

ฟิล์มเป่าที่มีรูพรุนขนาดเล็กจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MICROPOROUS BLOWN FILMS FROM POLYPROPYLENE/POLYETHYLENE BLENDS

Miss Pawina Anilabol



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile
Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ฟิล์มเป่าที่มีรูพรุนขนาดเล็กจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน
โดย	นางสาวปวีณา อนิลบล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. มัณฑนา โอภาประภาสิต
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ อาทร วิจิตรอมรเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โปธิยะราช)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. มัณฑนา โอภาประภาสิต)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ อาทร วิจิตรอมรเลิศ)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด)
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อหิตยส์สา เพ็ชรสุข)

ปีณา อนิลบล : พิล์มเป่าที่มีรูพรุนขนาดเล็กจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน (MICROPOROUS BLOWN FILMS FROM POLYPROPYLENE/POLYETHYLENE BLENDS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. มณฑนา โอภาสประกาศิต, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. อาทร วิจิตรอมรเลิศ, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีน (PE) เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปฟิล์มที่มีรูพรุนขนาดเล็ก โดยศึกษาจากพอลิโพรพิลีน 2 เกรด คือ PP1 และ PP2 ซึ่งมีดัชนีการไหล ~2.0-2.4 กรัม/10 นาที และเลือกใช้พอลิเอทิลีนที่มีดัชนีการไหลที่สูงต่างกัน 4 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และพอลิเอทิลีนแว็กซ์ (PE wax) มีการเตรียมฟิล์มเป่า PP/PE ด้วยสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีนต่อพอลิเอทิลีนเป็น 100/0 85/15 และ 60/40 โดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มของแล็บเทค รุ่น LF-400-COEX (สัดส่วนความยาวต่อความโตของช่องทางการไหลคือ 30 และ เส้นผ่านศูนย์กลางของตายคือ 30 มม.) ศึกษาอิทธิพลของการเย็นตัวของฟิล์ม และระดับการดึงยึดฟิล์มที่ส่งผลต่อสมบัติด้านแรงดึง สันฐานวิทยา และระดับรูพรุนของฟิล์ม จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/HDPE สามารถเตรียมให้มีระดับรูพรุนมากกว่าร้อยละ 20 ได้ อย่างไรก็ตามภาวะของการหล่อเย็น และการดึงยึดที่ได้ไม่เหมาะสม ส่งผลเชิงลบต่อระดับรูพรุน ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นถึงรูพรุนที่มีลักษณะวงรีเมื่อเพิ่มระดับดึงยึดที่สูง อย่างไรก็ตามความเป็นรูพรุนของฟิล์มเหล่านี้ซึ่งวัดจากการดูดซับน้ำมันนั้นมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยระดับการดึงยึดที่น้อยกว่า นอกจากนี้สมบัติด้านแรงดึงนั้นลดลงเมื่อเติมพอลิเอทิลีนผสมกับพอลิโพรพิลีน ยกเว้นฟิล์ม PP1/HDPE ซึ่งมี modulus ของแรงดึงและร้อยละการยืดสูงสุดมากกว่าฟิล์ม PP1 ในขณะที่ความเป็นรูพรุนของฟิล์ม PP สามารถทำได้สูงถึงร้อยละ 25 ระดับความเป็นรูพรุนของฟิล์ม 60/40 PP/HDPE มีค่าที่สูงกว่า

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา	วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2559

5772295723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: MICROPOROUS FILMS / POLYPROPYLENE / POLYETHYLENE / BLOWN FILM EXTRUSION / STRETCHING

PAWINA ANILABOL: MICROPOROUS BLOWN FILMS FROM POLYPROPYLENE/POLYETHYLENE BLENDS. ADVISOR: ASSOC. PROF. MANTANA OPAPRAKASIT, Ph.D., CO-ADVISOR: ARTHORN WICHITAMORNLOET, 113 pp.

This research is aimed to investigate the efficiency of using polypropylene (PP) and polyethylene (PE) blends as raw materials for fabricating micro-porous films. Two PP grades, PP1 and PP2, with melt flow rate of ~2.0-2.4 g/10 min were investigated. Four high melt flow index PE types including high density polyethylene (HDPE), low density polyethylene (LDPE), linear low density polyethylene (LLDPE), and polyethylene wax (PE wax) were employed in this study. Blown PP/PE films were fabricated using PP/PE blend ratios of 100/0, 85/15, and 60/40 (wt/wt), on an LF-400-COEX Lab tech extruder (30 L/D and 30mm diameter). Effects of film cooling and film stretching conditions on tensile property, morphology, and film porosity were examined. The results showed that films with porosity > 20% can be achieved only from PP and PP/HDPE films. Moreover, unsuitable film cooling and stretching may impose negative effects to the film's porosity. SEM images presented that large ellipse pores typically appeared in the films fabricated at high %stretching. However, porosity evaluated from oil absorption experiment of these films tended to be lower than the films processed at smaller % stretching. Tensile properties were deteriorated when PE were incorporated with PP, excepting PP1/HDPE films of which tensile modulus and % elongation at break were higher than PP1 films. While the porosity as high as ~25% was possibly obtained from PP films, the higher porosity was achieved with 60/40 PP/HDPE films.

Department:	Materials Science	Student's Signature
Field of Study:	Applied Polymer Science	Advisor's Signature
	and Textile Technology	Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์ หากไม่ได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำงานวิจัย อีกทั้งคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร. มัณฑนา โอภาประกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาด้านวิชาการและอื่น รวมถึงแนวทางการจัดทำวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาในด้านวิชาการและอื่นๆ รวมถึงแนวทางการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. นายอาทร วิจิตรอมรเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการเตรียมฟิล์มพอลิโพรพิลีนชนิดรูปวงรีขนาดเล็ก
3. รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด และ อาจารย์ ดร.อติตย์สา เพ็ชรสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. อาจารย์ ดร.อรทัย บุญดำเนิน ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำในการนำเสนอวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
5. ภาควิสดูศาสนาตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกระหว่างดำเนินงานวิจัย
6. วิทยบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิสดูศาสนาตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับทุนการสนับสนุนค่าเล่าเรียนเป็นระยะเวลา 1 ปีการศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณมารดาและครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จตามที่มุ่งหวัง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 งานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎี.....	4
2.1.1. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP)	4
2.1.1.1 การจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีน.....	4
2.1.1.2สมบัติของพอลิโพรพิลีน.....	6
2.1.1.3 ประโยชน์และการนำไปใช้งาน.....	6
2.1.2. พอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE).....	7
2.1.2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	7
2.1.2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE).....	8
2.1.2.3 เอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE).....	9
2.1.2.4 พอลิเอทิลีนแวกซ์ (WAX).....	10
2.1.3 พิล์มพลาสติก	11

2.1.3.1	ฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจัดเรียงตัว.....	11
2.1.3.2	ฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวหนึ่งทิศทาง	12
2.1.3.3	ฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง	12
2.1.4	ฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (microporous film)	13
2.1.4.1	ความหมาย และประโยชน์ของฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก	13
2.1.4.2	การเตรียมฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก	14
2.1.5	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มรูพรุนแบบดัดยัด	14
2.1.5.1	การขึ้นรูปฟิล์มหรือการสร้างสร้างฟิล์มเพื่อเตรียมในการทำฟิล์มรูพรุน กระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม (blown film extrusion process)	15
2.1.6	อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม	16
2.1.6.1	หน่วยเครื่องอัดรีด (extruder)	16
2.1.6.2	หน่วยตาย (die unit).....	16
2.1.6.3	รูปแบบการเป่าฟิล์ม	18
2.1.6.4	คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม	18
2.1.6.5	ข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม	20
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3	วิธีการทดลอง	23
3.1	สารเคมี.....	23
3.2	อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	24
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ	27
3.4	วิธีการทดลอง	28
3.4.1	การเตรียมวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม.....	28
3.4.2	การเตรียมฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม	30

3.4.3 การดัดยัดฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม	30
3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้	31
3.4.4.1 สันฐานวิทยา	31
3.4.4.2 สมบัติทางความร้อน	31
3.4.4.3 สมบัติการทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine	32
3.4.4.4 การวิเคราะห์ดัชนีการหลอมไหล (MFI).....	32
3.4.4.5 สมบัติความเป็นรูพรุนด้วยการวัดปริมาตรดูดซับน้ำมัน.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง และ วิจัยรณผลการทดลอง.....	34
4.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มผสมระหว่าง PP1 และ PE	34
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ	34
4.1.2 สมบัติด้านแรงดึง.....	39
4.1.3 สมบัติความเป็นรูพรุน	44
4.1.4 สันฐานวิทยา.....	48
4.2 สมบัติของฟิล์มเป่า PP2 และ ฟิล์มผสมระหว่าง PP2 และ PE	54
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	54
4.2.2 สมบัติด้านแรงดึง	57
4.2.3 สมบัติความเป็นรูพรุน	62
4.2.4 สันฐานวิทยา	66
4.3 สมบัติทางความร้อน.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปผลการทดลอง	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง	87

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 113



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ชนิด โครงสร้างและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของพอลิเอทิลีน	11
ตารางที่ 3.1 ชนิดของพอลิเมอร์ และอัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว	23
ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ที่ อัตราส่วนร้อยละ 15 และ 40 โดยน้ำหนัก	29
ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิภายในเครื่องอัดรีดสกรูคู่จากโซน hopper (โซน 1) จนถึงตาย (โซน 11) ที่ใช้สำหรับเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก.....	29
ตารางที่ 3.4 ภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม	30
ตารางที่ 3.5 ค่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกของพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน	32
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางแสง ความยับ และความหนาของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1 และ ฟิล์มเป่า PP/PEที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วมอเตอร์ที่ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm	36
ตารางที่ 4.2 ค่า flexural strength และดัชนีการไหลของ PP1 PP2 HDPE LDPE และ LLDPE ที่ได้จากเครื่อง melt flow indexer เปรียบเทียบกับค่าที่รายงานทางการค้า.....	37
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของลูกโป่งฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1/PE ที่ระดับความสูงต่างจาก ตาย เมื่อขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm.....	40
ตารางที่ 4.4 ค่ามอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืด ผน จุดคราก และจุดขาดของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1/PE.....	41
ตารางที่ 4.5 ร้อยละของรูพรุนของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1/PE	45
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางแสง ความยับ และความหนาของฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE ที่ ขึ้นรูปด้วยความเร็วมอเตอร์ที่ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm.....	56
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิของลูกโป่งฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE ที่ระดับความสูงต่างจาก ตาย เมื่อขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm.....	58
ตารางที่ 4.8 ค่ามอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืด ผน จุดคราก และจุดขาดของฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE.....	59

ตารางที่ 4.9 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE.....63

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการหลอมผลึก และเกิดผลึก เอนทัลปีการหลอม การเกิดผลึก และระดับ
ความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมการให้ความเย็น ของ PP และ PE 73

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการหลอมผลึก เอนทัลปีการหลอม และระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก
DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP1
และ ฟิล์มเป่า PP1/PE ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm.....83

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิหลอมผลึก เอนทัลปีการหลอม และระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก
DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP2
และ ฟิล์มเป่า PP2/PE ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm.....84



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอลิโพรพิลีน	4
รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (recycle) ของพอลิโพรพิลีน	4
รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างพอลิโพรพิลีน	5
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพอลิเอทิลีน	7
รูปที่ 2.5 สัญลักษณ์เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (recycle).....	7
รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (recycle) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	8
รูปที่ 2.7 แสดงสายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (ก) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ข) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(ค)	10
รูปที่ 3.1 เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยรังสี	24
รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งสองตำแหน่ง.....	24
รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งไฟฟ้าสี่ตำแหน่ง	25
รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดเกลียวคู่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและแวกซ์	25
รูปที่ 3.5 เครื่องเป่าฟิล์มที่ใช้ในการขึ้นรูปเพื่อเตรียมฟิล์มรูปurun	26
รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal testing machine ของ.....	26
รูปที่ 3.7 Scanning Electron Microscope (SEM).....	27
รูปที่ 3.8 Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	27
รูปที่ 3.9 เครื่องMelt flow Indexer.....	28
รูปที่ 3.10 แสดงภาพวิธีการขับน้ำมันและการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังแช่ในน้ำมัน	33
รูปที่ 4.1 ลักษณะการมองเห็นตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษ เมื่อมีฟิล์มเป่า PP1 (ก) PP1wax15 (ข) PP1HD15 (ค) PP1HD40 (ง) PP1LD15 (จ) PP1LD40 (ฉ) PP1LL15 (ช) และPP1LL40 (ช) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ปิดอยู่ทางครึ่งด้านขวา	38

รูปที่ 4.2 ค่ามอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืดสูงสุด (ค) ของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm	42
รูปที่ 4.3 ค่ามอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืดสูงสุด (ค) ของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm	43
รูปที่ 4.4 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm.....	46
รูปที่ 4.5 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm.....	47
รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400(ก) 700(ข) และ 1,000(ค) rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture.....	50
รูปที่ 4.7 สันฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืด ร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture	51
รูปที่ 4.8 สันฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืด ร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture	52
รูปที่ 4.9 สันฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืด ร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture	53

รูปที่ 4.10 ลักษณะการมองเห็นตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษ เมื่อมีฟิล์มเป่า PP2 (ก) PP2wax15 (ข) PP2HD15 (ค) PP2HD40 (ง) PP2LD15 (จ) PP2LD40 (ฉ) PP2LL15 (ช) และ PP2LL40 (ซ) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ปิดอยู่ทางครึ่งด้านขวา.....55

รูปที่ 4.11 ค่ามอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืด ณ จุดคราก (ค) ของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm.....60

รูปที่ 4.12 ค่ามอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืด ณ จุดคราก (ค) ของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm.....61

รูปที่ 4.13 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm.....64

รูปที่ 4.14 ผลของร้อยละการดูดซับน้ำมัน ของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm65

รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture67

รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture68

รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture69

รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืด

ร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm ที่เตรียมได้ จากเทคนิค Freeze fracture	70
รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การให้ความเย็น (ข) และให้ความร้อน ครั้งที่ 2 (ค) ของเม็ดเรซิน PE และ PP	72
รูปที่ 4.20 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การให้ความเย็น (ข) และให้ความร้อน ครั้งที่ 2 (ค) ของ PP1.....	74
รูปที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การให้ความเย็น (ข) และให้ความร้อน ครั้งที่ 2 (ค) ของ PP2	75
รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความเย็นของฟิล์มเป่า PP1/HDPE (ก) PP1/LDPE (ข) และ PP1/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นหล่อเย็น	77
รูปที่ 4.23 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความเย็นของฟิล์มเป่า PP2/HDPE (ก) PP2/LDPE (ข) และ PP2/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น	78
รูปที่ 4.24 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มเป่า PP1/HDPE (ก) PP1/LDPE (ข) และ PP1/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น	79
รูปที่ 4.25 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มเป่า PP2/HDPE (ก) PP2/LDPE (ข) และ PP2/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น	80
รูปที่ 4.26 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP1/HDPE (ก) PP1/LDPE (ข) และ PP1/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น	81
รูปที่ 4.27 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP2/HDPE (ก) PP2/LDPE (ข) และ PP2/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 งานวิจัย

ปัจจุบันการใช้งานพลาสติกในด้านต่าง ๆ มีอยู่มากมายโดยเฉพาะในรูปของพลาสติกฟิล์ม เช่น ถุงร้อน ซองยา ถุงซิปล็อค ฟิล์มหัด ฉลากสินค้า เป็นต้น ทั้งนี้กระบวนการเป่าฟิล์มนั้นมีต้นทุนที่ต่ำมีอัตราการผลิตสูงแต่ผลิตภัณฑ์มีมูลค่าไม่สูงนัก ดังนั้นฟิล์มที่ผลิตให้มีลักษณะพิเศษย่อมเป็นการเพิ่มมูลค่าทางการค้า ซึ่งการพัฒนาให้ฟิล์มมีรูพรุนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากอุตสาหกรรม เช่น ฟิล์มกรอง ฟิล์มห่อหุ้มผักผลไม้ ฟิล์มชับน้ำมัน เป็นต้น [1-4] เนื่องจากเป็นการเพิ่มฟังก์ชันให้กับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดโดยใช้กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน งานวิจัยที่พบส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาฟิล์มเมมเบรนเลือกผ่านที่ใช้งานในแบดเตอรีลิเทียมเพื่อแยกแก๊สไฮโดรเจน หรือเป็นเมมเบรนเลือกผ่านแคสตาลิสและสารอื่นๆ [5, 6] ฟิล์มที่มีรูพรุนขนาดเล็กสามารถเตรียมได้โดยอาศัยหลักการของ dry stretching คือ การเตรียมของผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อออกแรงดึงทำให้เกิดรอยแยกระหว่างภูมิภาค ส่งผลให้มีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า สารตัวเติมสำหรับการพัฒนาฟิล์มรูพรุนเป็นได้ทั้งของเหลวและของแข็ง เช่น มิเนอร์ลอยด์ พาราฟินแว็กซ์ ปีโตรเลียมเจล แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นต้น [7-9] ทั้งนี้การใช้พอลิเมอร์ผสมก็เป็นอีกแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถขึ้นรูปโดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการผสมซึ่งต่างจากกรณีสารตัวเติมอื่นๆ พอลิเมอร์ที่เลือกใช้ควรมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันแต่มีส่วนที่ไม่เข้ากัน ซึ่งความไม่เข้ากันนี้อาจมาจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้ ชนิดของพอลิเมอร์ รวมไปถึงปัจจัยอื่นที่ทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้เมื่อได้รับแรงดึงสามารถเกิดรอยแยกบริเวณเชื่อมกันระหว่างภูมิภาคที่ไม่เข้ากัน ทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆ หรือรูพรุนบนผิวฟิล์มได้ ทั้งนี้การเลือกใช้อุณหภูมิและตัวแปรต่างๆ ในขณะที่เตรียมส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้

การเตรียมฟิล์มรูพรุนด้วยหลักการดึงประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้ [10-12] คือ ขั้นตอนการสร้างฟิล์มหรือ precursor film ฟิล์มที่เตรียมได้ในเบื้องต้นนี้มีสมบัติอย่างไรนั้นขึ้นกับอัตราเร็วในการดึงเพื่อม้วนเก็บและอุณหภูมิของฟิล์ม หากสามารถควบคุมอัตราการเย็นตัวและอัตราเร็วของการม้วนเก็บได้เหมาะสม ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลภายในฟิล์มยังสามารถจัดเรียงตัวได้ ย่อมส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีได้ ซึ่งเครื่องจักรพื้นฐานที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มโดยทั่วไป คือ เครื่องเป่าฟิล์ม (blown film extrusion) และเครื่องอัดรีดฟิล์ม (cast film extrusion) [13] งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้กระบวนการแบบอัดรีดฟิล์มเนื่องจากสามารถควบคุมการผลิตที่ง่ายกว่าแบบเป่าฟิล์ม แต่ด้วยข้อดีของกระบวนการเป่า

ฟิล์มที่สามารถปรับเปลี่ยนหน้ากว้างของฟิล์มที่ต้องการได้อย่างง่ายดาย สามารถผลิตฟิล์มที่มีหน้าตัดเป็นวงแหวน จึงไม่ต้องซีลขอบอย่างฟิล์มที่ได้จากกระบวนการอัดรีด ทำให้ผลิตฟิล์มได้รวดเร็วกว่าต้นทุนต่ำ และสามารถผลิตฟิล์มที่นำไปใช้กับสินค้าหลายรูปแบบ หลายขนาดได้ง่าย อีกทั้งกระบวนการเป่าฟิล์มมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสองทิศทางจึงส่งผลต่อสมบัติด้านแรงดึงและความแข็งแรงที่ดีกว่ากระบวนการอัดรีดฟิล์มอีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงสนใจเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า โดยตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการเป่าฟิล์มคือ ความเร็วในการหมุนของสกรู ความเร็วของลมหล่อเย็น และความเร็วในการม้วนเก็บฟิล์ม และชั้นการดึงยึดฟิล์ม ซึ่งสามารถดึงได้ทั้งขณะที่ฟิล์มมีอุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ ซึ่งได้ลักษณะและขนาดของรูพรุนบนผิวของฟิล์มที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้สนใจพัฒนาฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนให้มีรูพรุนโดยใช้พอลิเอทิลีนร่วมอยู่ด้วย โดยพอลิเมอร์ทั้งสองจัดเป็นพอลิเมอร์เชิงพาณิชย์ที่มีราคาถูกและมีการประยุกต์ใช้ในรูปของฟิล์มอย่างกว้างขวาง เมื่อพิจารณาโครงสร้างของพอลิเอทิลีนพบว่าจำแนกได้เป็น 4 ชนิดหลัก คือ ชนิดความหนาแน่นสูง ชนิดความหนาแน่นต่ำ ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และพอลิเอทิลีนแวกซ์ ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ย่อมส่งผลต่อความเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาชนิดของพอลิเอทิลีนที่ส่งผลต่อรูพรุนที่เกิดขึ้นและสมบัติด้านแรงดึง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาผลของชนิดพอลิเอทิลีนต่อความสามารถในการเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า
- 1.2.2 ศึกษาผลของความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนต่อสมบัติด้านแรงดึง สัณฐานวิทยาและความเป็นรูพรุนของฟิล์มที่เตรียมได้
- 1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของภาวะการขึ้นรูปต่อสมบัติด้านแรงดึง สัณฐานวิทยาและความเป็นรูพรุนของฟิล์มที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1. ศึกษาการเตรียมฟิล์มเป่าของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน ซึ่งมีชนิดของพอลิเอทิลีน ดังนี้ ชนิดความหนาแน่นสูง ชนิดความหนาแน่นต่ำ ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และพอลิเอทิลีนแวกซ์
- 1.3.2. ศึกษาการเตรียมฟิล์มเป่าของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนซึ่งใช้พอลิโพรพิลีน 2 ชนิด ที่มีดัชนีการไหลที่ 2.0 และ 2.4 กรัม.ต่อ 10 นาที

1.3.3. ศึกษาการเตรียมฟิล์มเป่าของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน ซึ่งใช้ปริมาณของพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนร้อยละ 15 และ 40 โดยน้ำหนัก ยกเว้น พอลิเอทิลีนแวกซ์ ซึ่งศึกษาที่อัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักเท่านั้น

1.3.4. ศึกษาอิทธิพลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน ต่อสมบัติ ด้านแรงดึง สัมฐานวิทยาและความเป็นรูพรุนของฟิล์มที่เตรียมได้ ศึกษาภาวะการขึ้นรูป ได้แก่ ความเร็วหล่อเย็น ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนและฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

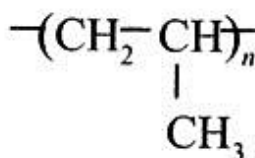
2.1 ทฤษฎี

2.1.1. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP)

ชื่อทางสารเคมี (Chemical name) : Poly(1-methylethylene)

ชื่อพ้อง (Synonyms name) : Polypropene 25 [USAN] 1-propene homopolymer
Propylene polymers และ Polypropene

สูตรทางเคมี : $(C_3H_6)_n$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอลิโพรพิลีน [14]

ประวัติของพอลิโพรพิลีนถูกค้นพบครั้งแรกโดย Giulio Natta และนักเคมีชาวเยอรมัน Karl Rehn เมื่อเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 1954 [15] ในประเทศสเปน ซึ่งค้นพบการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนชนิดไอโซแทกติกก่อน และบุกเบิกเป็นอุตสาหกรรมในปี 1957 พอลิโพรพิลีนหรือพีพีมีความหนาแน่น 0.855-0.946 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [16] ภายในโครงสร้างประกอบด้วยโพรพิลีนมอนอเมอร์ หลายๆตัวมาเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (รูปที่ 2.3) [15] ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลได้โดยใช้สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมหมายเลขห้า (รูปที่ 2.2) [16]

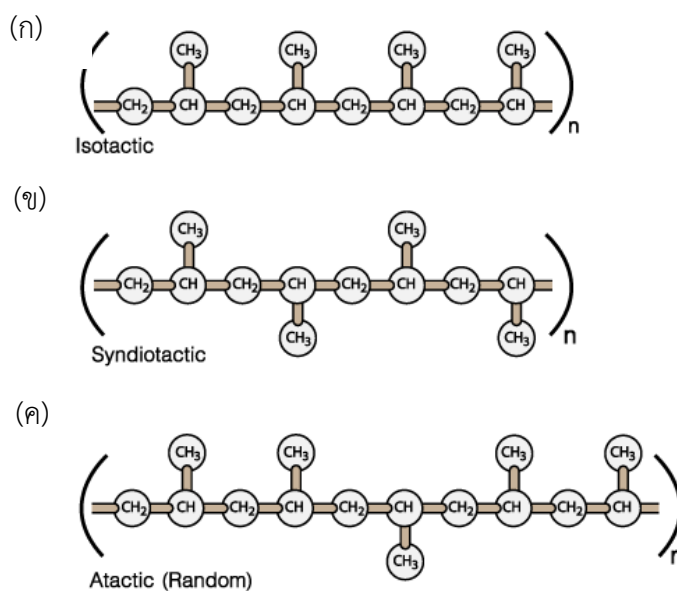


รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (recycle) ของพอลิโพรพิลีน [17]

2.1.1.1 การจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างลักษณะเป็นแบบเกลียว (helix) โดยพบว่าตำแหน่งของหมู่เมทิล ($-CH_3$) ของหน่วยซ้ำมอนอเมอร์อะตอมที่สัมพันธ์กับสายโซ่หลักของคาร์บอน ซึ่งสามารถจัดเรียงตัวได้ 3 แบบ คือ ไอโซแทกติก (isotactic) ซินดีโอแทกติก (syndiotactic) และอะแทกติก (atactic)

(รูปที่ 2.3) ซึ่งการจัดเรียงตัวที่ต่างกันของโครงสร้างพอลิโพรพิลีนส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีต่างกัน เช่น ความแข็งแรง ความคงรูป จุดหลอมเหลว ที่แตกต่างกัน [16, 18, 19]



รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างพอลิโพรพิลีน [14]

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 2.3 (ก)) พบว่าสายโซ่มีการจัดเรียงของหมู่เมทิล ($-CH_3$) ในทิศทางเดียวกัน มอนอเมอร์ถูกจัดเรียงตัวแบบหัวต่อหาง (head-to-tail) ส่งผลให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบสูง ทำให้มีปริมาณผลึกที่มาก การสังเคราะห์แบบโคออดิเนชันโดยใช้ตัวเร่งซิกเลอร์นัตต้า (Ziegler Natta) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวได้ผสมผสานกับสารประกอบของโลหะ 2 ชนิด คือสารประกอบเฮไลด์ของโลหะทรานซิชัน และสารประกอบอัลคิลของโลหะในหมู่ 3 ของตารางธาตุ ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย ทำให้ได้โครงสร้างของพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบมาก อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature หรือ T_g) ประมาณ 0 ถึง $13^{\circ}C$ และอุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature หรือ T_m) $165^{\circ}C$ [15, 19]

ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 2.3 (ข)) พบว่าสายโซ่มีการจัดเรียงของหมู่เมทิล ($-CH_3$) สลับไปมาทั้งสองด้านของสายโซ่ มอนอเมอร์ถูกจัดเรียงตัวแบบหัวต่อหาง (head-to-tail) ส่งผลให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบปานกลาง จึงทำให้มีสมบัติเด่นทางด้านความทนทานต่อแรงกระแทกสูง การสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยในกรณีนี้ปฏิกิริยาเกิดผ่านกลไก

แบบการควบคุมหมู่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain end control model) อุณหภูมิ การเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature หรือ T_g) ประมาณ -18 ถึง -5°C

อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 2.3 (ค)) พบว่าสายโซ่มีการจัดเรียงของหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) สลับแบบสุ่ม (random) มอนอเมอร์ถูกจัดเรียงตัวแบบหัวต่อหาง (head-to-tail) แบบหัวต่อหัว (head-head) หรือ แบบหางต่อหาง (tail-tail) ส่งผลให้โครงสร้างไม่มีความเป็นระเบียบ จึงทำให้มีสมบัติอ่อนนุ่มคล้ายยาง ทนทานต่อแรงกระแทกสูง การสังเคราะห์โดยกลไกแบบลูกลูกโซ่ผ่านตัวกลางแบบอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization) ที่ความดันสูง เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวไม่สามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ

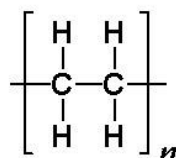
2.1.1.2 สมบัติของพอลิโพรพิลีน

- (1) มีความแข็งแรง มีผิวสัมผัสที่แข็ง เป็นมันเงา ทนทานต่อการขีดข่วน มีความคงตัวดี ไม่เสียรูปง่าย ทนทานต่อการล้า (Fatigue)
- (2) มีความทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน ซึ่งไม่ควรใช้งานต่ำกว่า 0°C มีสมบัติความเหนียวที่อุณหภูมิ 40 ถึง -10°C [11]
- (3) พอลิโพรพิลีน มีจุดอ่อนตัวประมาณ 150°C มีจุดหลอมเหลวที่ 130 ถึง 171°C
- (4) ไม่ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต
- (5) มีสมบัติติดไฟง่าย
- (6) มีความต้านทานซึมผ่านไอน้ำ ความชื้นและแก๊สที่สูง
- (7) ทนทานต่อสารเคมี การถูกกัดกร่อนโดยสารออกซิไดซ์ สารประเภทกรด-ด่าง เคมีภัณฑ์จำพวกแอลกอฮอล์ แต่ไม่ทนทานต่อสารเคมีประเภท ไฮโดรคาร์บอน [20-22]

2.1.1.3 ประโยชน์และการนำไปใช้งาน

การใช้งานทั่วไปในปัจจุบันส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ตามครัวเรือน เช่น ประเภทฟิล์มที่ใช้ห่อหุ้มอาหาร ถูกร้อน ถูงเย็น กล่องบรรจุภัณฑ์ต่างๆ รวมไปถึงการผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ และพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ [21, 22]

2.1.2. พอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างพอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน (Polyethylene) โครงสร้างประกอบด้วยพอลิเอทิลีนมอนอเมอร์ หลายๆตัวมาเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (รูปที่ 2.4) ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลได้ พอลิเอทิลีนมีโครงสร้างทั้งแบบโซ่ตรง แบบกิ่ง หรือแบบไว่ตรงและมีกิ่งเล็กออกมา (รูปที่2.8) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน ซึ่งสามารถแบ่งแยกได้ดังนี้ [23]

2.1.2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

ชื่อพ้อง (Synonyms name) : High-density polyethylene (HDPE) or polyethylene high-density (PEHD)

สูตรทางเคมี : $(C_2H_4)_n$

- โครงสร้างเป็นสายโซ่โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นเส้นตรงค่อนข้างสูง และมีกิ่งเป็นสายโซ่โมเลกุลสั้นๆ เพียงเล็กน้อย (รูปที่2.7ก) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลได้โดยใช้สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมหมายเลขสอง (รูปที่2.5)



รูปที่ 2.5 สัญลักษณ์เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (recycle)

ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [17]

- ประวัติ HDPE ถูกพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 โดย Karl Ziegler ประเทศเยอรมัน โดยบริษัท Standard Oil และ Philips Petroleum ประเทศสหรัฐอเมริกา การผลิตเริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1957 ในประเทศเยอรมัน อิตาลี และสหรัฐอเมริกา การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการซีเกลอร์แนททา (Ziegler Natta Process) ในทางการค้าทำที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย (0.2-0.4 MPa หรือ 2-4 บรรยากาศ อุณหภูมิ 50-75°Cโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์แนทตา ซึ่งได้แก่

ไททาเนียมเตตระ-คลอไรด์/อะลูมิเนียมอัลคิล ส่วนสารทำให้เจือจางที่ใช้ได้แก่ น้ำมันดีเซล (Diesel Oil) หรือ โทลูอีน ปฏิกริยาเกิดภายใต้บรรยากาศเฉื่อย ต้องไม่มีความชื้นและออกซิเจน โดยถูกป้อนอย่างต่อเนื่องเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ พอลิเมอร์ที่ได้ละลายในสารทำให้เจือจางเล็กน้อยโดยอยู่ในรูปของสารขุ่นหนืด (Slurry) และทำให้ถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วด้วยการเติมแอลกอฮอล์ โลกะจากตัวเร่งปฏิกริยาถูกแยกออกด้วยกรดเกลือ ถ้าต้องการฉนวนไฟฟ้า ต้องทำให้บริสุทธิ์หลายครั้ง แล้วจึงเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ได้ความหนาแน่นประมาณ $0.94-0.965 \text{ g/cm}^3$ มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวๆ มีกิ่งก้านสาขาน้อยหรือประปรายทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและความเป็นผลึกสูงกว่า LDPE มีความแข็งตึง ความเหนียว ความทนต่อแรงดึง ความแข็ง ความทนต่อความร้อนและสารเคมีมากกว่าด้วยอีกทั้งมีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี HDPE มีจุดหลอมเหลวประมาณ 135°C และจุดอ่อนตัวประมาณ 125°C

2.1.2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

ชื่อพ้อง (Synonyms name) : Low-density polyethylene (LDPE) or polyethylene low-density (LEHD)

สูตรทางเคมี : $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$

- โครงสร้างมีสายโซ่โมเลกุลแบบกิ่ง (รูปที่ 2.7ข) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลได้โดยใช้สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมหมายเลขสี่ (รูปที่ 2.6)

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (recycle) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ[17]

ประวัติถูกค้นพบโดยบริษัทไอซีโอ ประเทศอังกฤษและถูกผลิตขึ้นในปีค.ศ. 1939 เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า มีความหนาแน่นต่ำ $0.910-0.925 \text{ g/cm}^3$ เนื่องจากโครงสร้างมีกิ่งก้านสาขาแยกออกมา ทำให้โมเลกุลจัดตัวอยู่อย่างหลวมๆและไม่เป็นระเบียบ ซึ่งสมบัติทางกายภาพมีลักษณะค่อนข้างใส มีความเหนียวพอสมควรและมีผิวหน้ามันคล้ายขี้ผึ้งหรือเทียนไข การสังเคราะห์ LDPE ในทางการค้าถูกผลิตด้วยกระบวนการความดันระดับสูง (High Pressure Process) ประมาณ 150-350 MPa และอุณหภูมิ $80-300^{\circ}\text{C}$ ใช้ตัวริเริ่มชนิดอนุมูลอิสระ

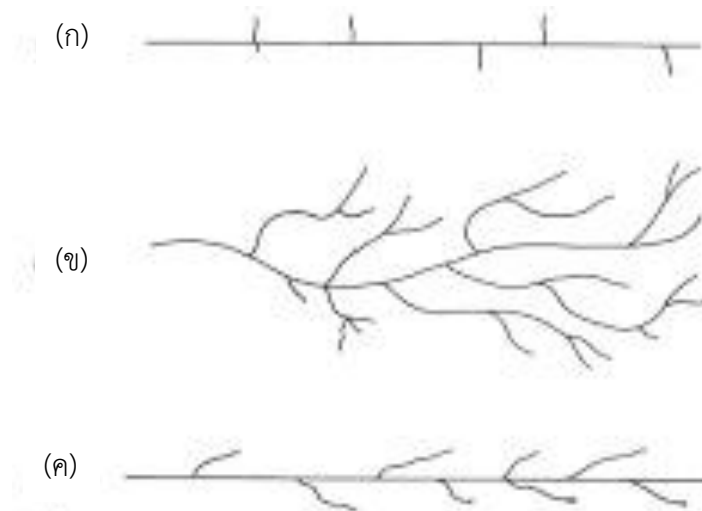
(Free radical) หรือถ้าใช้ออกซิเจน (ประมาณ 0.03-0.1%) ใช้ความดันประมาณ 1,500 บรรยากาศ อุณหภูมิ 200 °C การพอลิเมอไรเซชันทำโดยผ่านมอนอเมอร์และตัวริเริ่มเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งปฏิกิริยา การเกิด LDPE คายความร้อนออกมาสูงมาก จึงต้องมีระบบทำความเย็นอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้มอนอเมอร์ความเข้มข้นมากๆ และความดันสูงทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและได้พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขา หลังจากลดความดัน สมบัติทั่วไปของ LDPE สามารถใช้งานทั่วไปที่อุณหภูมิต่ำได้ดี มีจุดหลอมเหลวประมาณ 110°C และอุณหภูมิของจุดอ่อนตัว 40-50 °C จึงไม่ควรใช้งานที่อุณหภูมิสูงจึงไม่เหมาะกับการนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุณหภูมิสูง การใช้งานส่วนใหญ่ มักนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ประมาณ 65 % โดยส่วนผลิตเป็นฟิล์ม เช่น ถุงเย็น ถุงสินค้า ฟิล์มหดรูป (Shrink Film) และฟิล์มยืด (Stretch Film) เป็นต้น [15, 21]

2.1.2.3 เอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)

ชื่อพ้อง (Synonyms name) : Linear low-density polyethylene (LLDPE) or polyethylene linear low-density (LLEHD)

สูตรทางเคมี : $(C_2H_4)_n$

- มีลักษณะเส้นตรงโดยส่วนที่สำคัญคือความยาวของสายโซ่กิ่งสั้นๆ (รูปที่ 2.7ค) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก โดยทั่วไปผลิต LLDPE ที่อุณหภูมิต่ำและที่ความดันสูงโดยโคพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน เช่น โอลิฟินอัลฟา เป็น บิวทีน, เฮกซีน หรือ ออกทีน เป็นต้น กระบวนการโคพอลิเมอไรเซชันที่ผลิต LLDPE ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบลงกว่า LDPE และในการรวมกับโครงสร้างเชิงเส้นที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญส่งผลต่อคุณสมบัติการไหล การผลิต LLDPE ใช้ตัวริเริ่มโดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะ ประเภทซีเกลแนททาเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการพอลิเมอไรเซชันจริงสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เฟสก๊าซ โดยปกติใช้ออกทีนเป็นโคพอลิเมอร์ ในขณะที่บิวทีน และเฮกซีน ใช้โคพอลิเมอร์ใดกับเอทิลีนในเครื่องปฏิกรณ์เฟสแก๊ส LLDPE เรซินที่ผลิตในเครื่องปฏิกรณ์เฟสแก๊สอยู่ในรูปแบบเม็ดและอาจขายเป็นเม็ดหรือแปรรูปเป็นเม็ด LLDPE มีแรงดึงที่สูงขึ้นและมีสมบัติความต้านทานที่เฉพาะเจาะจงมากกว่า LDPE มีความยืดหยุ่นมาก ภายใต้อุณหภูมิเย็น มันสามารถใช้เพื่อทำให้ฟิล์มทินเนอร์ มีความต้านทานต่อสิ่งแวดล้อมที่ดี มีความต้านทานต่อสารเคมีที่ดี ทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี แต่ไม่เป็นเรื่องง่ายต่อการผลิต อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 120-125°C [19, 24]



รูปที่ 2.7 แสดงสายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (ก) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ข) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (ค)

2.1.2.4 พอลิเอทิลีนแวกซ์ (WAX)

แวกซ์ประเภทพอลิเอทิลีนที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ลักษณะเฉพาะของมันคือการมีจุดหลอมละลายสูงและมีความแข็งที่ดีจากอุณหภูมิต่ำไปสูง นอกจากนี้การมีค่าความหนืดที่กว้างทำให้มันถูกนำไปใช้ได้อย่างหลากหลาย พอลิเอทิลีนแวกซ์ (PE-Wax) ถูกใช้เป็นตัวช่วยในกระบวนการการผลิตท่อพีวีซี วัสดุหรือวัตถุดิบที่มีรูปร่างพิเศษเฉพาะ ฟิล์ม สายเคเบิล รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางและพลาสติก นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นและเป็นตัวช่วยในการถอดแบบของพอลิโอเลฟิน (polyolefin) และพีวีซีด้วย โดยพอลิเอทิลีนแวกซ์สามารถพัฒนาการไหลของพอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีน, พลาสติก ABS และพัฒนาคุณสมบัติในการถอดแบบของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิคาร์บอเนต ในการผลิตพีวีซีนั้น พอลิเอทิลีนแวกซ์มีการหล่อลื่นภายในดีกว่าการหล่อลื่นภายนอก นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว พอลิเอทิลีนแวกซ์ยังถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นและสารกระจายตัวในการทำเม็ดสีพลาสติก โดยพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นตัวพัฒนาการกระจายตัวของสารเติมเต็มหรือเม็ดสีต่างๆ อีกทั้งยังใช้เป็นสารตัดแปรสำหรับกระบวนการผลิตเทียน พลาสติกและอีลาสโตเมอร์ และการเคลือบผิวกระดาษด้วย อุณหภูมิหลอมเหลว $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15, 19, 25]

ตารางที่ 2.1 ชนิด โครงสร้างและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของพอลิเอทิลีน [26]

ชนิดของพอลิเมอร์	ลักษณะโครงสร้าง	อุณหภูมิอ่อนตัว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ หลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
พอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นต่ำ (LDPE)	สายโซ่โมเลกุลแบบกิ่ง	40-50 °C	110 °C
พอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นสูง (HDPE)	สายโซ่โครงสร้างโมเลกุลมี ความเป็นเส้นตรงค่อนข้าง สูงและมีกิ่งเป็นสายโซ่ โมเลกุลสั้นๆ	125 °C	135 °C
พอลิเอทิลีนความ หนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)	สายโซ่โครงสร้างโมเลกุลมี ความเป็นเส้นตรงโดยส่วนที่ สำคัญคือความยาวของสาย โซ่กิ่งสั้นๆ	92 °C	120-125 °C
พอลิเอทิลีนแว็กซ์ (PE wax)	เป็นแว็กซ์ประเภทมวล โมเลกุลต่ำที่ได้จากพอลิเอที ลีนชนิดความหนาแน่นสูง	อุณหภูมิต่ำกว่า LDPE	110°C

2.1.3 พลาสติก

ฟิล์ม (film) คือพลาสติกชนิดอ่อน (flexible material) ที่มีผิวเรียบ มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม และยาวต่อเนื่องมีความหนาไม่เกิน 250 ไมครอนเมตร สามารถม้วนได้โดยไม่ผิดรูปอย่างถาวร ฟิล์มพอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทได้ดังต่อไปนี้ ฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการจัดเรียงตัว (non-oriented polypropylene film) [16, 21, 22, 27]

2.1.3.1 ฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจัดเรียงตัว

เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการสมบัติการสกัดกั้น งานที่ไม่ต้องการสมบัติเชิงกล และความคงทน ที่อุณหภูมิสูง ฟิล์มประเภทนี้มีความต้านทานการฉีกขาดดีเยี่ยมและมีราคาไม่สูงมาก โดยอาจเป็นฟิล์มชั้นเดียว (monolayer) หรือฟิล์มอัดรีดรวมหลายชั้น (multilayer)

2.1.3.2 फिल्मโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวหนึ่งทิศทาง

ฟิล์มโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวหนึ่งทิศทาง (orientation polypropylene film หรือ OPP film) ฟิล์ม OPP มีทั้งที่ผลิตจากโฮโมโพลิเมอร์ โคโพลิเมอร์และเรซินที่ถูกตัดแปร ฟิล์ม OPP เกิดจากการถูกดึงด้วยกระบวนการเชิงกลในทิศทางที่ตั้งฉาก ส่งผลให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวตามแนวแกนของเครื่องจักร (machine direction หรือ MD) และแนวขวางแกนของเครื่องจักร (transverse direction หรือ TD) ทำให้ฟิล์มได้รับการปรับปรุงสมบัติทางแสง ความแข็งแรง การสกัดกั้นความชื้น และการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเป็นอย่างมาก จากความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถผลิตฟิล์มที่มีความหนาเพียง 0.045 มิลลิเมตร และใช้เป็นฟิล์มประกบสำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์

2.1.3.3 फिल्मโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง

ฟิล์มโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง (biaxially orientation polypropylene film หรือ BOPP film) กระบวนการผลิตฟิล์ม BOPP มีการยืดหรือดึงฟิล์มในขณะร้อนทำให้ฟิล์มมีการจัดเรียงโมเลกุล 2 ทิศทาง คือทางแนวแกน x และแนวแกน y ฟิล์มขยายขนาดจากเดิมถึง 50 เท่า โดยตามแนวแกน x (ตามขวางเครื่องจักร) ยืดออก 5 เท่า ในขณะที่ตามแนวแกน y (ตามยาวเครื่องจักร) ยืดออกถึง 10 เท่า โดยฟิล์มที่ผ่านการดึงยืดแล้วมีความทรงรูป (stiffness) ไม่ยืดหรือยุบในขณะนำไปผ่านขั้นตอนการพิมพ์สี ฟิล์มประเภทนี้ใสและมันวาว ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้เป็นอย่างดี น้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ ไม่ต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไม่ทนทานต่อไขมัน และน้ำมัน ฟิล์ม BOPP สามารถแบ่งตามลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็น 4 ประเภท ดังนี้

- ฟิล์มแบบไม่ปิดผนึกด้วยความร้อน (non-heat sealable film) เป็นฟิล์มใสที่ต้องนำไปแปรรูปโดยการพิมพ์สี หรือประกบกับฟิล์มชนิดอื่นเพื่อนผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต่อไป เช่น เทปกาว ฟิล์มเพื่อการหีบห่อแบบไม่ใช้ความร้อนในการติดผนึก ฟิล์มเพื่อนำไปผลิตเป็นธนบัตร เป็นต้น
- ฟิล์มแบบปิดผนึกด้วยความร้อน (heat sealable film) เป็นฟิล์มที่ได้จากการอัดร่วม (co-extrusion) ระหว่างโพรพิลีนโคโพลิเมอร์ ทำให้ผิวชั้นบน และชั้นล่างของฟิล์มถูกผนึกด้วยความร้อนในช่วงกว้างได้ (อุณหภูมิ 101 - 128°C) เช่น ฟิล์มห่อตลับเทป ซองบุหรี่ ถุงใส่ขนมปัง และ

ของใส่เครื่องปรุงอาหาร เป็นต้น พิล์มชนิดนี้มีความพิเศษ คือ ป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่าน เหมาะกับอาหารที่ไม่คำนึงถึงกลิ่นรสมากนัก อายุการเก็บอาหารไม่ยาวนานมาก และต้องการให้มองเห็นของที่อยู่ภายใน

- พิล์มแบบเคลือบโลหะ (metalized film) เป็นฟิล์มที่ต้องนำไปผ่านขั้นตอนการอบด้วยไออะลูมิเนียมในระบบสุญญากาศทำให้ฟิล์มที่ได้มีอะลูมิเนียมเกาะที่ผิวของฟิล์ม นิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้สามารถเก็บรักษากลิ่นรสของอาหารที่บรรจุอยู่ เช่น ของใส่กาแฟสำเร็จรูป ของบะหมี่ต้มยำ และของขนมขบเคี้ยว เช่น มันฝรั่งทอด และขนมปังกรอบ เป็นต้น พิล์มชนิดนี้มีความมันวาวของอะลูมิเนียมมีสีสนสวยงามสามารถใช้ความร้อนในการตีผนึกได้ แต่ราคาแพงกว่าฟิล์มชนิดอื่น

- พิล์มทึบแสงหรือฟิล์มไข่มุก (opaque หรือ pearlized film) พิล์มชนิดนี้มีความทึบแสง และมันวาวเหมือนไข่มุก นำไปพิมพ์สี และประกบกับฟิล์มชนิดอื่นได้ รวมทั้งสามารถผนึกด้วยความร้อนได้ เช่น ของใส่ไอศกรีม พิล์มห่อลูกกวาด เป็นต้น

2.1.4 พิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (microporous film)

2.1.4.1 ความหมาย และประโยชน์ของฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก

- พิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก คือฟิล์มพลาสติกที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากถึงระดับไมครอนหรือไมโครเมตร ซึ่งอาจผลิตจากพอลิเอทิลีน (polyethylene หรือ PE) พรีโพลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP) เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปสมบัติของฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็กนั้นต้องมีความเรียบ (flatness) และมีสมบัติที่สม่ำเสมอตลอดหน้ากว้าง มีความเป็นรูพรุน (porosity) และมีขนาดรูพรุน (pore size) ที่เหมาะสม รวมทั้งมีสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ที่ดี และคงที่

- ประโยชน์ของฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็กสามารถนำไปใช้ได้หลายด้าน ได้แก่ การใช้เป็นวัสดุในการกรอง (filter) พิล์มซับมัน (facial oil control film) เยื่อเลือกผ่าน (membrane) สำหรับการซึมผ่านของความชื้นเพื่อเก็บรักษาอาหารให้สดใหม่อยู่เสมอ หรือแม้กระทั่งการเลือกให้น้ำผ่านได้แต่หยุดน้ำไม่สามารถผ่านได้ เป็นต้น

2.1.4.2 การเตรียมฟิล์มชนิดรูปขนาดเล็กลง

- ใช้การเปลี่ยนเฟสของพอลิโพรพิลีนจากผลึกบีทาที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.921 g/cm^3) ไปเป็นผลึกแอลฟาที่มีความหนาแน่นสูง (0.936 g/cm^3) [2-4] โดยสารก่อผลึกบีทานั้นได้แก่ Quinacridone-pigment Remafin (E3B) ซึ่งมีข้อเสียคือผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสีแดง ซึ่งในบางครั้งไม่ตรงกับความต้องการของผู้ผลิตสินค้า N,N'-dicyclohexyl-2,6-naphthalene dicarboxamide เป็นสารก่อผลึกบีทาประเภทสารประกอบเอไมด์ซึ่งได้มีการจดทะเบียนลิขสิทธิ์เฉพาะโดยใช้ชื่อ NJSTAR ของบริษัทนิวเจแปนเคมิคัล Aryl amid-base system (TMB-5) เป็นสารประกอบประเภทแอริลไดคาร์บอกซิลิกเอไมด์คอมพาวนด์ และสารก่อผลึกบีทาที่เริ่มมีการศึกษาในปัจจุบันเป็นประเภทเกลือแคลเซียมของกรดไดคาร์บอกซิลิก เช่น แคลเซียมพิมาเลต (Calcium pimaleate) แคลเซียมซูเบอร์เรต (Calcium suberate) เป็นต้น เนื่องจากมีวิธีการเตรียมที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก

- การเตรียมจากคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมชนิดที่แยกวัฏภาคจากเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ [6,9] เมื่อทำการตั้งยัดฟิล์มที่มีอนุภาคสารตัวเติมดังกล่าวทำให้บริเวณรอยต่อของเฟสของพอลิเมอร์ถูกแยกออกจากอนุภาคสารตัวเติมเหล่านั้น ซึ่งสารตัวเติมเหล่านั้นอาจอยู่ในรูปของของเหลว เช่น มิเนอร์ลออยล์ (mineral oil) พาราฟินแว็กซ์ (paraffin wax) หรือปิโตรเลียมเจลลี่ (petroleum jelly) เป็นต้น หรือของแข็ง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ CaCO_3) หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide หรือ SiO_2) พอลิเมอร์ผสม เป็นต้น [2-4,6,9]

2.1.5 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มรูปขนาดเล็กลงแบบตั้งยัด

- ขั้นการสร้างฟิล์มหรือ precursor film ฟิล์มที่เตรียมได้ในเบื้องต้นนี้มีสมบัติอย่างไรนั้นขึ้นกับอัตราเร็วในการตั้งเพื่อม้วนเก็บ และอุณหภูมิของฟิล์ม หากสามารถควบคุมอัตราการเย็นตัว และอัตราเร็วของการม้วนเก็บได้เหมาะสม ส่งผลให้สายโซ่โพลิเมอร์ในฟิล์มยังสามารถจัดเรียงตัวได้ ย่อมส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีได้ ซึ่งเครื่องจักรพื้นฐานที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มโดยทั่วไปคือ เครื่องเป่าฟิล์ม (blown film extrusion) และเครื่องอัดรีดฟิล์ม (cast film extrusion) [12,13] งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้กระบวนการแบบอัดรีดฟิล์มเนื่องจากสามารถควบคุมการผลิตที่ง่ายกว่าแบบเป่าฟิล์ม แต่ด้วยข้อดีของกระบวนการเป่าฟิล์มที่สามารถปรับเปลี่ยนหน้ากว้างของฟิล์มที่ต้องการได้อย่างง่ายดาย สามารถผลิตฟิล์มที่มีหน้าตัดเป็นวงแหวน จึงไม่ต้องซีลขอบอย่างฟิล์มที่ได้จากกระบวนการอัดรีด ทำให้ผลิตฟิล์มได้รวดเร็วกว่า ต้นทุนต่ำ และสามารถผลิตฟิล์มที่นำไปใช้กับสินค้าหลายรูปแบบหลายขนาดได้ง่าย อีกทั้งกระบวนการเป่าฟิล์มมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสองทิศทางจึง

ส่งผลต่อสมบัติด้านแรงดึง และความแข็งแรงที่ดีกว่ากระบวนการอัดรีดฟิล์มอีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงสนใจเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า โดยตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการเป่าฟิล์มได้แก่ ความเร็วในการหมุนของสกรู ความเร็วของลมหล่อเย็น และความเร็วในการม้วนเก็บฟิล์ม

- การอบอ่อนฟิล์ม โดยนำฟิล์มมาให้ความร้อนที่ใกล้กับอุณหภูมิหลอมผลึกแต่ต่ำกว่า เพื่อให้เกิดการจัดเรียงผลึก
- การดึงยืดฟิล์ม ซึ่งสามารถดึงได้ทั้งขณะที่ฟิล์มมีอุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ ซึ่งได้ลักษณะ และขนาดของรูพรุนบนผิวของฟิล์มที่แตกต่างกัน

2.1.5.1 การขึ้นรูปฟิล์มหรือการสร้างสร้างฟิล์มเพื่อเตรียมในการทำฟิล์มรูพรุน กระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม (blown film extrusion process)

กระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มเป็นหนึ่งในหลายกระบวนการที่มีความสำคัญ และได้รับความนิยมนำมาผลิตฟิล์มพลาสติก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene หรือ LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene หรือ HDPE) และพอลิโพรพิลีน (polypropylene หรือ PP) เป็นต้น กระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มพลาสติกเป็นกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกอย่างต่อเนื่องโดยใช้วิธีการเป่าฟิล์ม โดยวิธีการขึ้นรูปโดยสรุปกล่าวคือเริ่มจากการใส่เม็ดพลาสติกชนิดที่ต้องการในเครื่องอัดรีด (extruder) ที่อยู่ในหน่วยเครื่องอัดรีด (extruder unit) ซึ่งต่อจากส่วนของการเป่าฟิล์ม ซึ่งเม็ดพลาสติกเกิดการหลอมเหลวภายในเครื่องอัดรีดโดยความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อน และความร้อนจากการเสียดสี จากนั้นเนื้อพลาสติกเหลวถูกขับเคลื่อนโดยสกรูเดี่ยว (single screw) ภายในเครื่องอัดรีดไปยังดายทรงกลม (circular die) และออกมาจากดายทรงกลมไปยังดายวงแหวน (annular die) ในส่วนของหน่วยดาย (die unit) จากนั้นเนื้อพลาสติกเหลวถูกทำการดึงยืดในแนวแกนของเครื่องจักร (machine direction หรือ MD) พร้อมกับมีการใช้ลมเป่าให้พลาสติกดังกล่าวพองเป็นลูกโป่ง (bubble) ที่มีผนังบาง และลมตัวนี้เป็นตัวปรับขนาด และความหนาของฟิล์ม ซึ่งเป็นการพองออกในแนวขวางของเครื่องจักร (transverse direction หรือ TD) อีกทั้งบริเวณปากดายวงแหวนมีวงแหวนลม (cooling ring) ไว้สำหรับหล่อเย็นเนื้อพลาสติกเหลวให้กลายเป็นฟิล์มพลาสติก ในหน่วยหล่อเย็น (cooling unit) จากนั้นลูกโป่งถูกป้อนเข้าไปในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip rolls) ซึ่งทำหน้าที่บีบลูกโป่งให้แบน

ลงกลายเป็นฟิล์มสองชั้นแล้วจึงทำการดึงฟิล์มพลาสติกโดยใช้หน่วยดึง (take-off unit) ขั้นตอนสุดท้ายทำการม้วนเก็บฟิล์มด้วยหน่วยม้วนเก็บ (winding unit) แล้วจึงนำไปทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ [13, 16, 22, 27]

2.1.6 อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม

อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มแบ่งออกเป็น 2 หน่วยดังต่อไปนี้ [13, 27]

2.1.6.1 หน่วยเครื่องอัดรีด (extruder)

โดยทั่วไปเครื่องอัดรีดที่ใช้ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มส่วนใหญ่เป็นแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งมีสัดส่วนความยาวต่อความโตของช่องทางการไหล (L/D) ของสกรูอยู่ในช่วง 20:1 ถึง 34:1 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องอัดรีดอยู่ในช่วง 4 ถึง 20 เซนติเมตร ซึ่งขนาดของเครื่องอัดรีดขึ้นกับขนาดกว้าง (lay-flat width) และความหนาของฟิล์มที่ผลิตรวมถึงอัตราการดึงของเครื่องม้วนฟิล์ม ดังนั้นการเลือกใช้งานเครื่องอัดรีดจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว ปกติแล้วโซนของสกรูแบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ โซนป้อนเม็ด (feed zone) ทำหน้าที่ลำเลียงเม็ดพลาสติกให้ไหลไปตามช่องของสกรู ซึ่งการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเม็ดพลาสติกเกิดจากการหมุนของสกรูที่สัมพันธ์กับผนังกระบอกกลมที่อยู่กับที่ ทำให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ไปยังโซนหลอม (transition zone หรือ compression zone) ทำหน้าที่หลอมเม็ดพลาสติกที่ถูกบีบอัด และลำเลียงมาในรูปของของแข็งให้กลายเป็นพลาสติกหลอมเหลว อีกทั้งยังลำเลียงพลาสติกหลอมเหลวไปยังส่วนของโซนอัดส่ง (metering zone) ทำหน้าที่ผสมเม็ดพลาสติกหลอมเหลวเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดความดันเพื่อนำให้เกิดการไหลของพลาสติกในกระบอกหลอม และส่งต่อพลาสติกหลอมเหลวไปยังหน่วยของตาย

2.1.6.2 หน่วยของตาย (die unit)

ของตายที่ใช้ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มเป็นของตายวงแหวน (annular die) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนด้านนอกของของตาย (die bushing) และส่วนที่เป็นแกนของของตาย (die mandrel) โดยทั่วไปของตายที่ใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์มมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 15 เซนติเมตร โดยอาจมีขนาดใหญ่ถึง 40 เซนติเมตรได้ในกรณีที่ต้องการฟิล์มที่มีความกว้างมาก การออกแบบของตายที่ใช้ขึ้นอยู่กับความต้องการ และความสะดวกในการใช้งาน หน่วยการหล่อเย็น (cooling unit) มีด้วยกัน 4 ประเภทดังต่อไปนี้

- Single-lip air ring การเย็บของฟิล์มเกิดจากการเป่าลมบริเวณด้านนอกของฟิล์ม โดยใช้วงแหวนลมเพียงตัวเดียว สามารถเพิ่มอัตราการเย็บตัวด้วยการเพิ่มความเวลาในการเป่าลมหรือการใช้ลมจากระบบให้ความเย็น ข้อดีของวิธีนี้คือราคาไม่แพง สำหรับข้อเสียของวิธีนี้คือเป็นการทำให้ฟิล์มมีการเย็บตัวแค่บริเวณภายนอกเท่านั้น อีกทั้งถ้าความเร็วในการเป่าลมสูงมากเกินไปทำให้ลูกโป่งเกิดการเสียรูปได้

- Dual-lip air ring การเย็บตัวของฟิล์มเกิดจากการเป่าลมบริเวณด้านนอกของฟิล์มโดยใช้วงแหวนลมสองตัวซึ่งลมจากวงแหวนลมด้านล่างทำหน้าที่เลี้ยงลูกโป่งเกิดการคงรูป คล้ายๆกับเป็นการหล่อลื่นให้กับระบบ ในขณะที่ลมจากวงแหวนลมด้านบนมีความเร็วสูง ทำหน้าที่ทำให้ฟิล์มเย็บตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นจากวงแหวนลมด้านบนควรมีค่ามากกว่าความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นจากวงแหวนลมด้านล่างเพราะทำให้เกิดการเย็บตัวของฟิล์มด้วยความเร็วสูงโดยที่ไม่เกิดการเสียรูปไปของลูกโป่ง ระบบนี้มีข้อดีคือทำให้ฟิล์มเย็บตัวลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับระบบ single-lip air ring สำหรับข้อเสียคือ ทำให้ฟิล์มเย็บตัวเฉพาะภายนอก

- Internal bubble การเย็บตัวของฟิล์มเกิดทั้งภายใน และภายนอกฟิล์ม ซึ่งภายนอกฟิล์มเย็บตัวจากการใช้อุปกรณ์ที่ในแบบเดียวกับระบบ single-lip air ring และ dual-lip air ring คือวงแหวนลม แต่ระบบนี้มีการเพิ่มอุปกรณ์ forced convection air ทำให้ฟิล์มเย็บตัวภายใน โดยวิธีการนี้ต้องรักษาความดันอากาศภายในลูกโป่งให้คงที่ ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการตรวจวัดและปรับค่าความดันของอากาศภายในลูกโป่งดังกล่าว ข้อดีของระบบนี้คือทำให้ฟิล์มเย็บตัวลงเร็วกว่าและยังได้ฟิล์มที่มีคุณภาพการผ่านแสงที่ดีกว่า อีกทั้งยังสามารถเป่าลมหล่อเย็นจากภายนอกด้วยความเร็วสูงได้เนื่องจากการควบคุมความดันภายในลูกโป่งคงที่ และยังได้ผลผลิตสูงกว่าการหล่อเย็นภายนอกอย่างเดียว 30-50% ซึ่งข้อเสียของระบบนี้คืออุปกรณ์แพงมาก

- Tubular water bath คือการใช้น้ำในการทำให้ฟิล์มเกิดการเย็บตัวโดยส่วนมากให้กับวิธีการเป่าลง วิธีนี้มีข้อดีคือเกิดการเย็บตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้น สามารถควบคุมอัตราการพองของลูกโป่ง (blow up ratio หรือ BUR) ได้ดีอีกทั้งยังเป็นการเกิดการเย็บตัวที่เร็วที่เร็วทำให้พอลิเมอร์กึ่งผลึกมีผลึกขนาดเล็ก ดังนั้นฟิล์มที่ได้มีความเหนียว (toughness) ความยืดหยุ่น และความใสมากขึ้น ซึ่งระบบนี้สามารถทำงานกับพลาสติกที่มีความหนืดต่ำได้ สำหรับข้อเสียของระบบนี้คือเกิดการรั่วซึมของน้ำได้ อีกทั้งค่าอัตราการพองของลูกโป่งมีค่าที่ตายตัวปรับเปลี่ยนได้ ส่วนมากการนำไปใช้

งานพัฒนาเพื่อใช้กับพอลิโพรพิลีนหรือใช้กับพลาสติกอื่นที่มีค่าความแข็งแรงในขณะหลอมเหลว (melt strength) ต่ำ

2.1.6.3 รูปแบบการเป่าฟิล์ม

- การเป่าลง วิธีการเป่าลงใช้กับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่ใหญ่มาก โดยใช้น้ำในการทำ ให้ฟิล์มเย็นตัว ดังนั้นฟิล์มใส เนื้อที่มีขนาดจำกัดเหมาะกับพลาสติกที่ค่าดัชนีการไหล (melt flow index หรือ MFI) ค่อนข้างสูง โดยค่าดัชนีการไหลที่สูงแสดงว่าฟิล์มค่อนข้างเหลว และมีความแข็งแรงขณะหลอมเหลว (melt strength) ที่ต่ำ เช่นพอลิโพรพิลีน แต่ข้อเสียคือระบบยุ่งยาก และไป สะดวก
- การเป่าขึ้น วิธีการเป่าขึ้นเป็นวิธีการโดยทั่วไปในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม โดยมี อัตราเร็วในการทำให้ฟิล์มเย็นตัวค่อนข้างช้าขึ้นอยู่กับความเร็ว และปริมาณของลม ดังนั้นอัตราการ ผลิตช้าตามไปด้วย โดยมีข้อเสียคือการเป่าขึ้นไปด้านบนต้องใช้เพดานที่มีความสูงมาก
- การเป่าในแนวนอน วิธีการเป่าในแนวนอนต้องมีสายพานในการรองรับไม่ให้ฟิล์ม ตกลงไปที่พื้น อีกทั้งอัตราการเย็นตัวไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้ากว้างฟิล์ม ดังนั้นในปัจจุบันจึงไม่ค่อยมี กระบวนการผลิตฟิล์มในแบบนี้เนื่องจากไม่ได้รับความนิยม [13, 27]

2.1.6.4 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม

- stalk height หมายถึงระยะทางที่ฟิล์มที่ฟิล์มพลาสติกรูปทรงกระบอกยืดออกมา จากตายก่อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขยายตัวออกเนื่องจากแรงดันของลมภายใน ซึ่งมี 2 ประเภท คือ short stalk และ long stalk
 - (1) short stalk หมายถึง ปรากฏการณ์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งพลาสติกมีการ ขยายใหญ่ขึ้นมาทันทีที่ออกจากตายโดยเกิดกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - (2) long stalk หมายถึง ปรากฏการณ์ที่ฟิล์มพลาสติกยืดออกมาจากตายเป็นคอ ประมาณ 15 ถึง 25 เซนติเมตรก่อนที่เกิดการขยายออก หรือพองตัวออกเป็นลูกโป่งใหญ่ๆ ทำให้เกิด ความแข็งแรงของฟิล์มทั้งสองทิศทางคือแนวแกนของเครื่องจักร และแนวขวางแกนของเครื่องจักร ซึ่งช่วงที่ดึงต่อนแรกเป็นการจัดเรียงตัวหนึ่งทิศทาง (uniaxial orientation) ในแนวแกนของ

เครื่องจักร ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมาก ซึ่งเกิดกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเนื่องจากมีความสามารถในการดึงยืดออกมาค่อนข้างดี

- ความสูงของแนวเย็นตัว หรือ frost line height (FLH) หมายถึงขอบรูปวงแหวนบนฟิล์มพลาสติกที่ออกจากตายที่เริ่มเปลี่ยนจากพลาสติกหลอมเหลว (มองดูใส) เป็นฟิล์มพลาสติกที่แข็งตัวแล้ว (ขุ่น) ซึ่งขยายขนาดไม่ได้แล้ว ถ้าขยายขนาดไม่ได้แล้ว ถ้าขยายขนาดอีกเป็นการยืดของเนื้อของแข็ง เป็นตำแหน่งที่ขยายตัวได้มากที่สุด ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายของฟิล์มเป็นตัวบ่งชี้ที่ใช้บอกคุณภาพของระบบการผลิต โดยความสูงของแนวเย็นตัวต้องมีความสูงของแนวเย็นตัวเปลี่ยนไป เช่น สูงขึ้นหมายความว่า มีการเย็นตัวช้า การหล่อเย็นช้าลง อุณหภูมิลดลง เป็นต้น ความสูงของแนวเย็นตัวเป็นผลของค่าอัตราเร็วการเย็นตัว โดยผลของอัตราการเกิดผลึกควบคุมโดยความเร็วของลม อุณหภูมิของลม อัตราการเย็นตัวที่ช้าๆ ผลคือฟิล์มแข็งแรงขึ้น แต่ความใสลดลง ทำให้เกิดการเลื่อนหายไปของรอยที่เกิดจากการตาย spider arm ผลคือฟิล์มมีความมันวาวมากขึ้น และ ลักษณะพื้นผิวเรียบมากขึ้น เพิ่มการเกิดการเชื่อมติดกันของฟิล์มในขณะม้วนเก็บ

- อัตราการพองของลูกโป่ง blow up ratio (BUR) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง (D_{bubble}) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตาย (D_{die}) ซึ่งโดยทั่วไป ค่าอัตราการพองของลูกโป่งของการเป่าฟิล์มมีค่าอยู่ในช่วง 2:1 – 6:1 ซึ่งการวัดการยืดออกของพลาสติกหลอมเหลวในทิศทางตั้งฉากกับการไหลออกจากตายหาได้จากสมการดังนี้ [13] ดังนี้

$$BUR = \frac{D_{bubble}}{D_{die}} = \frac{0.637 LFW}{D_{die}} \quad (2.1)$$

เมื่อ BUR คือ อัตราการพองของลูกโป่ง

D_{bubble} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง

D_{die} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตาย

LFW คือ ความกว้างของฟิล์มพลาสติกของฟิล์มที่พับแล้ว

โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการพองของลูกโป่งเมื่ออัตราการดึงยืดฟิล์มคงที่ ส่งผลให้ความกว้างของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มลดลง ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง แต่ความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

- อัตราการดึง draw down ratio (DDR) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วในการดึงยืดของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้งหรือหน่วยดึงกับความเร็วของการอัดรีด ซึ่งการวัดอัตราการดึงเป็นการวัดการยืดออกของพลาสติกหลอมเหลวในทิศทางการดึงของลูกกลิ้ง โดยหาได้จากสมการ [13]
ต่อไปนี้เป็น

$$DDR = \frac{V_{take-off}}{V_{die}} = \frac{H_{die}}{H_{film} BUR} \quad (2.2)$$

เมื่อ DDR คือ อัตราการดึง

$V_{take-off}$ คือ ความเร็วในการดึงของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้งหรือหน่วยดึง

V_{die} คือ ความเร็วของการอัดรีด

H_{die} คือ ความกว้างของตาย

H_{film} คือ ความหนาของฟิล์ม

BUR คือ อัตราการพองของลูกโป่ง

โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการดึงเมื่ออัตราการพองของลูกโป่งคงที่ ส่งผลให้ความยาวของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มลดลง ความแข็งแรงของฟิล์มในแนวแกนของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นแต่ความทนทานต่อแรงกระแทกของฟิล์มลดลง

- Blocking หมายถึง การที่ฟิล์มพลาสติกติดกันทางความร้อนตรงบริเวณผิวด้านนอกเป็นผลเนื่องมาจากในขณะม้วนเก็บฟิล์มพลาสติกยังร้อนเกินไปจึงเกิดการเชื่อมติดกันด้วยความร้อนซึ่งไม่ได้ติดกันเป็นเนื้อเดียวแต่ติดกันแค่บริเวณผิวฟิล์มพลาสติก โดยทั่วไปสาเหตุของการติดกันของฟิล์มพลาสติกอาจมีสาเหตุมาจากการติดกันทางความร้อน การติดกันทางไฟฟ้าสถิตซึ่งสามารถเกิดได้เนื่องจากการถูฟิล์มกับเหล็ก ดังนั้นอาจทำการเติมสารป้องกันไฟฟ้าสถิตเพื่อลดการติดฟิล์ม

- Slip characteristics หมายถึง การลื่นไปมาของฟิล์มพลาสติกเมื่อถูแผ่นฟิล์มพลาสติกในม้วนเก็บ [13]

2.1.6.5 ข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม

- ข้อดีของกระบวนการเป่าฟิล์มคือ ได้ฟิล์มที่มีหน้ากว้างมาก เป็นที่นิยมมากเพราะสามารถทำได้ง่าย สะดวก ไม่ยุ่งยาก มีต้นทุนต่ำ ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง
- ข้อเสียคือ ต้องควบคุมความหนาจากปริมาณลม และความดันเท่านั้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tabatabaei และ คณะ [10] ศึกษาการพัฒนาเมมเบรนเลือกผ่านจากพอลิโพรพิลีนชนิด PP28 และ PP08 ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 2.8 และ 0.8 กรัม/10 นาที ตามลำดับ จากการเตรียม precursor film ด้วยกระบวนการอัดรีดที่ติดตั้งอุปกรณ์ air knife แล้วปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการดึง (Draw ratio : DR) เป็น 70, 80 และ 90 พบว่าฟิล์มของทุกสัดส่วนมีค่า orientation function ของวัฏภาคผลึกสูงขึ้นตามค่า DR ที่เพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เตรียมด้วยค่า DR ต่ำๆ lamellae ผลึกไม่สามารถเกิดการจัดเรียงในแนวตั้งฉากกับทิศทางของเครื่องจักรได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยการเติม PP08 นั้นมีค่าการจัดเรียงตัวของผลึกสูงกว่า precursor film ของ PP28 เมื่อทดลองนำ precursor film ไปทำการอบอ่อน และดึงยืดที่ภาวะต่างๆ ได้แก่ อบอ่อนอย่างเดียวที่ 120 ที่ 140 องศาเซลเซียส และ อบอ่อนที่ 140 องศาเซลเซียส พร้อมยืดที่ร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่า การอบอ่อนอย่างเดียวที่ 140 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าหรือมีการดึงระหว่างอบอ่อน เมื่อนำ precursor film ซึ่งเตรียมด้วย DR 70 และผ่านการอบอ่อนที่ 140 องศาเซลเซียส มาดึงยืดเพิ่มเติม ผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง พบว่า ฟิล์มที่มี PP08 เป็นส่วนประกอบมีแนวโน้มให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดลดลงทั้งแนว MD และ TD จากการศึกษาวิเคราะห์อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีรูพรุนที่เล็กและปริมาณของรูพรุนที่มากกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีน ดังนั้นดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันสามารถส่งผลต่อขนาดและการเกิดรูพรุนของฟิล์มได้

Tabatabaei และ คณะ [7] ศึกษาการพัฒนาเมมเบรนเลือกผ่านในแบบเตอริลิเทียมจากพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในรูปของฟิล์ม PP ชั้นเดียว HDPE ชั้นเดียว และฟิล์มหลายชั้นของ PP/HDPE/PP จากการศึกษาตัวแปรในขั้นตอนการเตรียม precursor film ด้วยกระบวนการอัดรีด ได้แก่ DR (60 และ 90 มม./นาที) อัตราเร็วของลมหล่อเย็น (cold air flow rate: AFR) และการอบอ่อนฟิล์ม 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที พบว่าผลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นการจัดเรียงตัวของระนาบ 110 และ 040 ของผลึกในชั้นฟิล์ม PP และ

ระนาบผลึก 110 ของผลึกในชั้นฟิล์ม HDPE นั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยน DR จาก 60 เป็น 90 มม./นาที่ อีกทั้งการจัดเรียงตัวที่สูงขึ้นยังเกิดได้เมื่อเพิ่มค่า AFR จาก 1.2 เป็น 12 ลิตร/วินาที เมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์ม precursor film ที่เตรียมด้วย DR 90 ที่ H-AFR (12 ลิตร/วินาที) ซึ่งถูกดึงยืดเย็น (cold stretching) ร้อยละ 55 และต่อด้วยการดึงยืดร้อน (hot stretching) ร้อยละ 75 ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่า ชั้นของพอลิเอทิลีนมีรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่าชั้นของพอลิโพรพิลีน และมีส่วนของวัฏภาคพอลิเอทิลีนเข้าไปบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นของพอลิโพรพิลีน และชั้นของพอลิเอทิลีน จึงส่งผลให้ฟิล์ม PP/HDPE/PP มีค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่าฟิล์มชั้นเดียวของพอลิโพรพิลีน อย่างไรก็ตาม ค่า water vapor transmission rate (WVTR) ของฟิล์มหลายชั้นมีค่าน้อยกว่าฟิล์มชั้นเดียว

Shanks และคณะ [8] ศึกษาความเข้ากันได้ และลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน โดยพอลิเอทิลีนที่ใช้คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์รวมที่ต่างกัน ได้แก่ LLDPE ซึ่งใช้เฮกซีนร้อยละ 5 เป็นมอนอเมอร์รวม VLDPE และ ULDPE ซึ่งใช้บิวทีนเป็นมอนอเมอร์รวมร้อยละ 6.3 และ 20 ตามลำดับ ผลการติดตามการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ผสมด้วยพอลิเอทิลีนที่สังเคราะห์โดยใช้เฮกซีนเป็นมอนอเมอร์รวมนั้นสามารถเกิดผลึกได้ค่อนข้างช้ากว่าในกรณี HDPE และ LDPE อย่างมาก แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของพอลิเอทิลีนมีผลต่อความเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีน โดยโครงสร้างแบบเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ (LLDPEs) นั้นมีความเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนมากกว่า

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีน และฟิล์มเป่าผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน มีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดของพอลิเมอร์ และอัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว

ชนิดพอลิเมอร์	บริษัทผู้ผลิต	เกรด	มาตรฐานการทดสอบ MFI	อัตราการไหล เมื่อหลอมเหลว
พอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene)	บริษัท A	เป่า	ASTM D1238 (230°C / 2.16 kg), dg/min	2.0
พอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene)	บริษัท B	เป่า	ASTM D 1238 (230°C / 2.16 kg), g/ 10 นาที	2.4
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE: High Density Polyethylene)	SCG Plastics Co.,Ltd	EL-Lene H355JA	ASTM D 1238 (190°C / 2.16 kg), g/ 10 นาที	7.5
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE: Low Density Polyethylene)	PTT Polymer Co..Ltd.	LD 2426K	ISO 1133 (190°C / 2.16 kg), g/ 10 นาที	4.0
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene)	PTT Polymer Co..Ltd	LL8420A	ASTM D1238 (190°C / 2.16 kg), g/ 10 นาที	20
พอลิเอทิลีนแวกซ์ (PE Wax Powder)	SCG Plastics Co.,Ltd	LP1020P	ASTM D3236 Viscosity at 149 °C (cPs)	10-20

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยรังสี (Infrared thermometer) ของ Cason รุ่น CA380 (รูปที่ 3.1) ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิในช่วง (-32) - 380 องศาเซลเซียส ระยะในการวัด 12 : 1 ใช้ระบบดิจิทัลในการแสดงผลทางจอภาพ ความแม่นยำในการวัด (+/-) 2 %



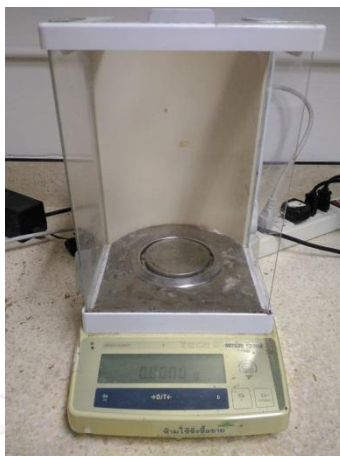
รูปที่ 3.1 เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยรังสี

3.2.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าสองตำแหน่ง (Balance) ของ AND company Limited รุ่น FZ-3000i (รูปที่ 3.2) สำหรับการชั่งน้ำหนักก่อนการผสมของพอลิเมอร์ที่สัดส่วน 85/15 และ 60/40 โดยน้ำหนัก คือ พอลิโพรพิลีน 0.85 กิโลกรัม ต่อ พอลิเอทิลีน 0.15 กิโลกรัม และ พอลิโพรพิลีน 0.6 กิโลกรัม ต่อ พอลิเอทิลีน 0.4 กิโลกรัม ชั่งตามปริมาณที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งสองตำแหน่ง

3.2.3 เครื่องชั่งไฟฟ้าสี่ตำแหน่ง (Balance) ของ METTLER TOLEDO รุ่น AB204-S (รูปที่ 3.3) สำหรับการชั่งน้ำหนักฟิล์มก่อนและหลังซบน้ำมันในการหาปริมาณการดูดซบน้ำมันเพื่อหาปริมาณรูพรุน



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งไฟฟ้าสี่ตำแหน่ง

3.2.4 เครื่องอัดรีดเกลียวคู่ (twin screw extruder) ของ Lab tech รุ่น LTE26-44 (รูปที่ 3.4) ใช้ในการผสม ของ PP1wax15 และ PP2wax15 สัดส่วนความยาวต่อความโตของช่องทางการไหล (L/D Ratio) เท่ากับ 44 และขนาดของสกรู 26 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วรอบสกรูในการผสม 22 – 26 rpm



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดเกลียวคู่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและแวกซ์

3.2.5 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) ของ Lab tech รุ่น LF-400-COEX . (รูปที่ 3.5) ใช้ในการเป่าฟิล์ม PP1 PP2 และฟิล์มเป่าผสม สัดส่วนความยาวต่อความโตของช่องทางการไหล (L/D Ratio) เท่ากับ 30 และขนาดของสกรู 30 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วรอบสกรูในการผสม 20-25 rpm



รูปที่ 3.5 เครื่องเป่าฟิล์มที่ใช้ในการขึ้นรูปเพื่อเตรียมฟิล์มรูปทรงแปดเหลี่ยม

3.2.6 เครื่องมือสำหรับการดึงยึดฟิล์ม (Uniaxial orientation) ใช้การประยุกต์ของเครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K (รูปที่ 3.6 (ก)) และ ของ LLOYD รุ่น 500 (รูปที่ 3.6 (ข)) ใช้ load cell 100 N ในการเตรียมฟิล์มรูปทรงแปดเหลี่ยม PP1 และ ฟิล์มผสม PP1 ใช้เครื่อง Universal testing machine รุ่น LR100K และการเตรียมฟิล์มรูปทรงแปดเหลี่ยม PP2 และ ฟิล์มผสม PP2 ใช้เครื่อง Universal testing machine รุ่น 500

(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K(ก) และ LLOYD รุ่น 500(ข)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

3.3.1. Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K (รูปที่ 3.6 (ก)) และ รุ่น 500 (รูปที่ 3.7 (ข)) ใช้ load cell 100 N อัตราเร็วของการดึงยืด 50 มิลลิเมตร/นาที .ใช้ ระยะการวัด (gage length) 100 มิลลิเมตร ในการทดสอบฟิล์ม PP1 และ ฟิล์มผสม PP1 ใช้ รุ่น LR100K และ การทดสอบฟิล์ม PP2 และ ฟิล์มผสม PP2 ใช้ รุ่น 500

3.3.2. Scanning Electron Microscope (SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6480LV (รูปที่ 3.7) ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลวัตต์ ที่กำลังขยาย 2,500 5,000 และ 10,000 เท่า ซึ่งใช้สลับที่ติดแท่งเหล็กเพิ่ม เพื่อดูสัณฐานวิทยาตามแนวขวาง



รูปที่ 3.7 Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.3. Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของ METTLER รุ่น DSC 204 F1 (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 Differential Scanning Calorimeter (DSC)

3.3.4. ด้วยเครื่อง Melt flow Indexer ของ kayeness Inc Honey Brook, PA, USA.

(รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 เครื่อง Melt flow Indexer

3.4. วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม

- สำหรับสูตรที่ใช้พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน (ตารางที่ 3.2) ให้ชั่งน้ำหนักตามสัดส่วน 85/15 และ 60/40 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาบรรจุลงถุง เพื่อทำการเขย่าและผสมให้เกิดการกระจายตัวคลุกเคล้าอย่างทั่วถึง
- สำหรับสูตรที่ใช้พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนแกวซ์ด้วยสัดส่วน 85/15 โดยชั่งตามสัดส่วนดังกล่าว แล้วนำมาบรรจุลงถุง เพื่อทำการเขย่าและผสม หลังจากผสมเบื้องต้นแล้วให้นำมาผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ (รูปที่ 3.4) ที่อุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.3 โดยใช้ความเร็วรอบของสกรู 34 รอบ/นาที จากนั้นผ่านเข้าเครื่องตัดเม็ด ที่ความเร็ว 10 – 15 รอบ/นาที ซึ่งได้เม็ดพอลิเมอร์ผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 2.25 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนร้อยละ 15 และ 40 โดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์ของ พอลิเมอร์ผสม	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของพอลิโพรพิลีน		อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีน			
	PP1 (MFI:2.4)	PP2 (MFI:2.0)	ชนิดความ	ชนิดความ	ชนิดความ	ชนิดแวก
			หนาแน่น สูง	หนาแน่น ต่ำ	หนาแน่น ต่ำเชิงเส้น	
PP1	100					
PP1HD15	85		15			
PP1HD40	60		40			
PP1LD15	85			15		
PP1LD40	60			40		
PP1LL15	85				15	
PP1LL40	60				40	
PP1wax15	85					15
PP2		100				
PP2HD15		85	15			
PP2HD40		60	40			
PP2LD15		85		15		
PP2LD40		60		40		
PP2LL15		85			15	
PP2LL40		60			40	
PP2wax15		85				15

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิภายในเครื่องอัดรีดสกรูคู่จากโซน hopper (โซน 1) จนถึงตาย (โซน 11) ที่ใช้สำหรับเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ (องศา- เซลเซียส)	โซน	โซน	โซน	โซน	โซน	โซน	โซน	โซน	โซน	โซน	โซน
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
PP1wax15	145	155	165	170	180	195	195	195	185	170	160
PP2wax15	170	175	180	180	190	180	200	200	195	190	180

3.4.2 การเตรียมฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม

นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากขั้น 3.4.1 มาขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม ทั้งนี้ตัวแปรในการขึ้นรูป ระบุในตาราง 3.4 งานวิจัยนี้ได้ทดสอบเลือกใช้ ความเร็วของรอบมอเตอร์ของลมหล่อเย็นต่างกัน 3 ค่า คือ 400 700 1,000 rpm เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเย็นตัวต่อสมบัติของฟิล์มเป่าที่ได้ ระหว่างการขึ้นรูปและทำการวัดอุณหภูมิของฟิล์มเป่า เมื่อผ่านออกมาจากตายที่ระยะความสูง 0 11 27 42 และ 56 เซนติเมตร ด้วยเครื่อง Infrared thermometer (รูปที่3.1)

ตารางที่ 3.4 ภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม

ภาวะการขึ้นรูป		หน่วย
อุณหภูมิโซน 1 (ฮอบเปอร์)	190	°C
อุณหภูมิโซน 2 (บารเรล)	190	°C
อุณหภูมิโซน 3 (บารเรล)	200	°C
อุณหภูมิโซน 4 (บารเรล)	200	°C
อุณหภูมิโซน 5 (ตายทรงกลม)	200	°C
อุณหภูมิโซน 6 (ข้อต่อ)	200	°C
อุณหภูมิโซน 7 (ตายแผ่นล่าง)	200	°C
อุณหภูมิโซน 8 (ตายแผ่นกลาง)	200	°C
อุณหภูมิโซน 9 (ตายแผ่นบน)	200	°C
อุณหภูมิโซน 10 (ตายวงแหวน)	200	°C
ความเร็วรอบสกรู	20/25	rpm
ความเร็วลูกกลิ้งหนีบ	1.5	m/min
ความเร็วลูกกลิ้งม้วนเก็บ	2.5	m/min
ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น หล่อเย็น	400,700 และ 1,000	rpm

3.4.3 การดึงยืดฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม

ตัดฟิล์มเป่าตามแนว MD เป็นชิ้นขนาด 25×100 mm² แล้วนำมาดึงยืด (orientation) ตามแนว MD ด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยใช้ load cell ขนาด 100 N ทั้งนี้ อัตราเร็วของการดึงยืดคือ 50 mm/min และระดับการดึงยืดร้อยละ 50 และ 100 โดยทำการดึงยืดฟิล์มเป่าชนิดละ 15 ชิ้น เพื่อนำไปตรวจสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติความเป็นรูพรุนและ

สัณฐานวิทยา

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

3.4.4.1 สัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM ของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนก่อนการดึงยืด และ หลังดึงยืดร้อยละ 50 และ 100 ในแนวตัดขวาง (cross section) ด้วยเทคนิค Freeze fracture โดยการนำฟิล์มความกว้าง 20 – 25 มิลลิเมตร แช่ไนโตรเจนเหลว ในระบบปิดเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นหักฟิล์มด้วยคีมคีบในแนว MD ของฟิล์ม และนำไปแช่บนแท่งสตั๊บ จากนั้นนำไปไว้ที่จุดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาเคลือบทองที่ผิวของสตั๊บ ทำการเข้าเครื่องทดสอบ โดยใช้ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลวัตต์ ที่กำลังขยาย 2,500 5,000 และ 10,000 เท่า

3.4.4.2 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature หรือ T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature หรือ T_c) และระดับความเป็นผลึก (%Crystallinity หรือ X_m) ของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม เตรียมชิ้นงานของฟิล์ม PP1 และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมน้ำหนัก 3 - 4 มิลลิกรัม และ ฟิล์ม PP1 และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมน้ำหนัก 10 - 11 มิลลิกรัม ลงใน aluminum pan โดยใช้อัตราเร็ว $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ใช้การทดสอบแบบ heat-cool-heat ช่วงอุณหภูมิการให้ความร้อนครั้งที่ 1 คือ -60°C ถึง 200°C ช่วงอุณหภูมิการเย็นตัวคือ 200 ถึง (-60) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 คือ -60°C ถึง 200°C ระดับความเป็นผลึก (%Crystallinity) คำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$X_m = \frac{\Delta H_m}{f \times \Delta H_m^{\circ}} \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ

X_m คือ ระดับความเป็นผลึก (%Crystallinity)

ΔH_m คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึก

ΔH_m° คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึก (ตารางที่ 3.5)

f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ผสม

ตารางที่ 3.5 ค่าเอนทาลปีของการหลอมผลึกของพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน

ชนิดพอลิเมอร์	ΔH_f°
พอลิโพรพิลีน (PP)	207 [28]
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	289 [29]
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	250 [30]
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)	277 [31]

3.4.4.3 สมบัติการทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine

ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงได้แก่ มอดุลัส (Modulus) ความทนแรงดึง (Tensile strength at maximum load) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D882 เตรียมฟิล์มขนาด 25×100 มม.² ในแนวแกนของเครื่องจักร (MD) โดยใช้ load cell 100 N และใช้อัตราเร็วการทดสอบ 5 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง

3.4.4.4 การวิเคราะห์ดัชนีการหลอมไหล (MFI)

ทดสอบดัชนีการหลอมไหล (melt flow indexer) (รูปที่ 3.9) ณ ภาวะทดสอบตามตารางที่ 3.1 คำนวณและบันทึกผลในหน่วยกรัม/10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1238

3.4.4.5 สมบัติความเป็นรูพรุนด้วยการวัดปริมาตรดูดซับน้ำมัน

ทดสอบสมบัติความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่าที่ผ่านการดึงยึดแล้ว โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 10×30 มม.² จำนวน 5 ตัวอย่าง พร้อมชั่งน้ำหนัก W_d (รูปที่ 3.8) จากนั้นนำไปแช่ในน้ำมันพืชเป็นเวลา 10 วินาที (รูปที่ 3.10) จากนั้นใช้กระดาษทิชชูซับน้ำมันที่ไม่สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในฟิล์มเป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วจึงนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก W_s ซึ่งร้อยละความเป็นรูพรุน (Porosity % หรือ ϵ) ของฟิล์มคำนวณตามสมการดังนี้

$$\epsilon = \frac{W_s - W_d}{A l \rho} \times 100\% \quad (3.2)$$

เมื่อ

ϵ คือ ร้อยละความเป็นรูพรุนของฟิล์ม (%)

W_s คือ น้ำหนักของฟิล์มที่อิ่มตัวด้วยน้ำมันปาล์ม (mg)

W_d คือ น้ำหนักของฟิล์มแห้ง (mg)

A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (mm^2)

l คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม ($0.8940 \text{ mg}/\text{mm}^3$)



รูปที่ 3.10 แสดงภาพวิธีการชั่งน้ำมันและการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังแช่น้ำมัน

บทที่ 4

ผลการทดลอง และ วิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเตรียมฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็กด้วยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีน (PE) โดยเลือกใช้ PE ที่ต่างกัน 4 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และพอลิเอทิลีนแว็กซ์ (wax) (ตารางที่ 3.1) ด้วยสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของ PP ต่อ PE เป็น 100/0 85/15 และ 60/40 ใช้กระบวนการเป่าฟิล์มโดยทดลองปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น เพื่อศึกษาอิทธิพลของภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์มต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้ ทั้งนี้ผลการศึกษารายงานตามเกรดของ PP ที่เลือกใช้ 2 ชนิด (ตารางที่ 3.1) ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.1 – 4.3

4.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มผสมระหว่าง PP1 และ PE

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (PP1/PE) ที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าลมหล่อเย็นที่ป้อนภายนอกลูกโป่งฟิล์มมีผลต่อความยับและความหนาของฟิล์มเป่าที่เตรียมได้อย่างเห็นได้ชัด การปรับมอเตอร์ที่ควบคุมลมหล่อเย็นให้มีรอบสูงขึ้นจาก 400 เป็น 700 rpm สามารถลดความยับของฟิล์มที่เตรียมได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมีค่าน้อยลง เนื่องด้วยเครื่องเป่าฟิล์มที่ใช้เป็นแบบเป่าขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมออกจากตายความหนืดที่ค่อนข้างต่ำส่งผลให้ลูกโป่งฟิล์มสามารถเกิดการหลุดตัวลงมา ลมที่ป้อนเพื่อหล่อเย็นลูกโป่งจึงมีหน้าที่ช่วยประคองส่งลูกโป่งไปด้านบน ดังนั้นหากรอบของมอเตอร์ต่ำ ปริมาณลมที่ประคองก็ไม่มากพอที่ทำให้ลูกโป่งทรงตัวได้ดี ส่งผลให้ฟิล์มมีความยับมากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณลมที่สูงขึ้นมีแนวโน้มให้ลูกโป่งฟิล์มเกิดการยึดตัวมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาลดลงเป็นลำดับเมื่อเพิ่มรอบมอเตอร์จาก 400 เป็น 700 และ 1,000 rpm

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม PP1/PE พบว่ามีเพียงฟิล์มที่เตรียมด้วย PP1/HDPE ที่มีความเรียบใกล้เคียงกับฟิล์ม PP1 ในขณะที่ฟิล์มที่ใช้ PE เป็น LLDPE และ wax ซึ่งมีความหนืดต่ำมาก (ตารางที่ 4.1) มีระดับความยับมากที่สุด ทั้งนี้สัมพันธ์กับค่า MFI ของ LLDPE ที่แสดงในตารางที่ 4.2 รวมถึงความหนืดที่รายงานทางการค้าของ wax มีค่า 20-40 cPs เมื่อตรวจวัดที่อุณหภูมิ 149 องศาเซลเซียส ด้วยความหนืดที่ต่ำมากของ wax ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการวัดค่า MFI

ด้วยเครื่อง melt flow Indexzer ได้ แม้ว่าค่า MFI ของ HDPE ที่รายงานในตารางที่ 4.2 มีค่าสูงกว่าของ LDPE แต่ระดับความยับของฟิล์มที่เตรียมจาก PE ชนิด HDPE มีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นผลของผลึกภายในฟิล์มที่สูงกว่าในกรณีที่ใช้ HDPE จึงทำให้ฟิล์มค่อนข้างแข็งแรง และทรงรูปกว่า จากความหนืดของ wax ที่น้อยมาก และมีลักษณะเป็นผง ส่งผลให้ไม่เหมาะสมผสมกับพอลิโพรพิลีนทางกายภาพ แล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการเป่าฟิล์ม ดังนั้นในสูตรที่เป็น PP1/wax จึงมีขั้นตอนการผสมด้วยการหลอมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เพื่อช่วยในการผสมระหว่าง PP และ wax ก่อนการนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่า และจากการขึ้นการผสม พบว่าหากใช้ wax สูงถึงร้อยละ 40 ของผสมมีความหนืดต่ำมากจนไม่สามารถเตรียมเป็นเส้นเพื่อตัดเม็ดได้ ดังนั้นกรณี PP1/wax ถึงมีการศึกษาเพียงที่สัดส่วน 85/15 เท่านั้น ความหนืดที่ต่ำมากของ LLDPE และ wax ยังส่งผลให้ต้องปรับรอบสกรูให้สูงขึ้นในการขึ้นรูปฟิล์ม PP1/LL ที่สัดส่วน 60/40 และ PP1/wax ที่สัดส่วน 85/15 ให้มีความหนาตามที่ต้องการ (ตารางที่ 4.3)



ตารางที่ 4.1 สมบัติทางแสง ความยับ และความหนาของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP/PE ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วมอเตอร์ที่ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

ฟิล์มเป่า	ความเร็วของ			ความหนาของฟิล์ม (ไมโครเมตร)
	มอเตอร์ควบคุม ลมหล่อเย็น	สมบัติทางแสง	ความยับ	
PP1	400	TL	1	58±0.004
	700	TL	0	55±0.002
	1,000	TL	0	54±0.003
PP1HD15	400	TL	1	80±0.007
	700	TL	0	63±0.006
	1,000	TL	0	59±0.002
PP1HD40	400	TL	1	69±0.001
	700	TL	0	68±0.004
	1,000	TL	0	62±0.002
PP1LD15	400	TL	2	63±0.007
	700	TL	1	51±0.008
	1,000	TL	1	45±0.004
PP1LD40	400	TL	2	56±0.004
	700	TL	1	53±0.007
	1,000	TL	1	48±0.004
PP1LL15	400	TL	3	70±0.004
	700	TL	2	60±0.006
	1,000	TL	2	50±0.008
PP1LL40	400	TL	3	56±0.004
	700	TL	2	55±0.007
	1,000	TL	2	50±0.004
PP1wax15	400	TL	3	71±0.002
	700	TL	2	57±0.005
	1,000	TL	2	50±0.004

หมายเหตุ * TP คือ โปร่งใส(Transparent) TL คือ โปร่งแสง(Translucent)

** 0 คือ ไม่ยับ 1 คือ ยับน้อย 2 คือ ยับปานกลาง และ 3 คือ ยับมาก

ตารางที่ 4.2 ค่า flexural strength และดัชนีการไหลของ PP1 PP2 HDPE LDPE และ LLDPE ที่ได้จากเครื่อง melt flow indexer เปรียบเทียบกับค่าที่รายงานทางการค้า

วัสดุ	ดัชนีการไหลทางการค้า (กรัม/ 10 นาที)	ดัชนีการไหลที่วัดได้ (กรัม/ 10 นาที)	มอดูลัสในแนวการตัดโค้ง (MPa) ASTM D790A	ความทนแรงดึง (MPa)	ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด
PP1	2.4	3.7±0.49	1,323	N/A	650
PP2	2.0	2.6±0.70	1,800	N/A	N/A
HDPE	7.5	7.6±0.07	1,323	N/A	1,150
LDPE	4.0	4.3±0.53	N/A	20	N/A
LLDPE	20	22±0.60	N/A	25	N/A

หมายเหตุ *N/A คือ ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้เนื่องจากมาตรฐานการทดสอบไม่ตรงกัน

ฟิล์ม PP1 ที่ได้มีลักษณะโปร่งแสง (รูปที่ 4.1 (ก)) แสดงถึงความเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกของ PP1 อีกทั้งผลึกมีขนาดใหญ่จนเกิดการกระเจิงแสง จึงไม่เห็นเป็นฟิล์มที่มีลักษณะโปร่งใส สำหรับฟิล์ม PP1/PE ส่วนใหญ่พบว่ามีความโปร่งแสงของฟิล์มไม่ต่างจากของฟิล์ม PP1 มากนัก มีฟิล์มที่เตรียมด้วยการผสมกับ wax (รูปที่ 4.1 (ข)) มีความขุ่นมากกว่าฟิล์มอื่นๆ ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเป็นผลจากทั้งการมีอยู่ของผลึก และการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของลูกโป่งฟิล์มที่ระดับความสูงห่างจากหัวตายที่ 0 11 27 42 และ 56 เซนติเมตร (ตารางที่ 4.3) พบว่า อุณหภูมิที่วัดได้จากระยะ 0 เซนติเมตร แตกต่างจากอุณหภูมิที่ตั้งไว้ค่อนข้างมาก ซึ่งอาจเกิดจากการผิดพลาดขณะทำการวัดผิวฟิล์ม โดยอุปกรณ์วัดอาจสัมผัสกับลมที่หล่อเลี้ยงลูกโป่งฟิล์มแทน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าที่ได้ที่ระยะการวัดระดับอื่นๆ พบว่าลูกโป่งฟิล์มมีระดับการเย็นตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นอุณหภูมิของฟิล์มเป่าในช่วง 11 เซนติเมตร ที่ออกจากตายลดลงอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าช่วงที่พอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวผลึกได้อยู่ในระยะดังกล่าวเท่านั้น

(ก)	<p>PP1</p> <p>เมื่อพิจารณาลักษณะ สัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่าที่ไม่ ผ่านการดึงยืด (รูปที่ 4.6) พบว่า ไม่สังเกตเห็นโพรงในเนื้อฟิล์ม PP1 อย่างชัดเจนนัก (4.6(1ก) –</p>	(ข)	<p>PP1wax15</p> <p>พรมบางฟิล์มที่เตรียมได้ ซึ่งลักษณะโพรงที่เหมาะสมควร เป็น โพรงขนาดเล็กที่กระจายไป ทั่วฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 4.8(2ก) และ 4.8(3ก) ของฟิล์ม</p>
(ค)	<p>PP1HD15</p> <p>400 (4.7(1ก) และ 1.7(1ข)) และ 700 rpm (รูปที่ 4.8(1ก) และ 4.8(1ข)) ลักษณะ โพรงขนาดใหญ่ในฟิล์มจะเริ่ม สังเกตเห็นได้เมื่อทำการดึงยืด</p>	(ง)	<p>PP1HD40</p> <p>4.6(1ก) ในขณะที่ฟิล์ม PP1/PE ซึ่งใช้ HDPE จะเริ่ม สังเกตเห็นโพรงชัดเจนในฟิล์มที่ ขึ้นรูปด้วยความเร็วลม 700 rpm (รูปที่ 4.8(2-3ข)) แต่ฟิล์มที่</p>
(จ)	<p>PP1LD15</p> <p>ร้อยละ 100 ในขณะที่ ฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วลม 1000 (4.9(1ก) และ 4.9(1ข)) จะเริ่มสังเกตเห็นโพรงขนาดใหญ่ ตั้งแต่การใช้อัตราการดึงยืดฟิล์ม</p>	(ฉ)	<p>PP1LD40</p> <p>ใช้ LDPE และ LLDPE จะเริ่มพบโพรงในฟิล์มที่เตรียม ได้ตั้งแต่การเลือกใช้ความเร็วลม ต่ำที่สุดอย่าง 400 rpm (รูปที่ 4.6(3-5ก)) ผลการศึกษ</p>
(ช)	<p>PP1LL15</p> <p>ที่ 50 อิทธิพลของ ความเร็วลมที่ใช้ต่อลักษณะ สัณฐานวิทยาของฟิล์มน่าจะ เกี่ยวข้องกับการ orientati</p>	(ซ)	<p>PP1LL40</p> <p>เปรียบเทียบกับระดับ ความเป็นรูพรุน การดึงยืดฟิล์ม จนเกิดลักษณะของโพรงรูปร่าง วงรีที่ขยายความยาวในแนว MD มักส่งผลในทางลบต่อระดับรู</p>

รูปที่ 4.1 ลักษณะการมองเห็นตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษ เมื่อมีฟิล์มเป่า PP1 (ก) PP1wax15 (ข) PP1HD15 (ค) PP1HD40 (ง) PP1LD15 (จ) PP1LD40 (ฉ) PP1LL15 (ช) และ PP1LL40 (ซ) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ปิดอยู่ทางครึ่งด้านขวา

4.1.2 สมบัติด้านแรงดึง

เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัส ความทนแรงดึง และร้อยละการยืดตัวที่แสดงในตารางที่ 4.4 ของฟิล์ม PP1 และฟิล์ม PP1/PE พบว่าการผสมด้วย PE ชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่าง wax มีผลต่อค่าร้อยละการยืดอย่างมาก โดยการผสมด้วยปริมาณเพียง 15% ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีร้อยละการยืดเพียง ~ 7 - 16 เมื่อเทียบกับฟิล์มชนิดอื่นที่มีค่าร้อยละการยืด ~ 400 - 700 (รูปที่ 4.2 และ 4.3) เมื่อพิจารณาสมบัติด้านแรงดึงของฟิล์มที่ผสมด้วย HDPE LDPE และ LLDPE สังเกตได้ว่ามีเพียงการใช้ HDPE ที่มีมอดูลัส และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงกว่าฟิล์ม PP1 โดยค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด ก็ไม่ด้อยไปกว่า ฟิล์ม PP1 เนื่องด้วย PE ที่ใช้ศึกษาเป็นเกรดชนิด ดั้งนั้นการพิจารณาสมบัติเชิงกลของ PE จึงอาศัยข้อมูลที่ได้จากทางการค้า จากข้อมูลที่รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 อาจกล่าวได้ว่า PP1 และ HDPE มีค่ามอดูลัสที่ใกล้เคียงกัน แต่ HDPE มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่สูงกว่า PP1 เกือบเท่าตัว ในขณะที่ทั้ง LDPE และ LLDPE มีมอดูลัส และค่าการทนแรงดึงที่ต่ำกว่า PP1 อย่างชัดเจน ดังนั้นเมื่อผสม LDPE และ LLDPE จึงส่งผลในเชิงลบต่อค่ามอดูลัส และค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าที่เตรียมได้ โดยมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณที่ใช้

เมื่อพิจารณาปริมาณของ PE พบว่าค่ามอดูลัส และร้อยละการยืดของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PE ทั้งนี้เชื่อว่าเป็นผลของปริมาณวิภาคของ PE ที่สูงขึ้น ดังนั้นปริมาณรอยต่อระหว่างวิภาคซึ่งมีความแข็งแรงต่ำกว่าจึงเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจึงเกิดการฉีกขาดเสียหายได้ง่ายขึ้น เป็นที่สังเกตว่ามอดูลัสของฟิล์ม PP1HD15 PP1HD40 และ PP1LL15 มีค่ามากกว่าฟิล์ม PP1 แสดงว่า PE ดังกล่าวช่วยเสริมแรงให้แก่ PP เมทริกซ์ ซึ่งในกรณีของ HDPE นั้นมีความเป็นไปได้ แต่ในกรณีของ LLDPE ซึ่งมีค่ามอดูลัสที่ค่อนข้างต่ำกว่าของ PP1 จึงเชื่อว่าเป็นผลของการจัดเรียงโครงสร้างของ PE ที่ช่วยเสริมแรงให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวได้ หรืออาจเป็นผลของปริมาณผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งต้องพิจารณาผลที่วิเคราะห์ได้จาก DSC ต่อไป

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น พบว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้ค่ามอดูลัส และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม ลดลงบ้างพอควร ทั้งนี้อาจสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มที่ลดลง

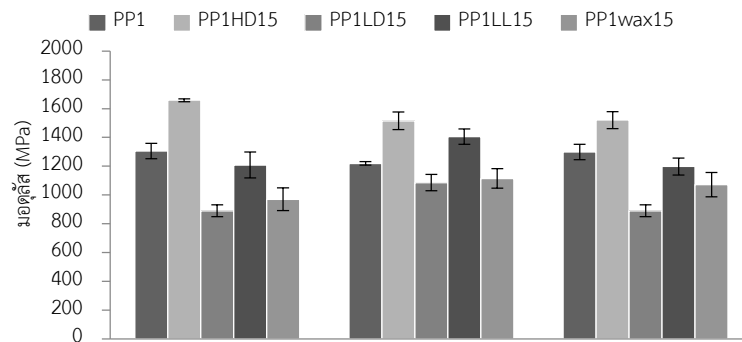
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของลูกโป่งฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1/PE ที่ระดับความสูงต่างจากตาย เมื่อขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

ฟิล์มเป่า	ความเร็วของสกรู (rpm)	ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น (rpm)	อุณหภูมิ (°C) ของฟิล์มเป่า ที่ระดับความสูง (cm.)				
			0	11	27	42	56
PP1	20	400	90.3	51.9	48	45.1	44.7
		700	84.6	50.2	48	45.0	44.3
		1,000	83.1	49.2	46.5	44.9	43.6
PP1HD15	20	400	161.3	62.5	52.7	48.9	47.7
		700	159.8	55.8	52.1	48.0	45.9
		1,000	153.2	51.0	48.2	47.5	45.4
PP1HD40	20	400	101.6	54.3	48.7	45.1	42.7
		700	94.0	52.5	48.4	44.8	42.5
		1,000	87.2	49.8	48.0	44.5	41.8
PP1LD15	20	400	157.2	53.7	48.6	45.0	43.7
		700	155.5	52.8	46.2	44.5	43.6
		1,000	155.4	48.6	43.5	42.8	42.4
PP1LD40	20	400	150.8	48.5	43.9	44.9	43.1
		700	146.7	47.1	46.4	42.0	41.8
		1,000	139.0	46.7	46.9	41.5	40.6
PP1LL15	20	400	146.7	56.5	47.9	49.3	46.4
		700	146.7	54.9	47.6	52.2	45.4
		1,000	137.7	54.0	47.6	45.9	45.5
PP1LL40	25	400	146.0	52.5	47.2	44.9	44.2
		700	142.8	51.8	47	43.9	43.5
		1,000	135.5	50.3	45.1	43.9	43.0
PP1wax15	25	400	168.7	50.6	42.4	41.7	40.2
		700	166.5	47.7	42.4	41.5	38.5
		1,000	158.8	46.9	42.1	41.5	38.5

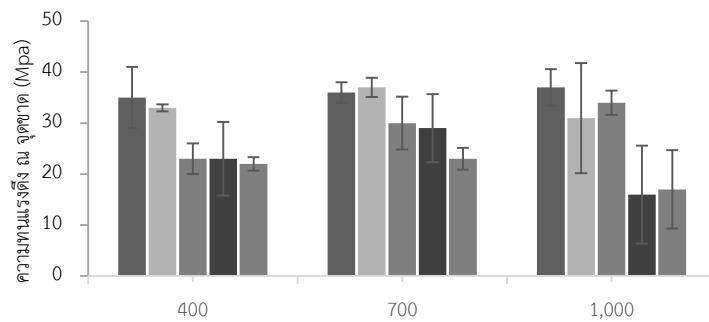
ตารางที่ 4.4 ค่ามอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืด ธิ จุดคราก และจุดขาดของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1/PE

ฟิล์มเป่า	ความเร็ว ของมอเตอร์ ควบคุมลม หล่อเย็น (rpm)	มอดูลัส (MPa)	ทนแรงดึง ณ จุดคราก (MPa)	ความยืด ธิ จุด คราก(%)	ทนแรงดึง ณ ที่จุดขาด (MPa)	ความยืดสูงสุด ของฟิล์ม (%)
PP1	400	1,305±52.6	31±1.0	8±0.6	35±6.0	707±78.0
	700	1,219±11.9	33±2.1	9±0.6	36±2.0	611±40.7
	1,000	1,299±53.5	34±1.5	10±0.4	37±3.6	579±31.6
PP1HD15	400	1,658±134.1	37±0.8	8±0.8	33±0.7	705±50.0
	700	1,515±61.4	37±1.3	9±0.4	37±1.9	716±28.8
	1,000	1,520±59.9	36±2.1	8±0.6	31±10.8	686±37.9
PP1HD40	400	1,521±66.5	33±4.1	8±0.6	33±4.6	759±70.0
	700	1,375±73.3	32±0.9	9±0.5	28±0.6	754±33.4
	1,000	1,396±40.0	31±2.2	10±0.4	28±3.0	687±32.9
PP1LD15	400	890±40.5	23±2.4	9±0.8	23±3.0	706±50.0
	700	1,086±56.5	30±1.3	10±0.7	30±5.2	584±29.7
	1,000	890±40.5	23±2.4	13±0.8	34±2.4	604±29.1
PP1LD40	400	800±87.5	23±2.1	11±1.1	24±5.4	706±50.0
	700	841±25.1	23±0.4	12±0.3	25±2.1	654±27.7
	1,000	819±82.6	23±1.6	13±0.5	24±4.9	449±32.1
PP1LL15	400	1,208±89.7	27±2.8	8±0.7	23±7.2	445±32.7
	700	1,406±52.9	31±2.5	8±1.1	29±6.7	572±41.3
	1,000	1,198±58.9	31±1.0	7±0.5	16±9.6	630±54.8
PP1LL40	400	783±35.9	21±1.4	10±0.4	14±4.2	608±40.0
	700	671±51.9	19±1.5	11±0.5	16±4.5	526±53.8
	1,000	680±73.6	18±0.7	9±0.5	11±3.3	610±55.6
PP1wax15	400	970±78.4	22±1.3	0.7±1.1	22±1.3	7±0.7
	700	1,114±67.8	23±2.2	0.4±0.6	23±2.15	7±2.0
	1,000	1,072±84.8	25±2.7	7±0.8	17±7.7	16±6.3

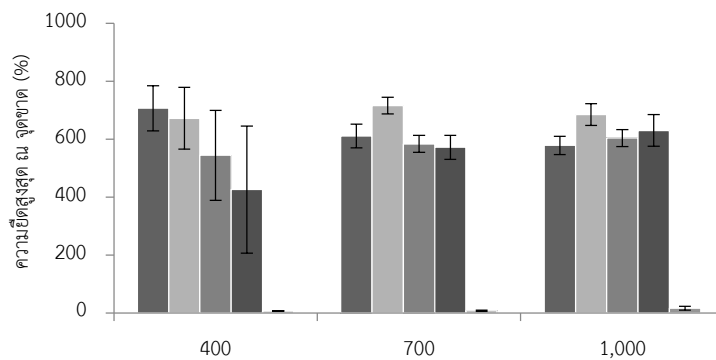
(ก)



(ข)

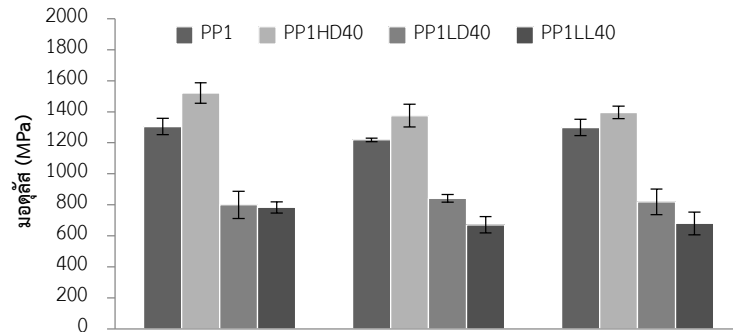


(ค)

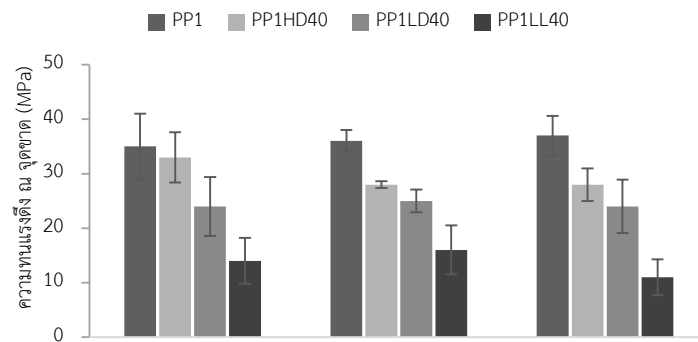


รูปที่ 4.2 ค่ามอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืดสูงสุด (ค) ของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

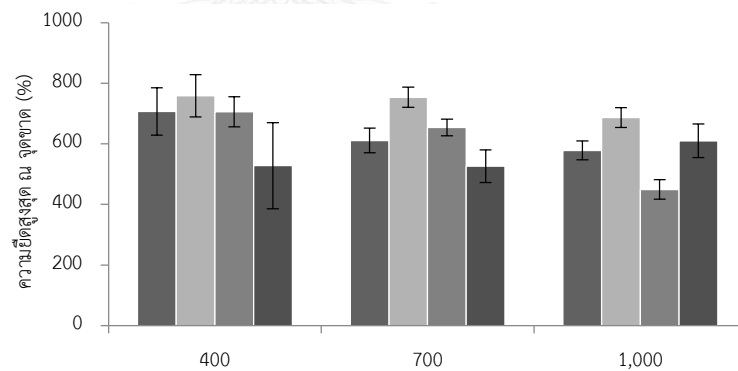
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 4.3 ค่ามอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืดสูงสุด (ค) ของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สั้ดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

4.1.3 สมบัติความเป็นรูพรุน

ความเป็นรูพรุนในการศึกษานี้วิเคราะห์จากปริมาณการดูดซับน้ำมันของฟิล์มที่เตรียมได้แล้ว คำนวณด้วยสมการ 3.2 ค่าที่ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.5 เนื่องด้วยระยะเย็ดสูงสุด ณ จุดขาด ของกรณีที่ใช้ wax มีค่าเพียง 10% ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการศึกษากการดูดซับน้ำมันของฟิล์ม PP1wax15 หลังการดึงเย็ดได้ ส่วนกรณีที่ใช้ LLDPE ในปริมาณร้อยละ 40 เมื่อทำการดึงเย็ดพบว่าฟิล์ม PP1LL40 เกิดรอยขาดระหว่างกลางของชิ้นงานเป็นจำนวนมากก่อนถึงระยะเย็ดร้อยละ 50 และ 100 จึงไม่เหมาะที่นำไปทดสอบ จากรูปที่ 4.4 - 4.5 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเป่าที่ดึงเย็ดด้วยระดับ 50 และ 100% สามารถดูดซับน้ำมันได้สูงกว่าฟิล์มเป่าที่ไม่ผ่านการดึงเย็ด

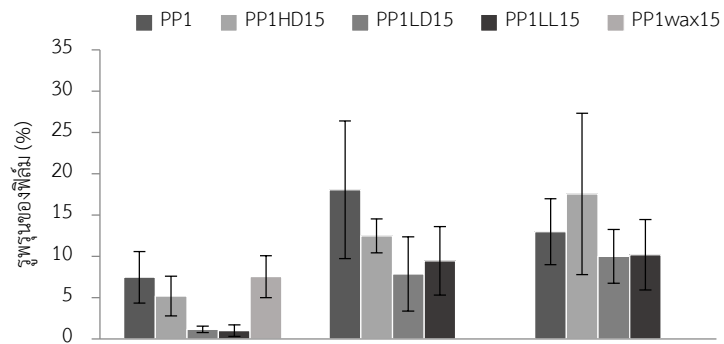
เมื่อพิจารณาผลของระดับการดึงเย็ด 50 และ 100% ต่อค่าความเป็นรูพรุน พบว่าแนวโน้มแตกต่างกันในแต่ละระดับของความเร็วมอเตอร์ที่ควบคุมลมหล่อเย็น โดยพบว่าเมื่อฟิล์มเป่าถูกขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm (รูปที่ 4.4 (ค) และ 4.5 (ค)) การเพิ่มระดับการดึงเย็ดจาก 50 เป็น 100 % ไม่สามารถเพิ่มระดับรูพรุนของฟิล์ม PP1 และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการขึ้นรูปที่ระดับลมหล่อเย็น 700 rpm (รูปที่ 4.4 (ข) และ 4.5 (ข)) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ LDPE และ LLDPE มีระดับรูพรุนที่ไม่แตกต่างกันเมื่อเพิ่มการดึงเย็ดฟิล์ม ในขณะที่เมื่อใช้ HDPE ทั้งร้อยละ 15 และ 40 ระดับรูพรุนของฟิล์มที่ผ่านการดึงเย็ดเพียงร้อยละ 50 มีค่าสูงกว่า ในทางตรงกันข้ามฟิล์ม PP1 ที่ดึงเย็ดด้วยร้อยละ 100 มีความเป็นรูพรุนสูงกว่าเกือบเท่าตัว เมื่อเทียบกับที่ระดับการดึงเย็ดร้อยละ 50 เมื่อพิจารณาผลที่ระดับลมหล่อเย็น 400 rpm (รูปที่ 4.4 (ก) และ 4.5 (ก)) พบว่าฟิล์มที่ใช้ LDPE และ LLDPE ร้อยละ 15 ให้ผลเช่นเดียวกับกรณีที่มีความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm (รูปที่ 4.4 (ข)) ในขณะที่ฟิล์ม PP1 ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ HDPE และฟิล์มที่ใช้ LDPE ร้อยละ 40 ให้ผลในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm กล่าวคือ PP1HD15 (รูปที่ 4.4 (ก)) และ PP1HD40 (รูปที่ 4.5 (ก)) กลับมีรูพรุนมากขึ้นเมื่อระดับการดึงเย็ดสูงขึ้น ในขณะที่ฟิล์ม PP1 และ PP1LD40 มีแนวโน้มมีระดับรูพรุนลดลงเมื่อเพิ่มระดับการดึงเย็ด

ตารางที่ 4.5 ร้อยละของรูพรุนของฟิล์มเป่า PP1 และฟิล์มเป่า PP1/PE

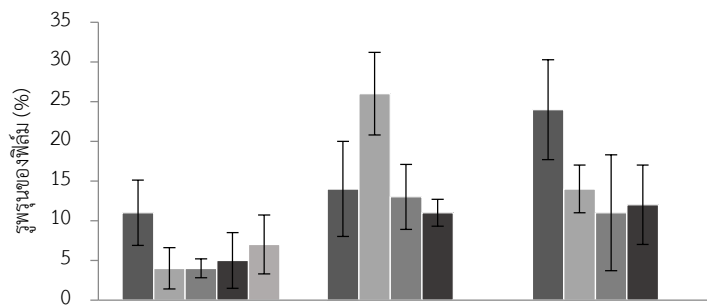
ฟิล์มเป่า	ความเร็วของมอเตอร์ ควบคุมลมหล่อเย็น (rpm)	ร้อยละของรูพรุนของฟิล์ม ที่ระดับดิ่งยึด		
		0	50	100
PP1	400	7±3.1	18±8.3	13±4.0
	700	11±4.1	14±6.0	24±6.3
	1,000	7±4.8	15±5.9	13±2.3
PP1HD15	400	5±2.4	12±2.1	18±10.0
	700	4±2.6	26±5.2	14±3.0
	1,000	6±1.9	12±1.2	13±3.6
PP1HD40	400	5±1.7	16±5.2	23±7.9
	700	4±0.8	30±5.2	22±10.9
	1,000	4±2.3	16±8.0	14±2.7
PP1LD15	400	1±0.3	8±4.5	10±3.3
	700	4±1.2	13±4.1	11±7.3
	1,000	3±1.6	13±4.4	12±4.6
PP1LD40	400	3±2.1	21±4.3	7±3.0
	700	3±1.3	10±4.4	12±4.6
	1,000	4±2.4	12±5.9	11±3.4
PP1LL15	400	1±0.7	9±4.2	10±4.3
	700	5±3.5	11±1.7	12±10.5
	1,000	2±1.6	10±2.4	7±1.9
PP1LL40	400	5±1.9	N/A	N/A
	700	12±6.7	N/A	N/A
	1,000	6±1.9	N/A	N/A
PP1wax15	400	8±2.6	N/A	N/A
	700	7±3.7	N/A	N/A
	1,000	6±4.5	N/A	N/A

หมายเหตุ *N/A คือ ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากไม่เหมาะสมต่อการนำไปทดสอบ

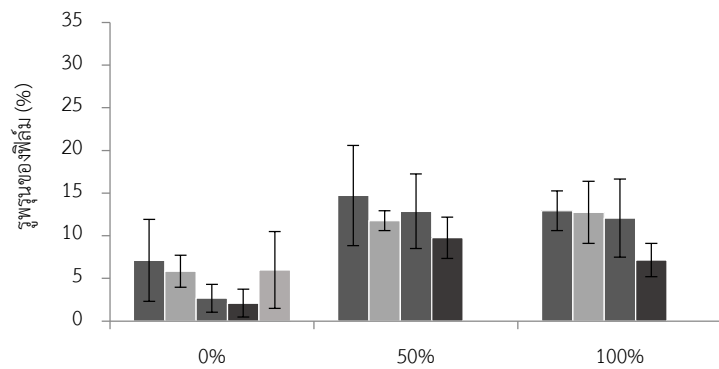
(ก)



(ข)

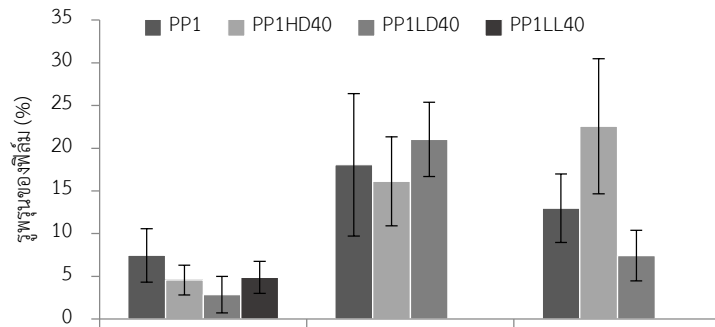


(ค)

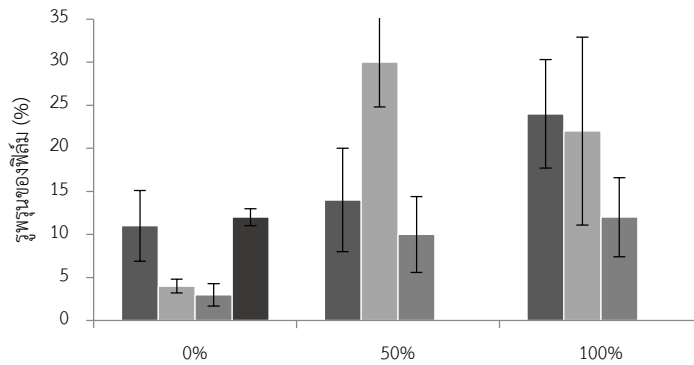


รูปที่ 4.4 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

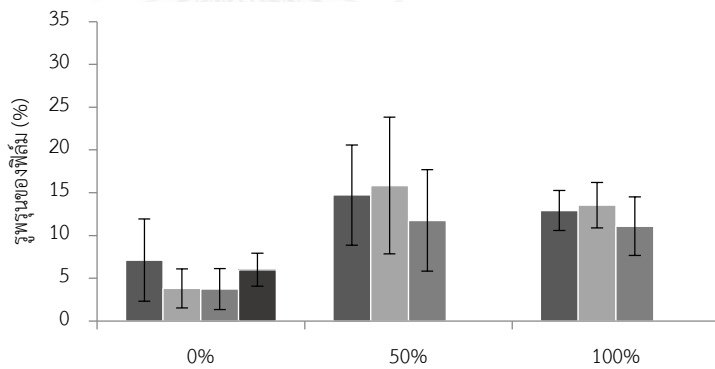
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 4.5 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP1 และ PP1/PE ที่สัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

4.1.4 สันฐานวิทยา

เมื่อพิจารณาลักษณะสันฐานวิทยาของฟิล์มเป่าที่ไม่ผ่านการดึงยืด (รูปที่ 4.6) พบว่าไม่สังเกตเห็นโครงในเนื้อฟิล์ม PP1 อย่างชัดเจนนัก (4.6 (1ก) - 4.6 (1ค)) ในขณะที่ฟิล์ม PP1/PE ซึ่งใช้ HDPE เริ่มสังเกตเห็นโครงชัดเจนในฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm (รูปที่ 4.6 (2-3ข)) แต่ฟิล์มที่ใช้ LDPE และ LLDPE เริ่มพบโครงในฟิล์มที่เตรียมได้ตั้งแต่การเลือกใช้ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นต่ำที่สุดอย่าง 400 rpm (รูปที่ 4.6 (3-5ก)) ผลการศึกษาสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มดังกล่าว เมื่อมีการผสม PE ซึ่งสามารถเกิดการแยกวัฏภาคกับ PP เมทริกซ์ ดังนั้นในขณะที่ขึ้นรูป การจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดรอยแยกระหว่างวัฏภาคได้ เกิดเป็นลักษณะโครงขึ้น ทั้งนี้ในฟิล์มที่เลือกใช้ PE ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าจึงเกิดโครงได้ตั้งแต่ที่ความเร็วของลมเป่าต่ำๆ

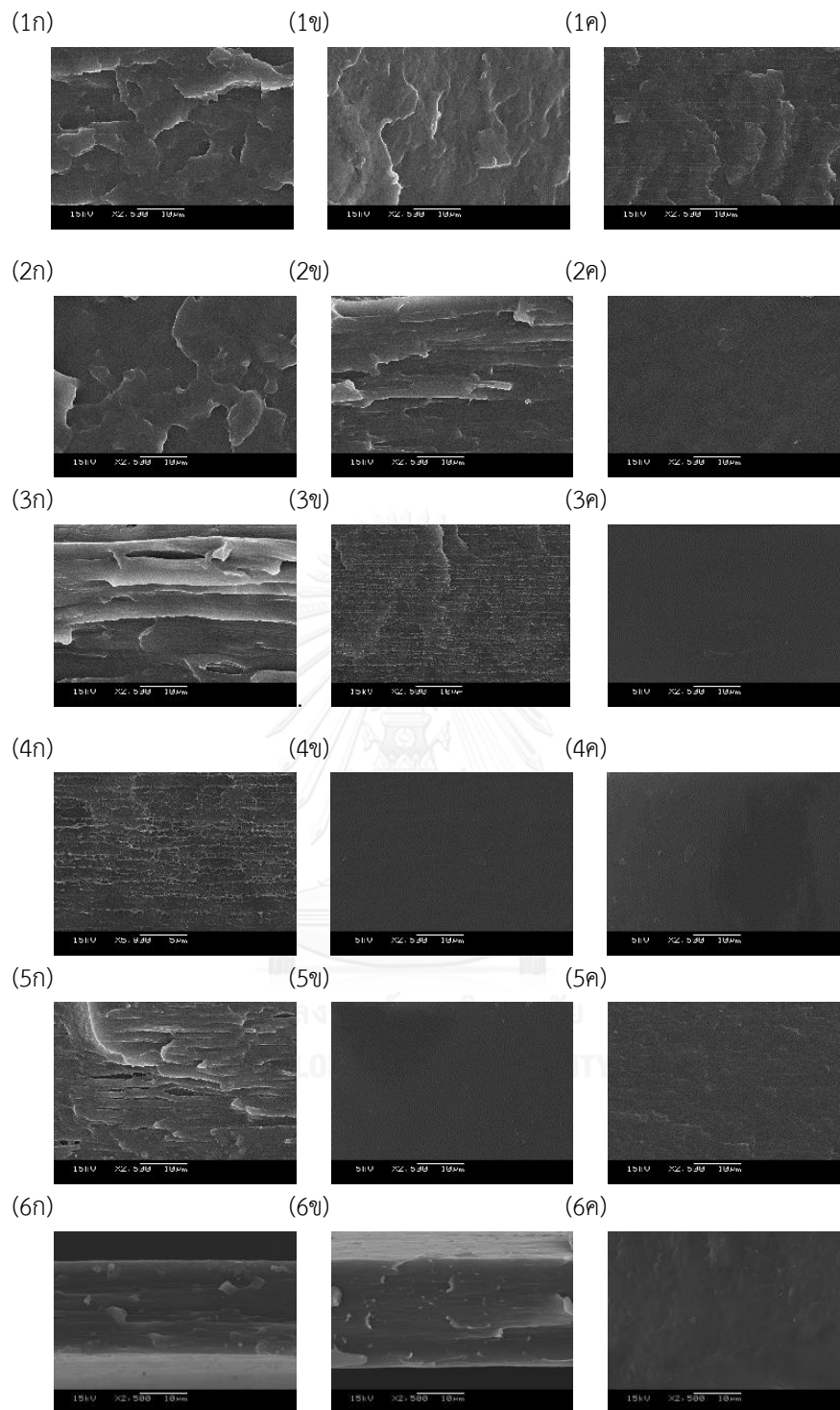
เมื่อพิจารณาฟิล์มที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 และ 100 (รูปที่ 4.7 - 4.9) พบว่าในฟิล์ม PP1 ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (4.7(1ก) และ 4.7 (1ข)) และ 700 rpm (รูปที่ 4.8(1ก) และ 4.8 (1ข)) ลักษณะโครงขนาดใหญ่ในฟิล์ม เริ่มสังเกตเห็นได้เมื่อใช้การดึงยืดร้อยละ 100 ในขณะที่ฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm (4.9 (1ก) และ 4.9 (1ข)) เริ่มสังเกตเห็นโครงขนาดใหญ่ตั้งแต่การใช้ระดับการดึงยืดฟิล์มที่ 50 อิทธิพลของความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นที่ใช้ต่อลักษณะสันฐานวิทยาของฟิล์มเกี่ยวข้องกับการ orientation ของฟิล์มที่เกิดระหว่างการขึ้นรูป เมื่อเลือกใช้ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นสูง เชื่อว่าส่งผลให้เกิดแรงกระทำในแนว MD ต่อลูกโป่งฟิล์มมากขึ้นด้วย เป็นผลให้ฟิล์มที่ผลิตมีระดับการเป็นรูพรุนที่ต่างกัน อิทธิพลของภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีต่อลักษณะสันฐานวิทยาของฟิล์ม PP1/PE เป็นไปในแนวทางเดียวกับฟิล์ม PP1 นั่นคือโครงมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการดึงยืดและความเร็วของมอเตอร์ที่ควบคุมลมหล่อเย็น

เมื่อพิจารณาลักษณะสันฐานวิทยาของฟิล์มเปรียบเทียบกับระดับความเป็นรูพรุน การดึงยืดฟิล์ม จนเกิดลักษณะของโครงรูปร่างวงรีที่ขยายความยาวในแนว MD มักส่งผลในทางลบต่อระดับรูพรุนของฟิล์มที่เตรียมได้ ซึ่งลักษณะโครงที่เหมาะสมควรเป็นโครงขนาดเล็กที่กระจายไปทั่วฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 4.8 (2ก) และ 4.8 (3ก) ของฟิล์ม PP1HD15 และ PP1HD40 ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm ที่ระดับการดึงยืดร้อยละ 50 ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นรูพรุนเป็นร้อยละ 26 และ 30 ตามลำดับ และฟิล์ม PP1 (รูปที่ 4.8 (1ข)) ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm ที่ระดับการดึงยืดร้อยละ 100

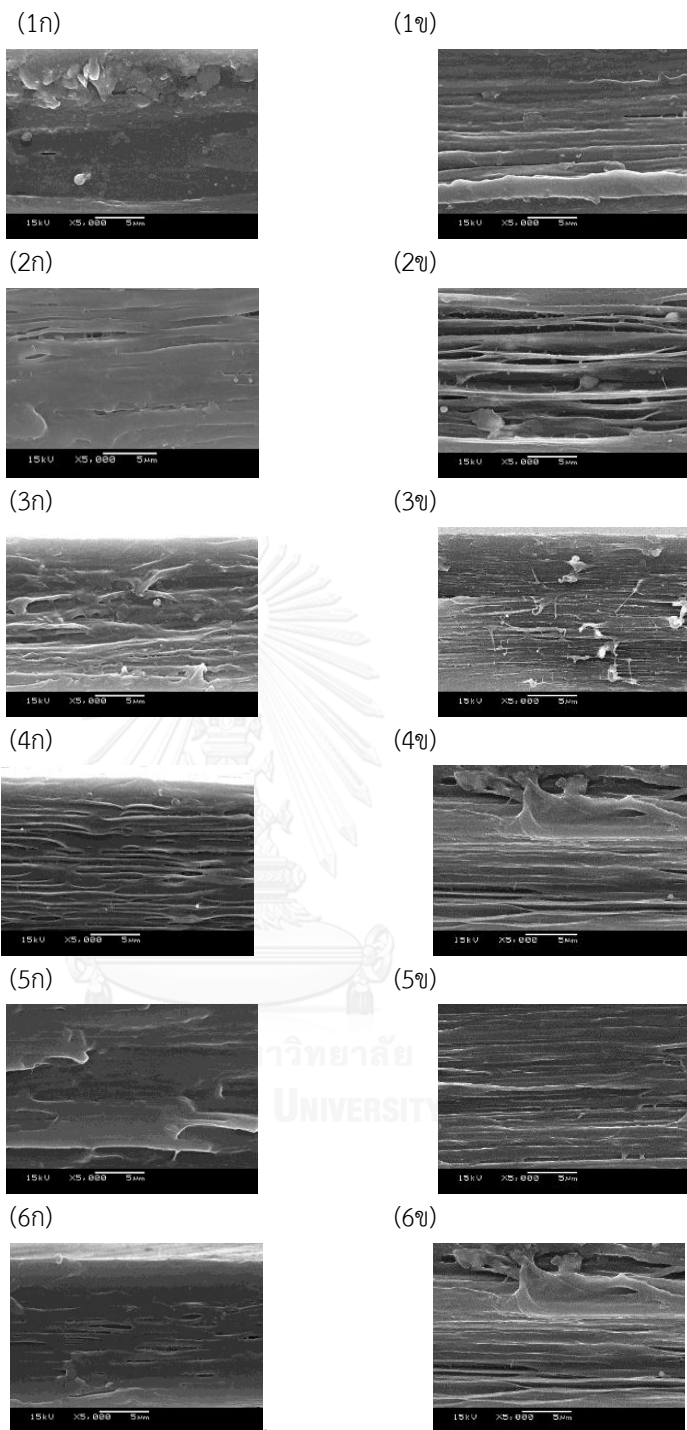
ฟิล์มเป่าที่ใช้ PE เป็น LDPE และ LLDPE นั้นพบว่าสันฐานวิทยาของรูพรุนมีขนาดที่ใหญ่ซึ่งเกิดจากความสามารถการทนแรงดึงที่น้อยเมื่อได้รับแรงดึงจึงมีโอกาสที่ขนาดโครงภายในฟิล์มขยาย

มากกว่าฟิล์ม PP1 หรือ PP1HD จึงอาจสามารถเก็บกักน้ำมันได้น้อยกว่าฟิล์มรูพรุนขนาดเล็ก และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเอทิลีนเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าเห็นชั้นที่แยกออกจากกันมากกว่าที่สัดส่วน 85/15 ซึ่งแสดงให้เห็นการกระจายตัว และความไม่เข้ากันของวัสดุ และมีความกว้างที่ขนาดใหญ่จึงทำให้ร้อยละรูพรุนลดลง

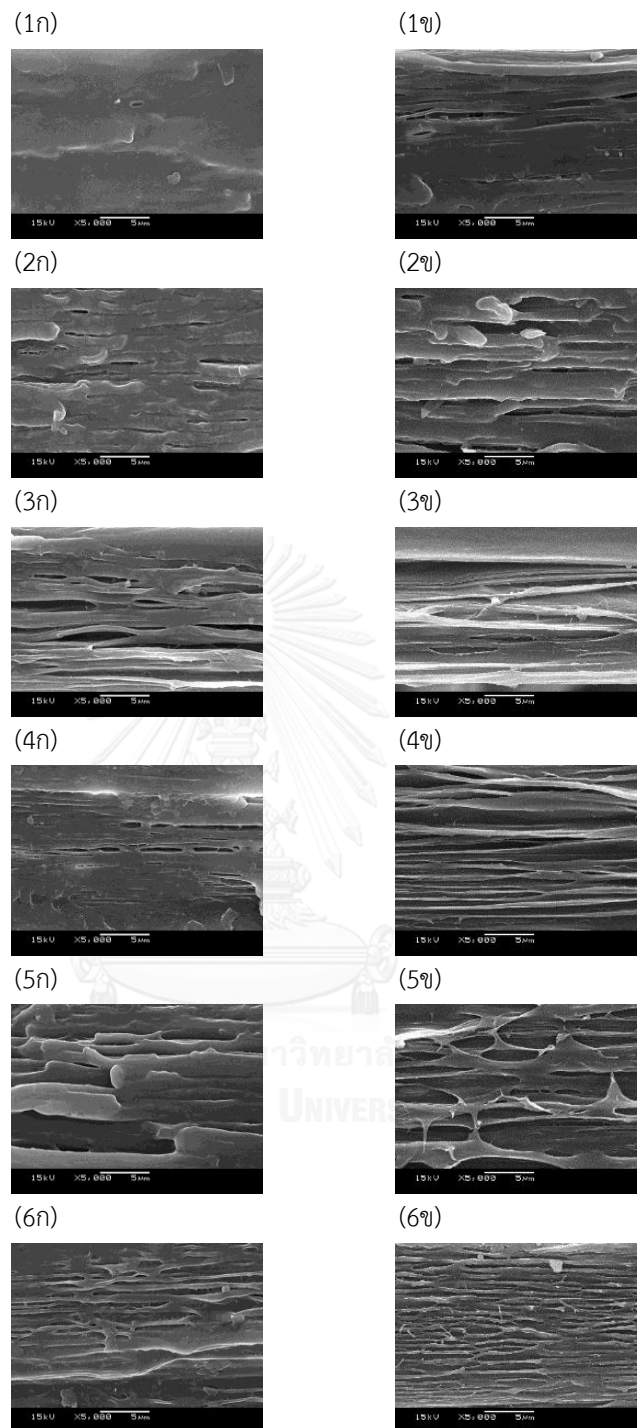




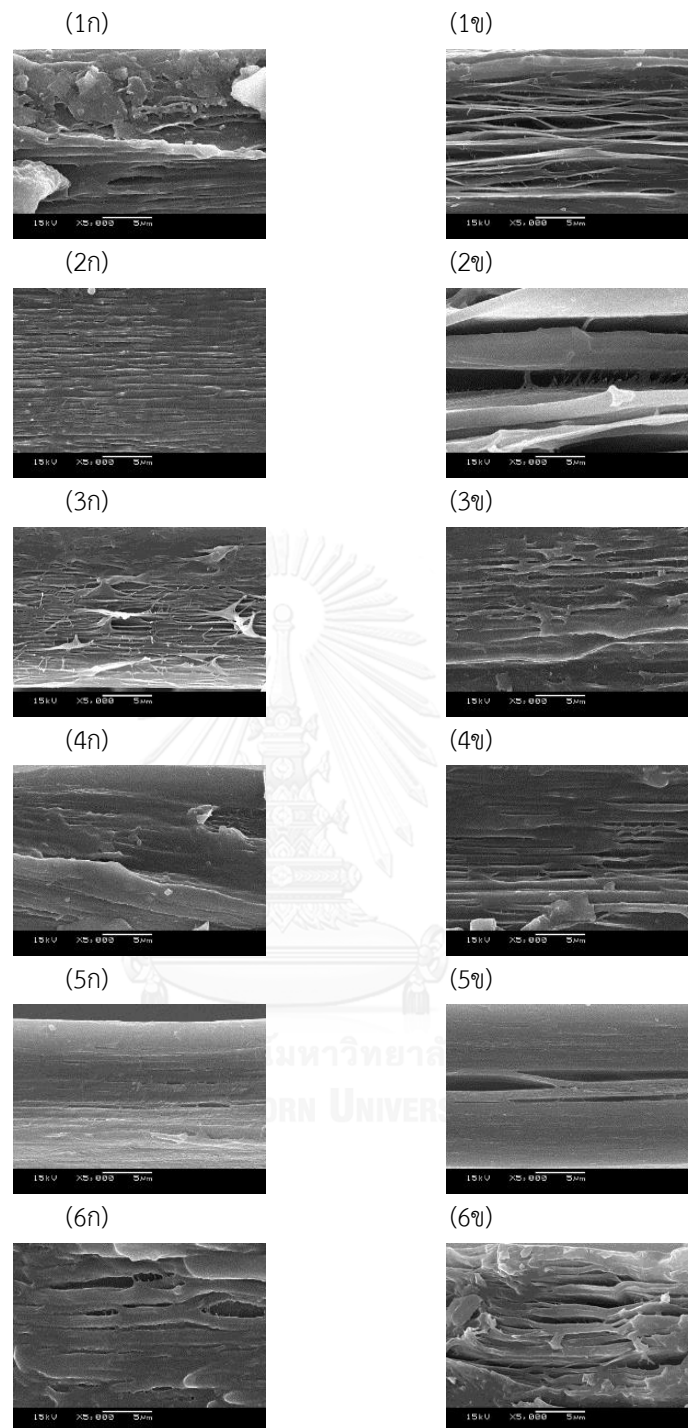
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400(ก) 700(ข) และ 1,000(ค) rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture



รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture



รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP1 (1) ฟิล์มเป่า PP1HD15 (2) PP1HD40 (3) PP1LD15 (4) PP1LD40 (5) และ PP1LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture

4.2 สมบัติของฟิล์มเป่า PP2 และ ฟิล์มผสมระหว่าง PP2 และ PE

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการศึกษาลักษณะของฟิล์มเป่า PP2 และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PP2 และ PE (ตารางที่ 4.6) พบว่าเมื่อเติมพอลิเอทิลีนทำให้เกิดความยับของฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็นส่วนใหญ่ มีเพียงกรณีที่ใช้ HDPE ที่ร้อยละ 15 เท่านั้นที่ความยับของฟิล์มไม่แตกต่างจาก PP2 ความยับของฟิล์มเกิดจากความหนืดที่แตกต่างกันของพอลิเอทิลีนเกรดชนิด (ตารางที่ 4.2) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงในสภาวะหลอมลดต่ำลงทำให้แรงในการพองตัวของฟิล์มลดลง เมื่อเพิ่มลมหล่อเย็นความยับของฟิล์มลดลง เช่นเดียวกับชุดการทดลองของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP1 ในขณะที่ฟิล์มผสมของ PP1 และ PP2 ที่เติม LLDPE และ wax พบว่าความยับของฟิล์มไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามในชุดของพอลิเมอร์ผสม PP2 จำเป็นต้องใช้ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm จึงสามารถแก้ไขเรื่องการยับของฟิล์มได้ ในขณะที่ชุดของพอลิเมอร์ผสม PP1 ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm ก็สามารถช่วยทรงตัวลูกโป่งฟิล์มได้ดีแล้ว จึงอาจกล่าวได้ว่า PP2 มีความแข็งแรงในขณะหลอมต่ำกว่า PP1

ฟิล์ม PP2 (รูปที่ 4.10) ที่ได้มีลักษณะโปร่งใส ในขณะที่ PP1 มีลักษณะโปร่งแสง ซึ่งน่าจะเกิดจากขนาดผลึกที่ต่างกัน PP2 อาจมีขนาดผลึกที่เล็กกว่าจึงทำให้แสงส่องผ่านได้มาก การเติม HDPE LDPE LLDPE และ wax ฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะเพียงโปร่งแสง

ฟิล์ม PP2LL40 และ PP2wax15 จำเป็นต้องขึ้นรูปโดยเพิ่มความเร็วรอบของสกรูเป็น 25 rpm (ตารางที่ 4.7) เช่นเดียวกับชุดข้อมูลฟิล์มเป่า PP1 อีกทั้งฟิล์ม 2 สูตรดังกล่าวไม่สามารถนำไปทดสอบดูดซับน้ำมันได้เช่นเดียวกับชุดการทดลองของ PP1

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของลูกโป่งฟิล์มที่ระดับความสูงต่างๆ ห่างจากหัวตาย (ตารางที่ 4.7) พบว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากระยะ 0 เซนติเมตร มีค่าสูงกว่าที่พบในชุดการทดลองของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP1 แต่ยังคงแตกต่างจากอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดขณะทำการวัดผิวฟิล์ม เช่นเดียวกับชุดที่ 1 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าที่ได้ที่ระยะการวัดระดับอื่นๆ พบว่าลูกโป่งฟิล์มมีระดับการเย็นตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น ด้วยวิธีที่ใช้วัดมีความแม่นยำที่ไม่สูงนัก ข้อมูลที่ได้ไม่อาจแสดงว่าฟิล์มผสมของชุด PP2 มีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างไปจากของชุด PP1



รูปที่ 4.10 ลักษณะการมองเห็นตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษ เมื่อมีฟิล์มเป่า PP2 (ก) PP2wax15 (ข) PP2HD15 (ค) PP2HD40 (ง) PP2LD15 (จ) PP2LD40 (ฉ) PP2LL15 (ช) และ PP2LL40 (ซ) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ปิดอยู่ทางครึ่งด้านขวา

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางแสง ความยับ และความหนาของฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วมอเตอร์ที่ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

ฟิล์มเป่า	ความเร็วของ			ความหนาของฟิล์ม (ไมโครเมตร)
	มอเตอร์ควบคุม ลมหล่อเย็น (rpm)	สมบัติทางแสง	ความยับ	
PP2	400	TP	2	60±0.002
	700	TP	2	60±0.003
	1,000	TP	1	50±0.003
PP2HD15	400	TL	2	60±0.005
	700	TL	2	70±0.004
	1,000	TL	2	70±0.002
PP2HD40	400	TL	3	70±0.002
	700	TL	3	70±0.004
	1,000	TL	2	60±0.007
PP2LD15	400	TL	3	50±0.010
	700	TL	3	40±0.008
	1,000	TL	2	40±0.006
PP2LD40	400	TL	3	60±0.004
	700	TL	3	60±0.004
	1,000	TL	2	50±0.003
PP2LL15	400	TL	3	70±0.004
	700	TL	3	60±0.006
	1,000	TL	2	50±0.008
PP2LL40	400	TL	3	60±0.006
	700	TL	3	60±0.004
	1,000	TL	2	40±0.002
PP2wax15	400	TL	3	80±0.014
	700	TL	3	70±0.007
	1,000	TL	2	50±0.002

หมายเหตุ * TP คือ โปร่งใส(Transparent) TL คือ โปร่งแสง(Translucent)

** 0 คือ ไม่ยับ 1 คือ ยับน้อย 2 คือ ยับปานกลาง และ 3 คือ ยับมาก

4.2.2 สมบัติด้านแรงดึง

การตรวจสอบสมบัติด้านแรงดึงของฟิล์มในชุดพอลิเมอร์ผสม PP2 จำเป็นต้องซึ่งใช้เครื่อง universal testing machine ที่ต่างกับชุดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP1 เนื่องจาก load cell ของ LLOYD รุ่น LR100K ที่ใช้ในชุดฟิล์ม PP1 ชำรุด ดังนั้นฟิล์มผสมชุด PP2 จึงทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine LLOYD รุ่น 500 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.8 ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของระยะยืดสูงสุดของเครื่องที่ไม่เกิน 600 % ซึ่งฟิล์มที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่เกิดการยืดได้มากกว่าระยะดังกล่าว ดังนั้นค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ที่แสดงผลในตารางที่ 4.8 จึงมีเพียง PP2wax15 ที่มีร้อยละการยืดได้เพียง $\sim 3 - 4$ (รูปที่ 4.11ค)

หากเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชุด PP1 (ตารางที่ 4.4) กับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชุด PP2 (ตารางที่ 4.8) พบว่าค่าที่ได้จากชุด PP2 นั้นต่ำกว่าของชุด PP1 ซึ่งค่อนข้างแปลกเนื่องด้วยหากพิจารณาโดยใช้ค่า flexural modulus ทางการค้า (ตารางที่ 4.2) นั้น PP2 มีความแข็งแรงสูงกว่า ดังนั้นจึงได้ทดลองนำชิ้นงานฟิล์ม PP1 ที่เตรียมด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ไปลองทดสอบกับเครื่อง Universal testing machine LLOYD รุ่น 500 พบว่า มีค่ามอดุลัส 582 ± 104.9 MPa ในขณะที่ค่าที่ได้จากรุ่น LR100K มีค่ามอดุลัส $1,305 \pm 52.6$ MPa (ตารางที่ 4.4) ดังนั้นจึงไม่สามารถวิจารณ์ผลการศึกษเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างชุด PP1 กับ PP2 แต่สามารถศึกษาลักษณะแนวโน้มในชุดเดียวกันได้เท่านั้น

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของ PP2 ที่ผสมด้วย-LDPE และ LLDPE มีค่ามอดุลัส (รูปที่ 4.11ก และ 4.12ก) และค่าความทนแรงดึง ณ จุดคราก (รูปที่ 4.11ข และ 4.12ข) ต่ำกว่าฟิล์ม PP2 เนื่องจากพอลิเอทิลีนที่ใช้เป็นเกรดชนิดซึ่งมีความแข็งแรงไม่สูงเท่ากับเกรดเป่าฟิล์ม PP2 อีกทั้งยังเกิดการแยกวัฏภาคจาก PP จึงส่งผลในเชิงลบต่อความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเช่นเดียวกับชุดฟิล์มผสม PP1 จากการสังเกตพฤติกรรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP2 ที่เติม HDPE พบว่าค่ามอดุลัส และค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากก็ลดลงเช่นเดียวกับการเติมพอลิเอทิลีนชนิดอื่น ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มตรงข้ามกับฟิล์ม PP1HD ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่า PP1 และ PP2 อาจมีโครงสร้างที่ต่างกันจนเป็นเหตุให้ส่งผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดึงที่ต่างกันระหว่าง PP1HD กับ PP2HD ปริมาณของ PE ที่สูงขึ้นส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงต่อการดึงลดลง

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิของลูกโป่งฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE ที่ระดับความสูงต่างจากตาย เมื่อขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

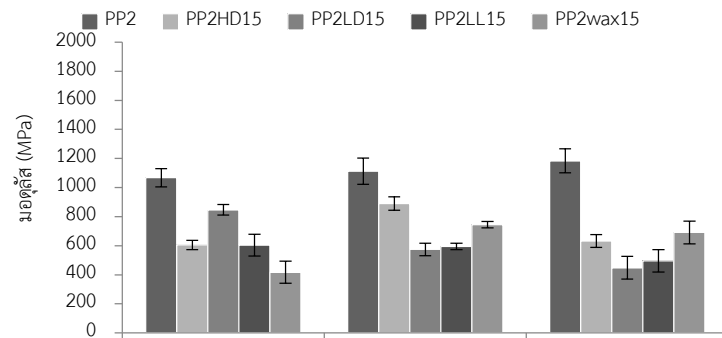
ฟิล์มเป่า	ความเร็ว ของสกรู (rpm)	ความเร็วของ มอเตอร์ ควบคุมลม หล่อเย็น (rpm)	อุณหภูมิ (°C) ของฟิล์มเป่า ที่ระดับความสูง (cm)				
			0	11	27	42	56
PP2	20	400	122.6	50	47	46.9	42.6
		700	114	49.6	46.8	46.1	42.5
		1,000	101.2	47.1	46	45.8	41.7
PP2HD15	20	400	182.7	59.8	52.1	50	43.2
		700	153.1	49.8	49.5	45.5	43.7
		1,000	152.9	48.4	47.8	42.6	41.9
PP2HD40	20	400	120.6	52.5	50.5	47	43.2
		700	119	51	50	46	43.2
		1,000	105.7	50.3	48.5	45.5	42.8
PP2LD15	20	400	185.7	53.2	47.5	46.3	43.6
		700	181.7	48.7	47.2	44.7	42.4
		1,000	178.8	50.4	43.8	41.9	40.9
PP2LD40	20	400	169	58.9	57.1	53.5	46.2
		700	160.6	52.9	50.7	50	45.6
		1,000	173.8	50.8	49.3	46.4	45
PP2LL15	20	400	182.9	49.1	49	45.8	43
		700	166.5	51.1	47.4	45.7	45.3
		1,000	155.3	49.1	45.4	44.8	45.4
PP2LL40	25	400	166.2	50.1	48.1	45.9	43.1
		700	166.1	49.4	47.8	45.7	42.9
		1,000	161.2	48	46.4	45	42.6
PP2wax15	25	400	166.5	50.8	47.1	45.2	44.7
		700	165.7	50.5	46.9	44.8	43.5
		1,000	162.4	50.1	46.8	43.5	42.8

ตารางที่ 4.8 ค่ามอดุลัส ความทนแรงดึง และความยืด ณ จุดคราก และจุดขาดของฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE

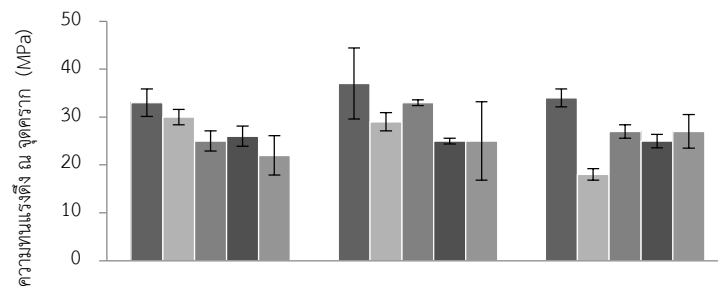
ฟิล์มเป่า	ความเร็ว ของมอเตอร์ ควบคุมลม หล่อเย็น (rpm)	มอดุลัส (MPa)	ทนแรงดึง ณ จุด คราก(MPa)	ความยืด ณ จุด คราก (%)	ความยืดสูงสุด ของฟิล์ม(%)
PP2	400	1,068±63.2	33±2.9	8±0.4	N/A
	700	1,113±90.1	37±7.4	8±0.3	N/A
	1,000	1,184±82.8	34±1.9	9±0.6	N/A
PP2HD15	400	605±31.7	30±1.7	8±0.2	N/A
	700	890±47.2	29±1.9	5±0.2	N/A
	1,000	633±44.5	18±1.2	5±0.1	N/A
PP2HD40	400	707±71.6	26±1.8	4±0.4	N/A
	700	876±49.1	25±1.4	5±0.3	N/A
	1,000	610±12.4	30±1.2	5±0.3	N/A
PP2LD15	400	847±35.6	25±2.5	20±0.5	N/A
	700	575±42.9	33±1.8	20±0.4	N/A
	1,000	448±77.9	27±1.1	13±1.2	N/A
PP2LD40	400	507±23.1	23±1.8	20±0.8	N/A
	700	391±15.2	24±5.2	18±0.8	N/A
	1,000	367±17.1	26±0.9	11±0.2	N/A
PP2LL15	400	604±75.7	26±2.1	6±1.8	N/A
	700	594±22	25±0.6	6±0.6	N/A
	1,000	496±77.9	25±1.4	5±0.4	N/A
PP2LL40	400	484±76.7	10±0.6	8±1.6	N/A
	700	544±65.5	25±1.8	5±0.8	N/A
	1,000	444±5.7	33±0.7	4±0.8	N/A
PP2wax15	400	417±59.3	22±4.1	0.4±0.1	3±1.5
	700	744±23.9	25±8.2	0.5±0.1	4±1.2
	1,000	691±83.1	27±3.5	0.3±0.1	4±1.2

หมายเหตุ N/A* คือ ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม(%) ที่ไม่สามารถหาได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่อง Universal testing machine

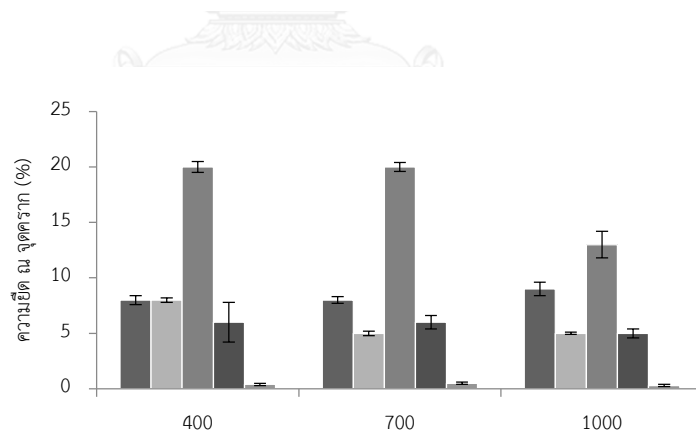
(ก)



(ข)

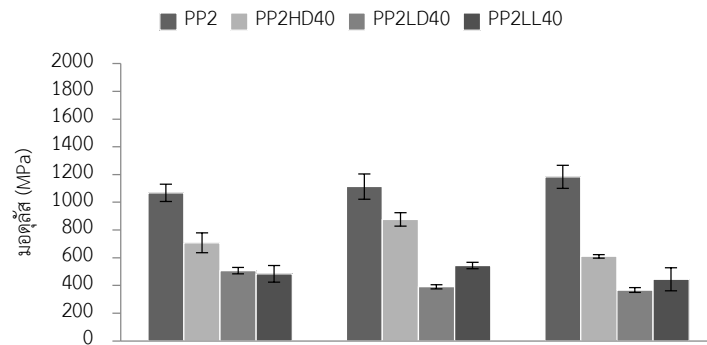


(ค)

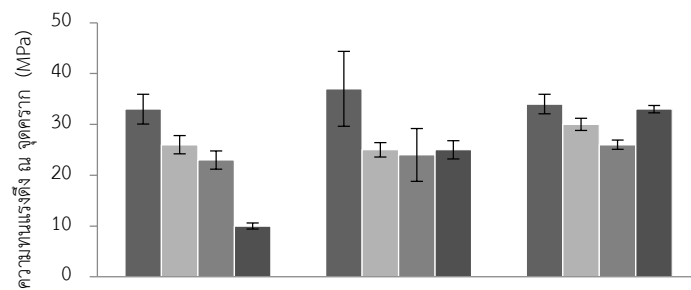


รูปที่ 4.11 ค่ามอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืด ณ จุดคราก (ค) ของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

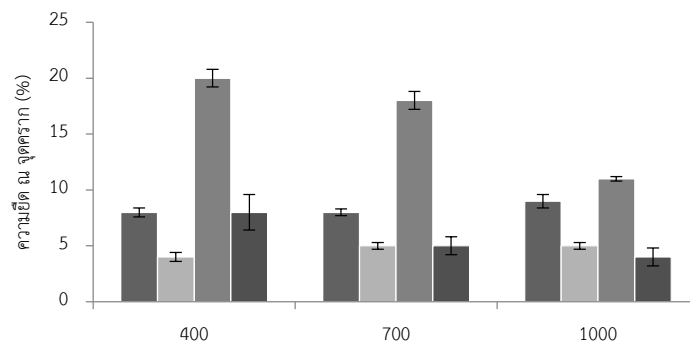
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 4.12 ค่ามอดูลัส (ก) ความทนแรงดึง ณ จุดคราก (ข) และความยืด ณ จุดคราก (ค) ของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

4.2.3 สมบัติความเป็นรูพรุน

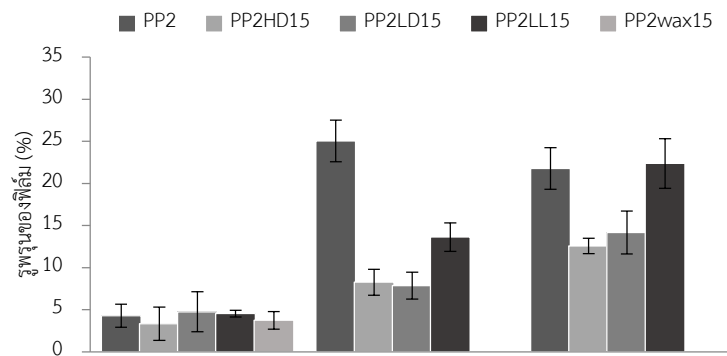
ความเป็นรูพรุนในตารางที่ 4.9 แสดงได้ว่า ฟิล์มเป่าที่ดึงยืดด้วยระดับร้อยละ 50 และ 100 สามารถดูดซับน้ำมันได้สูงกว่าฟิล์มเป่าที่ไม่ผ่านการดึงยืด ซึ่งมีผลเช่นเดียวกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชุด PP1 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของชนิด และปริมาณ PE รวมถึงความเร็วของลมหล่อเย็นที่ใช้ พบว่ามีผลการศึกษาที่สอดคล้องกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชุด PP1 คือการเพิ่มร้อยละการดึงยืดจาก 50 เป็น 100 มักไม่ส่งผลต่อระดับรูพรุนโดยเฉพาะเมื่อฟิล์มมีการขึ้นรูปที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นสูง นอกจากนี้หากเปรียบเทียบการใช้ PE เกรดชนิดที่ต่างกัน อาจสรุปได้ว่าการพัฒนาฟิล์มรูพรุนจากพอลิเมอร์ผสม PP และ LDPE มีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า PE ชนิดอื่น และดีกว่าฟิล์ม PP อีกด้วย เมื่อพิจารณาผลของการใช้ LLDPE ร้อยละ 15 พบว่าในชุดของ PP1 (ตารางที่ 4.9) ให้ค่าที่ไม่ต่างกับการใช้ LDPE ในขณะที่ในชุดของ PP2 (รูปที่ 4.13) พบว่า LLDPE ที่ขึ้นรูปด้วยบางสภาวะสามารถให้ค่าความเป็นรูพรุน ~ 20 ได้ ในขณะที่เมื่อใช้ HDPE พบว่าหากเลือกภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม สามารถเตรียมฟิล์มที่มีร้อยละรูพรุนที่มีค่าสูงกว่า 20 ได้ (รูปที่ 4.14) ทั้งนี้การใช้ HDPE ร้อยละ 40 มีแนวโน้มให้ฟิล์มที่ได้มีรูพรุนสูงสุด ~ 30 โดยในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชุด PP1 เกิดขึ้นกับฟิล์มเป่าที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm และดึงยืดที่ร้อยละ 50 ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชุด PP2 เกิดขึ้นกับฟิล์มเป่าที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm และดึงยืดที่ร้อยละ 50 สำหรับฟิล์มที่มีเพียง PP เป็นองค์ประกอบ พบว่าสามารถเตรียมให้มีร้อยละรูพรุนระหว่าง 20-25 ได้เมื่อขึ้นรูปด้วยลมหล่อเย็นที่ 400 และ 700 rpm

ตารางที่ 4.9 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP2 และฟิล์มเป่า PP2/PE

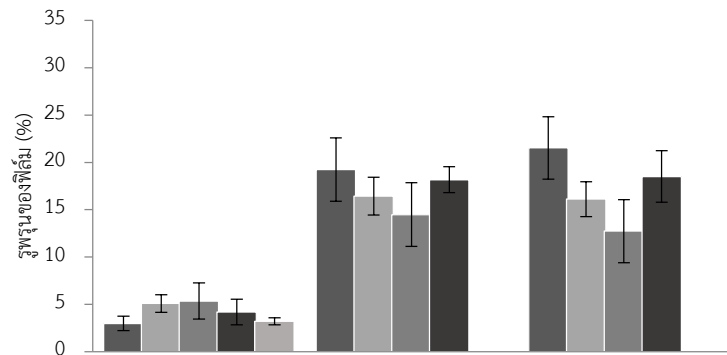
ฟิล์มเป่า	ความเร็วของ มอเตอร์ควบคุม ลมหล่อเย็น (rpm)	ร้อยละของรูพรุนของฟิล์ม ที่ระดับดิ่งยึด		
		0	50	100
PP2	400	4±1.36	25±2.5	22±2.5
	700	3±0.75	19±3.4	22±3.3
	1,000	3±1.4	13±2.3	16±2.9
PP2HD15	400	3±2.0	8±1.6	13±0.9
	700	5±0.9	16±2.0	16±1.9
	1,000	4±2.2	14±1.8	13±2.9
PP2HD40	400	4±0.9	10±1.9	26±3.4
	700	4±0.9	10±2.9	20±3.4
	1,000	3±1.0	30±3.4	10±2.9
PP2LD15	400	5±2.4	8±1.6	14±2.5
	700	5±0.1	14±3.4	13±3.3
	1,000	3±1.0	10±3.1	14±2.6
PP2LD40	400	3±1.0	6±2.6	7±2.8
	700	3±1.4	4±1.7	7±2.6
	1,000	5±1.2	6±2.8	7±2.4
PP2LL15	400	5±0.4	14±1.7	22±3.0
	700	4±1.4	18±1.4	19±2.7
	1,000	3±0.5	14±3.1	21±3.4
PP2LL40	400	3±1.1	N/A	N/A
	700	4±1.5	N/A	N/A
	1,000	4±1.7	N/A	N/A
PP2wax15	400	4±1.0	N/A	N/A
	700	3±0.4	N/A	N/A
	1,000	4±1.6	N/A	N/A

หมายเหตุ *N/A คือ ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากไม่เหมาะสมต่อการนำไปทดสอบ

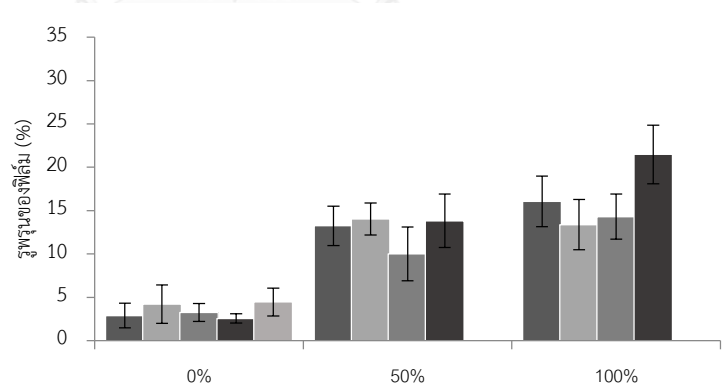
(ก)



(ข)

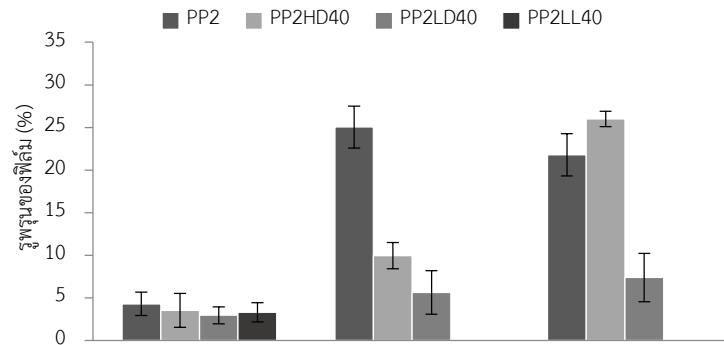


(ค)

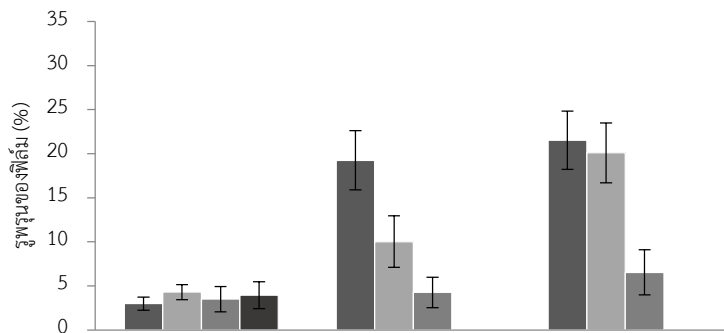


รูปที่ 4.13 ร้อยละการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 85/15 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

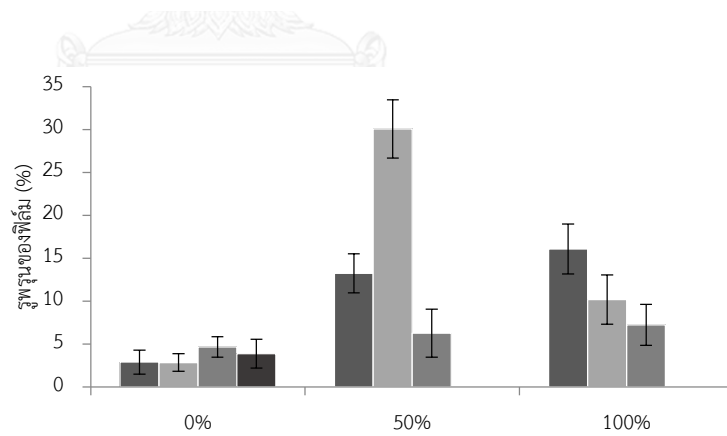
(ก)



(ข)



(ค)



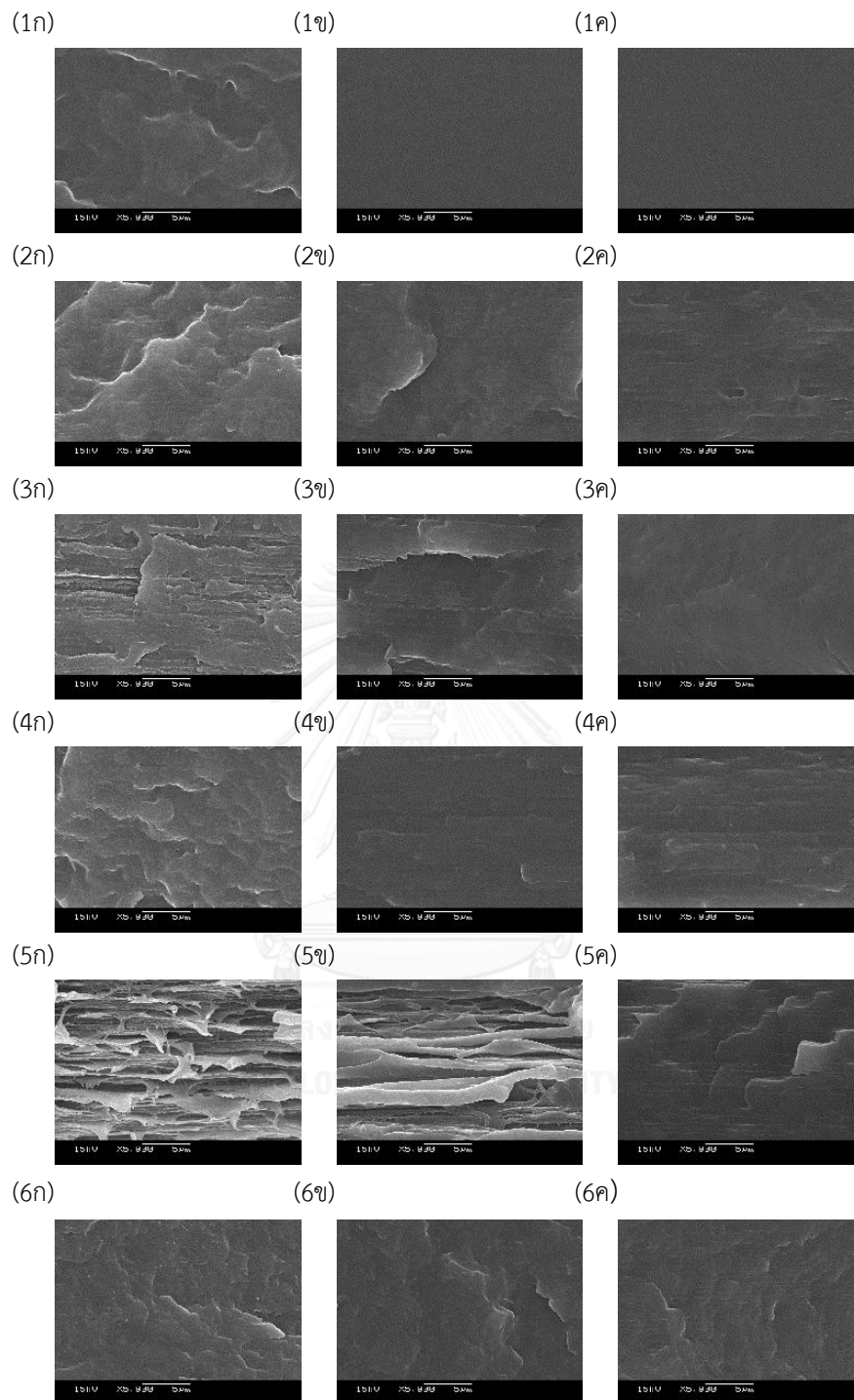
รูปที่ 4.14 ผลของร้อยละการดูดซับน้ำมัน ของฟิล์มเป่า PP2 และ PP2/PE ที่สัดส่วน 60/40 โดย น้ำหนัก ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

4.2.4 สัณฐานวิทยา

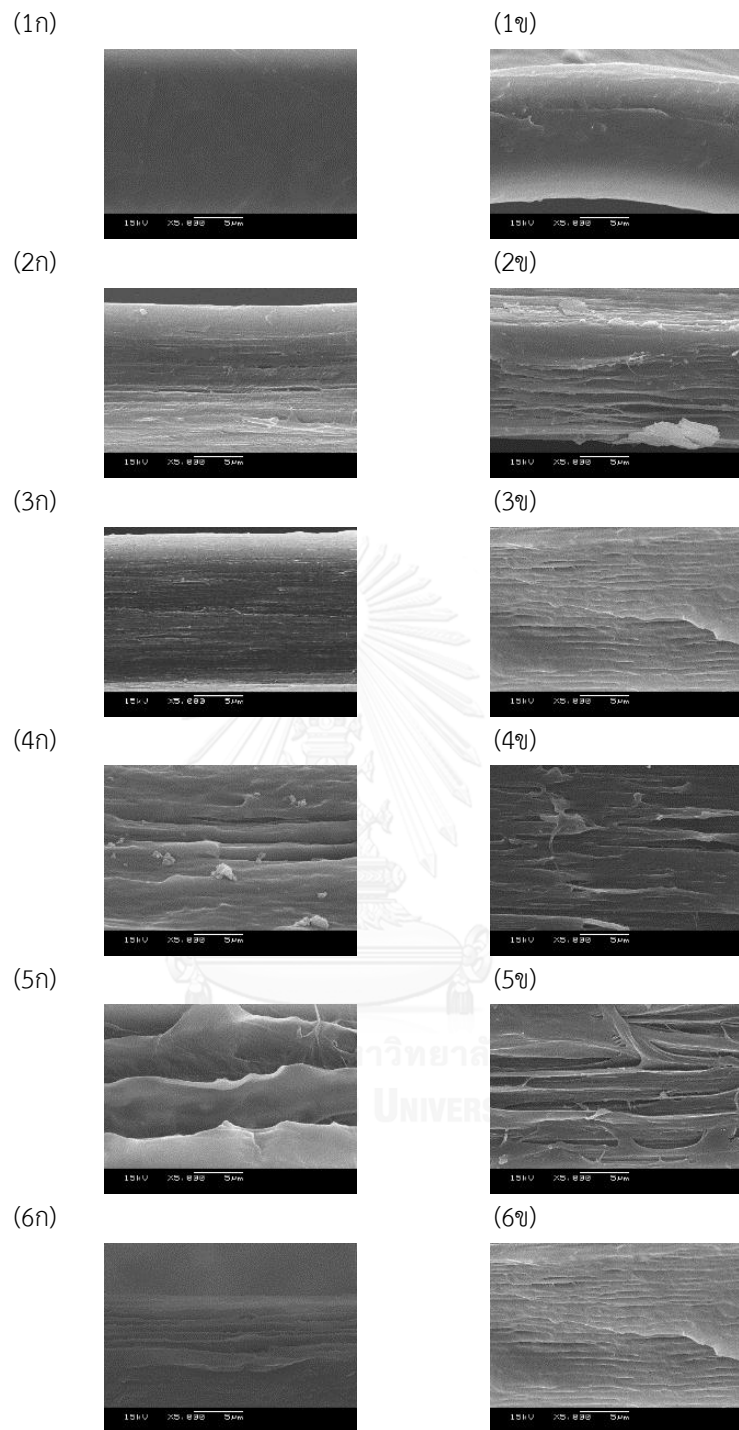
เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า PP2 (รูปที่ 4.15 (1ก) สังเกตโพรงที่ไม่ชัดเจนมากนัก แต่พบได้ชัดเมื่อมีการเติมพอลิเอทิลีน ลักษณะที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับชุดการทดลองของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP1 โพรงในเนื้อของฟิล์ม PP2/PE สังเกตเห็นการซ้อนทับที่ชัดเจนในความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นที่ 400 rpm ลักษณะคล้ายกับชุดทดลองของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP1

เมื่อพิจารณาฟิล์มที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 และ 100 (รูปที่ 4.16-4.18) พบว่าในฟิล์ม PP2 ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm (4.17 (1ก) และ (1ข)) และ 1,000 rpm (รูปที่ 4.18 (1ก) และ (1ข)) ลักษณะโพรงขนาดใหญ่ ในขณะที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm (4.16 (1ก)) มีลักษณะรูพรุนที่มองเห็นได้ไม่ชัด และเริ่มสังเกตเห็นได้เมื่อใช้การดึงยืดร้อยละ 100 (4.16 (1ข)) เช่นเดียวกับชุดการทดลองของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PP1

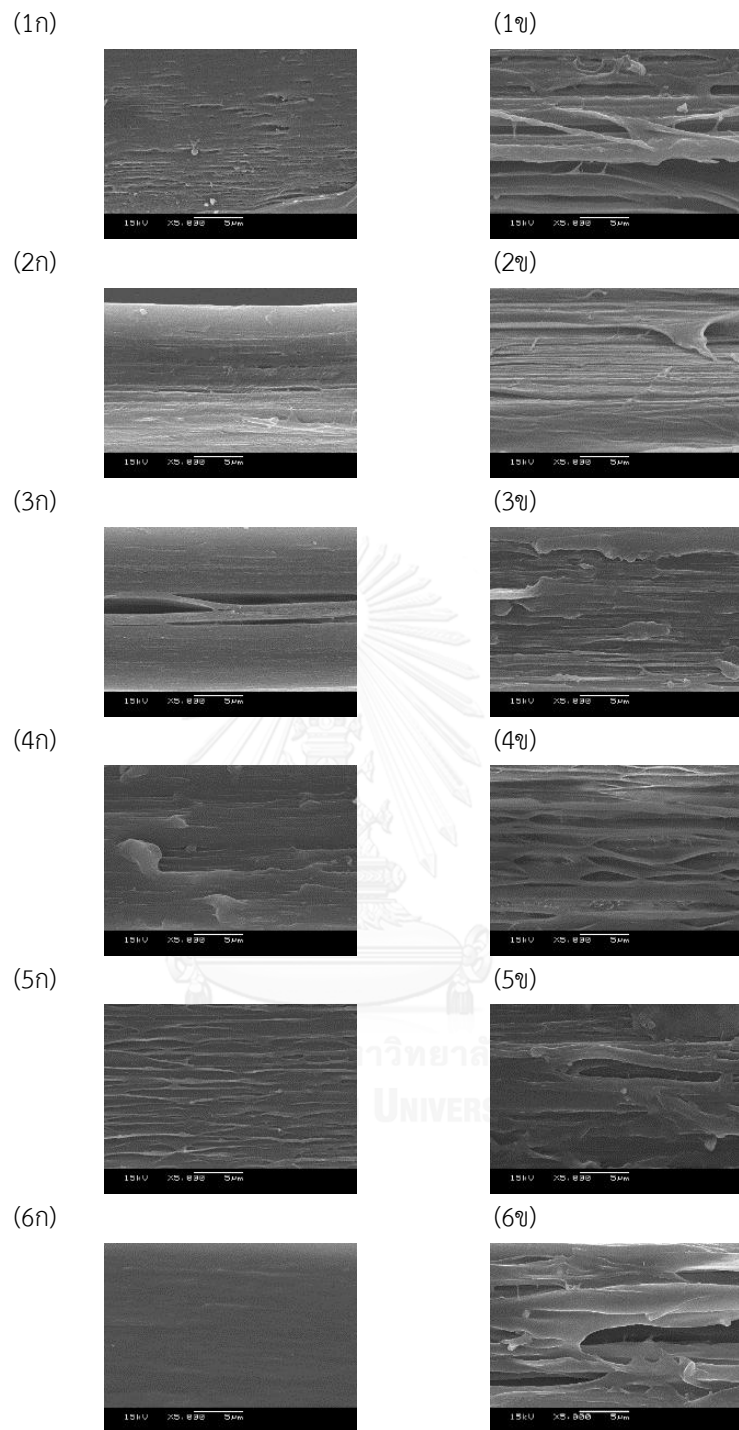
เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มเปรียบเทียบกับระดับความเป็นรูพรุน การดึงยืดฟิล์มที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อร้อยละรูพรุนที่ได้จากการซึบน้ำมันมากนัก ซึ่งเกิดจากลักษณะของโพรงรูปร่างวงรีที่ขยายความยาวในแนว MD มักส่งผลในทางลบต่อระดับรูพรุนของฟิล์มที่เตรียมได้ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโพรงของชุดการทดลองฟิล์ม PP1 และ PP2 พบว่า PP1/PE มีลักษณะโพรงที่มีความสม่ำเสมอมากกว่า PP2/PE ซึ่งลักษณะโพรงที่เหมาะสมควรเป็นโพรงขนาดเล็กที่กระจายไปทั่วฟิล์มแบบชุดการทดลองของ PP1 ดังแสดงในรูปที่ (4.5 – 4.7) ฟิล์ม PP2HD40 ที่มีร้อยละรูพรุนที่สูงกว่าฟิล์ม PP2 ที่ระดับการดึงยืดร้อยละ 50 พบว่ามีรูพรุนกระจายที่ดี ลักษณะโพรงของฟิล์มสอดคล้องกับความเป็นรูพรุนที่ได้จากการดูดซึบน้ำมัน ฟิล์มที่มีรูพรุนขนาดใหญ่อย่าง PP2LD (รูปที่ 4.16 - 4.18 (5ก)) พบว่าไม่สามารถเก็บกักน้ำมันในปริมาณสูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ



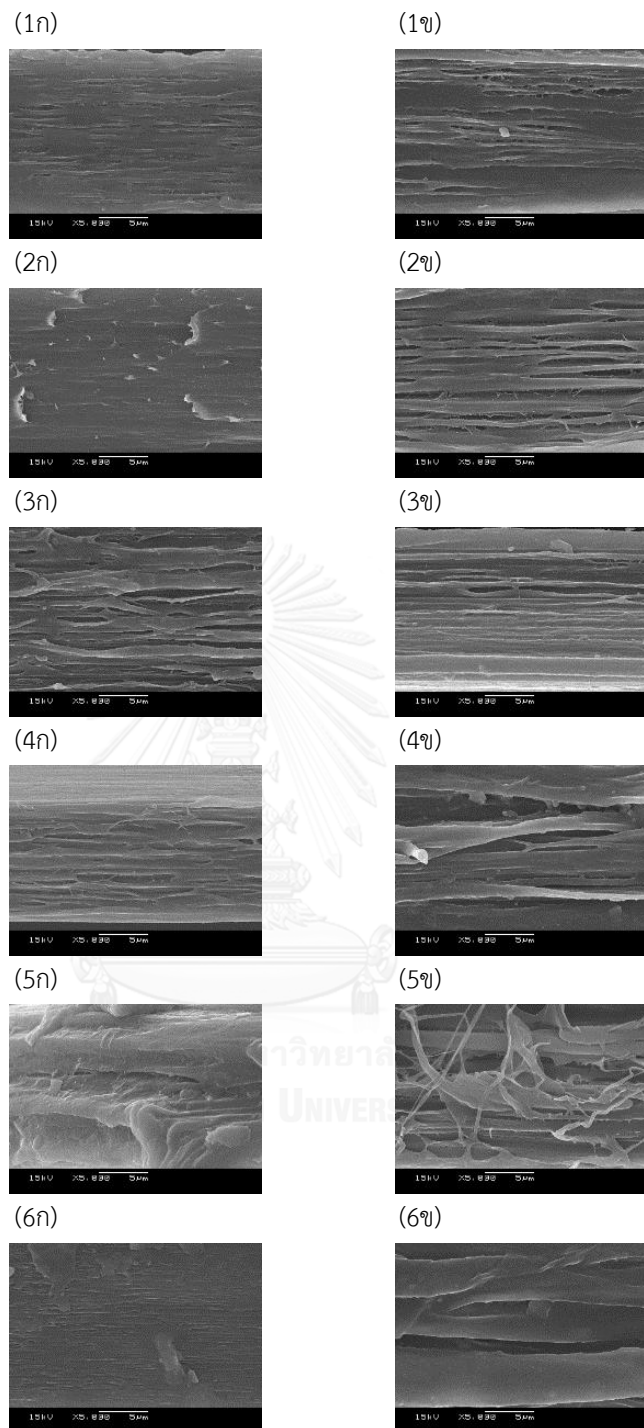
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture



รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืด ร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture



รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture

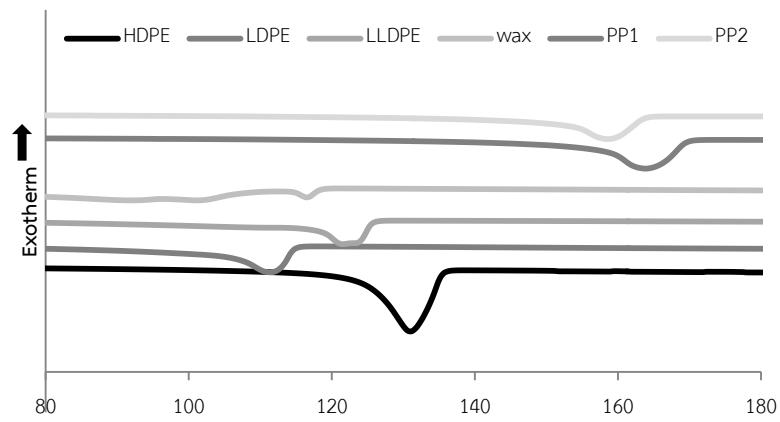


รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาจาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP2 (1) ฟิล์มเป่า PP2HD15 (2) PP2HD40 (3) PP2LD15 (4) PP2LD40 (5) และ PP2LL15 (6) ที่ผ่านการดึงยืดร้อยละ 50 (ก) และ 100 (ข) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm ที่เตรียมได้จากเทคนิค Freeze fracture

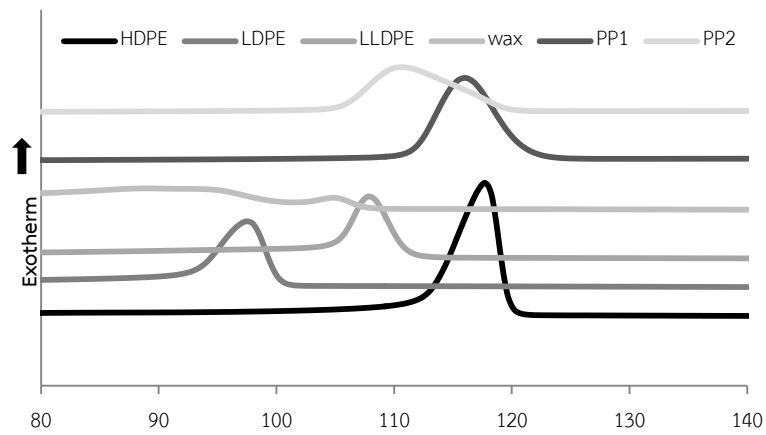
4.3 สมบัติทางความร้อน

DSC เทอร์โมแกรมที่วิเคราะห์จากเม็ด PP1 PP2 และ PE ชนิดต่างๆ แสดงเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4.19 สังเกตได้จากเทอร์โมแกรมในช่วงให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 ว่า PE ที่ใช้ในการศึกษานี้มีช่วงอุณหภูมิหลอมผลึกที่ต่างกัน (4.19 (ก) และ (ค)) โดยในเทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 สังเกตเห็นพิกัดความร้อนที่ชัดเจนของ HDPE LLDPE และ LDPE ที่อุณหภูมิ ~ 132 122 และ 112 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ PP1 และ PP2 มีอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ที่ ~ 168 และ 161 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 4.10) สำหรับในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ค่าที่ตรวจวัดได้ก็ใกล้เคียงกับการให้ความร้อนครั้งที่ 1 อย่างไรก็ตามผลจากการลดอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าการเกิดผลึกของ PP และ HDPE และ LLDPE มีการคาบเกี่ยวกับค่อนข้างมาก เนื่องด้วยการศึกษาที่มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสภาพเข้ากันได้ของ PE ที่เลือกใช้กับ PP ว่าสัมพันธ์กับผลการศึกษาในส่วนที่ 4.1-4.2 อย่างไร แต่ด้วยผลจาก DSC ไม่สามารถพบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ของทั้ง PE และ PP ผู้วิจัยจึงลองใช้ข้อมูลของช่วงการหลอมผลึก ว่าปริมาณผลึก PE และ PP ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมนั้นมีความแตกต่างไปจากกรณีที่พอลิเมอร์องค์ประกอบเดียวหรือไม่ แต่ด้วยข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ไม่สามารถเตรียมฟิล์มจาก PE ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูล DSC ที่วิเคราะห์จากเม็ด PE อีกทั้งบางส่วนของช่วงอุณหภูมิการหลอมผลึก PE มีการคาบเกี่ยวกันกับของ PP ขึ้นอยู่กับชนิดของ PE ที่เลือกใช้ จึงอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของข้อมูล ซึ่งกล่าวในรายละเอียดต่อไป

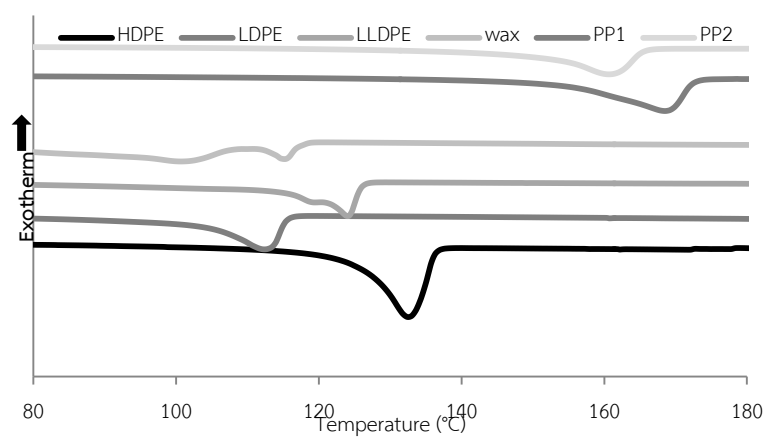
(ก)



(ข)



(ค)



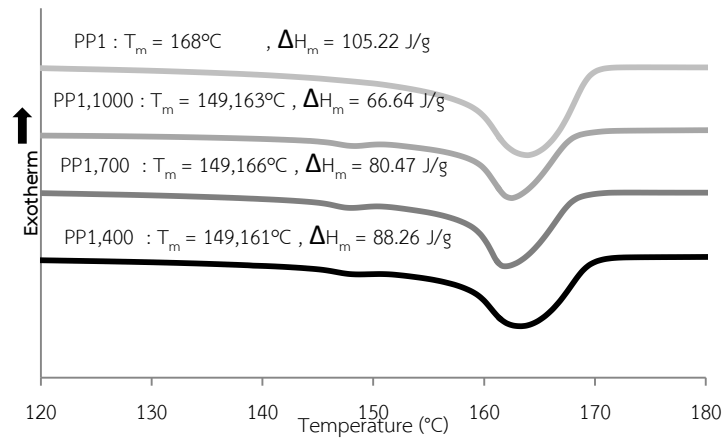
รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมการความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การให้ความเย็น (ข) และให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของเม็ดเรซิน PE และ PP

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการหลอมผลึก และเกิดผลึก เอนทัลปีการหลอม การเกิดผลึก และระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อน ของ PP และ PE

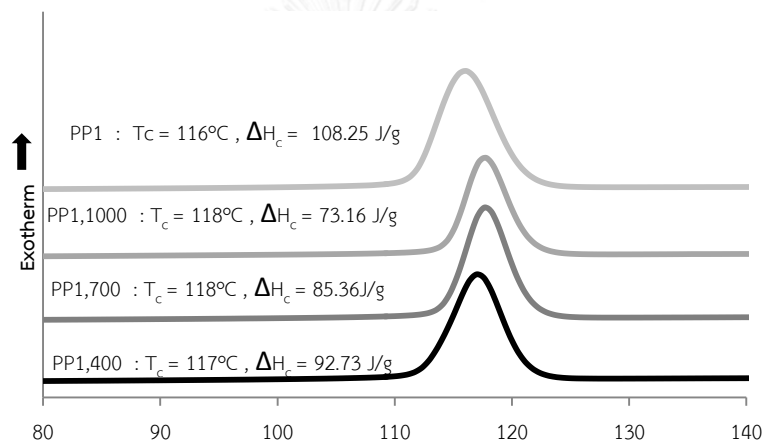
ฟิล์มเป่า	ให้ความร้อนครั้งที่ 1			ให้ความร้อนครั้งที่ 2			ให้ความเย็น		
	T_m	ΔH_m	X_c	T_m	ΔH_m	X_c	T_m	ΔH_m	X_c
	(°C)	(J/g)	(%)	(°C)	(J/g)	(%)	(°C)	(J/g)	(%)
PP1	168	105.22	51				164	113.19	55
PP2	161	87.73	42				158	87.14	42
HDPE	132	141	49	131	142	49	118	149	51
LDPE	112	107	43	111	111	44	98	110	44
LLDPE	124	102	37	121	102	37	108	110	40
wax	127	191	-	91	178	-	89	180	-

เมื่อพิจารณา DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มเป่า PP1 (รูปที่ 4.20ก) เปรียบเทียบกับ PP2 (รูปที่ 4.21ก) พบว่าผลึกของฟิล์ม PP1 มีช่วงการหลอมปรากฏเป็น 2 พีคชัดเจน คือ 149 และ $\sim 161-166$ °C ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์ม PP2 ที่ปรากฏเพียงพีคเดียวคือ $\sim 159-162$ °C ทั้งผลการตรวจสอบจากฟิล์มและเม็ดเรซิน สามารถยืนยันได้ว่า PP เกรดที่เลือกใช้ มีพฤติกรรมการเกิดผลึกที่ต่างกัน ทั้งนี้อุณหภูมิและช่วงการหลอมผลึก (100 - 180°C) ของฟิล์มเป่า PP1 มักมีค่าสูงกว่าที่พบในฟิล์มเป่า PP2 (ช่วงการหลอมผลึกคือ 70 - 180 °C) (รูปที่ 4.20 (ก,ค)-4.21 (ก,ค)) และช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของฟิล์มเป่า PP1 มักมีค่าสูงกว่าของฟิล์ม PP2 (รูปที่ 4.20 (ข)-4.21 (ข)) เมื่อพิจารณาประกอบกับความสามารถในการส่องผ่านของแสง จึงเป็นไปได้ว่าความโปร่งใสของฟิล์มเป่า PP2 เป็นผลจากลักษณะรูปร่างผลึก

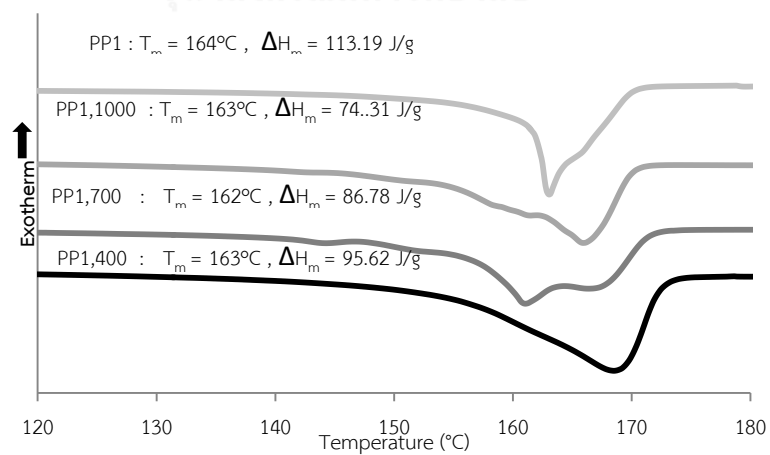
(ก)



(ข)

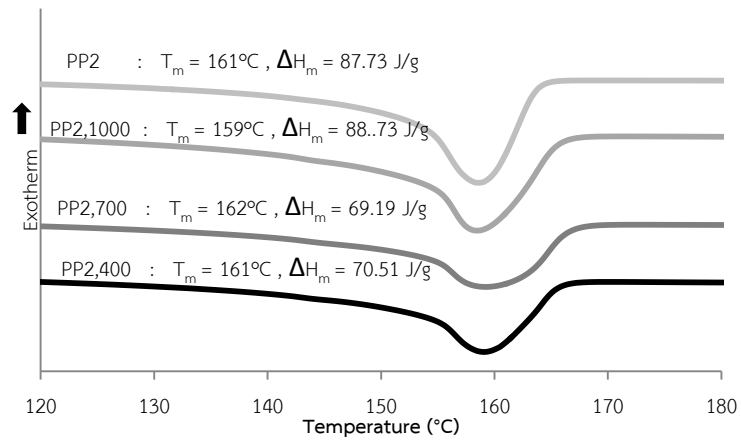


(ค)

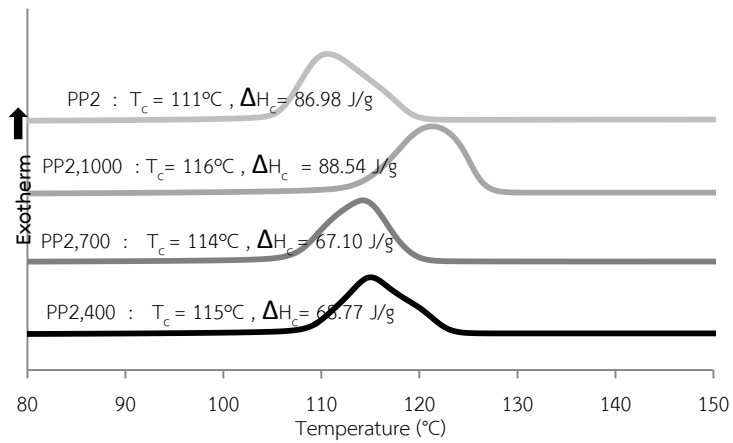


รูปที่ 4.20 DSC เทอร์โมแกรมการความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การให้ความเย็น (ข) และให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของ PP1

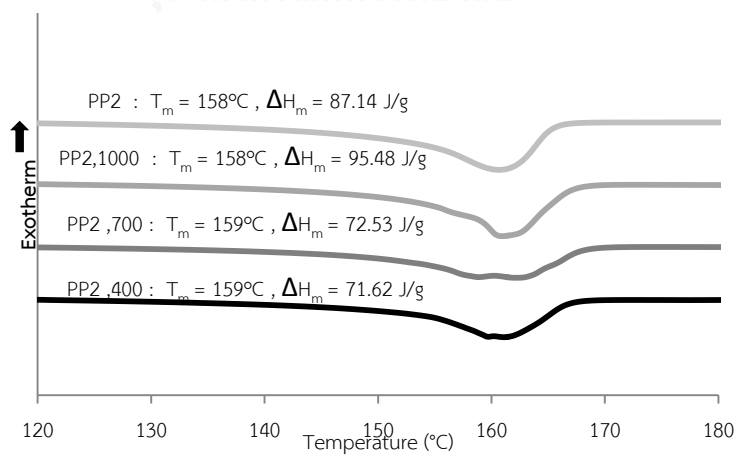
(ก)



(ข)



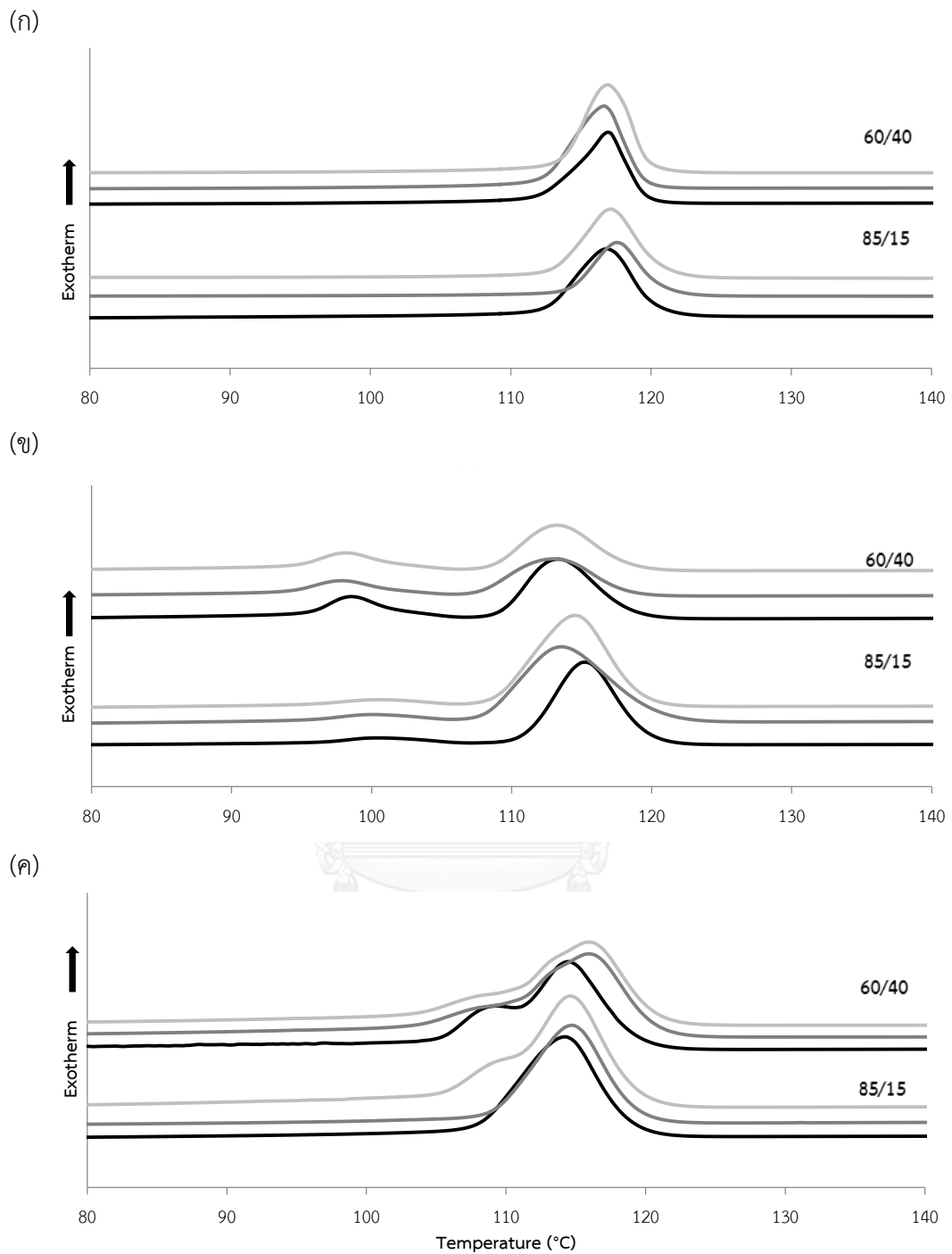
(ค)



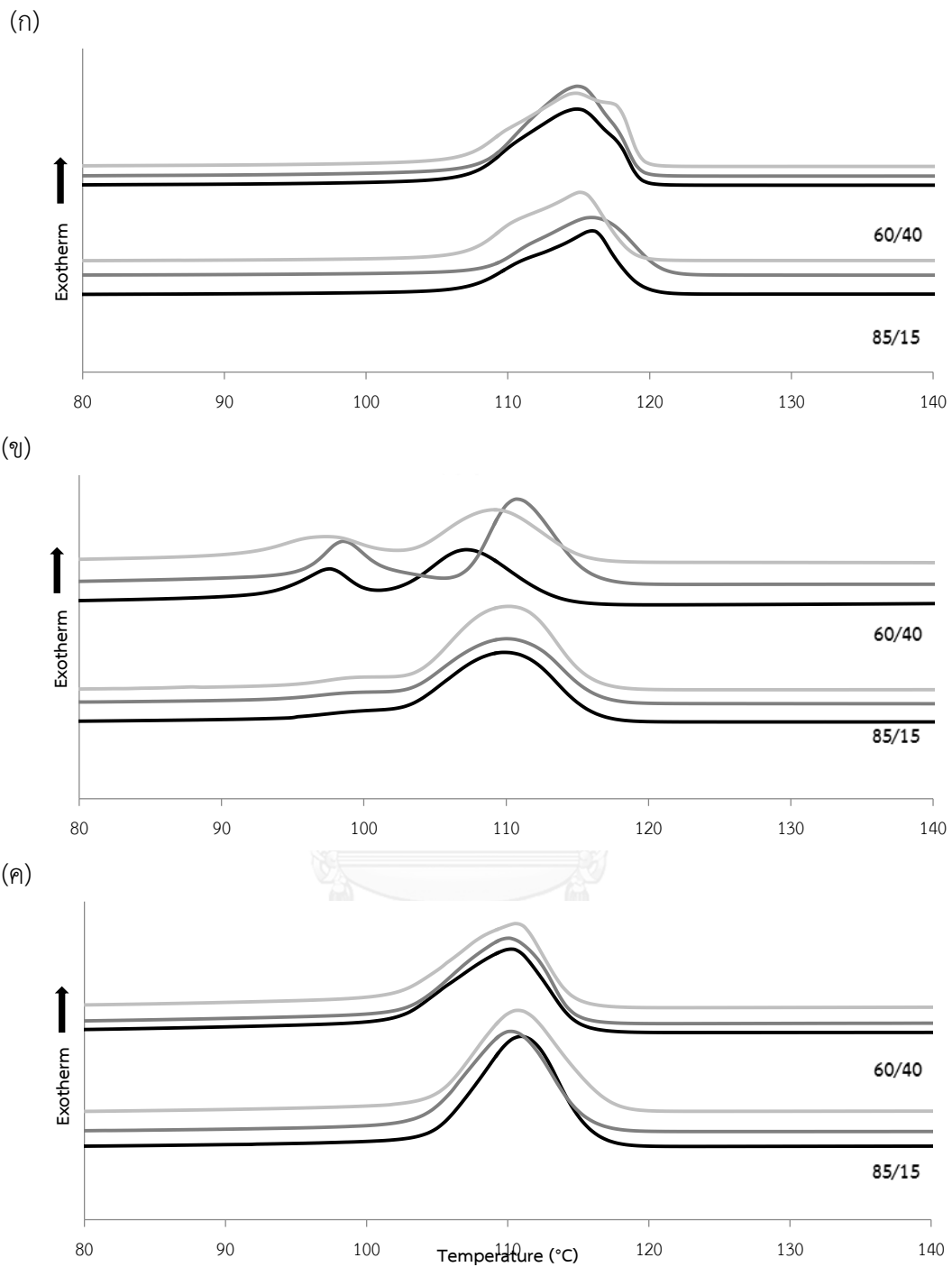
รูปที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมการความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การให้ความเย็น (ข) และให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของ PP2




ในฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมพบว่าผลึก PE และ PP ภายในฟิล์มได้รับผลกระทบจากการมีอยู่ของพอลิเมอร์ต่างชนิดที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพอลิเอทิลีนและสัดส่วนการผสม เมื่อพิจารณาเทอร์โมแกรมช่วงลดอุณหภูมิของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชุด PP1 และ PP2 พบว่าช่วงอุณหภูมิเกิดผลึกของ PP และ PE มีการคาบเกี่ยวกันค่อนข้างมาก (รูปที่ 4.19) โดยเฉพาะในกรณีของ HDPE และ LLDPE ดังนั้นจึงไม่สามารถอาศัยข้อมูลในส่วนนี้เพื่อวิเคราะห์สภาพการเข้ากันได้ระหว่าง PP กับ PE ต่างชนิด

เมื่อลองพิจารณาข้อมูลในช่วงการให้ความร้อน (รูปที่ 4.24 – 4.25) สังเกตพบอุณหภูมิหลอมผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็น 2 ช่วงที่สอดคล้องกับผลึก PP และ PE ดังนั้นจึงนำค่าเอนทัลปีของการหลอมที่ได้จากแต่ละช่วงมาคำนวณดังอธิบายใน 3.1 เป็นปริมาณผลึก (X_c) ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบของฟิล์มแล้วรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.11-4.12 ด้วยข้อจำกัดของความหนืด PE ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มเป่าได้ ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่วิเคราะห์จากเม็ดเรซิน ซึ่งระดับการเกิดผลึกของ HDPE LDPE LLDPE คือร้อยละ 49 43 และ 37 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.10) ซึ่งหากพิจารณาเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกของ PE ชนิดต่างๆ ในฟิล์มผสมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่าปริมาณผลึก LLDPE และ LDPE มีแนวโน้มต่ำกว่าที่พบเมื่อทดสอบกับเม็ดเรซิน ในขณะที่ปริมาณผลึก HDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสูงกว่าที่พบเมื่อทดสอบกับเม็ดเรซิน และเมื่อพิจารณาจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ซึ่งเชื่อว่าผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการกระบวนการเป่าฟิล์ม พบว่าผลึกของ LLDPE และ HDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่พบจากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ในขณะที่ผลึก LDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มใกล้เคียงกับเม็ด LDPE สำหรับผลึก PP ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ตารางที่ 4.11 และ 4.12) เมื่อเปรียบเทียบกับของฟิล์ม PP1 และฟิล์ม PP2 (ร้อยละ ~ 33 – 46) พบว่าแม้ค่าร้อยละผลึก PP ที่คำนวณได้แตกต่างไปจากของฟิล์ม PP อย่างไรก็ตามความแตกต่างนั้นน้อยกว่ากรณีผลึกของ PE การพิจารณาข้อมูลต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากการเลือกช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันเล็กน้อยเพื่อคำนวณค่าเอนทัลปีสามารถส่งผลให้ได้ค่าที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นการที่ปริมาณผลึก HDPE และ LLDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความแตกต่างมากกว่า LDPE อาจเป็นข้อสังเกตได้ว่า LDPE เกรดชนิดนี้มีสภาพเข้ากันได้กับ PP น้อยกว่า LLDPE และ HDPE

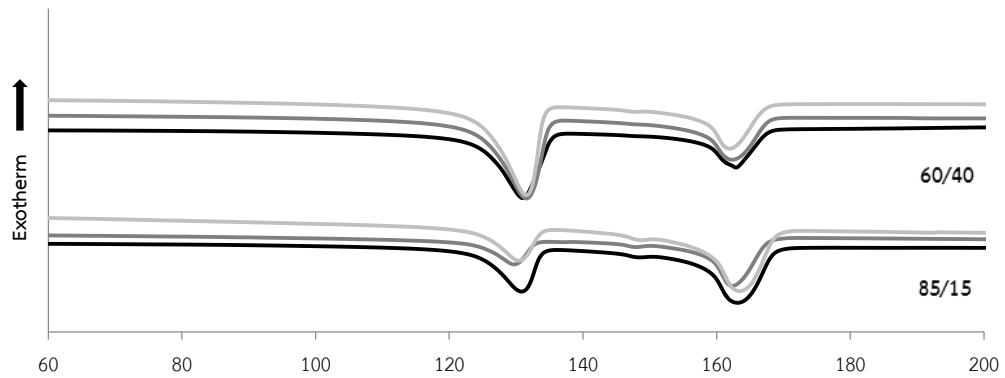


รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความเย็นของฟิล์มเป่า PP1/HDPE (ก) PP1/LDPE (ข) และ PP1/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นหล่อเย็น 400 (—) 700 (—) และ 1,000 (—) rpm

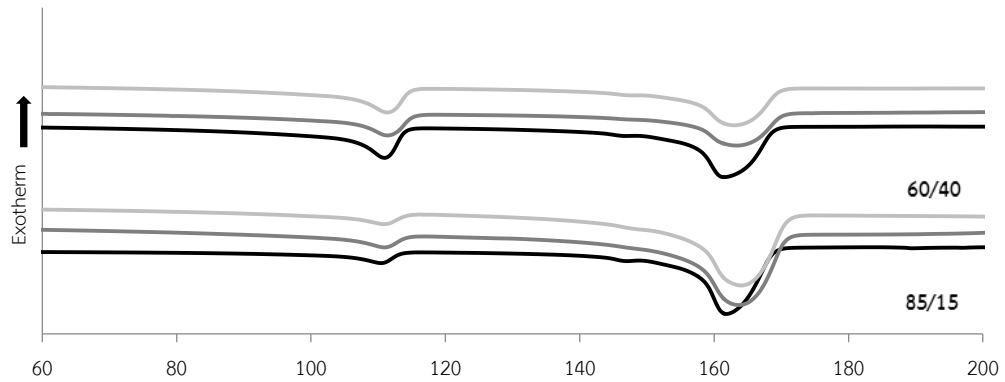


รูปที่ 4.23 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความเย็นของฟิล์มเป่า PP2/HDPE (ก) PP2/LDPE (ข) และ PP2/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 () 700 () และ 1,000 () rpm

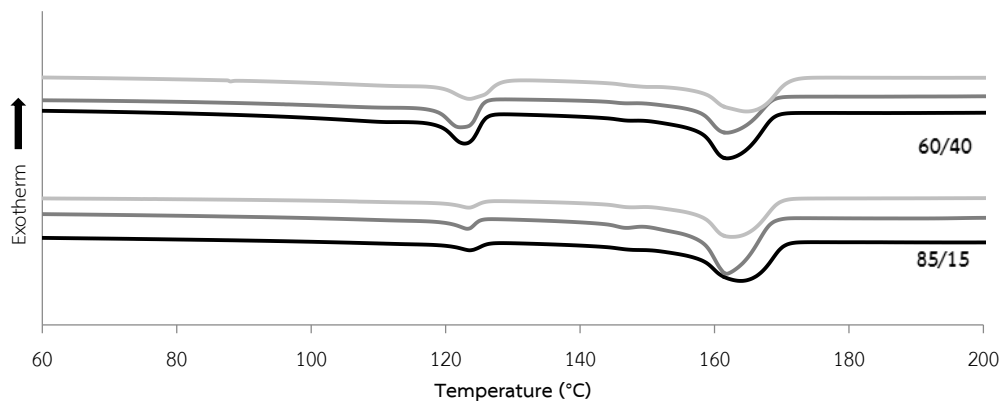
(ก)






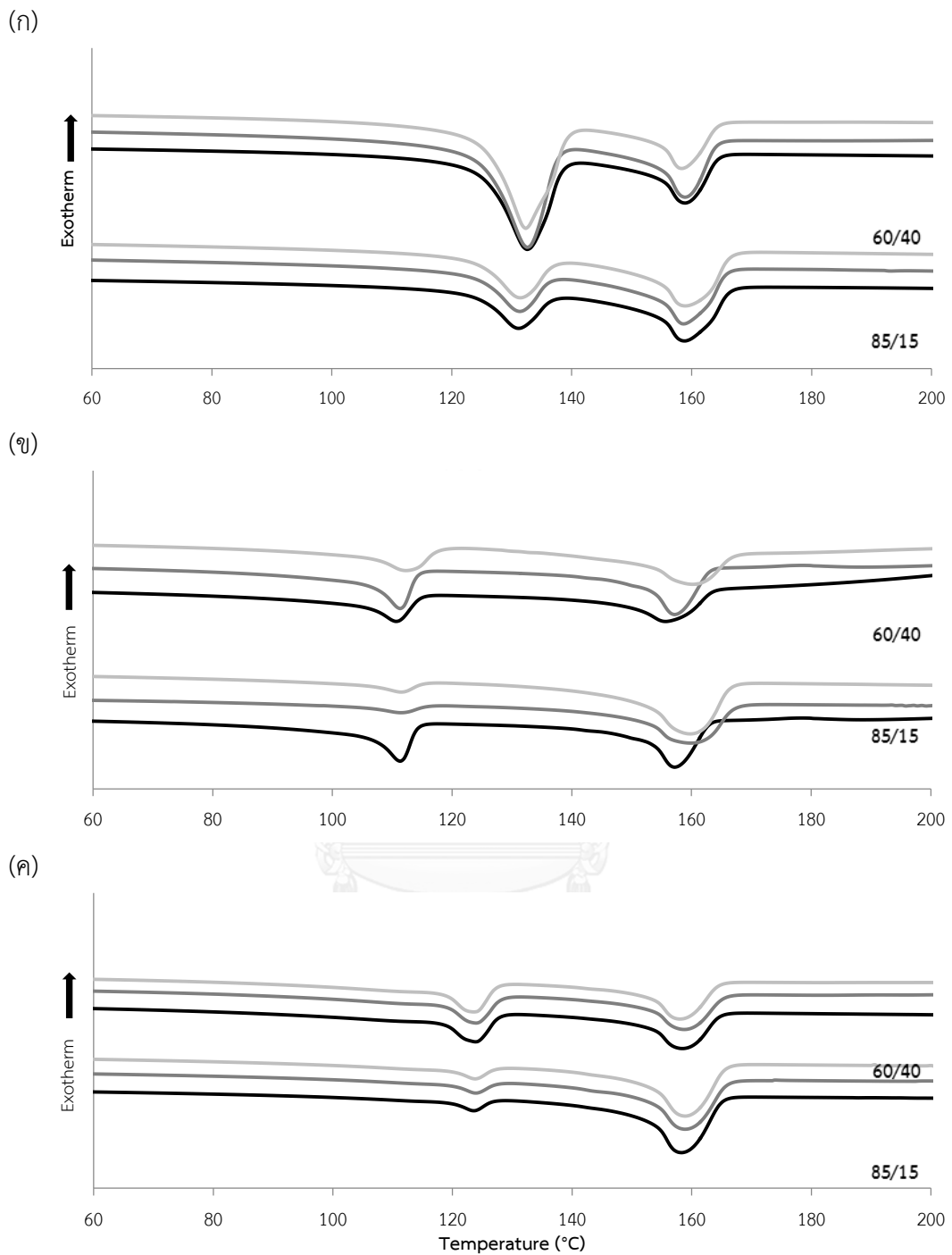
(ข)






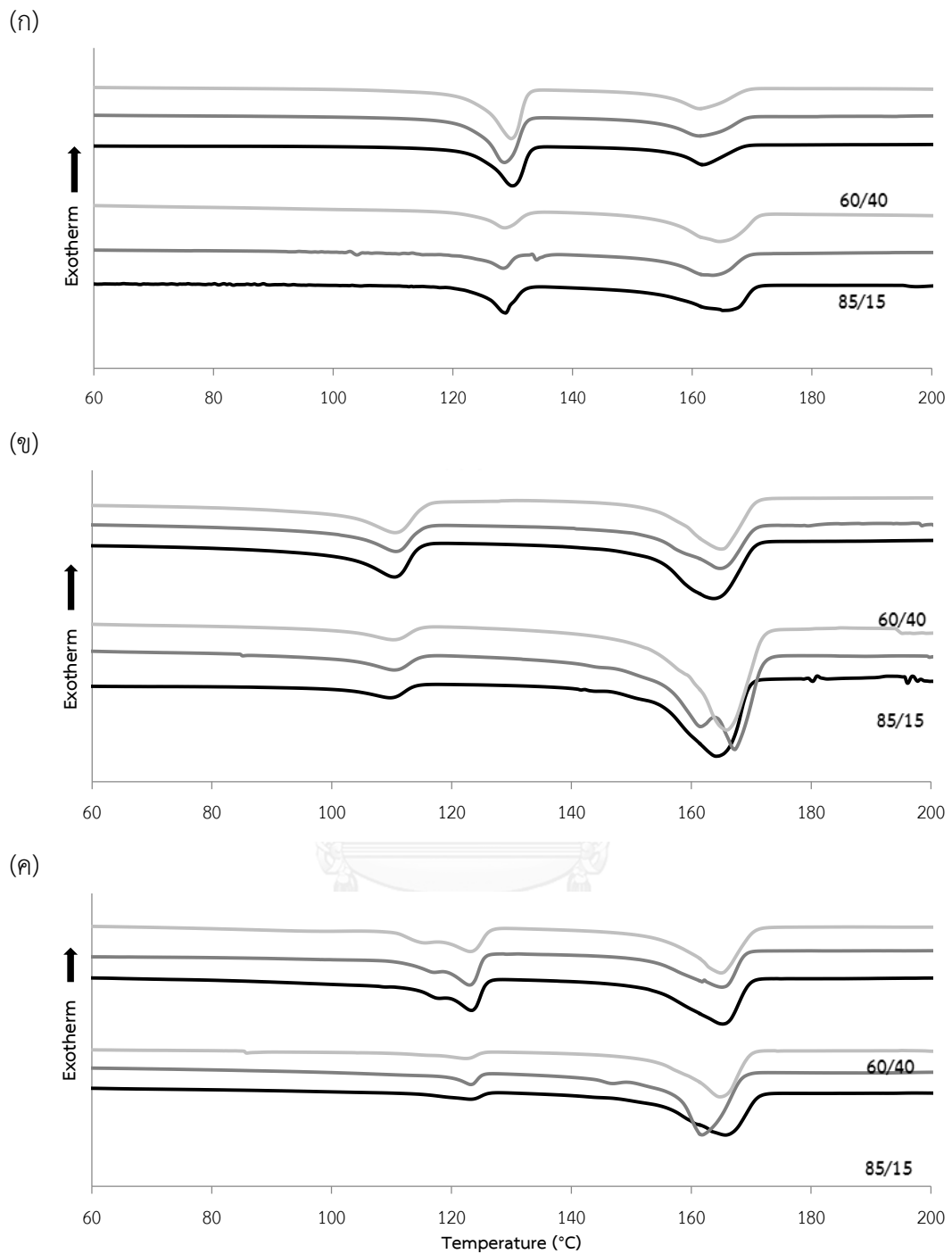
(ค)






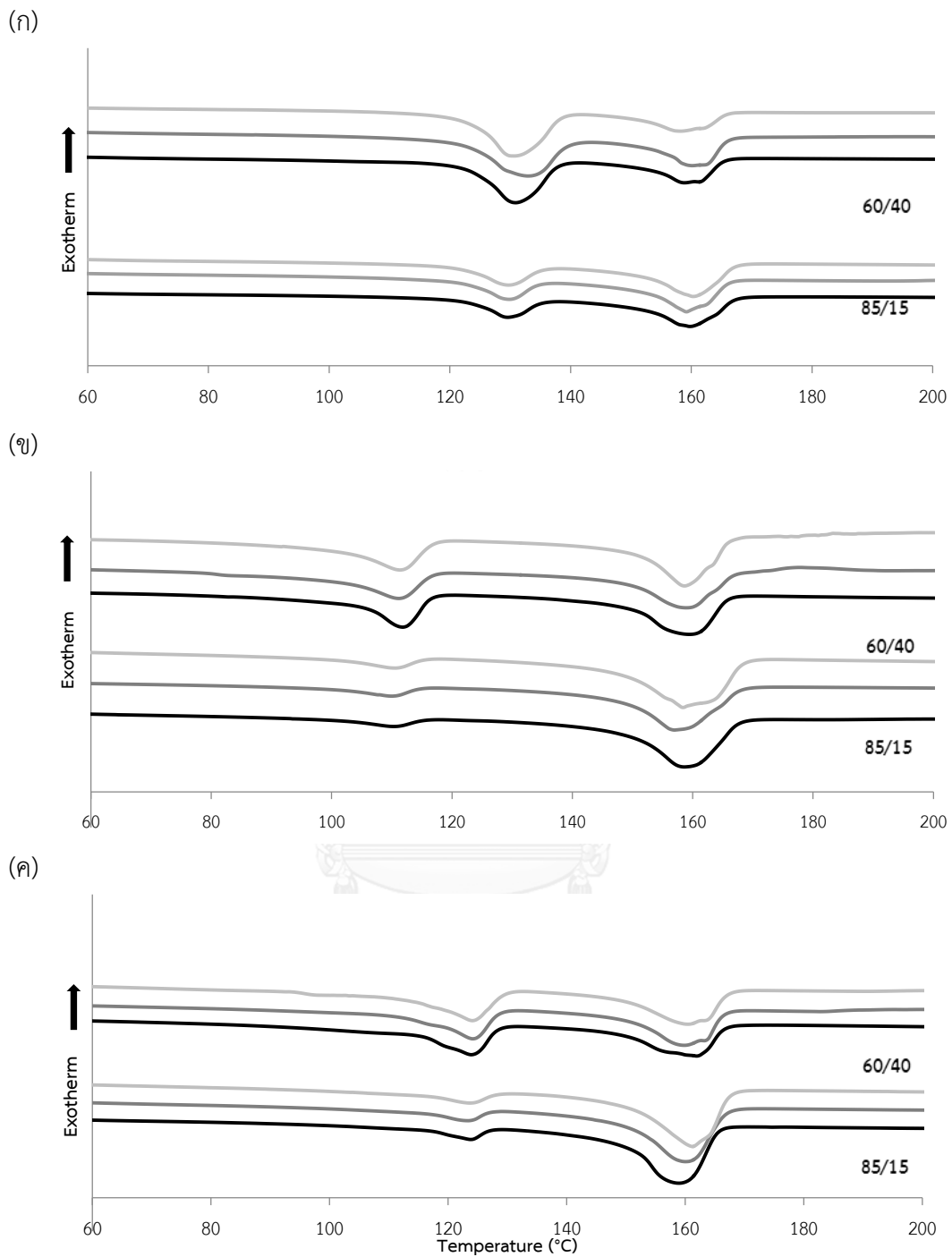
รูปที่ 4.24 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มเป่า PP1/HDPE (ก) PP1/LDPE (ข) และ PP1/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 () 700 () และ 1,000 () rpm



รูปที่ 4.25 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มเป่า PP2/HDPE (ก) PP2/LDPE (ข) และ PP2/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 () 700 () และ 1,000 () rpm



รูปที่ 4.26 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP1/HDPE (ก) PP1/LDPE (ข) และ PP1/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 () 700 () และ 1,000 () rpm



รูปที่ 4.27 DSC เทอร์โมแกรมการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP2/HDPE (ก) PP2/LDPE (ข) และ PP2/LLDPE (ค) ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (—) 700 (—) และ 1,000 (—) rpm

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการหลอมผลึก เอนทัลปีการหลอมและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP1 และ ฟิล์มเป่า PP1/PE ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

ฟิล์ม เป่า	ความเร็วของ มอเตอร์ ควบคุม ลมหล่อ เย็น (rpm)	ให้ความร้อนครั้งที่ 1						ให้ความร้อนครั้งที่ 2					
		พอลิโพรพิลีน			พอลิเอทิลีน			พอลิโพรพิลีน			พอลิเอทิลีน		
		T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)
PP1	400	149, 161	88.26	43	-	-	-	163	95.62	46	-	-	-
	700	149, 166	80.47	39	-	-	-	162	86.78	42	-	-	-
	1,000	149, 163	66.64	32	-	-	-	163	74.31	36	-	-	-
PP1HD 15	400	165	71.49	41	129	39.62	91	163	67.68	38	131	41.37	95
	700	163	56.97	32	128	16.61	38	162	68.4	39	130	36.32	84
	1,000	164	68.46	39	128	31.27	72	163	74.2	42	130	35.22	81
PP1HD 40	400	162	41.05	33	130	64.2	56	163	43.93	35	131	75.59	65
	700	161	48.03	39	128	75.42	65	162	49.31	40	131	82.64	71
	1,000	161	39.64	32	129	69.06	60	162	41.1	33	131	67.73	59
PP1LD 15	400	164	62.28	35	110	16.39	44	162	68.5	39	110	9.93	26
	700	167	86	49	110	19.12	51	163	88.12	50	111	9.42	25
	1,000	166	66.03	38	110	14.61	39	164	69.09	39	111	9.92	26
PP1LD 40	400	164	53.45	43	110	45.62	46	161	54.91	44	111	34.91	35
	700	165	38.64	31	111	33.06	33	163	39.81	32	111	27.95	28
	1,000	165	38.04	31	111	45.59	46	163	43.52	35	111	29.84	30
PP1LL 15	400	166	57.02	32	123	10.26	25	164	57.42	33	123	8.33	20
	700	165	63.89	36	123	11.2	27	162	64.93	37	123	8.95	22
	1,000	165	50.77	29	122	10.5	25	163	53.14	30	123	6.44	15
PP1LL 40	400	165	54.89	44	123	46.86	42	162	56.83	46	123	56.31	51
	700	165	42.88	35	123	42.29	38	162	42.32	34	122	44.38	40
	1,000	165	52.42	42	123	36.71	33	165	50.25	40	123	33.43	30
PP1 wax15	400	162	64.76	37	92	-	-	159	64.58	37	92	-	-
	700	163	69.87	40	92	-	-	159	78.33	45	91	-	-
	1,000	163	67.76	38	92	-	-	160	72.17	41	92	-	-

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิหลอมผลึก เอนทัลปีการหลอม และระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP2 และ ฟิล์มเป่า PP2/PE ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm

ฟิล์ม เป่า	ความเร็วของ มอเตอร์ ควบคุม ลมหล่อ เย็น (rpm)	ให้ความร้อนครั้งที่ 1						ให้ความร้อนครั้งที่ 2							
		พอลิโพรพิลีน			พอลิเอทิลีน			พอลิโพรพิลีน			พอลิเอทิลีน				
		T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _m (%)		
PP2	400	161	70.51	34						159	71.62	35			
	700	162	69.19	33						159	72.53	35			
	1,000	159	88.73	43						158	95.48	46			
PP2HD 15	400	159	56.91	32	129	29.79	69	158	56.26	32	131	34.76	80		
	700	159	54.99	31	129	29.62	68	158	56.45	32	131	35.36	82		
	1,000	160	57.73	33	129	30.47	70	158	55.92	32	131	33.56	77		
PP2HD 40	400	158	40.93	33	130	86.65	75	158	41.91	34	132	85.62	74		
	700	160	51.64	42	132	85.52	74	158	48.65	39	132	92.13	80		
	1,000	158	34.64	28	130	80.43	70	158	39.83	32	132	98.1	85		
PP2LD 15	400	158	59.92	34	110	9.9	26	160	62.01	35	111	5.07	14		
	700	157	56.09	32	110	11.94	32	160	55.91	32	111	6.55	17		
	1,000	158	66.03	38	110	14.61	39	159	69.09	39	111	9.92	26		
PP2LD 40	400	159	45.95	37	112	48.14	48	156	50.79	41	110	39.7	40		
	700	158	56.42	45	111	51.23	51	157	50.44	41	111	44.17	44		
	1,000	159	52.25	42	111	39	39	160	49.83	40	112	35.09	35		
PP2LL 15	400	158	62.26	35	124	7.03	17	158	62.02	35	123	6.67	16		
	700	160	60.08	34	123	11.89	29	158	58.89	33	124	6.53	16		
	1,000	161	61.42	35	123	15.31	37	158	58.38	33	124	10.23	25		
PP2LL 40	400	162	36.73	30	123	42.35	38	158	38.51	31	123	42.21	38		
	700	159	38.95	31	124	42.81	39	157	39.07	31	123	41.49	37		
	1,000	160	40.38	32	124	45.2	41	158	38.73	31	124	39.1	35		
PP2 wax15	400	163	74.73	42	96			158	74.44	42	93				
	700	161	41.64	24	123			158	40.13	23	123				
	1,000	157	70.15	40	77			156	71.85	41	92				

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. फिल्मเป่าพอลิโพรพิลีนสามารถทำให้ได้ฟิล์มรูพรุนขนาดเล็กได้ ภาวะที่ใช้เตรียมฟิล์มมีผลต่อการเกิดรูพรุน โดยพบว่าฟิล์ม PP1 ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นที่ 700 rpm สามารถเกิดรูพรุนสูงถึงร้อยละ 24 เมื่อตั้งยัดฟิล์มที่ร้อยละ 100 ในขณะที่ฟิล์มเป่า PP2 ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นที่ 400 rpm มีรูพรุนร้อยละ 25 เมื่อตั้งยัดฟิล์มที่ร้อยละ 50 การผสมพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนสามารถทำให้ได้ฟิล์มรูพรุนขนาดเล็กได้ ฟิล์มที่มี HDPE เป็นองค์ประกอบสามารถให้ปริมาณรูพรุนใกล้เคียงและสูงกว่าฟิล์ม PP เมื่อให้สัดส่วนที่เหมาะสมคือร้อยละ 40 โดยภาวะที่เหมาะสมสำหรับเตรียมฟิล์ม PP1HD40 ให้มีร้อยละรูพรุนเท่ากับ 30 คือความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 700 rpm และระดับการยัดฟิล์มที่ร้อยละ 50 สำหรับฟิล์ม PP2HD40 พบร้อยละรูพรุนเท่ากับ 30 เมื่อขึ้นรูปฟิล์มที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 1,000 rpm ระดับการยัดฟิล์มที่ร้อยละ 50 การเติม LDPE LLDPE และ wax ไม่สามารถเพิ่มระดับรูพรุนได้สูงเทียบเท่า HDPE
2. จากพฤติกรรมการเกิดผลึกของ HDPE และ LLDPE ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความแตกต่างจากเม็ดเรซินอย่างเห็นได้ชัด แสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนกับวัฏภาคของพอลิโพรพิลีน ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE ปริมาณผลึก LDPE ในฟิล์มไม่ต่างจากของเม็ดเรซินมากนัก จึงเป็นไปได้ว่า LDPE มีสภาพเข้ากันได้กับ PP ที่ดีกว่า ด้วยสภาพความเข้ากันได้และสมบัติเชิงกลที่ดีของ LDPE จึงส่งผลให้ฟิล์ม PP/LDPE มีสมบัติด้านแรงดึงและระดับรูพรุนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอื่นและฟิล์มพอลิโพรพิลีน
3. ความเป็นรูพรุนของฟิล์ม PP/HDPE ที่มากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอื่น ๆ เป็นผลทั้งจากสภาพผสมเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคของ PP และ HDPE และความแข็งแรงของวัฏภาคกระจายตัวที่สูง ดังนั้น แรงดึงจากภายนอกจึงมีผลให้รอยแยกเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค
4. ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นมีผลต่อความหนาและความยับของฟิล์มเป่า ความหนาและความยับมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วหล่อเย็น

5. SEM แสดงให้เห็นว่าการดึงยึดฟิล์มก่อให้เกิดโพรงปริมาณมากขึ้นในระดับร้อยละ การดึงที่เหมาะสม หากใช้ร้อยละการดึงยึดฟิล์มที่สูงเกินไป โพรงที่มีอยู่ถูกดึงจนมีขนาดใหญ่ซึ่งให้ผล ในทางลบกับประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การผสมพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนสามารถหาสัดส่วนเพิ่มเติมในช่วงการผสมร้อยละ 15 – 40 ได้ เนื่องจากในการทดลองใช้สัดส่วนร้อยละ 15 และ 40 ที่คาดว่าจะเกิดโพรงสูงสุดจึงศึกษา เพียงสัดส่วนดังกล่าวเท่านั้น หากศึกษาเพิ่มเติมอาจสามารถหาภาวะที่จะพบรูพรุนที่เพิ่มขึ้น

2) การวัดปริมาณและขนาดรูพรุนจากการดูดซับน้ำมัน เป็นวิธีการหารูพรุนอย่างคร่าว เป็นวิธีที่ง่ายและราคาไม่สูง แต่ถ้าต้องการค่าที่มีความแม่นยำที่สูงสามารถใช้เครื่องมือวัดอย่างอื่นได้ เช่น เครื่อง Micromeritics ที่ใช้แก๊สวัดการดูดซับของรูพรุนบนผิวของฟิล์ม

3) การเตรียมฟิล์มรูพรุนในการทดลองนี้เตรียมในสภาวะอุณหภูมิห้อง หากผ่านการอบอ่อน หรือดึงยึดฟิล์มขณะอุณหภูมิอ่อนตัวของฟิล์มอาจสามารถเพิ่มระดับความเป็นรูพรุนของฟิล์มได้

รายการอ้างอิง

- [1] Hughes, S.K., Kody, R.S., Mrozinski, J.S., and Myles, L.B. . Microporous materials and methods of making the same. 2007.
- [2] Chu, F. and Kimura, Y. Structure and gas permeability of microporous films prepared by biaxial drawing of β -form polypropylene. Polymer 37(4) (1996): 573-579.
- [3] Chu, F., Yamaoka, T., and Kimura, Y. Crystal transformation and micropore formation during uniaxial drawing of β -form polypropylene film. Polymer 36(13) (1995): 2523-2530.
- [4] Fisher, H.M. and Wensley, C.G. Polypropylene microporous membrane for battery separator. 2002, Google Patents.
- [5] Gozdz, A.S., Schmutz, C.N., Tarascon, J.M., and Warren, P.C. Method of making polymeric electrolytic cell separator membrane. 1997, Google Patents.
- [6] Venugopal, G., Moore, J., Howard, J., and Pandalwar, S. Characterization of microporous separators for lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 77(1) (1999): 34-41.
- [7] Tabatabaei, S.H., Carreau, P. J., and Aji, A. Microporous membranes obtained from polypropylene blend films by stretching. Journal of Membrane Science 325(2) (2008): 772-782.
- [8] Shanks, R.A., Li, J., and Yu, L. Polypropylene-polyethylene blend morphology controlled by time-temperature-miscibility. Polymer 41(6) (2000): 2133-2139.
- [9] Offord, G.T., Armstrong, S.R., Freeman, B.D., Baer, E., Hiltner, A., and Paul, D.R. Influence of processing strategies on porosity and permeability of β nucleated isotactic polypropylene stretched films. Polymer 54(11) (2013): 2796-2807.
- [10] Tabatabaei, S.H., Carreau, P. J., and Aji, A. Microporous membranes obtained from PP/HDPE multilayer films by stretching. Journal of Membrane Science 345(1-2) (2009): 148-159.
- [11] Ferrer-Balas, D., MasPOCH, M.L., Martinez, A.B., and Santana, O.O. Influence of annealing on the microstructural, tensile and fracture properties of polypropylene films. Polymer 42(4) (2001): 1697-1705.

- [12] Saffar, A., Carreau, P.J., Aji, A., and Kamal, M.R. Development of polypropylene microporous hydrophilic membranes by blending with PP- g- MA and PP- g-AA. Journal of Membrane Science 462 (2014): 50-61.
- [13] ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์.. เอกสารประกอบการสอนวิชาการออลอยีและกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์.. 2557, มหาวิทยาลัยศิลปากร: นครปฐม.
- [14] วิชาการตอทคอม.พอลิเมอร์. พอลิเมอร์ Available from : <http://www.vcharkarn.com/lesson/1465>. [21 ตุลาคม 2558]
- [15] Seymour, R. B. and Cheng, T. History of Polyolefins. Chemists and Chemistry. Department of Polymer Science, The University of Southern Mississippi: Springer Netherlands, 1986.
- [16] นาดยา เอื้อพิทักษ์สกุล. การปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [17] สัญลักษณ์ของพลาสติกรีไซเคิล (Symbol of recycled plastic) Available from: <https://sites.google.com/site/plastic9911/saylaksn-khxng-phlastik-risikheil-symbol-of-recycled-plastic>
- [18] คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ.. การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกแบบโคออดิเนชัน Available from: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter%201.pdf> [21 ตุลาคม 2558]
- [19] Ven, S. v. d. Polypropylene and other Polyolefins: Polymerization and Characterization. (1990).1-363
- [20] จุติพล สวัสดิ์พานิช , สุชานนท์ แก้วจินดา. ฟิล์มพีพีจากเครื่อง chill Roll Cast.. 2555.
- [21] วิมลวรรณ พิมพ์พันธ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิล์ม (Part 1). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [22] ขวสิทธิ์ ชาญฉลาด. ฟิล์มนาโนคอมโพสิตพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยการเป่าอัดรีดสำหรับการประยุกต์ในบรรจุภัณฑ์อาหาร. คาร์บอนเนต.. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [23] ประทุมมา สุโส๊ะ. สมบัติเชิงกลของพลาสติกผสม 3 ชนิด ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิโพรพิลีน. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [24] Manufacturing Terms.LLDPE พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น Available from: <http://www.manufacturingterms.com/Thai/LLDPE.html> [21 ตุลาคม 2558]

- [25] บริษัทเวสเซล เคมิคัล จำกัด. โพลีเอทิลีนแวกซ์(POLYETHYLENE WAX) Available from: [http:// www.vessel-chemical.com/Default.aspx?pageid=16](http://www.vessel-chemical.com/Default.aspx?pageid=16) [22 ตุลาคม 2558]
- [26] Zhang, X., Peng, X., and Zhang, S.W. 7 - Synthetic biodegradable medical polymers: Polymer blends. in, Woodhead Publishing, 2017. 217-254:
- [27] มัณฑนา โอภาประกาศิต . เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิล์ม (Part 2). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [28] Yang, C., Zhe, X., Zhang, M., Wang, M., and Wu, G. Radiation effects on the foaming of atactic polypropylene with supercritical carbon dioxide. Radiation Physics and Chemistry 131 (2017): 35-40.
- [29] Chen, Y., Zou, H., Liang, M., and Cao, Y. Melting and crystallization behavior of partially miscible high density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (HDPE/EVA) blends. Thermochemica Acta 586 (2014): 1-8.
- [30] Telen, L., Jansens, K.J.A., Verpoest, I., Delcour, J.A., Van Puyvelde, P., and Goderis, B. Wheat gluten/LDPE based thermoplastic vulcanizates containing LDPE-g-MA as compatibilizer. Industrial Crops and Products 74 (2015): 824-838.
- [31] As, habi, L., Jafari, S.H., Khonakdar, H.A., Häussler, L., Wagenknecht, U., and Heinrich, G. Non-isothermal crystallization behavior of PLA/LLDPE/nanoclay hybrid: Synergistic role of LLDPE and clay. Thermochemica Acta 565 (2013): 102-113.

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพผนวก ก

ค่าดัชนีการไหลที่ได้จากการจับเวลาและชั่งน้ำหนักเมื่อพลาสติกไหลออกจากเครื่อง Melt flow Indexer ของพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ

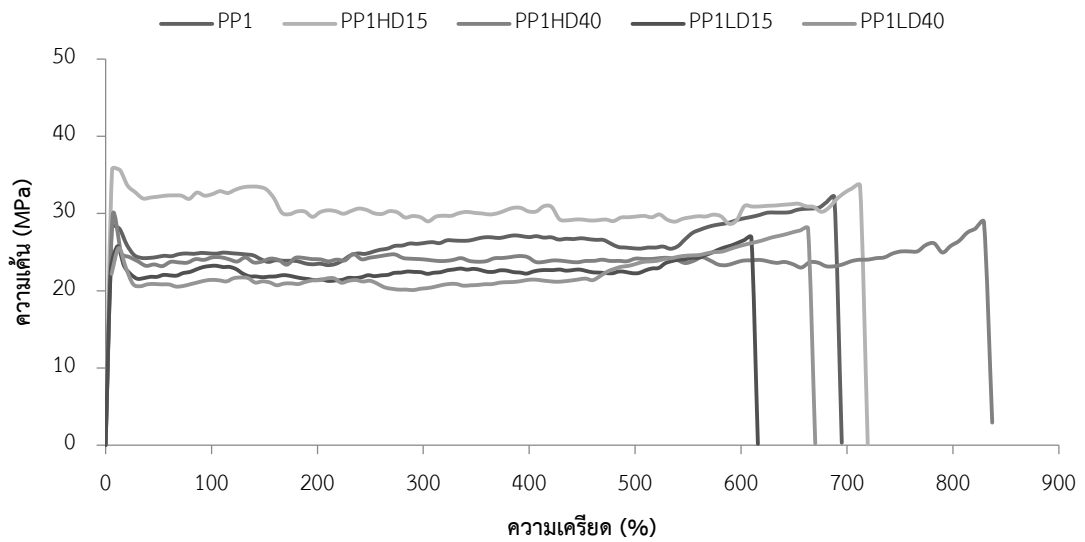
ตารางที่ 1 ค่าดัชนีการไหลที่ได้จากการจับเวลาและชั่งน้ำหนักเมื่อพลาสติกไหลออกจากเครื่อง Melt flow Indexer ของเม็ดเรซินพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน

ตัวอย่าง	ครั้งที่1			ครั้งที่2			ครั้งที่3		
	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10min)	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10min)	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10min)
PP1	375	1.398 3	2.2	376	1.3793	2.2	380	1.3858	2.2
PP2	275	1.419 6	3.1	189	1.3922	4.4	242	1.402	3.5
HDPE	112	1.438	7.7	110	1.4198	7.7	113	1.4373	7.6
LDPE	195	1.428 1	4.4	193	1.4252	4.4	195	1.4244	4.4
LLDPE	38	1.396 2	22.0	37	1.36082	22.1	38	1.4013	22.1
ตัวอย่าง	ครั้งที่4			ครั้งที่5					
	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10min)	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10min)			
PP1	330	1.379	2.5	221	1.4091	3.8			
PP2	226	1.4077	3.7	238	1.4065	3.5			
HDPE	114	1.4266	7.5	113	1.4289	7.6			
LDPE	194	1.4332	4.4	194	1.432	4.4			
LLDPE	38	1.4021	22.1	39	1.4254	21.9			

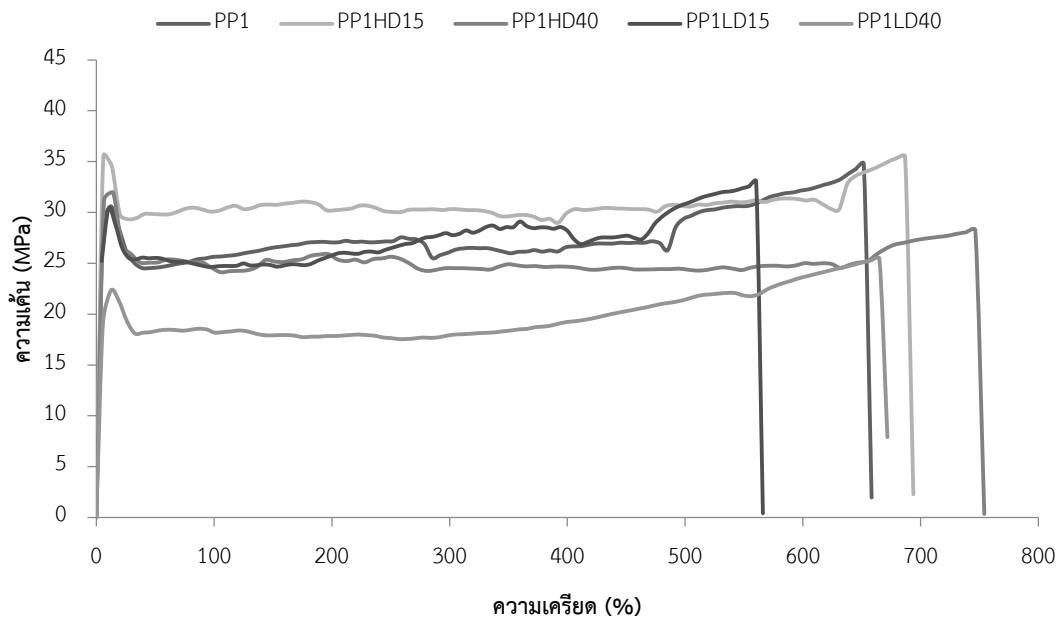
ภาพผนวก ข

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของฟิล์มเป่า PP1/PE ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นต่าง ๆ

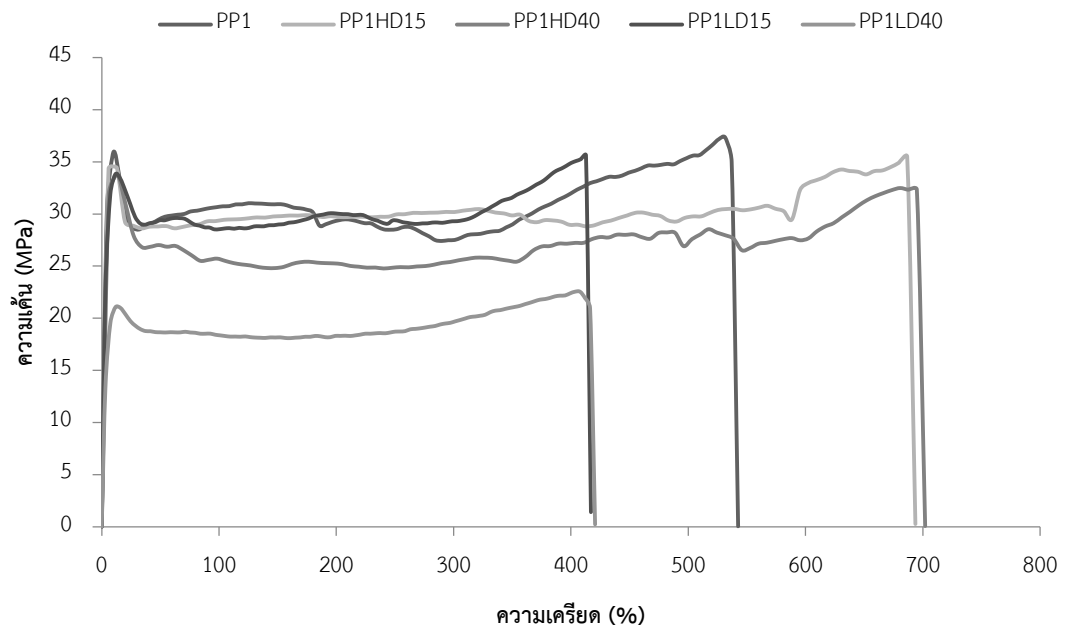
ก)



ข)



ค)

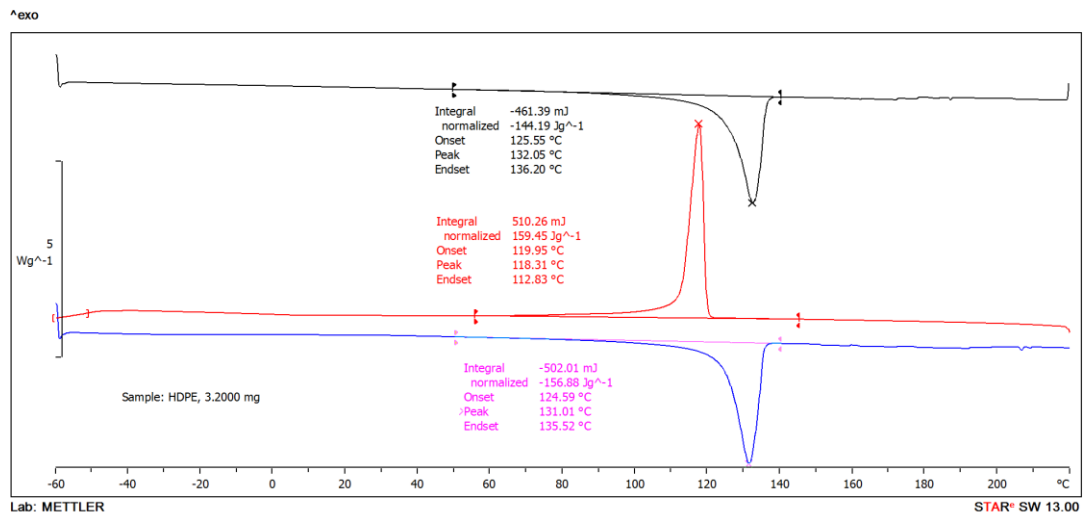


รูปที่ 1 กราฟความเค้น-ความเครียด ของฟิล์มเป่า PP1/PE ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

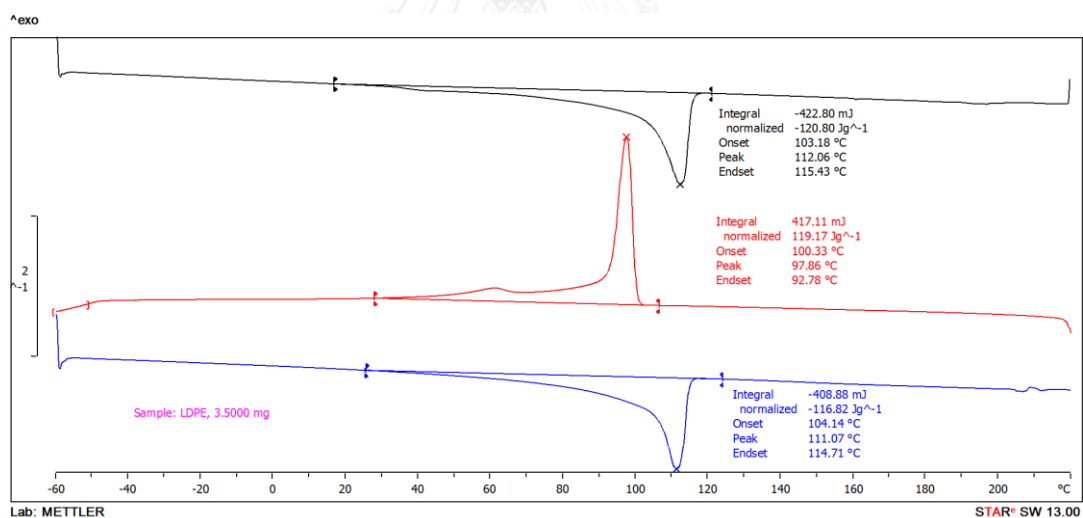
ภาคผนวก ค

เทอร์โมแกรมของ PE และ พิล์มเป่า PP และ PP/PE ที่สัดส่วน 85/15 และ 60/40 โดยให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

ก)

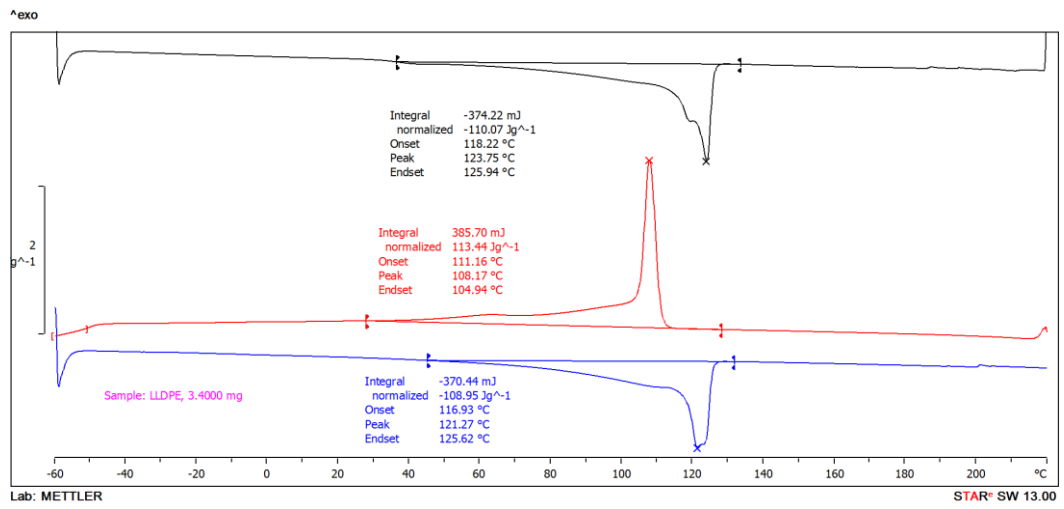


ข)

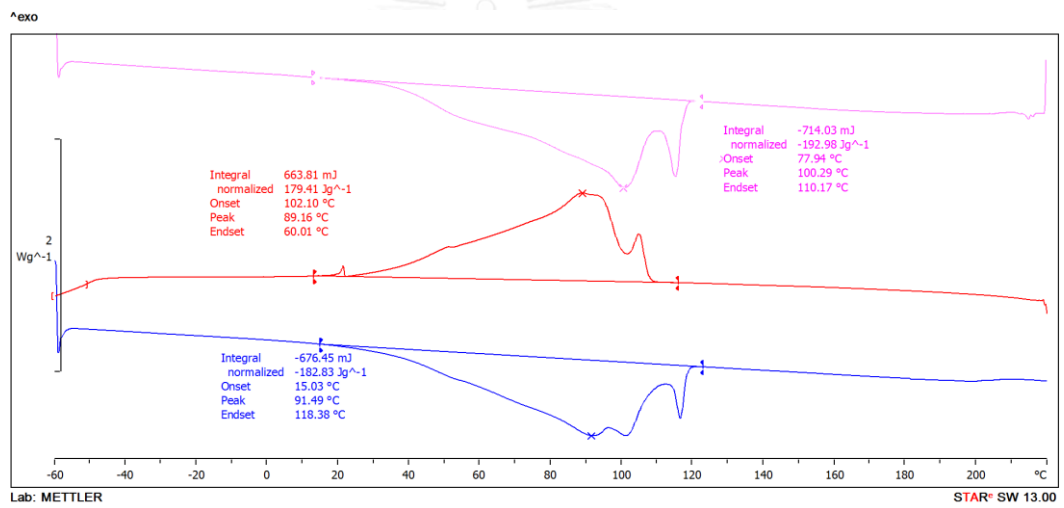


รูปที่ 2 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดเรซิน HDPE (ก) และ LDPE (ข) ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2

ก)

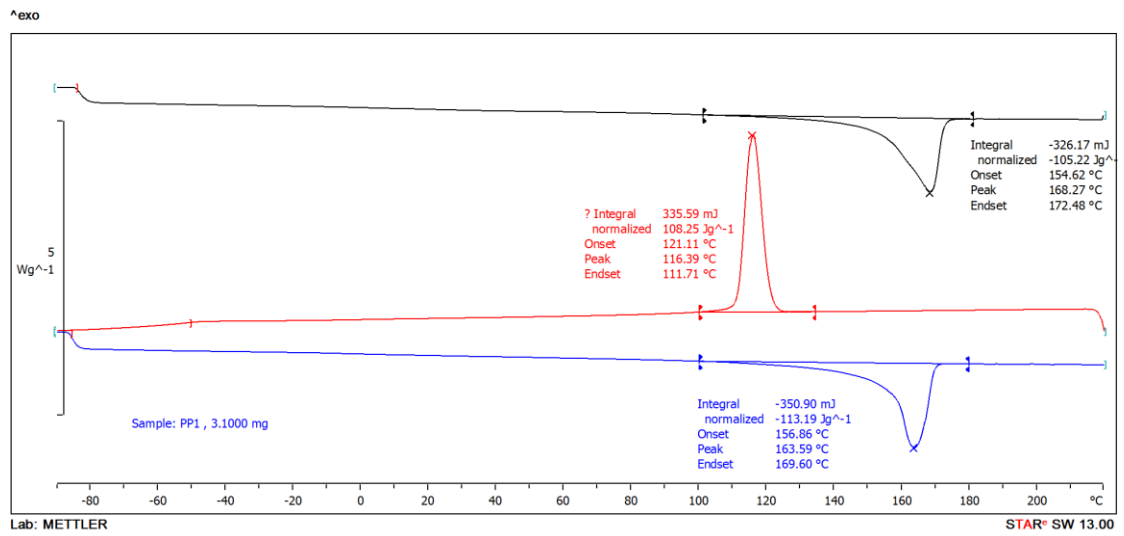


ข)

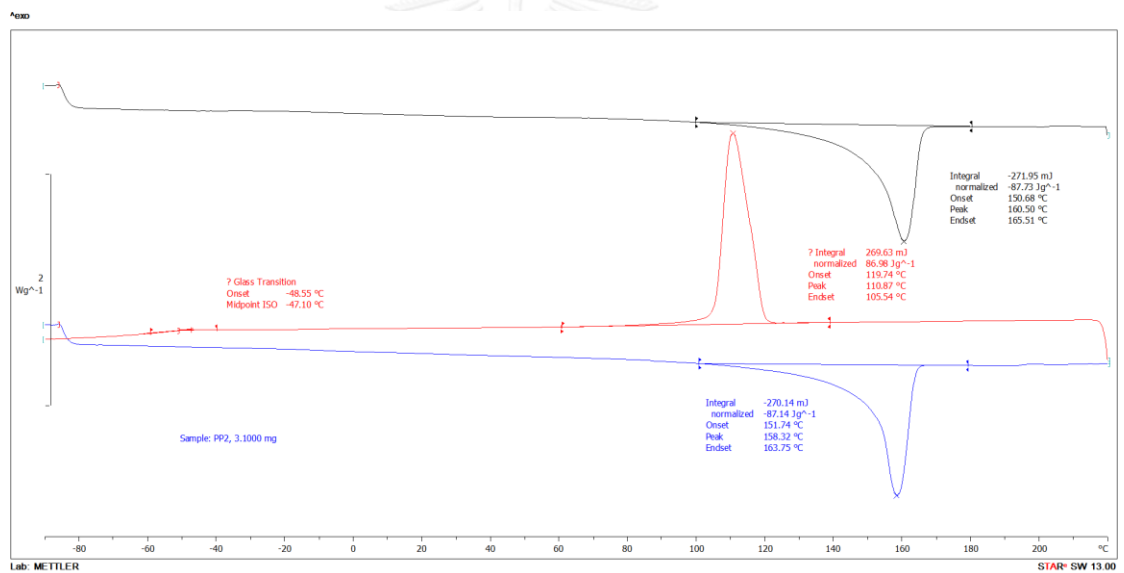


รูปที่ 3 DSC เทอร์โมแกรมของเม็ดเรซิน LLDPE (ก) และ wa x(x) ให้ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2

ก)

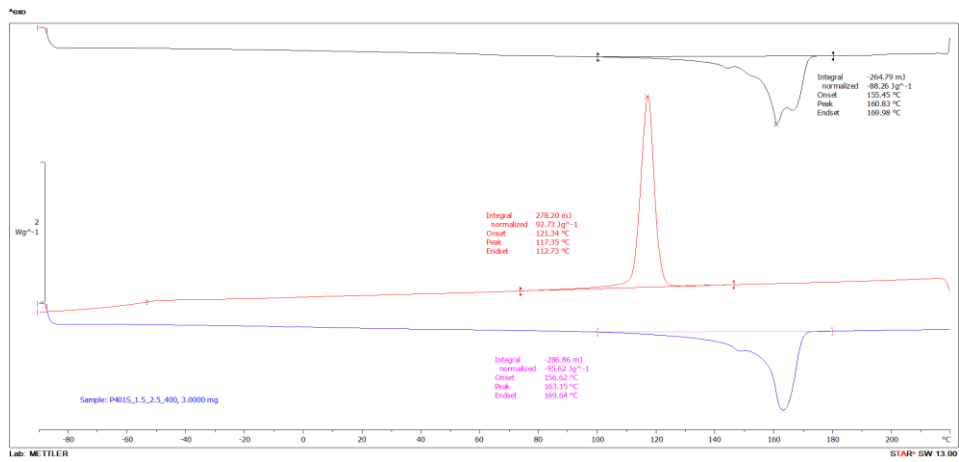


ข)

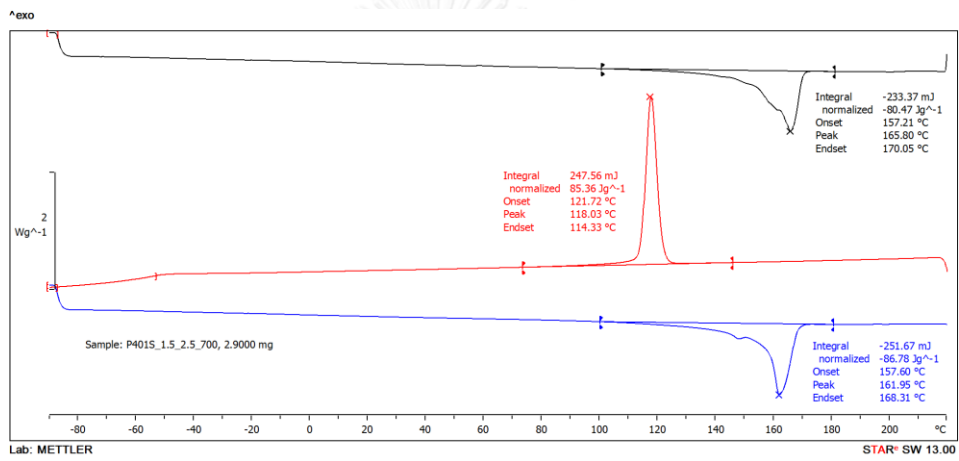


รูปที่ 4 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1 (ก) และ PP (2) ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และ ความร้อนครั้งที่ 2

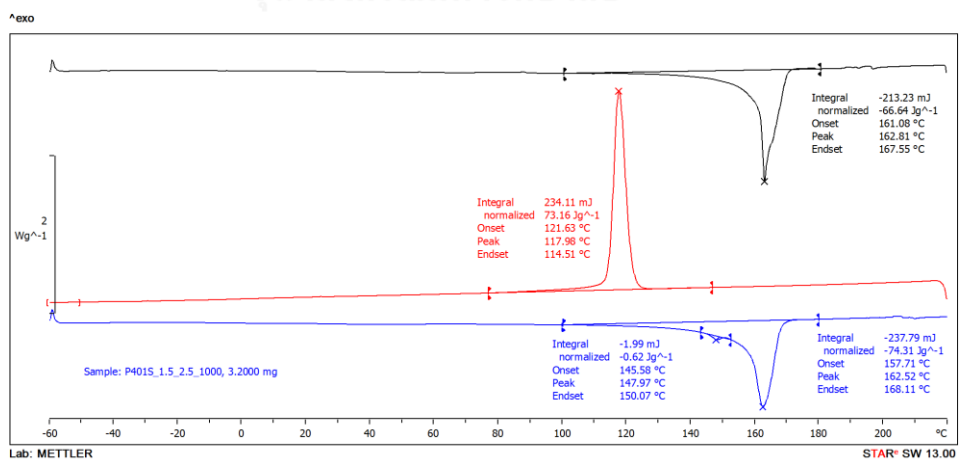
ก)



ข)

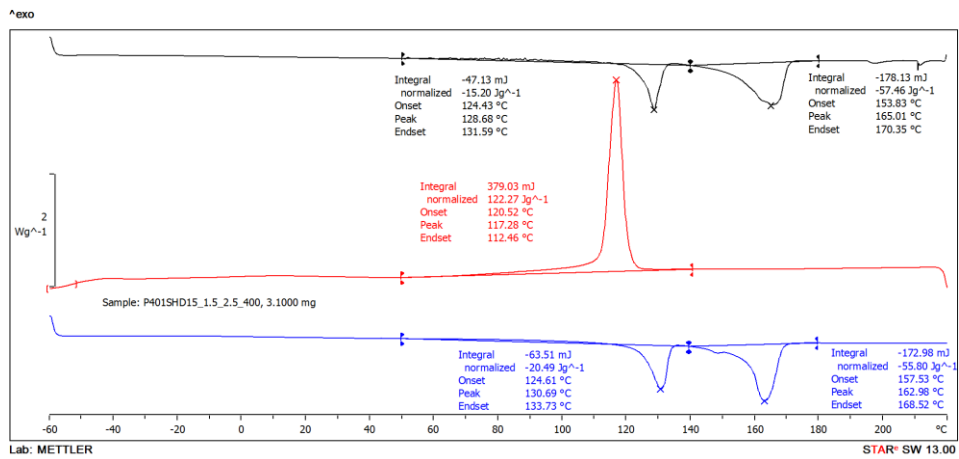


ค)

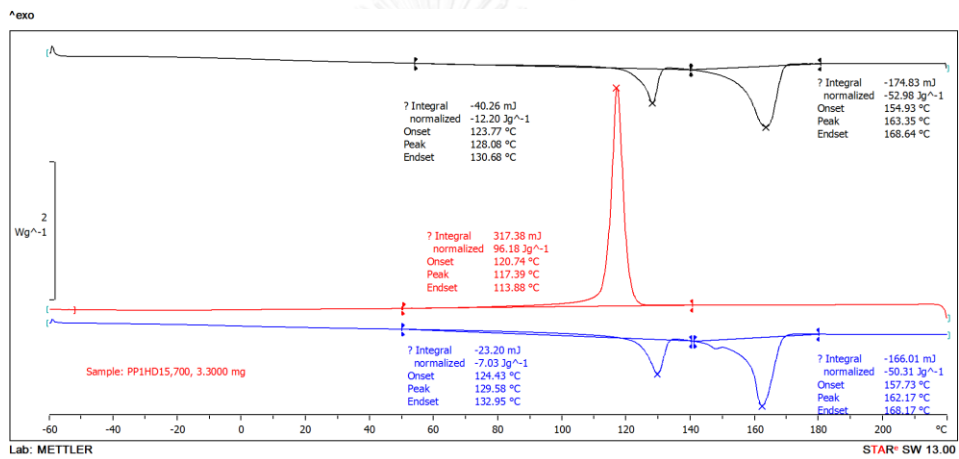


รูปที่ 5 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .
ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

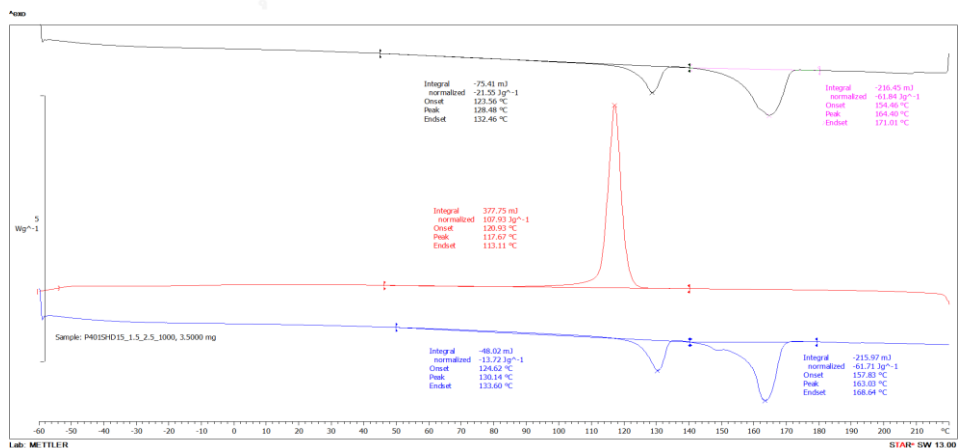
ก)



ข)

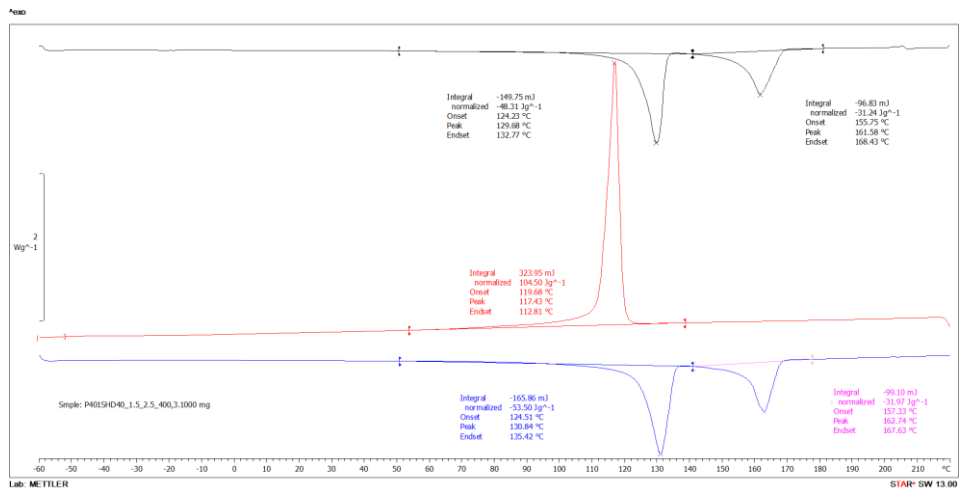


ค)

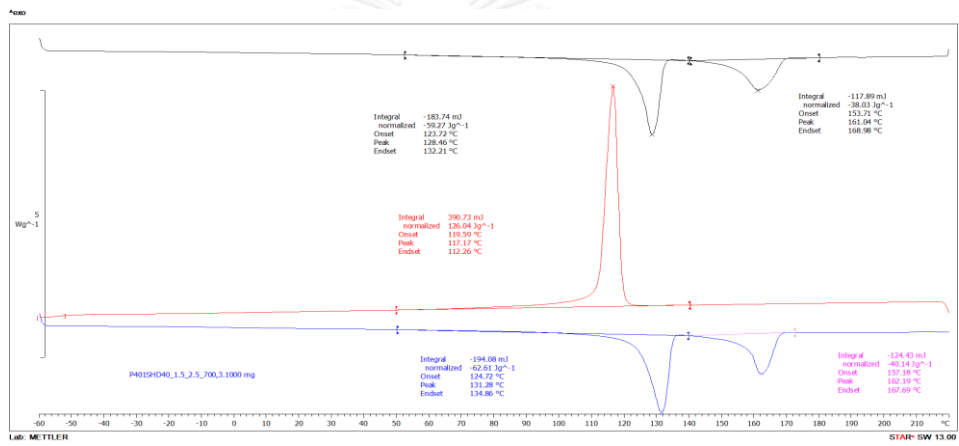


รูปที่ 6 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1HD15 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

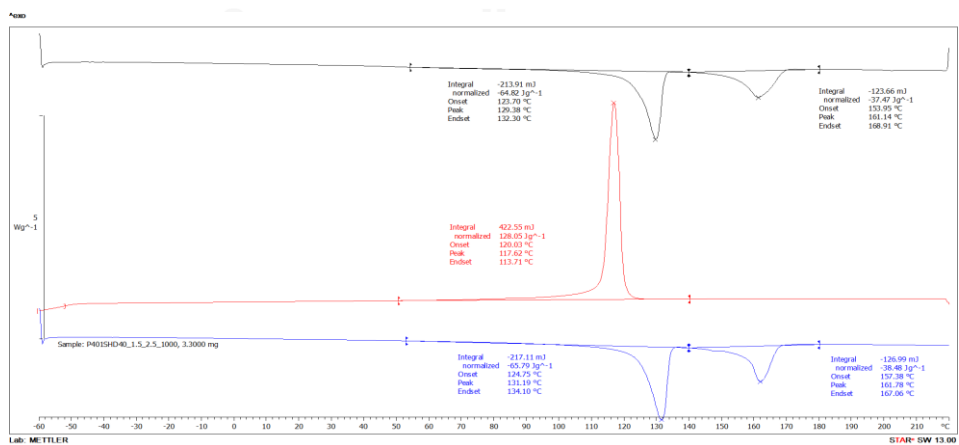
ก)



ข)

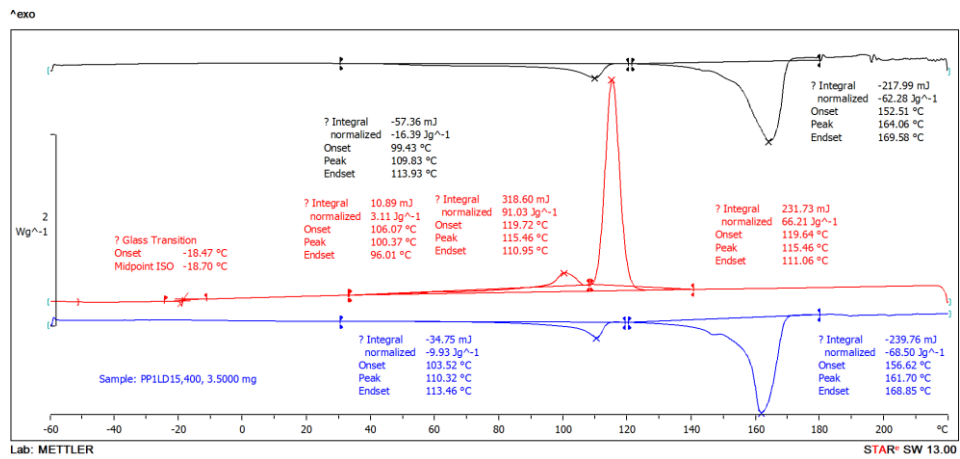


ค)

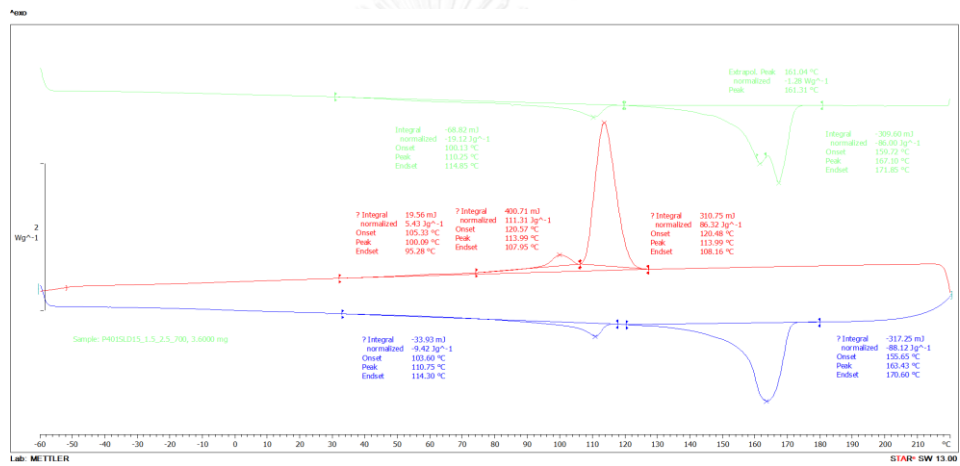


รูปที่ 7 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1HD40 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

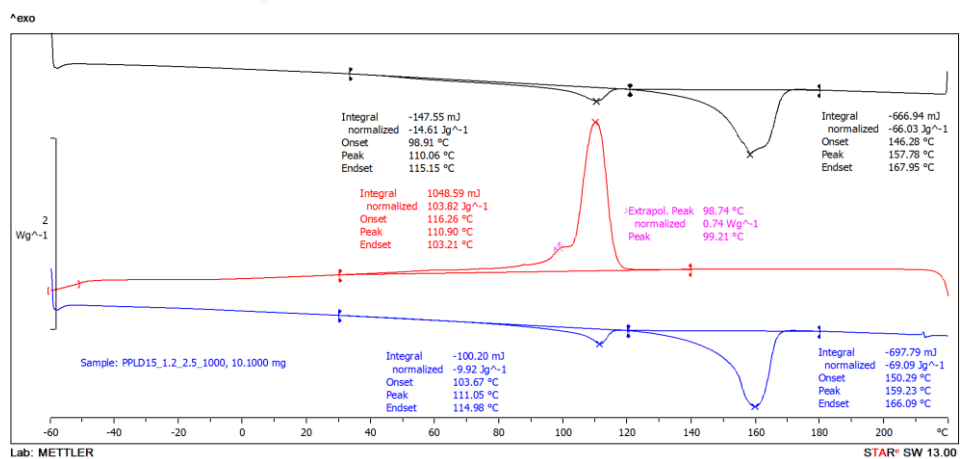
ก)



ข)

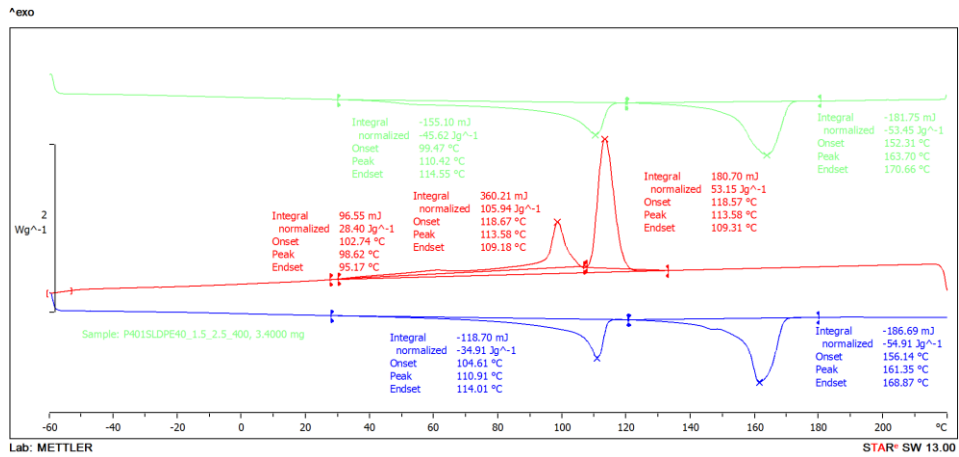


ค)

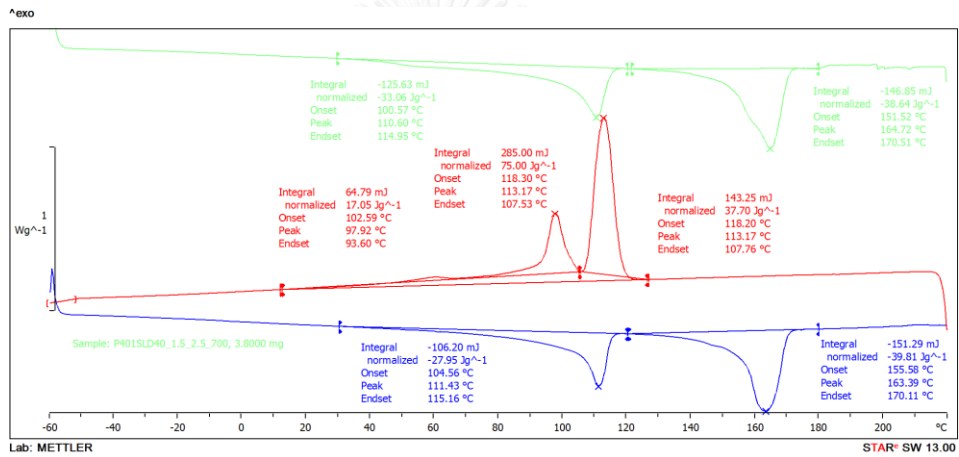


รูปที่ 8 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1LD1 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

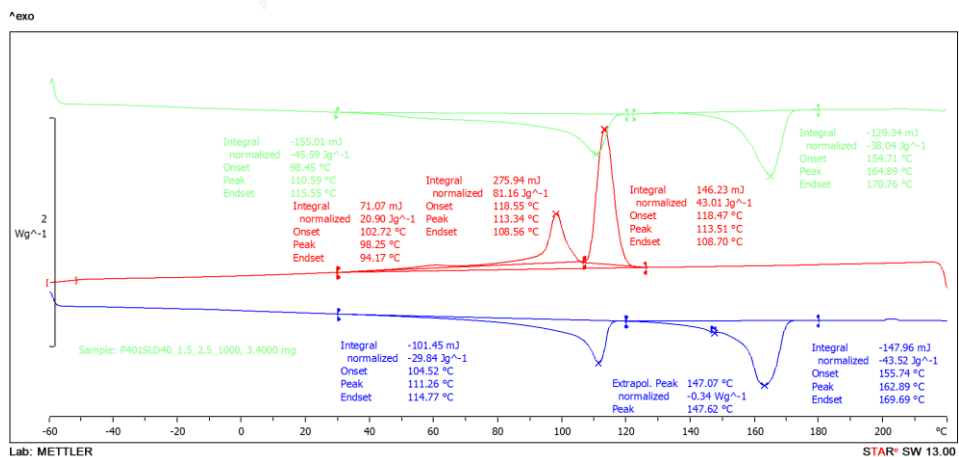
ก)



ข)

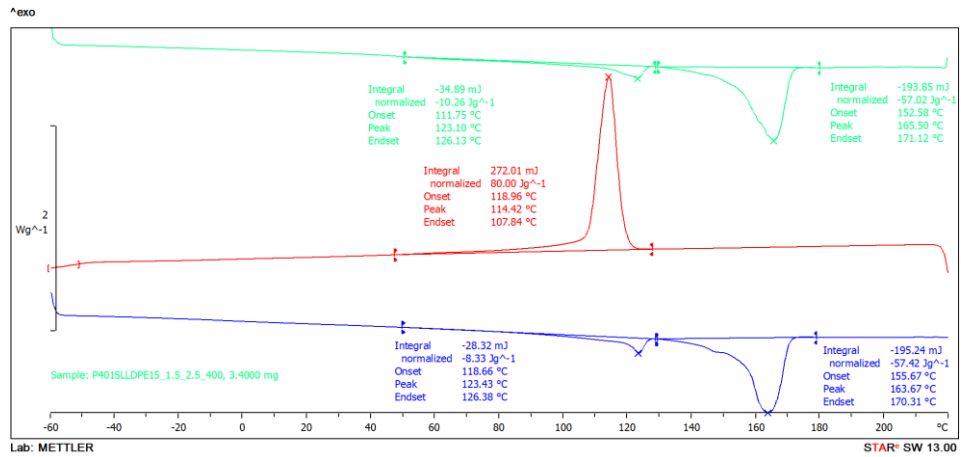


ค)

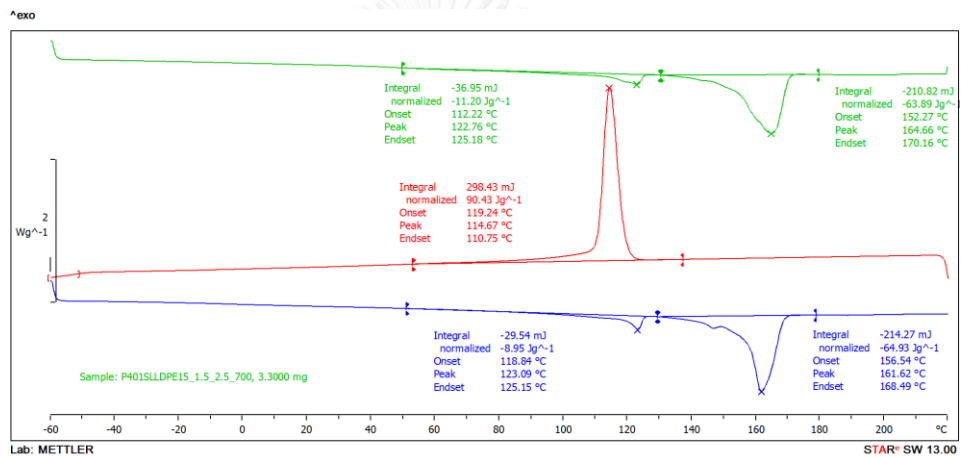


รูปที่ 9 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1LD40 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

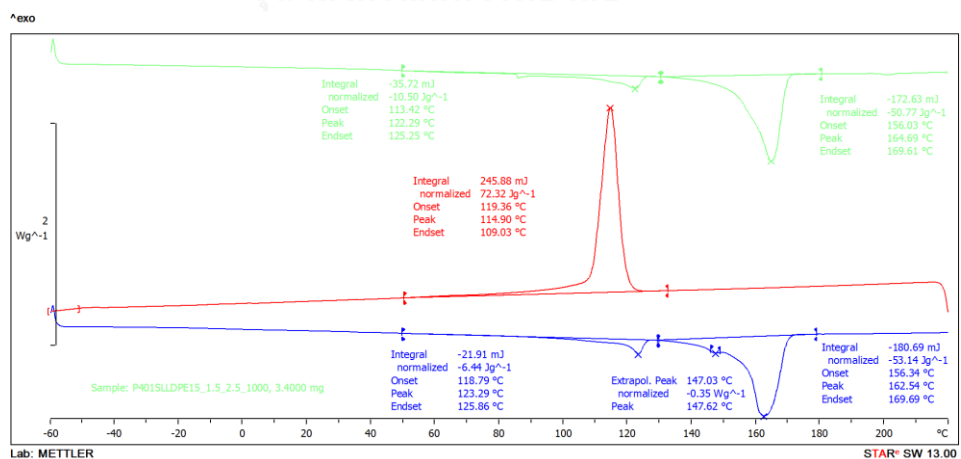
ก)



ข)

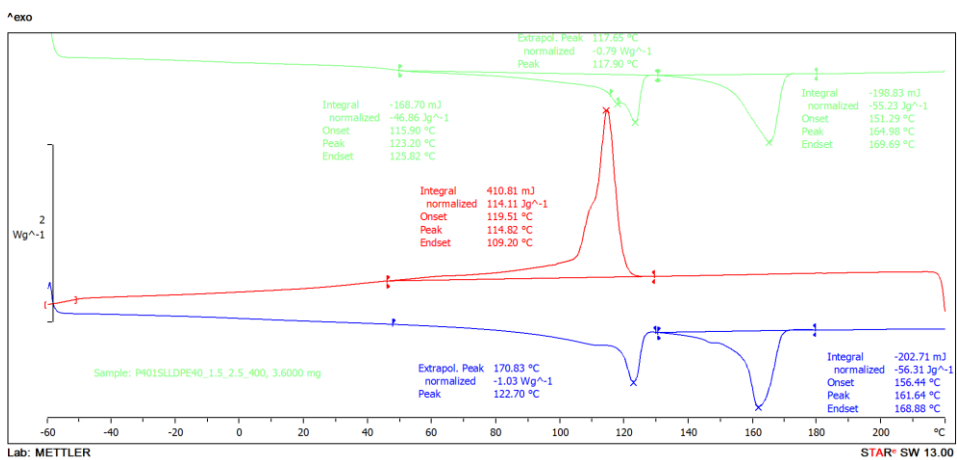


ค)

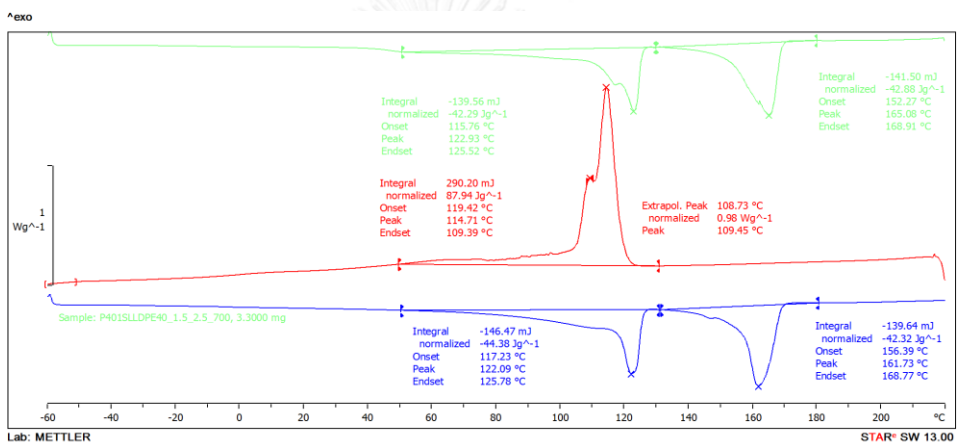


รูปที่ 10 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1LL15 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

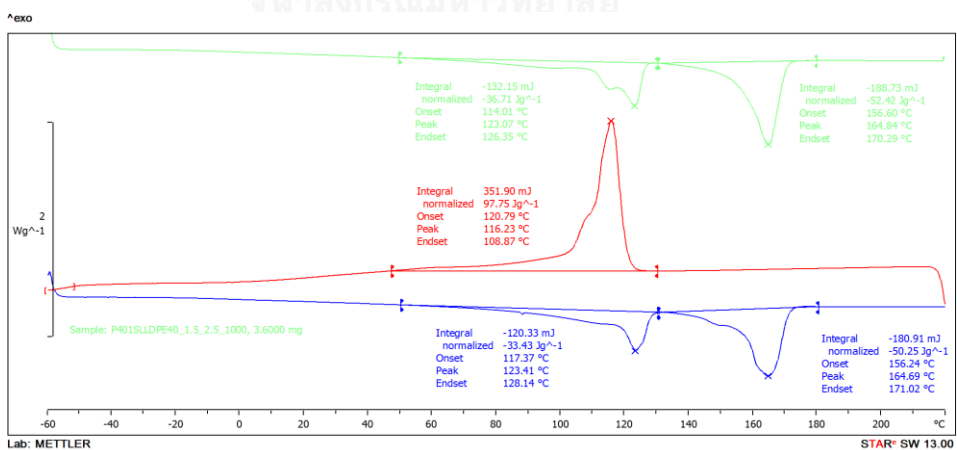
ก)



ข)

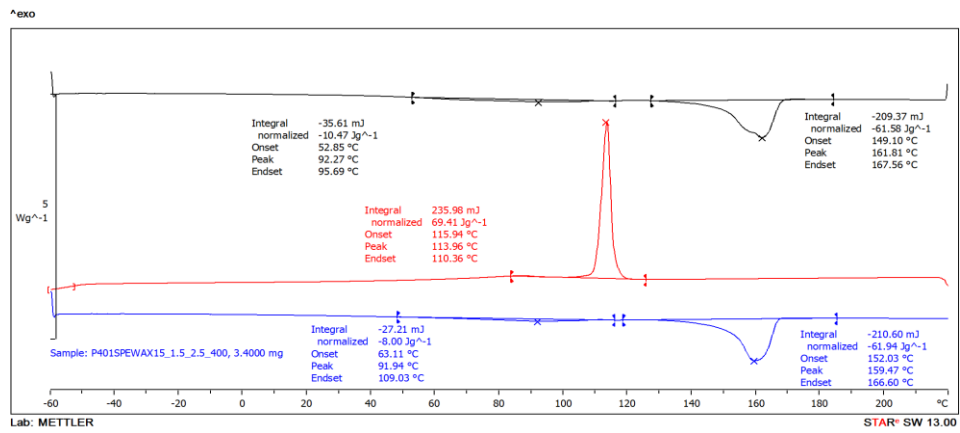


ค)

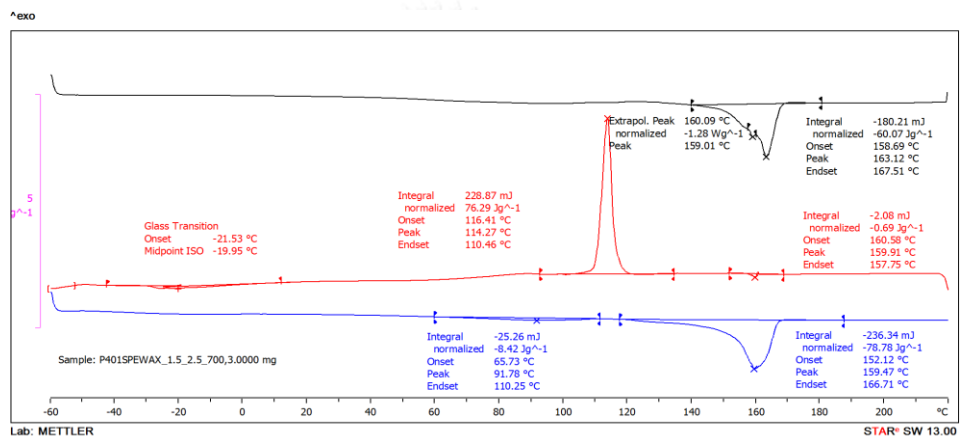


รูปที่ 11 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1LL40 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

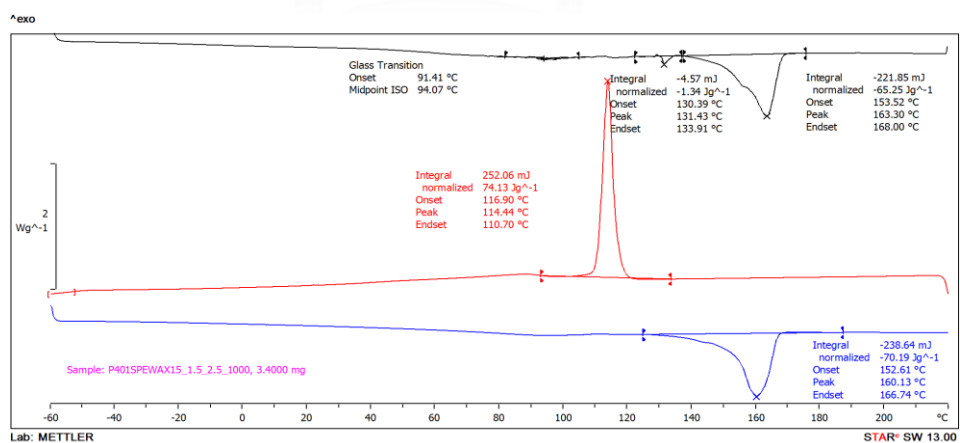
ก)



ข)

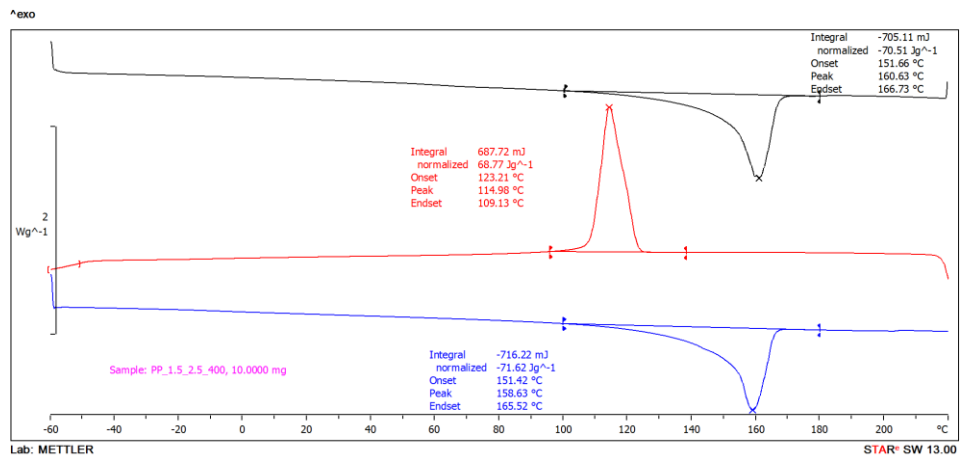


ค)

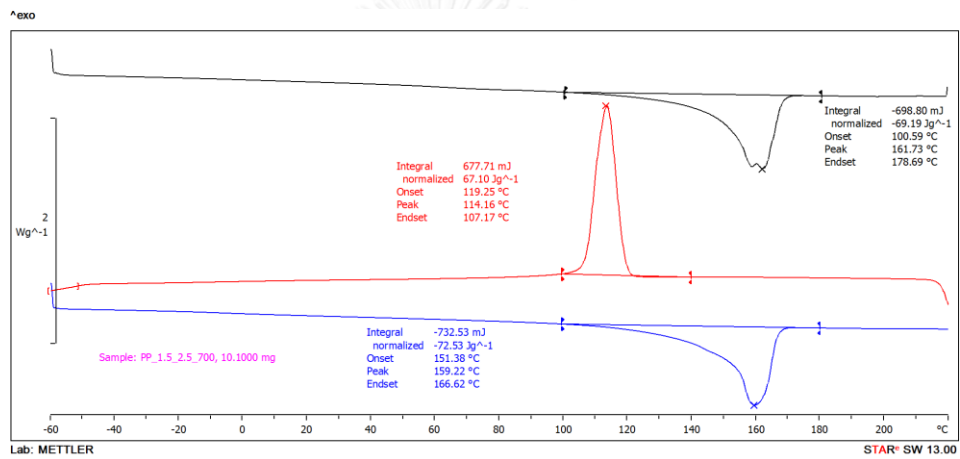


รูปที่ 12 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP1wax15 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อน ครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

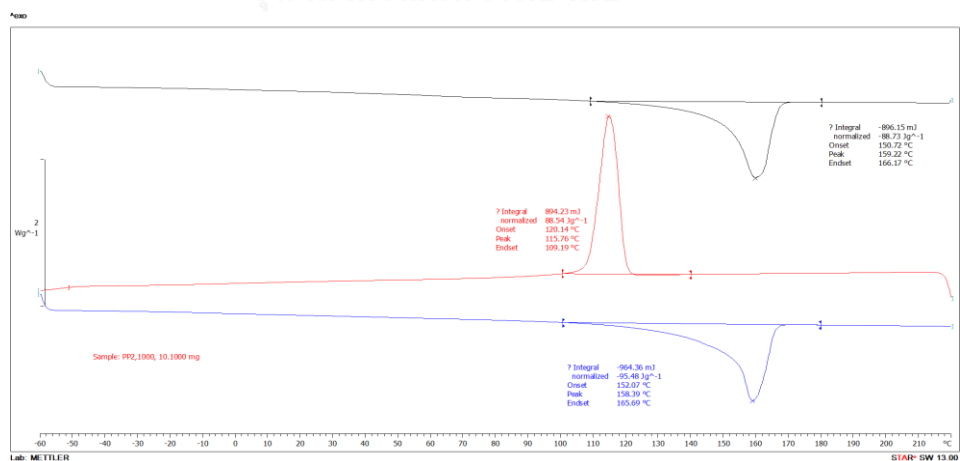
ก)



ข)

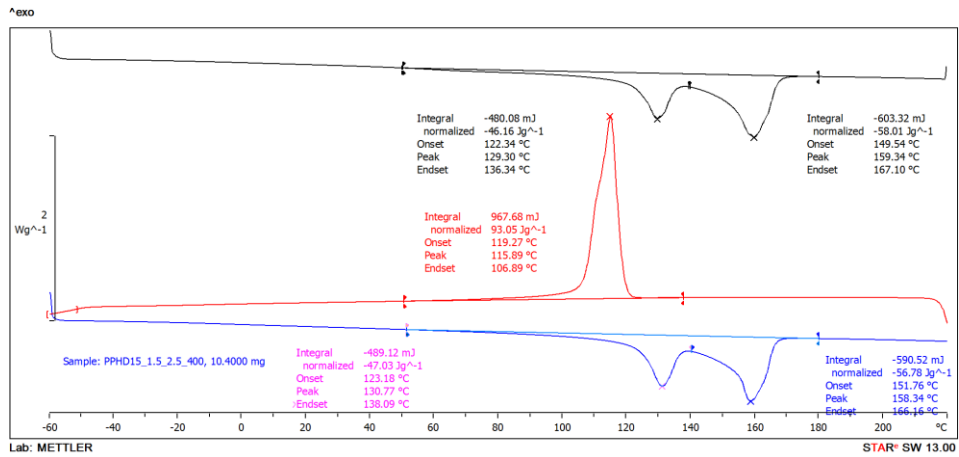


ค)

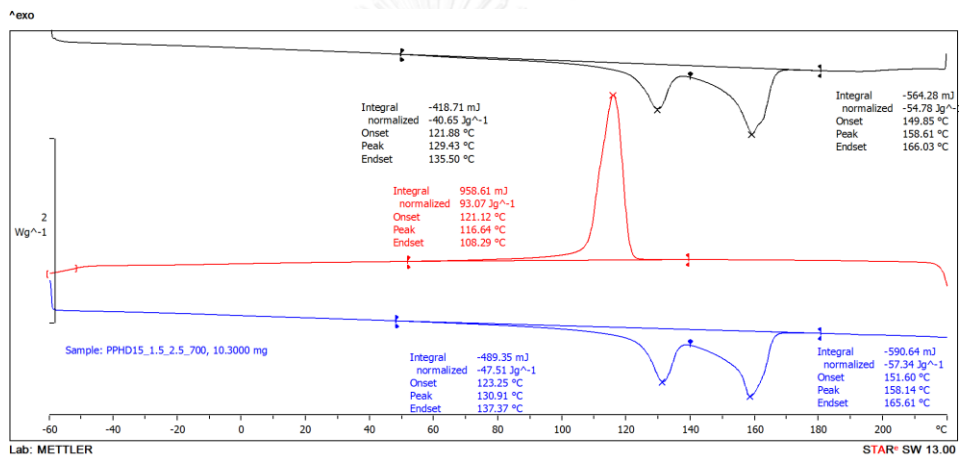


รูปที่ 13 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

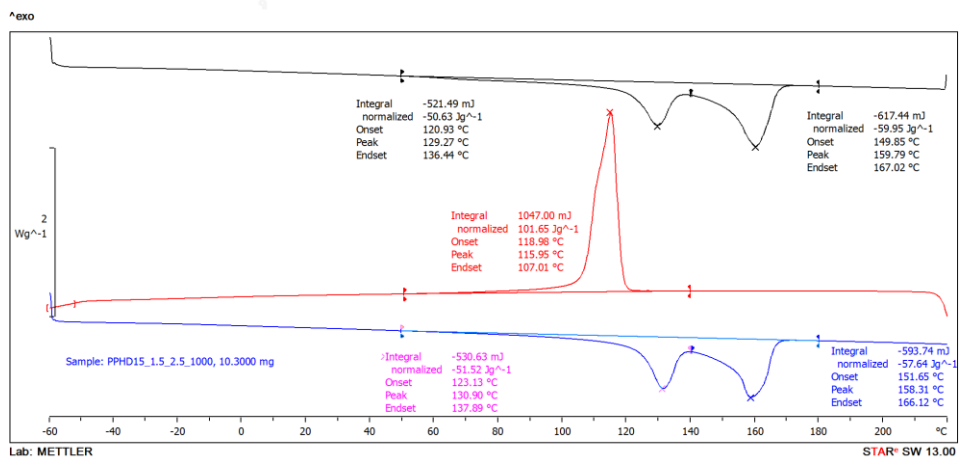
ก)



ข)

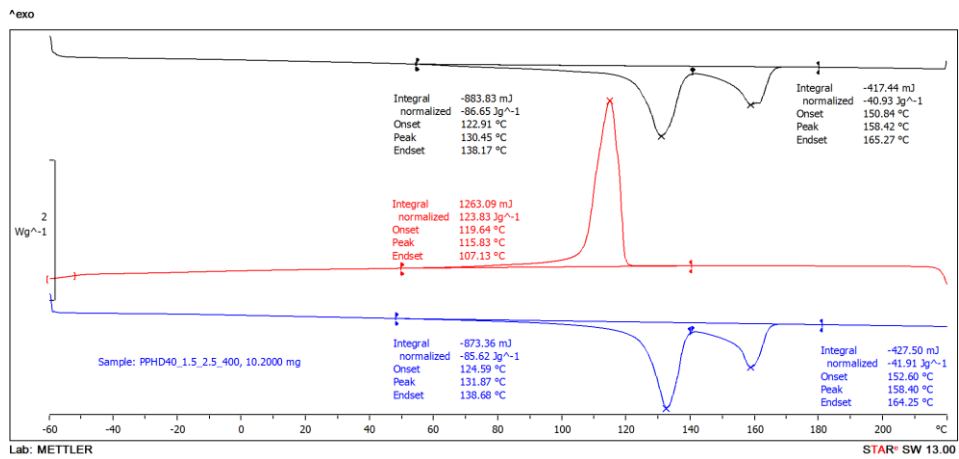


ค)

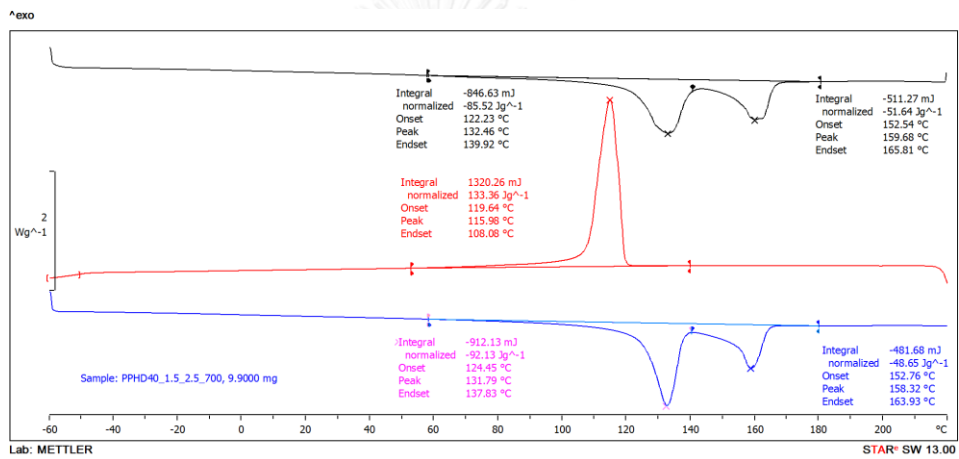


รูปที่ 14 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2HD15 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อน ครั้งที่ 2 .ที่ความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

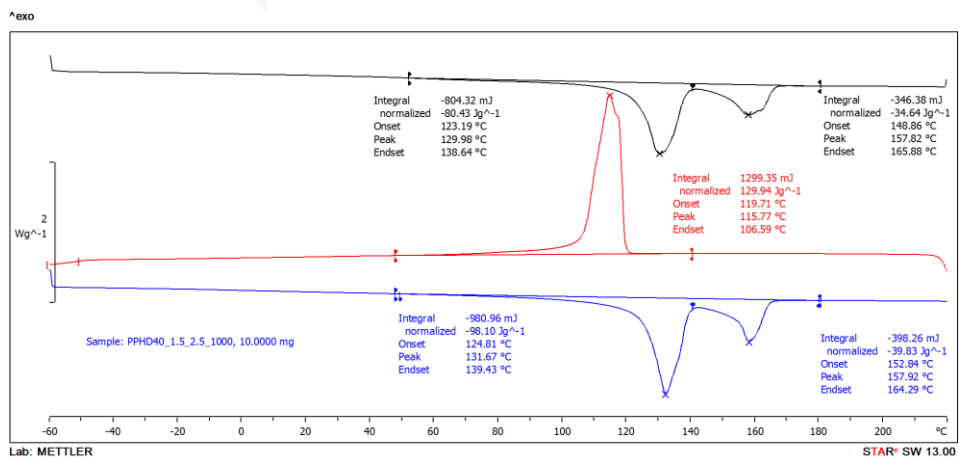
ก)



ข)

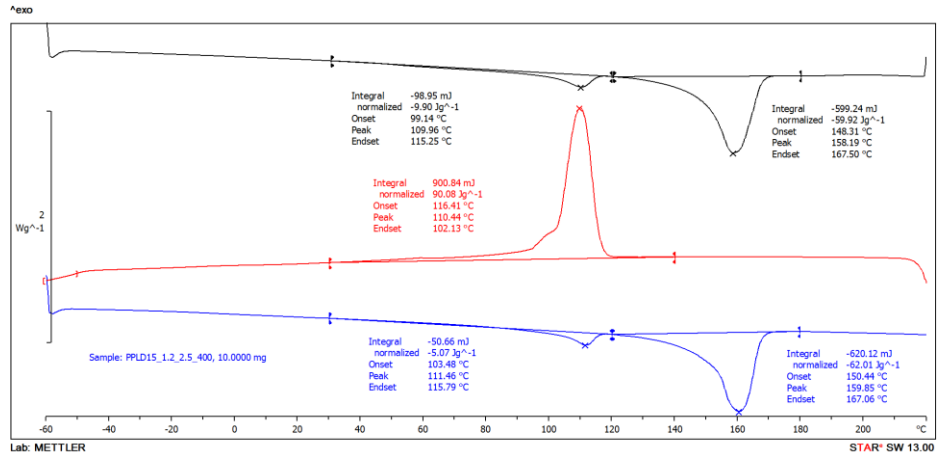


ค)

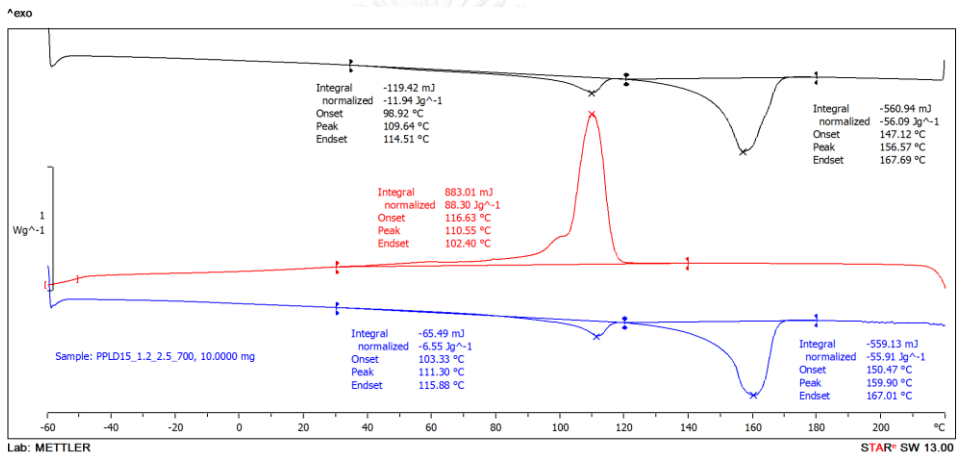


รูปที่ 15 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2HD40 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อน ครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

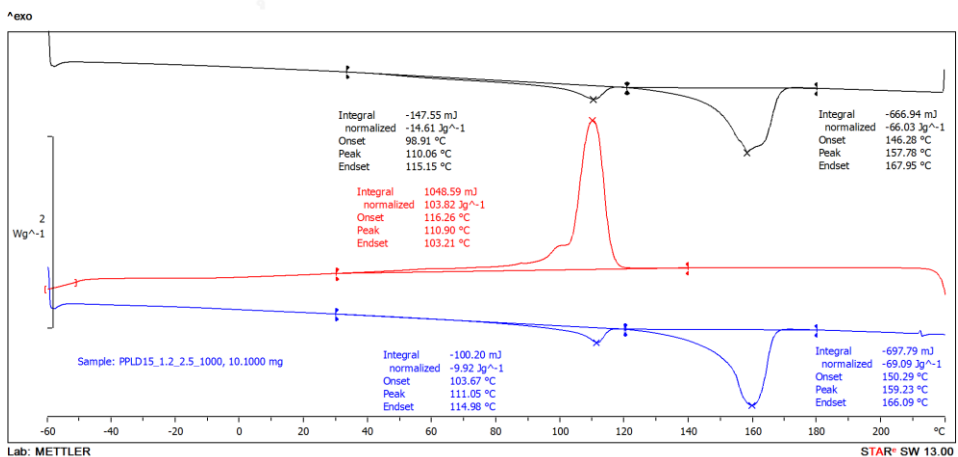
ก)



ข)

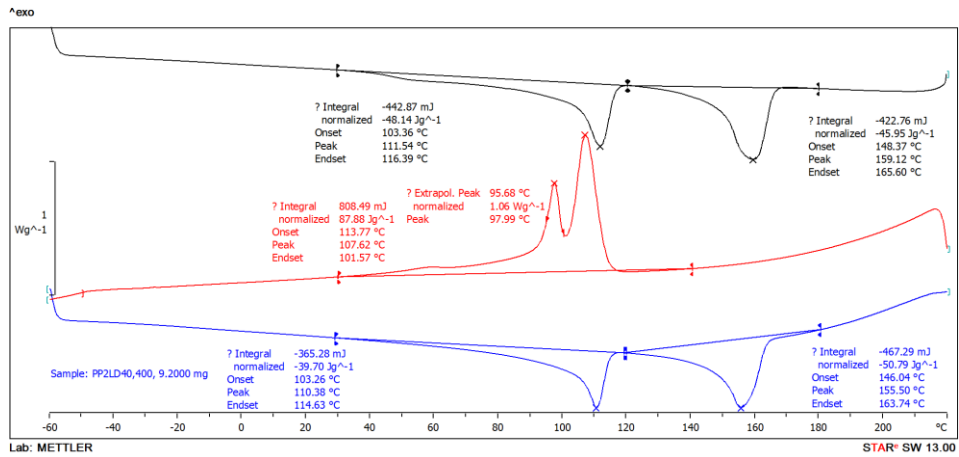


ค)

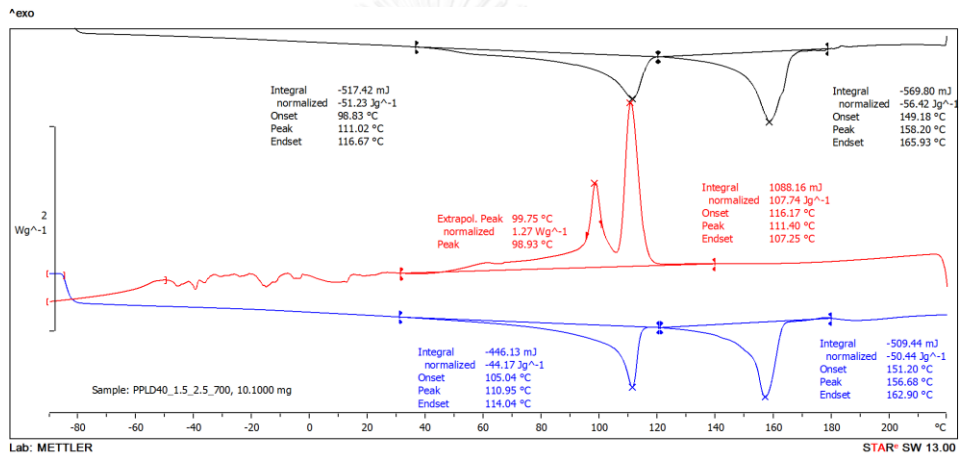


รูปที่ 16 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2LD15 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

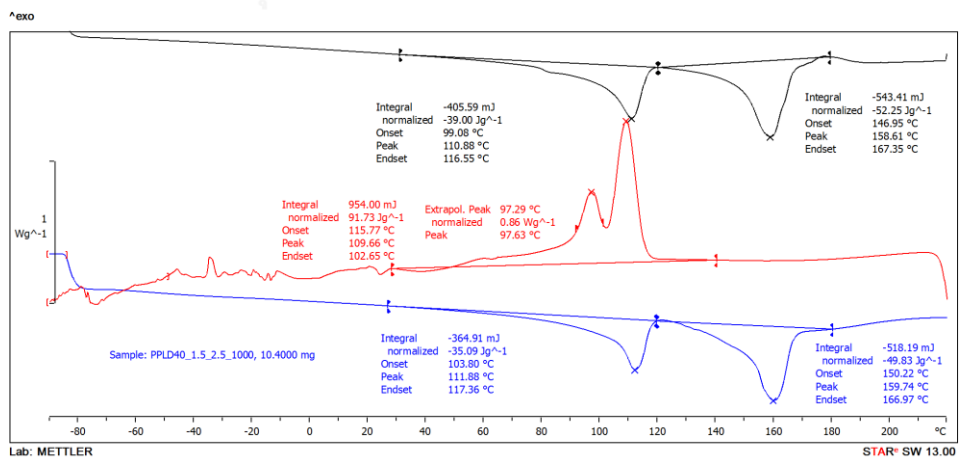
ก)



ข)

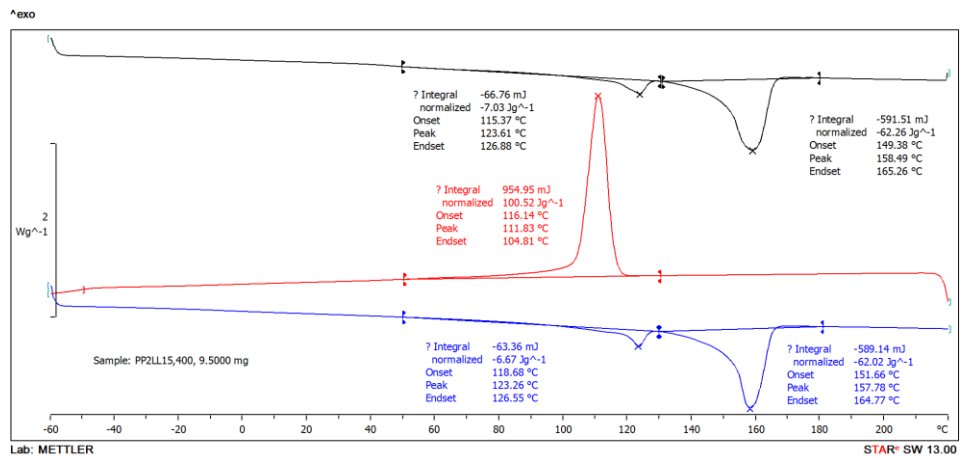


ค)

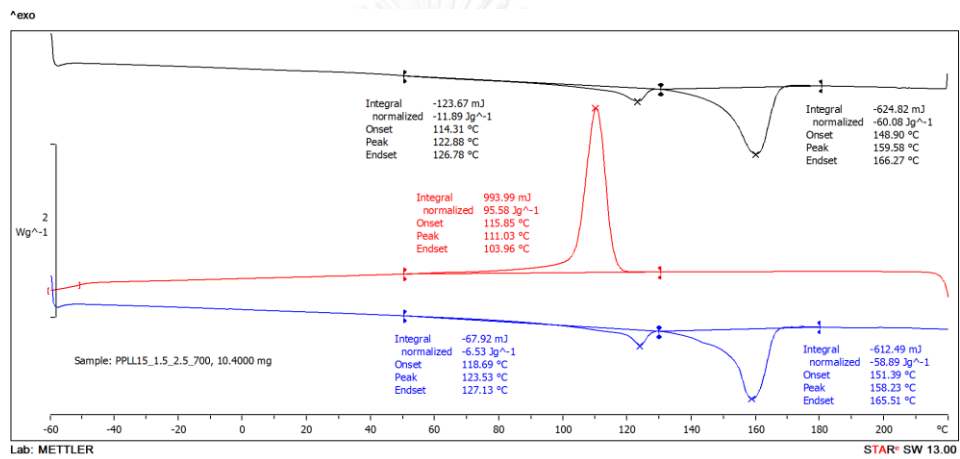


รูปที่ 17 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2LD40 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

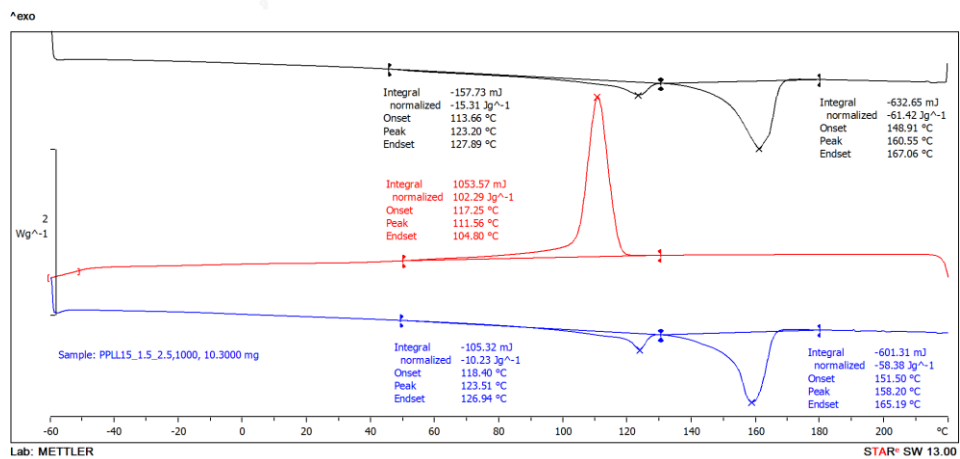
ก)



ข)

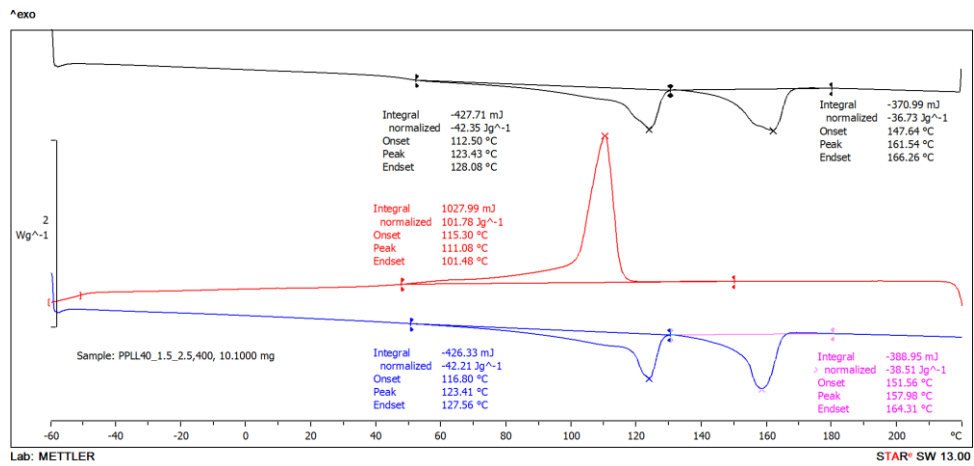


ค)

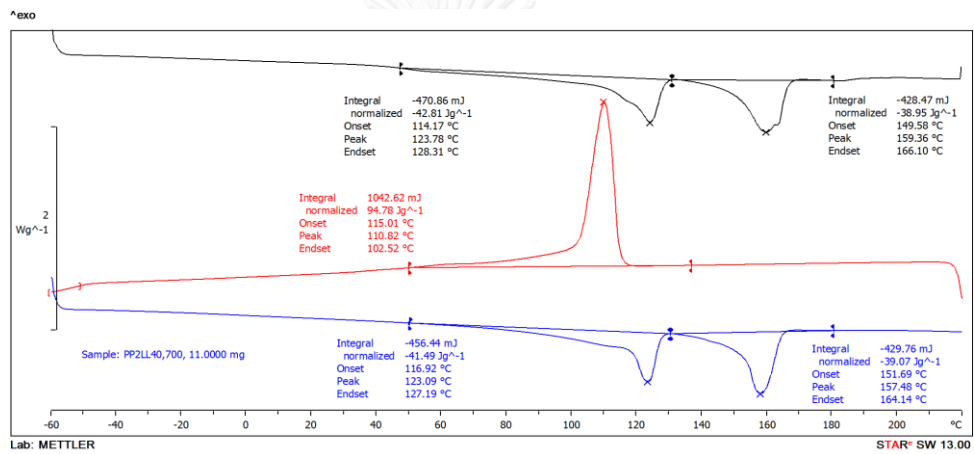


รูปที่ 18 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2LL15 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

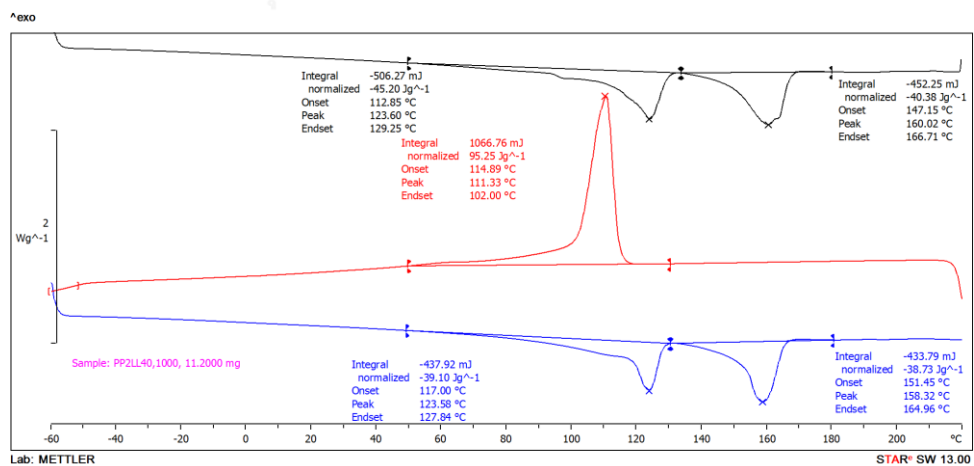
ก)



ข)

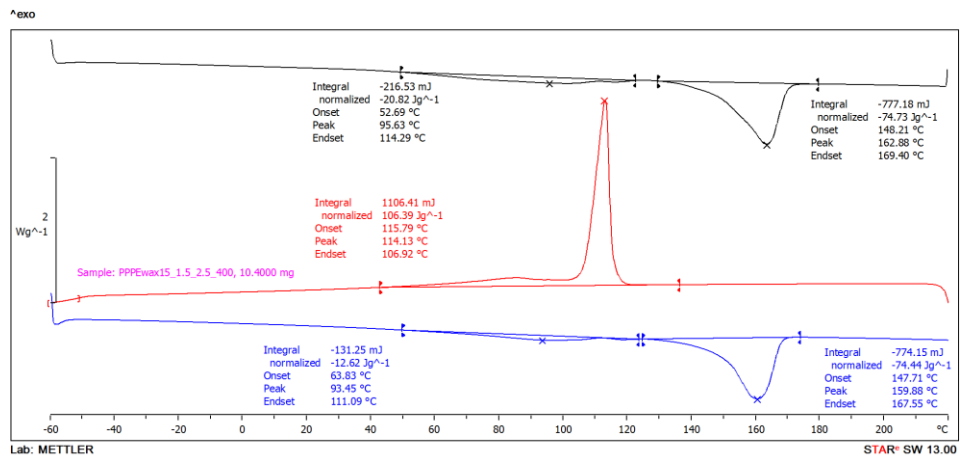


ค)

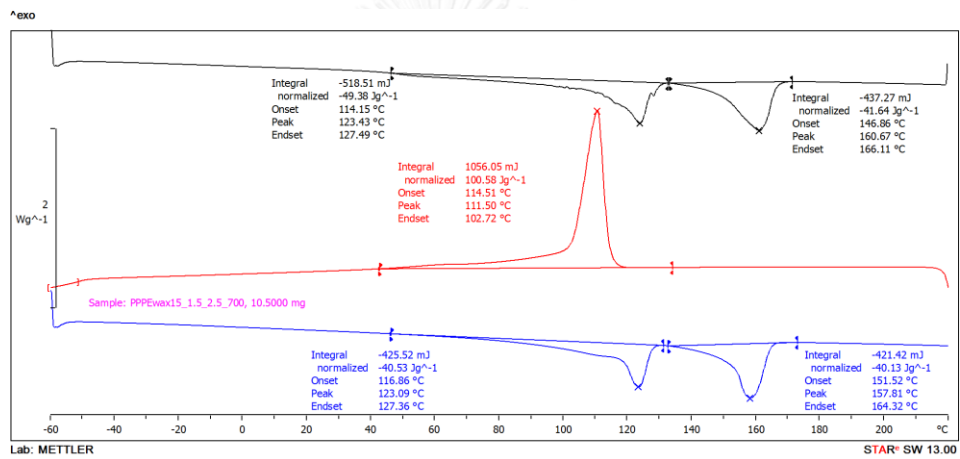


รูปที่ 19 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2LL40 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

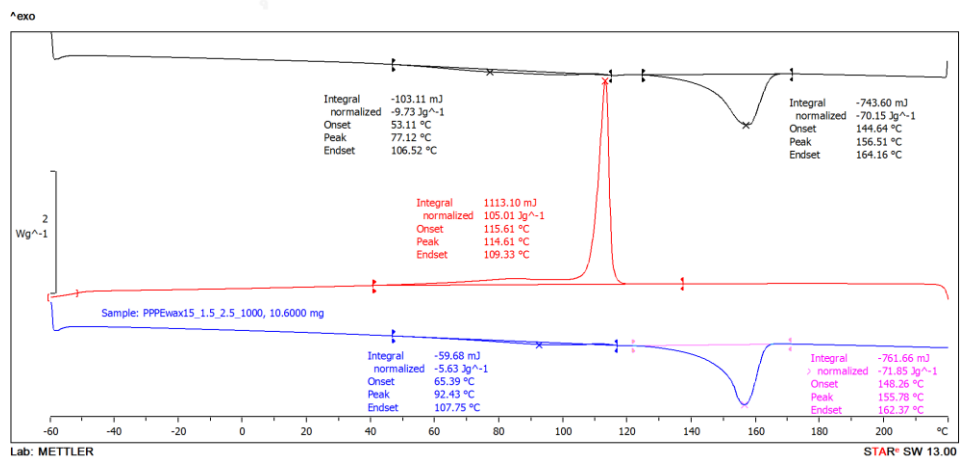
ก)



ข)



ค)



รูปที่ 20 DSC เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP2wax15 ให้ความร้อนครั้งที่ 1 ความเย็น และความร้อนครั้งที่ 2 .ที่ระดับความเร็วของมอเตอร์ควบคุมลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปวีณา อนิลบล เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤษภาคม 2535 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชา วิทยาการ และวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปี 2557 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในภาคปลาย ปีการศึกษา 2559

ทุนการศึกษา

- ได้รับทุนวิทยบัณฑิตเป็นระยะเวลา 2 ภาคการศึกษา

ประสบการณ์การทำงาน

- ปี พ.ศ. 2555 ฝึกงานที่บริษัท วินิไทย จำกัด มหาชน

ผลงานที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่

- Anilabol, P. , Wichitamornloet, A. , Opaprasit, P., and Opaprasit, M. Effects of polyethylene types on properties of polypropylene/polyethylene blends. In The Pure and Applied Chemistry International Conference 2017 (PACCON 2017) pp. 831-836