

ฟิล์มเปาพอลิโพรพิลีนชนิดรูปทรงขนาดเล็ก



นางสาวกมลวรรณ สุนทรศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MICROPOROUS POLYPROPYLENE BLOWN FILM

Miss Kamonwan Soonthornsart



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนชนิดรูพรุนขนาดเล็ก |
| โดย | นางสาวกมลวรรณ สุนทรศาสตร์ |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มัณฑนา โอภาประกาศิต |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | นาย อาทร วิจิตรอมรเลิศ |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริฉันทน์ เจริญศิริเลิศ)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มัณฑนา โอภาประกาศิต)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(นาย อาทร วิจิตรอมรเลิศ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรเพ็ญ อาทกรกิจวัฒน์)

กมลวรรณ สุนทรศาสตร์ : फिल्मเป่าพอลิโพรพิลีนชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (MICROPOROUS POLYPROPYLENE BLOWN FILM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. มณฑนา โอภา ประกาสิทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: นาย อาทร วิจิตรอมรเลิศ, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มที่มีรูพรุนจากพอลิโพรพิลีน (พีพี) โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมและระดับการดัดยัดที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า พีพี คอมพาวนด์ที่ใช้ขึ้นรูปประกอบด้วยสารตัวเติมชนิดมิเนอรัลลอยล์ และ/หรือแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเรียกว่า PO และ POC/หรือ PC ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แคลเซียมซูเบอร์เรตที่เตรียมขึ้นเองเพื่อใช้เป็นสารก่อผลึกปีทาให้กับฟิล์มเป่าพีพี ผลการศึกษาแสดงว่าความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PO และ PC มีความสัมพันธ์กับระดับการดัดยัด โดยเมื่อระดับการดัดยัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ฟิล์มเป่า PO และ PC มีความเป็นรูพรุนมากขึ้น ฟิล์มที่มีปริมาณสารตัวเติมสูงมีแนวโน้มที่จะมีความเป็นรูพรุนสูง แต่สมบัติเชิงกลของฟิล์มจะลดลง เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้งสอง พบว่ามีเนอรัลลอยล์มีศักยภาพในการส่งเสริมให้เกิดรูพรุนสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต โดยฟิล์มเป่า PO ซึ่งมีปริมาณมิเนอรัลลอยล์ระหว่าง 30 – 40% สามารถดูดซับน้ำมันได้ 13 – 41% ในขณะที่ฟิล์ม PC ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตระหว่าง 10 – 30% สามารถดูดซับน้ำมันได้สูงสุดเพียง 8% เท่านั้น อย่างไรก็ตามฟิล์ม PC มีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์ม PO อย่างมาก ในขณะที่มีค่าความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ไม่แตกต่างกันนัก จากการทดลองเตรียมฟิล์มชนิด $PO_{30}C_{20}$ ซึ่งประกอบด้วยมิเนอรัลลอยล์ (30%) และแคลเซียมคาร์บอเนต (20%) พบว่ามีความเป็นรูพรุนใกล้เคียงกับฟิล์ม PO_{40} แต่มีมอดุลัสที่สูงกว่า ผลจากรูป SEM แสดงว่ารูพรุนในฟิล์ม PO มีขนาดเล็กกว่าและกระจายทั่วแผ่นฟิล์มดีกว่ารูพรุนที่พบในฟิล์ม PC และ POC นอกจากนี้ ยังพบว่าฟิล์มเป่าซึ่งเตรียมจากพอลิโพรพิลีนที่คอมพาวนด์ด้วยแคลเซียมซูเบอร์เรตในปริมาณ 0.5 - 1% นั้น ไม่สามารถเหนี่ยวนำการเกิดผลึกชนิดปีทาได้ โดยมีเพียงผลึกชนิดแอลฟาเท่านั้น

| | | | |
|----------|---------------------------------|----------------------------|-------|
| ภาควิชา | วัสดุศาสตร์ | ลายมือชื่อนิสิต | |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และ | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก | |
| | เทคโนโลยีสิ่งทอ | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม | |

ปีการศึกษา 2557

5571907823 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: POLYPROPYLENE / MICROPOROUS FILM / BETA NUCLEATING AGENT / BLOWN FILM EXTRUSION / CALCIUM CARBONATE

KAMONWAN SOONTHORNSART: MICROPOROUS POLYPROPYLENE BLOWN FILM.
ADVISOR: ASST. PROF. MANTANA OPAPRAKASIT, Ph.D., CO-ADVISOR: MR. ARTHORN WICHITAMORNLOET, 127 pp.

This research work is aimed to develop porous films from polypropylene (PP). Effects of filler content and degree of drawing on tensile properties and porosity of the PP blown films are examined. PP compounds used in the fabrication of films comprise of mineral oil and/or calcium carbonate, called PO and POC/or PC, respectively. Feasibility study on the use of in-house synthesized calcium suberate as a beta-nucleating agent for PP blown films is also a main interest. The results indicate that the porosity of PO and PC blown films is dependent on the degree of drawing, in which the increase in the drawing ratio leads to an increase in the porosity of both PO and PC films. Blown films with high filler loading contents tend to possess high porosity, but deteriorated mechanical properties. Among the 2 fillers, mineral oil has higher potency than calcium carbonate in the promotion of micro-pore formation. PO blown films with the mineral oil contents ranging from 30 - 40% can absorb oil at 13 – 41%, whereas the PC blown films containing 10 - 30% calcium carbonate have a maximum oil absorptivity of only 8%. However, PC films possess much higher modulus than the PO counterparts, while their tensile strength at maximum load and elongation at break are not different. A film consisting of mixed fillers, i.e., PO₃₀C₂₀, which contains 30% mineral oil and 20% calcium carbonate, has comparable porosity to that of PO₄₀, but higher modulus. SEM images show that pores in PO films are smaller and dispersed more uniformly, compared to those in PC and POC films. Additionally, WAXD's results reveal that PP blown films prepared from PP compounded with 0.5 - 1% calcium suberate exhibit only the alpha crystal domains, indicating its low efficiency in inducing beta-phase crystal formation.

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

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์ หากไม่ได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำงาน วิจัย อีกทั้งคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มัณฑนา โอภาประกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาในด้านวิชาการและอื่นๆ รวมถึงแนวทางการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. นาย อาทร วิจิตรอมรเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการเตรียมฟิล์มพอลิโพรพิลีนชนิดรูปขนาดเล็ก
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี และอาจารย์ ดร.พรเพ็ญ อาทรกิจวัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกระหว่างดำเนินงานวิจัย
5. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) และสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย
6. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ.ระดับปริญญาโท ประจำปี 2556 และโรงงานมหาชัยพลาสติก สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยและทุนการศึกษา 1 ปีการศึกษา
7. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนค่าเล่าเรียนเป็นระยะเวลา 1 ปีการศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จตามที่มุ่งหวัง

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญรูป..... | ฉม |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 งานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP)..... | 4 |
| 2.1.1 การจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีน..... | 4 |
| 2.1.2 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน..... | 6 |
| 2.1.3 สมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีน..... | 6 |
| 2.1.4 สมบัติทางเคมีของพอลิโพรพิลีน..... | 7 |
| 2.1.5 โครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีน..... | 7 |
| 2.1.6 ประโยชน์และการนำไปใช้งาน..... | 8 |
| 2.2 फिल्मพลาสติก..... | 8 |
| 2.2.1 फिल्मพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีการจัดเรียงตัว (non-oriented polypropylene film)..... | 9 |
| 2.2.2 फिल्मพอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวหนึ่งทิศทาง (orientation polypropylene film หรือ OPP film)..... | 9 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.3 | ฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง (biaxially orientation polypropylene film หรือ BOPP film)..... | 9 |
| 2.3 | ฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (microporous films)..... | 10 |
| 2.3.1 | ความหมายและประโยชน์ของฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก..... | 10 |
| 2.3.2 | วิธีการเตรียมฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก..... | 11 |
| 2.4 | กระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม (blown film extrusion process)..... | 12 |
| 2.4.1 | อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม | 13 |
| 2.4.2 | รูปแบบการเป่าฟิล์ม | 17 |
| 2.4.3 | คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม | 17 |
| 2.4.4 | ข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม | 20 |
| 2.5 | แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ CaCO ₃)..... | 20 |
| 2.5.1 | แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ (Natural calcium carbonate) | 21 |
| 2.5.2 | แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ (Precipitated calcium carbonate หรือ PCC).... | 22 |
| 2.6 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 23 |
| บทที่ 3 | วิธีการทดลอง | 25 |
| 3.1 | สารเคมี..... | 25 |
| 3.2 | อุปกรณ์และเครื่องมือ | 25 |
| 3.3 | เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ | 26 |
| 3.4 | วิธีการทดลอง..... | 26 |
| 3.4.1 | การเตรียมสารก่อผลึกแคลเซียมซูเบอเรต | 26 |
| 3.4.2 | การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพาวนด์..... | 27 |
| 3.4.3 | การเตรียมฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต | 28 |
| 3.4.4 | การศึกษาประสิทธิภาพของสารก่อผลึกแคลเซียมซูเบอเรต..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.4.5 การดัดยัดฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต..... | 31 |
| 3.5 การวิเคราะห์สมบัติของแคลเซียมซูเบอเรตและฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียม ได้..... | 32 |
| 3.5.1 โครงสร้างทางเคมี..... | 32 |
| 3.5.2 โครงสร้างผลึกและความเป็นผลึก..... | 32 |
| 3.5.3 สัณฐานวิทยา..... | 33 |
| 3.5.4 สมบัติทางความร้อน..... | 33 |
| 3.5.5 ความเสถียรทางความร้อน..... | 34 |
| 3.5.6 สมบัติการทนต่อแรงดึง..... | 34 |
| 3.5.7 สมบัติความเป็นรูพรุน..... | 35 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... | 36 |
| 4.1 ฟิล์มเป่า PO..... | 36 |
| 4.1.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PO ที่ไม่ผ่านการดัดยัด..... | 36 |
| 4.1.2 สมบัติของฟิล์มเป่า PO ที่ผ่านการดัดยัด..... | 50 |
| 4.2 ฟิล์มเป่า PC..... | 60 |
| 4.2.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PC ที่ไม่ผ่านการดัดยัด..... | 60 |
| 4.2.2 สมบัติของฟิล์มเป่า PC ที่ผ่านการดัดยัด..... | 74 |
| 4.3 ฟิล์มเป่า PO ₃₀ C ₂₀ | 83 |
| 4.3.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PO ₃₀ C ₂₀ ที่ไม่ผ่านการดัดยัด..... | 83 |
| 4.3.2 สมบัติของฟิล์มเป่า PO ₃₀ C ₂₀ ที่ผ่านการดัดยัด..... | 90 |
| 4.4 ฟิล์มเป่า POS และ PS..... | 95 |
| 4.4.1 สมบัติและเอกลักษณ์ของแคลเซียมซูเบอเรตที่เตรียมได้..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.2 ประสิทธิภาพของแคลเซียมซูเบอร์เตสำหรับเป็นสารก่อผลึกปีทาที่วิเคราะห์จากแผ่นซีทที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดและความคุมอุณหภูมิการเกิดผลึกด้วย hot stage | 99 |
| 4.4.3 สมบัติของฟิล์มเป้า POS และ PS ที่ไม่ผ่านการดิงยี้ด..... | 102 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 112 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 112 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 113 |
| รายการอ้างอิง | 114 |
| ภาคผนวก..... | 118 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 127 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ดायรูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม | 14 |
| ตารางที่ 2.2 หน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในหน่วยดึง..... | 16 |
| ตารางที่ 2.3 หน่วยอื่นๆ ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มพลาสติก | 16 |
| ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ | 21 |
| ตารางที่ 2.5 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติที่เหมาะสมในการใช้เป็นสารตัวเติม | 21 |
| ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติและสังเคราะห์ | 22 |
| ตารางที่ 3.1 สัดส่วนองค์ประกอบและสัญลักษณ์ของสูตรการผสมฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีน คอมโพสิต..... | 28 |
| ตารางที่ 3.2 ภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตด้วยกระบวนการ เป่าอัดรีดฟิล์ม | 29 |
| ตารางที่ 3.3 ภาวะการขึ้นรูป PP _c PO ₃₀ และ PO ₃₀ S _{0.5} คอมพาวนด์ด้วยกระบวนการอัด..... | 30 |
| ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ที่ปริมาณมินิเอร์ล้อยล์และ ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 37 |
| ตารางที่ 4.2 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ที่ปริมาณมินิเอร์ล้อยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน | 40 |
| ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ที่ปริมาณมินิเอร์ล้อยล์และ ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากฟิล์มออกมาจากดา ยวงแหวน | 40 |
| ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็น ผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและ การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ที่ปริมาณมินิเอร์ล้อยล์และความเร็วลม หล่อเย็นแตกต่างกันเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมินิเอร์ล้อยล์..... | 42 |

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมิเนอร์ลออยล์แตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm เปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมิเนอร์ลออยล์..... 47

ตารางที่ 4.6 มอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ ปริมาณมิเนอร์ลออยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 48

ตารางที่ 4.7 มอดูลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ที่ผ่านการดึงยืด 100% เตรียมด้วยปริมาณมิเนอร์ลออยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 51

ตารางที่ 4.8 ความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PO ที่ปริมาณมิเนอร์ลออยล์ ความเร็วลมหล่อเย็นและ ระดับการดึงยืดแตกต่างกัน..... 54

ตารางที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 61

ตารางที่ 4.10 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 62

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากฟิล์มออกมาจากคายวงแหวน..... 65

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วรอบสกรูแตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต มาสเตอร์แบทช์ 66

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วรอบสกรูแตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต มาสเตอร์แบทช์ 70

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 4.14 มอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 71 |
| ตารางที่ 4.15 ความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วลมหล่อเย็นและระดับการดึงยึดแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm..... | 74 |
| ตารางที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 83 |
| ตารางที่ 4.17 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 85 |
| ตารางที่ 4.18 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากฟิล์มออกมาจากตายวงแหวน..... | 85 |
| ตารางที่ 4.19 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 87 |
| ตารางที่ 4.20 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 87 |
| ตารางที่ 4.21 มอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า POC ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 88 |
| ตารางที่ 4.22 ความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นและระดับการดึงยึดแตกต่างกัน..... | 93 |
| ตารางที่ 4.23 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเปอร์เรต..... | 98 |
| ตารางที่ 4.24 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีของการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของแผ่นซีท PP_c PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ | 102 |
| ตารางที่ 4.25 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_a PP_b POS และ PS ที่ปริมาณมิเนอรัลลอยล์และแคลเซียมซูเปอร์เรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 4.26 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า PP _a PP _b POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ล้อยล์ และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากที่ฟิล์มออกมาจากดายวงแหวน | 104 |
| ตารางที่ 4.27 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ล้อยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm | 105 |
| ตารางที่ 4.28 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ล้อยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm..... | 108 |
| ตารางที่ 4.29 มอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PP _a PP _b POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ล้อยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm..... | 110 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์มาตรฐานของพอลิโพรพิลีน..... | 4 |
| รูปที่ 2.2 โครงสร้างเคมีของโพรพิลีนมอนอเมอร์ (ซ้าย) และพอลิโพรพิลีน (ขวา)..... | 4 |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างสเตอริโอแบบต่างๆ ของพอลิโพรพิลีน ไอโซแทกติก (บน) ซินดีโอแทกติก (กลาง) และอะแทกติก (ล่าง)..... | 5 |
| รูปที่ 2.4 รูปแบบผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โมโนคลินิก (ซ้าย) เฮกซะโกนอล (กลาง) (ขวา) และออโรธอมบิก | 8 |
| รูปที่ 2.5 ผลึกภัณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งผลิตจากพอลิโพรพิลีน..... | 8 |
| รูปที่ 2.6 ผลึกภัณฑ์ที่ทำจากฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก | 11 |
| รูปที่ 2.7 แผนภาพกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม | 12 |
| รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของด้ายวงแหวน | 13 |
| รูปที่ 2.9 short stalk (ซ้าย) และ long stalk (ขวา) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม..... | 18 |
| รูปที่ 2.10 ความสูงของแนวเอ็นตัว (FLH) จากกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม | 18 |
| รูปที่ 2.11 ผลกระทบจากอัตราการพองของลูกโป่ง (BUR) และอัตราการดึง (DDR)..... | 20 |
| รูปที่ 3.1 เครื่อง Blown film extruder ของ Lab tech รุ่น LF-400-COEX..... | 29 |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะฟิล์มที่ออกมาจากด้ายวงแหวนของเครื่อง Blown film extruder ลักษณะโดยรวม (ก) บริเวณปากด้ายวงแหวน (ข) บริเวณหน่วยม้วนเก็บ (ค)..... | 30 |
| รูปที่ 3.3 เครื่อง Compression moulding ของ Lab tech รุ่น V-18-508CX | 31 |
| รูปที่ 3.4 เครื่อง Hot stage ของ Mettler Toledo รุ่น FP 90 Central processor และ FP82HT Hot stage | 31 |
| รูปที่ 3.5 การดึงยึดฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ด้วยเครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K | 31 |
| รูปที่ 3.6 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ของ BRUKER รุ่น ALPHA..... | 32 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.7 เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ของ BRUKER รุ่น AXS Diffraktometer D8 | 32 |
| รูปที่ 3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope ของ JEOL รุ่น JSM-6400..... | 33 |
| รูปที่ 3.9 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter ของ NETZSCH รุ่น DSC 204 F1 | 33 |
| รูปที่ 3.10 เครื่อง Thermogravimetric analyser ของ NETZSCH รุ่น TG 209 F..... | 34 |
| รูปที่ 3.11 เครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K..... | 34 |
| รูปที่ 4.1 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ที่ปริมาณมีเนอร์ล้อยล์แตกต่างกัน ใช้ ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) | 39 |
| รูปที่ 4.2 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการ ให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP _a ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 43 |
| รูปที่ 4.3 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการ ให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PO ₁₀ และ PO ₃₀ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน | 44 |
| รูปที่ 4.4 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการ ให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm เปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมีเนอร์ล้อยล์..... | 45 |
| รูปที่ 4.5 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ที่ปริมาณมีเนอร์ล้อยล์แตกต่างกัน ใช้ ความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm เปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมีเนอร์ล้อยล์..... | 46 |
| รูปที่ 4.6 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PP _a และ PO ที่ปริมาณมีเนอร์ล้อยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 49 |
| รูปที่ 4.7 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า PO ₃₀ และ PO ₄₀ ที่ผ่านการดึงยืด 100% ซึ่ง เตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 50 |
| รูปที่ 4.8 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PO ₃₀ และ PO ₄₀ ที่ไม่ผ่านการดึงยืดเปรียบเทียบกับที่ผ่านการดึงยืด 100% ที่ความเร็วลมหล่อเย็น แตกต่างกัน..... | 52 |
| รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการดึงยืดและความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PO ที่ความเร็ว ลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 54 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PP_a ที่ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค)..... | 55 |
| รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{10} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... | 56 |
| รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{10} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... | 56 |
| รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{20} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... | 57 |
| รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{20} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... | 57 |
| รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{30} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... | 58 |
| รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{30} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... | 58 |
| รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{40} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)..... | 59 |
| รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า $000PO_{40}$ ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)..... | 59 |

รูปที่ 4.19 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์ 63

รูปที่ 4.20 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์ 64

รูปที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต..... 67

รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต..... 68

รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วรอบสกรูแตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์..... 69

รูปที่ 4.24 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm..... 72

รูปที่ 4.25 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm..... 73

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการดึงยึดและความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PC ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm..... 75

รูปที่ 4.27 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PP₆ โดย
ใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm (ก) และ 20 rpm (ข) ที่ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (1) 700 (2)
และ 1,000 rpm (3) 76

รูปที่ 4.28 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) และ 100% (2) 77

รูปที่ 4.29 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) และ 100% (2) 77

รูปที่ 4.30 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) และ 100% (2) 78

รูปที่ 4.31 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) และ 100% (2) 78

รูปที่ 4.32 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) และ 100% (2) 79

รูปที่ 4.33 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) และ 100% (2) 79

รูปที่ 4.34 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4) 80

รูปที่ 4.35 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่
ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่
ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4) 80

รูปที่ 4.36 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดิงยี้ด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... 81

รูปที่ 4.37 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดิงยี้ด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... 81

รูปที่ 4.38 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดิงยี้ด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... 82

รูปที่ 4.39 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดิงยี้ด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)..... 82

รูปที่ 4.40 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ เปรียบเทียบกับ PO₃₀ และ PC₂₀ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 84

รูปที่ 4.41 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน 86

รูปที่ 4.42 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ เปรียบเทียบกับ PO₃₀ และ PC₂₀ ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน 88

รูปที่ 4.43 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ เปรียบเทียบกับ PO₃₀ และ PC₂₀ ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 89

รูปที่ 4.44 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า POC ที่ผ่านการดิงยี้ด 100% ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 90

รูปที่ 4.45 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ ที่ไม่ผ่านการดิงยี้ดเปรียบเทียบกับที่ผ่านการดิงยี้ด 100% ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... 91

| | |
|--|-----|
| รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการดัดยัดและความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PO_{30} และ PO_{40} ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน..... | 92 |
| รูปที่ 4.47 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดัดยัด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)..... | 94 |
| รูปที่ 4.48 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดัดยัด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)..... | 94 |
| รูปที่ 4.49 FTIR สเปกตรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเปอร์เรต | 95 |
| รูปที่ 4.50 WAXD แพทเทิลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเปอร์เรต | 96 |
| รูปที่ 4.51 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของแคลเซียมซูเปอร์เรตที่ ลักษณะเป็นแผ่นกระจายทั่วไป (ก) จับตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็ก (ข) และจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ (ค) | 96 |
| รูปที่ 4.52 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการ ให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) รอกไซด์ ซูเปอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเปอร์เรตของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ | 97 |
| รูปที่ 4.53 TGA เทอร์โมแกรมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเปอร์เรต..... | 98 |
| รูปที่ 4.54 แผ่นซีท PP_c (ก) PO_{30} (ข) และ $PO_{30}S_{0.5}$ (ค)..... | 99 |
| รูปที่ 4.55 WAXD แพทเทิลของแผ่นซีท PP_c PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด และควบคุมอุณหภูมิการเกิดผลึกด้วย hot stage..... | 100 |
| รูปที่ 4.56 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการ ให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของแผ่นซีท PP_c PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ | 101 |
| รูปที่ 4.57 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_a PP_b POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ล้อยล์และ แคลเซียมซูเปอร์เรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm. 103 | |
| รูปที่ 4.58 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการ ให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ล้อยล์และแคลเซียมซูเปอร์ เรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| รูปที่ 4.59 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณมินเนอร์อัลลอยด์และแคลเซียม ซูเปอร์เรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm..... | 107 |
| รูปที่ 4.60 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PP _a PP _b POS และ PS ที่ปริมาณมินเนอร์อัลลอยด์และแคลเซียมซูเปอร์เรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบ สกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm..... | 109 |
| รูปที่ 4.61 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 (ก) และ 5,000 เท่า (ข) แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิว ของฟิล์มเป่า PO ₁₀ S _{0.5} (1) PO ₂₀ S _{0.5} (2) PO ₃₀ S _{0.5} (3) PO ₄₀ S _{0.5} (4) PO ₃₀ S _{1.0} (5)..... | 111 |
| รูปที่ 4.62 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 100 (ก) 1,500 (ข-ค) และ 5,000 เท่า (ง-จ) แสดงสัณฐาน วิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PS _{0.5} | 111 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 งานวิจัย

ปัจจุบันพลาสติก (plastic) นับว่าเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสมบัติที่สำคัญของวัสดุประเภทนี้คือ น้ำหนักเบา มีความเหนียว มีความแข็งแรง ทนทานต่อน้ำ อากาศและสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าและฉนวนความร้อนที่ดี สามารถนำไปขึ้นเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ง่ายกว่าวัสดุประเภทอื่น อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งสมบัติได้ด้วยการปรับเปลี่ยนชนิดสารเติมแต่งที่ใส่และสังเคราะห์โดยเลือกชนิดของมอนอเมอร์ร่วมที่เหมาะสม เป็นต้น วัสดุประเภทนี้มีการใช้งานในหลายรูปแบบ อาทิเช่น ขวด กล่อง แผ่นซีท รวมถึงบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนหรือฟิล์ม [1]

บรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน (flexible packaging) หรือฟิล์ม (film) ที่พบในท้องตลาดมีทั้งฟิล์มพลาสติกเดี่ยว (single plastic film) ฟิล์มพลาสติกประกบ (laminated plastic film) ฟิล์มพลาสติกรีดร่วม (coextruded plastic film) ฟิล์มยืด (stretch cling film) ฟิล์มหด (shrink film) และฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (microporous film) ซึ่งแต่ละชนิดล้วนมีการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป [2, 3]

ฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (microporous film) สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุในการกรอง ฟิล์มซับมัน เยื่อเลือกผ่านสำหรับการซึมผ่านของความชื้นเพื่อเก็บรักษาอาหารให้สดใหม่อยู่เสมอ หรือแม้กระทั่งการเลือกให้น้ำผ่านได้แต่หยดน้ำไม่สามารถผ่านได้ เป็นต้น [4] ซึ่งโดยทั่วไปฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็กนั้นจะต้องมีความเรียบและมีสมบัติที่สม่ำเสมอตลอดหน้ากว้าง มีความเป็นรูพรุน (porosity) และมีขนาดของรูพรุน (pore size) ที่เหมาะสม รวมถึงมีสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ที่ดีและคงที่ [4]

วัสดุที่นำมาผลิตฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP) โพลีเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE) เป็นต้น [4] โดยโพลีเมอร์ทั้งสองประเภทนี้มีการนำมาใช้เป็นหลักในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนหรือฟิล์ม ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาโพลีเมอร์ประเภทโพลีโพรพิลีน เนื่องจากมีสมบัติที่น่าสนใจคือ มีความใส มีความแข็งแรงเชิงกลดีเยี่ยมและทนแรงกระแทกได้ดี น้ำหนักเบา ต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี มีความปลอดภัยสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและยา สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ไม่ยาก ต้นทุนวัตถุดิบต่ำ ลามิเนตกับฟิล์มชนิดอื่นได้ง่าย สามารถทนอุณหภูมิได้สูงพอประมาณและสามารถพัฒนาสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้โดยง่าย [4]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มหรือแผ่นซีทพอลิโพรพิลีนชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (microporous polypropylene film/sheet) สามารถเตรียมได้จากคอมพาวนด์ที่มีสารตัวเติมชนิดที่แยกวิภูภาคจากเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งสารตัวเติมเหล่านั้นอาจอยู่ในรูปของของเหลว เช่น พาราฟินแว็กซ์ (Parafin wax) ปิโตรเลียมเจลลี (Petroleum jelly) หรือมิเนอร์ลออยล์ (Mineral oil) เป็นต้น [5] หรือในรูปของแข็ง เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide หรือ SiO_2) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ CaCO_3) เป็นต้น [4] นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาได้จากคอมพาวนด์ที่มีสารก่อผลึกบีทา (β -nucleating agent) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสารที่มีแนวโน้มว่าเป็นสารก่อผลึกบีทาของพอลิโพรพิลีน เช่น Quinacridone pigment remafin (E3B) [6] Aryl amide based system (TMB-5) [7-9] N,N'-dicyclohexyl-2,6-naphthalene dicarboxamide (NJSTAR) [10-12] และเกลือแคลเซียมของกรดไดคาร์บอกซิลิก เช่น แคลเซียมพิเมเลต (Calcium pimelate) แคลเซียมซูเบอร์เรต (Calcium suberate) เป็นต้น [13-16]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมบัติของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากคอมพาวนด์ที่เตรียมด้วยสารเติมแต่งที่เป็นของเหลวซึ่งจะเลือกใช้มิเนอร์ลออยล์และของแข็งซึ่งจะเลือกใช้แคลเซียมคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับคอมพาวนด์ที่เตรียมด้วยสารก่อผลึกบีทาที่เตรียมขึ้นเอง โดยจะศึกษาผลกระทบของปริมาณสารและชนิดสารเติมแต่งที่ใช้ รวมถึงภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป ต่อระดับความพรุนตัว ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเตรียมฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนชนิดรูพรุนขนาดเล็กจากคอมพาวนด์ที่เตรียมด้วยสารเติมแต่งและ/หรือสารก่อผลึกบีทา

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของปริมาณสารและชนิดสารเติมแต่งที่ใช้ รวมถึงภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป ต่อระดับความพรุนตัว ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปริมาณมิเนอร์ลออยล์ที่มีผลต่อฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ซึ่งจะใช้ปริมาณของมิเนอร์ลออยล์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

1.3.2 ศึกษาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต ซึ่งจะใช้ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของการเติมสารก่อผลึกบีทาประเภทแคลเซียมซูเบอร์เรตต่อสมบัติของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนที่เตรียมได้

1.3.4 ศึกษาภาวะการขึ้นรูป ได้แก่ ความเร็วรอบสกรูและ/หรือความเร็วลมหล่อเย็น ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนและฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางสำหรับผลิตฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนชนิดรูพรุนขนาดเล็กเพื่อใช้ในการดูดซับน้ำมันของบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP) [17-19]

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

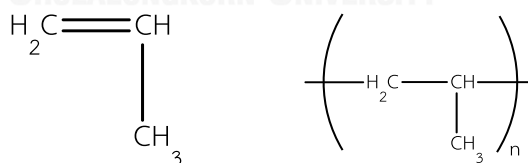
ชื่อพ้อง (Synonyms name) : Polipropene 25 [USAN] 1-propene homopolymer
Propylene polymers และ Polypropene

สูตรทางเคมี : $(C_3H_6)_n$

พอลิโพรพิลีนหรือพีพี เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกซึ่งสามารถนำมาหลอมขึ้นรูปด้วยความร้อนแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ได้ โดยสมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกแห่งอเมริกา (The Society of the Plastics Industry, Inc.) ได้กำหนดสัญลักษณ์มาตรฐานของพลาสติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งสามารถนำกลับมาหมุนเวียนหรือการรีไซเคิล (recycle) โดยใช้สัญลักษณ์เป็นตัว 5 (รูปที่ 2.1) พอลิโพรพิลีนจะประกอบด้วยโพรพิลีนมอนอเมอร์ (รูปที่ 2.2 ซ้าย) เป็นหน่วยย่อยหลายๆ หน่วยประกอบกันเป็นโครงสร้างเส้นตรงของพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 2.2 ขวา)



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์มาตรฐานของพอลิโพรพิลีน [20]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างเคมีของโพรพิลีนมอนอเมอร์ (ซ้าย) และพอลิโพรพิลีน (ขวา) [18]

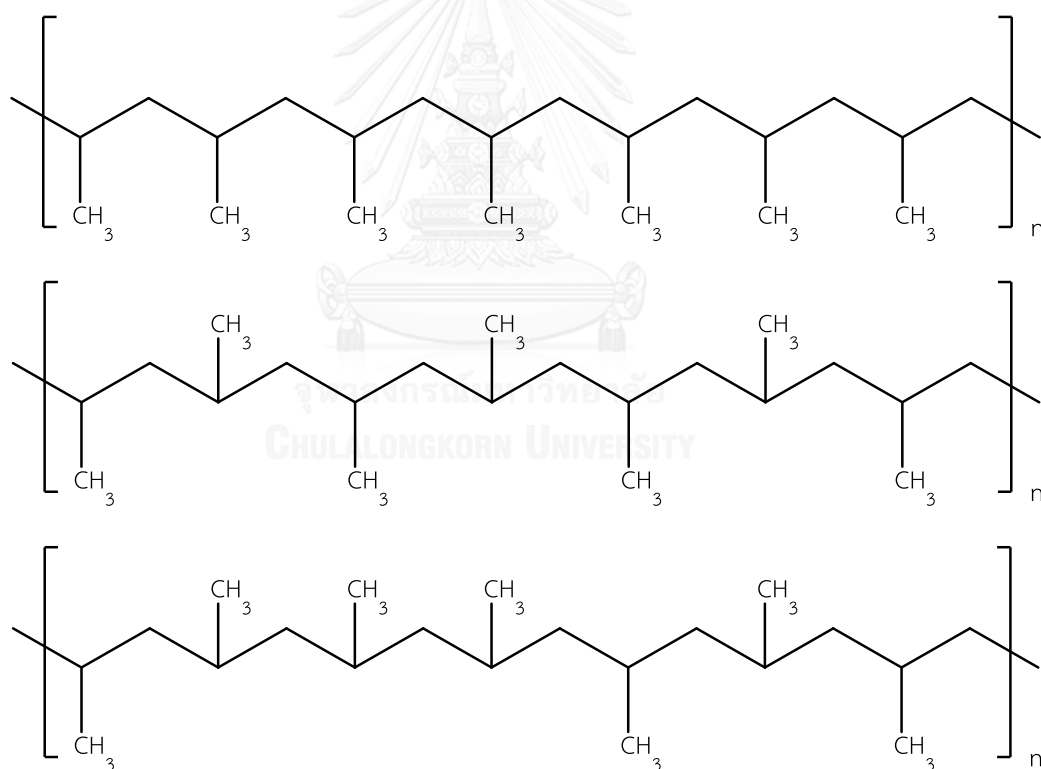
2.1.1 การจัดเรียงตัวของพอลิโพรพิลีน [17, 18]

พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเกลียว (helix) มอนอเมอร์มีการเรียงต่อกันแบบ head-to-tail โดยตำแหน่งของหมู่เมทิล ($-CH_3$) ของหน่วยซ้ำโพรพิลีนที่สัมพันธ์กับอะตอมคาร์บอนในสายโซ่หลักสามารถมีลักษณะที่แตกต่างกันได้ แบบ 3 คือ ไอโซแทกติก (isotactic) ซินดิโอแทกติก (syndiotactic) และอะแทกติก (atactic) (รูปที่ 2.3) ทั้งนี้พอลิโพรพิลีนทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมีจุดหลอมเหลว ความแข็งแรง เสถียรภาพการคงรูป และสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน

2.1.1.1 ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โครงสร้างแบบไอโซแทกติกมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบมาก หมู่เมทิลอยู่เพียงด้านเดียวของสายโซ่หลัก มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูง มีความแข็งแรงมาก มีอุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature หรือ T_m) ประมาณ 165°C มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature หรือ T_g) ประมาณ 0 ถึง 13°C

2.1.1.2 ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน โครงสร้างแบบซินดีโอแทกติกจะมีหมู่เมทิลอยู่สลับไปมาทั้งสองด้านตลอดสายโซ่ มีความทนทานต่อแรงกระแทกสูง มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ -18°C ถึง -5°C

2.1.1.3 อะแทกติกพอลิโพรพิลีน โครงสร้างแบบอะแทกติกจะมีหมู่เมทิลอยู่แบบสุ่ม (random) มีลักษณะอ่อนนุ่มคล้ายยาง จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย มีความทนทานต่อแรงกระแทกสูง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสเตอริโอแบบต่างๆ ของพอลิโพรพิลีน

ไอโซแทกติก (บน) ซินดีโอแทกติก (กลาง) และอะแทกติก (ล่าง) [17]

2.1.2 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน [21, 22]

2.1.2.1 การสังเคราะห์ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนสามารถสังเคราะห์โดยใช้การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบโคออดิเนชันโดยใช้ตัวเร่งซิกเลอร์นาตต้า (Ziegler Natta) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะได้จากการผสมสารประกอบโลหะสองชนิด คือ สารประกอบเฮไลด์ของโลหะทรานสิชัน เช่น ไทเทเนียมคลอไรด์ ($TiCl_4$) และสารประกอบอัลคิลของโลหะในหมู่ 3 ของตารางธาตุ เช่น ไตรเอทิลอลูมินา (TEA) ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนเกิดขึ้นที่มีความจำเพาะเจาะจงมาก เป็นตัวควบคุมตำแหน่งมอนอเมอร์แต่ละหน่วยที่จะเข้าไปต่อในสายโซ่พอลิเมอร์

2.1.2.2 การสังเคราะห์ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีนสามารถสังเคราะห์โดยใช้ระบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น การใช้วาเนเดียมคลอไรด์ (VCl_4) โดยในกรณีนี้ปฏิกิริยาจะเกิดผ่านกลไกแบบการควบคุมหมู่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain end control model)

2.1.2.3 การสังเคราะห์อะแทกติกพอลิโพรพิลีน อะแทกติกพอลิโพรพิลีนสามารถสังเคราะห์โดยกลไกแบบลูกโซ่ผ่านตัวกลางแบบอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization) ที่ความดันสูง เนื่องจากในปฏิกิริยาดังกล่าวจะไม่สามารถควบคุมการเรียงตัวของมอนอเมอร์ที่เข้าทำปฏิกิริยาได้ อีกทั้งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาจะค่อนข้างเสถียรทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้ยากขึ้น ดังนั้นพอลิโพรพิลีนที่สังเคราะห์โดยวิธีแบบอนุมูลอิสระจึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไม่มีความเป็นผลึก ไม่ค่อยมีประโยชน์ในการนำไปใช้งานด้านที่ต้องการความแข็งแรง การทนต่อความร้อนและการทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์

2.1.3 สมบัติทางกายภาพของพอลิโพรพิลีน [3, 19]

- พอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรง มีผิวสัมผัสที่แข็ง เป็นมันเงา ทนทานต่อการขีดข่วน มีความคงตัวดี ไม่เสีรूपง่าย และนอกจากนั้นยังมีความต้านทานต่อการล้า (fatigue) เนื่องจากการหักงอ (flexing) ได้ดีอีกด้วย จึงเหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นหลอดที่หักงอได้

- พอลิโพรพิลีนมีความทนทานต่อแรงกระแทกได้ดี แต่จะขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ ทั้งนี้ความทนทานต่อแรงกระแทกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า $0^{\circ}C$ การปรับปรุงความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนสามารถทำได้โดยโคพอลิเมอร์เซชันกับโอเลฟินส์อื่นๆ เช่น เอทิลีน เป็นต้น

- พอลิโพรพิลีนมีจุดหลอมเหลว 130 ถึง $171^{\circ}C$ ทำให้สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ เช่น อุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค (sterilization $\sim 100^{\circ}C$) และสามารถทำเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถบรรจุอาหารขณะร้อนได้ (hot-filled)

- พอลิโพรพิลีนมีจุดหลอมเหลวแคบ ดังนั้นจึงทำการผนึกติดกันได้ง่าย
- พอลิโพรพิลีนมีความเหนียวที่อุณหภูมิ 40°C ถึง -10°C แต่จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำ
- พอลิโพรพิลีนมีจุดอ่อนตัวประมาณ 150°C และไม่ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต
- พอลิโพรพิลีนมีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นประมาณ 0.855 - 0.946 g/cm³
- พอลิโพรพิลีนมีความใส สามารถผสมสีได้ง่ายทั้งโปร่งแสงและทึบแสง
- พอลิโพรพิลีนติดไฟง่าย

2.1.4 สมบัติทางเคมีของพอลิโพรพิลีน [17, 18]

- พอลิโพรพิลีนมีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ ความชื้นและก๊าซได้ดี
- พอลิโพรพิลีนมีความทนทานต่อสารเคมี ถูกกัดกร่อนโดยสารออกซิไดซ์ กรด ต่างและเคมีภัณฑ์จำพวกแอลกอฮอล์รวมทั้งตัวทำละลายอินทรีย์ยาก แต่จะไม่ทนทานต่อสารเคมีจำพวกไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติก รวมทั้งพอลิโพรพิลีนจะพองตัวหรืออ่อนนิ่มและสลายตัวได้ในสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง เช่น ไออของกรดไนตริก กรดซัลฟิวริกที่เข้มข้นและร้อน

2.1.5 โครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีน [5, 19]

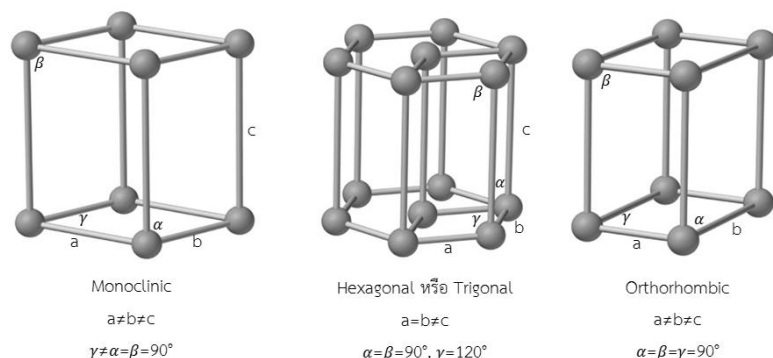
พอลิโพรพิลีนประเภทไอโซแทกติกเป็นโครงสร้างที่มีในการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยสามารถเกิดผลึกได้ 4 รูปแบบคือ แอลฟา (α) บีทา (β) แกมมา (γ) และสเมกติก (รูปที่ 2.4)

2.1.5.1 ผลึกแอลฟา (α -crystal) เป็นผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากการเย็นตัวของพอลิโพรพิลีนอย่างช้าๆ จากสถานะหลอมเหลว ผลึกมีความเสถียรมากที่สุด มีความหนาแน่น 0.936 g/cm³ ทนแรงดึงสูง โมดูลัสสูง และความแข็งเกร็งสูง มีรูปผลึกแบบโมนอกลิติก (monoclinic)

2.1.5.2 ผลึกบีทา (β -crystal) เป็นผลึกที่พบเป็นส่วนน้อย ผลึกมีความเสถียรต่ำ สามารถเกิดได้จากการใส่สารก่อผลึกบีทา มีความหนาแน่น 0.921 g/cm³ ทนแรงกระแทกสูง มีการยืดตัว ณ จุดขาดสูง มีความเหนียวสูง และอุณหภูมิอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนมีค่าสูงขึ้น มีรูปแบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) หรือไตรโกนอล (trigonal)

2.1.5.3 ผลึกแกมมา (γ -crystal) พบได้จากการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หรือตกผลึกภายใต้ความดันสูง มีความหนาแน่นต่ำ มีรูปแบบผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic)

2.1.5.4 ผลึกสเมกติก (smectic crystal) พบได้ยาก ต้องเกิดจากการลดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างรวดเร็ว เป็นเฟสที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่างส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน



รูปที่ 2.4 รูปแบบผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

โมนอคลินิก (ซ้าย) เฮกซะโกนอล (กลาง) และออร์โธรมบิก (ขวา) [23]

2.1.6 ประโยชน์และการนำไปใช้งาน [2]

การใช้งานพอลิโพรพิลีนที่พบเห็นทั่วไปในปัจจุบัน เช่น ฟิล์มที่สัมผัสกับอาหาร แผ่นซีททั่วไป ขวด ปกแฟ้ม กล่องและตลับเครื่องสำอาง กล่องเครื่องมือ กล่องบรรจุอาหาร อุปกรณ์ของรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ หลอดดูดน้ำ ขวดใส่สารเคมี กระจองน้ำมันเครื่อง กระจอบข้าวและถุงบรรจุปุ๋ย แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งผลิตจากพอลิโพรพิลีน [24]

2.2 ฟิล์มพลาสติก [2, 3, 17, 18]

ฟิล์ม (film) คือพลาสติกชนิดอ่อน (flexible material) ที่มีผิวเรียบ มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมและยาวต่อเนื่อง มีความหนาได้ถึง 0.25 มิลลิเมตร (0.01 นิ้ว) และสามารถม้วนได้โดยไม่มีการผิดรูปอย่างถาวร ในกรณีที่ความหนามากกว่า 0.25 มิลลิเมตร จะเรียกว่าซีท ซึ่งจัดเป็นวัสดุชนิดแข็ง (rigid material) เกิดการผิดรูปอย่างถาวรถ้าเกิดการพับ ฟิล์มพอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 พลาสติกโพรพิลีนที่ไม่มีการจัดเรียงตัว (non-oriented polypropylene film)

พลาสติกโพรพิลีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจัดเรียงตัว เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการสมบัติการสกัดกั้น งานที่ต้องการสมบัติเชิงกลและความคงทนที่อุณหภูมิสูง พลาสติกประเภทนี้มีความต้านทานการฉีกขาดดีเยี่ยมและมีราคาไม่สูงมาก โดยอาจเป็นฟิล์มชั้นเดียว (monolayer) หรือฟิล์มอัดรีดร่วมหลายชั้น (multilayer)

2.2.2 พลาสติกโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวหนึ่งทิศทาง (orientation polypropylene film หรือ OPP film)

ฟิล์ม OPP มีทั้งที่ผลิตจากโพลิโพรพิลีน โคอโพลิเมอร์และเรซินที่ถูกดัดแปร

2.2.3 พลาสติกโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง (biaxially orientation polypropylene film หรือ BOPP film)

ฟิล์ม BOPP เกิดจากการถูกดึงด้วยกระบวนการเชิงกลในทิศทางที่ตั้งฉาก ส่งผลให้โมเลกุลมีการเรียงตัวตามแนวแกนของเครื่องจักร (machine direction หรือ MD) และแนวขวางแกนของเครื่องจักร (transverse direction หรือ TD) ทำให้ฟิล์มได้รับการปรับปรุงสมบัติทางแสง ความแข็งแรง การสกัดกั้นความชื้น และการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเป็นอย่างมาก จากความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถผลิตฟิล์มที่มีความหนาเพียง 0.045 มิลลิเมตร และใช้เป็นฟิล์มประกอบสำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์

กระบวนการผลิตฟิล์ม BOPP จะมีการยืดหรือดึงฟิล์มในขณะที่ร้อนทำให้ฟิล์มมีการจัดเรียงโมเลกุล 2 ทิศทาง คือ ทางแนวแกน x และแนวแกน y ฟิล์มจะขยายขนาดจากเดิมถึง 50 เท่า โดยตามแนวแกน x (ตามขวางเครื่องจักร) ยืดออก 5 เท่า ในขณะที่ตามแนวแกน y (ตามยาวเครื่องจักร) ยืดออกถึง 10 เท่า โดยฟิล์มที่ผ่านการดึงยืดแล้วจะมีความทรงรูป (stiffness) ไม่ยืดหรือย่นในขณะที่นำไปผ่านขั้นตอนการพิมพ์สี ฟิล์มประเภทนี้จะใสและมันวาว ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้เป็นอย่างดี น้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ ไม่ต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และไม่ทนทานต่อไขมันและน้ำมัน ฟิล์ม BOPP สามารถแบ่งตามลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็น 4 ประเภทดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ฟิล์มแบบไม่ปิดผนึกด้วยความร้อน (non-heat sealable film) เป็นฟิล์มใสที่ต้องนำไปแปรรูปโดยการพิมพ์สี หรือประกบกับฟิล์มชนิดอื่นเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต่อไป เช่น เทปกาว ฟิล์มเพื่อการหีบห่อแบบไม่ใช้ความร้อนในการติดผนึก และฟิล์มเพื่อนำไปผลิตเป็นธนบัตร เป็นต้น

2.2.3.2 พิล์มแบบปิดผนึกด้วยความร้อน (heat sealable film) เป็นฟิล์มที่ได้จากการอัดรีดร่วม (co-extrusion) ระหว่างโพรพิลีนโคพอลิเมอร์กับโพรพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ ทำให้ผิวชั้นบนและชั้นล่างของฟิล์มถูกผนึกด้วยความร้อนในช่วงกว้างได้ (อุณหภูมิ 106 - 128°C) เช่น ฟิล์มห่อถั่วลิสง ซองบุหรี ถุงใส่ขนมปัง และซองใส่เครื่องปรุงอาหาร เป็นต้น ฟิล์มชนิดนี้มีความพิเศษคือป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่าน เหมาะกับอาหารที่ไม่คำนึงถึงกลิ่นรสมากนัก อายุการเก็บอาหารไม่ยาวนานมากและต้องการให้มองเห็นของที่อยู่ภายใน

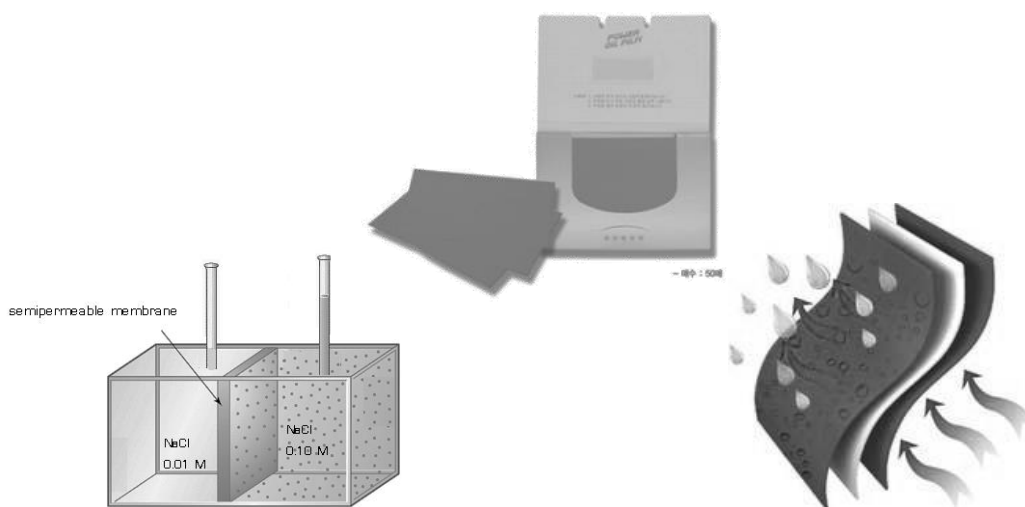
2.2.3.3 พิล์มแบบเคลือบโลหะ (metallized film) เป็นฟิล์มที่ต้องนำไปผ่านขั้นตอนการอบด้วยไออะลูมิเนียมในระบบสุญญากาศทำให้ฟิล์มที่ได้มีอะลูมิเนียมเกาะที่ผิวของฟิล์ม นิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้สามารถเก็บรักษากลิ่นรสของอาหารที่บรรจุอยู่ เช่น ซองใส่กาแฟสำเร็จรูป ซองบะหมี่ต้มยำ และซองขนมขบเคี้ยว เช่น มันฝรั่งทอด และขนมปังกรอบ เป็นต้น ฟิล์มชนิดนี้มีความมันวาวของอะลูมิเนียม มีสีมันวาว สามารถใช้ความร้อนในการติดผนึกได้ แต่ราคาแพงกว่าฟิล์มชนิดอื่น

2.2.3.4 พิล์มทึบแสงหรือฟิล์มไข่มุก (opaque หรือ pearlized film) ฟิล์มชนิดนี้มีความทึบแสง และมันวาวเหมือนไข่มุก นำไปพิมพ์สี และประกบกับฟิล์มชนิดอื่นได้ รวมทั้งสามารถผนึกด้วยความร้อนได้ เช่น ซองใส่ไอศกรีม ฟิล์มห่อลูกกวาด เป็นต้น

2.3 พิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (microporous films) [4, 5, 10-12]

2.3.1 ความหมายและประโยชน์ของฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก

ฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก คือฟิล์มพลาสติกที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากถึงระดับไมครอนหรือไมโครเมตร ซึ่งอาจผลิตจากพอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE) หรือพอลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP) เป็นต้น โดยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายด้าน ได้แก่ การใช้เป็นวัสดุในการกรอง (filter) ฟิล์มซับมัน (facial oil control film) เยื่อเลือกผ่าน (membrane) สำหรับการซึมผ่านของความชื้นเพื่อเก็บรักษาอาหารให้สดใหม่อยู่เสมอ หรือแม้กระทั่งการเลือกให้น้ำผ่านได้แต่หยดน้ำไม่สามารถผ่านได้ เป็นต้น (รูปที่ 2.6) ซึ่งโดยทั่วไปสมบัติของฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็กนั้นจะต้องมีความเรียบ (flatness) และมีสมบัติที่สม่ำเสมอตลอดหน้ากว้าง มีความเป็นรูพรุน (porosity) และมีขนาดของรูพรุน (pore size) ที่เหมาะสม รวมถึงมีสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ที่ดีและคงที่



รูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก [25, 26]

2.3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็ก

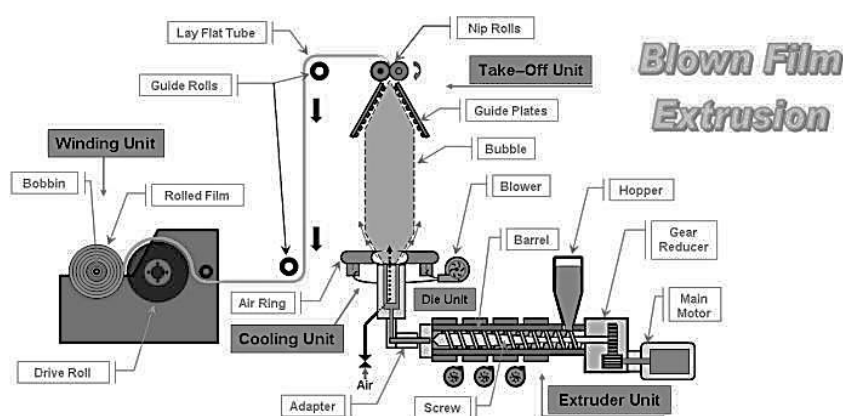
2.3.2.1 วิธีการแรกคือการเตรียมจากคอมพาวนด์ที่มีสารตัวเติมชนิดที่แยกวัฏภาคจากเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ [4, 5] เมื่อทำการดึงยึดฟิล์มที่มีอนุภาคสารตัวเติมดังกล่าวทำให้บริเวณรอยต่อของเฟสของพอลิเมอร์ถูกแยกออกจากอนุภาคสารตัวเติมเหล่านั้น ซึ่งสารตัวเติมเหล่านั้นอาจอยู่ในรูปของของเหลว เช่น มิเนอร์ลออยล์ (Mineral oil) พาราฟินแว็กซ์ (Parafin wax) หรือปิโตรเลียมเจลลี่ (Petroleum jelly) เป็นต้น หรือของแข็ง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ CaCO_3) หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide หรือ SiO_2) เป็นต้น

2.3.2.2 วิธีการที่สองคือใช้การเปลี่ยนเฟสของพอลิโพรพิลีนจากผลึกปีทาที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.921 g/cm^3) ไปเป็นผลึกแอลฟาที่มีความหนาแน่นสูง (0.936 g/cm^3) [10-12] โดยสารก่อผลึกปีทานั้นได้แก่ Quinacridone-pigment Remafin (E3B) ซึ่งมีข้อเสียคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีแดง ซึ่งในบางครั้งไม่ตรงกับความต้องการของผู้ผลิตสินค้า N,N'-dicyclohexyl-2,6-naphthalene dicarboxamide เป็นสารก่อผลึกปีทาประเภทสารประกอบเอไมด์ ซึ่งได้มีการจดทะเบียนลิขสิทธิ์เฉพาะโดยใช้ชื่อ NJSTAR ของบริษัทนิวเจแปนเคมิคัล Aryl amide-based system (TMB-5) เป็นสารประกอบประเภทแอริลไดคาร์บอกซิลิกเอไมด์คอมพาวนด์ และสารก่อผลึกปีทาที่เริ่มมีการศึกษาในปัจจุบันเป็นประเภทเกลือแคลเซียมของกรดไดคาร์บอกซิลิก เช่น แคลเซียมพิมเลต (Calcium pimelate) แคลเซียมซูเบอร์เรต (Calcium suberate) เป็นต้น เนื่องจากมีวิธีการเตรียมที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก

2.4 กระบวนการเป่าอัตรัดฟิล์ม (blown film extrusion process) [2, 17, 18, 27, 28]

กระบวนการเป่าอัตรัดฟิล์มเป็นหนึ่งในหลายกระบวนการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมในการผลิตฟิล์มพลาสติก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene หรือ LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene หรือ HDPE) และโพลิโพรพิลีน (polypropylene หรือ PP) เป็นต้น

กระบวนการเป่าอัตรัดฟิล์มพลาสติกเป็นกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกอย่างต่อเนื่องโดยใช้วิธีการเป่าฟิล์ม โดยมีวิธีการขึ้นรูปโดยสรุปกล่าวคือจะเริ่มจากการใส่เม็ดพลาสติกชนิดที่ต้องการในเครื่องอัตรัด (extruder) ที่อยู่ในหน่วยเครื่องอัตรัด (extruder unit) ซึ่งต่อกับส่วนของการเป่าฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเม็ดพลาสติกจะเกิดการหลอมเหลวภายในเครื่องอัตรัดโดยความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อนและความร้อนจากการเสียดสี จากนั้นเนื้อพลาสติกเหลวจะถูกขับเคลื่อนโดยสกรูเดี่ยว (single screw) ภายในเครื่องอัตรัดไปยังดายทรงกลม (circular die) และออกมาจากดายทรงกลมไปยังดายวงแหวน (annular die) ในส่วนของหน่วยดาย (die unit) จากนั้นเนื้อพลาสติกเหลวจะถูกทำการดึงยึดในแนวแกนของเครื่องจักร (machine direction หรือ MD) พร้อมทั้งมีการใช้ลมเป่าให้พลาสติกดังกล่าวพองเป็นลูกโป่ง (bubble) ที่มีผนังบางและลมตัวนี้จะเป็นตัวปรับขนาดและความหนาของฟิล์ม ซึ่งเป็นการพองออกในแนวขวางแกนของเครื่องจักร (transverse direction หรือ TD) อีกทั้งบริเวณปากดายวงแหวนจะมีวงแหวนลม (cooling ring) ไว้สำหรับหล่อเย็นเนื้อพลาสติกเหลวให้กลายเป็นฟิล์มพลาสติก ในหน่วยหล่อเย็น (cooling unit) จากนั้นลูกโป่งจะถูกป้อนเข้าไปในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip rolls) ซึ่งทำหน้าที่บีบลูกโป่งให้แบนลงกลายเป็นฟิล์มสองชั้น แล้วจึงทำการดึงฟิล์มพลาสติกโดยใช้หน่วยดึง (take-off unit) สุดท้ายทำการม้วนเก็บฟิล์มด้วยหน่วยม้วนเก็บ (winding unit) แล้วจึงนำไปทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ



รูปที่ 2.7 แผนภาพกระบวนการเป่าอัตรัดฟิล์ม [29]

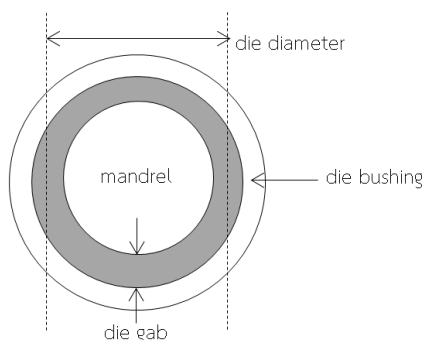
2.4.1 อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม [2, 27, 28]

อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มแบ่งออกเป็น 6 หน่วยดังต่อไปนี้

2.4.1.1 หน่วยเครื่องอัดรีด (extruder unit) โดยทั่วไปเครื่องอัดรีดที่ใช้ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มส่วนใหญ่จะเป็นแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ของสกรูอยู่ในช่วง 20:1 ถึง 34:1 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องอัดรีดจะอยู่ในช่วง 4 ถึง 20 เซนติเมตร ซึ่งขนาดของเครื่องอัดรีดจะขึ้นกับขนาดกว้าง (lay-flat width) และความหนาของฟิล์มที่ผลิตรวมถึงอัตราการดึงของเครื่องม้วนฟิล์ม ดังนั้นการเลือกใช้งานเครื่องอัดรีดจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว

ปกติแล้วโซนของสกรูจะแบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ โซนป้อนเม็ด (feed zone) ทำหน้าที่ลำเลียงเม็ดพลาสติกให้ไหลไปตามช่องของสกรู ซึ่งการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเม็ดพลาสติกเกิดจากการหมุนของสกรูที่สัมพันธ์กับผนังกระบอกกลมที่อยู่กับที่ ทำให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนไปยังโซนหลอม (transition zone หรือ compression zone) ทำหน้าที่หลอมเม็ดพลาสติกที่ถูกบีบอัดและลำเลียงมาในรูปของของแข็งให้กลายเป็นพลาสติกหลอมเหลว อีกทั้งยังลำเลียงพลาสติกหลอมเหลวไปยังส่วนของโซนอัดส่ง (metering zone) ทำหน้าที่ผสมเม็ดพลาสติกหลอมเหลวเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดความดันเพื่อทำให้เกิดการไหลของพลาสติกในกระบอกหลอมและส่งต่อพลาสติกหลอมเหลวไปยังหน่วยของตาย

2.4.1.2 หน่วยตาย (die unit) ตายที่ใช้ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มจะเป็นตายวงแหวน (annular die) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของด้านนอกของตาย (die bushing) และส่วนที่เป็นแกนของตาย (die mandrel) รูปที่ 2.8 โดยทั่วไปตายที่ใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์มจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 15 เซนติเมตร โดยอาจมีขนาดใหญ่ถึง 40 เซนติเมตรได้ในกรณีที่ต้องการฟิล์มที่มีหน้ากว้างมาก การออกแบบตายที่ใช้ขึ้นอยู่กับความต้องการและความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งตายแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของตายวงแหวน [28]

ตารางที่ 2.1 คายรูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม [2, 27, 28]

| ประเด็น | คายนอนด้านข้าง (side-fed die) | คายนอนด้านล่าง (bottom fed die) | |
|-------------------------------------|---|--|---|
| | | spider arm die | spiral arm die |
| การป้อนพอลิเมอร์หลอม | ถูกป้อนเข้าทางด้านข้างของคายนอน | ถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของคายนอน | |
| การลงทุน | ไม่แพง | แพงกว่า | แพงสุด |
| การหมุนคายนอน | ไม่สามารถทำได้ | สามารถทำได้ | |
| ความกว้างของปากคายนอน | ปรับได้ | ปรับไม่ได้ | |
| ความดันย้อนกลับ | น้อย | น้อย | มาก |
| เพดานที่สูง | ไม่ต้องการ | ต้องการ | ต้องการมาก |
| การทำความสะอาด | ง่าย แต่แกนของคายนอนจะเกิดการโค้งงอได้ | ยากจึงไม่เหมาะสมกับระบบที่ใช้พลาสติกสี หรือที่เปลี่ยนพลาสติกบ่อย | ง่าย |
| รอยเชื่อมต่อในฟิล์ม | 1 รอย | >2 รอย แต่มีความแข็งแรงมากกว่าของ side fed die | ไม่มี |
| การไหล | ไม่สม่ำเสมอ (non-uniform flow) และฟิล์มหนาบางไม่เท่ากัน | สม่ำเสมอเหมือนกันทุกจุด (uniform flow) | |
| เหมาะกับพลาสติกที่มี ความหนืดสูง | เหมาะสม | เหมาะสม | ไม่เหมาะสม |
| อื่นๆ | ไม่เกิดการเสียดสีและเกิดความร้อนสูงเนื่องจากมีแนวแกนกีดขวางทางเดินของพลาสติกทำให้พลาสติกไหลไม่สะดวก | การนำไปใช้งานกับพอลิไวนิลคลอไรด์และพลาสติกชนิดอื่นๆ ที่สลายตัวง่าย ความร้อนได้ง่ายจากผลของการเสียดสีความร้อน | เกิดการเสียดสีสูง และใช้ความดันในการดันส่งพลาสติกสูง ไม่เหมาะกับพลาสติกที่ไม่ทนการเสียดสี เหมาะกับพอลิโอเลฟินส์ทั่วไป ทั้งยังเพิ่มสมบัติทางแสงให้กับฟิล์มด้วย |

2.4.1.3 หน่วยหล่อเย็น (cooling unit) มีด้วยกัน 4 ประเภท ดังต่อไปนี้

single-lip air ring การเย็นตัวของฟิล์มเกิดจากการเป่าลมบริเวณด้านนอกของฟิล์มโดยใช้วงแหวนลมเพียงตัวเดียว สามารถเพิ่มอัตราการเย็นตัวด้วยการเพิ่มความเร็วในการเป่าลมหรือการใช้ลมจากระบบให้ความเย็น ข้อดีของวิธีการนี้คือราคาไม่แพง สำหรับข้อเสียของวิธีการนี้คือเป็นการทำให้ฟิล์มมีการเย็นตัวแค่บริเวณภายนอกเท่านั้น อีกทั้งถ้าความเร็วในการเป่าลมสูงมากเกินไปจะทำให้ลูกโป่งเกิดการเสียรูปได้

dual-lip air ring การเย็นตัวของฟิล์มเกิดจากการเป่าลมบริเวณด้านนอกของฟิล์มโดยใช้วงแหวนลมสองตัว ซึ่งลมจากวงแหวนลมด้านล่างจะทำหน้าที่เลี้ยงให้ลูกโป่งเกิดการคงรูปคล้ายๆ กับเป็นสารหล่อลื่นให้กับระบบ ในขณะที่ลมจากวงแหวนลมด้านบนจะมีความเร็วสูง ทำหน้าที่ทำให้ฟิล์มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความเร็วลมจากวงแหวนลมด้านบนควรจะมีความมากกว่าความเร็วลมจากวงแหวนลมด้านล่างเพราะจะทำให้เกิดการเย็นตัวลงของฟิล์มด้วยความเร็วสูงโดยที่ไม่เกิดการเสียรูปไปของลูกโป่ง ระบบนี้มีข้อดีคือทำให้ฟิล์มเย็นตัวลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับระบบ single-lip air ring สำหรับข้อเสียคือ ทำให้ฟิล์มเย็นตัวเฉพาะภายนอก

internal bubble การเย็นตัวของฟิล์มจะเกิดทั้งภายในและภายนอกฟิล์ม ซึ่งภายนอกฟิล์มจะเย็นตัวจากการใช้อุปกรณ์ที่ในแบบเดียวกับระบบ single-lip air ring และ dual-lip air ring คือวงแหวนลม แต่ระบบนี้จะมีการเพิ่มอุปกรณ์ forced convection air ทำให้ฟิล์มเย็นตัวภายใน โดยวิธีการนี้จะต้องรักษาความดันอากาศภายในลูกโป่งให้คงที่ ซึ่งจะใช้คอมพิวเตอร์ในการตรวจวัด และปรับค่าความดันของอากาศภายในลูกโป่งดังกล่าว ข้อดีของระบบนี้คือทำให้ฟิล์มเย็นตัวลงเร็วกว่า และยังได้ฟิล์มที่มีคุณภาพการผ่านแสงที่ดีกว่า อีกทั้งยังสามารถเป่าลมหล่อเย็นจากภายนอกด้วยความเร็วสูงได้เนื่องจากมีการควบคุมความดันภายในลูกโป่งคงที่ และยังได้ผลผลิตสูงกว่าการหล่อเย็นภายนอกอย่างเดียว 30-50% ซึ่งข้อเสียของระบบนี้คือราคาอุปกรณ์แพงมาก

tubular water bath คือการใช้น้ำในการทำให้ฟิล์มเกิดการเย็นตัวซึ่งโดยส่วนมากจะให้กับวิธีการเป่าลม วิธีการนี้มีข้อดีคือเกิดการเย็นตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้น สามารถควบคุมอัตราการพองของลูกโป่ง (blow up ratio หรือ BUR) ได้ดี อีกทั้งยังเป็นการเกิดการเย็นตัวที่เร็วทำให้พอลิเมอร์กึ่งผลึกมีผลึกขนาดเล็ก ดังนั้นฟิล์มที่ได้จะมีความเหนียว (toughness) ความยืดหยุ่นและความใสมากขึ้น ซึ่งระบบนี้สามารถทำงานกับพลาสติกที่มีความหนืดต่ำได้ สำหรับข้อเสียของระบบนี้คือ เกิดการรั่วซึมของน้ำได้ อีกทั้งค่าอัตราการพองของลูกโป่งมีค่าที่ตายตัวปรับเปลี่ยนไม่ได้ ส่วนมากการนำไปใช้งานจะพัฒนาเพื่อใช้กับพอลิโพรพิลีนหรือใช้กับพลาสติกอื่นที่มีค่าความแข็งแรงในขณะหลอมเหลว (melt strength) ต่ำ

2.4.1.4 หน่วยดึง (take-off unit) เป็นหน่วยที่ทำให้ฟิล์มเป่าเกิดการจัดเรียงตัวไปในแนวแกนของเครื่องจักร ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มเป่าในแนวแกนของเครื่องจักรนั่นเอง โดยอุปกรณ์และหน้าที่ของอุปกรณ์แต่ละชนิดในหน่วยดึงจะแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 หน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในหน่วยดึง [28]

| อุปกรณ์ | หน้าที่ |
|---|--|
| ชุดบีบลูกโป่ง (guide rollers หรือ forming tent) | ประคองและปรับรูปร่างลูกโป่งให้แบนลงเพื่อเข้าหาลูกกลิ้งหนีบ |
| ลูกกลิ้งเหล็ก (steel nip roll) | ดึงฟิล์มพลาสติกให้ออกจากตาย |
| ลูกกลิ้งยาง (rubber nip roll) | หมุนไปตามการหมุนของลูกกลิ้งเหล็ก |

2.4.1.5 หน่วยม้วนเก็บ (winding unit) หน่วยม้วนเก็บจะทำหน้าที่ม้วนเก็บฟิล์มพลาสติกที่ออกมาจากหน่วยดึง โดยจะต้องควบคุมให้แรงดึง (tension) ที่กระทำบนฟิล์มพลาสติกมีค่าคงที่

2.4.1.6 หน่วยอื่นๆ (auxiliary unit) หน่วยอื่นๆ ในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม ได้แก่ หน่วยการควบคุมความหนา (gauging unit) ซึ่งจะทำหน้าที่วัดความหนาของฟิล์มที่ออกมาจากหน่วยดึงก่อนเข้าสู่หน่วยม้วนเก็บ หน่วยการเตรียมผิว (surface treatments unit) เพื่อเตรียมฟิล์มพลาสติกให้มีพื้นผิวที่เหมาะสมในการพิมพ์สีหรือการเชื่อมติดกับวัสดุอื่นๆ แสดงในตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 หน่วยอื่นๆในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มพลาสติก [28]

| หน่วย | อุปกรณ์ | หน้าที่ของอุปกรณ์ |
|---|-------------------|--|
| หน่วยการควบคุมความหนา (gauging unit) | beta gauge | ยิงรังสีผ่านฟิล์ม วัดความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านเพื่อหาความหนาของฟิล์ม |
| | capacitance gauge | วัดการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการประจุกระแสไฟฟ้าเพื่อหาความหนา |
| | magnetic gauge | วัดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก |
| หน่วยการเตรียมผิว (surface treatments unit) | corona discharge | ออกซิไดซ์ฟิล์มโดยความต่างศักย์ค่าสูง |
| | flame treatment | ออกซิไดซ์ฟิล์มโดยร้อนจากเปลวไฟ |

2.4.2 รูปแบบการเป่าฟิล์ม [27]

2.4.2.1 การเป่าลง วิธีการเป่าลงจะใช้กับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่ใหญ่มาก โดยจะใช้น้ำในการทำให้ฟิล์มเย็นตัว ดังนั้นฟิล์มจะใส เนื้อที่มีขนาดจำกัดจะเหมาะกับพลาสติกที่มีค่าดัชนีการไหล (melt flow index หรือ MFI) ค่อนข้างสูง โดยค่าดัชนีการไหลที่สูงแสดงว่าฟิล์มจะค่อนข้างเหลว และมีความแข็งแรงขณะหลอมเหลว (melt strength) ที่ต่ำ เช่นพอลิโพรพิลีน แต่ข้อเสียคือระบบยุ่งยากและไม่สะดวก

2.4.2.2 การเป่าขึ้น วิธีการเป่าขึ้นเป็นวิธีการโดยทั่วไปในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม โดยมีอัตราเร็วในการทำให้ฟิล์มเย็นตัวค่อนข้างช้าขึ้นอยู่กับความเร็ว และปริมาณของลม ดังนั้นอัตราการผลิตจะช้าตามไปด้วย โดยมีข้อเสียคือการเป่าขึ้นไปด้านบนจะต้องใช้พัดลมที่มีความสูงมาก

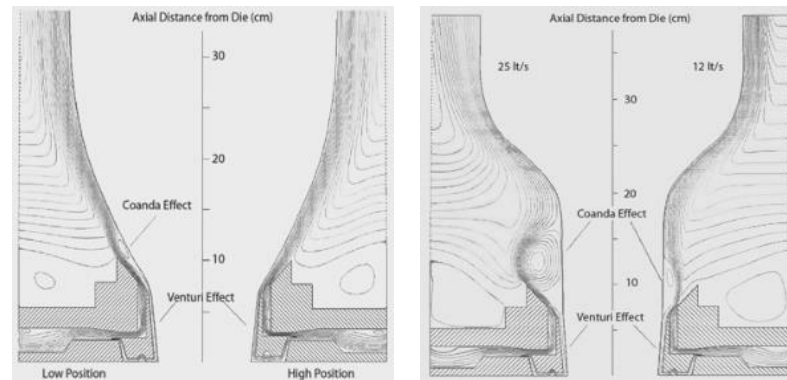
2.4.2.3 การเป่าในแนวนอน วิธีการเป่าในแนวนอนต้องมีสายพานในการรองรับไม่ให้ฟิล์มตกลงไปที่พื้น อีกทั้งอัตราการเย็นตัวจะไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้ากว้างฟิล์ม ดังนั้นในปัจจุบันจึงไม่ค่อยมีกระบวนการผลิตฟิล์มในแบบนี้เนื่องจากไม่ได้รับความนิยม

2.4.3 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม [28]

2.4.3.1 stalk height หมายถึง ระยะทางที่ฟิล์มพลาสติกรูปทรงกระบอกยืดออกมาจากตายก่อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะขยายตัวออกเนื่องจากแรงดันของลมภายใน ซึ่งมี 2 ประเภทคือ short stalk และ long stalk ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.9

short stalk หมายถึง ปรากฏการณ์ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งพลาสติกมีการขยายใหญ่ขึ้นมาทันทีที่ออกจากตายโดยจะเกิดกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

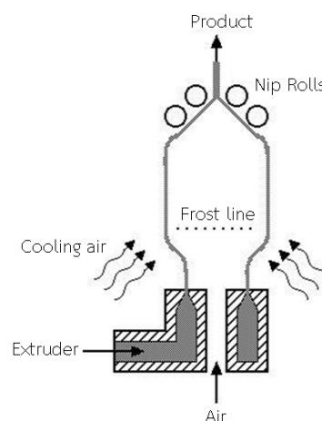
long stalk หมายถึง ปรากฏการณ์ที่ฟิล์มพลาสติกยืดออกมาจากตายเป็นคอประมาณ 15 ถึง 25 เซนติเมตรก่อนที่จะเกิดการขยายออกหรือพองตัวออกเป็นลูกโป่งใหญ่ๆ ทำให้เกิดความแข็งแรงของฟิล์มทั้งสองทิศทางคือแนวแกนของเครื่องจักรและแนวขวางแกนของเครื่องจักร ซึ่งช่วงที่ดึงต่อนแรกจะเป็นการจัดเรียงตัวหนึ่งทิศทาง (uniaxial orientation) ในแนวแกนของเครื่องจักร ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมาก ซึ่งจะเกิดกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเนื่องจากมีความสามารถในการดึงยืดออกมาค่อนข้างดี



รูปที่ 2.9 short stalk (ซ้าย) และ long stalk (ขวา) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม [30]

2.4.3.2 ความสูงของแนวเย็นตัว หรือ frost line height (FLH) หมายถึง ขอบรูปวงแหวนบนฟิล์มพลาสติกที่ออกจากตายที่เริ่มเปลี่ยนจากพลาสติกหลอมเหลว (จะมองดูใส) เป็นฟิล์มพลาสติกที่แข็งตัวแล้ว (ขุ่น) ซึ่งจะขยายขนาดไม่ได้แล้ว ถ้าจะขยายขนาดอีกจะเป็นการยืดของเนื้อของแข็ง เป็นตำแหน่งที่ลูกโป่งขยายตัวได้มากที่สุด ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายของฟิล์มเป็นตัวบ่งชี้ที่ใช้บอกคุณภาพของระบบการผลิต โดยความสูงของแนวเย็นตัวจะต้องมีความสูงที่เท่าเดิมตลอดหากภาวะกระบวนการขึ้นรูปเหมือนเดิม หากตำแหน่งของความสูงของแนวเย็นตัวเปลี่ยนไป เช่น สูงขึ้นหมายความว่า มีการเย็นตัวช้า การหล่อเย็นช้าลง อุณหภูมิลดลง เป็นต้น

ความสูงของแนวเย็นตัว (รูปที่ 2.10) เป็นผลของค่าอัตราเร็วการเย็นตัว โดยผลของอัตราเร็วการเกิดผลึกควบคุมโดย ความเร็วของลม อุณหภูมิของลม อัตราการเย็นตัวที่ช้าๆ ผลคือฟิล์มแข็งแรงขึ้น แต่ความใสลดลง ทำให้เกิดการเลือนหายไปของรอยที่เกิดจากตาย spider arm ผลคือฟิล์มมีความมันวาวมากขึ้นและลักษณะพื้นผิวเรียบมากขึ้น เพิ่มการเกิดการเชื่อมติดกันของฟิล์มในขณะม้วนเก็บ



รูปที่ 2.10 ความสูงของแนวเย็นตัว (FLH) จากกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม [31]

2.4.3.3 อัตราการพองของลูกโป่ง blow up ratio (BUR) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง (D_{bubble}) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตาย (D_{die}) ซึ่งโดยทั่วไป ค่าอัตราการพองของลูกโป่งของการเป่าฟิล์มจะมีค่าอยู่ในช่วง 2:1 - 6:1 ซึ่งการวัดการยืดออกของพลาสติกหลอมเหลวในทิศทางตั้งฉากกับการไหลออกจากตายหาได้จากสมการที่ (2.1) [28] ดังนี้

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

เมื่อ

BUR คือ อัตราการพองของลูกโป่ง

D_{bubble} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง

D_{die} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตาย

LFW คือ ความกว้างของฟิล์มพลาสติกที่พับแล้ว

โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการพองของลูกโป่งเมื่ออัตราการดึงยืดฟิล์มคงที่ (รูปที่ 2.11 คอลัมน์ที่หนึ่ง) จะส่งผลให้ความกว้างของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มลดลง ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง แต่ความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

2.4.3.4 อัตราการดึง draw down ratio (DDR) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วในการดึงยืดของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้งหรือหน่วยดึงกับความเร็วของการอัดรีด ซึ่งการวัดอัตราการดึงจะเป็นการวัดการยืดออกของพลาสติกหลอมเหลวในทิศทางการดึงของลูกกลิ้ง โดยจะหาได้จากสมการที่ 2.2 [28] ต่อไปนี้

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

เมื่อ

DDR คือ อัตราการดึง

$V_{take-off}$ คือ ความเร็วในการดึงยืดของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้งหรือหน่วยดึง

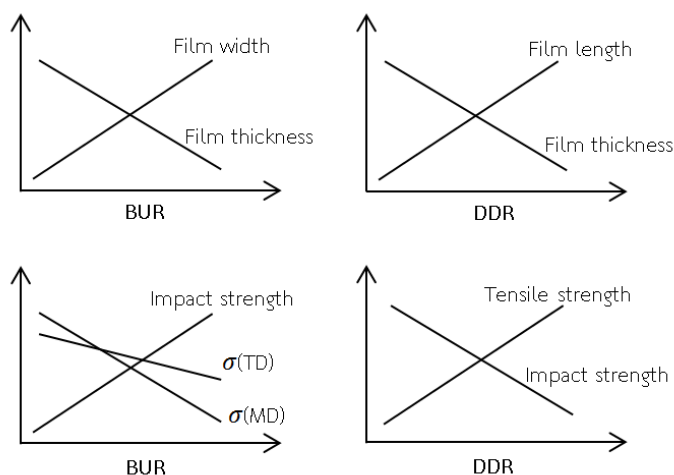
V_{die} คือ ความเร็วของการอัดรีด

H_{die} คือ ความกว้างของตาย

H_{film} คือ ความหนาของฟิล์ม

BUR คือ อัตราการพองของลูกโป่ง

โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการดึงเมื่ออัตราการพองของลูกโป่งคงที่ (รูปที่ 2.11 คอลัมน์ที่สอง) จะส่งผลให้ความยาวของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มลดลง ความแข็งแรงของฟิล์มในแนวแกนของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นแต่ความทนทานต่อแรงกระแทกของฟิล์มจะลดลง



รูปที่ 2.11 ผลกระทบจากอัตราการพองของลูกโป่ง (BUR) และอัตราการดึง (DDR) [28]

2.4.3.5 blocking หมายถึง การที่ฟิล์มพลาสติกติดกันทางความร้อนตรงบริเวณผิวด้านนอก เป็นผลเนื่องมาจากในขณะที่ม้วนเก็บฟิล์มพลาสติกยังร้อนเกินไปจึงเกิดการเชื่อมติดกันด้วยความร้อนซึ่งไม่ได้ติดกันเป็นเนื้อเดียวแต่จะติดกันแค่บริเวณผิวฟิล์มพลาสติก โดยทั่วไปสาเหตุของการติดกันของฟิล์มพลาสติกอาจมีสาเหตุมาจากการติดกันทางความร้อน การติดกันทางไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งสามารถเกิดได้เนื่องจากการถูฟิล์มกับเหล็ก ดังนั้นอาจทำการเติมสารป้องกันไฟฟ้าสถิตย์เพื่อลดการติดกันของฟิล์ม

2.4.3.6 slip characteristics หมายถึง การลื่นไปมาของฟิล์มพลาสติกเมื่อถูแผ่นฟิล์มพลาสติกในม้วนเก็บ

2.4.4 ข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม [2]

ข้อดีของกระบวนการเป่าฟิล์มคือ ได้ฟิล์มที่มีหน้ากว้างมาก เช่น พลาสติกคลุมบ่อพลาสติกคลุมหน้าดิน เป็นที่นิยมมากเพราะสามารถทำได้ง่าย สะดวก ไม่ยุ่งยาก มีต้นทุนที่ต่ำ ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวสองทิศทาง แต่มีข้อเสียคือ ต้องควบคุมความหนาจากปริมาณลมและความดันเท่านั้น

2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ CaCO_3) [32]

ปัจจุบันมีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการเป็นสารตัวเติม (fillers) เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เพราะแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคอ่อน ไม่เกิดการขีดสีเครื่องจักร ไม่เป็นพิษ และทนความร้อนได้ถึง 600°C แคลเซียมคาร์บอเนตจะมีอยู่ 2 ชนิด คือชนิดที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ [32]

| รูปแบบ | ความหนาแน่น (g/cm ³) | ดัชนีหักเหแสง | การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (%) | | | | | | |
|--|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-------------|
| | | | CaCO ₃ | MgCO ₃ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | MnO |
| แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ (Natural calcium carbonate) | | | | | | | | | |
| ชอล์ก | 2.7 | 1.5 | 95-99 | 3-5 | 0-0.8 | 0.25 | 0.25 | | 0.01 |
| หินปูน | 2.71 | 1.5- 1.65 | 98-99.5 | 1-2 | 0.45 | 0.02- 0.06 | 0.02- 0.06 | | น้อย มาก |
| แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ (Precipitated calcium carbonate หรือ PCC) | | | | | | | | | |
| ไม่เคลือบผิว | 2.65 | 1.49 | 98.5-99 | | | | 0.04 | 0.8 | 2 |
| เคลือบผิว | 2.55 | 1.49 | | | | | | | |

2.5.1 แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ (Natural calcium carbonate)

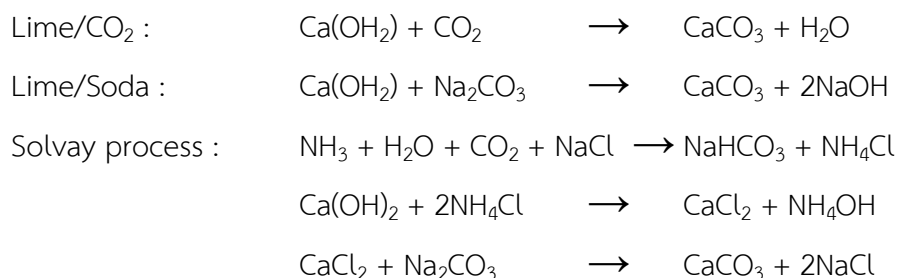
แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติมีอยู่ 2 ชนิด คือ ชอล์ก (chalk) ซึ่งเป็นตะกอนที่ได้จากซากของสัตว์ทะเลเล็กๆ และหินปูน (limestone) ทั้งนี้แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติที่ผ่านการบดและเหมาะสมเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ ควรมีสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติที่เหมาะสมในการใช้เป็นสารตัวเติม [32]

| สมบัติ | ค่าที่เหมาะสม |
|--|--------------------------------------|
| ปริมาณความชื้น | ไม่เกิน 0.3% |
| ความหนาแน่น | ไม่เกิน 2.7 g/cm ³ |
| ความแข็ง (Mohs hardness) | 3 |
| ความขาว (degree of whiteness) | 85 - 95% |
| pH | 9.0 - 9.5 |
| การดูดซับน้ำมัน (oil absorption) ASTM D281 | 9 - 21 g oil/100 g CaCO ₃ |
| DOP Number ASTM D281 | 9 - 33 g DOP/100 g CaCO ₃ |
| พื้นที่ผิวหน้า (surface area) | 1 - 15 m ² /g |

2.5.2 แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ (Precipitated calcium carbonate หรือ PCC)

แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ที่ได้จากการนำปูนขาว (Calcium hydroxide หรือ Ca(OH)_2) ไปตกตะกอนโดยการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ซึ่งสามารถทำได้ 3 วิธี คือ



ในการนำแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งชนิดที่ได้จากธรรมชาติและชนิดที่ได้จากการสังเคราะห์ไปใช้กับพอลิเมอร์ มักปรับแต่งหรือเคลือบพื้นผิวด้วยกรดไขมัน (fatty acid) เช่น กรดสเตียริก เพื่อช่วยให้แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถกระจายตัวได้ดี นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิวยังช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์อีกด้วย โดยสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติและแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ได้ถูกเปรียบเทียบในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติและสังเคราะห์

| สมบัติ | แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ | แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ |
|----------------------|--|---|
| ความบริสุทธิ์ทางเคมี | สูง ไม่มีไอออนของโลหะหนักปนเปื้อน | มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูงมาก |
| ราคา | ถูกกว่า และหาง่าย | แพงกว่า |
| พื้นที่ผิวหน้า | น้อย จึงไม่ค่อยดูดซับพลาสติกไฮเซอรและสารเติมแต่งอื่นๆ จึงสามารถใช้ในปริมาณสูงได้ | สูง จึงดูดซับพลาสติกไฮเซอรและสารเติมแต่งอื่นๆ สูงกว่า จึงไม่สามารถใช้ในปริมาณสูงได้ |
| ความขาว | สูง จึงสามารถใช้แทนผงสีสีขาวที่มีราคาแพงได้บางส่วน | สูงกว่า (degree of whiteness ประมาณ 95-96%) |
| ขนาดอนุภาค | หลากหลายเนื่องจากกระบวนการบด | เล็กกว่าและสามารถผลิตให้มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกันได้ |
| อื่นๆ | ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกปรับปรุงคุณภาพที่ผิว เกิดการแยกตัวของสารเติมแต่งน้อยลง การหดตัวน้อยลง ไม่เกิดการจับกันเป็นก้อน | ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งตึง (stiffness) สูง มีอิลาสติคโมดูลัสสูง และมีความทนแรงกระแทกสูง อีกทั้งมีความเงาที่พื้นผิวสูงด้วย |

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าสิทธิบัตร [5] แสดงถึงความเป็นไปได้ของการเตรียมฟิล์มพอลิโพรพิลีนชนิดรูพรุนขนาดเล็กด้วยการใช้สารตัวเติมชนิดมีเนอรัลลอยด์ พาราฟินแว็กซ์ หรือปิโตรเลียมเจลลี่ ซึ่งจากการศึกษาทำให้พบว่าเมื่อปริมาณมีเนอรัลลอยด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเป็นรูพรุนและขนาดของรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณมีเนอรัลลอยด์ที่มากกว่าร้อยละ 55 โดยน้ำหนักจะทำให้ฟิล์มมีความอ่อนนุ่มมากเกินไป โดยกลไกการเกิดรูพรุนจากสารเติมแต่งที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันจะเกิดจากการที่น้ำมันสามารถแทรกอนุภาคเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ได้ ดังนั้นเมื่อเกิดการดึงยึดจึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์แยกออกจากกันและเกิดเป็นรูพรุน

Mizutani และคณะ [4] ทดลองเตรียมแผ่นซีทจากพอลิโพรพิลีนที่ผสมสารเติมแต่งชนิดแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ CaCO_3) หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide หรือ SiO_2) โดยกระบวนการอัดรีด (extrusion process) ในการผสมและกระบวนการอัด (compression process) ในการขึ้นรูปตามลำดับ จากผลงานวิจัยพบว่าแผ่นซีทที่เตรียมได้มีความเป็นรูพรุนและขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเตรียมจากคอมพาวนด์ที่มีปริมาณของสารเติมแต่งสูงขึ้น ทั้งนี้ปริมาณสารตัวเติมสูงสุดที่ใช้คือร้อยละ 68 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคของสารเติมแต่งส่งผลต่อลักษณะของรูพรุนโดยแผ่นซีทที่เตรียมด้วยสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กและมีความเป็นรูพรุนที่สูง ผลการศึกษายังสรุปได้ว่าชนิดของอนุภาคที่ใช้ในการศึกษานี้ไม่ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนและความเป็นรูพรุน แต่ปัจจัยหลักคือขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมและระดับการดึงยึด โดยกลไกการเกิดรูพรุนนั้นเกิดมาจากความไม่แข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสอนุภาคของสารตัวเติมและพอลิโพรพิลีน เมื่อดึงยึดแผ่นซีทจึงทำให้เกิดการแยกออกจากกันตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสและเกิดเป็นรูพรุนของแผ่นซีทตรงบริเวณดังกล่าวตลอดทั้งภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มที่มีอนุภาคแทรกตัวอยู่ อย่างไรก็ตามการเพิ่มระดับการดึงยึดส่งผลต่อสมบัติอื่นๆ ของแผ่นซีทด้วยเช่น ความหนาของซีทมีค่าลดลง ความหนาแน่นของซีทมีค่าลดลง รวมถึงความแข็งแรงของซีทมีค่าลดลงอีกด้วยซึ่งงานวิจัยได้ชี้ให้เห็นถึงสมบัติเชิงกลของซีทที่ผ่านการดึงยึดหนึ่งและสองทิศทางว่าแผ่นซีทที่มีการดึงยึดสองทิศทางจะสามารถควบคุมสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้จากการให้ระดับการดึงยึดที่เหมาะสม

นอกจากการเกิดโพรงหรือรูพรุนด้วยการใช้สารเติมแต่งแล้ว ยังมีรายงานว่า การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของพอลิโพรพิลีนยังสามารถทำให้ได้โครงสร้างของโพรงหรือรูพรุนได้เช่นกันโดย Chu และคณะ [10] ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนที่เติมสารก่อผลึกปีทาพบว่าความเป็นรูพรุนจะสอดคล้องกับปริมาณของผลึกปีทา โดยฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีเฟสปีทาอยู่มากจะส่งผลให้มีความเป็นรูพรุนมาก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเป็นรูพรุนจะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น

ขึ้นเมื่ออุณหภูมิการตกผลึก (crystallization temperature) มีค่าสูง และอุณหภูมิการดึงยืด (drawing temperature) มีค่าต่ำ งานวิจัยต่อเนืองของ Chu และคณะ [11] ได้อธิบายไว้ว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นผลของกระบวนการเปลี่ยนรูปจากผลึกบีทาไปเป็นแอลฟาซึ่งมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยความหนาแน่นของเฟสบีทาคือ 0.921 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของเฟสแอลฟาคือ 0.936 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อย่างไรก็ตามยังมีอีกสมมติฐานในการเกิดรูพรุนขนาดเล็กของฟิล์มพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นผลงานวิจัยต่อเนืองอีกฉบับของ Chu และ Kimura [12] ได้อธิบายถึงกลไกของการเกิดรูพรุนขนาดเล็กของฟิล์มบีทาพอลิโพรพิลีนว่าเมื่อฟิล์มพอลิโพรพิลีนได้รับแรงดึง จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างของสเฟียรูไลต์ (spherulite) ไปเป็นลามลลา (lamella) หากได้รับแรงดึงที่มากขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนไปเป็นไฟบริลลา (fibrilla) ในที่สุด เมื่อโครงสร้างของผลึกมีความเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบดังกล่าวจึงเป็นต้นเหตุทำให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้น

Li และคณะ [13] ได้รายงานถึงสารก่อผลึกบีทาประเภทเกลือของแคลเซียม ได้แก่แคลเซียมซัคซิเนต (Calcium succinate) แคลเซียมแอดิเพต (Calcium adipate) แคลเซียมพิเมเลต (Calcium pimelate) แคลเซียมซูเบอร์เรต (Calcium suberate) แคลเซียมซีบาเคต (Calcium sebacate) แคลเซียมฟทาเลต (Calcium phthalate) และแคลเซียมเทเรฟทาเลต (Calcium terephthalate) เมื่อทดลองใช้สารในกลุ่มดังกล่าวในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่าเกลือของแคลเซียมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการเป็นสารก่อผลึกบีทาคือสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกบีทาได้มากซึ่งวิเคราะห์จากเทคนิค X-ray diffraction คือแคลเซียมพิเมเลต แคลเซียมฟทาเลต และแคลเซียมซูเบอร์เรต ทั้งนี้ผลการศึกษานี้ทำให้เชื่อว่าสารก่อผลึกบีทาควรมีระยะห่างภายในโครงสร้างระหว่าง 11 - 13 อังสตรอม

Li และ Cheung [14] ได้เสนอแนวทางการเตรียมสารก่อผลึกบีทาชนิดแคลเซียมพิเมเลต โดยการละลายพิเมลิกแอซิด (Pimelic acid) ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ที่เป็นสารละลายอิ่มตัว โดยจะผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยโมลซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก ทำได้เร็ว และได้ผลผลิตที่มีร้อยละผลได้ที่มีค่ามาก

Trongtorsak และคณะ [15] ได้ศึกษาผลกระทบของสารก่อผลึกพอลิโพรพิลีน ได้แก่โซเดียมเบนโซเอต (Sodium benzoate) ทัลคัม (Tulcum) ไดเมทิลเบนซิลซอร์บิทอล (Dimethyldibenzylsorbital) และแคลเซียมพิเมเลต ต่อสมบัติการดึงยืดและความต้านทานต่อแรงกระทำของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีด (Injection molding) จากการศึกษาพบว่าค่าการทนแรงดึงของชิ้นงานทั้งหมดใกล้เคียงกัน แต่สมบัติความต้านทานต่อแรงกระทำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยแคลเซียมพิเมเลต จะมีค่ามากที่สุด

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารก่อผลึกแคลเซียมซูเบอเรต พิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนและฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต มีดังต่อไปนี้

3.1.1 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide)

เกรด ACS reagent $\geq 95.0\%$

บริษัทผู้ผลิต Sigma-Aldrich

3.1.2 ซูเบอริกแอซิด (Suberic acid)

เกรด 98%

บริษัทผู้ผลิต Sigma-Aldrich

3.1.3 พอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene)

เกรด Moplen HP741H

บริษัทผู้ผลิต HMC Polymers

3.1.4 มีเนอรัลออยล์ (Mineral oil)

เกรด CitationTM 90 NF Grade

บริษัทผู้ผลิต Avatar Corporation

3.1.5 แคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบตช์ (Calcium carbonate masterbatch)

เกรด POLYCAL CM 8E (CaCO₃ 80% LDPE 20%)

บริษัทผู้ผลิต Thai Poly Chemicals

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 ชุดเครื่องแก้วและเครื่องมือสำหรับการเตรียมสารก่อผลึกแคลเซียมซูเบอเรตและพอลิโพรพิลีนคอมพาวนด์

- เครื่องชั่งไฟฟ้าสองตำแหน่ง (Balance) ของ CHAUS[®] รุ่น Scout Pro SPS402F
- เครื่องชั่งไฟฟ้าสี่ตำแหน่ง (Balance) ของ Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT
- เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrers) ของ IKA[®] รุ่น color squid [White]
- เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plates stirrers) ของ IKA[®] รุ่น C-MAG HS 7
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิสาร (Temperature control) ของ IKA[®] รุ่น ETS-D5

- ชุดเครื่องกรองบูชเนอร์ (Buchner)
- ปัมสุญญากาศ (Circulating aspirator) ของ Sibata รุ่น WJ-20
- ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven) ของ Binder รุ่น VD23
- ตู้อบให้ความร้อน (Oven) ของ Lab tech รุ่น LDO-030E

3.2.2 เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยรังสี (Infrared thermometer) ของ Cason รุ่น CA380

3.2.3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิการเกิดผลึก (Hot stage) ของ Mettler Toledo รุ่น FP90 Central processor และ FP82HT Hot stage

3.2.4 เครื่องอัดแบบ (Compression moulding) ของ Lab tech รุ่น V508-18-CX

3.2.5 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) ของ Lab tech รุ่น LF-400-COEX

3.2.6 เครื่องมือสำหรับการดึงยืดฟิล์ม (Uniaxial orientation) ใช้การประยุกต์ของเครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

3.3.1 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ของ BRUKER รุ่น ALPHA

3.3.2 Wide Angle X-ray Diffractometer (WAXD) ของ BRUKER รุ่น AXS Diffraktometer D8

3.3.3 Scanning Electron Microscope (SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

3.3.4 Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของ NETZSCH รุ่น DSC 204 F1

3.3.5 Thermogravimetric analyzer (TGA) ของ NETZSCH รุ่น TG 209 F3

3.3.6 Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมสารก่อผลึกแคลเซียมซูเบอร์เรต [14]

เตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 37 กรัม/ลิตร และสารละลายซูเบอร์ริกแอซิดที่มีความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร จากนั้นนำสารละลายทั้งสองผสมเข้าด้วยกันโดยใช้อัตราส่วน 1:1 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 60°C พร้อมกับการกวนเป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งสารที่ทำการผสมทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรอง ล้าง และอบตะกอนแคลเซียมซูเบอร์เรตที่อุณหภูมิ 60°C

3.4.2 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพาวนด์

คอมพาวนด์ที่เตรียมในการศึกษานี้คือ

- พอลิโพรพิลีน/มิเนอรัลลอยด์คอมพาวนด์ (PO)
- พอลิโพรพิลีน/แคลเซียมคาร์บอเนตคอมพาวนด์ (PC)
- พอลิโพรพิลีน/มิเนอรัลลอยด์/แคลเซียมคาร์บอเนตคอมพาวนด์ (POC)
- พอลิโพรพิลีน/มิเนอรัลลอยด์/แคลเซียมซูเบอเรตคอมพาวนด์ (POS)
- พอลิโพรพิลีน/แคลเซียมซูเบอเรตคอมพาวนด์ (PS)

การเตรียม PO POS และ PS คอมพาวนด์นั้นมีรายละเอียดของขั้นตอนที่คล้ายกัน คือ อบเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนในตูบที่อุณหภูมิ 160°C เป็นระยะเวลา 55 นาที ผสมมิเนอรัลลอยด์และแคลเซียมซูเบอเรตปริมาณที่ต้องการ (ตารางที่ 3.1) แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130°C เป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นเติมเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่อบแล้วในสัดส่วนที่ต้องการลงไป รोजนเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนดูดซับมิเนอรัลลอยด์เข้าไปจนหมด ซึ่งสำหรับ PS คอมพาวนด์จะใช้มิเนอรัลลอยด์ปริมาณร้อยละ 1 ให้เกิดการดูดซึมแคลเซียมซูเบอเรตในพอลิโพรพิลีน ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นจึงใช้สัญลักษณ์ $PS_{0.5}$ (ตารางที่ 3.1) แทนสูตรการผสมดังกล่าว

การเตรียม PC และ POC คอมพาวนด์นั้น สำหรับสูตร PC คอมพาวนด์ซึ่งไม่มีการเติมมิเนอรัลลอยด์จะสามารถผสมเม็ดแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์กับพอลิโพรพิลีนโดยใช้การเขย่าในถุงที่เตรียมไว้ได้ ในขณะที่สูตรที่มีการเติมมิเนอรัลลอยด์ก็จะเตรียม PO คอมพาวนด์ตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว จากนั้นจึงนำมาผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์โดยใช้การผสมโดยการเขย่าในถุงซึ่งเตรียมไว้ ตามสัดส่วนที่ระบุในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนองค์ประกอบและสัญลักษณ์ของสูตรการผลิตฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

| คอมพาวนด์ | สัดส่วนองค์ประกอบ | | | | สัญลักษณ์ |
|-----------|-------------------|---------------|-------------------|------------------|-----------------------------------|
| | พอลิโพรพิลีน | มิเนอร์ลออยล์ | แคลเซียมคาร์บอเนต | แคลเซียมซูเบอเรต | |
| PO | 90 | 10 | 0 | 0 | PO ₁₀ |
| | 80 | 20 | 0 | 0 | PO ₂₀ |
| | 70 | 30 | 0 | 0 | PO ₃₀ |
| | 60 | 40 | 0 | 0 | PO ₄₀ |
| PC | 90 | 0 | 10 | 0 | PC ₁₀ |
| | 80 | 0 | 20 | 0 | PC ₂₀ |
| | 70 | 0 | 30 | 0 | PC ₃₀ |
| POC | 70 | 30 | 20 | 0 | PO ₃₀ C ₂₀ |
| POS | 90 | 10 | 0 | 0.5 | PO ₁₀ S _{0.5} |
| | 80 | 20 | 0 | 0.5 | PO ₂₀ S _{0.5} |
| | 70 | 30 | 0 | 0.5 | PO ₃₀ S _{0.5} |
| | 60 | 40 | 0 | 0.5 | PO ₄₀ S _{0.5} |
| | 70 | 30 | 0 | 1.0 | PO ₃₀ S _{1.0} |
| PS | 99 | 1 | 0 | 0.5 | PS _{0.5} |

3.4.3 การเตรียมฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

ขึ้นรูป PO POC POS และ PS คอมพาวนด์ที่เตรียมได้ในข้อ 3.4.2 โดยควบคุมตัวแปรของเครื่อง Blown film extruder (รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2) ตามที่ระบุในตารางที่ 3.2 (ภาวะ a) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมมิเนอร์ลออยล์ สารก่อผลึกแคลเซียมซูเบอเรต รวมถึงภาวะที่ใช้ขึ้นรูป ได้แก่ ความเร็วลมหล่อเย็น (blower speed) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเป่าที่ได้

ขึ้นรูป PC คอมพาวนด์ด้วยเครื่อง Blown film extruder ตามภาวะ b ที่ระบุในตารางที่ 3.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต รวมถึงศึกษาอิทธิพลของภาวะที่ใช้ขึ้นรูป ได้แก่ ความเร็วลมหล่อเย็นและความเร็วรอบสกรู (screw speed) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเป่าที่ได้

ขึ้นรูปฟิล์มเป่า PP_a และ PP_b ซึ่งเตรียมด้วยภาวะ a และ b ตามลำดับ (ตารางที่ 3.2) เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่าที่เตรียมด้วยคอมพาวนด์ชนิดต่างๆ

ระหว่างการขึ้นรูป จะทำการวัดอุณหภูมิของฟิล์มเป่าด้วยเครื่อง Infrared thermometer เมื่อผ่านออกมาจากสายแบบวงแหวนที่ระยะความสูง 0 11 27 42 และ 56 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.2 ภาวะการขึ้นรูปของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพลีตด้วยกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์ม

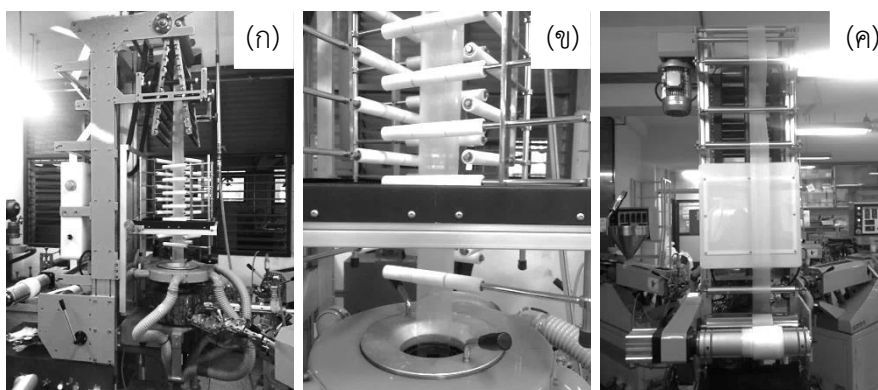
| ภาวะการขึ้นรูป | a* | b** | หน่วย |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------|
| อุณหภูมิโซน 1 (ฮอบเปอร์) | 190 | 200 | °C |
| อุณหภูมิโซน 2 (บาเรล) | 190 | 200 | °C |
| อุณหภูมิโซน 3 (บาเรล) | 200 | 210 | °C |
| อุณหภูมิโซน 4 (บาเรล) | 200 | 210 | °C |
| อุณหภูมิโซน 5 (ดายทรงกลม) | 200 | 210 | °C |
| อุณหภูมิโซน 6 (ข้อต่อ) | 200 | 210 | °C |
| อุณหภูมิโซน 7 (ดายแผ่นล่าง) | 200 | 210 | °C |
| อุณหภูมิโซน 8 (ดายแผ่นกลาง) | 200 | 210 | °C |
| อุณหภูมิโซน 9 (ดายแผ่นบน) | 200 | 210 | °C |
| อุณหภูมิโซน 10 (ดายวงแหวน) | 200 | 210 | °C |
| ความเร็วรอบสกรู | 20 | 10 และ 20 | rpm |
| ความเร็วลูกกลิ้งหนีบ | 1.5 | 1.2 และ 1.5 | m/min |
| ความเร็วลูกกลิ้งม้วนเก็บ | 2.5 | 2.2 และ 2.5 | m/min |
| ความเร็วลมหล่อเย็น | 400 700 และ 1,000 | 400 700 และ 1,000 | rpm |

หมายเหตุ *a คือ ค่าภาวะการขึ้นรูปฟิล์มเป่า POPOC POS และ PS

**b คือ ค่าภาวะการขึ้นรูปฟิล์มเป่า PC



รูปที่ 3.1 เครื่อง Blown film extruder ของ Lab tech รุ่น LF-400-COEX



รูปที่ 3.2 ลักษณะฟิล์มที่ออกมาจากตายวงแหวนของเครื่อง Blown film extruder
ลักษณะโดยรวม (ก) บริเวณปากตายวงแหวน (ข) บริเวณหน่วยม้วนเก็บ (ค)

3.4.4 การศึกษาประสิทธิภาพของสารก่อผลึกแคลเซียมซูเบอร์เรต

ก่อนการศึกษาประสิทธิภาพของแคลเซียมซูเบอร์เรตในการเป็นสารก่อผลึกบีทาให้กับฟิล์มเป่า POS และ PS งานวิจัยนี้ได้ทดลองเบื้องต้นกับแผ่นซีทที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression moulding (รูปที่ 3.3) โดยภาวะที่ใช้ขึ้นรูปแผ่นซีททั้งสามชนิดเป็นไปตามที่ระบุในตารางที่ 3.3 จากนั้นนำแผ่นซีทดังกล่าวไปเตรียมให้เกิดผลึกด้วยเครื่อง Hot stage (รูปที่ 3.4) ด้วยอุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 40 นาที [10] เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติความเป็นผลึกด้วย WAXD และสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ซึ่งแผ่นซีทที่เตรียมจะมีความหนาประมาณ 0.30 มิลลิเมตร

ในการศึกษาประสิทธิภาพการเป็นสารก่อผลึกบีทาให้แก่ฟิล์มเป่า นั้น ทำการศึกษาทั้งฟิล์มเป่า POS และ PS ตามสัดส่วนในตารางที่ 3.1 โดยทำการศึกษสมบัติของฟิล์มเป่า PS ด้วยการเตรียมให้เกิดผลึกโดย Hot stage (อุณหภูมิ 110°C ระยะเวลา 40 นาที) เพื่อวิเคราะห์สมบัติความเป็นผลึกด้วย WAXD

ตารางที่ 3.3 ภาวะการขึ้นรูป PP_c , PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ คอมพาวนด์ด้วยกระบวนการอัด

| ภาวะการขึ้นรูป | ค่า | หน่วย |
|----------------------------------|-----|-------|
| ระยะเวลาการให้ความร้อนก่อนการอัด | 300 | sec |
| ระยะเวลาก่อนการอัด | 5 | sec |
| ระยะเวลาการอัด | 600 | sec |
| ระยะเวลาการเย็นตัว | 600 | sec |
| อุณหภูมิ | 185 | °C |
| ความดัน | 25 | bar |



รูปที่ 3.3 เครื่อง Compression moulding
ของ Lab tech รุ่น V508-18-CX



รูปที่ 3.4 เครื่อง Hot stage ของ Mettler Toledo
รุ่น FP90 Central processor และ FP82HT Hot stage

3.4.5 การดึงยืดฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต

ตัดฟิล์มเป่าตามแนว MD เป็นชิ้นขนาด 25×100 mm² แล้วนำมาดึงยืด (orientation) ตามแนว MD ด้วยเครื่อง Universal testing machine ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยใช้ load cell ขนาด 100 N ทั้งนี้อัตราเร็วของการดึงยืดคือ 50 mm/min และระดับการดึงยืดที่ต้องการคือ 100 200 และ 300% โดยจะทำการดึงยืดฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตชนิดละ 15 ชิ้น เพื่อนำไปตรวจสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติความเป็นรูพรุนและสัณฐานวิทยา



รูปที่ 3.5 การดึงยืดฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิต
ด้วยเครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K

3.5 การวิเคราะห์สมบัติของแคลเซียมซูเบอเรตและฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมได้

3.5.1 โครงสร้างทางเคมี

ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแคลเซียมซูเบอเรตที่เตรียมได้ด้วย FTIR (รูปที่ 3.6) พร้อมทั้งบันทึกการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น 500 ถึง 4,000 โดยทำทั้งหมด 64 scan และเตรียมตัวอย่างโดยทำการอัดผสมกับ KBr



รูปที่ 3.6 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ของ BRUKER รุ่น ALPHA

3.5.2 โครงสร้างผลึกและความเป็นผลึก

ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของแคลเซียมซูเบอเรตที่เตรียมได้ และฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตด้วยเครื่อง WAXD (รูปที่ 3.7) โดยใช้ Cu-K α ที่ความยาวคลื่น 1.541 อังสตรอม อัตราเร็วของการสแกนคือ 2.4°/min ในช่วง 2 θ ระหว่าง 3 ถึง 30° หรือ 60° กรณีฟิล์มเป่า PC และ POC โดยระดับความเป็นผลึก (%crystallinity หรือ X_c) สามารถคำนวณด้วยสมการที่ (3.1) [10] คือ

$$X_c = \frac{\sum A_{(hkl)}}{\sum A_{(hkl)} + A_a} \times 100\% \quad \text{สมการที่ (3.1)}$$

เมื่อ

X_c คือ ระดับความเป็นผลึก (%crystallinity)

$A_{(hkl)}$ คือ พื้นที่ของระนาบ (hkl) (area of the (hkl) plane)

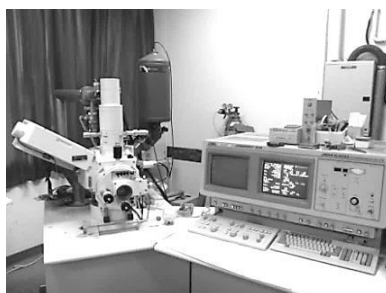
A_a คือ พื้นที่ของเฟสอสัณฐาน (area of amorphous phase)



รูปที่ 3.7 เครื่อง Wide Angle X-ray Diffractometer ของ BRUKER รุ่น AXS Diffraktometer

3.5.3 สัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของแคลเซียมซูเบอเรตที่เตรียมได้ และการกระจายตัวของรูพรุนบริเวณพื้นผิวฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตก่อนและหลังการดัดด้วยเครื่อง SEM (รูปที่ 3.8) ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลวัตต์



รูปที่ 3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope ของ JEOL รุ่น JSM-6400

3.5.4 สมบัติทางความร้อน

วิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature หรือ T_g) อุณหภูมิการหลอมผลึก (melting temperature หรือ T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature หรือ T_c) และระดับความเป็นผลึก (%crystallinity หรือ X_c) ของแคลเซียมซูเบอเรตที่เตรียมได้และฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตด้วยเครื่อง DSC (รูปที่ 3.9) โดยใช้อัตราเร็ว $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิการทดสอบระหว่าง -60°C ถึง 200°C โดยใช้ในการทดสอบแบบ heat-cool-heat ซึ่งระดับความเป็นผลึกจะคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.2) [33] คือ

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^\circ} \times 100\% \quad \text{สมการที่ (3.2)}$$

เมื่อ

X_c คือ ระดับความเป็นผลึก (%Crystallinity)

ΔH_m คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึก

ΔH_m° คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึกพอลิโพรพิลีน 100% มีค่า 207 J/g [34]



รูปที่ 3.9 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter ของ NETZSCH รุ่น DSC 204 F1

3.5.5 ความเสถียรทางความร้อน

วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature หรือ T_d) ในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น (T_{onset}) อุณหภูมิสูงสุด (T_{max}) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_{end}) พร้อมทั้งค่าน้ำหนักที่หายไปจากการสลายตัว (%mass change) ของแคลเซียมซูบอเรตที่เตรียมได้ และฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตด้วยเครื่อง TGA (รูปที่ 3.10) โดยใช้อัตราเร็วการทดสอบ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 50°C ถึง 600°C หรือ 950°C ในกรณีฟิล์มเป่า PC และ POC



รูปที่ 3.10 เครื่อง Thermogravimetric analyser
ของ NETZSCH รุ่น TG 209 F

3.5.6 สมบัติการทนต่อแรงดึง

ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงได้แก่ มอดุลัส (modulus) ความทนแรงดึง (tensile strength at maximum load) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) แสดงในรูปที่ 3.11 ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยใช้ load cell 100 N และใช้อัตราเร็วการทดสอบ 50 mm/min ซึ่งจะทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 เครื่อง Universal testing machine
ของ LLOYD รุ่น LR100K

3.5.7 สมบัติความเป็นรูพรุน

ทดสอบสมบัติความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่าที่ผ่านการดึงยืดแล้วด้วยเทคนิคการดูดซับน้ำมัน โดยเตรียมชิ้นงานขนาด $20 \times 50 \text{ mm}^2$ หรือ $10 \times 100 \text{ mm}^2$ หรือ $10 \times 50 \text{ mm}^2$ จำนวน 5 ตัวอย่าง พร้อมชั่งน้ำหนัก W_d จากนั้นหยดน้ำมัน (ปริมาณ 5 หยด) ลงบนแต่ละตัวอย่าง ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30 วินาที แล้วจึงใช้แปรงทาน้ำมันที่ยังเหลือบนตัวอย่างต่ออีก 30 วินาที จากนั้นใช้กระดาษทิชชูซับน้ำมันที่ไม่สามารถดูดซึมเข้าไปในฟิล์มเป็นระยะเวลา 30 วินาที แล้วจึงนำชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก W_s ซึ่งร้อยละความเป็นรูพรุน (porosity (%)) หรือ ε ของฟิล์มคำนวณตามสมการที่ (3.3) [10] คือ

สมการที่ (3.3)

$$\varepsilon = \frac{W_s - W_d}{AL\rho} \times 100\%$$

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 mg/mm^3) [35] |

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 फिल्मเป่า PO

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในส่วนนี้คือการเตรียมฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็กด้วยคอมพาวนด์ที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนและมีเนอรัลลอยล์ที่ร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยทำการศึกษาผลของความเร็วลมหล่อเย็นและระดับการดึงยึดต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเป่า PO

4.1.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PO ที่ไม่ผ่านการดึงยึด

4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการทดลองขึ้นรูปฟิล์มเป่า PP_a และ PO ด้วยความเร็วลมหล่อเย็นตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 rpm พบว่าการขึ้นรูปฟิล์มทำได้ยากเมื่อความเร็วลมหล่อเย็นอยู่ในช่วงระหว่าง 100 - 300 rpm เนื่องจากไม่สามารถพองฟิล์มให้ขึ้นไปได้ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 400 - 1,000 rpm ทำให้ขึ้นรูปฟิล์มได้ง่ายขึ้นเนื่องจากแรงลมจะพองฟิล์มให้ขึ้นไปสู่ลูกกลิ้งหนีบได้ อย่างไรก็ตามที่ความเร็วเป็น 1,000 rpm นั้น ฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ออกจากตายวงแหวนไม่เสถียรหรือเกิดการสั้นค่อนข้างมาก โดยคอมพาวนด์ที่มีปริมาณมีเนอรัลลอยล์สูง การสั้นของท่อฟิล์มจะยิ่งมากขึ้นด้วย

ในขั้นตอนต่อมาจึงเลือกพิจารณาอิทธิพลของความเร็วลมหล่อเย็นในช่วงระหว่าง 400 ถึง 1,000 rpm เพื่อทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม โดยจะเลือกศึกษาความเร็วลมหล่อเย็นที่ 400 700 และ 1,000 rpm ซึ่งลักษณะทางกายภาพของฟิล์มจะมีความแตกต่างกันสัมพันธ์กับปริมาณมีเนอรัลลอยล์และความเร็วลมหล่อเย็นดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งลักษณะที่พบคือ

สมบัติทางแสงของฟิล์ม : ฟิล์มเป่า PP_a PO₁₀ และ PO₂₀ จะมีลักษณะโปร่งใส (transparent) ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ซึ่งมีลักษณะโปร่งแสง (translucent) โดยความขุ่นของฟิล์มจะเกิดมากขึ้นเมื่อมีการเติมมีเนอรัลลอยล์ปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากดัชนีหักเหของแสงที่ต่างกันระหว่างเฟสสารตัวเติมที่เป็นมีเนอรัลลอยล์และพอลิเมอร์เมทริกซ์

ความยับของฟิล์ม : กระบวนการผลิตที่ใช้ความเร็วลมหล่อเย็นสูงๆ (700 - 1,000 rpm) และสูตรที่มีปริมาณการเติมมีเนอรัลลอยล์ปริมาณสูงๆ (PO₃₀ และ PO₄₀) ส่งผลให้ฟิล์มเกิดรอยยับได้ง่ายขึ้น โดยพบว่าในฟิล์มเป่า PO₁₀ และ PO₂₀ สามารถขึ้นรูปได้ด้วยความเร็วลมหล่อเย็นที่ 400 - 1,000 rpm โดยไม่เกิดการยับ แต่ในฟิล์มเป่า PO₃₀ สังเกตพบรอยยับในฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm ในสูตร PO₄₀ พบว่าความเร็วลมหล่อเย็นที่ส่งผลให้เกิดรอยยับคือความเร็วลมหล่อเย็น 700 และ 1,000 rpm

ปริมาณน้ำมันที่พื้นผิวของฟิล์ม : การเคลื่อนย้ายของมิเนอร์ลอลอยส์ไปอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์ม (migration) ที่เก็บไว้นาน 2 เดือนจะเกิดขึ้นกับฟิล์ม PO₄₀ เท่านั้นโดยปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดกับการเติมมิเนอร์ลอลอยส์ในปริมาณที่ต่ำ ทั้งนี้คาดว่า เป็นผลเนื่องมาจากการใส่มิเนอร์ลอลอยส์ในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้มิเนอร์ลอลอยส์ไม่สามารถแทรกตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ในส่วนของเฟสอสัณฐาน (amorphous) หรือส่วนที่มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบของพอลิโพรพิลีนได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมิเนอร์ลอลอยส์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | ลักษณะทางกายภาพ | | |
|------------------|------------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|
| | | สมบัติทางแสง* | ความยับ** | ปริมาณน้ำมันที่พื้นผิว** |
| PP _a | 400 | TP | X | X |
| | 700 | TP | X | X |
| | 1,000 | TP | X | X |
| PO ₁₀ | 400 | TP | X | X |
| | 700 | TP | X | X |
| | 1,000 | TP | X | X |
| PO ₂₀ | 400 | TP | X | X |
| | 700 | TP | X | X |
| | 1,000 | TP | X | X |
| PO ₃₀ | 400 | TL | X | X |
| | 700 | TL | X | X |
| | 1,000 | TL | / | X |
| PO ₄₀ | 400 | TL | X | / |
| | 700 | TL | / | / |
| | 1,000 | TL | / | / |

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

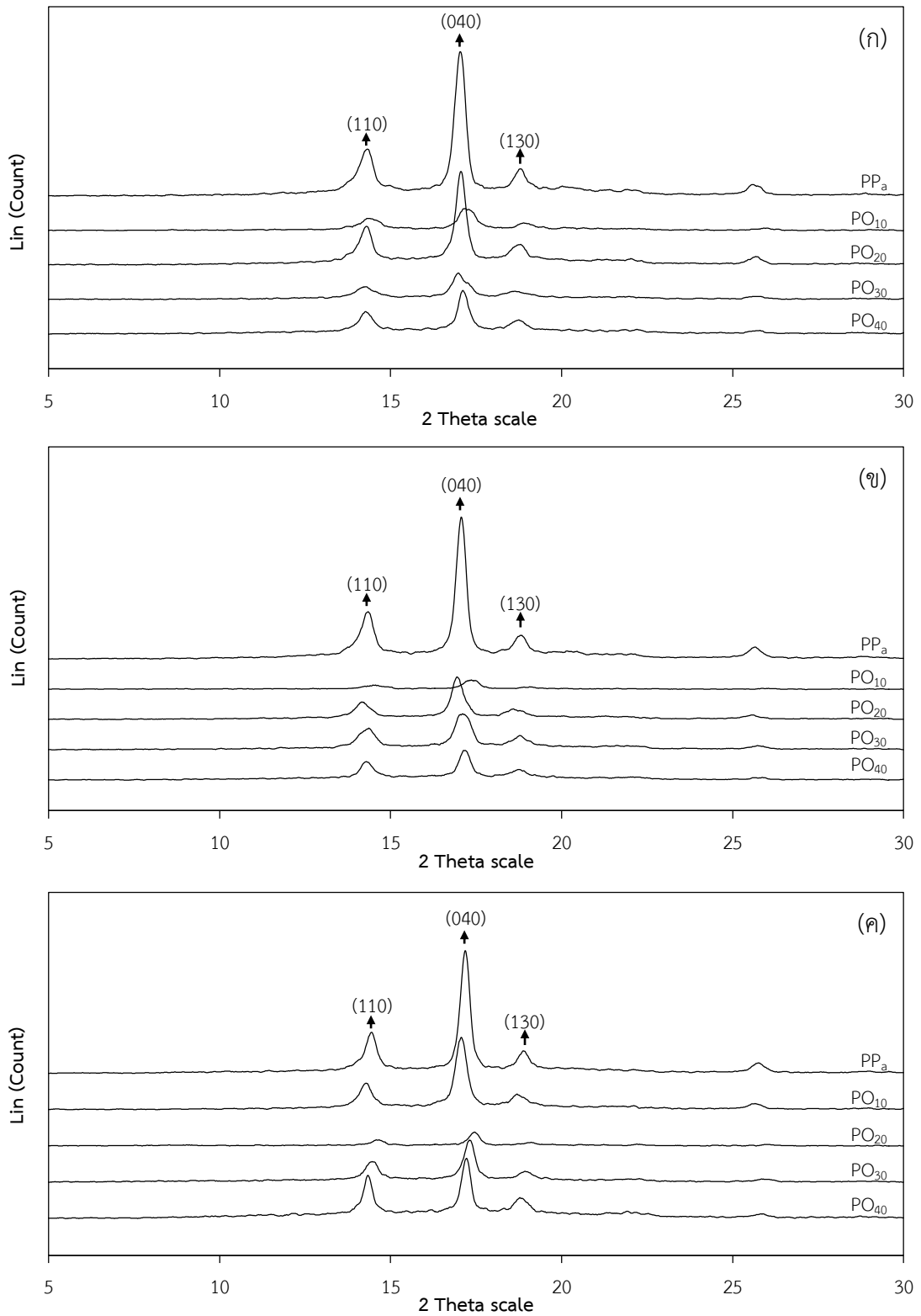
** / คือ มี X คือ ไม่มี

4.1.1.2 โครงสร้างผลึกและระดับความเป็นผลึก

WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ซึ่งขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตำแหน่ง 2θ ที่ปรากฏพบว่าสอดคล้องกับระนาบผลึก (110) (040) และ (130) ของผลึกแอลฟาพอลิโพรพิลีน [36] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตำแหน่ง 2θ ของระนาบดังกล่าวที่สัมพันธ์กับความเร็วลมหล่อเย็นและปริมาณมิเนอร์ล-ออยล์ พบว่าตำแหน่ง 2θ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาคผนวก ก) เมื่อเพิ่มความเร็วลมหล่อเย็น แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมิเนอร์ล-ออยล์

จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.1) ค่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ในตารางที่ 4.2 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟิล์มเป่า PP_a มีผลึกสูงถึงประมาณ 60 - 62% และค่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณมิเนอร์ล-ออยล์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งฟิล์มเป่า PO₄₀ ค่าระดับความเป็นผลึกจะเหลือเพียง 41 - 45% แต่ในทางกลับกันความเร็วลมหล่อเย็นที่แตกต่างกันไม่ได้มีผลต่อค่าระดับความเป็นผลึกอย่างชัดเจนมากนักทั้งในฟิล์มเป่า PP_a และ PO

เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มที่ผลิตด้วยกระบวนการเป่าอัดรีดฟิล์มนั้นมีความสำคัญต่อรูปแบบโครงสร้างผลึกและระดับความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิโพรพิลีน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงปรับเปลี่ยนความเร็วลมหล่อเย็นที่ 400 700 และ 1,000 rpm แล้วติดตามอุณหภูมิของฟิล์มที่ออกมาจากตายวงแหวน ณ ระยะความสูงต่างๆ คือ 0 11 27 42 และ 56 เซนติเมตร ตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของฟิล์มจะมีค่าลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มมากขึ้น แม้ว่าอุณหภูมิของฟิล์ม ณ ตำแหน่งที่ออกจากตายจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมผลึกของ PP แต่ในระยะเพียง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิของฟิล์มลดลงกว่า 100°C นั้นแสดงให้เห็นว่าการเกิดผลึกของ PP สามารถเป็นไปได้ในช่วงเวลาที่แรกๆ เป็นส่วนใหญ่ ในช่วงระยะต่อมาจะเกิดการเย็นตัวของฟิล์มจากลมภายนอกของเครื่องเป่าอัดรีดฟิล์ม ซึ่งจะสังเกตได้จากการเกิดความสูงของแนวเย็นตัว (FLH) เมื่อความเร็วลมหล่อเย็นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของฟิล์มมีแนวโน้มเร็วขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของมิเนอร์ล-ออยล์ต่ออัตราการเย็นตัว พบว่าที่ความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm ฟิล์ม PO ที่ออกจากตายในช่วงต้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าฟิล์ม PP_a ~ 10 - 15°C อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นฟิล์มเป่า PP_a และ PO มีความสามารถในการเย็นตัวที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.1 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมีเนอรัลลอยล์แตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 (ค) rpm

ตารางที่ 4.2 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ ปริมาณมีเนอรัลลออยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ระดับความเป็นผลึก (%) ที่ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | | |
|------------------|---|-----|-------|
| | 400 | 700 | 1,000 |
| PP _a | 61 | 62 | 60 |
| PO ₁₀ | 54 | 53 | 58 |
| PO ₂₀ | 50 | 50 | 52 |
| PO ₃₀ | 49 | 52 | 50 |
| PO ₄₀ | 43 | 41 | 45 |

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมีเนอรัลลออยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากฟิล์มออกมาจากคายวงแหวน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | อุณหภูมิ (°C) ของฟิล์มเป่าที่ระดับความสูง (cm.) | | | | |
|------------------|------------------------------|---|------|------|------|------|
| | | 0 | 11 | 27 | 42 | 56 |
| PP _a | 400 | 188.7 | 78.2 | 53.5 | 47.8 | 42.1 |
| | 700 | 161.2 | 56.2 | 38.7 | 39.3 | 34.5 |
| | 1,000 | 182.3 | 47.8 | 35.0 | 36.1 | 33.8 |
| PO ₁₀ | 400 | 158.7 | 66.3 | 43.3 | 42.0 | 36.4 |
| | 700 | 156.9 | 56.2 | 37.6 | 37.0 | 35.1 |
| | 1,000 | 144.5 | 46.4 | 37.0 | 37.3 | 34.3 |
| PO ₂₀ | 400 | 190.3 | 57.6 | 39.2 | 39.5 | 36.3 |
| | 700 | 178.1 | 45.5 | 34.7 | 34.5 | 34.1 |
| | 1,000 | 167.1 | 42.3 | 34.1 | 32.9 | 33.0 |
| PO ₃₀ | 400 | 184.9 | 52.7 | 39.4 | 42.1 | 37.2 |
| | 700 | 174.0 | 46.9 | 35.5 | 37.4 | 34.4 |
| | 1,000 | 130.3 | 42.2 | 36.5 | 35.8 | 34.8 |
| PO ₄₀ | 400 | 180.8 | 68.0 | 44.4 | 43.8 | 38.5 |
| | 700 | 180.8 | 52.7 | 38.2 | 39.0 | 35.4 |
| | 1,000 | 163.6 | 45.8 | 34.8 | 36.9 | 34.4 |

4.1.1.3 สมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 - 4.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็นต่างๆ เมื่อพิจารณา DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มเป่า PP_a (รูปที่ 4.2 (ก)) พบว่าการหลอมผลึกของฟิล์ม PP ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็นที่ 700 rpm มีลักษณะเป็น 2 พิกซ์ชัดเจน คือ 158.9 และ 163.1°C ในขณะที่ฟิล์ม PP ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 และ 1,000 rpm มีพีคของการหลอมผลึกที่อุณหภูมิ 158.6 และ 162.6°C ตามลำดับ อีกทั้งยังสังเกตเห็นไหล่พิคของการหลอมผลึกที่ 162.1 และ 157.1°C ในฟิล์มที่เป่าด้วยความเร็วลม 400 และ 1,000 rpm ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวทำให้เชื่อว่าผลึกที่เกิดในฟิล์ม PP_a ที่ขึ้นรูปด้วยภาวะต่างกันั้น มีความสมบูรณ์ไม่เท่ากัน จากผลของ WAXD ซึ่งแสดงให้เห็นว่า unit cell มีแนวโน้มเล็กลง (2θ เพิ่มขึ้น) เมื่อเพิ่มความเร็วลมหล่อเย็น ดังนั้น T_m ที่เพิ่มขึ้นอาจสัมพันธ์กับ unit cell เล็กลง เมื่อพิจารณาในช่วงการลดความร้อนและช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (รูปที่ 4.2 (ข) และ (ค)) จะไม่พบความแตกต่างระหว่างฟิล์มเป่าทั้งสามความเร็วลมหล่อเย็น เมื่อพิจารณาการหลอมผลึกที่เป็นผลจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มเป่า PO₁₀ และ PO₃₀ (รูปที่ 4.3) พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับฟิล์ม PP_a ผลจากช่วงการลดอุณหภูมิและให้ความร้อนครั้งที่ 2 ในรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) ไม่แตกต่างกันนัก เมื่อฟิล์มมีภาวะขึ้นรูปด้วยความเร็วลมต่างกัน

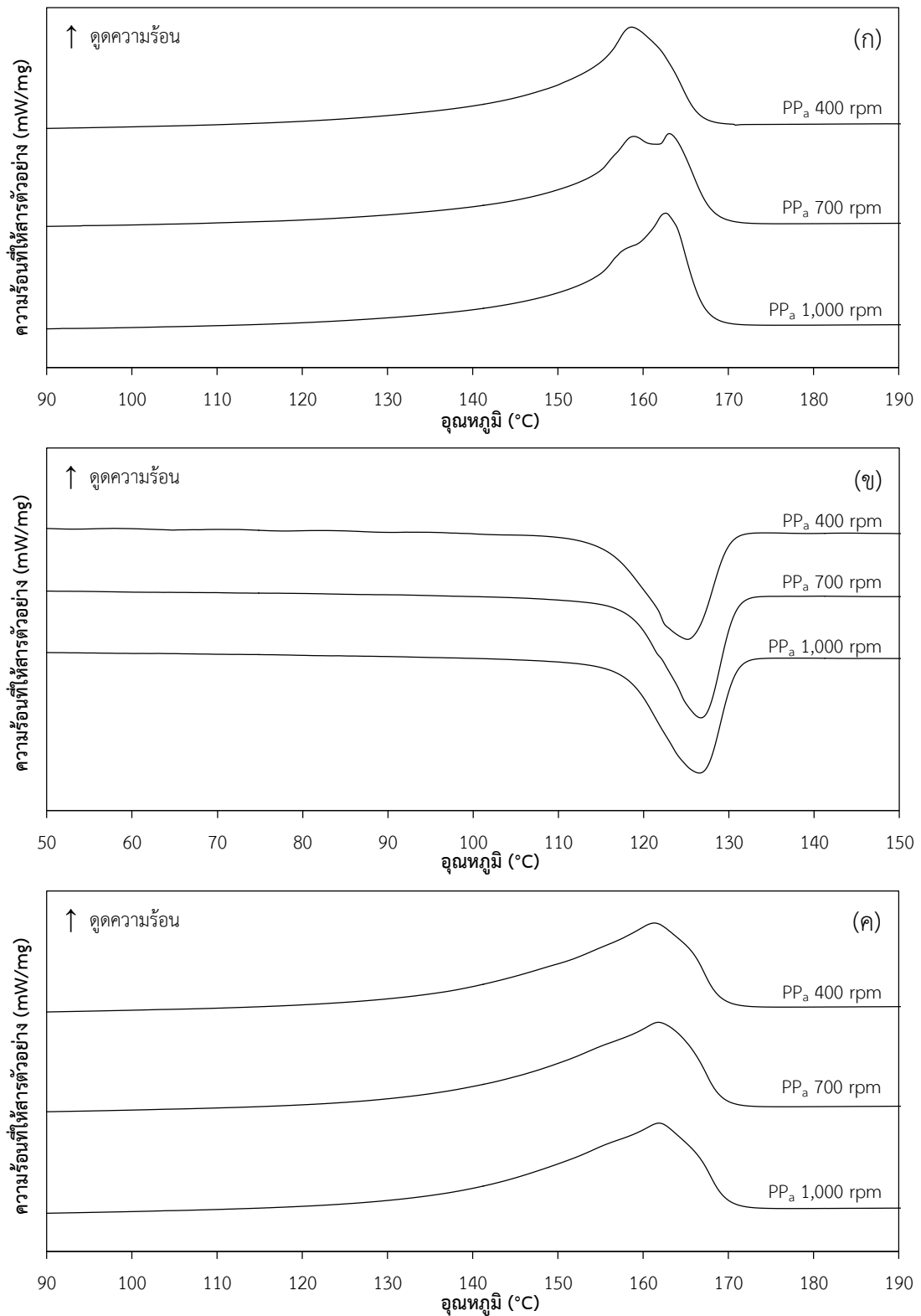
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 จะพบว่าปริมาณมีเนอรัลลออยล์มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของฟิล์มเป่า PO โดยฟิล์มมีแนวโน้มที่จะหลอมที่อุณหภูมิต่ำลงและเกิดผลึกได้ช้ากว่าเมื่อปริมาณออยล์สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาระดับความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า PP_a PO₁₀ และ PO₃₀ ที่วิเคราะห์ด้วย WAXD และ DSC ทำให้เชื่อว่าความเร็วลมหล่อเย็นระหว่าง 400 ถึง 1000 rpm นั้นไม่ส่งผลให้ระดับความเป็นผลึกของฟิล์มที่ขึ้นรูปได้มีความแตกต่างกันนัก อย่างไรก็ตามอิทธิพลของปริมาณมีเนอรัล-ออยล์ต่อระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์จาก WAXD และ DSC ให้แนวโน้มที่ต่างกัน กล่าวคือ ผลการวิเคราะห์ด้วย WAXD แสดงว่าความเป็นผลึกในฟิล์มเป่า PO มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มมีเนอรัลลออยล์ แต่ข้อมูลในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 ของ DSC บ่งชี้ว่าปริมาณมีเนอรัลลออยล์ไม่มีผลให้ระดับผลึกในฟิล์มเป่า PO ลดลง

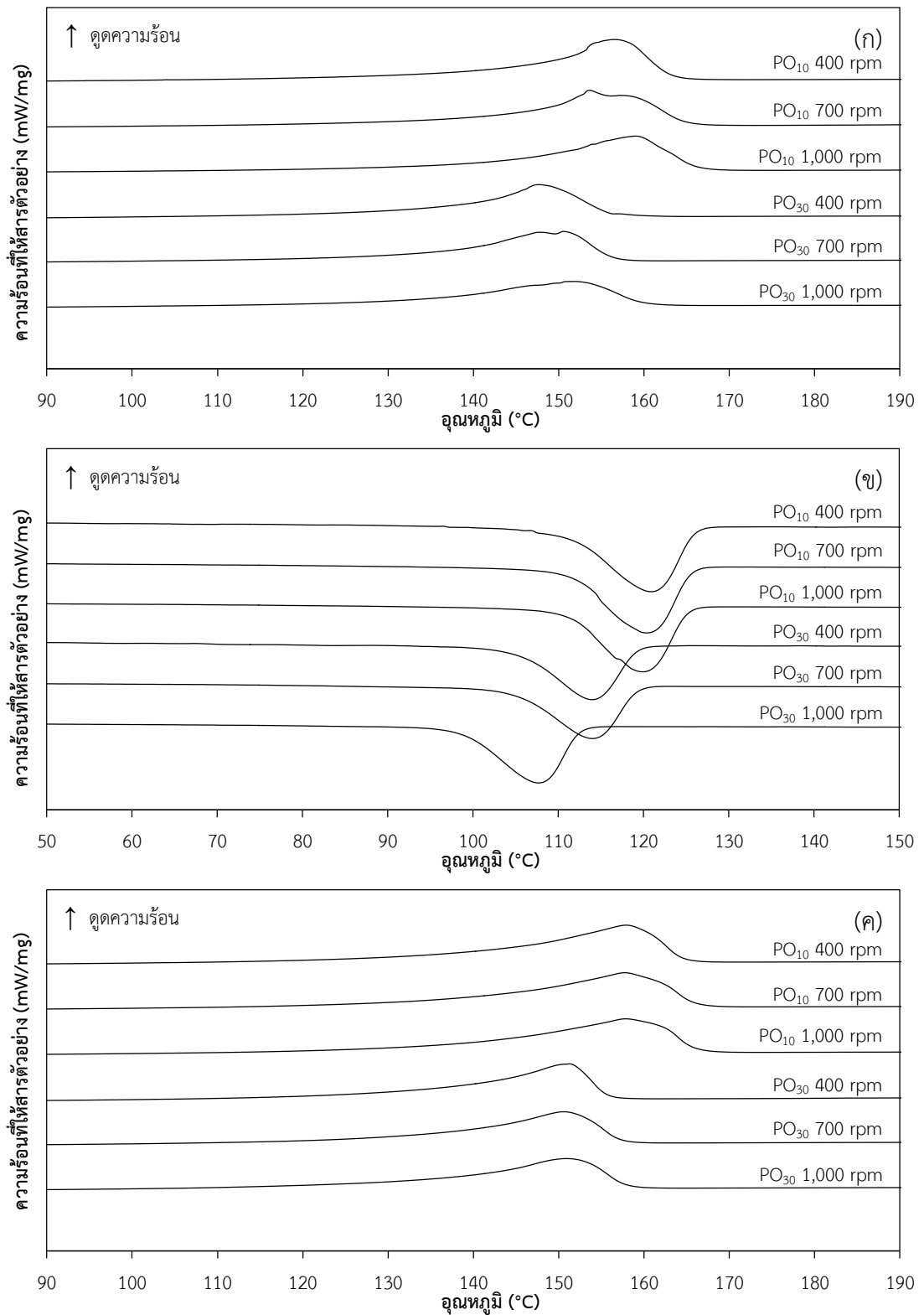
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมินิเอร์ลออยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกันเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมินิเอร์ลออยล์

| วัตถุดิบ/ ฟิล์มเป่า | ให้ความร้อนครั้งที่ 1 | | | ลดความร้อน | | | ให้ความร้อนครั้งที่ 2 | | |
|----------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| | T _m (°C) | ΔH _m (J/g) | X _c [*] (%) | T _c (°C) | ΔH _c (J/g) | X _c [*] (%) | T _m (°C) | ΔH _m (J/g) | X _c [*] (%) |
| PP _{pellet} | 162.4 | 92.6 | 44.7 | 126.4 | 100.6 | 48.6 | 162.8 | 104.3 | 50.4 |
| Mineral oil | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| PP _a 400 rpm | 158.6 | 95.5 | 46.1 | 125.1 | 101.3 | 48.9 | 161.3 | 101.3 | 48.9 |
| PP _a 700 rpm | 158.9 163.1 | 95.0 | 45.9 | 126.7 | 104.5 | 50.5 | 161.8 | 104.3 | 50.4 |
| PP _a 1,000 rpm | 162.6 | 95.0 | 45.9 | 126.5 | 108.1 | 52.2 | 161.9 | 109.6 | 52.9 |
| PO ₁₀ 400 rpm | 156.6 | 84.1 | 45.1 | 120.9 | 101.3 | 54.4 | 157.8 | 97.0 | 52.1 |
| PO ₁₀ 700 rpm | 153.6 157.0 | 83.0 | 44.6 | 120.3 | 97.9 | 52.5 | 157.7 | 97.3 | 52.2 |
| PO ₁₀ 1,000 rpm | 159.0 | 82.3 | 44.2 | 119.9 | 96.9 | 52.0 | 157.8 | 98.1 | 52.7 |
| PO ₂₀ 400 rpm | 151.6 | 82.0 | 49.5 | 113.7 | 91.7 | 55.4 | 153.5 | 89.9 | 54.3 |
| PO ₃₀ 400 rpm | 147.7 | 69.6 | 48.0 | 114.0 | 75.2 | 51.9 | 151.2 | 77.5 | 53.5 |
| PO ₃₀ 700 rpm | 147.8 150.6 | 72.1 | 49.8 | 114.0 | 79.2 | 54.7 | 150.6 | 76.2 | 52.6 |
| PO ₃₀ 1,000 rpm | 152.0 | 68.1 | 47.0 | 107.7 | 77.7 | 53.6 | 150.9 | 77.2 | 53.3 |
| PO ₄₀ 400 rpm | 148.6 | 62.5 | 50.3 | 111.3 | 68.2 | 54.9 | 147.0 | 68.3 | 55.0 |

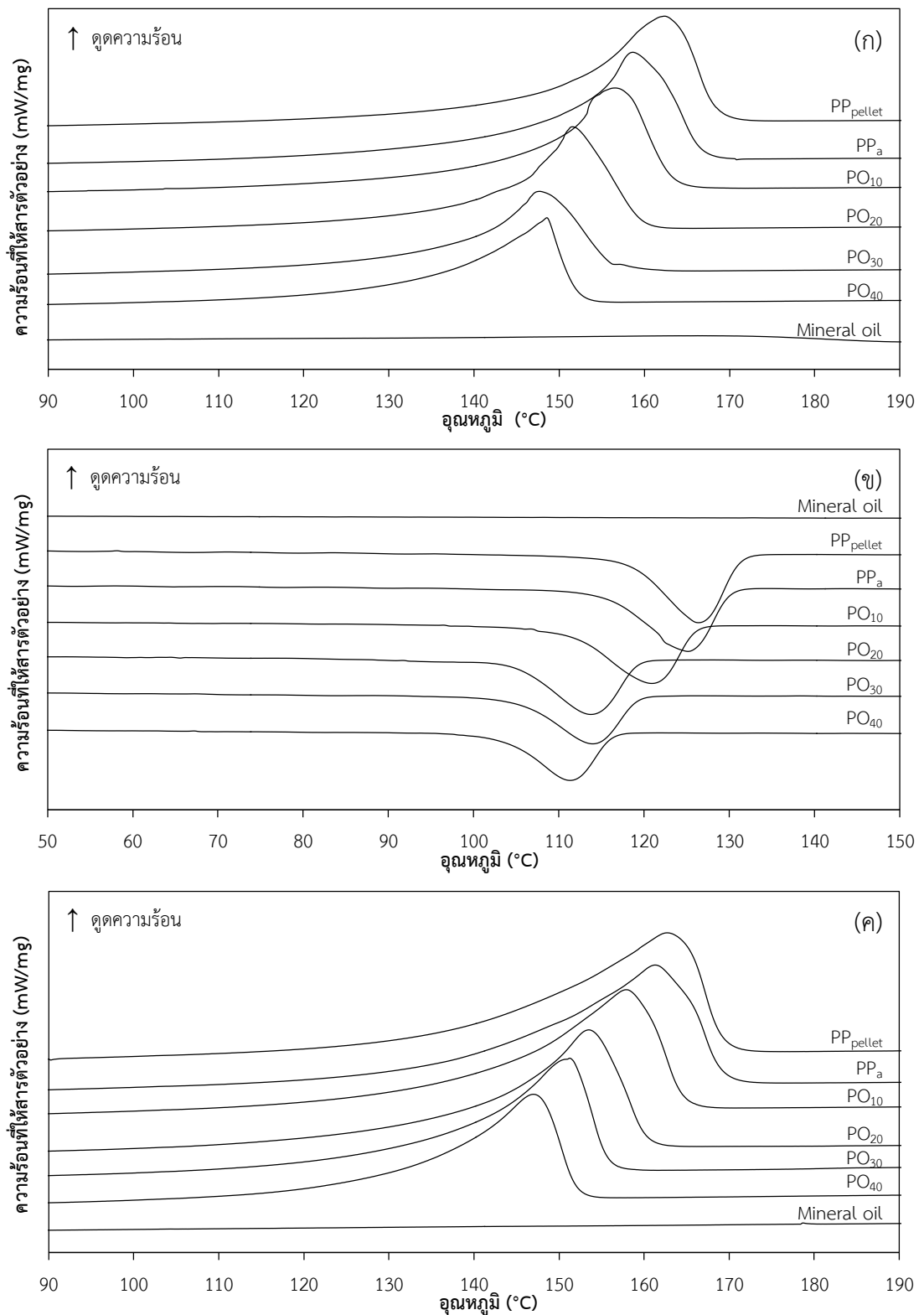
หมายเหตุ * คือ ข้อมูลระดับความเป็นผลึกที่ทำการ normalized แล้ว



รูปที่ 4.2 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP_a ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน



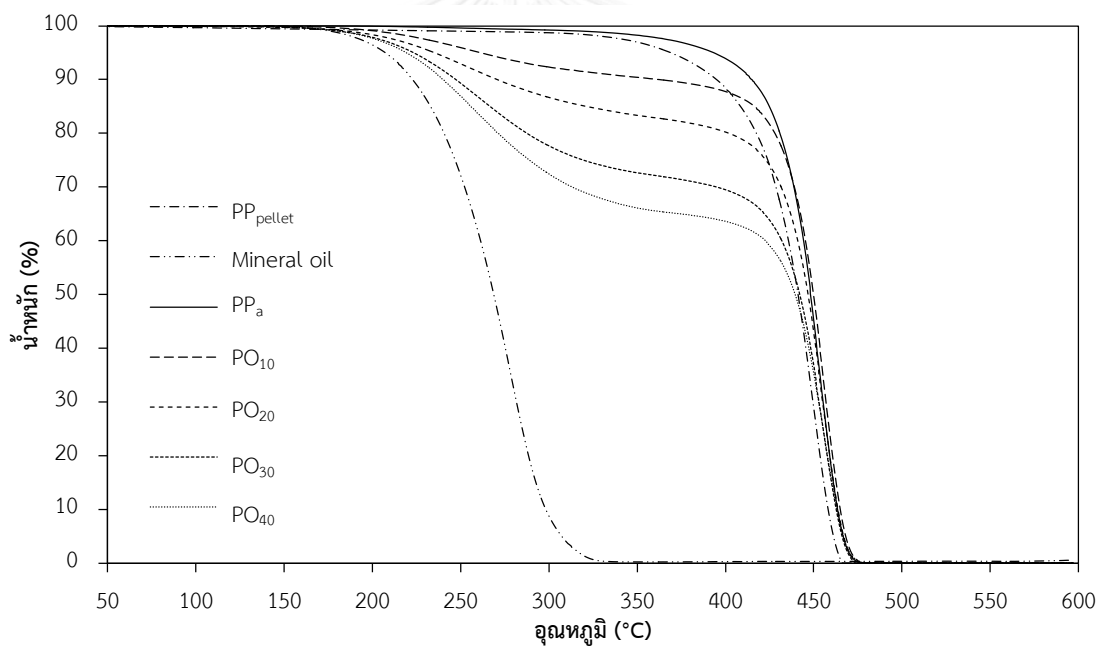
รูปที่ 4.3 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PO₁₀ และ PO₃₀ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.4 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมินิเออร์ลออยล์แตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm เปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมินิเออร์ลออยล์

4.1.1.4 ความเสถียรทางความร้อน

ผลการทดสอบเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5 फिल्मเป่า PP_a มีการสลายตัวทางความร้อนที่เกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวโดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ $428.7^{\circ}C$ ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ PP_{pellet} ประมาณ $4.3^{\circ}C$ แต่ในฟิล์มเป่า PO จะปรากฏช่วงการสลายตัวทางความร้อนเป็น 2 ช่วง ทั้งนี้การสลายตัวในช่วงแรกระหว่าง $202.0 - 308.0^{\circ}C$ ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของมิเนอร์ลออยล์และเป็นที่น่าสังเกตว่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเทียบเท่าได้กับปริมาณมิเนอร์ลออยล์ในแต่ละสูตร จึงเชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงในช่วงดังกล่าวเป็นผลของมิเนอร์ลออยล์ สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในช่วงที่สองระหว่าง $432.8 - 468.3^{\circ}C$ จะเป็นการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวประมาณ $432.8 - 435.7^{\circ}C$ ทั้งนี้อุณหภูมิการสลายตัวนั้นไม่แตกต่างกันในแต่ละสูตรคอมพาวนด์



รูปที่ 4.5 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมิเนอร์ลออยล์แตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm เปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมิเนอร์ลออยล์

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมินิเออร์ลออยล์แตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm เปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและมินิเออร์ลออยล์

| วัสดุติบ/ ฟิล์มเป่า | การสลายตัวช่วงที่ 1 | | | | การสลายตัวช่วงที่ 2 | | | |
|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) |
| PP _{pellet} | - | - | - | - | 424.4 | 451.4 | 462.6 | 100.00 |
| Mineral oil | 243.0 | 277.8 | 303.0 | 99.48 | - | - | - | - |
| PP _a | - | - | - | - | 428.7 | 451.7 | 468.1 | 99.45 |
| PO ₁₀ | 202.0 | 253.6 | 298.0 | 7.72 | 435.7 | 454.2 | 468.3 | 92.10 |
| PO ₂₀ | 202.0 | 252.1 | 302.0 | 15.48 | 432.8 | 453.2 | 467.4 | 84.48 |
| PO ₃₀ | 206.0 | 264.2 | 308.0 | 25.77 | 434.8 | 453.8 | 467.6 | 74.19 |
| PO ₄₀ | 208.0 | 255.2 | 308.0 | 34.24 | 435.6 | 457.1 | 468.2 | 65.70 |

4.1.1.5 การทนต่อแรงดึง

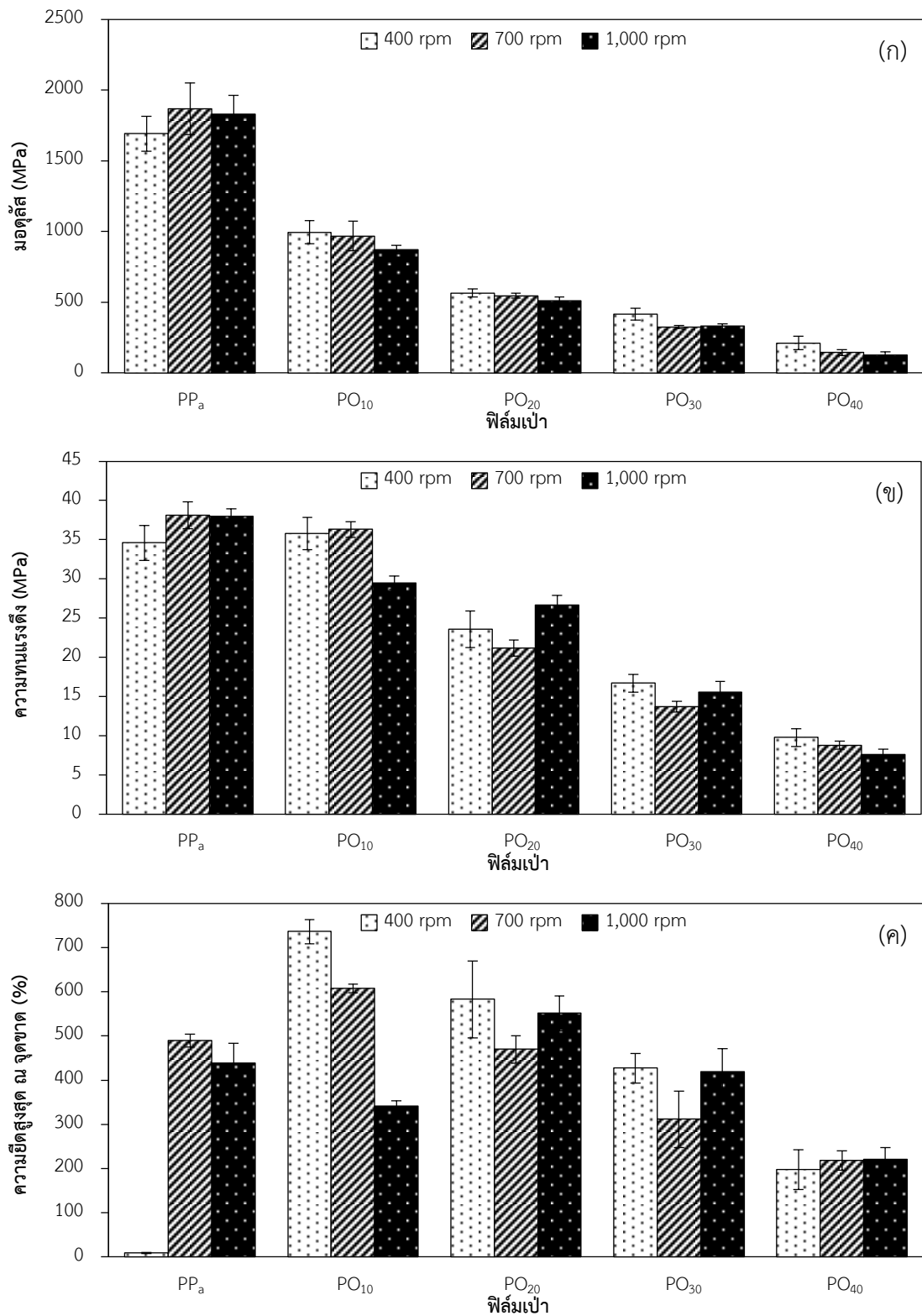
สมบัติการทนต่อแรงดึงได้แก่โมดูลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PP_a และ PO แสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 (ก) - (ค) ฟิล์มเป่า PP_a มีความแข็งแรงสูงกว่า PO โดยฟิล์มเป่า PP_a มีค่าโมดูลัสและค่าความทนแรงดึงอยู่ในช่วง 1,690 - 1,870 MPa และ 35 - 38 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อเติมมินิเออร์ลออยล์จะส่งผลให้ทั้งโมดูลัสและค่าความทนแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.6 (ก) - (ข)) โดยมีค่าคิดเป็น 7 - 58 % และ 17 - 95% ของฟิล์มเป่า PP_a ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าปริมาณออยล์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทั้งค่าโมดูลัสและค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่า PO ลดลง

เมื่อพิจารณาค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.6 (ค)) จะพบว่าฟิล์มเป่า PO₁₀ และ PO₂₀ สามารถดึงยืดได้ในระยะที่มากกว่าฟิล์ม PP_a ในขณะที่ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PO₃₀ และ PO₄₀ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP_a ซึ่งขึ้นรูปเมื่อความเร็วลมหล่อเย็นเป็น 700 และ 1,000 rpm ทั้งนี้เป็นไปได้ว่ามีมินิเออร์ลออยล์ในปริมาณที่ไม่มากนักจะสามารถแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ ในขณะที่เมื่อเติมในปริมาณสูงอาจก่อให้เกิดการแยกเฟสระหว่างพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์และออยล์มากขึ้น ส่งผลให้รอยต่อระหว่างเฟสซึ่งอ่อนแอมีจำนวนมาก จึงเป็นผลให้ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าลดลงกว่าฟิล์มจาก PP เพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วหล่อเย็น พบว่ามีผลค่อนข้างมากต่อความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเฉพาะ

ฟิล์มเป่า PP_a และ PO_{10} โดยฟิล์มเป่า PP_a ที่เตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm จะยืดสูงสุดได้เพียง 8% แต่เมื่อความเร็วลมหล่อเย็นสูงขึ้นจะสามารถยืดได้มากกว่า 400% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาฟิล์มเป่า PO_{10} จะพบแนวโน้มที่ตรงข้าม โดยฟิล์ม PO_{10} ที่เตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็นที่สูงขึ้นมีแนวโน้มให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการขึ้นรูปฟิล์มเป่าด้วยความเร็วลมหล่อเย็นสูงมาก (1,000 rpm) ส่งผลให้ฟิล์มได้รับการดึงยืดไปบางส่วนแล้ว ส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดสูงสุดลดลง ทั้งนี้การดึงยืดจากลมหล่อเย็นอาจทำให้รอยต่อระหว่างเฟสแยกออก ส่งผลให้ฟิล์ม PO ที่เตรียมด้วยความเร็วลมสูงกว่ามีค่ามอดูลัสลดลง ในทางตรงข้ามอิทธิพลของความเร็วลมหล่อเย็นที่เพิ่มขึ้นทำให้มอดูลัสและความทนแรงดึงของฟิล์มเป่า PP_a เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าลมหล่อเย็นที่แรงขึ้นก่อให้เกิดการจัดเรียงตัว จึงส่งผลให้สมบัติของ PP ดีขึ้น

ตารางที่ 4.6 มอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ปริมาณมีเนอรัลลอยส์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | มอดูลัส (MPa) | ความทนแรงดึง (MPa) | ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%) |
|-----------|------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|
| PP_a | 400 | 1,692 ± 123.0 | 34.6 ± 2.2 | 9 ± 0.9 |
| | 700 | 1,867 ± 182.6 | 38.1 ± 1.7 | 489 ± 14.4 |
| | 1,000 | 1,829 ± 135.4 | 38.0 ± 1.0 | 439 ± 44.6 |
| PO_{10} | 400 | 995 ± 83.0 | 35.8 ± 2.1 | 736 ± 27.7 |
| | 700 | 969 ± 103.3 | 36.3 ± 1.0 | 607 ± 9.4 |
| | 1,000 | 872 ± 30.5 | 29.5 ± 0.9 | 341 ± 12.1 |
| PO_{20} | 400 | 566 ± 29.7 | 23.6 ± 2.3 | 583 ± 87.2 |
| | 700 | 546 ± 16.2 | 21.2 ± 1.0 | 470 ± 31.0 |
| | 1,000 | 513 ± 24.1 | 26.7 ± 1.2 | 551 ± 39.6 |
| PO_{30} | 400 | 415 ± 41.5 | 16.7 ± 1.1 | 427 ± 33.8 |
| | 700 | 325 ± 11.3 | 13.7 ± 0.7 | 311 ± 64.3 |
| | 1,000 | 332 ± 16.7 | 15.6 ± 1.3 | 419 ± 52.2 |
| PO_{40} | 400 | 212 ± 48.6 | 9.8 ± 1.1 | 198 ± 45.0 |
| | 700 | 144 ± 20.5 | 8.8 ± 0.5 | 218 ± 22.0 |
| | 1,000 | 129 ± 21.9 | 7.6 ± 0.7 | 221 ± 26.8 |



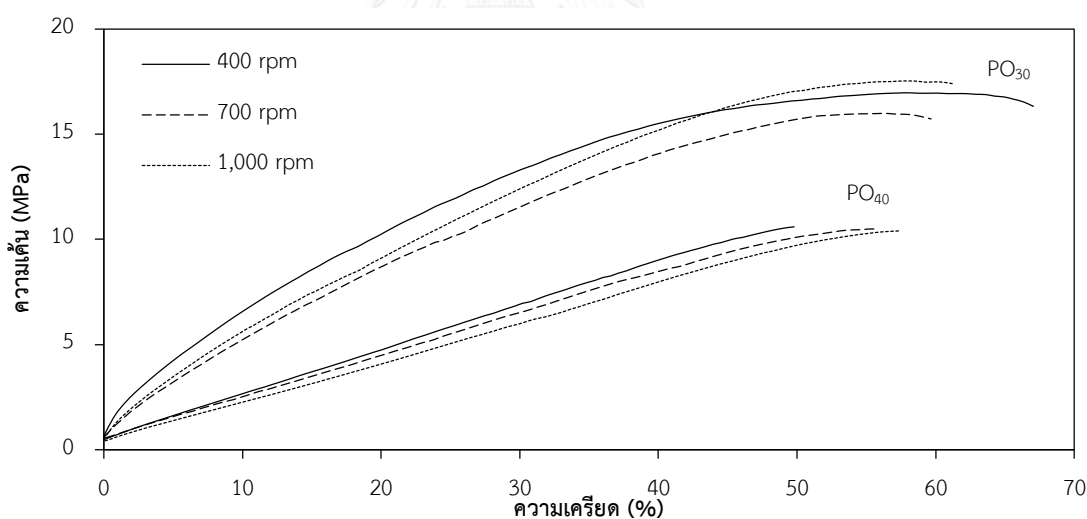
รูปที่ 4.6 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป้า PP_a และ PO ที่ปริมาณมิเนอรัลลอยด์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

4.1.2 สมบัติของฟิล์มเป่า PO ที่ผ่านการดึงยืด

4.1.2.1 การทนต่อแรงดึง

สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ที่ผ่านการดึงยืดที่ระดับ 100% แสดงในรูปที่ 4.7 - 4.8 และตารางที่ 4.7 สาเหตุที่ไม่ได้ทำการทดสอบฟิล์มเป่า PO₁₀ และ PO₂₀ เนื่องจากฟิล์มที่ผ่านการดึงยืดมีความกว้างของพื้นที่หน้าตัดที่ไม่แน่นอน และฟิล์มมีรอยย่นที่ชัดเจน ไม่เรียบ ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ซึ่งเมื่อทำการดึงยืดแล้วจะมีลักษณะของฟิล์มที่เรียบ มีพื้นที่หน้าตัดที่คงที่ และมีสีขาวขุ่น (opaque) ซึ่งเกิดมาจากการหักเหแสงในฟิล์มที่มีรูพรุนนั้น แม้ฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ที่ระดับการดึงยืด 200 และ 300% จะมีความกว้างที่คงที่ แต่มีขนาดเล็กมากไม่สามารถตัดชิ้นงานให้มีความกว้างตามที่ ASTM D882 กำหนดได้

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าความเค้นและความเครียดของฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่มีyield (yield) และในขณะทดสอบก็ไม่สังเกตเห็นการเกิดคอคอด (necking) แตกต่างจากกรณีของฟิล์มเป่าที่ยังไม่ผ่านการดึงยืด ที่จะสังเกตเห็นyieldที่ชัดเจน (ภาคผนวก ข)



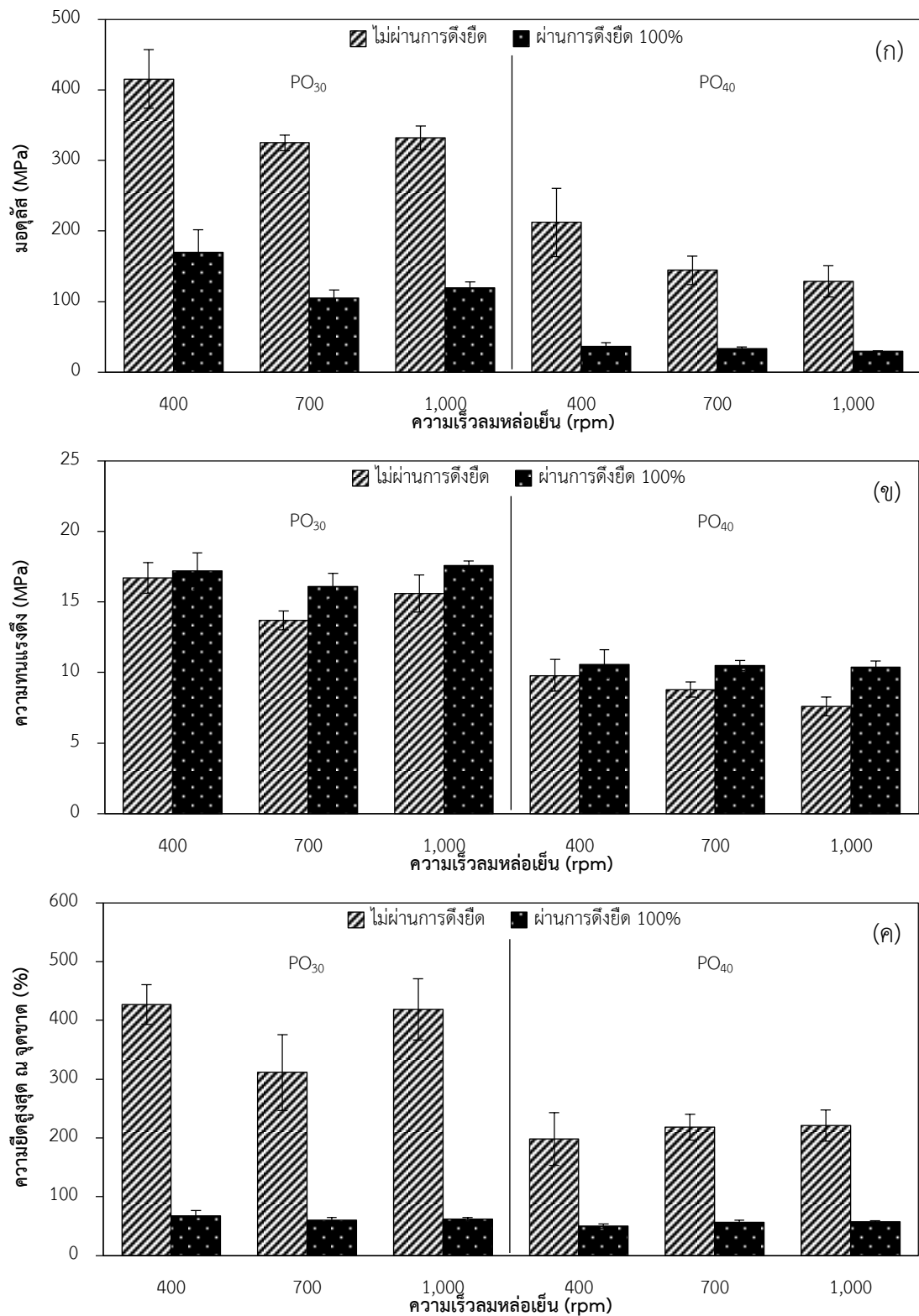
รูปที่ 4.7 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ที่ผ่านการดึงยืด 100% ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าอิทธิพลของปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์และความเร็วลมหล่อเย็นต่อสมบัติการทนแรงดึงของฟิล์ม PO₃₀ และ PO₄₀ ที่ผ่านการดึงยืดมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันกับฟิล์ม PO₃₀ และ PO₄₀ ก่อนการดึงยืด ปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัส ค่าความทนแรงดึง และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงและค่าความเร็วลมหล่อเย็นส่งผลเฉพาะค่ามอดูลัสของฟิล์มดังกล่าวเท่านั้น

ตารางที่ 4.7 มอดูลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ที่ผ่านการดึงยืด 100% เตรียมด้วยปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์และความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | มอดูลัส (MPa) | ความทนแรงดึง (MPa) | ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%) |
|------------------|------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|
| PO ₃₀ | 400 | 170 ± 32.3 | 17.2 ± 1.3 | 68 ± 8.5 |
| | 700 | 105 ± 11.6 | 16.1 ± 0.9 | 60 ± 4.0 |
| | 1,000 | 120 ± 8.2 | 17.6 ± 0.3 | 62 ± 2.9 |
| PO ₄₀ | 400 | 37 ± 5.4 | 10.6 ± 1.0 | 50 ± 3.5 |
| | 700 | 34 ± 2.4 | 10.5 ± 0.4 | 56 ± 3.5 |
| | 1,000 | 30 ± 0.8 | 10.4 ± 0.4 | 58 ± 1.8 |

รูปที่ 4.8 (ก) – (ค) แสดงมอดูลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดตามลำดับ ของฟิล์ม PO₃₀ และ PO₄₀ ก่อนและหลังการดึงยืด จะพบว่าฟิล์มที่มีการดึงยืดแล้วจะมีค่ามอดูลัสและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดต่ำกว่าฟิล์มก่อนการดึงยืด เนื่องจากฟิล์มได้รับแรงดึงไปก่อนหน้า และเกิดจุดอ่อนที่จะเกิดการแตกหักขึ้นในฟิล์ม (รูปที่ 4.8 (ก) และรูปที่ 4.8 (ค)) แต่ในฟิล์มที่มีการดึงยืดแล้วจะมีค่าความทนแรงดึงที่มากกว่าฟิล์มก่อนการดึงยืด (รูปที่ 4.8 (ข)) ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ (chain orientation) ของฟิล์มไปในแนวเดียวกันคือแนวแกนของเครื่องจักรทำให้ ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นและมีความแข็งแรงมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.8 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ ที่ไม่ผ่านการดั่งยี่ดเปรียบเทียบกับที่ผ่านการดั่งยี่ด 100% ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

4.1.2.2 ความเป็นรูพรุน

ความเป็นรูพรุนของฟิล์มคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) โดยใช้ข้อมูลการดูดซับน้ำมัน อิทธิพลของระดับการดัดยัด 0 100 200 และ 300% ต่อความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PO แสดงใน ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 สำหรับฟิล์มเป่า PO₄₀ นั้น จะไม่มีผลที่ระดับการดัดยัด 300% เนื่องจาก ฟิล์มเป่า PO₄₀ มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ~200% เท่านั้น จะเห็นว่าฟิล์มเป่า PO ที่ไม่มีการดัดยัด นั้นมีค่าความเป็นรูพรุนอยู่ในช่วง 0.4 ± 0.03 ถึง 2.9 ± 0.68 ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม เป่าที่ผ่านการดัดยัด

เมื่อพิจารณาฟิล์มเป่า PO₁₀ ระดับการดัดยัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความเป็น รูพรุนเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ฟิล์มเป่า PO₂₀ และ PO₃₀ ระดับการดัดยัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการดูด ซับน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นถึงที่ระดับการดัดยัด 200% และจะลดลงเมื่อระดับการดัดยัดเพิ่มเป็น 300% ในขณะที่ผลการศึกษาของฟิล์มเป่า PO₄₀ นั้นยังไม่พบจุดที่สูงที่สุดเนื่องจากในการทดลองไม่สามารถดัด ยัดฟิล์มที่อัตราการดัดยัด 300% ได้ เมื่อพิจารณาความเป็นรูพรุนที่คำนวณได้กับค่าของการดูดซับ น้ำมัน พบว่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ

กลุ่มแรก : ฟิล์มที่มีการดูดซับน้ำมันค่อนข้างน้อย (0.4 - 8.4%) คือฟิล์มเป่าที่มีค่า ความเป็นรูพรุน $\leq 10\%$ ได้แก่ ฟิล์มเป่าทุกชนิดที่ไม่มีการดัดยัดและฟิล์มเป่า PO₁₀ และ PO₂₀ ที่ทุก ระดับการดัดยัด

กลุ่มสอง : ฟิล์มที่มีการดูดซับน้ำมันปานกลาง (13.1 - 17.4%) คือฟิล์มเป่าที่มีค่า ความเป็นรูพรุนอยู่ในช่วง 10 - 15% ได้แก่ ฟิล์มเป่า PO₃₀ ที่มีระดับการดัดยัด 100%

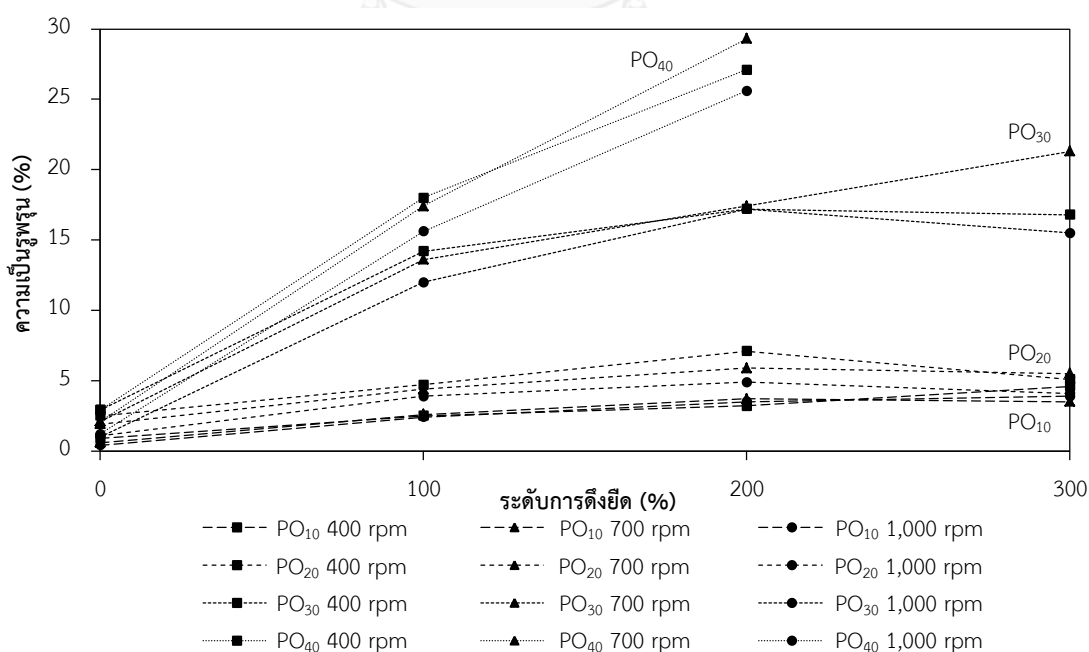
กลุ่มสาม : ฟิล์มที่มีการดูดซับน้ำมันมาก (20.8 - 40.8%) คือฟิล์มเป่าที่มีค่าความ ความเป็นรูพรุน $\geq 15\%$ ได้แก่ ฟิล์มเป่า PO₃₀ ที่มีระดับการดัดยัด 200 และ 300% รวมทั้งฟิล์มเป่า PO₄₀ ที่ทุกระดับการดัดยัด

ลักษณะของฟิล์มเป่า PO ก่อนการดัดยัดจะค่อนข้างใสในทุกความเร็วลมหล่อเย็น แต่ฟิล์มเป่า PO ที่มีปริมาณออยล์มากขึ้นจะมีลักษณะโปร่งแสง หลังการดัดยัดฟิล์ม PO พบว่าฟิล์มมี ความขุ่นเพิ่มขึ้นกว่าก่อนดัด ทั้งนี้ฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ เมื่อทำการดัดยัดจะเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่น และทึบแสง เมื่อทดสอบการดูดซับน้ำมัน ฟิล์มจะกลับมาใสขึ้น เนื่องจากการกระเจิงแสงของอนุภาค ตัวกลางน้ำมันที่แทรกอยู่ในรูพรุนของฟิล์มดังกล่าว

ตารางที่ 4.8 ความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PO ที่ปริมาณมีเนอรัลลออยล์ ความเร็วลมหล่อเย็นและระดับการดึงยืดแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | ความเป็นรูพรุน (%) ที่ระดับการดึงยืด (%) | | | |
|------------------|--------------------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | | 0 | 100 | 200 | 300 |
| PO ₁₀ | 400 | 0.9 ± 0.07 | 2.5 ± 2.01 | 3.2 ± 1.27 | 4.6 ± 1.69 |
| | 700 | 0.6 ± 0.01 | 2.6 ± 0.38 | 3.7 ± 2.15 | 3.5 ± 1.32 |
| | 1,000 | 0.4 ± 0.03 | 2.4 ± 1.10 | 3.5 ± 1.42 | 3.9 ± 0.53 |
| PO ₂₀ | 400 | 2.5 ± 0.54 | 4.7 ± 1.60 | 7.1 ± 0.66 | 5.1 ± 1.00 |
| | 700 | 1.9 ± 0.19 | 4.4 ± 1.50 | 5.9 ± 1.10 | 5.5 ± 0.26 |
| | 1,000 | 1.1 ± 0.24 | 3.9 ± 0.43 | 4.9 ± 1.60 | 4.1 ± 0.69 |
| PO ₃₀ | 400 | 2.9 ± 0.10 | 14.2 ± 1.19 | 17.2 ± 0.54 | 16.8 ± 0.24 |
| | 700 | 2.1 ± 0.09 | 13.6 ± 0.50 | 17.4 ± 0.31 | 21.3 ± 1.06 |
| | 1,000 | 1.0 ± 0.15 | 12.0 ± 0.37 | 17.2 ± 0.23 | 15.5 ± 0.50 |
| PO ₄₀ | 400 | 2.9 ± 0.68 | 18.0 ± 0.41 | 27.1 ± 0.54 | N/A* |
| | 700 | 2.1 ± 0.10 | 17.4 ± 0.24 | 29.3 ± 0.39 | N/A* |
| | 1,000 | 1.2 ± 0.07 | 15.6 ± 0.37 | 25.6 ± 0.44 | N/A* |

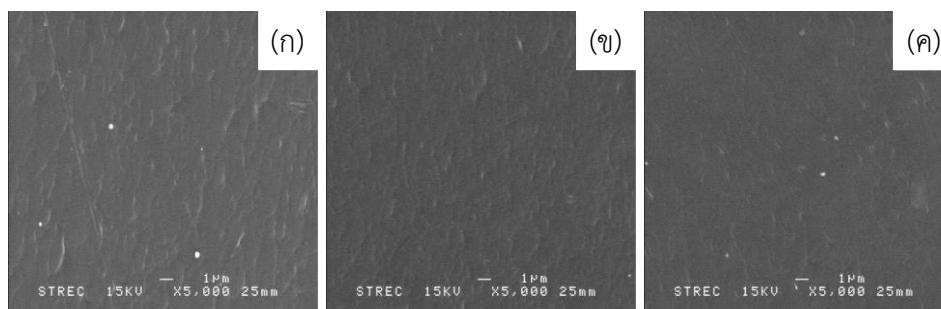
หมายเหตุ * N/A คือไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ เนื่องจากความสามารถในการดึงยืดของฟิล์มเป่าน้อยกว่าระดับการดึงยืดที่ต้องการ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการดึงยืดและความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PO ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

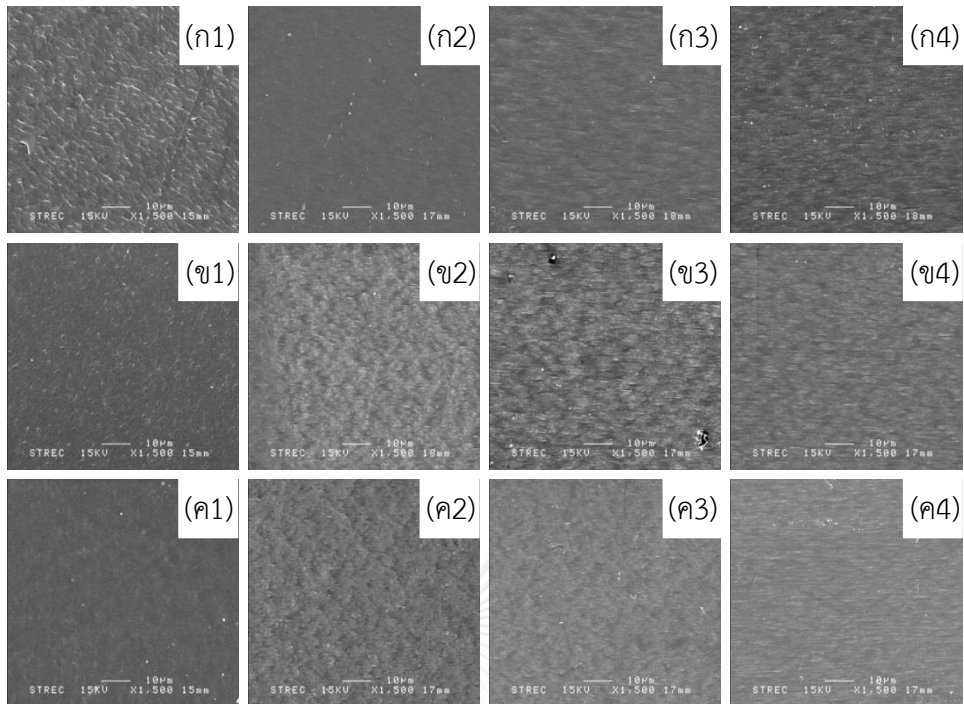
4.1.2.3 สัณฐานวิทยา

จากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (รูปที่ 4.10) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มเป่า PP_a ที่เตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm มีลักษณะเรียบ โดยความเร็วลมหล่อเย็นที่สูงขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีแนวโน้มเรียบมากกว่าด้วย

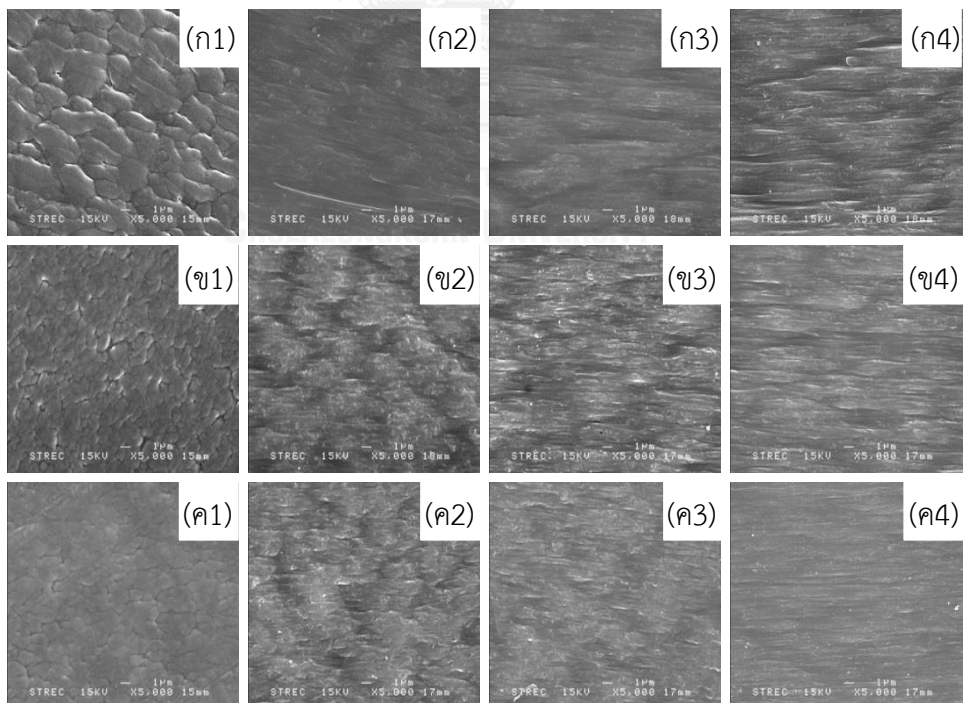


รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PP_a ที่ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค)

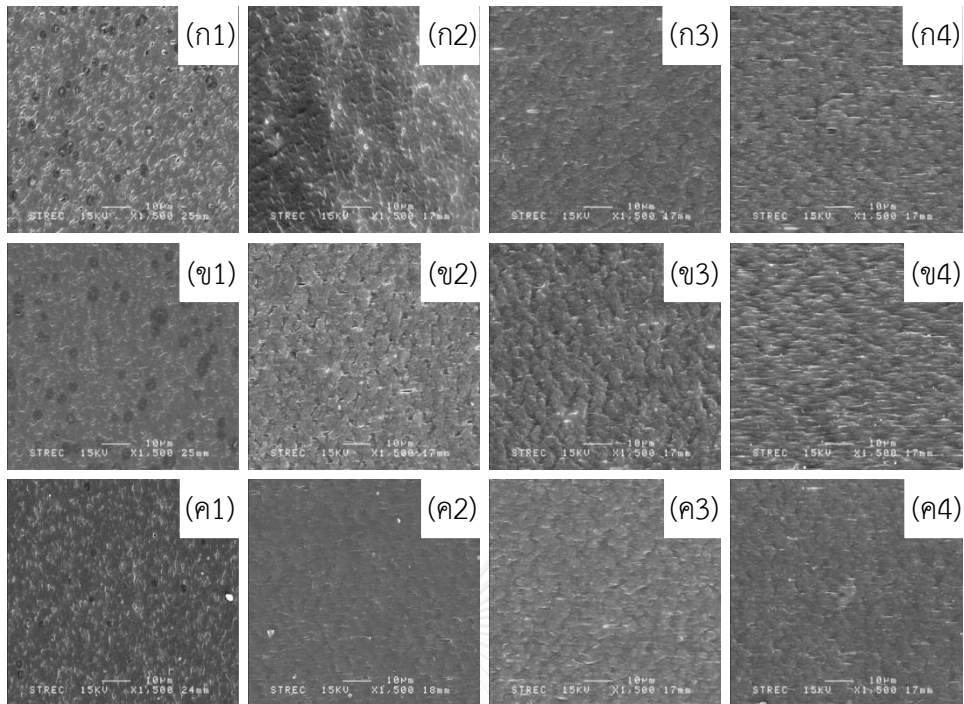
ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 และ 5,000 เท่าของพื้นผิวฟิล์ม PO แสดงในรูปที่ 4.11 - 4.18 เมื่อพิจารณาพื้นผิวฟิล์มที่ไม่ผ่านขั้นตอนการดัดยัด (รูปในคอลัมน์ซ้ายมือ) จะเห็นรอยแยกเล็กน้อยเนื่องจากในขณะขึ้นรูปฟิล์มเป่าได้รับการดัดยัดจากการปรับความเร็วลูกกลิ้งหนีบต่อลูกกลิ้งบริเวณหน่วยม้วนเก็บด้วยสัดส่วน 5:3 เมื่อฟิล์มผ่านการดัดยัดสูงขึ้น (รูปจากคอลัมน์ที่ 2 ถึง 4) จะพบว่ารูพรุนมีปริมาณและขนาดที่ยาวมากขึ้นตามแนวแรงดึง เนื่องจากการดัดยัดทำให้บริเวณที่เป็นรีวรอยที่แทรกในเนื้อพอลิเมอร์ถูกดึงให้แยกออกตามแนวแรงดึงและมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เชื่อว่าบริเวณรีวรอยดังกล่าวคือรอยต่อระหว่างเฟสพอลิโพรพิลีนและเฟสไมเนอร์ลอสอล เนื่องจากบริเวณดังกล่าวใหญ่ ชัดเจนและมีมากขึ้นตามปริมาณไมเนอร์ลอสอลที่เพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มเป่า PO₁₀ (รูปที่ 4.11 - 4.12) และ PO₂₀ (รูปที่ 4.13 - 4.14) รูพรุนจะมีความลึกเพียงเล็กน้อยไม่ทะลุไปทั้งความหนาของฟิล์มสอดคล้องกับค่าการดูดซับน้ำมันที่มีค่าที่ต่ำ แต่ในฟิล์มเป่า PO₃₀ (รูปที่ 4.15 - 4.16) และ PO₄₀ (รูปที่ 4.17 - 4.18) รูพรุนจะมีความลึกที่มาก สามารถทะลุความหนาไปยังผิวฟิล์มอีกด้านหนึ่งได้และสอดคล้องกับค่าการดูดซับน้ำมันที่มีค่าที่สูง นั้นหมายความว่า ฟิล์มที่เติมไมเนอร์ลอสอลในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 40 นั้น ปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นและเยอะขึ้น และมีลักษณะที่ลึกลงไปตามความหนาเพิ่มขึ้น



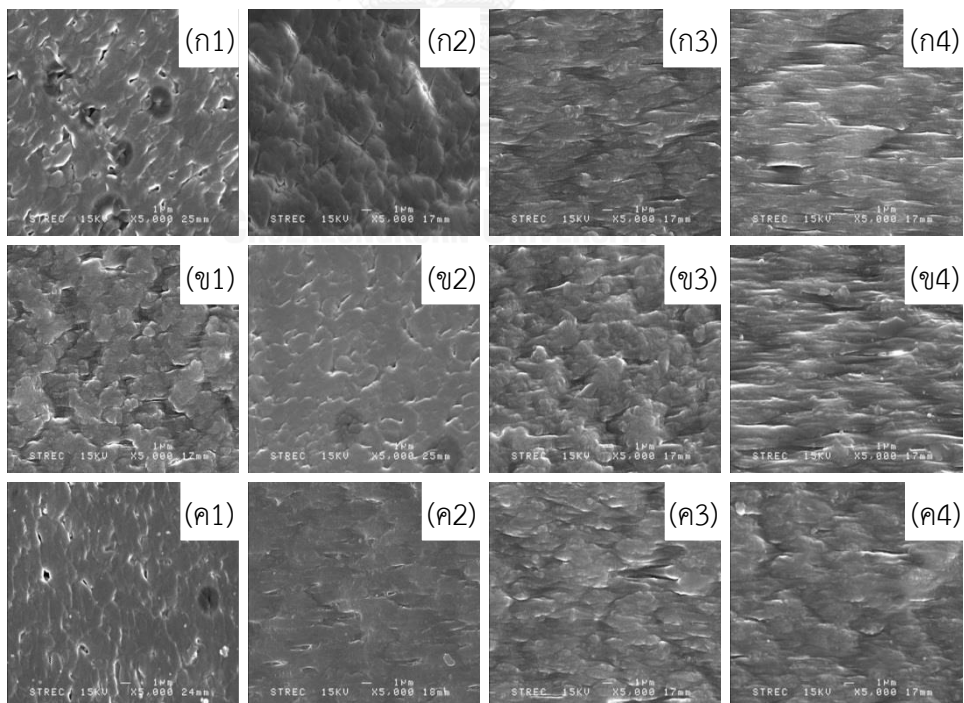
รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{10} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



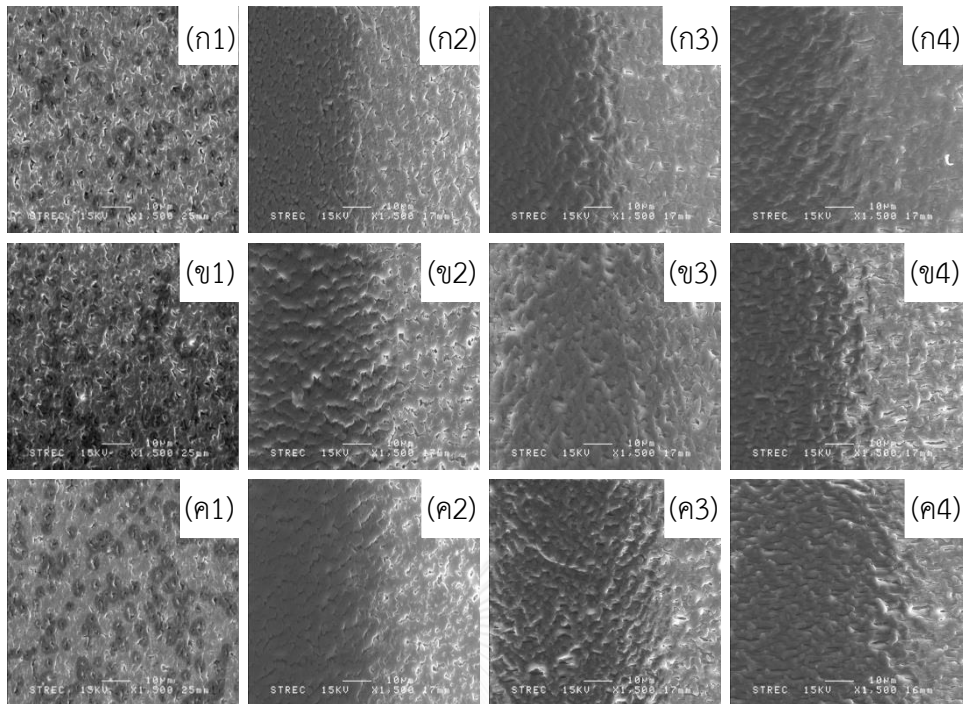
รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{10} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



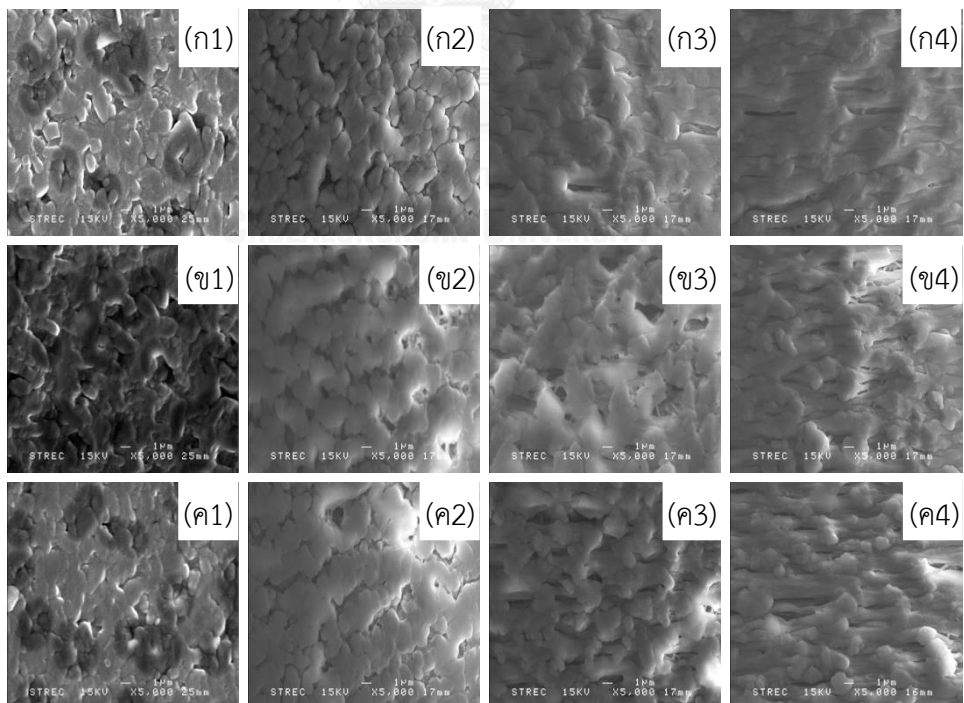
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{20} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



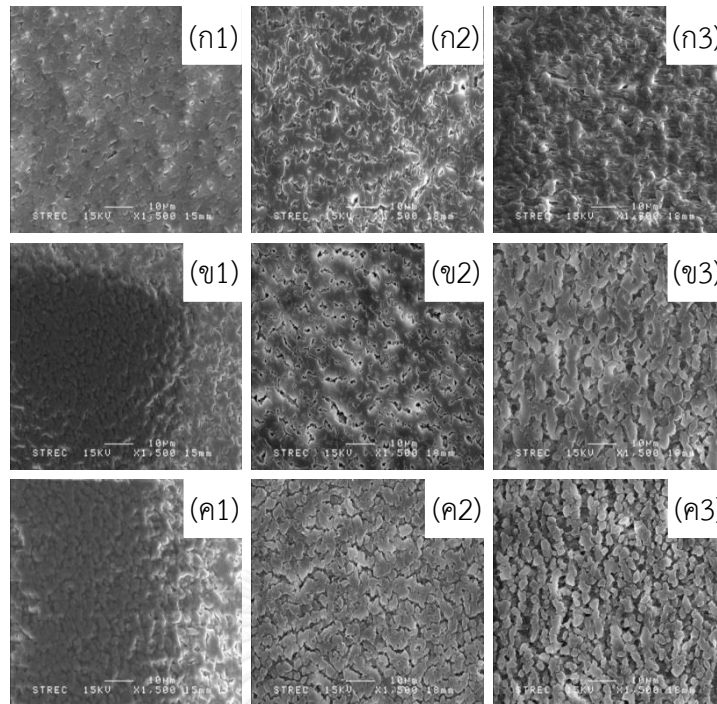
รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{20} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



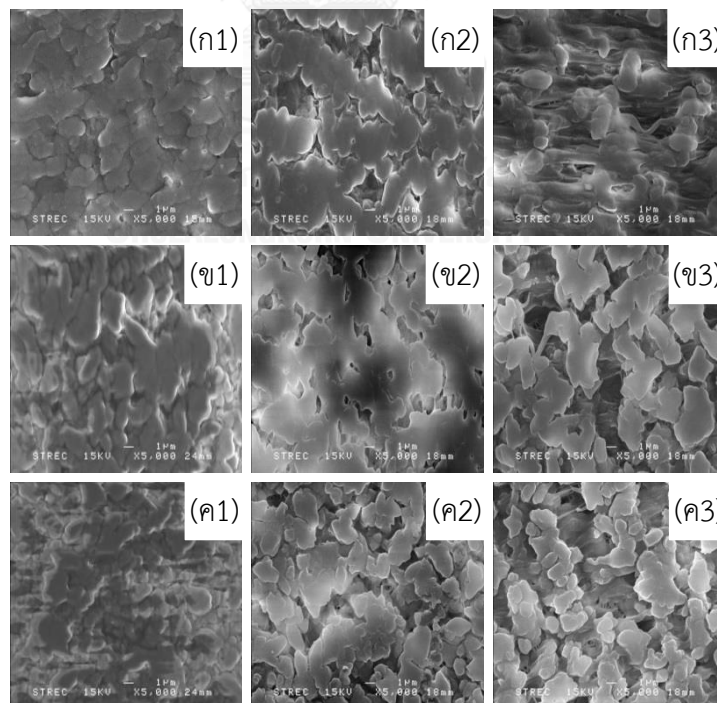
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{30} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดัดยัด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{30} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดัดยัด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{40} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการตั้งยัด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)



รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PO_{40} ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการตั้งยัด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)

4.2 फिल्मเป่า PC

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในส่วนนี้คือการเตรียมฟิล์มชนิดรูพรุนขนาดเล็กด้วยคอมพาวนด์ที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยทำการศึกษาผลของความเร็วยรอบสกรู ความเร็วลมหล่อเย็นและระดับการดึงยึดต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเป่า PC ทั้งก่อนการดึงยึดและหลังการดึงยึด

4.2.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PC ที่ไม่ผ่านการดึงยึด

4.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

การทดลองขึ้นรูปฟิล์มเป่า PC ใช้อุณหภูมิมากกว่าการขึ้นรูปฟิล์มเป่า PO 10°C ตามภาวะการขึ้นรูป b (ตารางที่ 3.2) เพื่อเป็นการลดความดันที่เกิดขึ้น จากการขึ้นรูปโดยปรับเปลี่ยนความเร็วลมหล่อเย็น พบว่าที่ความเร็วลมหล่อเย็น 400 และ 700 rpm ท่อฟิล์มจะมีลักษณะที่โค้ง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วลมหล่อเย็นเป็น 1,000 rpm ลักษณะการเลี้ยวของฟิล์มจะลดลงและสามารถขึ้นรูปฟิล์มให้ตรงขึ้นไปสู่ลูกกลิ้งหนีบได้ จึงสรุปได้ว่าความเร็วของลมหล่อเย็นนั้นต้องมีมากพอที่จะทำให้ท่อฟิล์มทรงตัวได้ โดยค่าที่เหมาะสมจะขึ้นกับความแข็งแรงของท่อฟิล์มที่ออกจากตาย ซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิพอลิเมอร์เหลว อัตราเร็วของการเย็นตัว และวัสดุที่ใช้ขึ้นรูป โดยฟิล์ม PO จะต้องการความเร็วลมหล่อเย็นต่ำกว่าฟิล์ม PC ที่มีอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ ซึ่งลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่าจะมีความแตกต่างกันสัมพันธ์กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วลมหล่อเย็นดังแสดงในตารางที่ 4.9

ฟิล์มเป่า PP_b จะมีลักษณะโปร่งใสและผิวสัมผัสที่เรียบลื่น ในขณะที่ฟิล์มเป่า PC มีลักษณะโปร่งแสงในทุกความเร็วลมหล่อเย็นและความเร็วยรอบสกรู โดยความขุ่นของฟิล์มเกิดมากขึ้นเมื่อมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น ผิวสัมผัสของฟิล์มเป่า PC มีความเรียบและลื่นลดน้อยลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP_b ในสูตรที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตสูงถึง 30% ผิวฟิล์มเป่าที่ขึ้นรูปด้วยรอบสกรู 10 rpm มีความขรุขระค่อนข้างมาก เมื่อสัมผัสแล้วรู้สึกถึงอนุภาคเม็ดเล็กๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในผิวฟิล์ม แต่เมื่อทดลองเพิ่มรอบสกรูเป็น 20 rpm พบว่า ความขรุขระบริเวณผิวจะลดลง เมื่อพิจารณาความยับของฟิล์มเป่า PC เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PO จะพบว่าฟิล์ม PC มีรอยยับที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้อยกว่า ซึ่งเชื่อว่าเป็นผลของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ทำให้ฟิล์มมีความแข็งตึง (stiffness) มากขึ้น

ตารางที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วรอบ สกรู (rpm) | ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | ลักษณะทางกายภาพ | | |
|------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------|-----------|--------------|
| | | | สมบัติทางแสง* | ความยับ** | ผิวสัมผัส*** |
| PP _b | 10 | 400 | TP | X | S |
| | | 700 | TP | X | S |
| | | 1,000 | TP | X | S |
| | 20 | 400 | TP | X | S |
| | | 700 | TP | X | S |
| | | 1,000 | TP | X | S |
| PC ₁₀ | 10 | 400 | TL | X | S |
| | | 700 | TL | X | S |
| | | 1,000 | TL | X | S |
| | 20 | 400 | TL | X | S |
| | | 700 | TL | X | S |
| | | 1,000 | TL | X | S |
| PC ₂₀ | 10 | 400 | TL | X | R |
| | | 700 | TL | X | R |
| | | 1,000 | TL | X | R |
| | 20 | 400 | TL | X | R |
| | | 700 | TL | X | R |
| | | 1,000 | TL | X | R |
| PC ₃₀ | 10 | 400 | TL | X | R |
| | | 700 | TL | X | R |
| | | 1,000 | TL | X | R |
| | 20 | 400 | TL | X | R |
| | | 700 | TL | X | R |
| | | 1,000 | TL | X | R |

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

** / คือ มี X คือ ไม่มี

*** S คือ เรียบ (Smooth) R คือ ขรุขระ (Rough)

4.2.1.2 โครงสร้างผลึกและระดับความเป็นผลึก

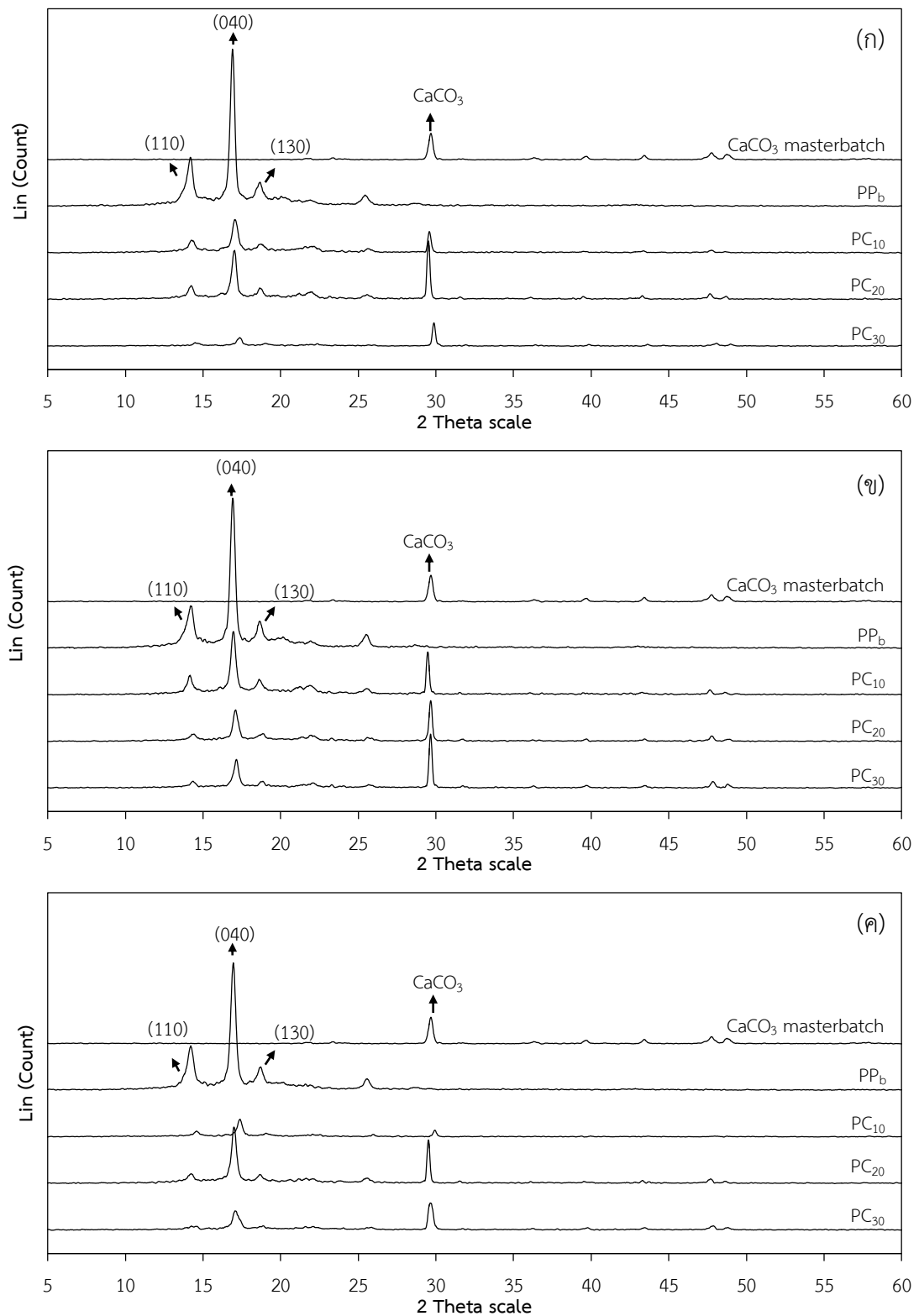
WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PC ซึ่งขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 700 และ 1,000 rpm ที่มีการใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 (ก) – (ค) และที่มีการใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 (ก) – (ค) จากรูปจะเห็นว่าระนาบที่ปรากฏคือ (110) (040) และ (130) ตามลำดับ [36] สอดคล้องกับผลึกแอลฟาเช่นเดียวกับฟิล์มเป่า PO แต่ฟิล์มเป่า PC จะพบระนาบผลึกที่มุม 29.9° ที่สอดคล้องกับผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต [37]

จากการพิจารณาดำแหน่งของระนาบผลึก (ภาคผนวก ก) พบว่าความเร็วลมหล่อเย็นที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์ม PP_b มีค่า 2θ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลของความเร็วลมหล่อเย็นต่อตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า PC มีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน นอกจากนี้ยังพบว่ารอบสกรูที่มากขึ้นทำให้ค่า 2θ ของฟิล์มเป่า PC มีค่าน้อยลง หรือส่งผลให้ unit cell ใหญ่ขึ้น รวมทั้งอุณหภูมิเป่าฟิล์ม PP ที่สูงขึ้น 10°C ก็ส่งผลให้ค่า 2θ ลดลงด้วยเช่นกัน

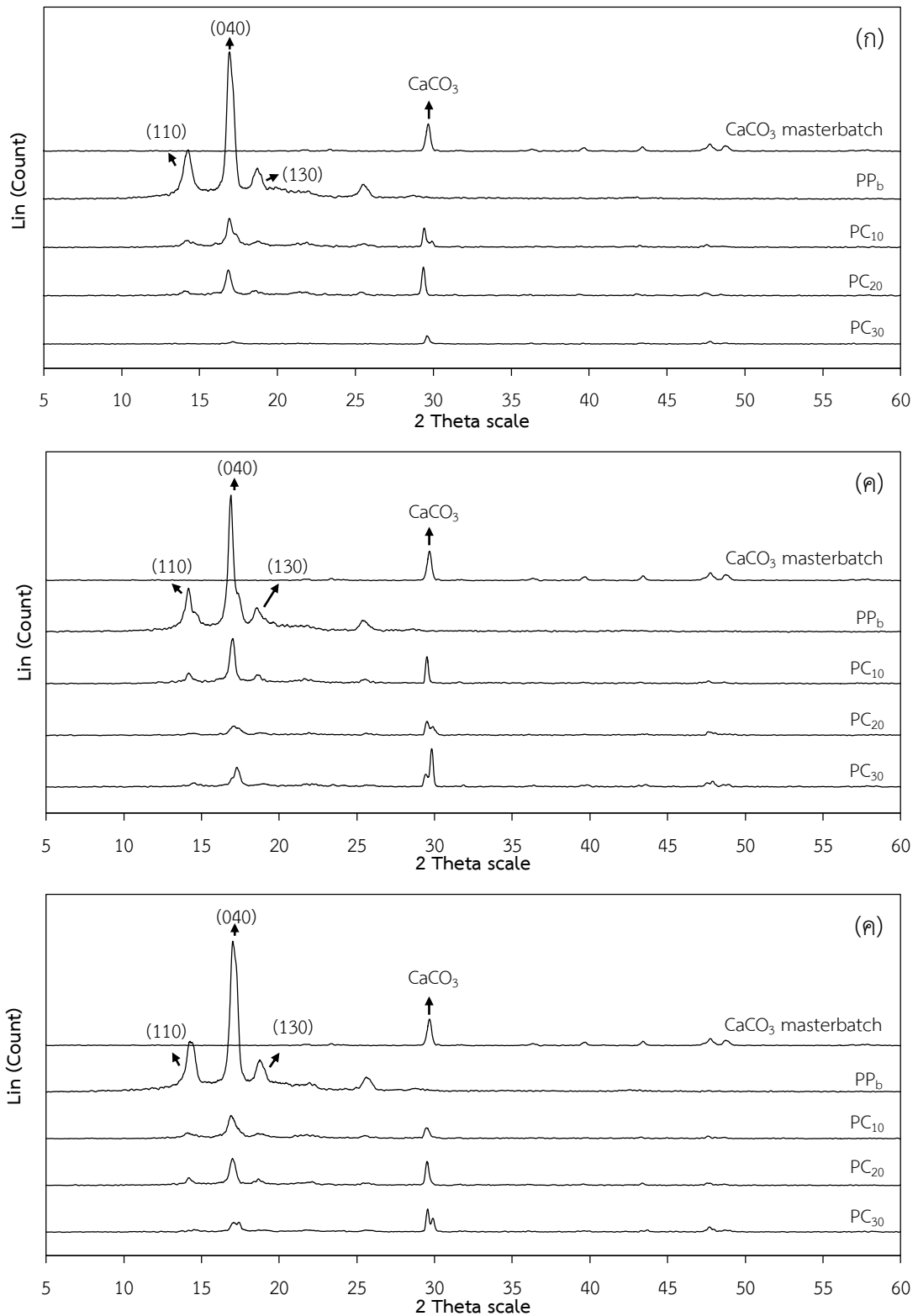
ค่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า PC ในตารางที่ 4.10 ซึ่งให้เห็นว่าฟิล์มเป่า PC มีความเป็นผลึกน้อยกว่าฟิล์มเป่า PP_b และยิ่งปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้นยิ่งส่งผลให้ปริมาณผลึกของฟิล์มลดลง โดยฟิล์มเป่า PP_b ที่ขึ้นรูปด้วยรอบสกรู 10 rpm (61 - 64%) มีผลึกสูงกว่าฟิล์มเป่า PP_b ที่ขึ้นรูปด้วย 20 rpm (55 - 60%) ทั้งนี้เชื่อว่าเป็นผลจากอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิบริเวณตาย (ตารางที่ 4.11) อย่างไรก็ตามรอบสกรูมีผลค่อนข้างน้อยต่อระดับผลึกในฟิล์ม PC₂₀ และ PC₃₀

ตารางที่ 4.10 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ระดับความเป็นผลึก (%) ที่ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | | | | | |
|------------------|---|-----|-------|------------------------|-----|-------|
| | ความเร็วรอบสกรู 10 rpm | | | ความเร็วรอบสกรู 20 rpm | | |
| | 400 | 700 | 1,000 | 400 | 700 | 1,000 |
| PP _b | 64 | 61 | 62 | 56 | 55 | 60 |
| PC ₁₀ | 45 | 48 | 48 | 52 | 56 | 51 |
| PC ₂₀ | 55 | 42 | 53 | 52 | 50 | 46 |
| PC ₃₀ | 36 | 44 | 49 | 35 | 52 | 49 |



รูปที่ 4.19 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์



รูปที่ 4.20 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากฟิล์มออกมาจากตายวงแหวน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วรอบสกรู (rpm) | ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | อุณหภูมิ (°C) ของฟิล์มเป่า | | | | |
|------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-------|------|------|------|
| | | | ที่ระดับความสูง (cm.) | | | | |
| | | | 0 | 11 | 27 | 42 | 56 |
| PP _b | 10 | 400 | 186.6 | 82.9 | 55.0 | 48.2 | 42.7 |
| | | 700 | 156.7 | 77.2 | 54.1 | 46.7 | 42.8 |
| | | 1,000 | 163.5 | 64.1 | 47.7 | 42.1 | 40.7 |
| | 20 | 400 | 194.0 | 71.0 | 48.4 | 41.4 | 39.1 |
| | | 700 | 193.0 | 58.9 | 41.1 | 37.6 | 36.3 |
| | | 1,000 | 188.3 | 50.8 | 38.7 | 36.6 | 35.3 |
| PC ₁₀ | 10 | 400 | 194.3 | 99.4 | 62.6 | 53.8 | 46.9 |
| | | 700 | 188.7 | 86.2 | 54.6 | 48.1 | 43.2 |
| | | 1,000 | 183.4 | 75.1 | 56.0 | 48.1 | 43.9 |
| | 20 | 400 | 184.5 | 71.6 | 47.0 | 42.4 | 40.3 |
| | | 700 | 184.7 | 73.0 | 44.5 | 40.6 | 38.7 |
| | | 1,000 | 163.2 | 62.1 | 40.6 | 38.4 | 37.0 |
| PC ₂₀ | 10 | 400 | 163.4 | 102.5 | 57.1 | 45.5 | 42.3 |
| | | 700 | 149.7 | 89.5 | 55.8 | 47.1 | 43.2 |
| | | 1,000 | 134.6 | 74.4 | 54.8 | 47.7 | 43.8 |
| | 20 | 400 | 169.1 | 85.1 | 51.0 | 43.5 | 40.3 |
| | | 700 | 176.9 | 78.1 | 44.1 | 39.5 | 38.1 |
| | | 1,000 | 140.3 | 71.7 | 40.9 | 37.5 | 35.8 |
| PC ₃₀ | 10 | 400 | 189.8 | 103.6 | 57.0 | 46.7 | 43.0 |
| | | 700 | 174.5 | 102.2 | 67.8 | 48.2 | 44.1 |
| | | 1,000 | 164.7 | 86.0 | 56.7 | 48.1 | 45.2 |
| | 20 | 400 | 151.1 | 89.4 | 56.6 | 47.6 | 45.3 |
| | | 700 | 163.2 | 82.8 | 46.6 | 41.7 | 39.6 |
| | | 1,000 | 136.1 | 61.9 | 41.2 | 38.3 | 37.5 |

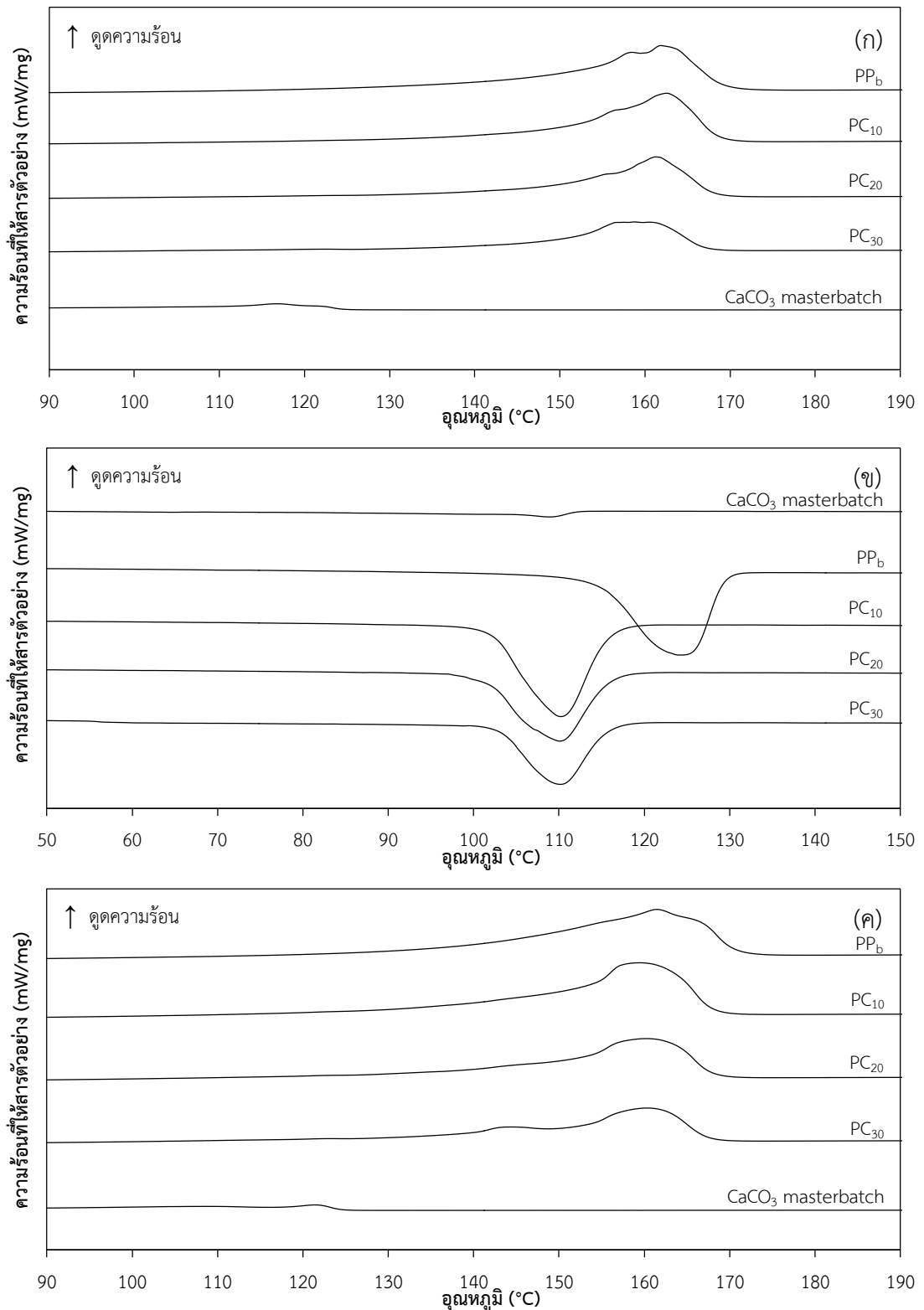
4.2.1.3 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของฟิล์มเป่า PC ซึ่งขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบสกรู 10 และ 20 rpm แสดงในรูปที่ 4.21 – 4.22 ตามลำดับ การวิเคราะห์เลือกเฉพาะฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เนื่องจากเป็นระดับความเร็วลมที่ฟิล์มเป่า PC₃₀ สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เลื้อยและไม่เกิดการยับ เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 พบว่าอุณหภูมิหลอมผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ไม่แตกต่างกันนัก อย่างไรก็ตามข้อมูลจากช่วงการลดอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเกิดผลึกของ PC ต่ำกว่า PP อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งความเร็วรอบสกรูที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ระดับความเป็นผลึก (ตารางที่ 4.12) ลดลงอย่างชัดเจนเฉพาะใน PP_b และ PC₁₀ เมื่อเปรียบเทียบความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า PP_b ซึ่งขึ้นรูปด้วยรอบสกรู 20 rpm พบว่าระดับความเป็นผลึก (42.6%) ต่ำกว่า PP_a (45.9%) ด้วย

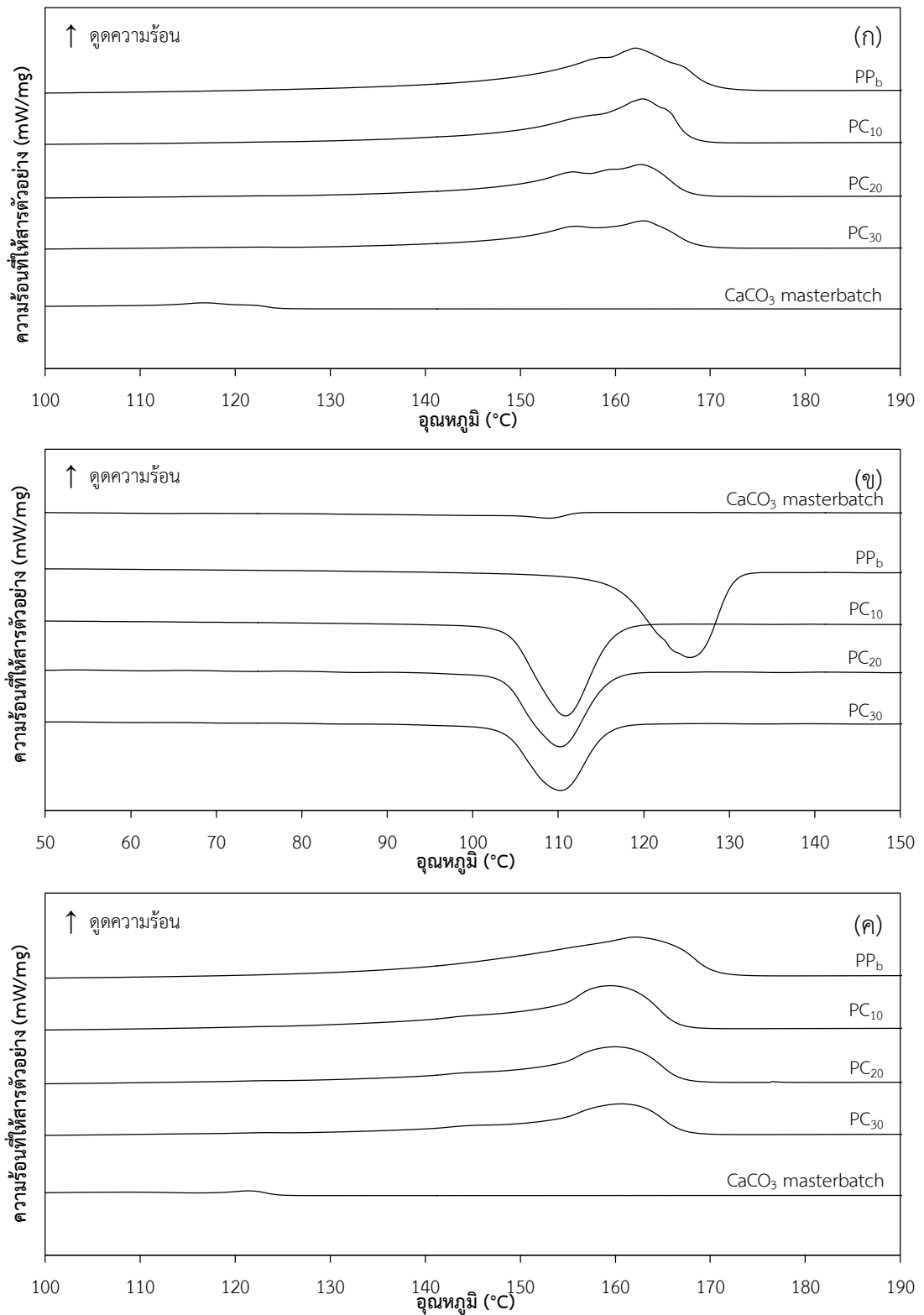
ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วรอบสกรูแตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบตช์

| วัตถุดิบ/ ฟิล์มเป่า | ความเร็วรอบ สกรู (rpm) | ให้ความร้อนครั้งที่ 1 | | | ลดความร้อน | | | ให้ความร้อนครั้งที่ 2 | | |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| | | T _m (°C) | ΔH _m (J/g) | X _c [*] (%) | T _c (°C) | ΔH _c (J/g) | X _c [*] (%) | T _m (°C) | ΔH _m (J/g) | X _c [*] (%) |
| CaCO ₃ masterbatch | | 116.8 | - | - | 108.9 | - | - | 108.5 | - | - |
| PP _b | 10 | 158.5 161.8 | 92.0 | 44.4 | 124.2 | 105.5 | 51.0 | 161.5 | 104.4 | 50.4 |
| | 20 | 162.1 | 88.1 | 42.6 | 125.4 | 100.8 | 48.7 | 162.1 | 104.4 | 50.4 |
| PC ₁₀ | 10 | 162.5 | 88.0 | 48.3 | 110.2 | 95.5 | 52.4 | 159.6 | 103.5 | 56.8 |
| | 20 | 162.9 | 75.6 | 41.5 | 110.8 | 85.9 | 47.2 | 159.6 | 89.9 | 49.4 |
| PC ₂₀ | 10 | 161.2 | 67.0 | 42.6 | 110.1 | 80.3 | 51.0 | 160.4 | 79.1 | 50.3 |
| | 20 | 155.6 162.7 | 66.1 | 42.0 | 110.2 | 69.9 | 44.4 | 160.0 | 75.7 | 48.1 |
| PC ₃₀ | 10 | 158.8 | 58.9 | 43.8 | 110.2 | 73.0 | 54.2 | 144.6 160.3 | 70.8 | 52.6 |
| | 20 | 156.0 163.0 | 60.6 | 45.0 | 110.3 | 65.5 | 48.7 | 160.7 | 63.9 | 47.5 |

หมายเหตุ * คือ ข้อมูลระดับความเป็นผลึกที่ทำการ normalized แล้ว



รูปที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต

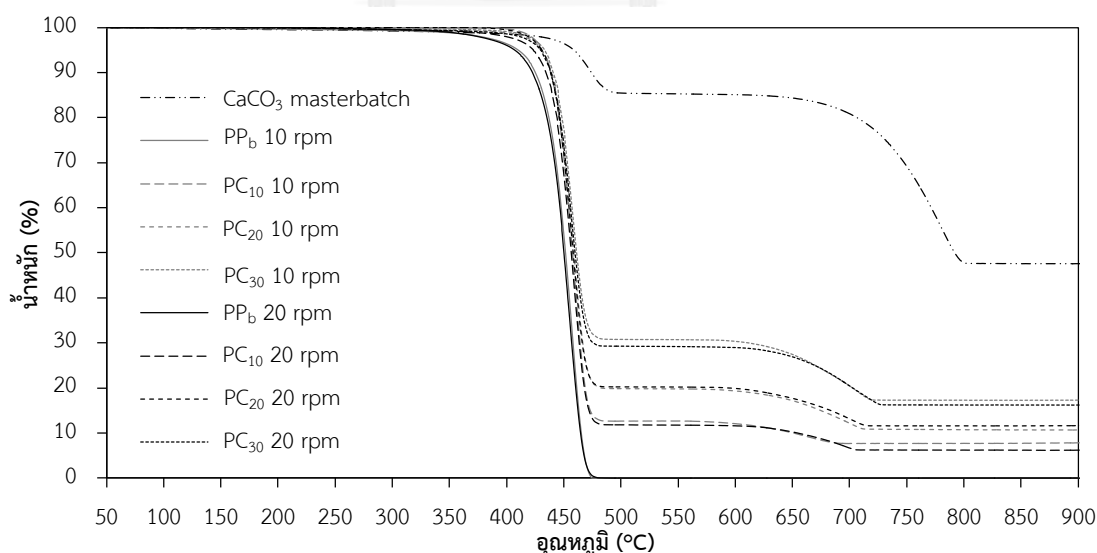


รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต

4.2.1.4 ความเสถียรทางความร้อน

เสถียรทางความร้อนของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบสกรู 10 และ 20 rpm แสดงในรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.13 ฟิล์ม PP_b มีการสลายตัวทางความร้อนที่เกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวระหว่างอุณหภูมิ 425 ถึง 470 °C ในฟิล์ม PC และ CaCO₃ masterbatch (รูปที่ 4.23) ปรากฏช่วงการสลายตัวทางความร้อนเป็น 2 ช่วง คือระหว่าง 447 - 487°C และ 723 - 790°C ทั้งนี้หลังจาก 780°C ยังมีสารหลงเหลือที่มีเสถียรภาพทางความร้อนค่อนข้างสูง คือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแม้ได้รับความร้อนถึง 900°C

การสลายตัวในช่วงแรกของ PC และ CaCO₃ masterbatch ปรากฏในช่วงอุณหภูมิ 430 - 445°C และ 447 - 487°C ตามลำดับ จึงเชื่อว่าการเริ่มต้นสลายตัวทางความร้อนของฟิล์ม PC ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าในกรณีของ PP กว่า 10 - 20°C นั้นเป็นผลมาจาก LDPE ที่ผสมใน CaCO₃ masterbatch เนื่องจากโดยทั่วไปอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ LDPE คือ 401 - 486°C [38] จึงสรุปได้ว่า CaCO₃ masterbatch สามารถช่วยหน่วงการสลายตัวทางความร้อนให้แก่ PP ได้ [37] การสลายตัวในช่วงที่สองและสารเหลือค้าง เชื่อว่าเป็นผลของแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้หากพิจารณาน้ำหนักของสารที่เกี่ยวข้องในช่วงดังกล่าว จะพบว่าเทียบเท่าได้กับอัตราส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนต และจากที่ได้เคยมีรายงานถึงอุณหภูมิการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 635 - 865°C [39] โดยกลไกการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเป็นไปตามสมการคือ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ [39] ดังนั้นถ้าที่เหลือของฟิล์ม PC จึงเป็น CaO ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วรอบสกรูแตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาตรฐานแบบทซ์

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วรอบสกรูแตกต่างกัน ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบตช์

| วัสดุติบ/ ฟิล์มเป่า | ความเร็ว รอบสกรู (rpm) | การสลายตัวช่วงที่ 1 | | | | การสลายตัวช่วงที่ 2 | | | |
|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| | | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) |
| CaCO ₃ masterbatch | | 447.0 | 472.8 | 487.0 | 14.90 | 723.0 | 779.8 | 790.0 | 37.53 |
| PP _b | 10 | 425.0 | 457.5 | 470.0 | 100.00 | - | - | - | - |
| | 20 | 425.0 | 455.4 | 470.0 | 100.00 | - | - | - | - |
| PC ₁₀ | 10 | 435.0 | 459.5 | 470.0 | 87.32 | 600.0 | 668.2 | 690.0 | 4.79 |
| | 20 | 438.0 | 458.8 | 472.0 | 88.31 | 627.0 | 696.3 | 704.0 | 5.47 |
| PC ₂₀ | 10 | 438.0 | 457.4 | 470.0 | 80.18 | 620.0 | 696.3 | 709.0 | 9.16 |
| | 20 | 435.0 | 458.8 | 464.0 | 79.80 | 616.0 | 703.0 | 712.0 | 8.51 |
| PC ₃₀ | 10 | 445.0 | 458.7 | 473.0 | 69.26 | 625.0 | 707.8 | 721.0 | 13.42 |
| | 20 | 430.0 | 455.9 | 468.0 | 70.86 | 640.0 | 699.4 | 725.0 | 12.91 |

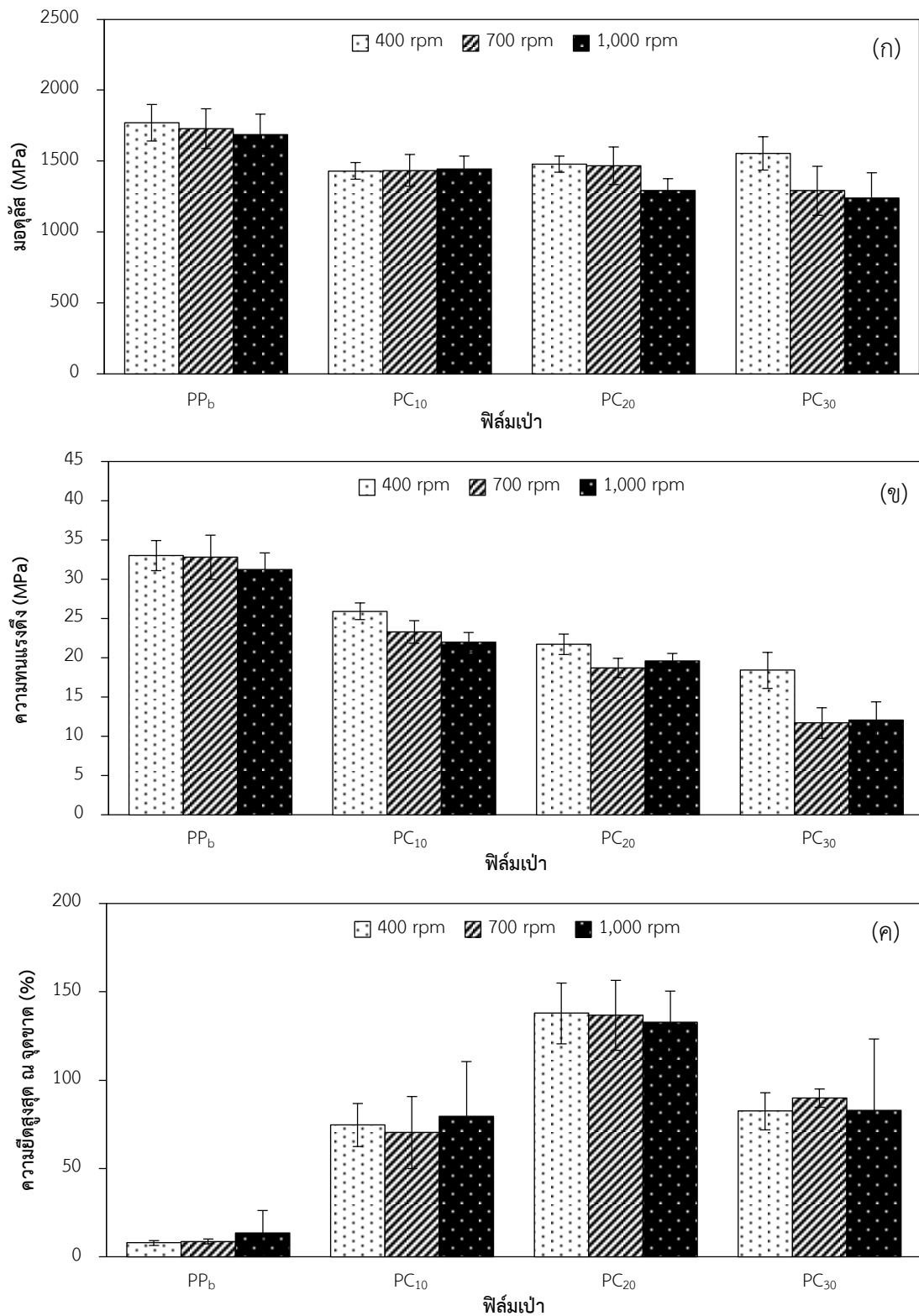
4.2.1.5 การทนต่อแรงดึง

สมบัติการทนต่อแรงดึงได้แก่โมดูลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ในตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูปฟิล์มด้วยความเร็วรอบสกรู 20 rpm ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มดีกว่าเมื่อใช้รอบสกรูเป็น 10 rpm เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารตัวเติมและความเร็วของลมหล่อเย็นต่อสมบัติของฟิล์ม PC (รูปที่ 4.24 - 4.25) พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับกรณีฟิล์ม PO โดยปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าโมดูลัสและความทนแรงดึงลดลง นอกจากนี้การใช้สารเติมที่ไม่สูงเกินกว่า 30% จะสามารถช่วยเพิ่มค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ให้แก่ทั้งฟิล์ม PC และ PO จากการพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลของฟิล์ม PO และ PC ซึ่งขึ้นรูปด้วยความเร็วสกรู 20 rpm (ตารางที่ 4.6 และ 4.14) จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณสารตัวเติมใกล้เคียงกัน ฟิล์มดังกล่าวมีค่าความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดไม่แตกต่างกัน แต่ค่าโมดูลัสแตกต่างกันอย่างมาก เมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติม 30% สารตัวเติมที่เป็นลักษณะของเหลวจะส่งผลให้ฟิล์มมีค่าโมดูลัสเพียง 20% ของฟิล์ม PP ในขณะที่สารตัวเติมชนิดของแข็งยังมีโมดูลัสที่ค่อนข้างสูง คือคิดเป็นกว่า 70% ของฟิล์ม PP ความเร็วลมหล่อเย็นไม่มีผลกระทบต่อสมบัติการทนแรงดึงของฟิล์ม PC แต่จะส่งผลต่อระยะการยืดของทั้งฟิล์ม PP_a และ PP_b เป็นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มเป่า PP ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน 10°C โดยเลือกความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นเดียวกัน

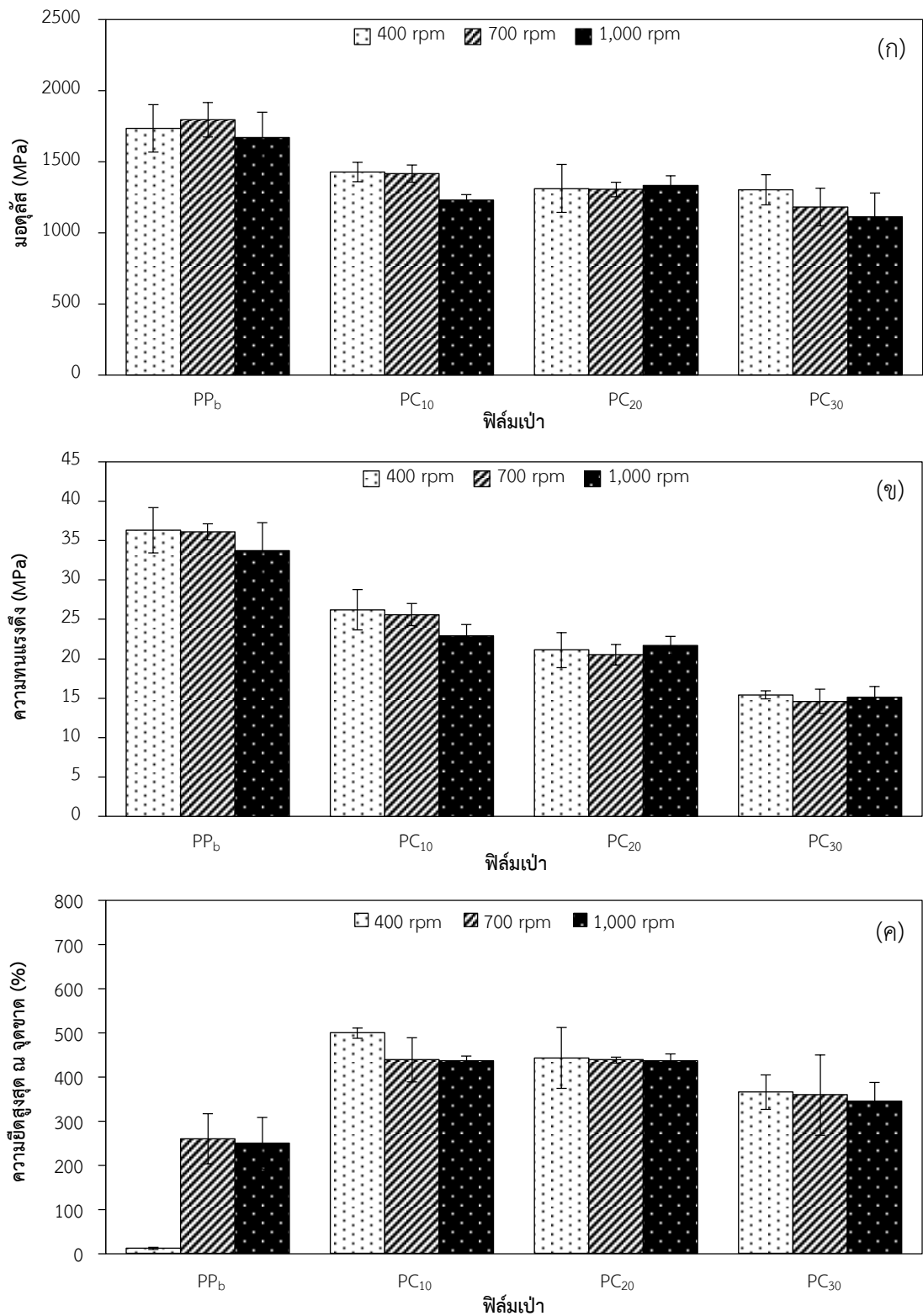
พบว่า การขึ้นรูปที่ ภาวะ a พิล์มที่ได้มีความแข็งแรงเชิงกลมากกว่าเมื่อขึ้นรูปที่ ภาวะ b สอดคล้องกับค่าระดับความเป็นผลึกที่สูงกว่าและ unit cell ที่เล็กกว่า

ตารางที่ 4.14 มอดุลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วรอบสกรูและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วรอบสกรู (rpm) | ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | มอดุลัส (MPa) | ความทนแรงดึง (MPa) | ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%) |
|------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|--------------------|----------------------------|
| PP _b | 10 | 400 | 1,771 ± 130.6 | 33.0 ± 1.9 | 8 ± 1.5 |
| | | 700 | 1,730 ± 139.9 | 32.8 ± 2.8 | 9 ± 1.3 |
| | | 1,000 | 1,688 ± 142.0 | 31.2 ± 2.1 | 13 ± 13.0 |
| | 20 | 400 | 1,734 ± 167.0 | 36.3 ± 2.9 | 11 ± 2.4 |
| | | 700 | 1,795 ± 121.4 | 36.1 ± 1.0 | 260 ± 57.2 |
| | | 1,000 | 1,667 ± 178.2 | 33.7 ± 3.5 | 250 ± 58.4 |
| PC ₁₀ | 10 | 400 | 1,431 ± 60.5 | 25.9 ± 1.1 | 75 ± 12.2 |
| | | 700 | 1,434 ± 94.1 | 23.3 ± 1.4 | 70 ± 20.3 |
| | | 1,000 | 1,443 ± 94.1 | 22.0 ± 1.3 | 80 ± 30.8 |
| | 20 | 400 | 1,426 ± 67.3 | 26.2 ± 2.6 | 499 ± 11.8 |
| | | 700 | 1,415 ± 59.6 | 25.6 ± 1.4 | 439 ± 50.0 |
| | | 1,000 | 1,231 ± 36.7 | 22.9 ± 1.4 | 435 ± 12.2 |
| PC ₂₀ | 10 | 400 | 1,480 ± 57.3 | 21.7 ± 1.3 | 138 ± 17.1 |
| | | 700 | 1,466 ± 132.6 | 18.7 ± 1.2 | 137 ± 19.8 |
| | | 1,000 | 1,293 ± 81.8 | 19.6 ± 1.0 | 133 ± 17.6 |
| | 20 | 400 | 1,311 ± 167.9 | 21.1 ± 2.2 | 442 ± 69.1 |
| | | 700 | 1,305 ± 51.2 | 20.5 ± 1.3 | 438 ± 6.5 |
| | | 1,000 | 1,334 ± 65.3 | 21.7 ± 1.2 | 436 ± 15.5 |
| PC ₃₀ | 10 | 400 | 1,554 ± 116.4 | 18.4 ± 2.3 | 82 ± 10.4 |
| | | 700 | 1,291 ± 172.5 | 11.7 ± 2.0 | 90 ± 5.2 |
| | | 1,000 | 1,241 ± 177.6 | 12.1 ± 2.3 | 83 ± 40.4 |
| | 20 | 400 | 1,303 ± 105.4 | 15.4 ± 0.5 | 365 ± 38.9 |
| | | 700 | 1,180 ± 131.7 | 14.6 ± 1.6 | 359 ± 90.4 |
| | | 1,000 | 1,113 ± 164.7 | 15.1 ± 1.4 | 345 ± 42.9 |



รูปที่ 4.24 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm



รูปที่ 4.25 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm

4.2.2 สมบัติของฟิล์มเป่า PC ที่ผ่านการดึงยืด

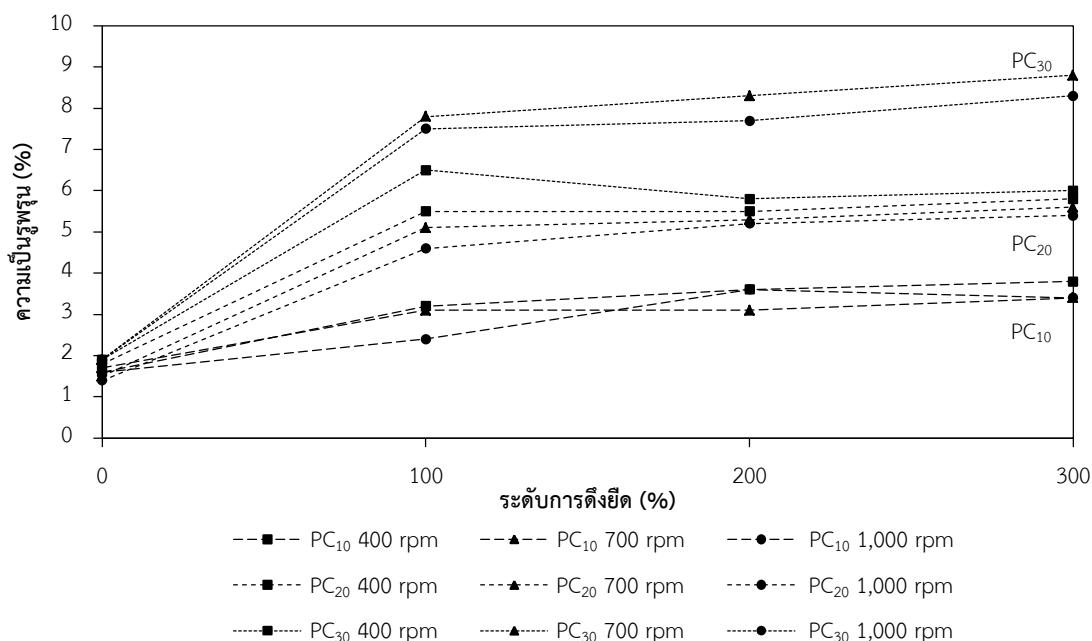
เนื่องจากฟิล์มเป่า PC ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบสกรู 10 rpm มีความสามารถในการดึงยืด หรือมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่น้อยกว่าที่ใช้รอบสกรู 20 rpm อย่างมาก ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจึงเลือกศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำมันและสัญญาณวิทยาของฟิล์มเป่า PC ที่ขึ้นรูปด้วยรอบสกรู 20 rpm และผ่านการดึงยืดที่ระดับต่างๆ

4.2.2.1 ความเป็นรูพรุน

ความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PC แสดงในตารางที่ 4.15 และ รูปที่ 4.26 โดยจะเห็นว่าฟิล์มเป่า PC ที่ไม่มีการดึงยืดยังนั้นแทบจะไม่มีรูพรุนเกิดขึ้น จากกลไกการเกิดรูพรุนซึ่งเป็นผลของการดึงแยกบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟสพอลิโพรพิลีนกับแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีกระจายอยู่ทั่วไป ดังนั้นความเป็นรูพรุนของฟิล์ม PC จึงมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการดึงยืด และเพิ่มปริมาณรอยต่อระหว่างเฟสด้วยการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้จำแนกไว้ในบทที่ 4.1.2.2 จะทำให้เห็นว่าฟิล์มเป่า PC นั้นมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม PO โดยประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันเทียบได้กับเพียง PO₂₀ คือฟิล์มเป่าที่มีค่าความเป็นรูพรุน $\leq 10\%$

ตารางที่ 4.15 ความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ความเร็วลมหล่อเย็น และระดับการดึงยืดแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm

| ฟิล์มเป่า PC | ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | ความเป็นรูพรุน (%) ที่ระดับการดึงยืด (%) | | | |
|------------------|--------------------------|--|------------|------------|------------|
| | | 0 | 100 | 200 | 300 |
| PC ₁₀ | 400 | 1.6 ± 0.34 | 3.2 ± 0.41 | 3.6 ± 0.30 | 3.8 ± 1.64 |
| | 700 | 1.7 ± 0.32 | 3.1 ± 1.42 | 3.1 ± 0.58 | 3.4 ± 0.20 |
| | 1,000 | 1.6 ± 0.23 | 2.4 ± 0.80 | 3.6 ± 0.39 | 3.4 ± 0.28 |
| PC ₂₀ | 400 | 1.8 ± 0.14 | 5.5 ± 1.01 | 5.5 ± 0.36 | 5.8 ± 1.14 |
| | 700 | 1.5 ± 0.14 | 5.1 ± 1.23 | 5.3 ± 0.15 | 5.6 ± 1.24 |
| | 1,000 | 1.4 ± 0.42 | 4.6 ± 0.48 | 5.2 ± 1.03 | 5.4 ± 0.16 |
| PC ₃₀ | 400 | 1.9 ± 0.27 | 6.5 ± 0.51 | 5.8 ± 0.55 | 6.0 ± 0.68 |
| | 700 | 1.9 ± 0.37 | 7.8 ± 1.44 | 8.3 ± 1.07 | 8.8 ± 0.83 |
| | 1,000 | 1.9 ± 0.59 | 7.5 ± 3.00 | 7.7 ± 0.37 | 8.3 ± 1.02 |



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการตั้งยัดและความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า PC ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm

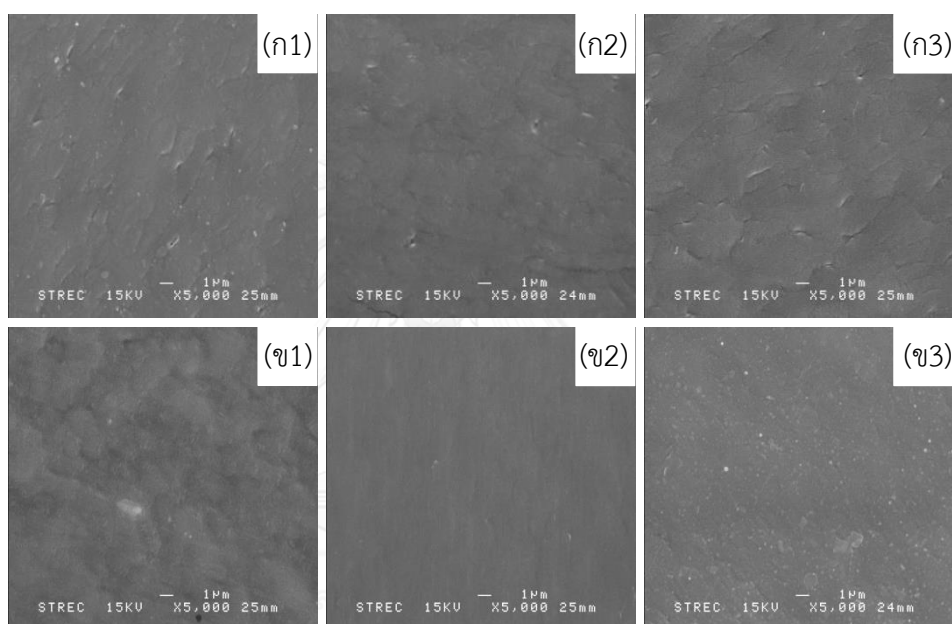
ฟิล์มเป่าทั้ง PP_b และ PC หลังการตั้งยัดจะมีลักษณะทึบแสง แต่เมื่อทดสอบการดูดซับน้ำมัน พบว่าฟิล์ม PC ยังมีความขุ่นขาวเหมือนกับก่อนการทดสอบทั้งนี้คาดว่ามาจากการที่ฟิล์มมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่น้อย ทำให้ไม่เกิดการกระเจิงแสงของน้ำมันที่ถูกดูดซึม และเป็นผลของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต

4.2.2.2 สันฐานวิทยา

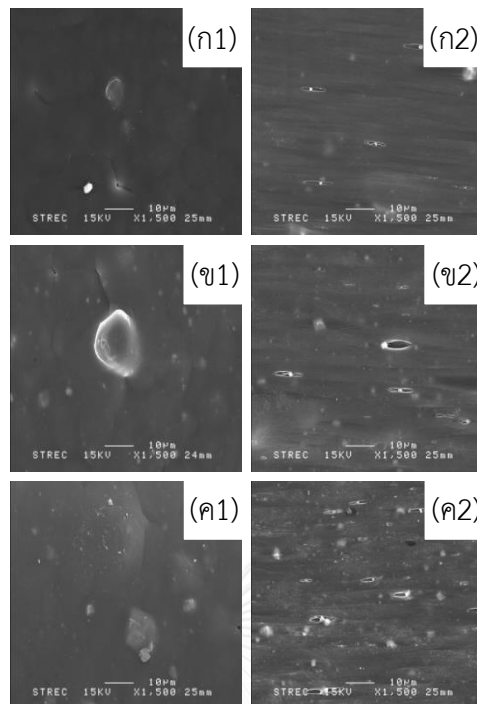
สันฐานวิทยาของฟิล์มเป่า PC ที่ความเร็วรอบสกรู 10 และ 20 rpm แสดงในรูปที่ 4.27 (ก) – (ข) ตามลำดับ จากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มเป่า PP_b พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบ โดยฟิล์ม PP_b ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็นและรอบสกรูที่สูงขึ้น มีแนวโน้มเรียบมากกว่า (รูปที่ 4.27 (ข))

สำหรับฟิล์มเป่า PC ที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm (รูปที่ 4.28 - 4.33) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มเป่าก่อนการตั้งยัดจะมีอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใส่เมื่อทำการตั้งยัดชิ้นงานตามแนวแกนของเครื่องจักรพบว่าบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสพอลิโพรพิลีนและอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดรอยฉีกขาดไปในทิศทางเดียวกับแรงที่ใช้ในการตั้งยัด ซึ่งเมื่อระดับการตั้งยัดเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มของรูพรุนจะเพิ่มมากขึ้นด้วย และการเกิดรูพรุนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็ก

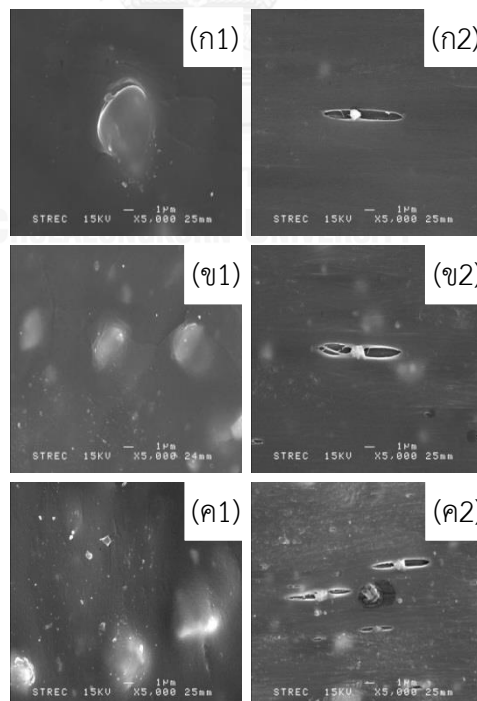
เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PO ที่ผ่านมาพบว่าลักษณะของรูพรุนจะแตกต่างกันชัดเจน โดยฟิล์มเป่า PO จะมีรูพรุนที่อยู่ระหว่างเฟสซึ่งกระจายได้อย่างทั่วถึงและเชื่อมต่อกันตลอดพื้นผิวฟิล์ม ในขณะที่ฟิล์มเป่า PC จะเกิดรูพรุนเฉพาะบริเวณรอยต่อของแคลเซียมคาร์บอเนตและพอลิโพรพิลีน ซึ่งไม่ได้เชื่อมต่อกันตลอดพื้นผิวฟิล์ม ซึ่งการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณร้อยละ 30 ก็ยังไม่ทำให้รูพรุนเกิดการเชื่อมต่อกันตลอดพื้นผิวของฟิล์มเช่นเดียวกันถึงแม้ปริมาณรูพรุนจะมีเพิ่มขึ้นก็ตาม รูปที่ 4.34 - 4.39 แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า PC ที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm กลไกการเกิดรูพรุนจะเหมือนกับในกรณีของการใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm และจะสังเกตว่าที่ระดับการดัดยัดที่สูงขึ้นเป็น 200 300% (คอลัมน์ที่ 3 และ 4) รูพรุนจะมีความยาวที่เพิ่มขึ้นไปในแนวทิศทางของแรงดึง



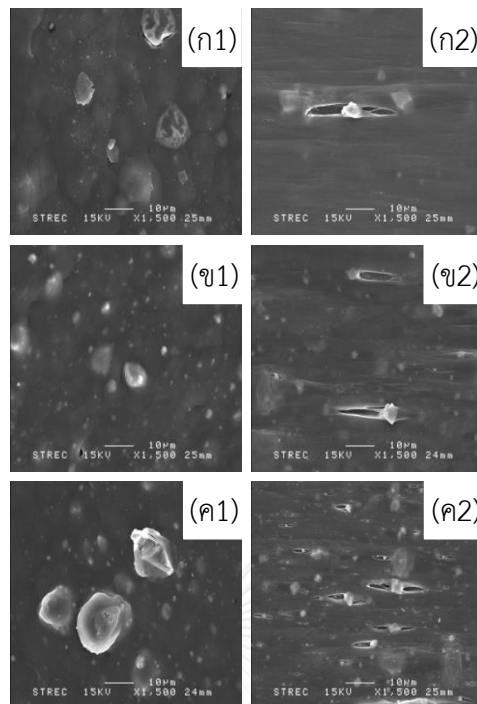
รูปที่ 4.27 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PP_b โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm (ก) และ 20 rpm (ข) ที่ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (1) 700 (2) และ 1,000 (3) rpm



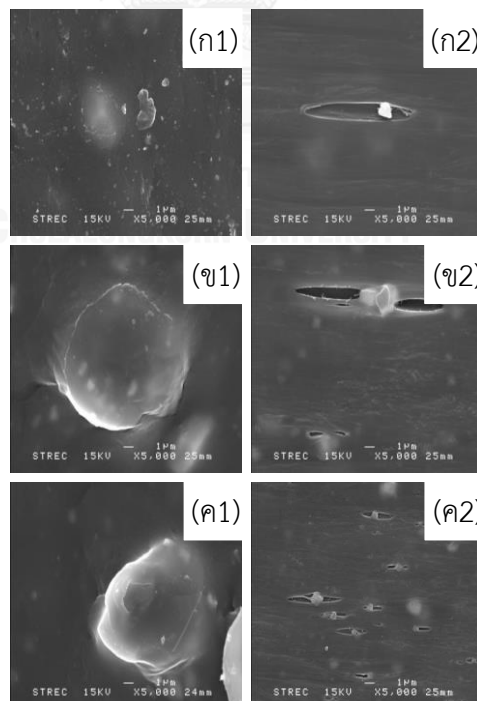
รูปที่ 4.28 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดั่งยี่ด 0 (1) และ 100% (2)



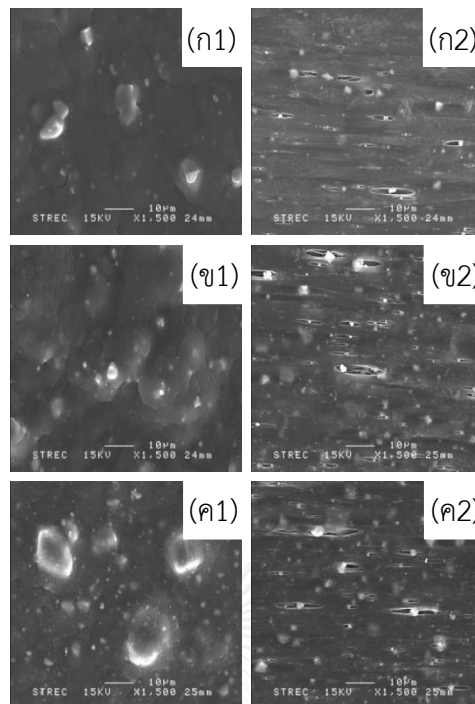
รูปที่ 4.29 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดั่งยี่ด 0 (1) และ 100% (2)



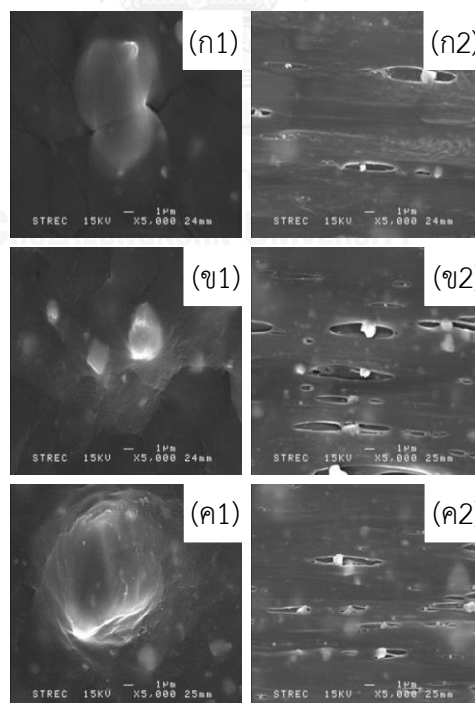
รูปที่ 4.30 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดั่งยี่ด 0 (1) และ 100% (2)



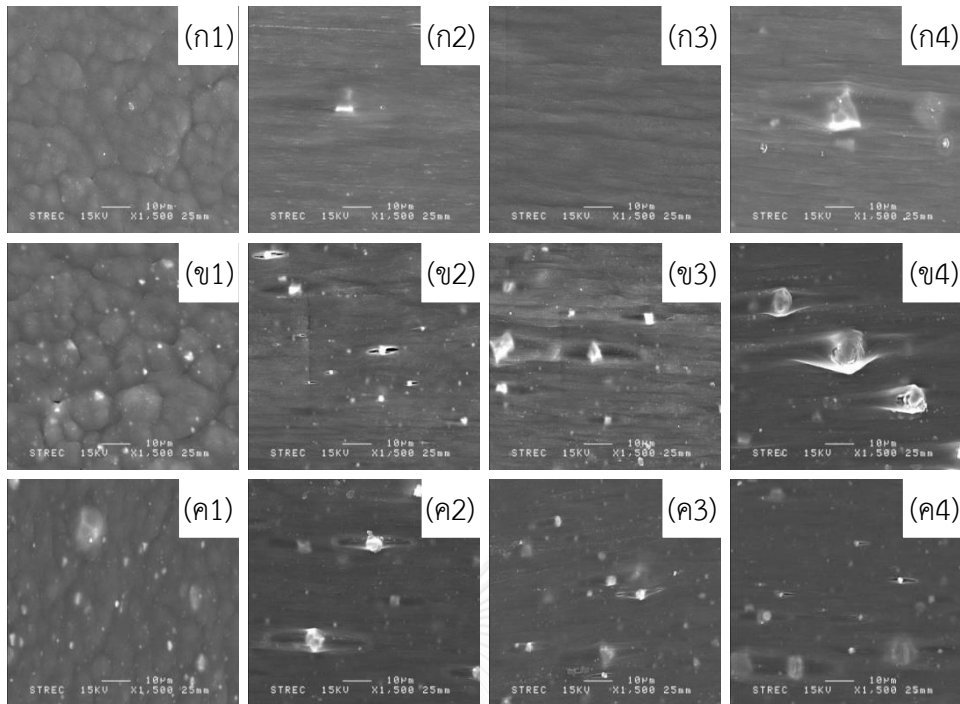
รูปที่ 4.31 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดั่งยี่ด 0 (1) และ 100% (2)



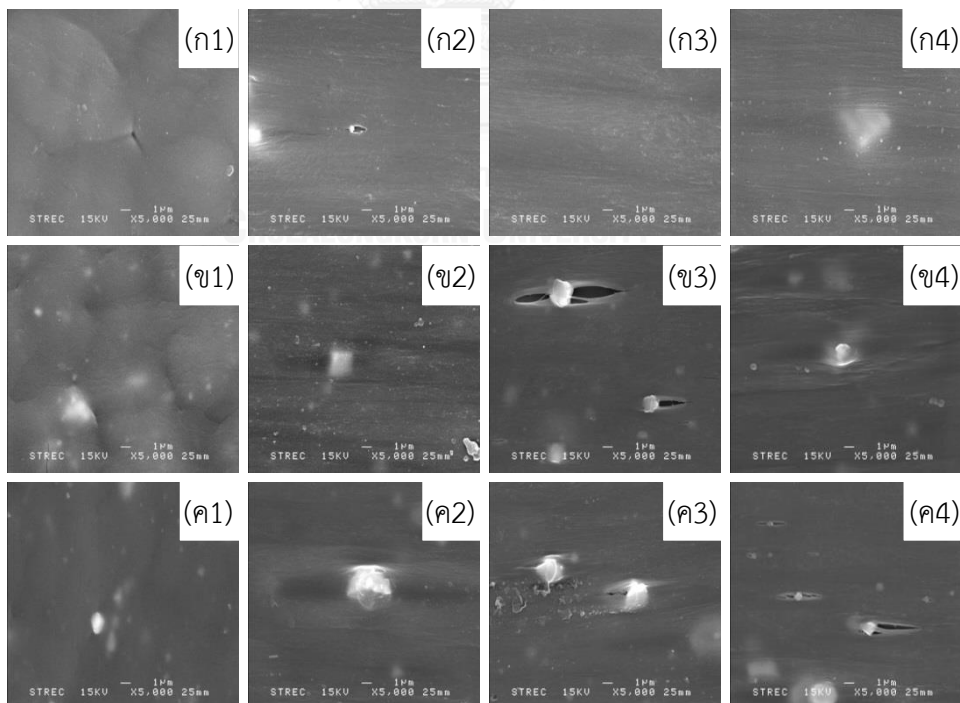
รูปที่ 4.32 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดั่งยี่ด 0 (1) และ 100% (2)



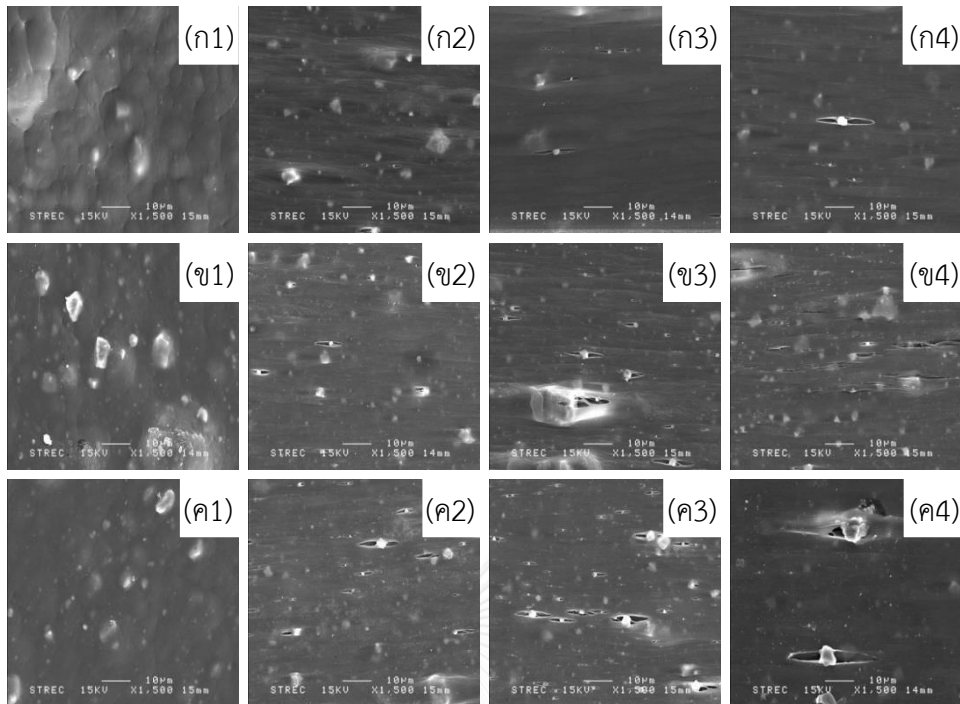
รูปที่ 4.33 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดั่งยี่ด 0 (1) และ 100% (2)



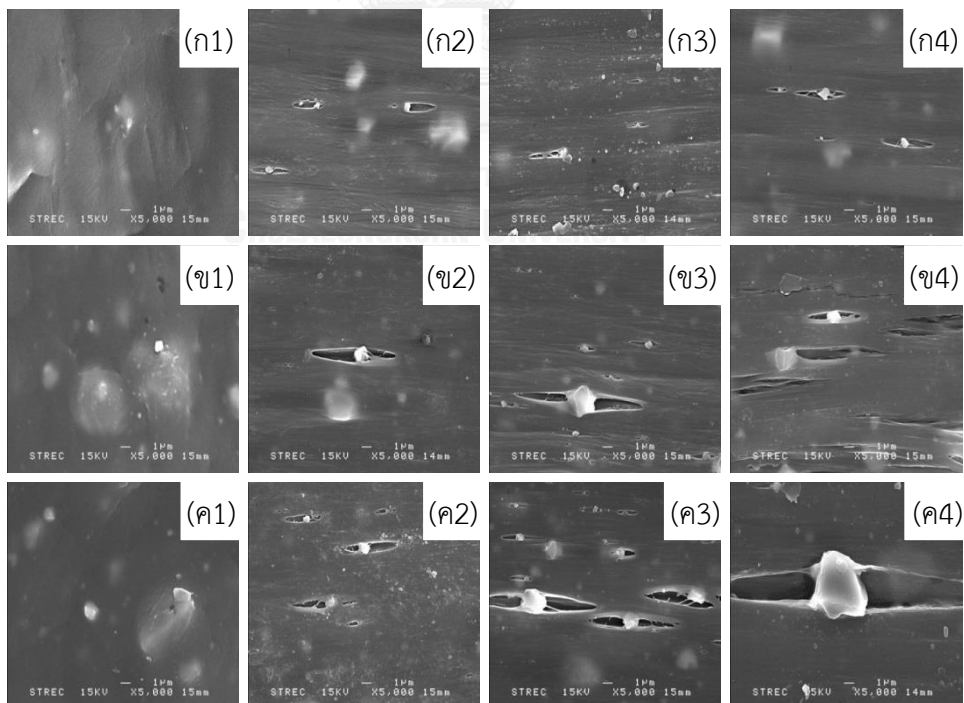
รูปที่ 4.34 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



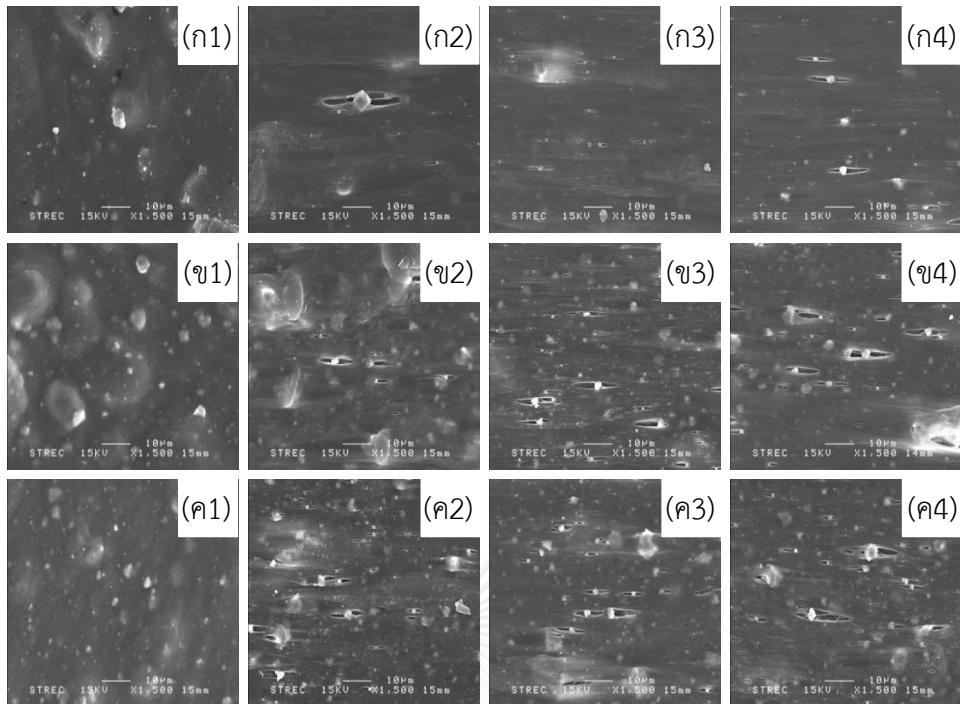
รูปที่ 4.35 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₁₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



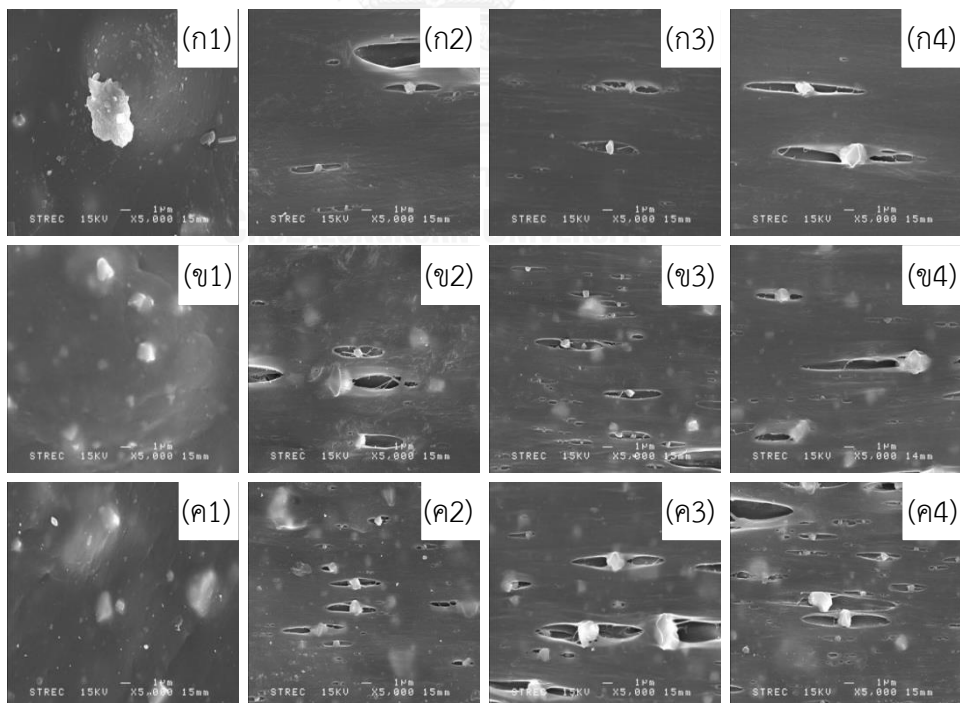
รูปที่ 4.36 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



รูปที่ 4.37 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₂₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



รูปที่ 4.38 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)



รูปที่ 4.39 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า PC₃₀ ที่ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) 200 (3) และ 300% (4)

4.3 फिल्मเป่า PO₃₀C₂₀

จากผลการศึกษาความเป็นรูพรุนของฟิล์ม PO และ PC ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ในส่วนนี้จึงสนใจศึกษาฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมทั้งมีเนอร์ลออยล์และแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้ปริมาณมีเนอร์ลออยล์และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้คือร้อยละ 30 และ 20 ตามลำดับ เนื่องจากการเติมมีเนอร์ลออยล์ร้อยละ 30 ทำให้ฟิล์มเป่า PO₃₀ เป็นฟิล์มที่เริ่มมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น สามารถดูดซับน้ำมันได้ดี อีกทั้งการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 ทำให้ฟิล์มเป่า PC₂₀ มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าฟิล์ม PC ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอื่น อิทธิพลของความเร็วลมหล่อเย็นและระดับการดึงยึดต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม PO₃₀C₂₀ มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 สมบัติของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ ที่ไม่ผ่านการดึงยึด

4.3.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการทดลองขึ้นรูปฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ ด้วยภาวะการขึ้นรูป a ที่ใช้กับฟิล์มเป่า PO₃₀ (ตารางที่ 3.2) พบว่าการขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm นั้นค่อนข้างยาก แต่เมื่อปรับเพิ่มความเร็วลมจะทำลูกโป่งฟิล์มที่กำลังขึ้นรูปเสถียรขึ้น การที่ฟิล์ม PO₃₀C₂₀ ต้องใช้ความเร็วลมหล่อเย็นที่สูงกว่าฟิล์ม PO₃₀ คาดว่าเป็นผลจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต จึงต้องใช้ความเร็วลมที่มีค่ามากเพื่อพองฟิล์มให้ขึ้นไปสู่ลูกกลิ้งหนีบได้ ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมได้แสดงในตารางที่ 4.16 ฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ ที่ทุกความเร็วลมหล่อเย็นจะมีลักษณะทึบแสงมากกว่าฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PC₂₀ อีกทั้งไม่เกิดรอยยับบนฟิล์ม ผิวสัมผัสของฟิล์ม PO₃₀C₂₀ นั้นมีความขรุขระน้อยกว่าฟิล์ม PC₂₀ และมีความนิ่มมากกว่าเมื่อมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากัน

ตารางที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | ลักษณะทางกายภาพ | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|------------------|
| | สมบัติทางแสง* | ความยับ** | ปริมาณน้ำมันที่พื้นผิว** | พื้นผิวสัมผัส*** |
| 400 | TL | X | X | S |
| 700 | TL | X | X | S |
| 1,000 | TL | X | X | S |

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

** / คือ มี X คือ ไม่มี

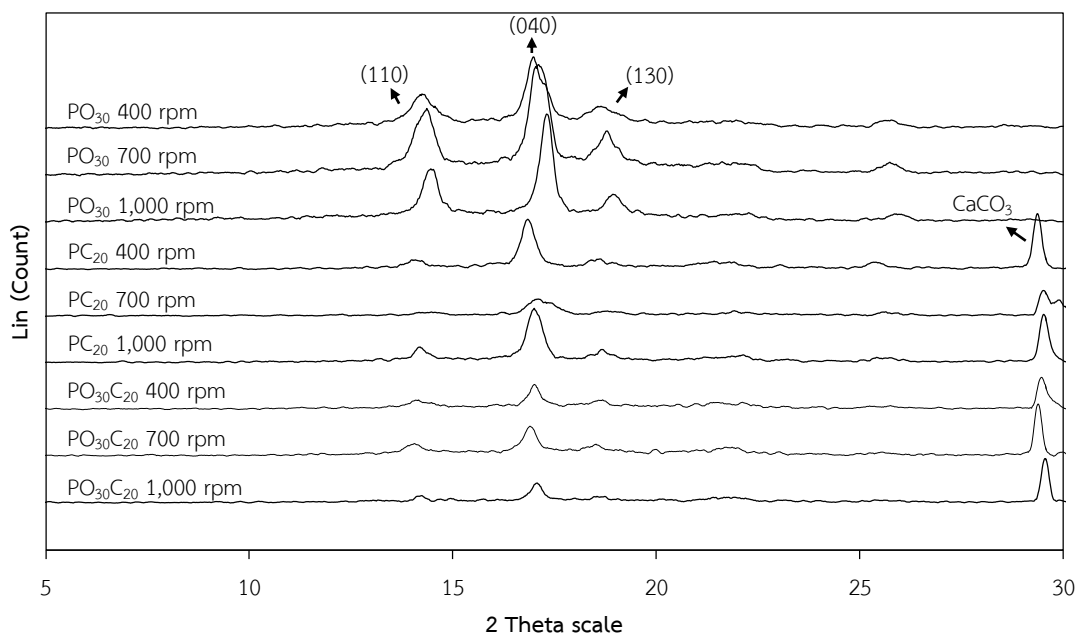
*** S คือ เรียบ (Smooth) R คือ ขรุขระ (Rough)

4.3.1.2 โครงสร้างผลึกและระดับความเป็นผลึก

WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ แสดงในรูปที่ 4.40 โดยจะมีลักษณะที่คล้ายกับฟิล์มเป่า PC คือจะเห็นระนาบผลึกที่ (110) (040) และ (130) ของแอลฟาพอลิโพรพิลีนและระนาบผลึกที่ 29.9° ที่เป็นของแคลเซียมคาร์บอเนต อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ กับ PO_{30} PC_{20} และ PP_a (ภาคผนวก ก) พบว่าตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20} \sim PC_{20} < PO_{30} < PP_a$ แสดงว่าขนาด unit cell ของ $PO_{30}C_{20} \sim PC_{20} > PO_{30} > PP_a$ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมหล่อเย็นเป็น 1,000 rpm จะปรากฏระนาบผลึกที่ 14.9° ซึ่งอยู่ใกล้กับตำแหน่งของ 14.2° เพิ่มเข้ามา (ภาคผนวก ก)

ระดับความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ (ตารางที่ 4.17) จะมีค่าที่น้อยมากคืออยู่ในช่วง 30 - 39% โดยฟิล์มเป่า PO_{30} และ PC_{20} จะมีระดับความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 49 - 52% และ 46 - 52% ตามลำดับ ทั้งนี้คาดว่าเป็ผลของการเติมสารตัวเติมถึง 3 องค์ประกอบจึงลดความเป็นระเบียบของพอลิโพรพิลีนลง

ตารางที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PO_{30} และ PC_{20} พบว่าฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ จะเย็นตัวช้ากว่าฟิล์มเป่า PO_{30} แต่จะเย็นตัวเร็วกว่าฟิล์มเป่า PC_{20}



รูปที่ 4.40 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ เปรียบเทียบกับ PO_{30} และ PC_{20} ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.17 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | ระดับความเป็นผลึก (%) |
|--------------------------|-----------------------|
| 400 | 30 |
| 700 | 39 |
| 1,000 | 33 |

ตารางที่ 4.18 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากทีฟิล์มออกมาจากคายวงแหวน

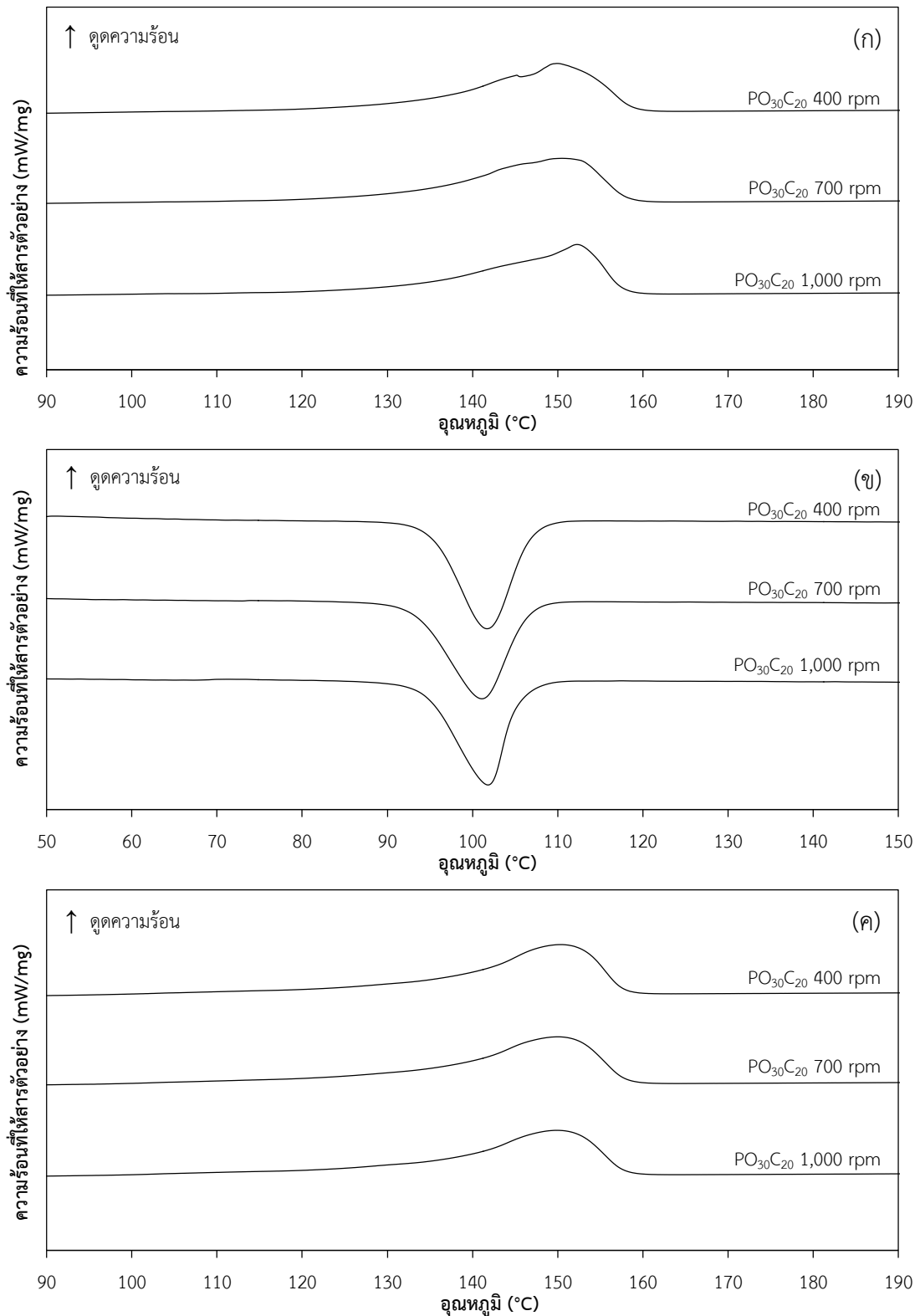
| ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ของฟิล์มเป่าที่ระดับความสูง (cm.) | | | | |
|--------------------------|--|------|------|------|------|
| | 0 | 11 | 27 | 42 | 56 |
| 400 | 172.6 | 92.5 | 50.5 | 42.9 | 39.0 |
| 700 | 173.1 | 70.2 | 42.9 | 39.7 | 37.8 |
| 1,000 | 162.2 | 66.2 | 40.3 | 37.7 | 36.1 |

4.3.1.3 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 4.41 และตารางที่ 4.19 เมื่อพิจารณาในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (รูปที่ 4.41 (ก)) พบว่า T_m ของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ (ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm) มีค่า $152.3^{\circ}C$ ซึ่งใกล้เคียงกับฟิล์มเป่า PO_{30} ($152.0^{\circ}C$) แต่มีค่าต่ำกว่า T_m ของฟิล์มเป่า PC_{20} และ PP_a อย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาข้อมูลในช่วงลดอุณหภูมิพบว่า T_c ของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ มีค่า $101.8^{\circ}C$ ซึ่งต่ำกว่าฟิล์มเป่า PO_{30} และ PC_{20} ซึ่งมีค่า 107.7 และ $110.2^{\circ}C$ ตามลำดับ ทำให้เชื่อว่าการเกิดผลึกของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ จะยากกว่าการเกิดผลึกของฟิล์มเป่า PO_{30} และ PC_{20} แต่เนื่องจากการเย็นตัวบริเวณหน้าคายที่ช้าทำให้มีเวลาเกิดผลึกได้ทัน ดังนั้นฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ จึงมีค่าระดับความเป็นผลึก (วิเคราะห์ด้วย DSC) ที่ไม่แตกต่างจาก PO_{30} นัก

นอกจากนั้นเมื่อทำการ Normalized ข้อมูล DSC การเพิ่มความเร็วลมหล่อเย็นของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ จะทำให้ระดับความเป็นผลึกลดลง และหากเปรียบเทียบระดับความเป็นผลึกกับฟิล์มเป่า PO_{30} และ PC_{20} ที่ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm ที่ผ่านมาพบว่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20} \sim PO_{30} > PC_{20}$ ซึ่งสอดคล้องกันทั้งในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ($46.1 \sim 47.0 > 42.0\%$) และช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ($51.9 \sim 53.3 > 48.1\%$)



รูปที่ 4.41 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.19 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | ให้ความร้อนครั้งที่ 1 | | | ลดความร้อน | | | ให้ความร้อนครั้งที่ 2 | | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|---------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| | T_m (°C) | ΔH_m (J/g) | X_c^* (%) | T_c (°C) | ΔH_c (J/g) | X_c^* (%) | T_m (°C) | ΔH_m (J/g) | X_c^* (%) |
| 400 | 145.2 149.9 | 58.6 | 50.6 | 101.7 | 69.3 | 59.8 | 150.3 | 64.8 | 55.9 |
| 700 | 150.6 | 57.1 | 49.3 | 101.1 | 62.0 | 53.5 | 150.1 | 65.4 | 56.4 |
| 1,000 | 152.3 | 53.4 | 46.1 | 101.8 | 58.3 | 50.3 | 149.7 | 60.2 | 51.9 |

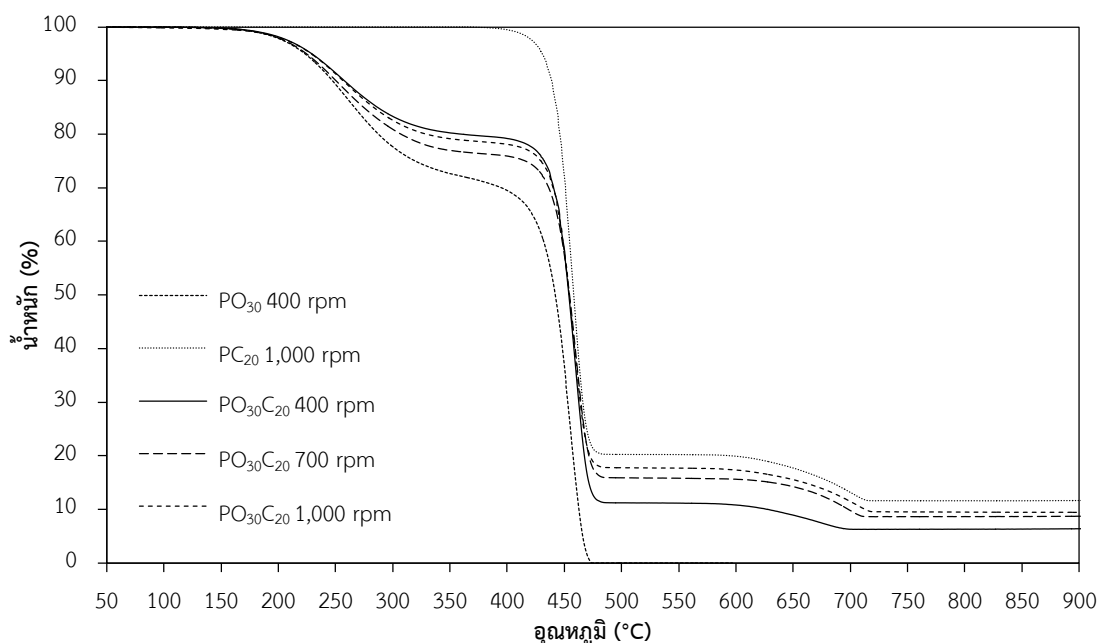
หมายเหตุ * คือ ข้อมูลระดับความเป็นผลึกที่ทำการ normalized แล้ว

4.3.1.4 ความเสถียรทางความร้อน

ความเสถียรทางความร้อนของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ แสดงในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.42 โดยการสลายตัวมีลักษณะของ PO ผนวกกับ PC ซึ่งในช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของมิเนอรัล-ออยล์ที่อุณหภูมิประมาณ 200°C และในช่วงที่สองจะเป็นการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนกับพอลิเอทิลีนที่อยู่ในแคลเซียมคาร์บอเนตมาสเตอร์แบทช์ ที่อุณหภูมิประมาณ 435°C สำหรับช่วงสุดท้ายของการสลายตัวที่พบในกราฟจะเป็นการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 600°C สำหรับแนวโน้มความเร็วลมหล่อเย็นที่ 400 rpm จะสลายตัวได้ช้ากว่าที่ความเร็วลมหล่อเย็นอื่น

ตารางที่ 4.20 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ความเร็ว ลม หล่อเย็น (rpm) | การสลายตัวช่วงที่ 1 | | | | การสลายตัวช่วงที่ 2 | | | | การสลายตัวช่วงที่ 3 | | | |
|-------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | T_{onset} (°C) | T_{max} (°C) | T_{end} (°C) | น้ำหนัก (%) | T_{onset} (°C) | T_{max} (°C) | T_{end} (°C) | น้ำหนัก (%) | T_{onset} (°C) | T_{max} (°C) | T_{end} (°C) | น้ำหนัก (%) |
| 400 | 200.0 | 256.5 | 315.0 | 20.13 | 435.0 | 460.3 | 475.0 | 68.76 | 600.0 | 675.4 | 695.0 | 4.69 |
| 700 | 200.0 | 254.1 | 325.0 | 23.37 | 438.0 | 460.5 | 472.0 | 60.89 | 630.0 | 696.3 | 710.0 | 7.00 |
| 1,000 | 203.0 | 260.9 | 303.0 | 21.16 | 437.0 | 459.2 | 473.0 | 61.22 | 637.0 | 708.0 | 721.0 | 8.16 |



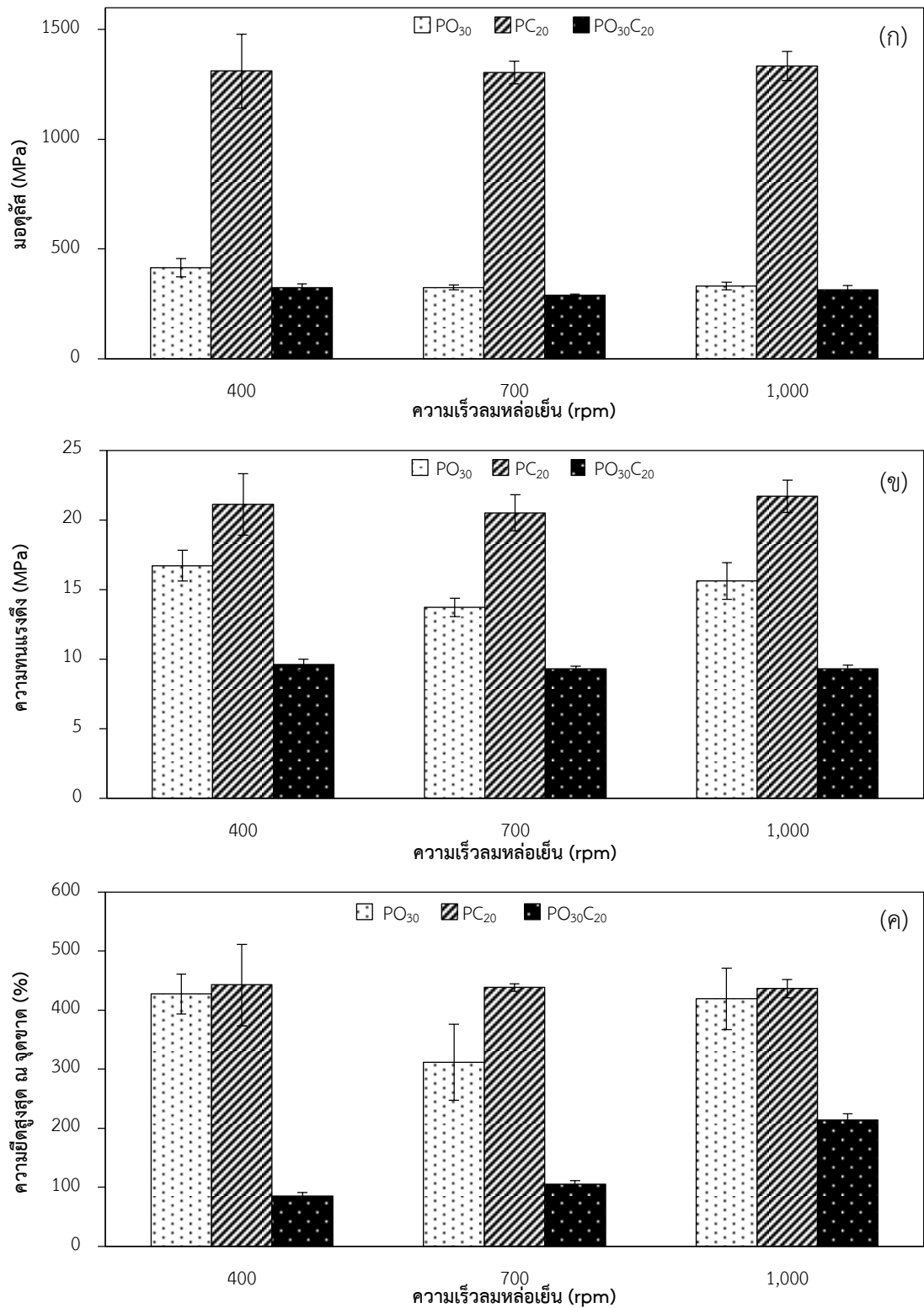
รูปที่ 4.42 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ เปรียบเทียบกับ PO_{30} และ PC_{20} ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

4.3.1.5 การทนต่อแรงดึง

สมบัติการทนต่อแรงดึงได้แก่ มอดุลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ปริมาณความเร็วลมหล่อเย็นต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.43 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฟิล์ม PO_{30} และ PC_{20} (รูปที่ 4.6 และ 4.25) จะเห็นว่าฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ มีค่ามอดุลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ต่ำกว่าฟิล์มเป่า PO_{30} และ PC_{20} ทั้งนี้เชื่อว่าเป็นผลจากปริมาณรอยแยกระหว่างเฟสที่มีปริมาณมากกว่า แต่สำหรับค่ามอดุลัสและความทนแรงดึงของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วลมหล่อเย็นคาดว่าเป็นผลของทั้งปริมาณผลึกที่ลดลงที่สอดคล้องกับผล DSC และรอยแยกระหว่างเฟส ในขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากผลึกที่ลดลงและรูปร่างผลึกที่แตกต่างกันที่ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm

ตารางที่ 4.21 มอดุลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า POC ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ความเร็วลม หล่อเย็น (rpm) | มอดุลัส (MPa) | ความทนแรงดึง (MPa) | ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%) |
|------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 400 | 324 ± 17.6 | 9.6 ± 0.4 | 85 ± 5.9 |
| 700 | 289 ± 6.2 | 9.3 ± 0.2 | 105 ± 5.9 |
| 1,000 | 314 ± 19.3 | 9.3 ± 0.3 | 213 ± 10.9 |

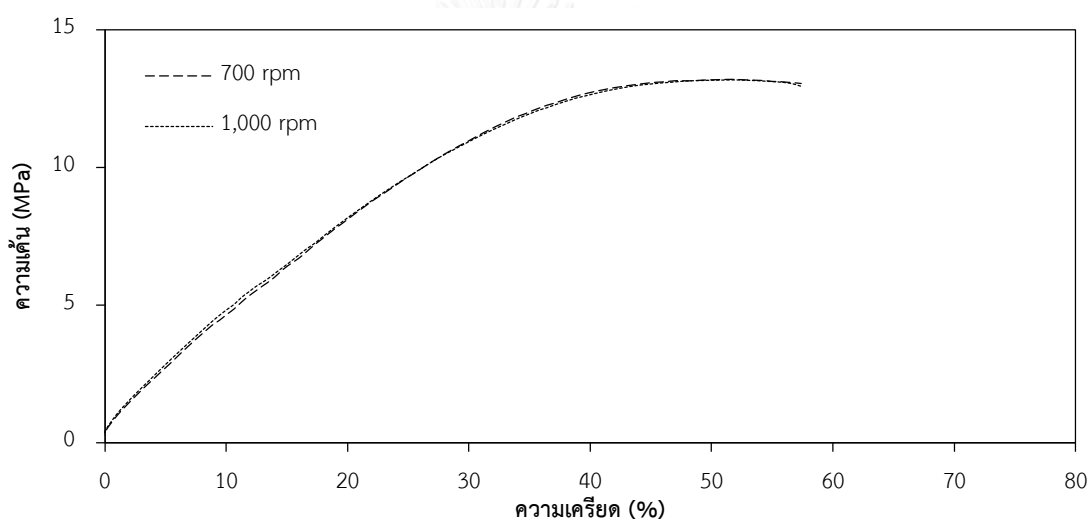


รูปที่ 4.43 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PO₃₀C₂₀ เปรียบเทียบกับ PO₃₀ และ PC₂₀ ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

4.3.2 สมบัติของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ผ่านการดึงยืด

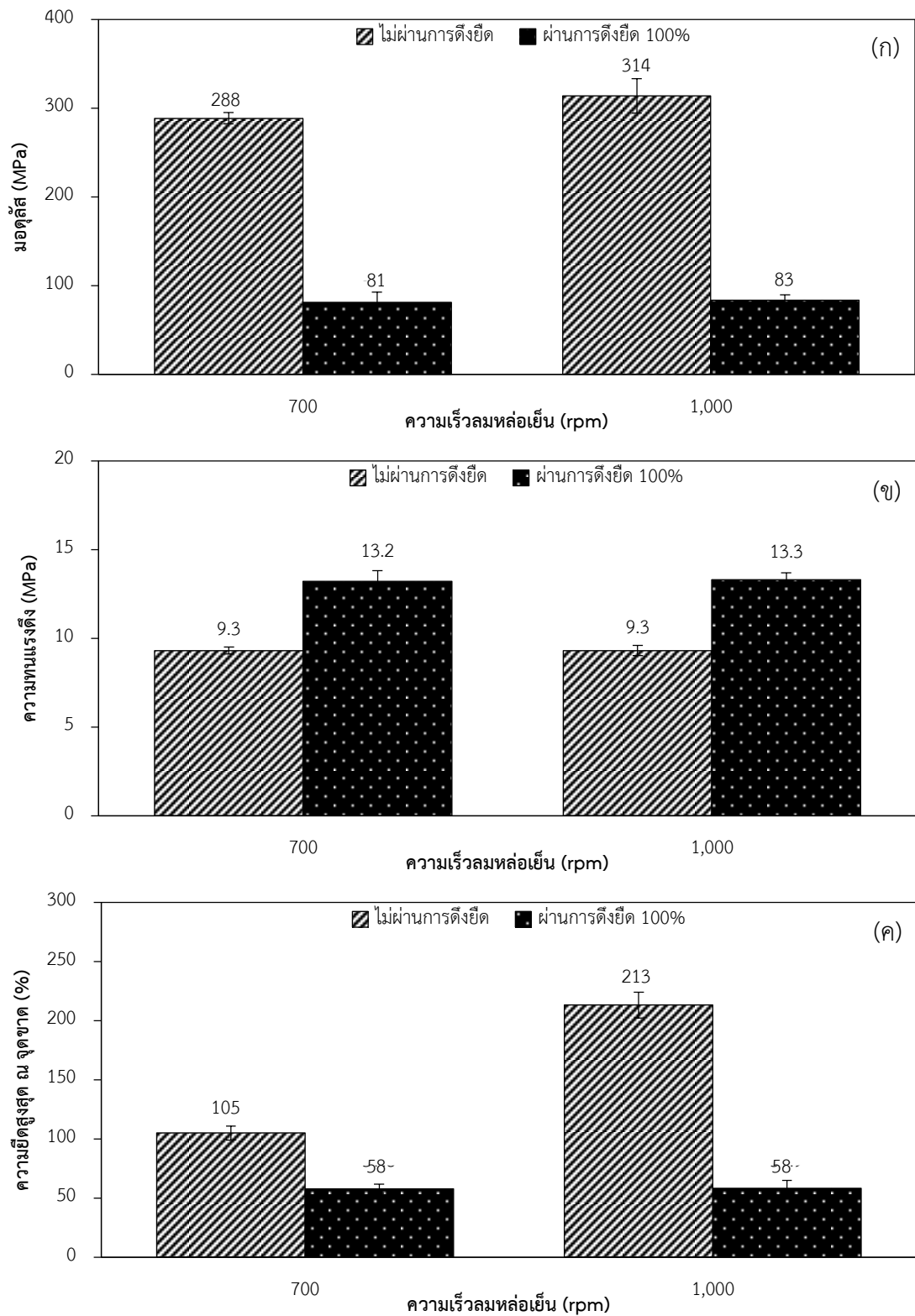
4.3.2.1 การทนต่อแรงดึง

สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 และ 1,000 rpm และดึงยืด 100% แสดงในรูปที่ 4.44 – 4.45 เนื่องจากฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่เตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 rpm สามารถดึงยืดสูงสุดได้เพียง 85% ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์สมบัติการทนแรงดึงของฟิล์มเป่าที่ผ่านการดึงยืด 100% ได้ จะเห็นว่าเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์ม $PO_{30}C_{20}$ ทั้งสองมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก (รูปที่ 4.44) โดยเป็นเส้นตรงที่ไม่มีyield) และคล้ายกับฟิล์มเป่า PO_{30} และ PO_{40} หลังดึงยืด 100% (รูปที่ 4.7) แต่ฟิล์มเป่า PC จะไม่ได้ทำการทดสอบในส่วนนี้



รูปที่ 4.44 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า POC ที่ผ่านการดึงยืด 100% ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ก่อนการดึงยืดและหลังการดึงยืด (รูปที่ 4.45 (ก) – (ค)) พบว่าฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ หลังการดึงยืดจะมีมอดูลัสและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่ต่ำกว่าก่อนการดึงยืด ในขณะที่ความทนแรงดึงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อทำการดึงยืดฟิล์มไปแล้ว เช่นเดียวกับฟิล์มเป่า PO_{30}

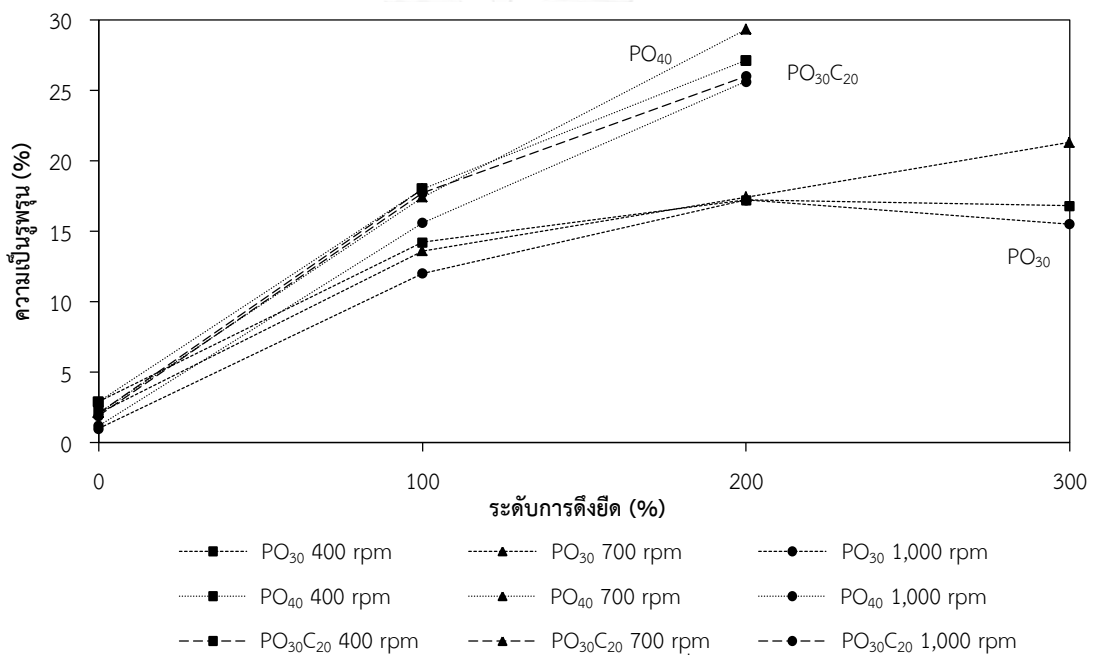


รูปที่ 4.45 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป้า PO₃₀C₂₀ ที่ไม่ผ่านการดิ่งยัดเปรียบเทียบกับที่ผ่านการดิ่งยัด 100% ที่ความเร็วหมุนล้อเย็นแตกต่างกัน

4.3.2.2 ความเป็นรูพรุน

ผลความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ซึ่งขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็นและระดับดิ่งยึดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.46 จากผลการทดลองจะเห็นว่าฟิล์มเป่าก่อนการดิ่งยึดจะมีความเป็นรูพรุนที่ต่ำมากและเมื่อระดับการดิ่งยึดเพิ่มมากขึ้นฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ มีแนวโน้มที่มีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PO จะเห็นได้ชัดเจนว่าฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ มีความเป็นรูพรุนสูงกว่าฟิล์มเป่า PO_{30} แต่เทียบเคียงได้กับฟิล์มเป่า PO_{40}

การดิ่งยึดส่งผลให้ฟิล์มเกิดเป็นลักษณะขรุขระและหลังดูดซับน้ำมันฟิล์มจะมีความใสมากขึ้น ทั้งนี้ลักษณะดังกล่าวคล้ายกับกรณีฟิล์มเป่า PO_{30} และ PO_{40} แต่จะไม่คล้ายกับฟิล์มเป่า PC_{20} เนื่องจากฟิล์มเป่า PC_{20} เมื่อทำการดิ่งยึดจะมีลักษณะทึบแสง แต่เมื่อทดสอบการดูดซับน้ำมันพบว่าฟิล์มเป่า PC_{20} ยังมีความขุ่นขาวเหมือนกับก่อนการทดสอบ



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการดิ่งยึดและความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PO_{30} และ PO_{40} ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

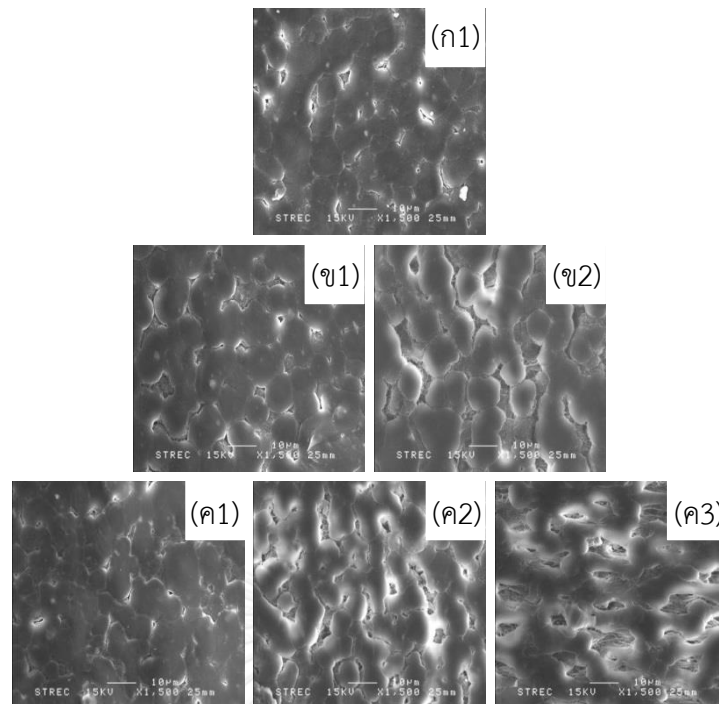
ตารางที่ 4.22 ความเป็นรูพรุนของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ความเร็วลมหล่อเย็นและระดับการดึงยึดแตกต่างกัน

| ความเร็วลมหล่อเย็น (rpm) | ความเป็นรูพรุน (%) ที่ระดับการดึงยึด (%) | | | |
|-----------------------------|--|-------------|-------------|------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 |
| 400 | 2.3 ± 0.18 | N/A* | N/A* | N/A* |
| 700 | 2.1 ± 0.20 | 18.0 ± 0.51 | N/A* | N/A* |
| 1,000 | 1.9 ± 0.43 | 17.7 ± 0.29 | 26.0 ± 0.44 | N/A* |

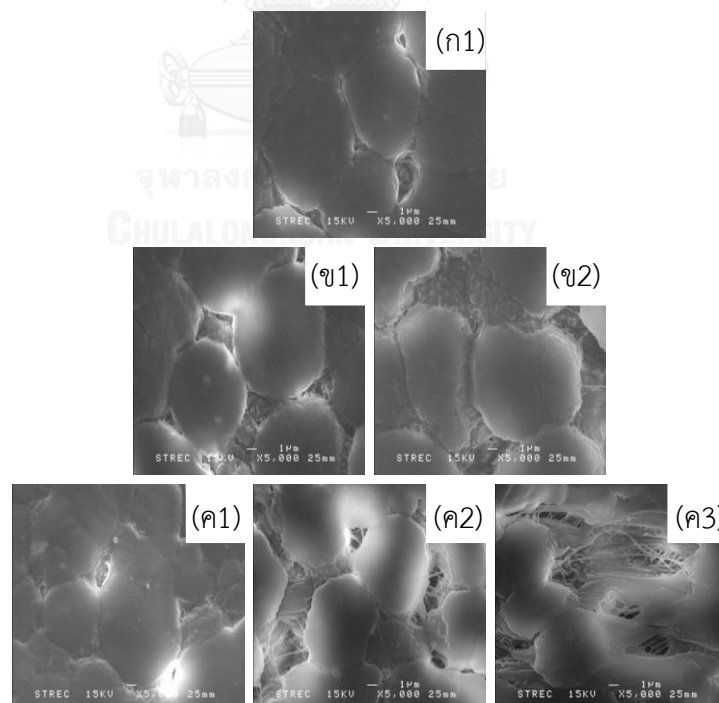
หมายเหตุ * N/A คือไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ เนื่องจากความสามารถในการดึงยึดของฟิล์มเป่าต่ำกว่าระดับการดึงยึดที่ต้องการ

4.3.2.3 สัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่วิเคราะห์ด้วย SEM แสดงในรูปที่ 4.47 ถึง 4.48 จะเห็นว่าฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ทุกความเร็วลมหล่อเย็นจะมีลักษณะเหมือนกันคือมีอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตแทรกตัวอยู่ระหว่างรอยต่อระหว่างเฟสของพอลิโพรพิลีนกับมินิเออร์ลอยด์และเมื่อมีการดึงยึดที่ระดับการดึงยึด 100% จะเห็นว่าบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสจะถูกดึงให้แยกออกจากกัน ทำให้เกิดช่องว่างที่มีลักษณะเป็นรูพรุนเกิดขึ้น ซึ่งรูพรุนนี้จะมีขนาดใหญ่กว่าฟิล์มเป่า PO_{30} และฟิล์มเป่า PC_{20} เมื่อมีการดึงยึดของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ในระดับ 200% (ความเร็วลมหล่อเย็น 1,000 rpm) พบว่าบริเวณรอยต่อจะแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัดจนมองเห็นเป็นรูพรุนรูปร่างรีเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาไปที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงภายในรูพรุนนั้นว่าเป็นลักษณะเส้นของพอลิเมอร์ที่ถูกแยกออกจากกันซึ่งในที่สันนิษฐานว่าเป็นพอลิเอทิลีนเพราะโดยปกติแล้วพอลิเอทิลีนจะมีการขาดที่ง่ายกว่าพอลิโพรพิลีน โดยจากการที่มีอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสของพอลิโพรพิลีนกับมินิเออร์ลอยด์ทำให้ฟิล์มเป่ามีการขาดที่ง่ายขึ้น สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PO_{30}



รูปที่ 4.47 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)



รูปที่ 4.48 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป่า $PO_{30}C_{20}$ ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค) ที่ระดับการดึงยืด 0 (1) 100 (2) และ 200% (3)

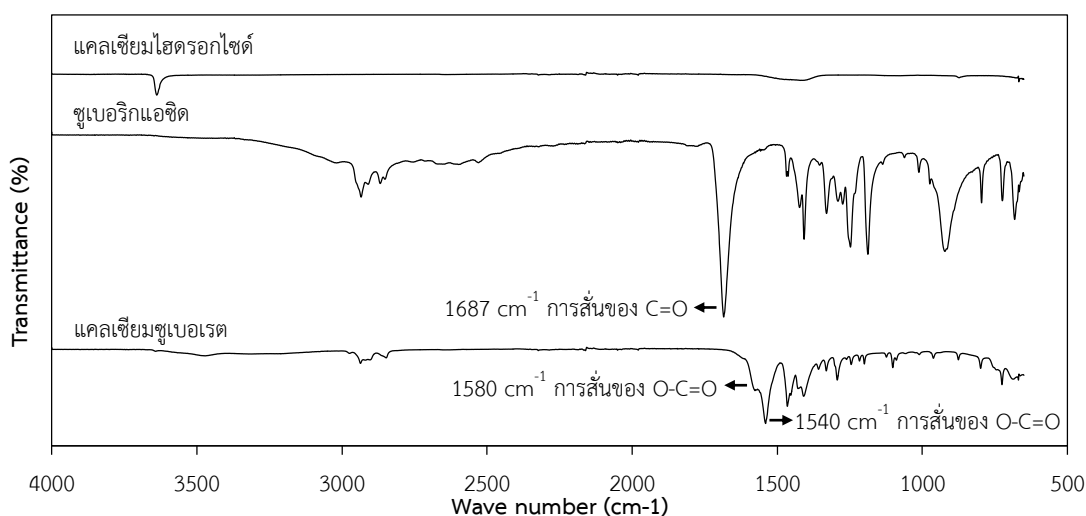
4.4 พิล์มเป่า POS และ PS

ฟิล์มเป่า POS และ PS ในการศึกษาเตรียมจากคอมพาวนด์ที่ประกอบด้วยพอลิโพรพิลีน มีเนอรัลลอยล์และแคลเซียมซูเบอเรตตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 เนื่องด้วยมีการค้นพบว่า แคลเซียมซูเบอเรตเป็นสารก่อผลึกบิทาสำหรับพอลิโพรพิลีน [13] การศึกษานี้จึงทดลองเตรียม แคลเซียมซูเบอเรตเองในห้องปฏิบัติการและตรวจสอบประสิทธิภาพของการเป็นสารก่อผลึกบิทาของ พอลิโพรพิลีน

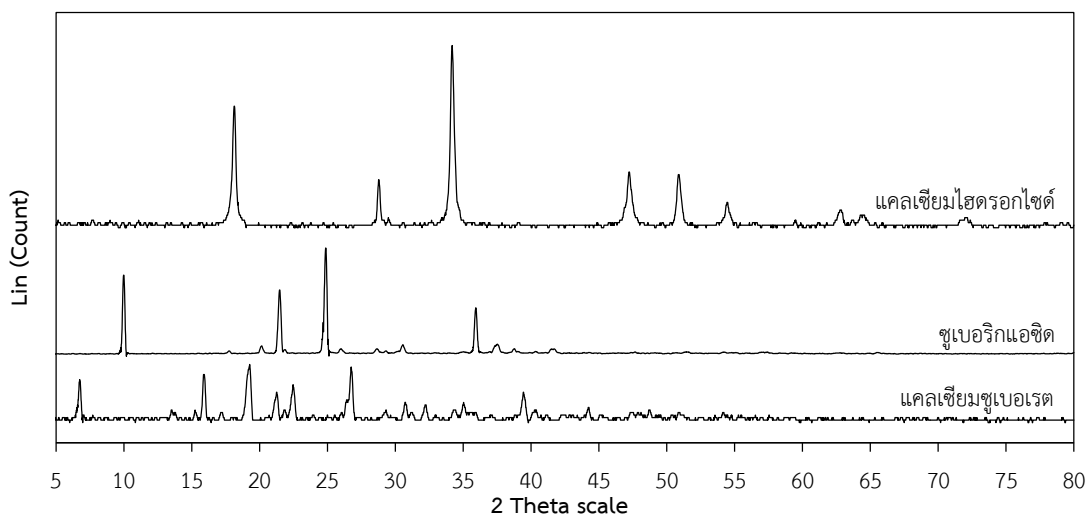
4.4.1 สมบัติและเอกลักษณ์ของแคลเซียมซูเบอเรตที่เตรียมได้

4.4.1.1 โครงสร้างทางเคมี ผลึก และสัณฐานวิทยา

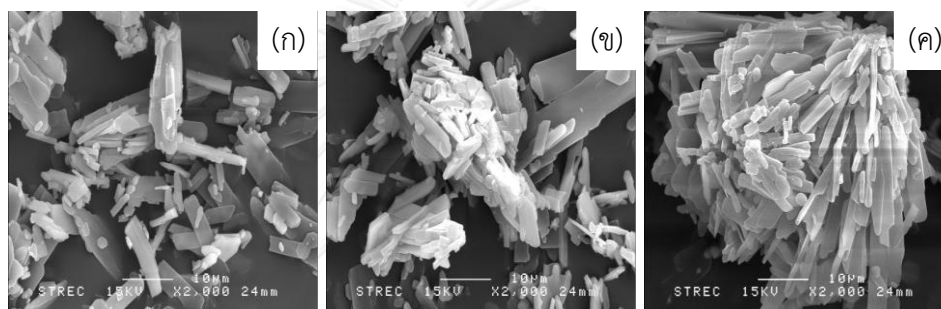
โครงสร้างเคมีและผลึกของแคลเซียมซูเบอเรตที่เปรียบเทียบกับสารตั้งต้นที่ใช้เตรียม แสดงในรูปที่ 4.49 – 4.51 ซึ่งจะเห็นว่าพันธะ C=O ของ O-C=O ในโครงสร้างของแคลเซียมซูเบอเรต ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $\text{Ca}^{2+}((\text{OOC}-(\text{CH}_2)_6-\text{COO}))_2$ ปรากฏที่ความยาวคลื่น 1580 และ 1540 cm^{-1} ซึ่งแตกต่างจากซูเบอริกแอซิดชัดเจน (รูปที่ 4.49) นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย WAXD ยังแสดงให้เห็นว่าระนาบผลึกของแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างไปจากซูเบอริกแอซิด และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 4.50) จึงเป็นการบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่าการผสมซูเบอริกแอซิดและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามวิธีที่ใช้ สามารถเตรียมแคลเซียมซูเบอเรตได้จริง จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแคลเซียมซูเบอเรตโดยใช้เทคนิค SEM พบว่าผลึกแคลเซียมซูเบอเรต จะมีลักษณะเป็นแผ่น (plate lamella) ซึ่งมีทั้งแบบจับตัวเป็นกลุ่มก้อนและกระจายอยู่ทั่วไป (รูปที่ 4.51) โดยผลึกลักษณะแผ่นหรือกลุ่มก้อนมีประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกบิทาในพอลิโพรพิลีนมากกว่าผลึก รูปแบบเข็มหรือแท่ง (needle) [13]



รูปที่ 4.49 FTIR สเปกตรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเบอริกแอซิดและแคลเซียมซูเบอเรต



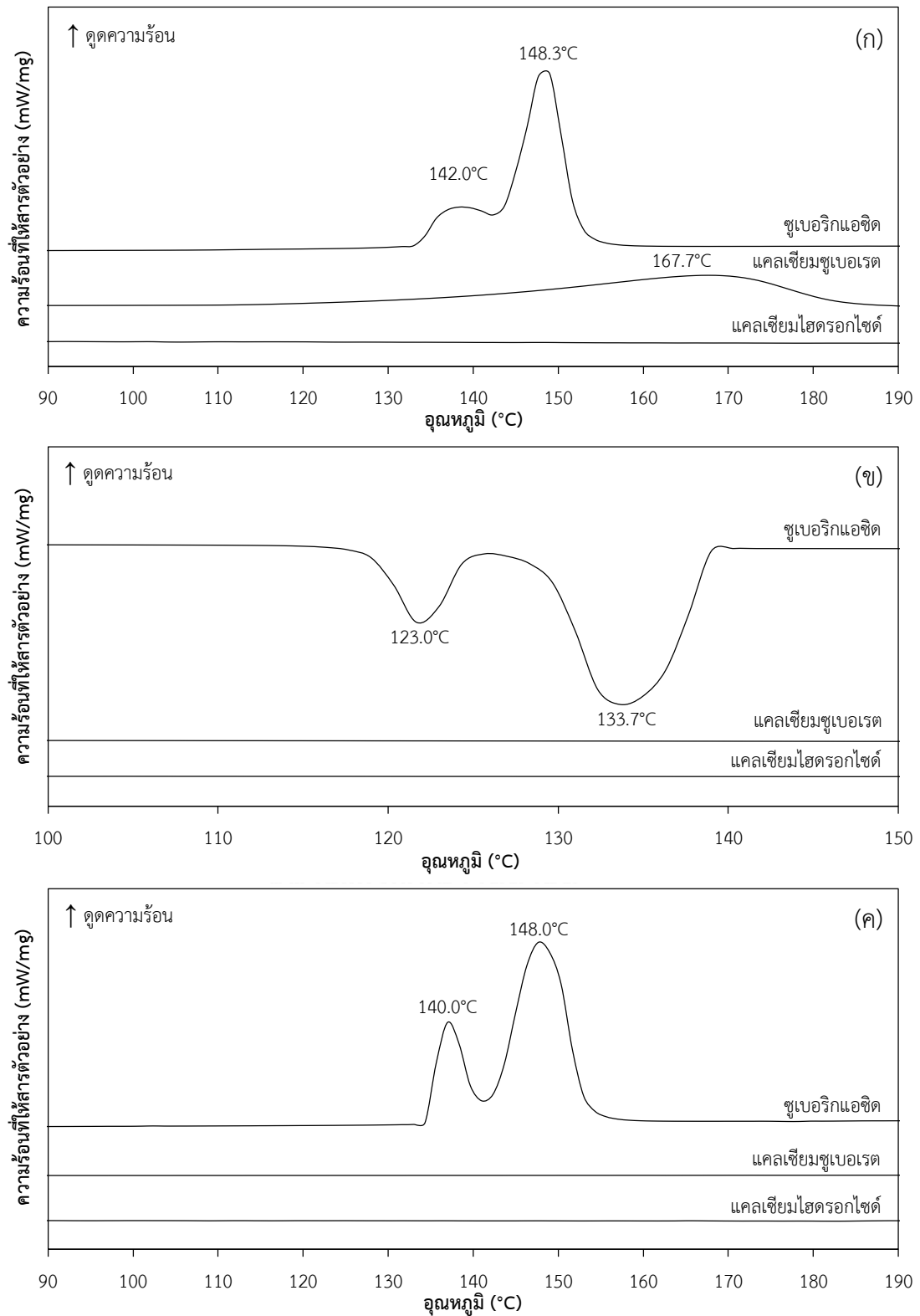
รูปที่ 4.50 WAXD แพทเทิลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเปอร์เรต



รูปที่ 4.51 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของแคลเซียมซูเปอร์เรตที่ลักษณะเป็นแผ่นกระจายทั่วไป (ก) จับตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็ก (ข) และจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ (ค)

4.4.1.2 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเปอร์เรตที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC แสดงในรูปที่ 4.52 (ก) – (ค) ในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 พบว่า T_m ของซูเปอร์ริกแอซิดจะมีค่าประมาณ 142.0°C และ 148.3°C แต่ในแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก T_m ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าตามที่ระบุในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุ (MSDS) คือ $\geq 450.0^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่สารประกอบเกลือแคลเซียมซูเปอร์เรตจะมี T_m ที่สูงกว่าและช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับซูเปอร์ริกแอซิด โดยมี T_m อยู่ประมาณ 167.7°C ในช่วงการลดอุณหภูมิลง พบ T_c ของซูเปอร์ริกแอซิดที่ประมาณ 123.0°C และ 133.7°C ตามลำดับ แต่ไม่พบ T_c ในเกลือแคลเซียมซูเปอร์เรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเมื่อมีการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่า T_m ของซูเปอร์ริกแอซิดจะใกล้เคียงกับการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (แตกต่างกันเพียง 1.4% และ 0.2% ตามลำดับ) แต่เกลือแคลเซียมซูเปอร์เรตที่สังเคราะห์ได้นั้นพบว่าการให้ความร้อนครั้งที่สองจะไม่พบ T_m ในช่วงการทดสอบดังกล่าว



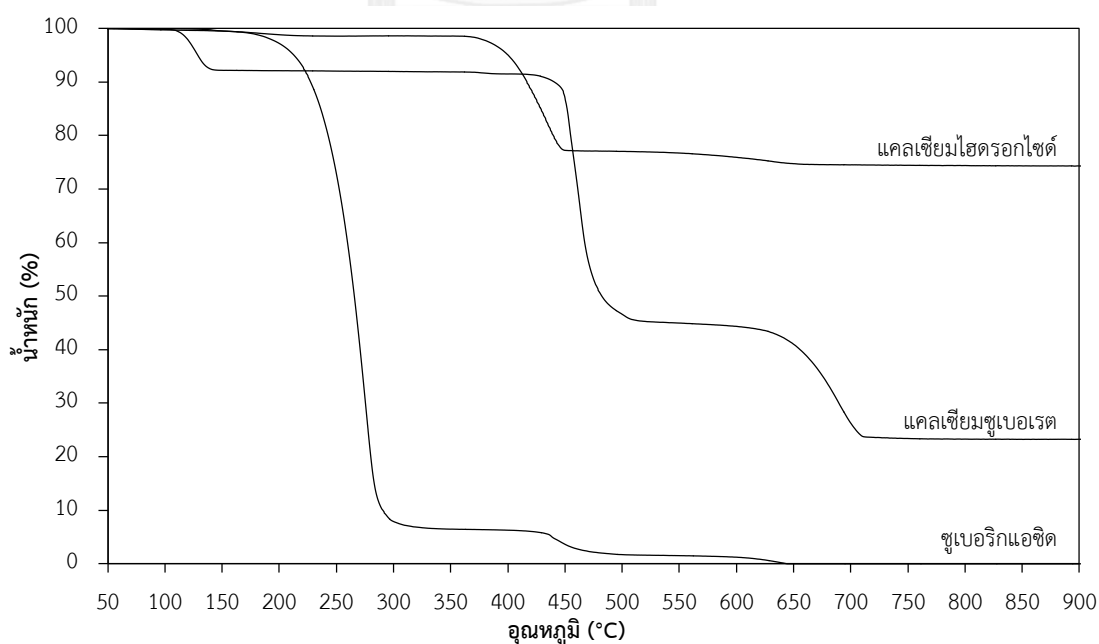
รูปที่ 4.52 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเบอร์ริกแอซิดและแคลเซียมซูเบอร์เรต

4.4.1.3 ความเสถียรทางความร้อน

ความเสถียรทางความร้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ิกแอซิดและแคลเซียมซู-เบอเรต ที่วิเคราะห์ด้วย TGA แสดงในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.53 แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีการสลายตัวเพียงช่วงเดียวระหว่างอุณหภูมิ 400 - 450°C และหลังอุณหภูมิครบ 900°C จะยังคงมีน้ำหนักที่เหลือจากการสลายตัวสูงถึง 74.3% ในขณะที่ซูเปอร์ิกแอซิดจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 248°C และจะเกิดการสลายตัวจนหมด 100% และแคลเซียมซูเบอเรตจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนเป็น 3 ช่วงโดยในช่วงอุณหภูมิ 449 - 475°C มีปริมาณการสลายตัวมากที่สุด

ตารางที่ 4.23 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ิกแอซิดและแคลเซียมซูเบอเรต

| สารตัวอย่าง | การสลายตัวช่วงที่ 1 | | | | การสลายตัวช่วงที่ 2 | | | | การสลายตัวช่วงที่ 3 | | | |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) |
| แคลเซียมไฮดรอกไซด์ | - | - | - | - | 400.0 | 433.5 | 450.0 | 21.6 | - | - | - | - |
| ซูเปอร์ิกแอซิด | 248.0 | 273.7 | 285.0 | 93.1 | 428.0 | 442.3 | 460.0 | 5.0 | - | - | - | - |
| แคลเซียมซูเบอเรต | 120.0 | 126.6 | 142.0 | 8.0 | 449.0 | 458.6 | 475.0 | 47.2 | 645.0 | 690.4 | 707.0 | 21.6 |

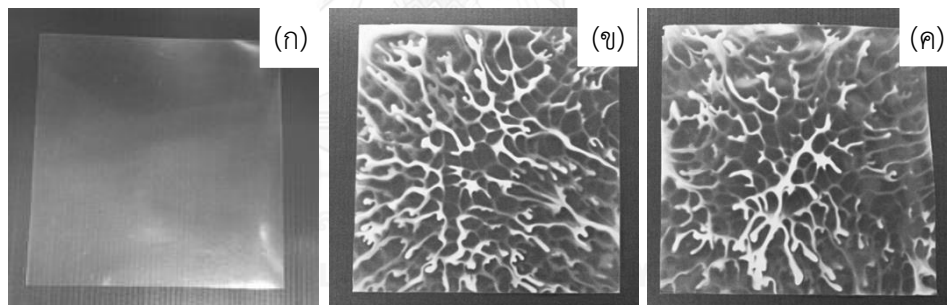


รูปที่ 4.53 TGA เทอร์โมแกรมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซูเปอร์ิกแอซิดและแคลเซียมซูเบอเรต

4.4.2 ประสิทธิภาพของแคลเซียมซูเบอเรตสำหรับเป็นสารก่อผลึกพีทาที่วิเคราะห์จากแผ่นซีทที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดและควบคุมอุณหภูมิการเกิดผลึกด้วย hot stage

การทดสอบประสิทธิภาพของแคลเซียมซูเบอเรตจะวิเคราะห์จากแผ่นซีทที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดก่อนที่จะผลิตฟิล์มจากกระบวนการเป่าฟิล์ม เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ยาก ใช้เวลาน้อยและใช้วัตถุดิบน้อย

แผ่นซีท PP_c , PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแสดงในรูปที่ 4.54 จะเห็นว่ามีเพียงแผ่นซีท PP_c เท่านั้นที่ใสและเนื้อที่เนียนเรียบสวยงาม แผ่นซีท PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ มีลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะพบบริเวณที่มีลักษณะโปร่งแสง (transparent) ซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณพอลิโพรพิลีนและบริเวณที่ทึบแสง (opaque) ซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณที่มีไมเนอร์ล้อยล์แทรกตัวอยู่ แสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีนและไมเนอร์ล้อยล์ ดังนั้นในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและสมบัติทางความร้อนจึงเลือกศึกษาทั้งในบริเวณที่โปร่งแสงและทึบแสงของแผ่นซีทดังกล่าว โดยเลือกตัดฟิล์มในบริเวณที่ต่างกัน แล้วนำมาควบคุมอุณหภูมิการเกิดผลึกด้วยเครื่อง hot stage ที่อุณหภูมิ $110^{\circ}C$ เป็นระยะเวลา 40 นาที [10] ก่อนนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วย WAXD และ DSC

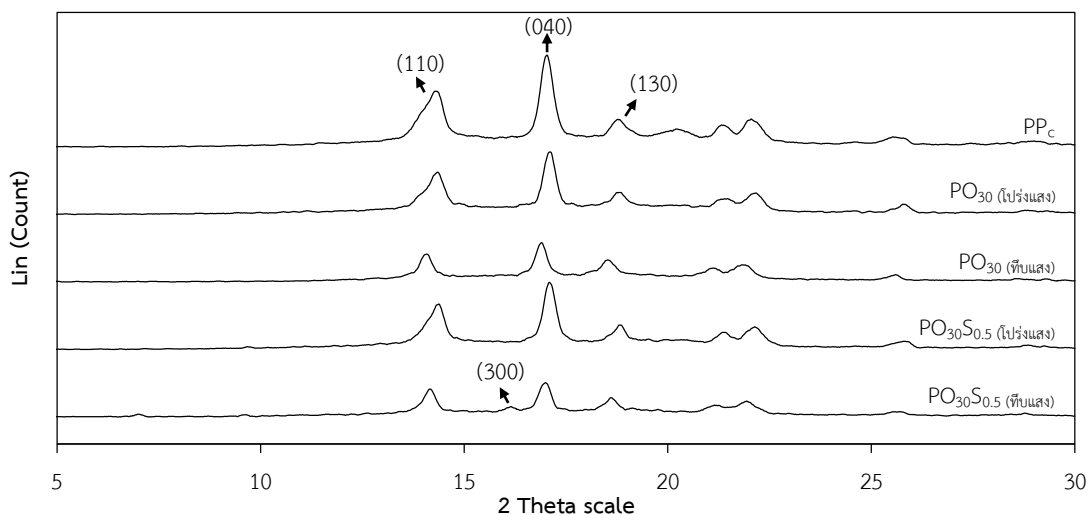


รูปที่ 4.54 แผ่นซีท PP_c (ก) PO_{30} (ข) และ $PO_{30}S_{0.5}$ (ค)

รูปที่ 4.55 แสดงให้เห็นว่าระนาบผลึกที่ (110) (040) และ (130) ซึ่งพบในแผ่นซีท PP_c , PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ บริเวณที่โปร่งแสง นั้นเป็นผลจากรูปผลึกชนิดแอลฟา แต่เมื่อพิจารณาผลของแผ่นซีท $PO_{30}S_{0.5}$ บริเวณที่ทึบแสง นอกจากรูปผลึกชนิดแอลฟาซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ ที่ต่ำกว่าแล้วยังสังเกตพบระนาบ (300) ซึ่งเป็นระนาบของผลึกพีทาอีกด้วยแต่ในปริมาณที่น้อย ลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแผ่นซีทที่เตรียมได้เมื่อใช้กระบวนการอัดแสดงถึงข้อจำกัดในเรื่องของการกระจายตัวของไมเนอร์ล้อยล์ในพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้เชื่อว่าบริเวณทึบแสงแสดงถึงการแยกวัฏภาคของไมเนอร์ล้อยล์จากเนื้อพอลิโพรพิลีน และการที่พบผลึกพีทาที่เหนียวมาจากการเติมแคลเซียมซูเบอเรตในบริเวณที่ทึบแสงของแผ่นซีท $PO_{30}S_{0.5}$ ยังแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมซูเบอเรตอยู่ในบริเวณที่มี

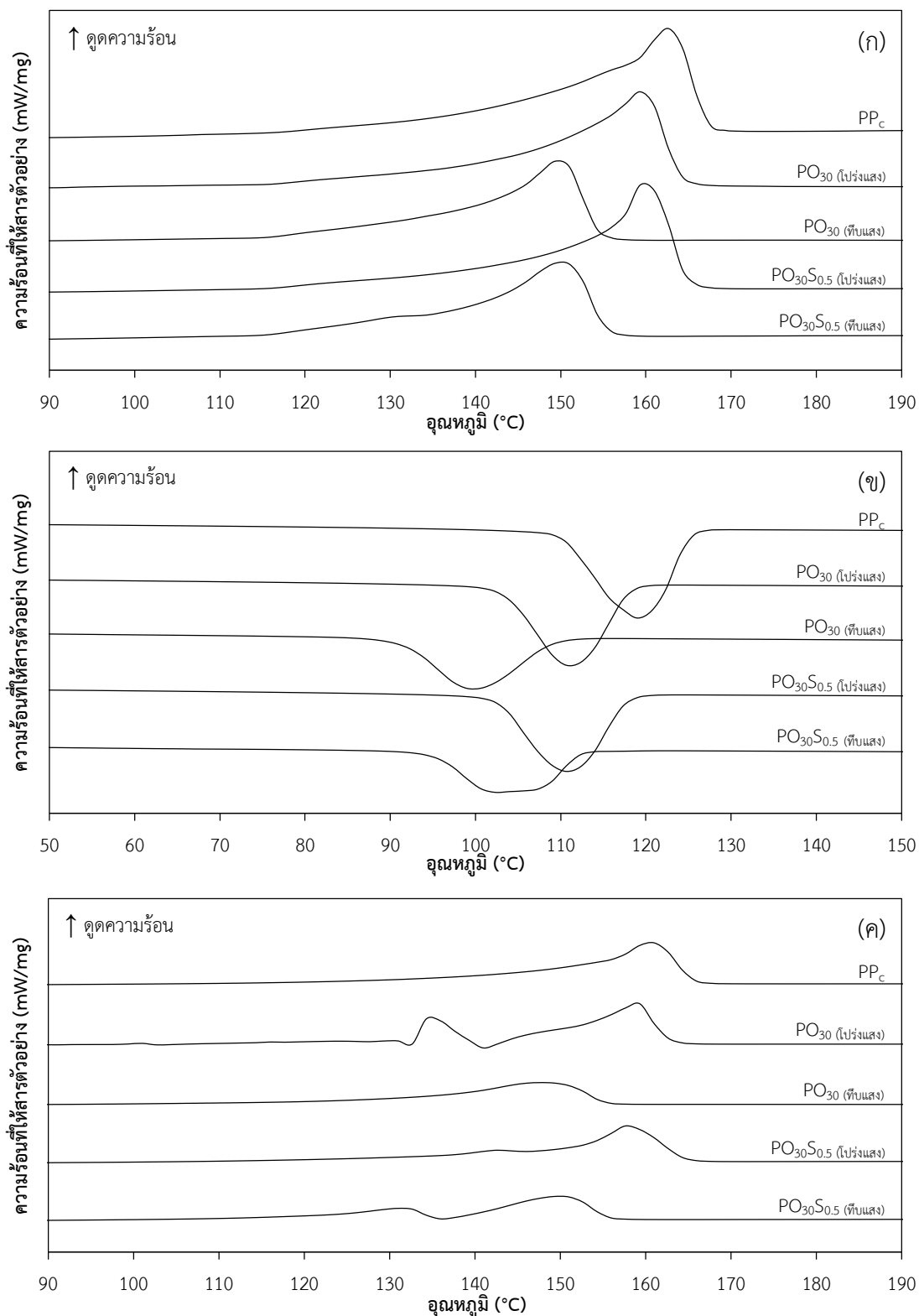
มีเนอรัลลอยล์นั่นเอง ดังนั้นประสิทธิภาพการเป็นสารก่อผลึกบีทาที่ไม่ดีนักอาจเป็นผลส่วนหนึ่งจากกระบวนการที่ไม่เหมาะสมในการขึ้นรูป

ข้อมูลของ WAXD แสดงให้เห็นว่าระดับความเป็นผลึกของแผ่นซีท PP_c (55%) นั้นใกล้เคียงกับบริเวณที่โปร่งแสงของ PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ (55 - 57%) ในขณะที่ในบริเวณที่ทึบแสงของ PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ จะมีระดับความเป็นผลึกที่น้อยกว่า (46 - 47%)



รูปที่ 4.55 WAXD แพทเทิลของแผ่นซีท PP_c , PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดและควบคุมอุณหภูมิการเกิดผลึกด้วย hot stage

รูปที่ 4.56 (ก) - (ค) และตารางที่ 4.24 แสดงสมบัติทางความร้อนที่วิเคราะห์ด้วย DSC ในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 อุณหภูมิการหลอมผลึกของแผ่นซีท PP_c มีค่าประมาณ $162^{\circ}C$ ซึ่งใกล้เคียงกับบริเวณที่โปร่งแสงของแผ่นซีท PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ แต่ในบริเวณที่ทึบแสงของแผ่นซีท PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ จะมีค่าเพียง $150^{\circ}C$ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการมี unit cell ที่ใหญ่สอดคล้องกับผลของ WAXD และในช่วงการลดอุณหภูมิพบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของแผ่นซีท PP_c มีค่าประมาณ $120^{\circ}C$ ในขณะที่บริเวณที่ทึบแสงของแผ่นซีท PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ มีค่าประมาณ $100^{\circ}C$ ซึ่งต่ำกว่าบริเวณที่โปร่งแสงของแผ่นซีท PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ ซึ่งมีค่าประมาณ $110^{\circ}C$ ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่ามีเนอรัลลอยล์ได้แทรกตัวอยู่ในบริเวณชุ่นของแผ่นซีท PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$ อีกทั้งในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่สอง พบว่าอุณหภูมิการหลอมผลึกของแผ่นซีทบริเวณใสจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ $160^{\circ}C$ และอุณหภูมิการหลอมผลึกของแผ่นซีทบริเวณชุ่นจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ $150^{\circ}C$ เหมือนกับการให้ความร้อนในช่วงแรก



รูปที่ 4.56 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของแผ่นซีท PP_c PO₃₀ และ PO₃₀S_{0.5}

ตารางที่ 4.24 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีของการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อน และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของแผ่นซีท PP_c , PO_{30} และ $PO_{30}S_{0.5}$

| แผ่นซีท | ให้ความร้อนครั้งที่ 1 | | | ลดความร้อน | | | ให้ความร้อนครั้งที่ 2 | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------------|---------|------------|--------------|---------|-----------------------|--------------|---------|
| | T_m | ΔH_m | X_c^* | T_c | ΔH_c | X_c^* | T_m | ΔH_m | X_c^* |
| | (°C) | (J/g) | (%) | (°C) | (J/g) | (%) | (°C) | (J/g) | (%) |
| PP_c | 162.8 | 101.8 | 49.2 | 119.2 | 92.5 | 44.7 | 160.7 | 99.7 | 48.2 |
| PO_{30} (โปร่งแสง) | | | | 111.0 | 83.0 | 40.1 | 134.7 | 49.7 | 24.0 |
| | 159.5 | 86.9 | 42.0 | | | | 158.7 | 69.1 | 33.4 |
| PO_{30} (ทึบแสง) | 149.8 | 69.2 | 33.4 | 99.7 | 63.6 | 30.7 | 148.0 | 64.7 | 31.3 |
| $PO_{30}S_{0.5}$ (โปร่งแสง) | 160.0 | 85.5 | 41.3 | 110.8 | 82.0 | 39.6 | 157.8 | 86.9 | 42.0 |
| | | | | 102.5 | 56.1 | 27.1 | 131.5 | 21.3 | 10.3 |
| $PO_{30}S_{0.5}$ (ทึบแสง) | 150.0 | 70.2 | 33.9 | | | | 150.0 | 37.6 | 18.1 |

หมายเหตุ * คือข้อมูลระดับความเป็นผลึกไม่ได้ทำการ normalized เนื่องจากชิ้นงานที่ทดสอบแยกวิฤภาคกันอย่างชัดเจน

4.4.3 สมบัติของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ไม่ผ่านการดึงยืด

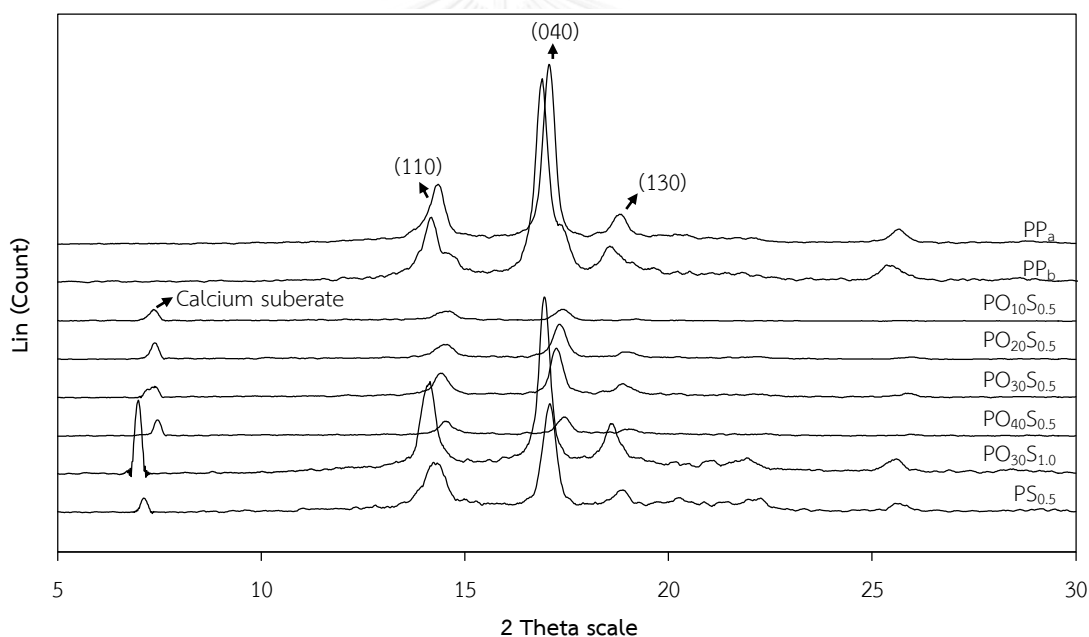
จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มเป่า PO PC และ POC ที่มีสารตัวเติมปริมาณที่เหมาะสมและผ่านการดึงยืดในแนวแกนของเครื่องจักรสามารถเหนี่ยวนำให้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนดังกล่าวมีรูพรุนเกิดขึ้น ในขั้นตอนต่อไปนี้จะสนใจศึกษาการเตรียมฟิล์มเป่าชนิดมีรูพรุนด้วย POS และ PS คอมพาวนด์ ที่มีสารก่อผลึกปิทาซินิกแคลเซียมซูเบอเรต สำหรับการเตรียมฟิล์มเป่า PS เนื่องจากมีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะทำการผสมแคลเซียมซูเบอเรตในปริมาณเพียง 0.5 - 1.0% ให้เกิดการกระจายอย่างทั่วถึงในพอลิโพรพิลีน จึงประยุกต์ใช้มินิเอร์ล้อยลในปริมาณเล็กน้อยในการนำแคลเซียมซูเบอเรตเข้าไปในพอลิโพรพิลีน (ตารางที่ 3.1)

4.4.3.1 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มเป่า POS จะมีลักษณะเหมือนกับฟิล์มเป่า PO ที่สัดส่วนการเติมมินิเอร์ล้อยลปริมาณเดียวกัน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1 หรือลักษณะทางกายภาพจะไม่ขึ้นกับแคลเซียมซูเบอเรตแต่จะขึ้นกับมินิเอร์ล้อยลเป็นหลัก ในขณะที่ฟิล์มเป่า PS จะมีลักษณะของการกระจายตัวของแคลเซียมซูเบอเรตขนาดใหญ่และทำให้เกิดเป็นจุดขาวบนเนื้อฟิล์มนั้นหมายความว่าปริมาณมินิเอร์ล้อยลที่ใช้น้อยเกินไปที่จะทำให้แคลเซียมซูเบอเรตสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงในพอลิโพรพิลีน และจับตัวกันเป็นก้อน

4.4.3.2 โครงสร้างผลึกและระดับความเป็นผลึก

WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า POS เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า PS ซึ่งผ่านการควบคุมการเกิดผลึกใน Hot stage แสดงไว้ในรูปที่ 4.57 จากรูปจะพบระนาบของผลึก (110) (040) และ (130) ของผลึกแอลฟาพอลิโพรพิลีน [36] เช่นเดียวกับฟิล์ม PO PC และ POC แต่ฟิล์มเป่าที่มีการเติมแคลเซียมซูเบอเรตจะพบระนาบผลึกปรากฏที่มุม ~ 7.3 ที่บ่งชี้ถึงแคลเซียมซูเบอเรตในฟิล์มดังกล่าว และจะมีความเข้มมากขึ้นเมื่อเติมแคลเซียมซูเบอเรต 1.0% แต่อย่างไรก็ตามจะไม่พบระนาบผลึกบิทาของพอลิโพรพิลีน ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าแคลเซียมซูเบอเรตไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกบิทาได้ในทุกปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์ ในขณะที่ปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์ที่เพิ่มขึ้นพบว่าแวนโวมของตำแหน่ง 2θ จะลดลงเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ได้เติมแคลเซียมซูเบอเรต คือ unit cell มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาผลของการเติมแคลเซียมซูเบอเรตในปริมาณที่มากขึ้นในฟิล์มเป่า $PO_{30}S_{1.0}$ จะเห็นว่าค่า 2θ มีค่าที่ลดลงเล็กน้อยซึ่งบ่งชี้ถึงการมี unit cell ที่ใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.57 WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_a , PP_b , POS และ PS ที่ปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสปกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

ระดับความเป็นผลึกของฟิล์มเป่า POS และ PS (ตารางที่ 4.25) มีแวนโวมเหมือนกับฟิล์มเป่า PO คือลดลงเมื่อปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับมิเนอร์ลอลอยล์มากกว่าแคลเซียมซูเบอเรต แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการเย็นตัว (ตารางที่ 4.26) จะไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.25 ระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก WAXD แพทเทิลของฟิล์มเป่า PP_a PP_b POS และ PS ที่ปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

| ฟิล์มเป่า | ระดับความเป็นผลึก (%) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| PP _a | 62 |
| PP _b | 55 |
| PO ₁₀ S _{0.5} | 55 |
| PO ₂₀ S _{0.5} | 55 |
| PO ₃₀ S _{0.5} | 47 |
| PO ₄₀ S _{0.5} | 44 |
| PO ₃₀ S _{1.0} | 48 |
| PS _{0.5} | 51 |

ตารางที่ 4.26 อุณหภูมิการเย็นตัวของฟิล์มเป่า PP_a PP_b POS และ PS ที่ปริมาณมิเนอร์ลอลอยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm ที่ระดับความสูงตำแหน่งต่างๆ หลังจากฟิล์มออกมาจากสายวงแหวน

| ฟิล์มเป่า | อุณหภูมิ (°C) ของฟิล์มเป่าที่ระดับความสูง (cm.) | | | | |
|-----------------------------------|---|------|------|------|------|
| | 0 | 11 | 27 | 42 | 56 |
| PP _a | 161.2 | 56.2 | 38.7 | 39.3 | 34.5 |
| PP _b | 193.0 | 58.9 | 41.1 | 37.6 | 36.3 |
| PO ₁₀ S _{0.5} | 173.9 | 52.4 | 36.7 | 38.9 | 35.5 |
| PO ₂₀ S _{0.5} | 177.4 | 51.3 | 37.4 | 36.9 | 34.5 |
| PO ₃₀ S _{0.5} | 180.3 | 53.5 | 38.8 | 39.5 | 35.5 |
| PO ₄₀ S _{0.5} | 170.8 | 48.8 | 38.9 | 38.3 | 35.4 |
| PO ₃₀ S _{1.0} | 136.9 | 51.1 | 37.8 | 38.9 | 35.3 |
| PS _{0.5} | 148.1 | 61.9 | 40.8 | 37.1 | 36.2 |

4.4.3.3 สมบัติทางความร้อน

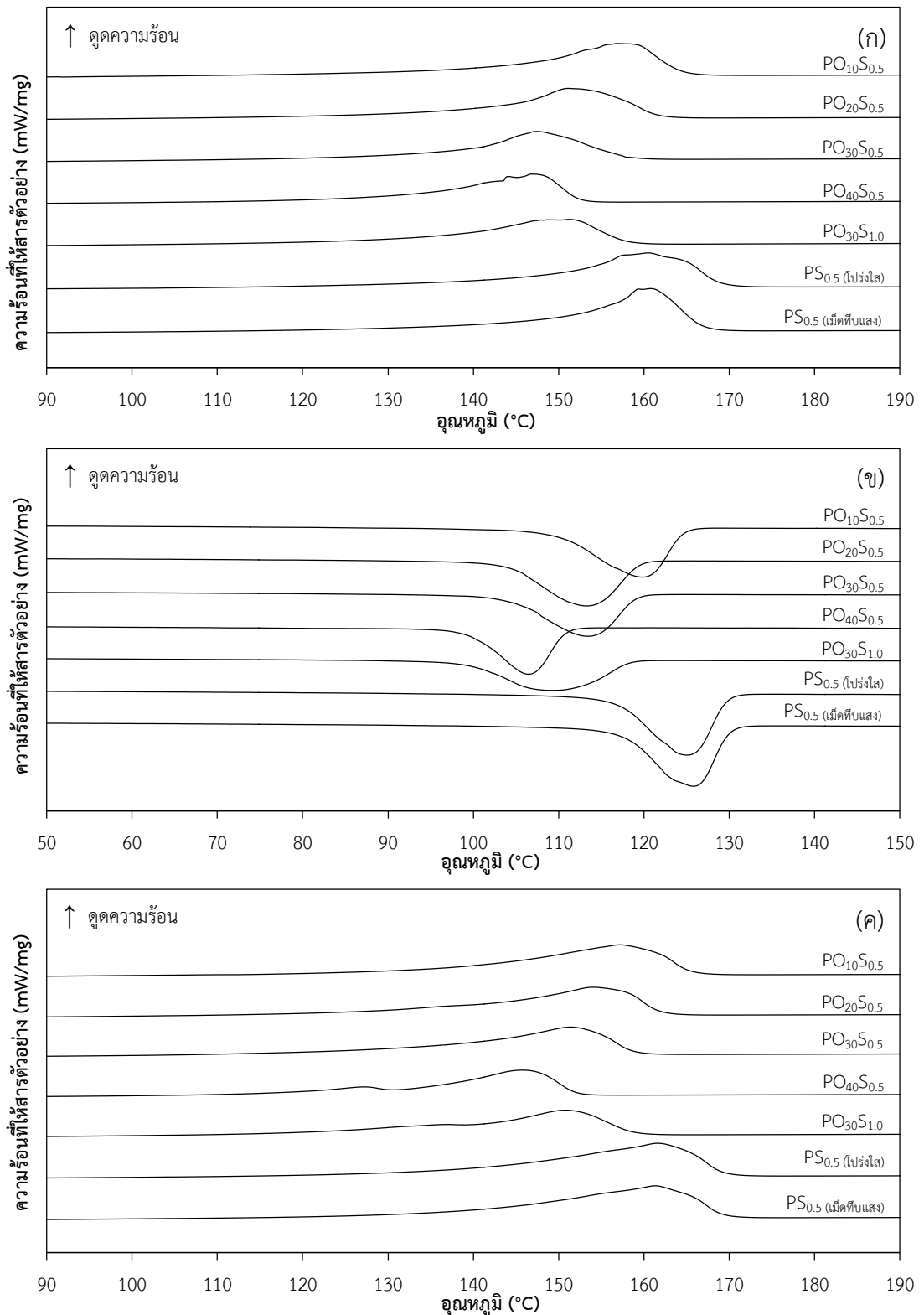
สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่า POS และ PS แสดงในรูปที่ 4.58 และตารางที่ 4.27 ซึ่งจากรูปที่ 4.58 เมื่อพิจารณา T_m ทั้งจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าฟิล์มเป่า POS ที่มีปริมาณมิเนอร์ลออยล์เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิหลอมผลึกมีแนวโน้มมีค่าต่ำลง สอดคล้องกับ unit cell ที่ใหญ่ขึ้นเมื่อวิเคราะห์ด้วย WAXD

จากการวิเคราะห์บริเวณเนื้อฟิล์มที่เรียบ (โปร่งใส) และขรุขระ (ทึบแสง) ของฟิล์มเป่า PS พบว่า T_m T_c และระดับความเป็นผลึกทั้งจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 ไม่ต่างกัน ในขณะที่ค่าระดับความเป็นผลึกที่ทำการ normalized ข้อมูล (ตารางที่ 4.27) จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมมิเนอร์ลออยล์ เช่นเดียวกับฟิล์มเป่า PO

ตารางที่ 4.27 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ เอนทัลปีการหลอมและการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกที่วิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การลดความร้อนและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่มีปริมาณมิเนอร์ลออยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

| ฟิล์มเป่า | ให้ความร้อนครั้งที่ 1 | | | ลดความร้อน | | | ให้ความร้อนครั้งที่ 2 | | |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|---------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| | T_m (°C) | ΔH_m (J/g) | X_c^* (%) | T_c (°C) | ΔH_c (J/g) | X_c^* (%) | T_m (°C) | ΔH_m (J/g) | X_c^* (%) |
| PO ₁₀ S _{0.5} | 156.9 | 82.8 | 44.4 | 119.8 | 94.4 | 50.7 | 157.2 | 86.7 | 46.5 |
| PO ₂₀ S _{0.5} | 151.2 | 79.5 | 48.0 | 113.3 | 87.8 | 53.0 | 154.1 | 87.4 | 52.8 |
| PO ₃₀ S _{0.5} | 147.4 | 66.5 | 45.9 | 113.4 | 79.7 | 55.0 | 151.4 | 82.2 | 56.7 |
| PO ₄₀ S _{0.5} | 146.9 | 63.6 | 51.2 | 106.5 | 65.2 | 52.5 | 127.2 145.8 | 65.3 | 52.6 |
| PO ₃₀ S _{1.0} | 151.3 | 72.9 | 50.3 | 109.2 | 74.9 | 51.7 | 136.9 150.8 | 75.8 | 52.3 |
| PS _{0.5} (โปร่งใส) | 160.5 | 92.5 | 45.1 | 125.0 | 105.3 | 51.4 | 161.7 | 106.5 | 52.0 |
| PS _{0.5} (เม็ดทึบแสง) | 160.8 | 89.5 | 43.7 | 125.8 | 101.2 | 61.4 | 161.4 | 100.5 | 49.0 |

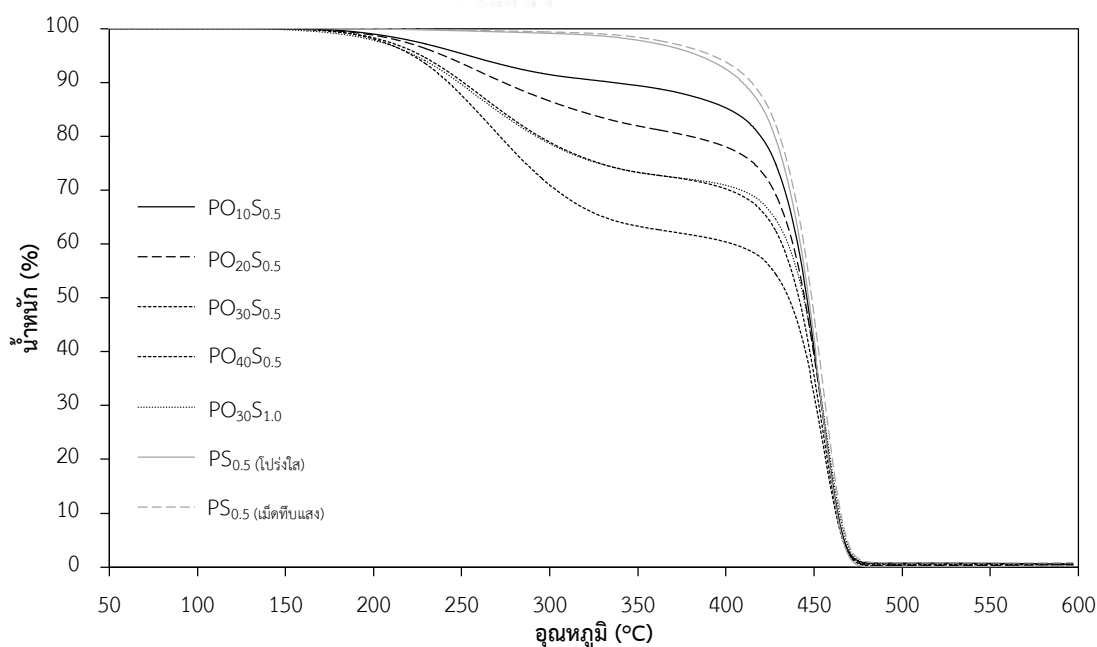
หมายเหตุ * คือ ข้อมูลระดับความเป็นผลึกที่ทำการ normalized แล้ว



รูปที่ 4.58 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ก) การลดความร้อน (ข) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ค) ของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณมิเนอรัลออกไซด์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

4.4.3.4 ความเสถียรทางความร้อน

ฟิล์มเป่า POS ที่ปริมาณมินิเออร์ลออยล์ต่างๆ จะเกิดการสลายตัวของมินิเออร์ลออยล์ที่อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 200°C (รูปที่ 4.59 และตารางที่ 4.28) เช่นเดียวกับฟิล์มเป่า PO ที่ปริมาณมินิเออร์ลออยล์เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มเป่า PS มีการเติมมินิเออร์ลออยล์ในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งทั้งนี้ฟิล์มเป่า PS จะมีการทดสอบสองบริเวณคือบริเวณที่โปร่งใสที่คาดว่าเป็นพอลิโพรพิลีน และบริเวณเม็ดทึบแสงซึ่งคาดว่าเป็นแคลเซียมซูเบอเรต อีกทั้งจะเห็นว่าฟิล์มเป่าทุกชนิดจะเกิดการสลายตัวไม่ครบ 100% ในช่วงอุณหภูมิการทดสอบดังกล่าว ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากแคลเซียมซูเบอเรตที่สลายตัวไม่หมด ดังที่ได้รายงานในหัวข้อ 4.4.1.3



รูปที่ 4.59 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ลออยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

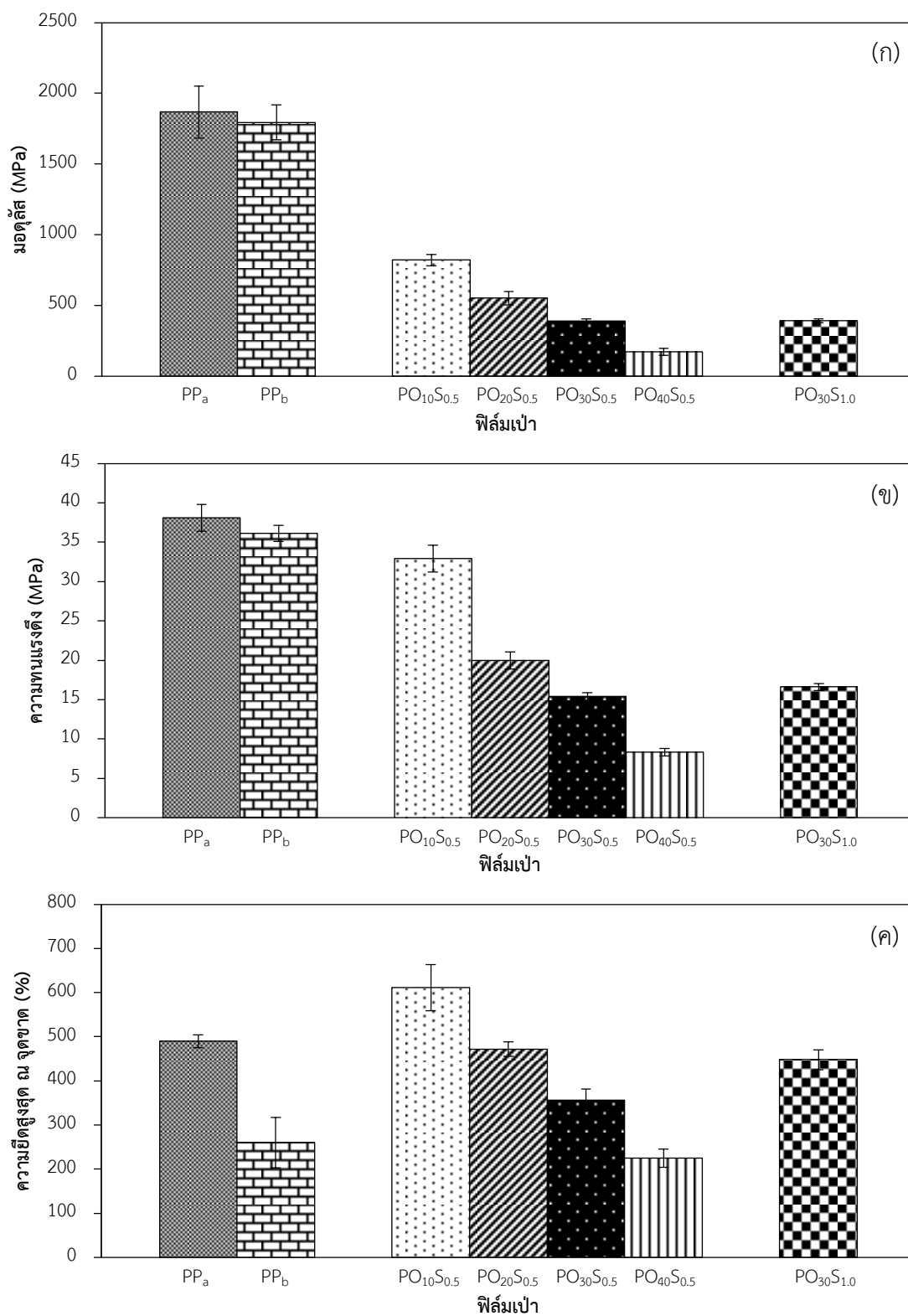
ตารางที่ 4.28 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่วิเคราะห์ได้จาก TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณมินิเออร์ลอยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

| ฟิล์มเป่า | การสลายตัวช่วงที่ 1 | | | | การสลายตัวช่วงที่ 2 | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) | T _{onset} (°C) | T _{max} (°C) | T _{end} (°C) | น้ำหนัก (%) |
| PO ₁₀ S _{0.5} | 200.0 | 253.9 | 309.0 | 9.73 | 429.0 | 455.3 | 464.0 | 89.78 |
| PO ₂₀ S _{0.5} | 208.0 | 260.8 | 319.0 | 18.89 | 435.0 | 455.6 | 463.0 | 80.70 |
| PO ₃₀ S _{0.5} | 209.0 | 262.5 | 326.0 | 27.49 | 431.0 | 455.9 | 467.0 | 72.28 |
| PO ₄₀ S _{0.5} | 210.0 | 270.0 | 327.0 | 37.89 | 429.0 | 456.0 | 465.0 | 61.52 |
| PO ₃₀ S _{1.0} | 204.0 | 254.2 | 320.0 | 27.37 | 429.0 | 457.1 | 470.0 | 71.96 |
| PS _{0.5} (โปร่งใส) | - | - | - | - | 426.0 | 453.6 | 464.0 | 99.81 |
| PS _{0.5} (เม็ดทึบแสง) | - | - | - | - | 428.0 | 456.0 | 469.0 | 99.18 |

4.4.3.5 การทนต่อแรงดึง

สมบัติการทนต่อแรงดึงจะทดสอบเฉพาะกับฟิล์มเป่า POS เนื่องจากฟิล์มเป่า PS มีอนุภาคของแคลเซียมซูเบอเรตกระจายอยู่ทั่วไปทำให้เกิดเป็นจุดอ่อนขึ้นในงาน ดังนั้นค่าสมบัติเชิงกลด้านการทนต่อแรงดึงจะไม่สามารถทำการวัดได้อย่างแม่นยำ อาจไม่ใช่ค่าจริงของชิ้นงานดังกล่าว ดังนั้นจึงทดสอบเฉพาะฟิล์มเป่า POS เท่านั้น

สมบัติการทนต่อแรงดึงได้แก่มอดูลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า POS ที่ปริมาณมินิเออร์ลอยล์และแคลเซียมซูเบอเรตต่างๆ ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm แสดงในตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.60 (ก) - (ค) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มเป่า POS มีมอดูลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ที่ค่าใกล้เคียงกับฟิล์มเป่า PO (ตารางที่ 4.6) ที่สัดส่วนการเติมมินิเออร์ลอยล์และความเร็วลมหล่อเย็นเดียวกัน ในขณะที่ปริมาณแคลเซียมซูเบอเรตในปริมาณที่มากขึ้นเป็นร้อยละ 1 ไม่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสและความทนแรงดึงแต่กลับส่งผลต่อค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดโดยจะมีค่าที่มากกว่าความยืด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่าที่มีการเติมแคลเซียมซูเบอเรตร้อยละ 0.5 ในปริมาณมินิเออร์ลอยล์เดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก WAXD ที่พบว่า unit cell ของ PO₃₀S_{1.0} มีขนาดใหญ่กว่า PO₃₀S_{0.5}



รูปที่ 4.60 มอดุลัส (ก) ความทนแรงดึง (ข) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (ค) ของฟิล์มเป่า PP_a, PP_b, POS และ PS ที่ปริมาณมิเนอร์ลออยล์และแคลเซียมซูบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

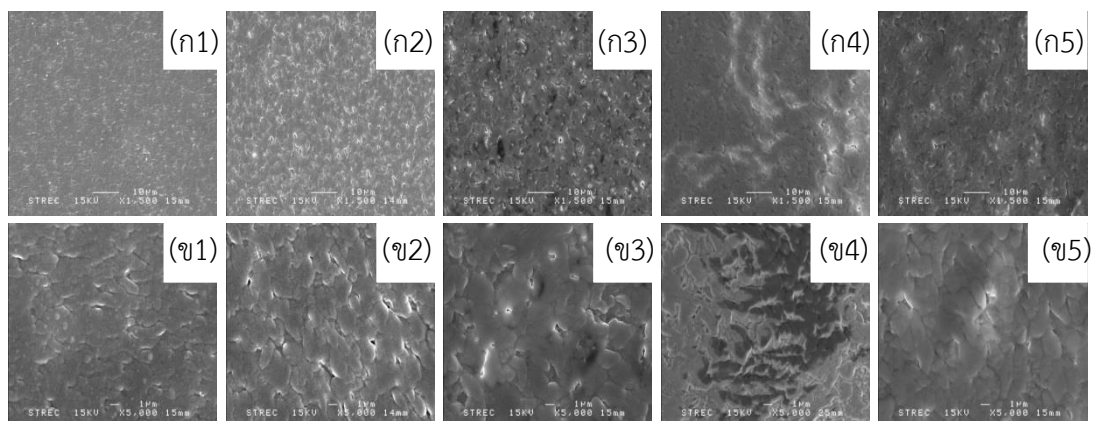
ตารางที่ 4.29 มอดุลัส ความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเป่า PP_a PP_b POS และ PS ที่ปริมาณมิเนอร์ลออยล์และแคลเซียมซูเบอเรตแตกต่างกัน ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ใช้ความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

| ฟิล์มเป่า | มอดุลัส (MPa) | ความทนแรงดึง (MPa) | ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%) |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|
| PP _a | 1,867 ± 182.6 | 38.1 ± 1.7 | 489 ± 14.4 |
| PP _b | 1,795 ± 121.4 | 36.1 ± 1.0 | 260 ± 57.2 |
| PO ₁₀ S _{0.5} | 820 ± 39.2 | 32.9 ± 1.7 | 611 ± 52.2 |
| PO ₂₀ S _{0.5} | 552 ± 47.6 | 20.0 ± 1.1 | 472 ± 16.6 |
| PO ₃₀ S _{0.5} | 391 ± 14.6 | 15.4 ± 0.5 | 356 ± 24.7 |
| PO ₄₀ S _{0.5} | 171 ± 25.5 | 8.3 ± 0.5 | 224 ± 20.9 |
| PO ₃₀ S _{1.0} | 391 ± 12.8 | 16.6 ± 0.4 | 448 ± 22.5 |

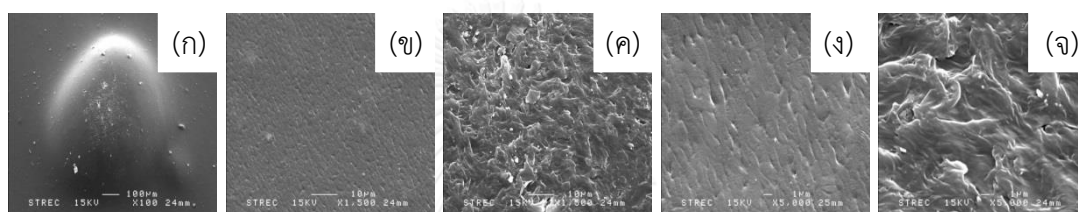
4.4.3.6 สัณฐานวิทยา

ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่า POS และ PS ที่ปริมาณการเติมต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.61 ถึง 4.62 โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่าลักษณะผิวฟิล์มเป่า POS ที่ปริมาณมิเนอร์ลออยล์ต่างๆ จะมีลักษณะเหมือนกับฟิล์มเป่า PO นั่นคือแคลเซียมซูเบอเรตไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มเป่าอย่างเห็นได้ชัด แต่บริเวณผิวหน้าฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเฟสที่มีรอยต่อระหว่างกันคาดว่าน่าจะเป็นเพราะมิเนอร์ลออยล์ในลักษณะเช่นเดียวกันกับฟิล์มเป่า PO ดังรูปที่ 4.61

สำหรับฟิล์มเป่า PS_{0.5} (รูปที่ 4.62) จะทำการศึกษาทั้งบริเวณโปร่งใส และบริเวณเม็ดทึบแสง จากรูปที่ 4.62 (ก) เป็นพื้นผิวบริเวณเม็ดทึบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า จะเห็นว่าเม็ดได้มีการนูนขึ้นมาจากผิวฟิล์ม ซึ่งจะไม่เกิดการทะลุออก พิจารณาที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าบริเวณโปร่งใส (รูปที่ 4.62 (ข)) จะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบแตกต่างจากบริเวณเม็ดทึบแสง (รูปที่ 4.62 (ค)) ซึ่งการเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000 เท่าจะเห็นว่าบริเวณโปร่งใส (รูปที่ 4.62 (ง)) จะคล้ายกับผิวฟิล์ม PP โดยทั่วไป แต่บริเวณเม็ดทึบแสง (รูปที่ 4.62 (จ)) จะมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ มีลักษณะเป็นคลื่น



รูปที่ 4.61 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 (ก) และ 5,000 เท่า (ข) แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป้า PO₁₀S_{0.5} (1) PO₂₀S_{0.5} (2) PO₃₀S_{0.5} (3) PO₄₀S_{0.5} (4) PO₃₀S_{1.0} (5)



รูปที่ 4.62 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 100 (ก) 1,500 (ข-ค) และ 5,000 เท่า (ง-จ) แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มเป้า PS_{0.5}

เนื่องจากการทดสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มเป้า POS เพื่อยืนยันถึงการเกิดผลึกบิทยาในพอลิเมอร์พืลนพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ไม่มีผลึกบิทยาเกิดขึ้นตามความต้องการ ดังนั้นในส่วนของการดิงยัดฟิล์มเพื่อให้เกิดรูพรุนโดยใช้กลไกของการเปลี่ยนเฟสบิทยาเป็นเฟสแอลฟาจึงไม่มีความจำเป็น จึงไม่ได้ทำการทดสอบในส่วนของสมบัติฟิล์มเป้า POS หลังการดิงยัด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) फिल्मเป่าที่มีมิเนอรัลลอยล์ซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดของเหลวเป็นองค์ประกอบอย่างฟิล์ม PO และ POC แสดงศักยภาพในการพัฒนาเป็นฟิล์มเป่าชนิดรูพรุนขนาดเล็กที่สามารถดูดซับน้ำมันได้ดีกว่าฟิล์มเป่าซึ่งมีเพียงสารตัวเติมชนิดของแข็งอย่างฟิล์ม PC ทั้งนี้ระดับความเป็นรูพรุนและสมบัติความทนต่อการดึงของฟิล์มจะขึ้นกับปริมาณสารตัวเติม ภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์มและระดับการดึงยืดฟิล์มเป่าที่เตรียมได้

2) फिल्मเป่า PO ที่มีปริมาณออยล์ระหว่างร้อยละ 30 - 40 สามารถดูดซับน้ำมันได้มากกว่า (ความเป็นรูพรุน $\geq 15\%$) फिल्मเป่า PO ที่มีปริมาณออยล์ต่ำกว่า การขึ้นรูปด้วยความเร็วลมหล่อเย็นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มเป่ามีความสามารถดูดซับน้ำมันได้ดีขึ้นเนื่องจากการเกิดรอยแยกระหว่างเฟสที่มากกว่า นอกจากนี้ระดับการดึงยืดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มเป่า PO เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นและลึกลงไปตามความหนาของฟิล์ม ซึ่งจะเห็นชัดเจนที่ฟิล์มเป่า PO₃₀ และ PO₄₀ สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า PO ทั้งก่อนและหลังการดึงยืดขึ้นกับปริมาณมิเนอรัลลอยล์ โดยค่ามอดุลัส ความทนแรงดึงและระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมออยล์ในปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้ความเร็วลมหล่อเย็นที่สูงขึ้นก็ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า PO ต่อยลงด้วย फिल्म PO ที่ผ่านการดึงยืดมีแนวโน้มให้ค่ามอดุลัสและค่าระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาด ลดลง แต่ส่งผลให้มีค่าความทนแรงดึงสูงกว่าก่อนการดึงยืด

3) फिल्मเป่า PC ที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบสกรูเดียวกับฟิล์มเป่า PO (20 rpm) แต่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูปที่สูงกว่า 10°C มีสมบัติทางกายภาพ (ความยับและความขรุขระของฟิล์ม) ที่ดีกว่าการใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm นอกจากนั้นสมบัติความยืดสูงสุด ณ จุดขาดยังมีค่าที่มากกว่าถึง 4.2 เท่า เนื่องจากการผสมที่ความเร็วรอบสกรูต่ำ (10 rpm) ไม่สามารถทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวได้ดีในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ สมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า PC (มอดุลัส ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด) ที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10-30 จะมีค่าที่สูงสุดเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 ในขณะที่การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไปจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และยังมีค่าความดันที่ค่อนข้างสูงเมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มเป่าด้วย ปริมาณรูพรุนของฟิล์มเป่า PC หลังการดึงยืด 100% จะมีค่าที่น้อยเทียบเคียงได้กับการใช้มิเนอรัลลอยล์ในปริมาณร้อยละ 20 เท่านั้น

4) फिल्मเป่า POC ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตและมิเนอร์ล้อยลในปริมาณร้อยละ 20 และ 30 ตามลำดับ มีสมบัติความเป็นรูพรุนเทียบได้กับฟิล์มเป่า PO₄₀ แต่มีสมบัติโมดูลัสที่สูงกว่า

5) จากการทดลองใช้แคลเซียมซูเบอเรตร้อยละ 0.5 และ 1.0 เพื่อเป็นสารก่อผลึกบีทาให้แก่ฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีน POS และ PS พบว่าไม่ปรากฏระนาบผลึกของบีทา อาจเป็นไปได้ว่าภาวะในการขึ้นรูปฟิล์มเป่ายังไม่เหมาะสม หรือแคลเซียมซูเบอเรตที่เตรียมได้ยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกบีทา ดังนั้นจึงไม่ได้ดำเนินการศึกษาความเป็นรูพรุนของฟิล์ม POS และ PS

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) फिल्मเป่า PO มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันได้ดี ที่ปริมาณมิเนอร์ล้อยลร้อยละ 30 ขึ้นไป แต่พบว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลง จากการทดลองของ PO₃₀C₂₀ จะแสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบที่เพิ่มเข้ามาสามารถเพิ่มปริมาณรูพรุน โดยยังคงสมบัติเชิงกลได้ในระดับหนึ่ง ดังนั้นจึงควรขยายขอบเขตการศึกษาในส่วนของปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตว่ามีผลต่อสมบัติของฟิล์ม POC อย่างไร

2) การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในฟิล์มเป่า PC ที่ปริมาณการเติมมากกว่าร้อยละ 30 ทำให้สมบัติเชิงกลแย่งลง ในขณะที่การเพิ่มความเร็วยรอบสกรูจะเพิ่มสมบัติเชิงกลในส่วนนี้ ดังนั้นจึงควรศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มสมบัติเชิงกลและความเป็นรูพรุนของฟิล์ม PC โดยหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มเป่า PC ที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูง

3) การศึกษาแคลเซียมซูเบอเรตในการเป็นสารก่อผลึกบีทาด้วยการใช้เทคนิค blown film extrusion ยังไม่ประสบผลสำเร็จ ซึ่งอาจเป็นเพราะภาวะการขึ้นรูป ซึ่งในการศึกษาได้มีการปรับเปลี่ยนความเร็วลมหล่อเย็นและ/หรือความเร็วลูกกลิ้งหนีบแล้วแต่ยังไม่พบผลึกบีทา ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยวิธี compression กลับพบผลึกดังกล่าว ดังนั้นถ้าหากปรับเปลี่ยนภาวะการขึ้นรูปด้วยวิธี blown film extrusion ให้ความเร็วลูกกลิ้งหนีบน้อยที่สุดอาจทำให้พบผลึกบีทาได้ รวมทั้งประสิทธิภาพของแคลเซียมซูเบอเรตยังไม่ดีพอ ซึ่งอาจปรับเปลี่ยนโดยเลือกใช้สารก่อผลึกบีทาประเภทแคลเซียมฟิเมเลต หรือ แคลเซียมฟทาเลต เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. (2555). เอกสารประกอบการสอนวิชาการรีไซเคิลพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. ขวลิต ชาญฉลาด. ฟิล์มนาโนคอมโพสิตพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยการเป่าอัดรีดสำหรับการประยุกต์ในบรรจุภัณฑ์อาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
3. เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร. (2555). เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิล์ม (Part1). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. Mizutani, Y., Nakamura, S., Kaneko, S., and Okamura, K. Microporous Polypropylene Sheets. Industrial and Engineering Chemistry Research 32 (1993): 221-227.
5. Shannon, K., Robert, S., James, S., and Mylee, L., inventor. 3M Innovative Properties Company, assignee. Microporous Materials and Methods of Making the Same. EP 1 385 901 B1. 06 June 2007
6. Gradys, A., et al. Crystallization of polypropylene at various cooling rates. Materials Science and Engineering: A 413-414 (2005): 442-446.
7. Bai, H., Wang, Y., Liu, L., Zhang, J., and Han, L. Nonisothermal Crystallization Behaviors of Polypropylene with α/β Nucleating Agents. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics (2008): 1853-1867.
8. Dong, M., Guo, Z., Yu, J., and Su, Z. Crystallization Behavior and Morphological Development of Isotactic Polypropylene with an Aryl Amide Derivative as β -Form Nucleating Agent. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics 46 (2008): 1725-1733.
9. Dong, M., Jia, M.-y., Guo, Z.-x., and Yu, J. Effect of final heating temperature on crystallization of isotactic polypropylene nucleated with an aryl amide derivative as β -form nucleating agent. Chinese Journal of Polymer Science 29 (2011): 308-317.

10. Chu, F., Yamaoka, T., Ide, H., and Kimura, Y. Microvoid formation process during the plastic deformation of β -form polypropylene. Polymer 35 (1994): 3442-3448.
11. Chu, F., Yamaoka, T., and Kimura, Y. Crystal transformation and micropore formation during uniaxial drawing of β -form polypropylene film. Polymer 36 (1995): 2523-2530.
12. Chu, F., and Kimura, Y. Structure and gas permeability of microporous films prepared by biaxial drawing of β -form polypropylene. Polymer 37 (1996): 573-579.
13. Li, X., Hu, K., Ji, M., Huang, Y., and Zhou, G. Calcium Dicarboxylates Nucleation of β -Polypropylene. Journal of Applied Polymer Science 86 (2002): 633-638.
14. Li, J., and Cheung, W. Pimelic Acid-Based Nucleating Agents for Hexagonal Crystalline Polypropylene. Journal of vinyl & additive technology 3 (1997): 151-156.
15. Trongtorsak, K., Supaphol, P., and Tantayanon, S. Effect of calcium stearate and pimelic acid addition on mechanical properties of heterophasic isotactic polypropylene/ethylene-propylene rubber blend. Polymer testing 23 (2004): 533-539.
16. Varga, J., Mudra, I., and Ehrenstein, G. W. Highly active thermally stable β -nucleating agents for isotactic polypropylene. Journal of Applied Polymer Science 74 (1999): 2357-2368.
17. นาดยา เอื้อพิทักษ์สกุล. การปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
18. อำนวย ลาภเกษมสุข. สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ผสมพอลิคาร์บอเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
19. นายจตุพล สวัสดิ์พานิช และ นายสุชานนท์ แก้วจินดา. (2555). ฟิล์มพีพีจากเครื่อง Chill Roll Cast. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

20. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). พลาสติกคืออะไร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/index.html [15 กันยายน 2557]
21. คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กลไกการสังเคราะห์พอลิเมอร์เบื้องต้น. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter%201.pdf> [14 กันยายน 2557]
22. คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกแบบโคออดิเนชัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter%2010.pdf> [14 กันยายน 2557]
23. Department of Chemistry The University of Maine. Crystal lattices. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://chemistry.umeche.maine.edu/~amar/spring2012/crystal.html> [29 กันยายน 2557]
24. PATHANASUK CAPITAL CO., LTD. ผลิตภัณฑ์จากพลาสติก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.plaztek.org/01x.html> [4 ตุลาคม 2557]
25. โรงเรียนโสภณศิริราษฎร์. ของเหลวและสารละลาย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.sopon.ac.th/sopon/lms/chemistry_2/liquid_solution/ls_exercises.htm [16 กันยายน 2557]
26. Ningbo Shanquan Building Material. Breathable membrane. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.shanquan-membrane.com/breathable_membrane/breathable_membrane.asp [22 สิงหาคม 2557]
27. มัณฑนา โอภาประกาศิต. (2555). เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิล์ม (Part 3). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
28. ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์. (2552). เอกสารประกอบการสอนวิชารีออลยีและกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
29. Higher Institute For Plastics Fabrication. Blown Film Extrusion. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.hipf.edu.sa/HIPF_English/Courses-BFE.html [23 สิงหาคม 2557]

30. Plasticbiz360. Aerodynamics of Blown Film Bubble Cooling. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.plasticbiz360.com/index.aspx?Page=article§name=Magazines%20-%20Technologies§id=3&contentid=2010100420101004134843736bf8f7652> [5 สิงหาคม 2557]
31. Polymer Processing.com. Film blowing. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://polymerprocessing.com/operations/fblow/> [5 กันยายน 2557]
32. อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
33. Zhang, J.-F., and Sun, X. Mechanical properties and crystallization behavior of poly(lactic acid) blended with dendritic hyperbranched polymer. *Polymer International* 53 (2004): 716-722.
34. Wal, A. v. d., Mulder, J. J., and Gaymans, R. J. Fracture of polypropylene: 2. The effect of crystallinity. *Polymer* 39 (1998): 5477-5481.
35. EDDY, N. O., and EKOP, A. S. Effect of Additives on Some Physical Parameters of Palm Oil. *E-Journal of Chemistry* 4 (2007): 350-353.
36. Wang, S., Zhang, J., Chen, S., and Zhu, H. Crystal structure and melting behavior of homo-polypropylene and heterophasic ethylene-propylene copolymer after long time heat treatment. *Journal of Crystal Growth* 355 (2012): 151-158.
37. Supaphol, P., Harnsiri, W., and Junkasem, J. Effects of calcium carbonate and its purity on crystallization and melting behavior, mechanical properties, and processability of syndiotactic polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science* 92 (2004): 201-212.
38. Roy, P. K., Surekha, P., Rajagopal, C., and Choudhary, V. Thermal degradation studies of LDPE containing cobalt stearate as pro-oxidant. *eXPRESS Polymer Letters* 1 (2007): 208-216.
39. Ingraham, T. R., and Marier, P. Kinetic studies on the thermal decomposition of calcium carbonate. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 41 (1963): 170-173.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตชนิดต่างๆ

ตารางที่ ก.1 ตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า PP_a และ PO ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม | | ตำแหน่ง 2θ | |
|------------------|----------------|--------|-------------------|--------|
| | หล่อเย็น (rpm) | | | |
| PP _a | 400 | 14.305 | 17.033 | 18.784 |
| | 700 | 14.335 | 17.068 | 18.798 |
| | 1,000 | 14.424 | 17.179 | 18.887 |
| PO ₁₀ | 400 | 14.388 | 17.215 | 18.909 |
| | 700 | 14.528 | 17.386 | 19.100 |
| | 1,000 | 14.272 | 17.065 | 18.707 |
| PO ₂₀ | 400 | 14.287 | 17.050 | 18.754 |
| | 700 | 14.166 | 16.952 | 18.585 |
| | 1,000 | 14.629 | 17.444 | 19.093 |
| PO ₃₀ | 400 | 14.272 | 16.973 | 18.638 |
| | 700 | 14.330 | 17.111 | 18.770 |
| | 1,000 | 14.467 | 17.307 | 18.949 |
| PO ₄₀ | 400 | 14.283 | 17.127 | 18.728 |
| | 700 | 14.291 | 17.172 | 18.757 |
| | 1,000 | 14.335 | 17.216 | 18.803 |

ตารางที่ ก.2 ตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ใช้ความเร็วรอบสกรู 10 rpm ที่ความเร็วลม
หล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม | | | | |
|------------------|-------------------|------------|--------|--------|--------|
| | หล่อเย็น (rpm) | ตำแหน่ง 2θ | | | |
| PP _b | 400 | 14.179 | 16.901 | 18.643 | - |
| | 700 | 14.207 | 16.915 | 18.655 | - |
| | 1,000 | 14.216 | 16.956 | 18.695 | - |
| PC ₁₀ | 400 | 14.291 | 17.074 | 18.718 | 29.595 |
| | 700 | 14.147 | 16.951 | 18.638 | 29.480 |
| | 1,000 | 14.591 | 17.370 | 19.090 | 29.926 |
| PC ₂₀ | 400 | 14.233 | 17.008 | 18.692 | 29.526 |
| | 700 | 14.368 | 17.095 | 18.825 | 29.664 |
| | 1,000 | 14.230 | 17.000 | 18.673 | 29.523 |
| PC ₃₀ | 400 | 14.545 | 17.345 | 19.034 | 29.863 |
| | 700 | 14.361 | 17.145 | 18.798 | 29.653 |
| | 1,000 | 14.419 | 17.088 | 18.819 | 29.658 |

ตารางที่ ก.3 ตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า PP_b และ PC ใช้ความเร็วรอบสกรู 20 rpm ที่ความเร็วลม
หล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม | | | | |
|------------------|-------------------|------------|--------|--------|--------|
| | หล่อเย็น (rpm) | ตำแหน่ง 2θ | | | |
| PP _b | 400 | 14.229 | 16.943 | 18.697 | - |
| | 700 | 14.173 | 16.894 | 17.460 | - |
| | 1,000 | 14.318 | 17.068 | 18.758 | - |
| PC ₁₀ | 400 | 14.180 | 16.918 | 18.750 | 29.437 |
| | 700 | 14.180 | 16.989 | 18.631 | 29.879 |
| | 1,000 | 14.072 | 16.910 | 18.625 | 29.508 |
| PC ₂₀ | 400 | 14.095 | 16.854 | 18.528 | 29.490 |
| | 700 | 14.504 | 17.068 | 18.787 | 29.538 |
| | 1,000 | 14.199 | 17.015 | 18.678 | 29.880 |
| PC ₃₀ | 400 | 12.956 | 17.137 | 17.292 | 29.624 |
| | 700 | 14.496 | 17.298 | 18.995 | 29.420 |
| | 1,000 | 14.593 | 17.366 | 19.061 | 29.810 |
| | | | | | 29.561 |
| | | | | | 29.900 |

ตารางที่ ก.4 ตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า POC ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม | | ตำแหน่ง 2θ | | | |
|----------------------------------|----------------|--------|------------|--------|--------|--|
| | หล่อเย็น (rpm) | | | | | |
| PO ₃₀ C ₂₀ | 400 | 14.116 | 17.007 | 18.617 | | |
| | 700 | 14.041 | 16.906 | 18.504 | | |
| | 1,000 | | 14.208 | | | |
| | | | 14.944 | 17.064 | 18.612 | |

ตารางที่ ก.5 ตำแหน่ง 2θ ของแผ่นซีท PP PO POS

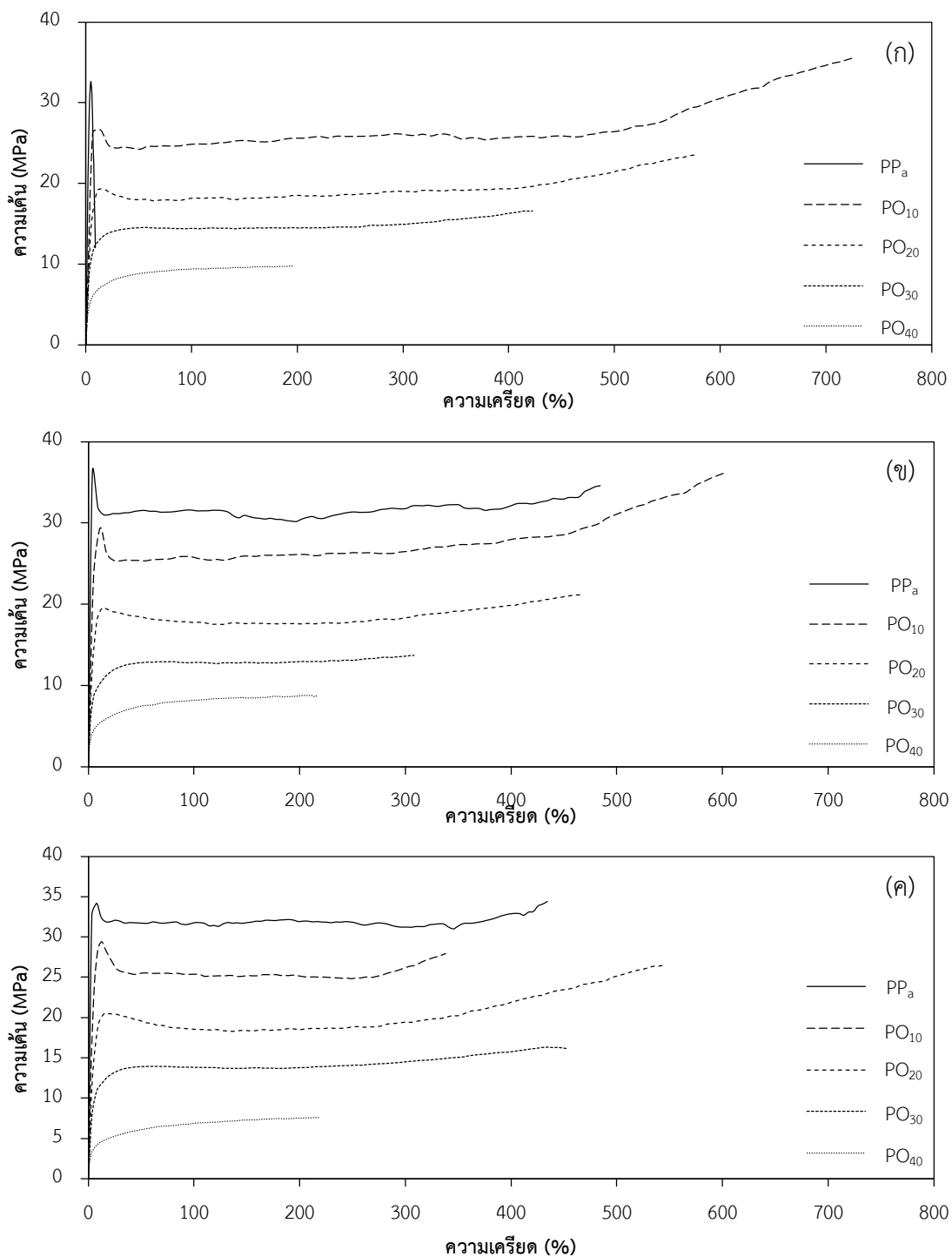
| แผ่นซีท | ตำแหน่ง 2θ | | | | |
|--|------------|--------|--------|--------|--------|
| PP _c | - | 14.301 | - | 17.025 | 18.784 |
| PO ₃₀ (โปร่งแสง) | - | 14.324 | - | 17.100 | 18.813 |
| PO ₃₀ (ทึบแสง) | - | 14.073 | - | 16.889 | 18.536 |
| PO ₃₀ S _{0.5} (โปร่งแสง) | - | 14.356 | - | 17.106 | 18.825 |
| PO ₃₀ S _{0.5} (ทึบแสง) | 7.004 | 14.165 | 16.146 | 16.987 | 18.622 |

ตารางที่ ก.6 ตำแหน่ง 2θ ของฟิล์มเป่า POS PS ที่ความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน

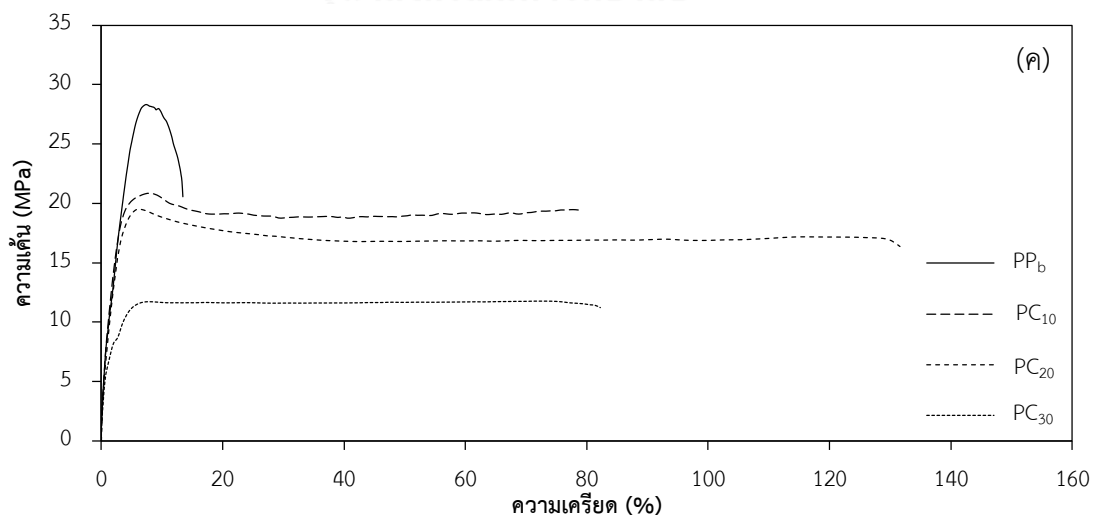
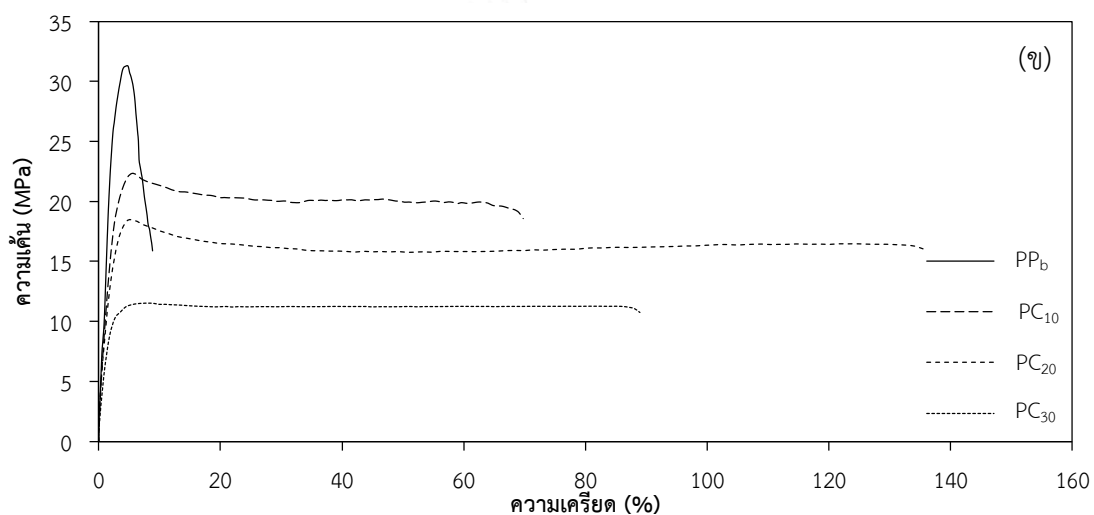
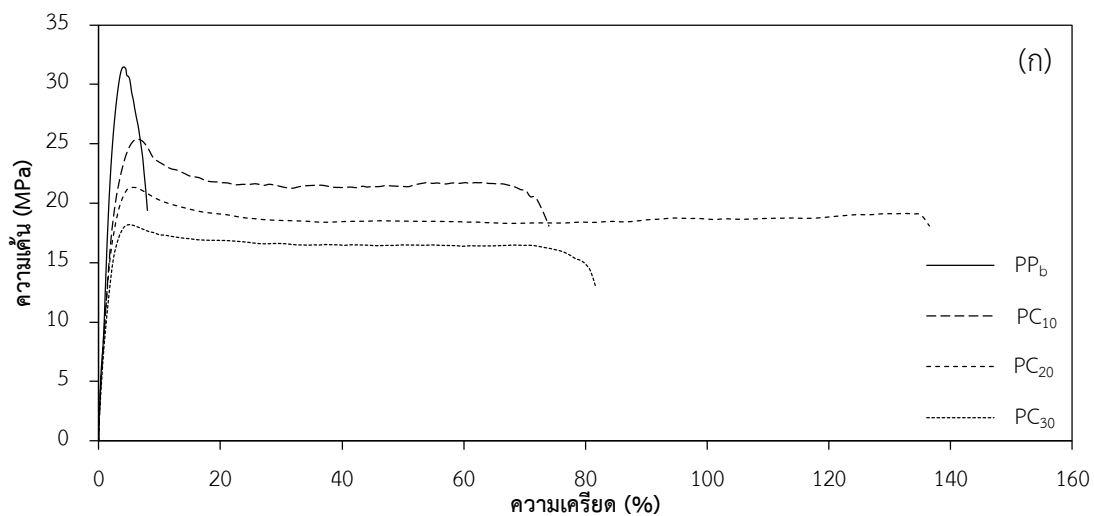
| ฟิล์มเป่า | ความเร็วลม | | ตำแหน่ง 2θ | | |
|-----------------------------------|----------------|-------|------------|--------|--------|
| | หล่อเย็น (rpm) | | | | |
| PO ₁₀ S _{0.5} | 700 | 7.361 | 14.585 | 17.395 | 19.190 |
| PO ₂₀ S _{0.5} | 700 | 7.367 | 14.510 | 17.331 | 18.974 |
| PO ₃₀ S _{0.5} | 700 | 7.330 | 14.413 | 17.256 | 18.885 |
| PO ₄₀ S _{0.5} | 700 | 7.448 | 14.531 | 17.436 | 19.021 |
| PO ₃₀ S _{1.0} | 700 | 6.960 | 14.099 | 16.948 | 18.597 |
| PS | 700 | 7.104 | 14.267 | 17.072 | 18.846 |

ภาคผนวก ข

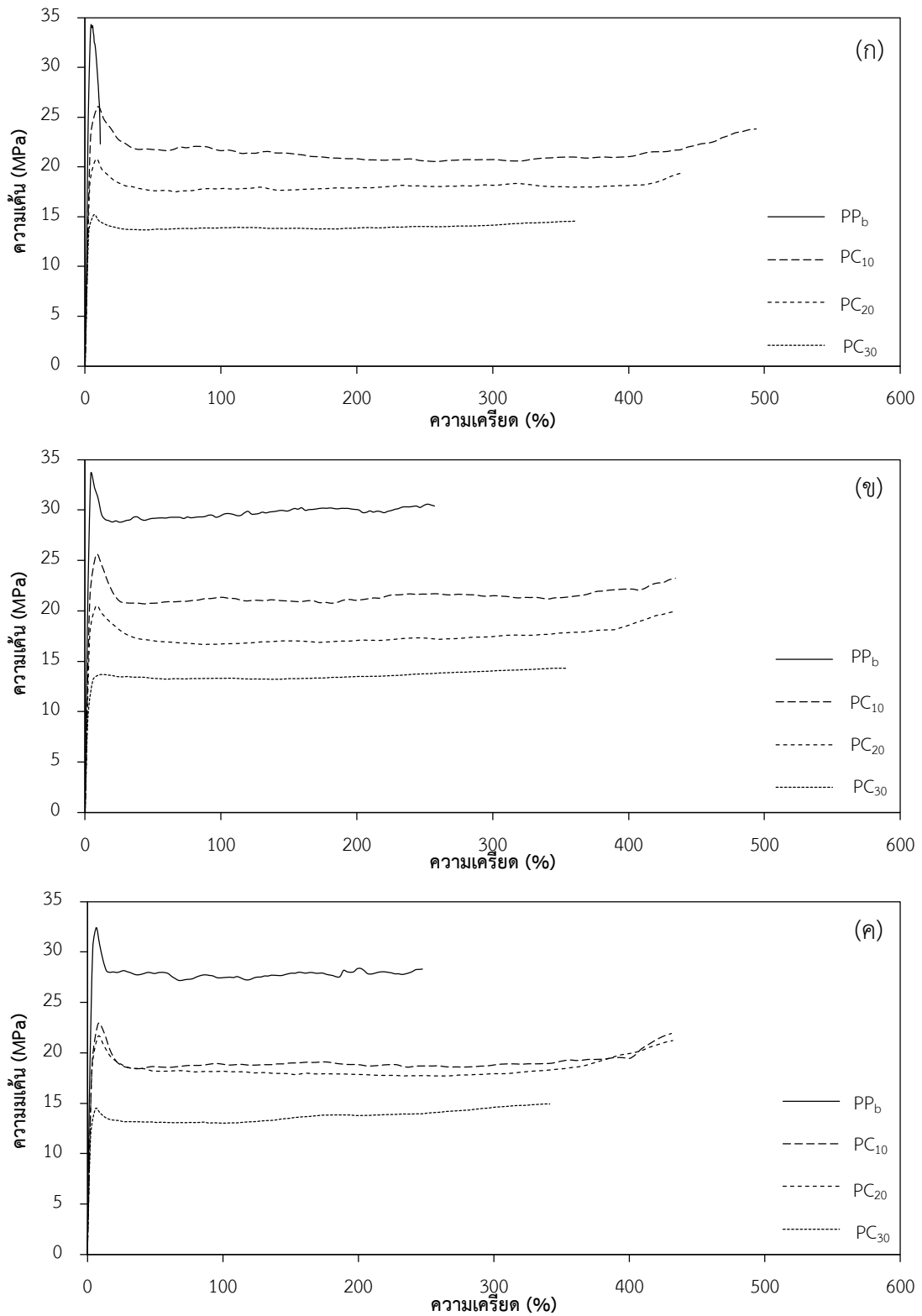
กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่าพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตชนิดต่างๆ



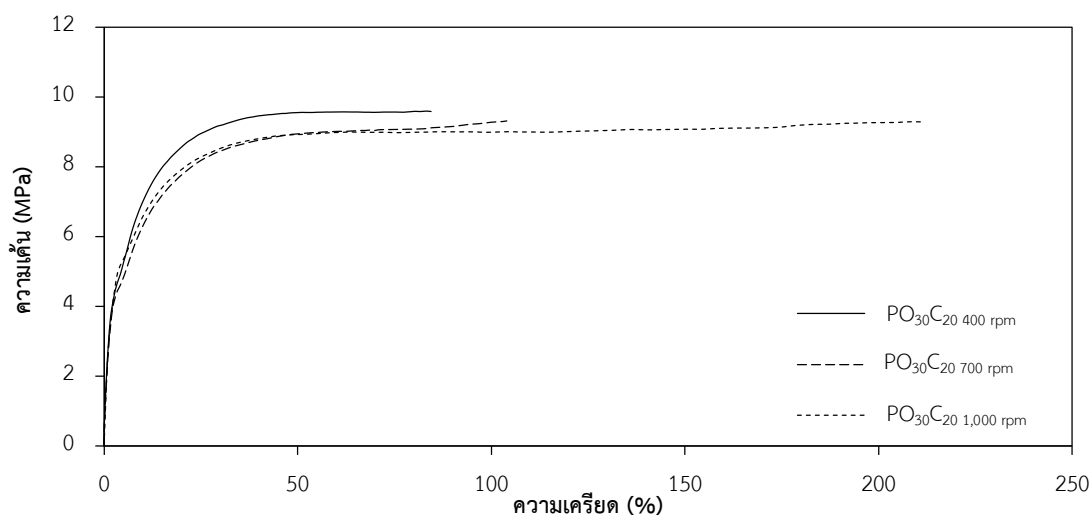
รูปที่ ข.1 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า PO ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค)



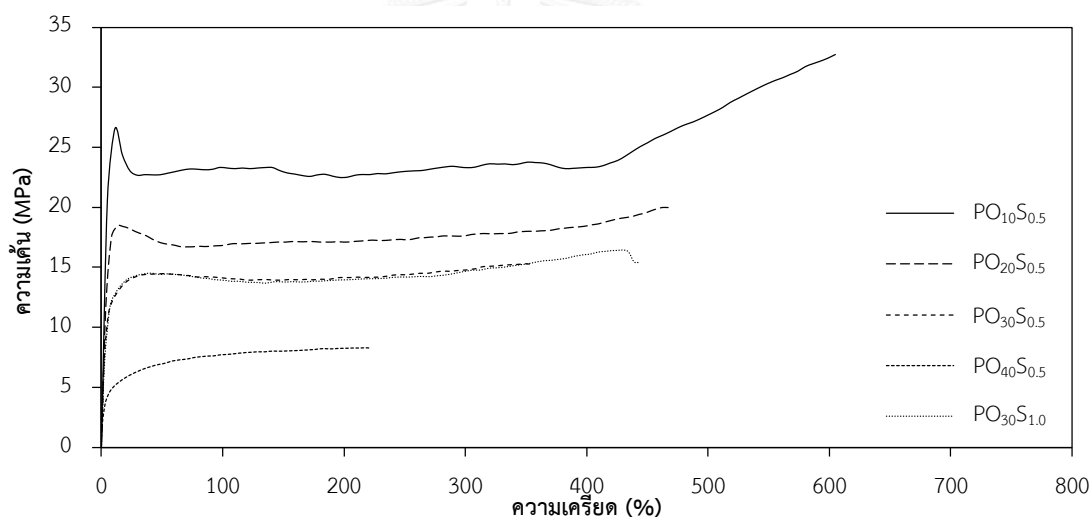
รูปที่ ข.2 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า PC ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วรอบสกรู 10 rpm และความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค)



รูปที่ ข.3 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า PC ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วรอบสกรู 20 rpm และความเร็วลมหล่อเย็น 400 (ก) 700 (ข) และ 1,000 rpm (ค)



รูปที่ ข.4 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า POC ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็นแตกต่างกัน



รูปที่ ข.5 กราฟความเค้น-ความเครียดของฟิล์มเป่า POS ที่ปริมาณมินเนอรัลลอยล์และแคลเซียมซู-เบอเรตแตกต่างกัน ซึ่งเตรียมด้วยความเร็วลมหล่อเย็น 700 rpm

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกมลวรรณ สุนทรศาสตร์ เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 10 เมษายน พ.ศ. 2532 สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษา ในภาคต้นของปีการศึกษา 2557 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปีครึ่ง

