป็น 70.57% และลดลงจาก 23.20% เป็น 17.00% ในด้านแนวตามและแนวขวาง เครื่องจักรตามลำดับ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ผลทั้งหมดที่ได้เทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ พบว่าการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วน 30% โดยน้ำหนักมีอัตราการหดตัวของฟิล์มที่ลดลง แต่ให้ผลเทียบเท่ากับการหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 10 ไมครอน ในด้านแนวตามเครื่องจักร

ตารางที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	เปอร์เซ็นต์การหดตัว (%)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	83.07	26.86
2	LDPE	100	50	79.64	24.86
3	LDPE	100	70	77.93	23.50
4	LDPE	100	90	75.64	22.00
5	LDPE	100	110	71.86	20.79
6	LDPE/MDPE	90/10	50	79.29	23.20
7	LDPE/MDPE	80/20	50	76.21	21.70
8	LDPE/MDPE	70/30	50	72.71	18.44
9	LDPE/MDPE	60/40	50	70.57	17.00

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดของการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางลงในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสม พบว่าอัตราส่วนผสมที่ให้สมบัติที่ดีที่สุดคือที่ 70/30 โดยน้ำหนักซึ่งให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงของการพ่นที่ใกล้เคียงฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 90 ไมครอน และให้ค่าความขุ่นของฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย รวมทั้งมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่ลดลง แต่สามารถใช้งานได้ (มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ความหนา 110 ไมครอน) โดยสูตรการผลิตนี้มีต้นทุนค่าวัตถุดิบที่ 0.6 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ซึ่งมีราคาต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตที่ 50.00 บาท/กิโลกรัมเพียงเล็กน้อย

#### 4.4 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ยินนำมาเติมในพลาสติก แคลเซียมคาร์บอเนตที่นิยมใช้มีอยู่หลากหลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นผง เป็นคอมพาวนด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด และใช้ในการทดลองนี้คือ รูปแบบของคอมพาวนด์ ฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติม

แคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 97.25/2.5 95/5 90/10 และ 85/15 โดยนำ านักถูกผลิตที่ความหนา 50 ไมครอน फिल्मผสมที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าฟิล์มผสมที่ได้จะมีลักษณะขุ่นมากขึ้น ความใสลดลง และนำฟิล์มที่ผลิตได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 4.11 फिल्मหดรพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

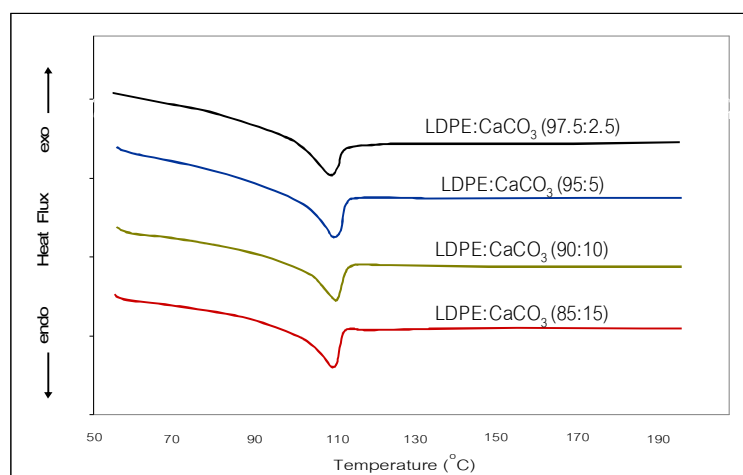
#### 4.4.1 สมบัติทางความร้อน (Thermal property)

สมบัติทางความร้อนของฟิล์มหดรพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	เอนทาลปี (จูล/กรัม)	ปริมาณผลึก (%)
1	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (97.5/2.5)	109	65.72	22.82
2	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (95/5)	110	68.39	23.75
3	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (90/10)	110	70.89	24.61
4	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (85/15)	109	74.43	25.84

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมพบว่า เทอร์โมแกรมที่ได้ปรากฏแค่หนึ่งพีคที่อุณหภูมิประมาณ 109-110 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจากการคำนวณหาค่าปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราส่วนของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น จาก 2.5% เป็น 15% โดยนี้ นัก ให้ค่าปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น จาก 22.82% เป็น 25.84% เป็นผลอันเนื่องมาจากสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีการกระจายตัวในเนื้อพอลิเอทิลีนได้ดี และทำตัวเป็นสารที่ช่วยก่อให้เกิดเป็นผลึกช่วยให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถเกิดเป็นผลึกได้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.12 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.4.2 สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.16 จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น จาก 2.5% เป็น 15% โดยนี้ นัก พบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 17.59 เมกะปาสคาลเป็น 23.26 เมกะปาสคาล ในด้านแนวตามเครื่องจักร และเพิ่มจาก 15.65 เมกะปาสคาล เป็น 21.45

เมกะปาสคาลในด้านแนวขวางเครื่องจักรตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องจากสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวภายในเนื้อพอลิเอทิลีนได้ดีและทำตัวเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเอทิลีน ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมที่ได้สามารถทนแรงดึงได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในฟิล์มผสมเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.16 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	17.15	11.11
2	LDPE	100	50	19.58	12.61
3	LDPE	100	70	22.41	13.06
4	LDPE	100	90	25.65	15.15
5	LDPE	100	110	28.19	16.98
6	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	97.5/2.5	50	17.59	15.65
7	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	95/5	50	19.62	16.63
8	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	90/10	50	21.74	18.28
9	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	85/15	50	23.26	21.45

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมที่อัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเทียบเท่ากับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 70 ไมครอน แต่เมื่อปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้นเป็น 15% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 90 ไมครอนเพียงเล็กน้อยในด้านแนวตามเครื่องจักร และเมื่อสังเกตผลที่ได้ในด้านแนวขวางเครื่องจักร เมื่อผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนมากกว่า 5% โดยน้ำหนักพบว่าให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ดีกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 110 ไมครอน



ผลของค่ายังสัมมูลย์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมทั้งในด้านแนวตามและแนวขวาง เครื่องจักรมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิเอทิลีนผสมเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัว และทำตัวเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยค่ายังสัมมูลย์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่ายังสัมมูลย์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	ยังสัมมูลย์ (MPa)	
		MD	TD
1	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (97.5/2.5)	132.35	145.97
2	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (95/5)	148.08	170.19
3	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (90/10)	155.28	174.79
4	LDPE/CaCO <sub>3</sub> (85/15)	182.12	180.88

#### 4.4.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของการผนึก (Seal strength)

ค่าความแข็งแรงของการผนึกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ถูกสรุปเป็นตารางทั้งด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร ดังแสดงในตารางที่ 4.18 จากผลการทดลองพบว่าทั้งในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรให้ผลในทำนองเดียวกันคือ เมื่ออัตราส่วนผสมของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจาก 2.5% เป็น 15% โดยนี้ หนักพบว่าค่าความแข็งแรงของการผนึกของฟิล์มผสมมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่มีค่าความแข็งแรงในการผนึกที่มากกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาเดียวกัน

ตารางที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	3.22	7.38
2	LDPE	100	50	4.69	7.54
3	LDPE	100	70	6.71	10.20
4	LDPE	100	90	8.66	11.11
5	LDPE	100	110	10.85	13.63
6	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	97.5/2.5	50	4.93	8.70
7	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	95/5	50	5.06	8.89
8	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	90/10	50	5.30	8.81
9	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	85/15	50	4.46	8.87

#### 4.4.4 สมบัติด้านความขุ่น (Haze)

จากผลการทดสอบวัดความขุ่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.19 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมมากขึ้น จาก 2.5% เป็น 15% โดยนี้ นักพบว่ามีความขุ่นเพิ่มขึ้น น้อย่างมากจาก 43.24 % เป็น 81.62% เป็นเพราะมีปริมาณอนุภาคของแคลเซียมที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.19 ค่าความชื้นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความชื้น (%)
1	LDPE	100	30	16.23
2	LDPE	100	50	16.34
3	LDPE	100	70	16.38
4	LDPE	100	90	16.72
5	LDPE	100	110	16.86
6	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	97.5/2.5	50	43.24
7	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	95/5	50	51.24
8	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	90/10	50	60.24
9	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	85/15	50	81.62

#### 4.4.5 สมบัติด้านความสามารถในการหดตัว (Shrink ability)

ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ทั้งด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักร สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ และฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	เปอร์เซ็นต์การหดตัว (%)	
				MD	TD
1	LDPE	100	30	83.07	26.86
2	LDPE	100	50	79.64	24.86
3	LDPE	100	70	77.93	23.50
4	LDPE	100	90	75.64	22.00
5	LDPE	100	110	71.86	20.79
6	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	97.5/2.5	50	79.79	24.64
7	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	95/5	50	81.14	26.43
8	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	90/10	50	82.29	27.64
9	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	85/15	50	83.71	27.93

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จาก 2.5% เป็น 15% โดยนี้ ำหนักให้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่เพิ่มมากขึ้น จาก 79.79% เป็น 83.71% และจาก 24.64% เป็น 27.93% ในด้านแนวตามและแนวขวางเครื่องจักรตามลำดับ จากผลที่ได้เป็นผลเนื่องจากสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าการนำความร้อน (Heat conductivity) อยู่ในช่วง 2.4-3.0 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส.เมตร ซึ่งมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.42-0.51 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส.เมตร [23] เมื่อสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตได้รับความร้อนจะสามารถส่งผ่านความร้อนที่ได้ไปยังพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมมีการหดตัวที่เพิ่มมากขึ้น

จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่าสูตรที่ให้สมบัติดีและเหมาะสมที่สุด คือที่อัตราส่วนผสม LDPE/CaCO<sub>3</sub> ที่ 90/10 โดยนี้ ำหนัก ซึ่งจะให้ค่าความแข็งแรงต่ง และความแข็งแรงของการน็อกดีใกล้เคียงฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนา 70 ไมครอน มีการหดตัวที่ดีมากขึ้น แต่ฟิล์มที่ดีมีความขุ่นที่เพิ่มมากขึ้น มาก ดังนั้นสูตรการผลิตนี้ จึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความใสของฟิล์มมากนัก โดยสูตรนี้ มีต้นทุนค่าวัตถุดิบที่ 48.4 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ซึ่งมีราคาต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตที่ 50.00 บาท/กิโลกรัม

#### 4.5 การคำนวณ และเปรียบเทียบต้นทุนฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมชนิดต่างๆ

จากการทดลองทั้งหมด เราสามารถคำนวณและสรุปต้นทุนวัตถุดิบของสูตรการผลิตทุกสูตรได้ดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ราคาต้นทุนวัตถุดิบของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (wt/wt)	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ราคาต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/กก)
1	LDPE	100	30	50.00
2	LDPE	100	50	50.00
3	LDPE	100	70	50.00
4	LDPE	100	90	50.00
5	LDPE	100	110	50.00
6	LDPE/HDPE	90/10	50	49.90
7	LDPE/HDPE	80/20	50	49.80
8	LDPE/HDPE	70/30	50	49.70
9	LDPE/HDPE	60/40	50	49.60
10	LDPE/MDPE	90/10	50	50.20
11	LDPE/MDPE	80/20	50	50.40
12	LDPE/MDPE	70/30	50	50.60
13	LDPE/MDPE	60/40	50	50.80
14	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	97.5/2.5	50	49.60
15	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	95/5	50	49.20
16	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	90/10	50	48.40
17	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	85/15	50	47.60

จากผลการทดลองเราจะได้สูตรการผลิตที่ดีที่สุดในแต่ละการทดลอง โดยสูตรการผลิตที่ดีที่สุดนี้ สามารถคำนวณต้นทุนที่แตกต่างเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ โดยคำนวณได้ดังสมการด้านล่างนี้ และสรุปได้ดังตารางที่ 4.22

$$\text{ต้นทุนที่แตกต่าง} = [(d_m \times t_m \times P_m) - (d_p \times t_p \times P_p)] \times 100\% / (d_p \times t_p \times P_p)$$

โดยที่  $d_m$  และ  $d_p$  คือ ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนผสม และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ตามลำดับ

$t_m$  และ  $t_p$  คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสม และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่เทียบเท่าตามลำดับ

$P_m$  และ  $P_p$  คือ ราคาต่อกิโลกรัมของพอลิเอทิลีนผสม และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ตามลำดับ

จากผลที่ได้พบว่าราคาต้นทุนต่อกิโลกรัมของพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีราคาต่ำกว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ อยู่เล็กน้อย ในขณะที่พอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางมี ราคาที่แพงกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วน 30% โดยน้ำหนักพบว่าให้ผลดีใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 90 ไมครอนแต่มีต้นทุนที่น้อยกว่า 44.08% และ 43.76% ตามลำดับ และในส่วนของสารเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักให้สมบัติใกล้เคียงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 70 ไมครอน แต่มีต้นทุนที่ต่ำ 30.65%

ตารางที่ 4.22 ต้นทุนที่แตกต่างของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนที่ดีที่สุด

ลำดับที่	สูตรการผลิต	อัตราส่วน (โดยน้ำหนัก)	ราคาต่อกิโลกรัม (บาท)	ดีเทียบเท่ากับ ความหนาของฟิล์ม LDPE (ไมครอน)	ความหนาที่ลดลง (%)	ต้นทุนที่แตกต่าง (บาท)
1	LDPE	100	50	-	-	-
2	LDPE/HDPE	70/30	49.7	90	(-44.44%)	(-44.08%)
3	LDPE/MDPE	70/30	50.6	90	(-44.44%)	(-43.76%)
4	LDPE/CaCO <sub>3</sub>	90/10	48.4	70	(-28.57%)	(-30.65%)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปได้ว่าความหนาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์สามารถลดลงได้ โดยการผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง หรือสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ โดยสูตรที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดคือ เมื่อเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วน 30% โดยน้ำหนักสมบัติของฟิล์มที่ได้จะใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 90 ไมครอน แต่มีสมบัติการหดตัวที่ลดลง และมีความขุ่นที่มากขึ้น และการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10% โดยน้ำหนักให้ฟิล์มที่มีสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 70 ไมครอน แต่ฟิล์มที่ได้จะมีความขุ่นที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากโดยฟิล์มทั้งสามสูตรที่ได้ยังมีผลทำให้ต้นทุนในการผลิตมีค่าลดลง 44.08% 43.76% และ 30.65% ตามลำดับด้วย ซึ่งเป็นแนวทางที่ดีที่จะช่วยลดปริมาณการใช้งานพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ลงเนื่องจากความหนาที่ลดลง และยังเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย การปรับปรุงให้สมบัติทางด้านการหดตัว และความขุ่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมดีขึ้น ควรได้รับการศึกษาการศึกษาเพิ่มเติม โดยการผสมด้วยพอลิเมอร์หรือสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นิทัศน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์ ชุดที่1. เชียงใหม่ : ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [2] Google. Shrink film. [online]. 2010. <<http://www.google.co.th>> [Mar 11, 2010].
- [3] Thomas, I. B. Film extrusion manual. United States of America : TAPPI PRESS, 2005.
- [4] Kirk, C. Blown Film Extrusion. Munich : Hanser Publishers, 2006.
- [5] Odian, G. Principles of polymerization. United States of America : John Wiley & Sons, Inc., Publishers, 2004.
- [6] Wikipedia. Medium density polyethylene. [online]. 2010. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Medium\\_density\\_polyethylene](http://en.wikipedia.org/wiki/Medium_density_polyethylene)> [Apr 8, 2010].
- [7] บรรณ เลง ศรีนิล. เทคโนโลยีพลาสติก พิมพ์ครั้งที่ 15 กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) 2546.
- [8] พจนานุกรมศัพท์พอลิเมอร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถานพิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : แปลงพี นิตย, 2546.
- [9] Osborn, K.; Jenkins, W. Plastic film technology and packaging applications United States of America : CRC Press, 1992.
- [10] Zhu, H.; et al. Influence of molecular architecture and melt rheological characteristic on the optical properties of LDPE blown films. Journal of Polymer 48 (2007) : 5098-5106.
- [11] Torress, A.; et al. Properties predictor for hdpe/ldpe/lldpe blends for shrink film applications. Journal of Plastic film and Sheeting (2006) ; 22-29.
- [12] Munaro, M.; Akcelrud, L. Polyethylene blends: A correlation study between morphology and environmental resistance. Journal of Polymer Degradation and Stability 93 (2008) : 43-49.
- [13] Gonzalez, J.; et al. Effects of coupling agents on mechanical and morphological behavior of the PP/HDPE blend with two different CaCO<sub>3</sub>. European Polymer Journal 38 (2002) : 2465-2475.
- [14] Strapasson, R.; Amico, S.C.; Pereira, M.F.R.; Sydenstricker, T.H.D. Tensile and impact behavior of polypropylene/low density polyethylene blends. Journal of Polymer Testing 24 (2005) : 468-473.



- [15] Faker, M.; Razavi, A. M.K.; Ghaffari, M.; Seyyedi, S.A. Rheology morphology and mechanical properties of polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (PE/EVA) blends. European Polymer Journal 44 (2008) : 1834-1842.
- [16] Pedrosom, A.G.; Rosa, D.S. Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. Journal of Polymer Testing 24 (2005) : 468-473.
- [17] Gui, F.S.; Wei, Y.; Bang, H.X.; Ming, B.Y. Mechanical Properties and Morphology of LDPE/PP Blends. Journal of Macromolecular Science 46 (2007) : 963-974.
- [18] Levita, G.; Marchetti, A.; Lazzeri, A. Fracture of ultrafine calcium carbonate/polypropylene composites. Journal of Polymer composite 10 (1) (2004) : 39-43.
- [19] Alicia, L.; Marcelo, A.V. Optical properties of CaCO<sub>3</sub>-filled poly(ethylene-co-vinyl acetate) films. Journal of Optical Materials 17 (2001) : 437-442.
- [20] Kartalis, C.N.; Papaspyrides, C.D.; Pfaendner, R. Recycling of post-used PE packaging film using the restabilization technique. Journal of Polymer Degradation and Stability 70 (2000) : 189-197.
- [21] Abdel-Bary, E.M.; Ismail, M.N.; Yehiab, A.A.; Abdel-Hakhd, A.A. Recycling of polyethylene films used in greenhouses-development of multilayer plastic films. Journal of Polymer Degradation and Stability 62 (1998) : 111-115.
- [22] Tzankova, D.N.; La Mantia, F.P.; Scaffaro, R.; Paci, M.; Acierno, D.; Camino, G. Reprocessing and restabilization of greenhouse films. Journal of Polymer Degradation and Stability 75 (2002) : 459-464.
- [23] Guy, A.R. Calcium carbonates for polyolefin extrusion coating applications. TAPPI Polymers, Laminations and Coatings Conference Proceedings (2004)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
 ปริสุทธิที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	16.45	16.93	24.67	20.72	25.32
2	16.57	17.03	25.71	20.82	26.32
3	16.60	17.19	20.69	22.21	26.76
4	16.88	17.53	20.79	22.24	27.11
5	17.06	17.86	20.96	23.82	27.22
6	17.27	19.27	21.19	24.70	27.57
7	17.42	19.75	21.64	28.22	27.59
8	17.60	22.56	21.75	30.79	29.63
9	17.65	23.80	22.65	31.27	29.84
10	17.96	23.88	24.03	31.71	34.51
AVG	17.15	19.58	22.41	25.65	28.19
STD	0.52	2.82	1.79	4.43	2.61

ตาราง ก2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
 ปริสุทธิที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	8.17	9.58	11.13	11.53	16.12
2	8.50	9.71	10.27	13.68	16.26
3	8.72	10.31	10.21	14.72	16.59
4	8.82	11.72	12.11	15.29	16.74
5	10.21	13.37	12.53	15.40	16.88
6	12.16	13.65	12.91	15.77	16.94
7	8.03	13.71	13.16	15.82	16.95
8	13.11	13.35	15.73	16.05	16.98
9	17.80	14.89	16.12	16.61	17.29
10	15.53	15.80	16.40	16.64	19.01
AVG	11.11	12.61	13.06	15.15	16.98
STD	3.43	2.17	2.32	1.55	0.80

ตาราง ก3 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	19.58	19.92	23.17	28.50
2	20.93	20.38	23.69	28.52
3	22.04	22.50	24.49	29.20
4	22.50	23.64	24.61	29.55
5	22.57	23.90	24.94	30.74
6	23.08	24.61	24.94	30.88
7	23.56	24.75	25.60	30.92
8	23.72	25.23	26.20	31.03
9	24.54	25.92	27.34	31.05
10	24.58	27.77	28.22	31.47
AVG	22.71	23.86	25.32	30.19
STD	1.57	2.41	1.57	1.12

ตาราง ก4 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	11.21	12.36	16.24	17.59
2	11.68	13.69	16.30	17.78
3	11.76	14.26	16.31	17.86
4	11.93	14.40	17.37	18.08
5	11.94	14.77	17.75	18.09
6	12.02	14.83	17.83	18.11
7	12.33	14.85	18.05	18.52
8	12.46	15.28	18.07	18.71
9	12.53	16.14	18.16	19.10
10	13.25	17.16	19.30	19.62
AVG	12.11	14.77	17.54	18.35
STD	0.56	1.30	1.00	0.64

ตาราง ก5 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	19.22	20.89	21.34	26.83
2	19.63	22.14	22.40	26.93
3	19.73	22.27	22.87	27.29
4	20.47	22.56	23.65	28.76
5	20.56	22.59	24.09	28.86
6	20.92	23.96	24.20	28.86
7	21.35	25.49	24.61	29.20
8	22.07	26.02	27.09	30.37
9	24.44	26.29	29.03	30.37
10	25.64	26.79	29.39	30.52
AVG	21.40	23.90	24.87	28.80
STD	2.11	2.09	2.75	1.40



ตาราง ก6 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	15.72	19.36	21.06	21.71
2	16.99	19.85	21.83	21.77
3	17.50	19.89	22.16	22.17
4	18.11	19.94	22.24	22.47
5	19.24	20.85	22.25	22.81
6	20.39	21.56	22.35	23.16
7	21.17	21.69	22.50	23.42
8	11.26	22.04	22.87	23.82
9	11.89	22.54	23.27	23.85
10	24.63	22.88	23.36	25.99
AVG	17.69	21.06	22.39	23.12
STD	4.08	1.25	0.68	1.27

ตาราง ก7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	14.54	15.83	18.28	20.69
2	15.53	16.55	18.39	21.26
3	15.85	16.57	19.06	21.97
4	16.31	17.32	20.53	22.31
5	16.42	17.84	20.54	22.36
6	17.47	19.94	22.89	23.34
7	17.48	20.60	24.14	23.65
8	19.01	23.34	24.18	25.19
9	21.22	23.42	24.48	25.88
10	22.10	24.76	24.89	25.98
AVG	17.59	19.62	21.74	23.26
STD	2.48	3.29	2.66	1.89

ตาราง ก8 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	12.11	13.25	18.39	15.31
2	12.12	14.08	19.16	15.77
3	14.78	15.53	19.41	17.04
4	14.79	16.06	19.60	19.56
5	16.76	16.25	20.30	20.83
6	16.94	16.60	14.77	22.94
7	17.04	17.50	16.92	24.27
8	17.14	18.39	17.66	24.98
9	17.14	19.16	17.73	25.61
10	17.65	19.41	18.94	28.16
AVG	15.65	16.63	18.28	21.45
STD	2.10	2.04	1.60	4.45

ตาราง ก9 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
บริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	3.07	4.31	6.44	8.09	10.29
2	3.12	4.46	6.45	8.10	10.33
3	3.19	4.50	6.46	8.29	10.66
4	3.21	4.63	6.59	8.54	10.74
5	3.21	4.66	6.75	8.79	10.74
6	3.23	4.66	6.78	8.87	10.74
7	3.24	4.73	6.85	8.91	10.94
8	3.29	4.80	6.85	8.97	11.04
9	3.30	5.03	6.86	9.02	11.46
10	3.31	5.17	7.10	9.05	11.53
AVG	3.22	4.69	6.71	8.66	10.85
STD	0.08	0.26	0.22	0.38	0.41

ตาราง ก10 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
บริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	6.64	6.78	9.60	10.11	12.44
2	6.78	6.85	9.78	10.16	12.62
3	6.87	6.88	9.87	10.79	12.75
4	7.08	7.03	9.87	10.88	13.43
5	7.17	7.11	9.90	10.98	13.58
6	7.65	7.17	10.28	11.17	13.58
7	7.73	8.07	10.32	11.34	13.94
8	7.81	8.25	10.35	11.59	14.48
9	8.04	8.49	10.96	11.92	14.53
10	8.04	8.80	11.07	12.14	14.95
AVG	7.38	7.54	10.20	11.11	13.63
STD	0.53	0.77	0.50	0.67	0.86

ตาราง ก11 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	6.00	6.57	6.96	8.07
2	6.05	6.60	6.97	8.12
3	6.10	6.63	6.98	8.26
4	6.17	6.75	7.01	8.27
5	6.22	6.86	7.09	8.32
6	6.28	6.89	7.13	8.36
7	6.32	6.95	7.14	8.38
8	6.39	6.96	7.21	8.39
9	6.40	7.01	7.30	8.49
10	6.47	7.02	7.52	8.50
AVG	6.24	6.82	7.13	8.32
STD	0.16	0.17	0.18	0.14

ตาราง ก12 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	9.79	10.82	11.34	11.44
2	9.83	10.85	11.34	11.68
3	10.00	11.03	11.38	11.76
4	10.10	11.07	11.51	11.91
5	10.11	11.17	11.65	12.14
6	10.13	11.33	11.71	12.19
7	10.27	11.34	11.80	12.27
8	10.69	11.43	11.80	12.41
9	10.72	11.47	11.90	12.43
10	10.97	11.90	12.25	13.13
AVG	10.26	11.24	11.67	12.13
STD	0.40	0.33	0.29	0.48

ตาราง ก13 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	4.73	6.09	5.59	6.78
2	4.83	6.38	5.64	6.82
3	4.84	4.82	5.70	6.90
4	5.05	4.96	5.77	6.93
5	5.18	5.04	5.81	6.94
6	5.24	5.17	5.81	6.94
7	5.26	5.26	5.83	6.99
8	5.42	5.43	5.95	7.09
9	5.68	5.45	6.09	7.22
10	5.77	5.74	6.17	7.33
AVG	5.20	5.43	5.84	6.99
STD	0.35	0.50	0.19	0.17



ตาราง ก14 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	9.08	9.94	11.18	11.68
2	9.13	9.96	11.31	11.82
3	9.21	10.05	11.52	11.92
4	9.21	10.08	11.80	12.07
5	9.32	10.28	11.91	12.22
6	9.46	10.39	11.97	12.34
7	9.47	10.40	12.04	12.49
8	9.70	10.54	12.13	12.72
9	9.72	10.90	12.17	13.22
10	10.00	10.96	12.30	13.24
AVG	9.43	10.35	11.83	12.37
STD	0.30	0.37	0.38	0.55

ตาราง ก15 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	4.36	4.72	4.98	4.24
2	4.71	4.83	5.00	4.32
3	4.81	4.85	5.03	4.35
4	4.87	4.88	5.22	4.39
5	5.01	4.94	5.33	4.41
6	5.04	5.06	5.38	4.41
7	5.10	5.19	5.44	4.46
8	5.12	5.25	5.50	4.53
9	5.13	5.33	5.56	4.54
10	5.16	5.55	5.57	4.95
AVG	4.93	5.06	5.30	4.46
STD	0.24	0.25	0.23	0.20

ตาราง ก16 ค่าความแข็งแรงของการฉีกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่าความแข็งแรงของการฉีก (N/cm)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	8.09	8.23	8.34	8.27
2	8.28	8.48	8.34	8.32
3	8.50	8.66	8.43	8.51
4	8.51	8.78	8.60	8.63
5	8.60	8.82	8.71	8.69
6	8.89	8.91	8.79	8.85
7	8.97	9.11	8.83	9.01
8	9.03	9.19	9.17	9.15
9	9.03	9.33	9.41	9.32
10	9.09	9.40	9.44	9.95
AVG	8.70	8.89	8.81	8.87
STD	0.33	0.38	0.41	0.51

ตาราง ก17 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	154.50	125.10	182.39	122.84	155.75
2	143.20	134.47	198.09	30.79	165.42
3	161.84	133.23	146.02	170.75	178.19
4	161.44	138.63	144.24	168.68	171.29
5	140.02	143.28	145.73	163.52	168.56
6	143.39	155.55	169.05	170.88	170.52
7	154.48	153.72	139.38	185.17	164.66
8	160.86	150.77	141.81	212.23	188.42
9	147.80	196.12	157.65	204.92	183.18
10	171.69	212.60	156.57	204.62	211.46
AVG	153.92	154.35	158.09	163.44	175.75
STD	10.22	28.32	19.49	53.38	15.73

ตาราง ก18 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	128.30	123.95	185.47	145.83	180.15
2	141.07	106.08	170.34	154.15	192.08
3	142.25	92.08	162.92	130.70	196.79
4	146.91	102.55	151.13	191.50	167.49
5	157.46	231.91	169.19	141.81	185.97
6	233.63	258.66	147.49	204.38	209.15
7	123.11	119.19	174.92	204.59	162.95
8	145.18	245.65	161.43	225.90	200.04
9	136.81	115.16	154.01	203.05	162.86
10	147.56	211.84	166.12	150.36	172.08
AVG	150.23	160.71	164.30	175.23	182.96
STD	30.91	67.26	11.53	33.90	16.44

ตาราง ก19 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	166.50	238.20	214.91	343.53
2	187.89	191.79	243.42	287.73
3	228.63	234.14	262.51	344.03
4	219.05	261.08	219.00	318.25
5	210.84	249.94	252.60	336.42
6	227.58	248.48	258.33	370.11
7	231.01	262.98	302.50	385.31
8	249.43	252.63	267.14	313.07
9	240.86	258.76	305.22	343.31
10	231.82	304.85	285.22	330.80
AVG	219.36	250.29	261.09	337.26
STD	25.10	28.22	30.87	27.79

ตาราง ก20 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	206.55	220.26	271.92	360.56
2	205.36	229.27	275.33	363.18
3	207.05	259.15	271.96	334.80
4	209.53	272.06	324.43	360.27
5	220.72	282.20	324.34	347.48
6	215.78	292.20	292.69	366.70
7	214.28	333.31	277.16	322.90
8	224.77	291.78	299.39	431.22
9	217.45	283.74	281.31	362.40
10	248.99	289.09	298.88	336.78
AVG	217.05	275.31	291.74	358.63
STD	12.94	32.74	20.05	29.48

ตาราง ก21 ค่ายังส์มอดุลัสฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	136.43	160.86	156.13	162.52
2	147.61	147.76	172.59	166.57
3	162.38	157.69	173.22	160.79
4	156.15	144.09	152.19	216.17
5	166.61	139.72	160.03	188.46
6	165.18	161.11	178.18	193.17
7	165.31	173.53	174.88	212.23
8	167.31	184.92	156.65	222.39
9	205.62	202.94	233.91	229.09
10	187.25	203.62	194.30	210.82
AVG	165.98	167.63	175.21	196.22
STD	19.29	23.07	24.26	25.76



ตาราง ก22 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	122.42	169.77	225.26	164.94
2	137.19	128.40	228.78	163.23
3	142.73	150.89	206.82	207.47
4	136.17	158.18	199.17	220.81
5	153.15	133.62	160.86	211.66
6	160.71	204.99	172.16	222.58
7	163.48	129.17	215.64	224.29
8	202.84	214.45	148.17	235.16
9	214.09	203.70	155.89	217.20
10	199.70	223.34	161.56	247.63
AVG	163.25	171.65	187.43	211.50
STD	31.78	37.09	30.90	27.46

ตาราง ก23 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	89.13	107.23	145.42	186.95
2	136.28	114.70	142.67	133.60
3	122.86	105.06	137.75	181.30
4	129.50	150.42	140.15	175.86
5	116.60	131.84	142.53	197.11
6	115.42	147.76	195.69	178.81
7	128.47	171.65	157.25	161.59
8	128.16	183.17	148.27	215.15
9	172.44	168.59	154.55	170.97
10	184.64	200.35	188.56	219.87
AVG	132.35	148.08	155.28	182.12
STD	27.67	33.07	20.41	25.20

ตาราง ก24 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวาง เครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ค่ายังส์มอดุลัส (MPa)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	219.19	138.48	130.29	118.36
2	206.41	242.81	225.69	144.02
3	107.77	257.16	116.35	108.81
4	96.06	234.72	141.05	167.07
5	101.32	100.91	232.40	164.18
6	100.08	114.42	140.77	214.64
7	130.24	130.29	180.88	213.05
8	185.75	225.69	209.01	216.40
9	210.19	116.35	152.11	221.52
10	102.67	141.05	219.35	240.73
AVG	145.97	170.19	174.79	180.88
STD	52.59	61.77	43.85	46.67

ตาราง ก25 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	1.75	2.05	2.20	2.35	2.70
2	1.70	2.00	2.15	2.45	2.75
3	1.75	2.10	2.25	2.40	2.85
4	1.70	1.90	2.25	2.50	2.85
5	1.65	2.15	2.25	2.40	2.80
6	1.60	2.00	2.20	2.50	2.90
7	1.70	2.05	2.15	2.45	2.85
AVG	1.69	2.04	2.21	2.44	2.81
STD	0.05	0.08	0.04	0.06	0.07
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	83.07	79.64	77.93	75.64	71.86

ตาราง ก26 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)				
	LDPE				
	30 $\mu$ m	50 $\mu$ m	70 $\mu$ m	90 $\mu$ m	110 $\mu$ m
1	7.35	7.45	7.60	7.80	7.95
2	7.30	7.60	7.65	7.75	7.85
3	7.25	7.55	7.65	7.80	7.95
4	7.20	7.50	7.70	7.75	8.00
5	7.30	7.55	7.75	7.75	7.85
6	7.35	7.50	7.65	7.90	7.95
7	7.45	7.45	7.55	7.85	7.90
AVG	7.31	7.51	7.65	7.80	7.92
STD	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	26.86	24.86	23.50	22.00	20.79

ตาราง ก27 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	2.10	2.65	3.10	3.35
2	2.15	2.65	3.20	3.30
3	2.05	2.75	3.25	3.40
4	2.15	2.75	3.05	3.25
5	2.05	2.80	3.15	3.45
6	2.20	2.70	3.20	3.40
7	2.00	2.90	3.15	3.40
AVG	2.10	2.74	3.16	3.36
STD	0.07	0.09	0.07	0.07
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	79.00	72.57	68.43	66.36

ตาราง ก28 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	7.50	7.80	8.00	8.55
2	7.50	7.60	8.15	8.50
3	7.55	7.90	8.05	8.45
4	7.65	7.80	8.25	8.60
5	7.60	7.70	8.25	8.55
6	7.55	7.73	8.20	8.50
7	7.70	7.77	8.05	8.35
AVG	7.58	7.76	8.14	8.50
STD	0.08	0.09	0.10	0.08
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	24.21	22.43	18.64	15.00

ตาราง ก29 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	2.05	2.35	2.65	2.90
2	2.05	2.45	2.65	2.95
3	2.10	2.30	2.70	2.90
4	2.15	2.50	2.80	2.95
5	2.15	2.30	2.75	3.00
6	1.95	2.40	2.75	3.05
7	2.05	2.35	2.80	2.85
AVG	2.07	2.38	2.73	2.94
STD	0.07	0.08	0.06	0.07
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	79.29	76.21	72.71	70.57



ตาราง ก30 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	7.80	7.70	8.00	8.35
2	7.80	7.70	8.10	8.25
3	7.70	7.80	8.20	8.25
4	7.60	7.90	8.20	8.25
5	7.60	7.90	8.20	8.35
6	7.60	8.00	8.25	8.25
7	7.66	7.81	8.14	8.40
AVG	7.68	7.83	8.16	8.30
STD	0.09	0.11	0.08	0.06
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	23.20	21.70	18.44	17.00

ตาราง ก31 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวตามเครื่องจักร (MD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	2.05	1.95	1.85	1.75
2	2.10	1.90	1.85	1.60
3	2.05	1.95	1.80	1.70
4	2.05	1.90	1.75	1.65
5	1.90	1.85	1.75	1.55
6	1.95	1.85	1.70	1.65
7	2.05	1.80	1.70	1.50
AVG	2.02	1.89	1.77	1.63
STD	0.07	0.06	0.06	0.09
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	79.79	81.14	82.29	83.71

ตาราง ก32 ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ในด้านแนวขวางเครื่องจักร (TD)

ลำดับที่	ขนาดที่วัดได้ (cm)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	7.45	7.30	7.30	7.25
2	7.50	7.45	7.25	7.25
3	7.65	7.35	7.15	7.20
4	7.55	7.40	7.35	7.20
5	7.60	7.35	7.20	7.15
6	7.55	7.30	7.20	7.10
7	7.45	7.35	7.20	7.30
AVG	7.54	7.36	7.24	7.21
STD	0.07	0.05	0.07	0.07
เปอร์เซ็นต์ หดตัว (%)	24.64	26.43	27.64	27.93

ตาราง ก33 ค่าความชื้นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา  
ต่างๆ

ลำดับที่	ค่าความชื้น (%)				
	LDPE				
	30 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	110 $\mu\text{m}$
1	16.03	16.30	16.40	16.70	16.80
2	16.20	16.40	16.50	16.80	16.70
3	16.30	16.20	16.30	16.70	17.10
4	16.10	16.40	16.40	16.60	16.90
5	16.30	16.40	16.30	16.80	16.80
AVG	16.23	16.34	16.38	16.72	16.86
STD	0.10	0.09	0.08	0.08	0.15

ตาราง ก34 ค่าความชื้นของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วนต่างๆ

ลำดับที่	ค่าความชื้น (%)			
	LDPE/HDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	17.70	20.50	23.60	22.70
2	17.50	21.00	21.90	22.30
3	18.00	19.79	24.90	24.20
4	18.90	20.60	26.00	26.40
5	18.90	21.60	23.60	27.40
AVG	18.20	20.70	24.00	24.60
STD	0.66	0.67	1.54	2.24

ตาราง ก35 ค่าความชื้นของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วนต่างๆ

ลำดับที่	ค่าความชื้น (%)			
	LDPE/MDPE			
	90/10	80/20	70/30	60/40
1	19.10	21.30	22.40	26.20
2	20.80	22.90	24.30	24.10
3	18.90	23.10	20.70	23.60
4	16.90	20.50	23.60	23.30
5	18.90	19.79	20.10	21.90
AVG	18.92	21.52	22.22	23.82
STD	1.38	1.46	1.81	1.56

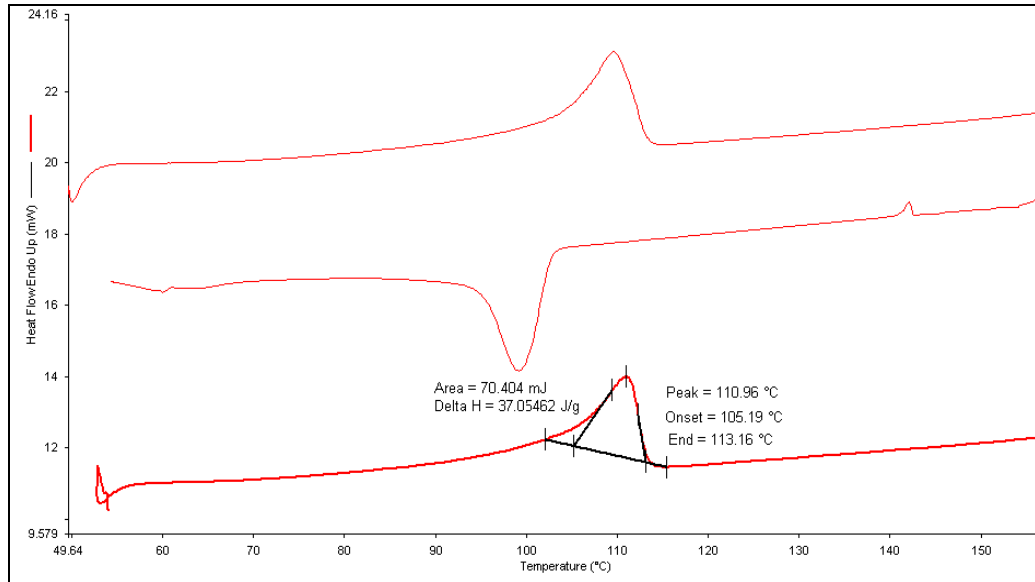
ตาราง ก36 ค่าความชื้นของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนต่างๆ

ลำดับที่	ค่าความชื้น (%)			
	LDPE/CaCO <sub>3</sub>			
	97.5/2.5	95/5	90/10	85/15
1	40.59	50.00	58.70	79.00
2	40.70	50.40	59.20	80.00
3	41.10	50.70	60.40	80.80
4	46.70	51.80	60.50	83.10
5	47.10	53.30	62.40	85.20
AVG	43.24	51.24	60.24	81.62
STD	3.35	1.33	1.43	2.51

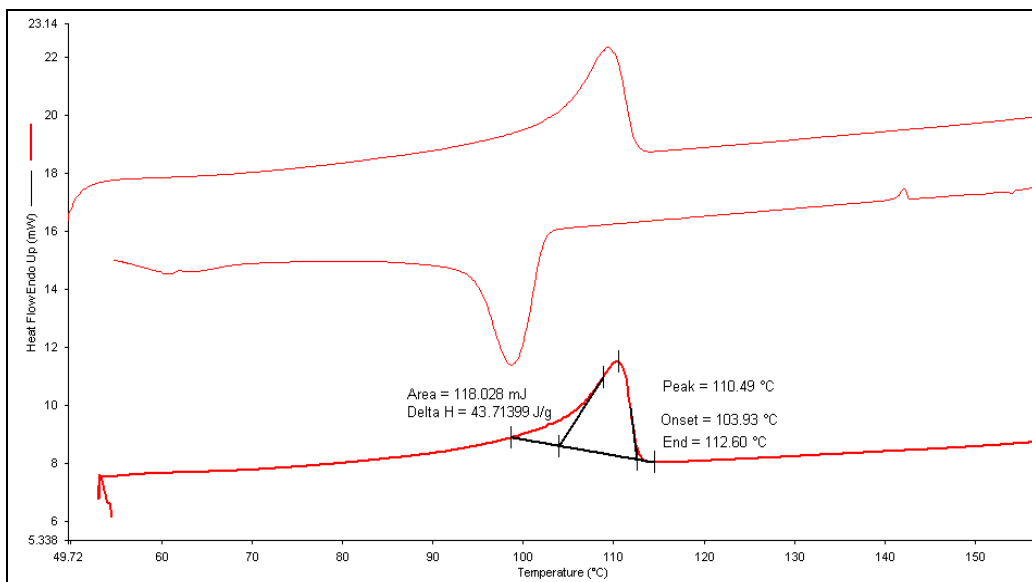
ภาคผนวก ข



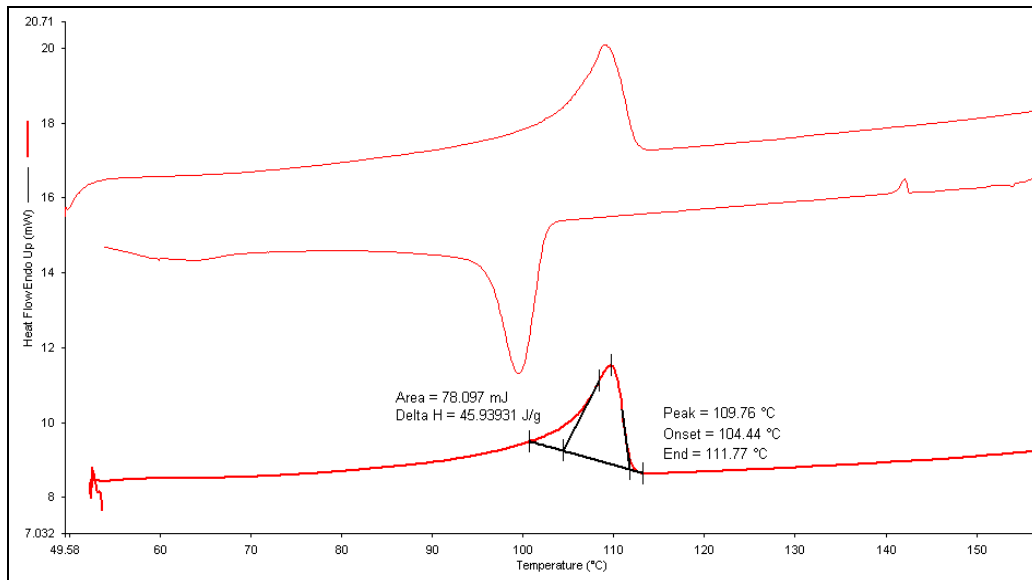
รูปที่ ข1 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 30 ไมครอน



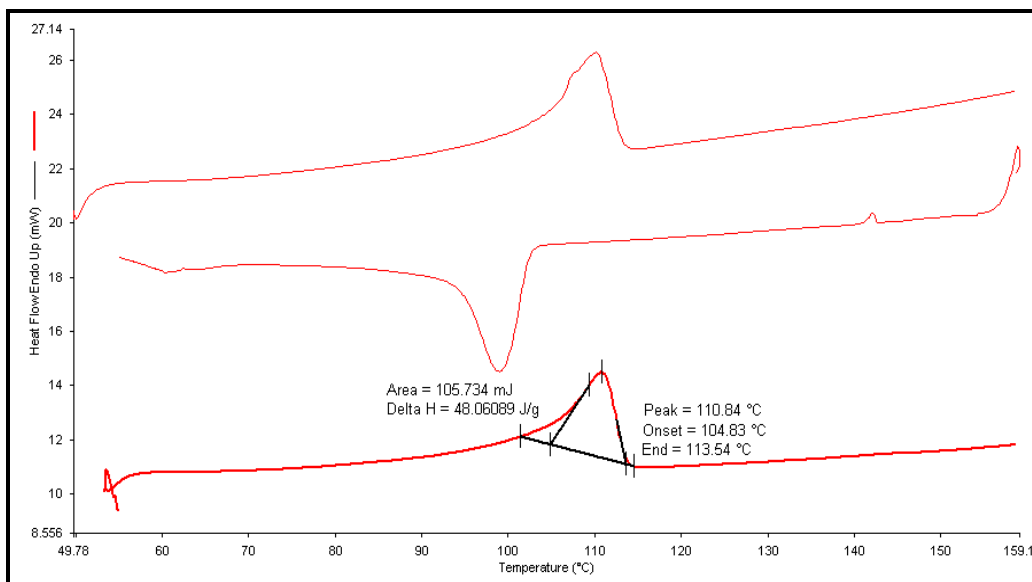
รูปที่ ข2 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 50 ไมครอน



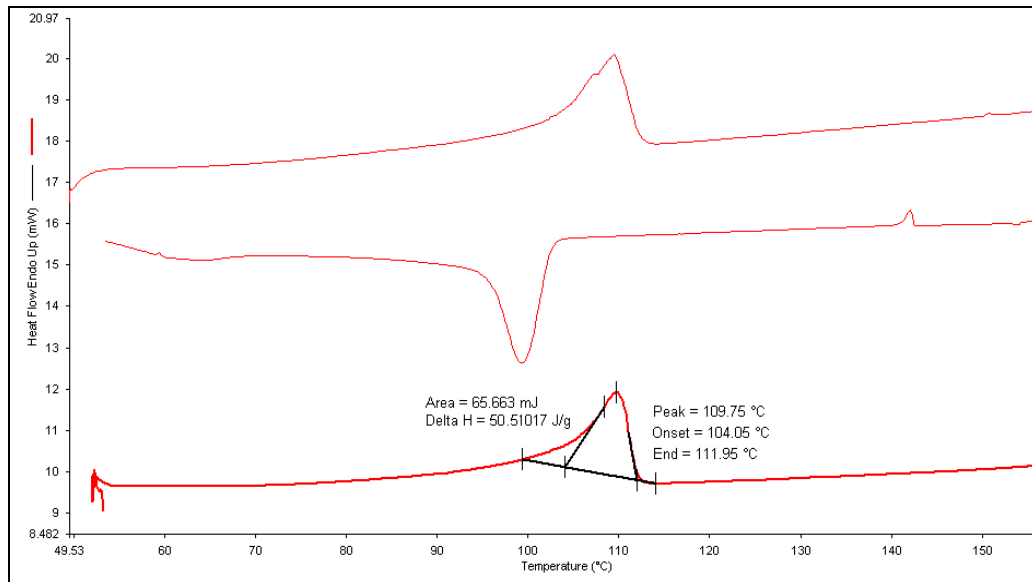
รูปที่ ข3 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่มีความหนา 70 ไมครอน



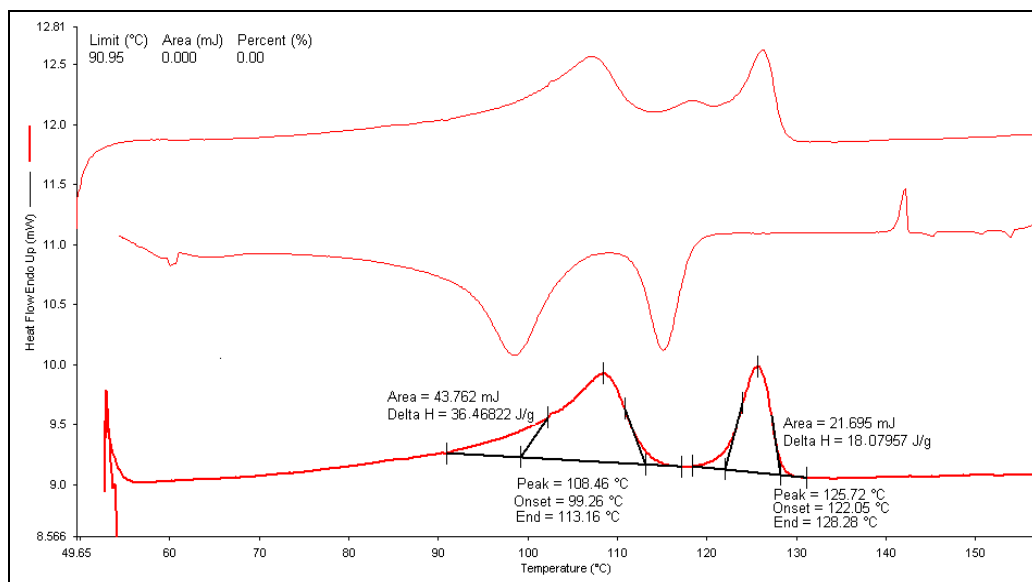
รูปที่ ข4 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่มีความหนา 90 ไมครอน



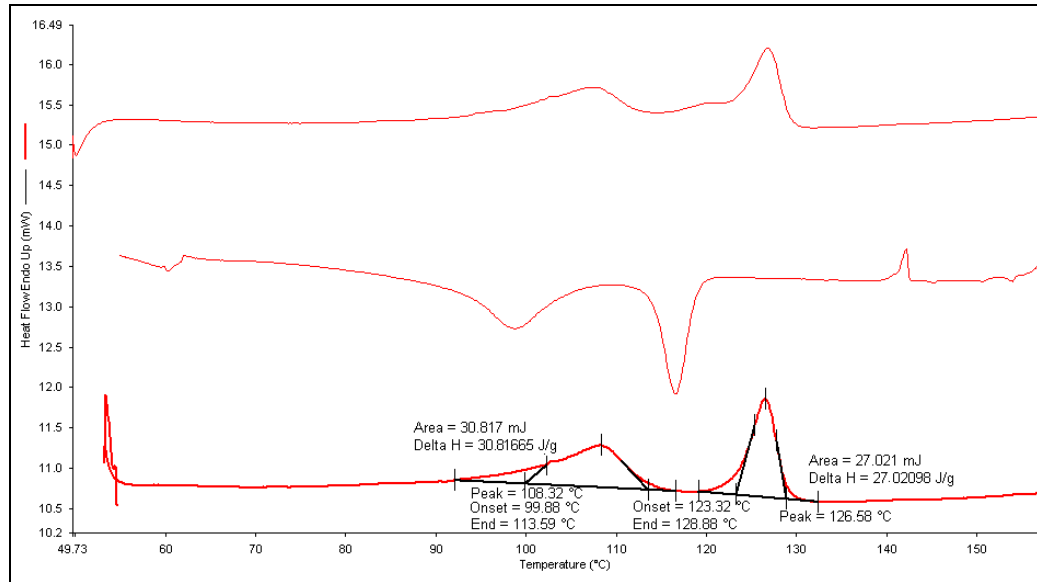
รูปที่ ข5 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ที่ความหนา 110 ไมครอน



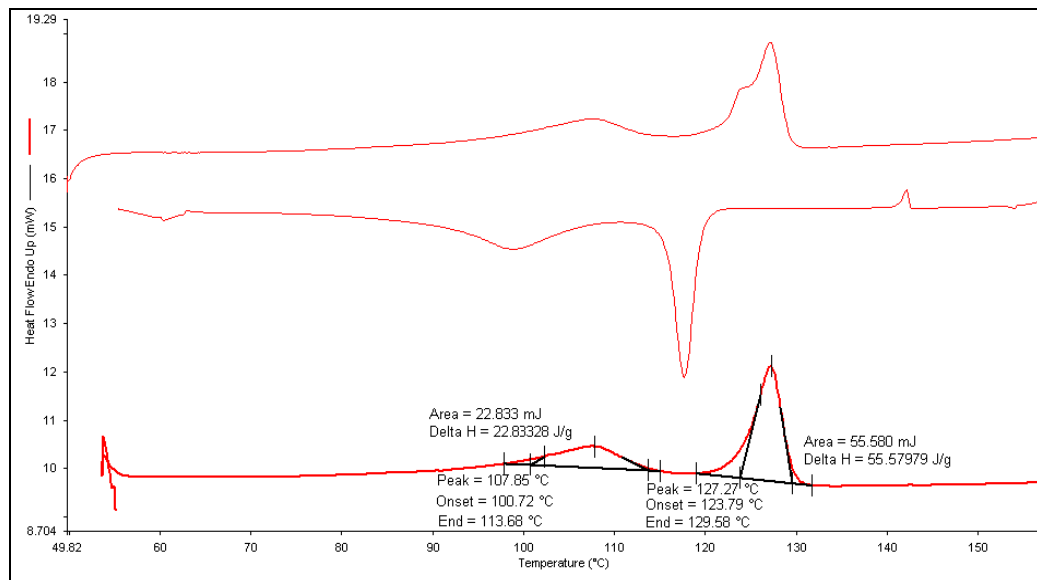
รูปที่ ข6 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน 90/10



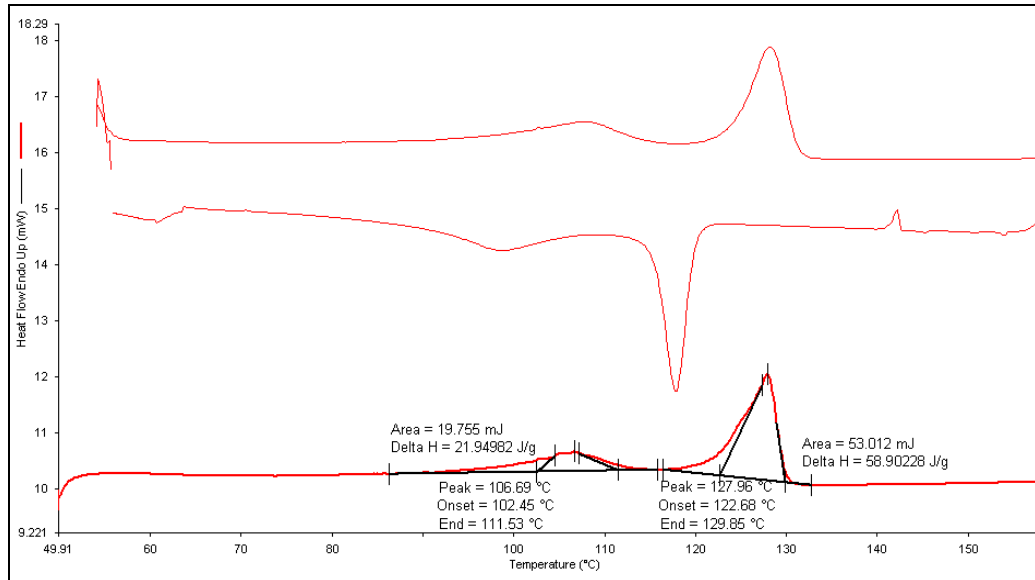
รูปที่ ข7 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน80/20



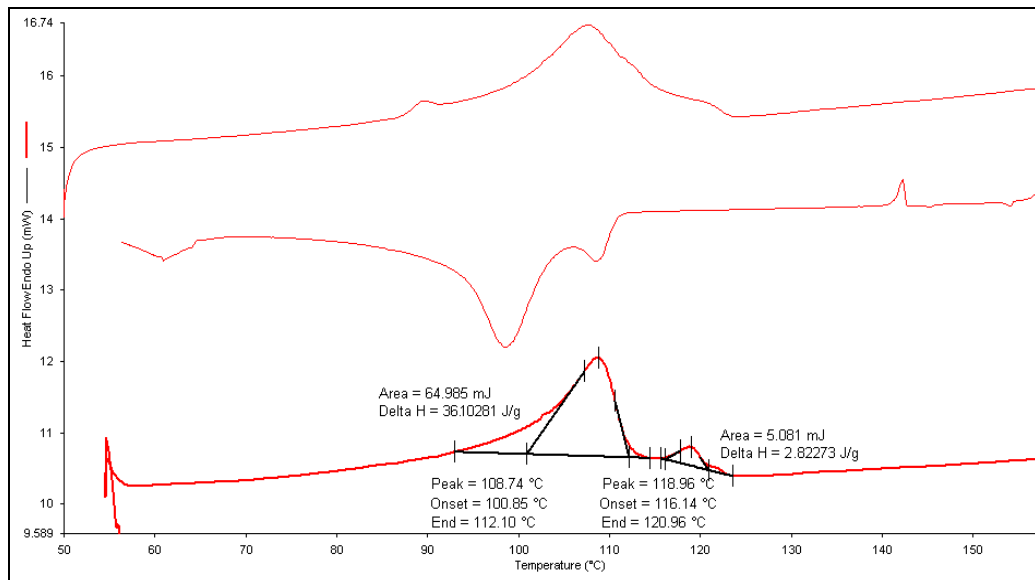
รูปที่ ข8 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน70/30



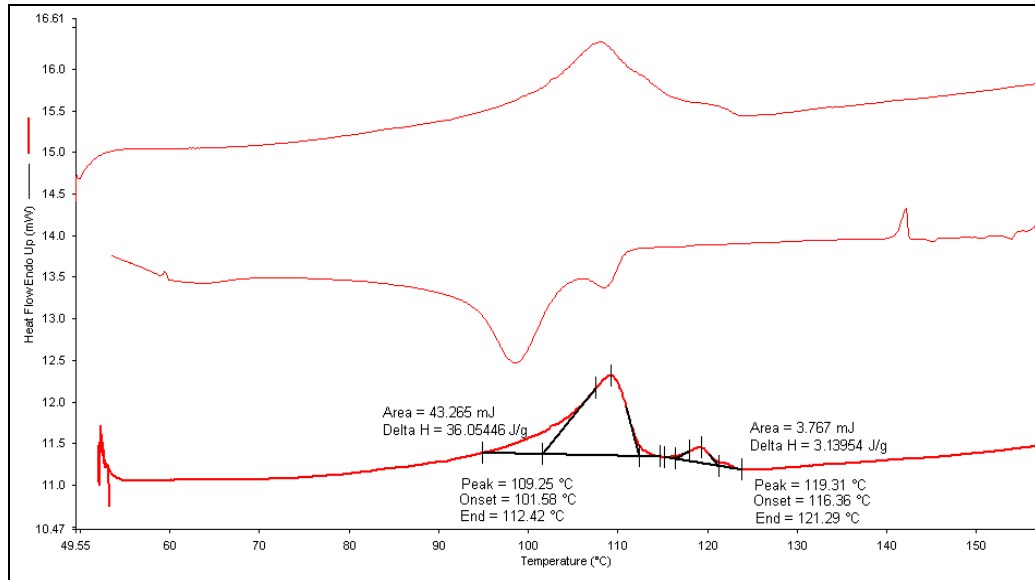
รูปที่ ข9 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่อัตราส่วน60/40



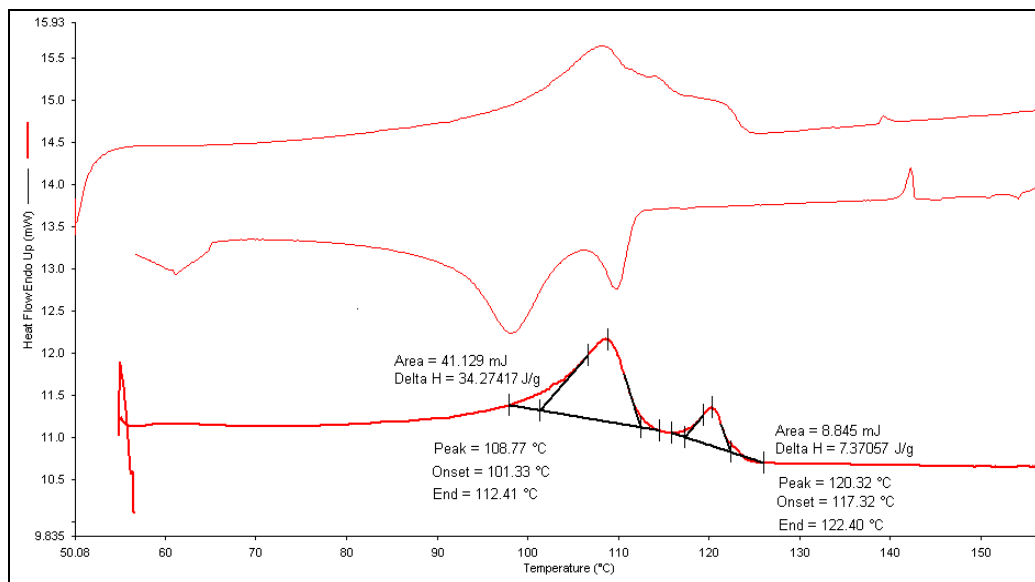
รูปที่ ข10 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตราส่วน90/10



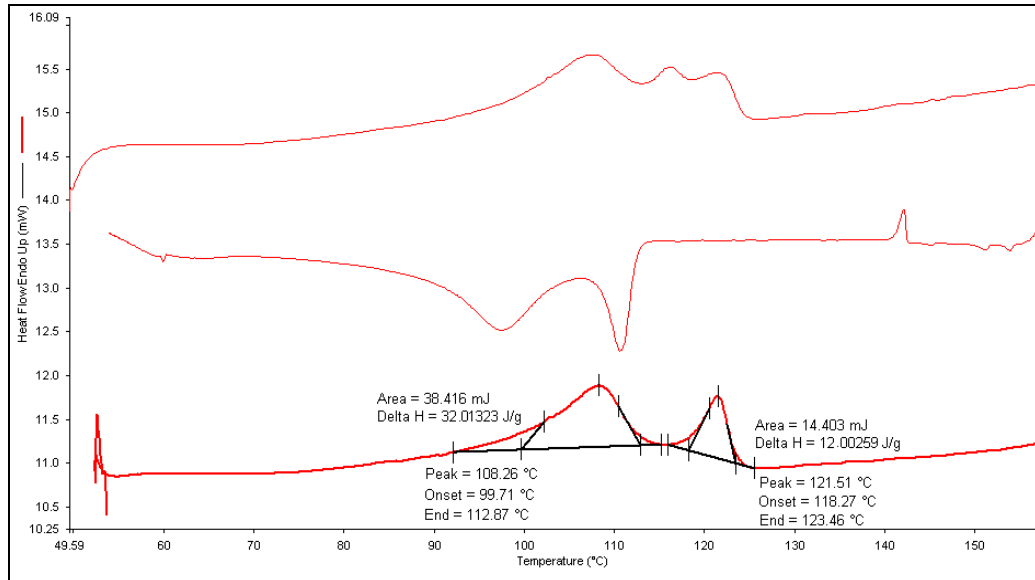
รูปที่ ข11 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตรา 80/20



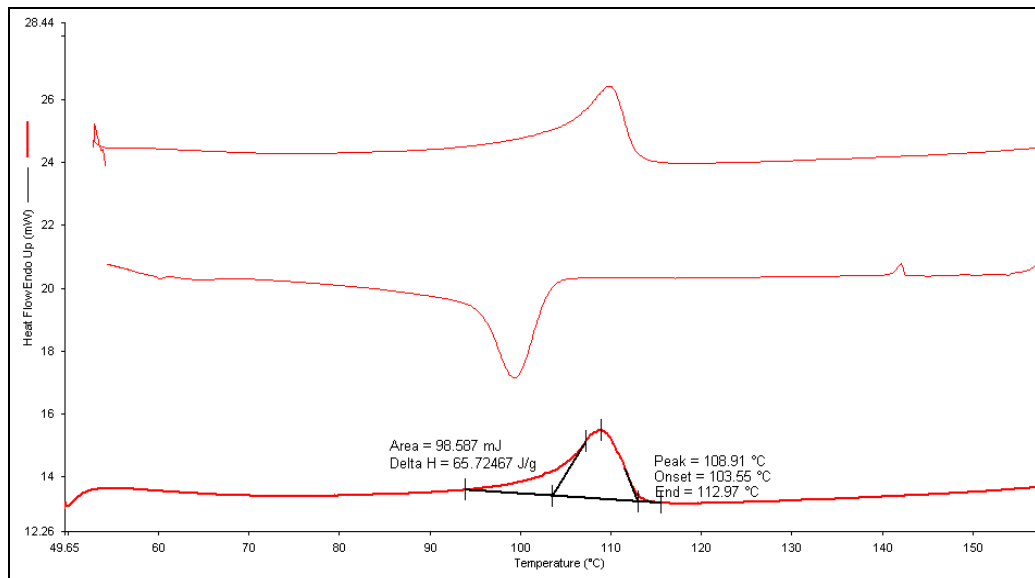
รูปที่ ข12 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตรา 70/30



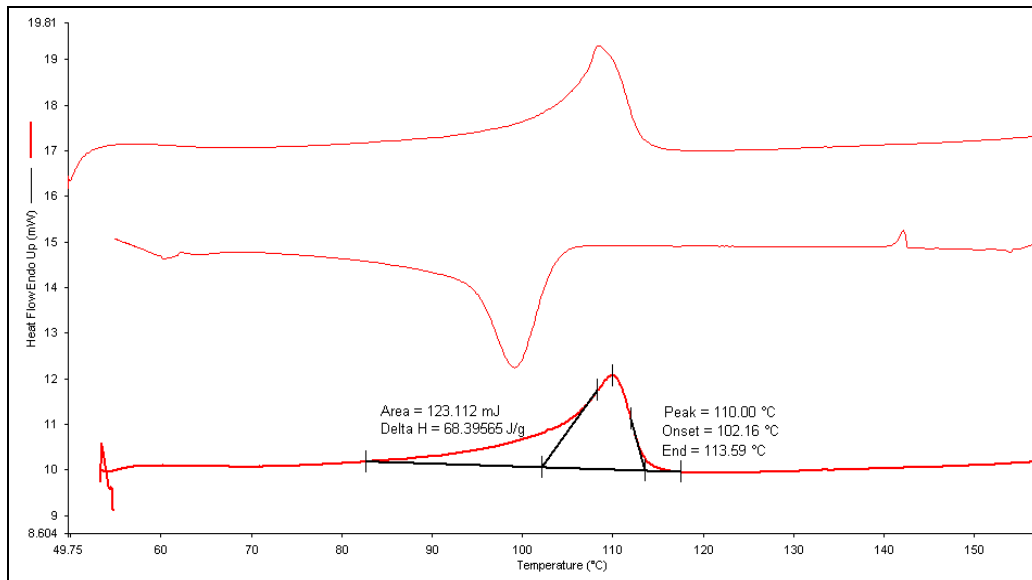
รูปที่ ข13 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางที่อัตรา 60/40



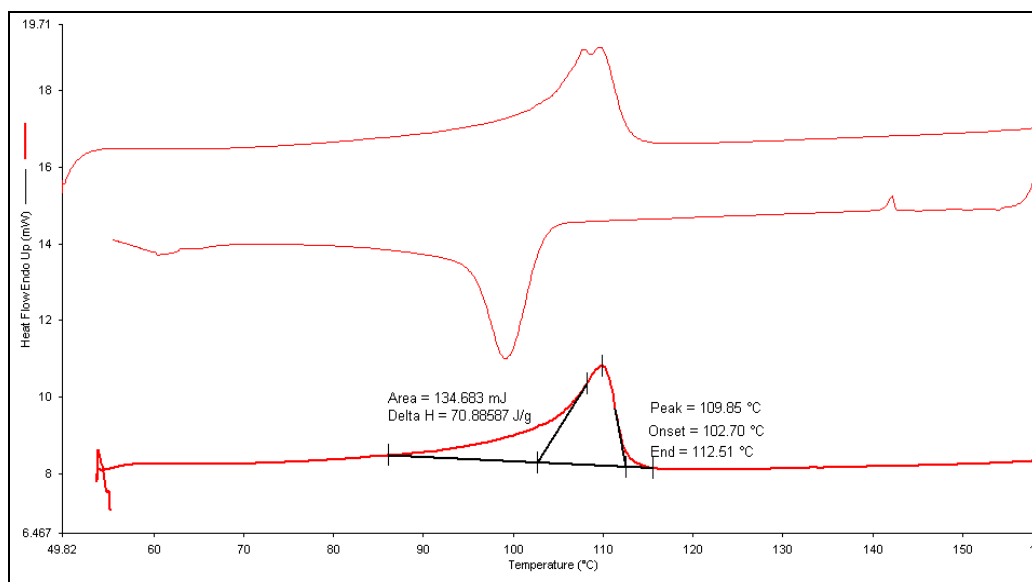
รูปที่ ข14 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 97.5/2.5



รูปที่ ข15 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 95/5

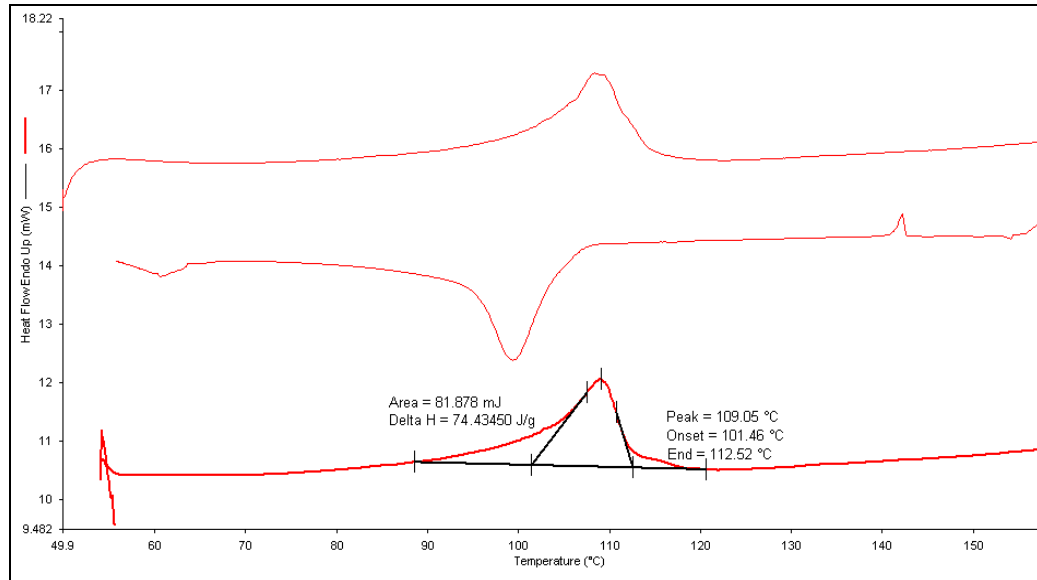


รูปที่ ข16 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 90/10





รูปที่ ข17 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 85/15





SHAPING the FUTURE with PLASTICS

July 2008

## Borstar® FB2230

### ENHANCED POLYETHYLENE FOR HIGH PERFORMANCE FLEXIBLE PACKAGING

#### DESCRIPTION

**Borstar FB2230** is an enhanced polyethylene film grade combining good and flexible extrusion behaviour, excellent draw down and superior mechanical properties. Film made from **Borstar FB2230** exhibits high dart impact strength combined with excellent yield, tensile strength and increased stiffness. Toughness is retained at low temperature. The film has high seal strength, good hot tack force and superior ESCR properties. **Borstar FB2230** contains antioxidant and low content of anti-blocking agent.

#### APPLICATIONS

**Borstar FB2230** is well suited for mono and coextrusion in a wide range of applications due to its unique balance of properties. The superior mechanical properties will improve the functionality of the films or allow for substantial material savings (down gauging) compared to conventional PE. Typical applications: Agriculture Film (incl. Greenhouse Film), Lamination (incl. Stand Up Pouches), Security Packaging, Shrink Film, Exclusive Carrier/Boutique bags, Industrial Film, Frozen Food and Compression Packaging.

#### FOOD CONTACT REGULATIONS

**Borstar FB2230** fulfils the food contact regulations in most countries. If required, contact your Borouge representative for a certificate.

PHYSICAL PROPERTIES	Typical Value*	Unit	Test Method
Density	923	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D 1505
Melt Flow Rate MFR (190°C/2.16 kg)	0.25	g/10 min	ASTM D 1238
Melt Flow Rate MFR (190°C/5.0 kg)	1.0	g/10 min	ASTM D 1238
Melt Flow Rate MFR (190°C/21.6 kg)	22	g/10 min	ASTM D 1238
Melting temperature	124	°C	ISO 11357/03
Vicat Softening Temperature A (10 N)	101	°C	ISO 306
ESCR - 10% Igepal / F50	>5000	Hours	ASTM D 1693

\* Data should not be used for specification work

#### PROCESSING GUIDELINES

**Borstar FB2230** can be processed in most types of blown film equipment such as LDPE, LLDPE or HDPE extruders. The balance of draw down properties and bubble stability is superior to conventional LLDPE and LDPE. Thickness of 10 to >200µm can be processed with good bubble stability. **Borstar FB2230** is well suited for co-extrusion.

Borouge Pte Ltd | 1 George Street | #18-01 | Singapore 049145  
Tel +65 6275 4100 | Fax +65 6377 1233 | www.borouge.com  
Borouge is part of the ADNOC and Borealis group of companies

Page 1 of 3



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสรารุท แซ่โค้ว เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2527 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร ในปี พ.ศ. 2548 เริ่มเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและปริญญาเอก ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2550 และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2553